



# DIPLOMARBEIT Master Thesis

## Optimierung der Frühfestigkeit von Ultra High Performance Concrete

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von  
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Baurat. Elemer Bölcskey

(Betreuer/-in) [Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer]

[E206]

[Institut für Hochbau und Technologie]

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

(Verfasser/-in)

Mahtab MIREMADI

Matrikelnummer: 0841451

Sandwirtgasse 4/16  
1060 Wien

Wien, Juni 2016

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Hochbau und Technologie. Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien.

Auf diesem Wege möchte ich mich sehr herzlich beim Herrn *Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Baurat. Elemer Bölcskey* für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an diesem Institut durchzuführen.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn *Dipl.Ing. Dr. Johannes Kirnbauer*, der durch seine vorbildliche Betreuung sowie seine zahlreichen Anregungen wesentlich zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen hat.

Mein herzlichen Dank gilt ebenso Herrn *Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinrich Bruckner* für seine großzügige Unterstützung während dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen engsten Freunden, die mir immer zur Seite gestanden sind. Besonders hervorheben möchte ich Herrn *Dipl.-Ing. Farzam Movahedrad* und Frau *Dipl.-Ing. Katherina Keim*, mit denen ich den Großteil meines Studiums bestritten und in oft nächtelangen Sitzungen so manche Probleme diskutiert und gelöst habe.

Mein herzlichen dank gilt ebenso Frau *Dr.med.univ. Christine Keim* und Herrn *Arash Rahimiardkapan*, die mich während der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit unterstützt haben. Zusätzlich danke ich meinem Studienkollegen *Farbod Farhoodi* für die reibungslose Zusammenarbeit.

Ebenfalls möchte ich mich hier bei meinem Arbeitgeber bedanken. Herr *Bahman Asadi* hat mich während der Studienzeit im Zuge meiner Werkstudententätigkeit immer motiviert.

Der wichtigste Mensch in meinem Leben, mein Mann, hat mir vor jeder schweren Prüfung seelische Unterstützung geschenkt, ohne seine tatkräftige Unterstützung und ermutigenden Worte wäre ich bestimmt niemals fertig geworden.

Weiter möchte ich mich bei meinen Schwiegereltern von ganzem Herzen bedanken. Sie haben mich immer moralisch unterstützt. Ohne deren Unterstützung das Studium und dieser Arbeit nicht möglich gewesen wären

Diese Diplomarbeit möchte ich meinen Eltern und meiner Schwester widmen, die mir das Studium ermöglichten, welche nie auch nur eine Sekunde zögern, wenn ich etwas brauche und immer für mich Zeit und ein offenes Ohr finden.

Abschließend möchte ich mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich während der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit motiviert und unterstützt haben.

Wien, Juni 2016

Mahtab Miremadi

## Kurzfassung

Der Begriff Ultra High Performance Concrete (UHPC) bezeichnet eine relativ neue Klasse von fortgeschrittenen zementgebundenen Materialien, deren mechanische Eigenschaften und Dauerhaftigkeit herkömmlichen Beton weit übertreffen. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit ( $>150 \text{ N/mm}^2$ ) ist es möglich, sehr schlanke und dünnwandige Konstruktionen auszuführen. Das Anwendungsgebiet beschränkt sich dabei aber nicht nur auf das klassische Bauwesen, sondern erlaubt auch Bauteile für den Maschinenbau oder auf den Objekt- und Designbereich. Die dichte Mikrostruktur des Betons führt zu einer besonders hohen Widerstandsfähigkeit gegen physikalische und chemische Angriffe und macht UHPC zu einem idealen Werkstoff für den Einsatz unter aggressiven Umwelteinflüssen.

Um diese herausragenden Eigenschaften zu erreichen, ist eine sorgfältige Auswahl der Ausgangsstoffe notwendig. Die Mischungszusammensetzung unterscheidet sich wesentlich von jener eines Normalbetons. Auf Grund des hohen Anteils an Feinststoffen kommt auch dem Mischprozess eine große Bedeutung zu. Speziell mit dem Vakuummischprozess können sowohl die Frischbeton- als auch die Festbetoneigenschaften gezielt beeinflusst werden.

Aus betontechnologischer Sicht ist der besonders niedrige Wasserzementwert (im Allgemeinen weit unter 0,3) für eine dichte und damit feste Betonmatrix von fundamentaler Bedeutung.

Um UHPC eine gut verarbeitbare Konsistenz (meist fließfähig) zu verleihen, ist der Einsatz von Hochleistungsfließmitteln notwendig. Derzeit besitzen Fließmittel auf Basis von Polycarboxylat-Ethern (PCE) die beste verflüssigende Wirkung. Es ist jedoch bekannt, dass diese Fließmittel in hohen Dosierungen, wie sie für UHPC notwendig sind, die Erhärtung des Betons stark verzögern. Um dennoch eine nennenswerte Druckfestigkeit nach wenigen Stunden bis zu einem Tag zu erreichen, müssen die Komponenten für die Mischungszusammensetzung so gewählt werden, dass die verzögernde Wirkung des Fließmittels kompensiert wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in umfangreichen Versuchsreihen wesentliche Parameter des UHPCs variiert und die Auswirkungen auf die Frühfestigkeitsentwicklung durch Biegezug- und Druckversuche charakterisiert.

## Abstract

The term UHPC refers to a relatively new class of advanced cementitious composite materials whose mechanical and durability properties surpass those of conventional concrete.

Because of the high compressive strength ( $> 150 \text{ N/mm}^2$ ), it is possible to run very slender and thin-walled constructions. The field of application is not only limited to the classical constructions, but also can be applied for the mechanical machines, objects, and in the design area.

The dense microstructure of concrete leads to a particularly high resistance to physical and chemical attacks, and makes UHPC an ideal material to use in aggressive environments. In order to achieve these outstanding features, a careful selection of raw materials is necessary. The mixture composition is essentially different from that of a normal concrete. Due to the high proportion of fine-grained particles, the mixing process is also of great importance. Especially along with the vacuum mixing process, both the fresh concrete and the hardened concrete properties can be influenced.

From the concrete technological point of view, the extremely low water-cement ratio (generally well below 0.3) plays a fundamental role in dense concrete matrix.

In order to allocate a good workable consistency (mostly flowing) to UHPC, the use of high-performance superplasticizers is necessary. Currently, the superplasticizers based on polycarboxylate ethers (PCE), possess the best plasticizing effect. However, it is known that these superplasticizers in high doses, as they are necessary for UHPC, greatly retard the hardening of the concrete. However, to achieve a significant compressive strength after a few hours up to a day, the components must be chosen in such a way that the delaying effect of the superplasticizer is compensated.

In this study, the essential parameters of UHPC were varied in an extensive series, and the effect on the early strength development were characterized by flexural and compressive tests.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Grundlagen – Ultrahochfester Beton.....	3
2.1	Entwicklung von UHPC .....	3
2.2	Ultrahochfester Beton - Typen .....	6
2.3	Anwendungsgebiete .....	7
2.3.1	Ultrahochfester Beton im Brückenbau .....	8
2.3.2	Ultrahochfester Beton am Beispiel von Hochhäusern.....	11
2.3.3	Beispiele sonstiger Anwendungen.....	15
3	Ausgangsstoffe zur Herstellung von UHPC.....	19
3.1	Grundprinzip zur Herstellung ultrahochfester Betone .....	19
3.2	Mischungsbestandteile .....	21
3.2.1	Zement .....	21
3.2.2	Gesteinskörnungen .....	26
3.2.2.1	Quarzsand .....	28
3.2.2.2	Quarzmehl .....	29
3.2.3	Zusatzstoffe .....	29
3.2.3.1	Silicastaub.....	32
3.2.3.2	Flugasche.....	35
3.2.4	Zusatzmittel .....	36
3.2.4.1	Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) .....	38
3.2.4.2	Beschleuniger (BE) .....	41
3.2.4.3	Verzögerer (VZ) .....	41
3.2.5	Faser.....	42
3.2.6	Anmachwasser.....	43
3.2.6.1	Allgemeines.....	43

3.2.6.2	W/Z - Wert und W/B- Wert .....	44
3.3	Wahl der Ausgangsstoffe .....	45
3.3.1	Verwendete Zementsorten.....	45
3.3.1.1	Portlandzement – C <sub>3</sub> A frei .....	45
3.3.1.2	Schnellzement – Supracem .....	46
3.3.1.3	Weißzement – Holcimweiß .....	47
3.3.1.4	Spezialzement für Spritzbeton – Der Blaue SP der Fa. LAFARGE .....	47
3.3.2	Verwendeter Beschleuniger – XSEED 100 der Fa. BASF.....	48
3.3.3	Verwendete Verzögerer – Master Pozzolith R 20.....	49
3.3.4	Verwendete Silicastaube.....	50
3.3.4.1	Silicastaub 1 – Microsilica Grade 940 U der Fa. ELKEM.....	50
3.3.4.2	Silicastaub 2 – Microwhite der Fa. ELKEM.....	51
3.3.5	Verwendete Flugasche – Microsit M10.....	51
3.3.6	Verwendete Nanosilica.....	52
3.3.6.1	Nanosilica 1– KS 300 der Fa. Bagrat.....	52
3.3.6.2	Nanosilica 2 – Aerosil 130 .....	53
3.3.7	Verwendete Fließmittel .....	53
3.3.7.1	Fließmittel 1 – Master Glenium ACE 430 der Fa. BASF .....	54
3.3.7.2	Fließmittel 2 – Master Glenium ACE 500 der Fa. BASF .....	55
3.3.7.3	Betonkonsistenzhalter – Glenium SKY 911 der Fa. BASF .....	55
3.3.8	Verwendete Entlüfter – MasterFinish DF 370 der Fa. BASF .....	56
4	Versuchseinrichtungen und Versuchsplanung .....	57
4.1	Herstellung des Frischbetons.....	57
4.1.1	Mischen .....	57
4.1.2	Mischtechnik .....	57
4.1.3	Mischen unter Vakuum .....	60

4.1.4	Mischwerkzeuge .....	62
4.1.5	Mischdauer .....	63
4.1.6	Mischleistung.....	64
4.1.7	Mischreihenfolge .....	65
4.1.8	Probekörperherstellung und Lagerung .....	66
4.2	Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung .....	68
4.2.1	Abbindephasen von Beton.....	68
4.2.2	Hydratationswärme.....	71
4.2.3	Hydratationswärmeentwicklung.....	71
4.2.4	Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung .....	73
4.3	Prüfung der mechanischen Eigenschaften.....	74
4.3.1	Ermittlung der Biegezugfestigkeit.....	74
4.3.2	Druckfestigkeit .....	77
5	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	81
5.1	Versuchsaufbau und Versuchsplanung.....	81
5.2	Mischungsentwurf .....	82
5.3	Prüfzeitpunkt .....	84
5.4	Bezeichnung .....	85
5.5	Durchführung der Versuchsserien.....	85
5.5.1	Einfluss der Zementmenge bei der Verwendung von Schnellzement.....	85
5.5.1.1	Mischungszusammensetzung .....	85
5.5.1.2	Hydratationswärmeentwicklung.....	87
5.5.1.3	Druckfestigkeit .....	88
5.5.1.4	Biegezugfestigkeit .....	92
5.5.1.5	Erkenntnisse aus der 1. Versuchsreihe .....	94
5.5.2	Einfluss der Zementsorte auf die Festigkeitsentwicklung.....	95

5.5.2.1	Mischungszusammensetzung .....	95
5.5.2.2	Hydratationswärmeentwicklung.....	96
5.5.2.3	Druckfestigkeit .....	96
5.5.2.4	Biegezugfestigkeit .....	99
5.5.2.5	Erkenntnisse aus der 2. Versuchsreihe .....	101
5.5.3	Einfluss von Silicastaub und Flugasche auf die Festigkeitsentwicklung ..	101
5.5.3.1	Mischungszusammensetzung .....	101
5.5.3.2	Hydratationswärmeentwicklung.....	103
5.5.3.3	Druckfestigkeit .....	105
5.5.3.4	Biegezugfestigkeit .....	108
5.5.3.5	Erkenntnisse aus der 3. Versuchsreihe .....	110
5.5.4	Einfluss von Nanosilica auf die Festigkeitsentwicklung.....	110
5.5.4.1	Mischungszusammensetzung .....	110
5.5.4.2	Hydratationswärmeentwicklung.....	112
5.5.4.3	Druckfestigkeit .....	113
5.5.4.4	Biegezugfestigkeit .....	116
5.5.4.5	Erkenntnisse aus der 4. Versuchsreihe .....	118
5.5.5	Einfluss des Fließmittels auf die Festigkeitsentwicklung.....	118
5.5.5.1	Mischungszusammensetzung .....	118
5.5.5.2	Hydratationswärmeentwicklung.....	120
5.5.5.3	Druckfestigkeit .....	120
5.5.5.4	Biegezugfestigkeit .....	122
5.5.5.5	Erkenntnisse aus der 5. Versuchsreihe .....	123
5.5.6	Einfluss eines Beschleunigers auf die Festigkeitsentwicklung .....	123
5.5.6.1	Mischungszusammensetzung .....	123
5.5.6.2	Hydratationswärmeentwicklung.....	124

5.5.6.3	Druckfestigkeit .....	125
5.5.6.4	Biegezugfestigkeit .....	128
5.5.6.5	Erkenntnisse aus der 6. Versuchsreihe .....	129
5.5.7	Einfluss eines Verzögerers auf die Festigkeitsentwicklung .....	130
5.5.7.1	Mischungszusammensetzung .....	130
5.5.7.2	Hydratationswärmeentwicklung.....	132
5.5.7.3	Druckfestigkeit .....	132
5.5.7.4	Biegezugfestigkeit .....	135
5.5.7.5	Erkenntnisse aus der 7. Versuchsreihe .....	136
5.5.8	Optimierung der Mischungsrezeptur .....	136
5.5.8.1	Mischentwurf 1 (ME1).....	136
5.5.8.2	Mischentwurf 2 (ME2).....	141
5.5.8.3	Mischentwurf 3 (ME3).....	144
5.5.8.4	Mischentwurf 4 (ME4).....	149
5.5.8.5	Mischentwurf 5 (ME5).....	154
5.5.9	Ausgewählte Mischungen im Vergleich.....	158
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	162
7	Literatur .....	167



## 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten führten die Untersuchungen von Beton zur Entstehung einer neuen „Betonart“ mit außergewöhnlichen Eigenschaften. Dieser „neue“ Beton wurde unter dem Namen Ultrahochleistungs-Beton (Ultra High Performance Concrete - UHPC) eingeführt. Im deutschsprachigen Raum ist ebenfalls der Ausdruck ultrahochfester Beton (UHFB) gebräuchlich. Seine charakteristischen Eigenschaften sind neben einer hohen (Druck-) Festigkeit auch eine außergewöhnliche Dauerhaftigkeit.

UHPC ist ein sehr gefügedichter feinkörniger Beton (Größtkorn < 1mm) mit einer Druckfestigkeit, die je nach Zusammensetzung und Herstellungsverfahren nach 28 Tagen bei Lagerung unter Normalbedingungen (20°C) zwischen 150 N/mm<sup>2</sup> und 250 N/mm<sup>2</sup> erreicht [1]. Diese Druckfestigkeit kann durch die Zugabe von Stahlfasern noch weiter erhöht werden. Ein Prinzip für die Herstellung von UHPC ist die Minimierung der Gefügestörungen (Poren) durch die Auswahl der Ausgangsstoffe sowie durch eine entsprechende Nachbehandlung [2]. Dadurch kann ein möglichst homogenes Gefüge des Materials erreicht werden. Zusätzlich erfolgt eine Reduktion des W/B-Wertes.

In der Regel kommen zur Herstellung von UHPC Quarz-, Kalkstein- und Hüttensandmehl aber auch Flugasche sowie Silicastaub zum Einsatz. Die hohe Festigkeit des UHPCs wird durch die optimierte Kombination aus reaktiven und inerten Feinstoffen (Silicatstaubgehalt, Sandgehalt, Fließmittel- und Fasergehalt) sowie gleichzeitig geringerem Wasser/Bindemittelwert (0,23 bis 0,25) erreicht. Die Porosität des Zementsteins wird damit gesenkt und der Anteil an Feinstkorn im Zementstein erhöht. Aufgrund des niedrigen W/Z-Werts ist für eine verarbeitungsfähige Konsistenz ein Fließmittel notwendig. Die maßgebenden Parameter zur Herstellung eines UHPCs sind also die Korngrößenverteilungen der Feststoffe, der Wasseranspruch, die Fließmittelverträglichkeit der Bindemittel und die Verwendung von geeigneten Zementen.

Im Vergleich zu Normalbeton besitzt UHPC üblicherweise eine längere Mischzeit, damit eine optimale Homogenität erreicht werden kann. Um eine gute Verarbeitbarkeit und eine hohe Festigkeit zu erzielen, ist es nötig, dass im Beton Feinstkörner verwendet werden, die keine Agglomerate bilden [3].

Um die Festigkeitseigenschaften des Betons gezielt zu verbessern, werden im Rahmen der

geplanten Arbeit Ultrahochfeste Betone aus einer Kombination verschiedener, aufeinander abgestimmter reaktiver und inerter Zusatzstoffe zusammengesetzt. Dementsprechend soll, ausgehend von einer Basismischung, durch die Variation verschiedener Mischungskomponenten eine Optimierung der Frühfestigkeit bei ausreichender Qualität der Verarbeitbarkeit erreicht werden.

Der Einfluss folgender Komponenten soll untersucht werden:

- Zementsorte (Art, Menge)
- Silicastaub (Art, Menge)
- Nanosilica (Art, Menge)
- Flugasche
- Fließmittel (Art, Menge)
- Beschleuniger (Art, Menge)
- Verzögerer.

Die durchgeführte Arbeit teilt sich in einen theoretischen und einen praktischen Teil.

Im theoretischen Teil (Kapitel 1 und 2) werden neben einer Einleitung die allgemeinen baustofftechnischen Grundlagen von ultrahochfestem Beton (UHPC) sowie die Geschichte, Eigenschaften und aktuelle Anwendungsbereiche erläutert.

Der praktische Teil umfasst die Beschreibung der Arbeit im Labor und unterteilt sich in zwei Kapitel.

Kapitel 3 beinhaltet die Darstellung der bei den Versuchen verwendeten Materialien.

Im Kapitel 4 werden die theoretischen Grundlagen der verwendeten Mischmethode und Erklärungen zu den Festbetonprüfungen, die in Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, dargestellt.

In Kapitel 5 werden die Versuchsdurchführung, die verschiedenen Mischentwurfsserien, die Auswertung und die Interpretationen der Ergebnisse beschrieben.

## 2 Grundlagen – Ultrahochfester Beton

UHPC mit seiner extrem hohen Festigkeit und Haltbarkeit gegenüber konventionellen Betonen und Hochleistungsbetonen (HPC) ist im Grunde ein neuer zementgebundener Baustoff. Dieser Beton ist weltweit als Beton mit einer Druckfestigkeit von mindestens 150 N/mm<sup>2</sup> bekannt [4]. UHPC kann eine solche hohe Festigkeit erreichen, weil seine Mischung so ausgelegt ist, dass einige charakteristische Schwächen von Normalbeton beseitigt werden können. Die Verwendung von Pulverkomponenten hilft, dieses Ziel zu erreichen und auch die Dauerhaftigkeit im Vergleich zu Normalbeton wesentlich zu erhöhen [5]. Durch diese neuen Entwicklungen erhöhten sich in den vergangenen Jahren die Anforderungen an den Mischprozess sowie die Betonbestandteile.

Da die Lebensdauer des UHPCs gegenüber Normalbeton deutlich höher ist und auch die charakteristischen Schwachpunkte von Beton so weit wie möglich verbessert wurden, sind die begrenzenden Faktoren bei der Anwendung des UHPCs die Kosten. Optimierungen sind daher notwendig, um UHPC häufiger verwenden zu können [6].

Dieser Abschnitt enthält die allgemeinen Zusammenhänge für die Entwicklung eines UHPCs und das Grundprinzip zur Herstellung sowie einen kurzen Überblick über die Arten und Anwendungen von UHPC.

### 2.1 Entwicklung von UHPC

Das moderne Bauen mit Zement und Beton basiert auf einer Vielzahl von Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet, die zu den heutigen Erkenntnissen führten. Obwohl UHPC oft als ein neues Material angesehen wird, erfolgte aber seine Entwicklung zur jetzigen Form schrittweise, über viele Jahre [5]. Mehrere Forschungsarbeiten fassen diese Entwicklung zusammen. *Naaman* und *Wille* [8] beschrieben viele bedeutende Fortschritte in der Technologie in den letzten fünf Jahrzehnten [9]. *Buitelaar* [10] fasste die frühe Entwicklung in den Niederlanden und Dänemark zusammen, *Richard* und *Rossi* beschrieben die Entwicklungen in Frankreich [11], [12].

Die Abbildung 2-1 zeigt die wesentliche Entwicklung der Betontechnologie im 20. Jahrhundert.

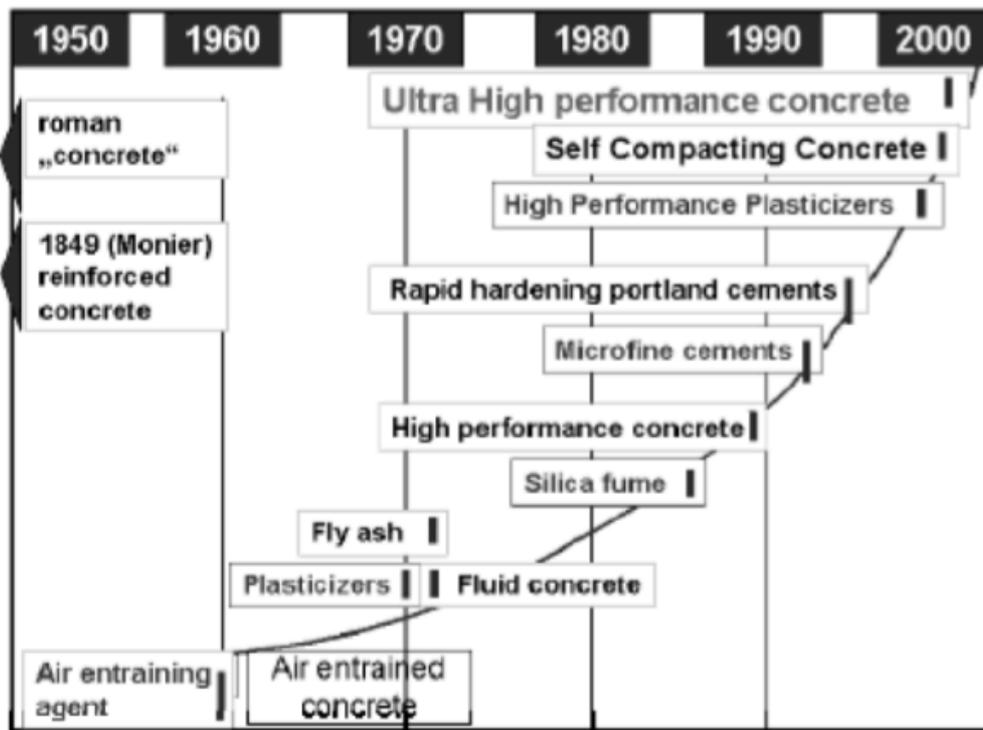


Abbildung 2-1: Wesentliche Entwicklung in der Betontechnologie im 20. Jahrhundert [6]

Die Bemühungen, einen sehr starken zementgebundenen Beton herzustellen, begannen in den 1930er-Jahren. Damals zeigte *Eugène Freyssinet* [13], dass unter Anwendung von Druck auf den Frischbeton, während der Erhärtungsphase des Betons, die Betonfestigkeit erhöht werden kann [14]. Obwohl *Otto Graf* es schaffte, einen Beton mit einer Druckfestigkeit von  $70 \text{ N/mm}^2$  in den frühen 1950er-Jahren zu erzeugen, zeigte die Bauindustrie sehr geringes Interesse an diesem neuen Produkt. Dieser Mangel an Interesse änderte sich auch nicht als *Kurt Walz* 1966 bewies, dass es mit diesem Herstellungsverfahren möglich ist, Betone mit einer Druckfestigkeit von  $140 \text{ N/mm}^2$  herzustellen [15].

In den frühen 80er-Jahren wurde die Idee der Entwicklung feinkörniger Betone mit sehr dichter und homogener Zementmatrix zur Verhinderung der Entwicklung von Mikrorissen innerhalb der Struktur geboren [14]. Seit dieser Zeit kann eine stetige und rasante Weiterentwicklung des Betons beobachtet werden. Die Innovationen basierten auf den Entdeckungen neuer Ausgangsstoffe des Betons wie Zusatzstoffe und Zusatzmittel [16]. Am Ende der 80er-Jahren begann in Frankreich und auch später in Kanada die Entwicklung von Hochleistungsbetonen, die durch ihre hohen Festigkeiten und wesentlich bessere

Dauerhaftigkeitseigenschaften gekennzeichnet sind. Am Beginn der 90er-Jahre wurde erstmals in Frankreich an der Bouygues S.A. ein Beton mit mehr als  $140 \text{ N/mm}^2$  hergestellt [7]. Dieser Beton wurde in Frankreich wegen der Verwendung sehr feiner und reaktiver Bestandteile als **Béton de Poudres Réactives (BPR)**, in den USA als **Reactive Powder Concrete (RPC)** und in Deutschland als Feinkorn- oder Reaktionspulverbeton und schließlich als **Ultra High Performance Concrete (UHPC)** bezeichnet [2]. Die erreichbare Druckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes ist in der Abbildung 2-2 ersichtlich.

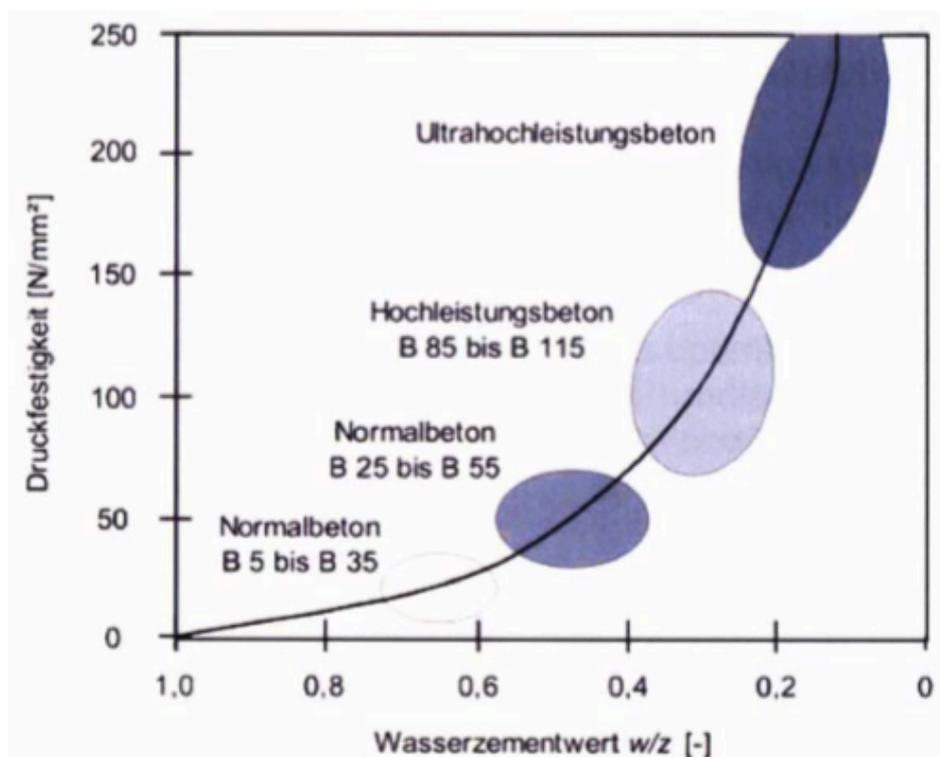


Abbildung 2-2: Spektrum der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes [2]

Einige Jahre später wurde die Betonforschung in zwei Richtungen weiterfolgt [14]:

- Die erste Richtung beschäftigte sich damit, eine verdichtete körnige Betonmatrix mit kleinen Partikel, **Densified with Small Particles Concrete (DSP)**, mit einem hohen Fließmittel- und Silicastaubgehalt herzustellen [17].
- Die andere Forschungsrichtung war die Entwicklung von **Macro Defect Free Concretes (MDF)** mit Kompositzement mit hohem Aluminatgehalt und unter

Nutzung von Polymeren, um die Poren der Betonmatrix zu füllen [2], [18], [19].

Diese zwei Betone unterscheiden sich folgendermaßen [5]:

- MDF Betone besitzen sehr anspruchsvolle Herstellungsbedingungen, die DSP Betone im Gegensatz dazu nicht.
- MDF Betone können die Biegezugfestigkeiten bis 150 MPa erreichen, DSP Betone besitzen nur geringere Biegezugfestigkeiten.
- MDF Betone sind anfällig in Bezug auf Wasser, kriechen sehr stark und sind wie DSP sehr spröde.
- Durch die Zugabe von Stahlfasern kann die Duktilität beider Betonarten verbessert werden. MDF Betone werden dadurch viskos und schlecht verarbeitbar.

Durch die Weiterentwicklung wurde 1986 ein Produkt unter dem Namen DENSIT in Dänemark patentrechtlich geschützt [4], [14], [20]. In den frühen 90er-Jahren führten die Forschungsarbeiten von *Richard et Cherrezy* [21] und *De Larrard et Sedran* [22] zu einer neuen Generation von UHPC mit mehr als 150 N/mm<sup>2</sup> Druckfestigkeit, wobei dieses Material unter dem Namen von RPC bekannt wurde [14].

## 2.2 Ultrahochfester Beton - Typen

Verschiedene Arten von UHPC wurden in verschiedenen Ländern und von unterschiedlichen Herstellern entwickelt. Der Hauptunterschied zwischen den verschiedenen Typen ist vor allem die Art und Menge der verwendeten Fasern [5].

Wichtige Arten des UHPCs sind [5]:

- CERACEM / **B**éton **S**écial **I**ndustriel (BSI) oder **B**éton **C**omposite **V**icat (BCV)
- **C**ompact **R**einforced **C**omposites (CRC)
- **M**ulti-**S**cale **C**ement **C**omposite (MSCC)
- **R**eactive **P**owder **C**oncrete (RPC).

Diese Typen von UHPC unterscheiden sich folgendermaßen [5]:

- CERACEM/BSI umfasst grobe Agglomerate, die in andere Typen von UHPC beseitigt wurden [23]. Ein besonderes rheologisches Verhalten des CERACEMs ist, dass er eine selbstverlaufende viskose Flüssigkeit ist und daher nicht verdichtet werden muss [24].

- CRC und MSCC verwenden eine große Menge an Fasern, auch die verwendete Fasergröße ist unterschiedlich zum RPC.
- Die verwendeten Stahlfasern beim RPC entsprechen zwei Prozent des Betonmischungsvolumens.

In den letzten Jahren führten die Entwicklungen von UHPC zu einem neuen Produkt unter dem Namen DUCTAL, das von drei französischen Unternehmern *Lafarge* [25], *Bouygues* [26] und *Rhodia* [27] in mehr als zehn Jahren Forschung entwickelt wurde. Dieses Produkt besitzt eine hohe Festigkeit, Duktilität und Haltbarkeit. Er beinhaltet eine dichte mineralische Matrix und eine Verstärkung durch Kunststoff- oder Stahlfasern [28]. Aufgrund des reduzierten W/Z-Wertes ist die Kriechzahl für DUCTAL niedriger als 0,8, während die für Normalbeton drei bis vier ist. Dies reduziert die Vorspannungsverluste und macht DUCTAL besser geeignet für Spannanwendungen [24].

### 2.3 Anwendungsgebiete

UHPC in der heutigen Form weist wegen seinen außergewöhnlichen Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften ein großes Potenzial für die Instandsetzung und Verstärkung von bestehenden Bauwerken auf. Die Vorteile beim Einsatz von UHPC sind eine ca. zehnfache Festigkeit im Vergleich zu konventionellen Betonen, die Hälfte der Erhaltungskosten und das Doppelte der Lebensdauer des Bauwerks [29], [30].

Bei der Verwendung der neuen Werkstoffe wurde nicht nur der wirtschaftliche Gewinn, sondern auch die Auswirkung auf die Umwelt betrachtet. Die Untersuchungen in Deutschland zeigen, dass Bauwerke 70 % der gesamten Stoffströme ausmachen. Aus diesem Grund spielt die Forderung der Nachhaltigkeit und auch die Bauwerkslebenszyklusanalyse eine große Rolle. Durch einen wirtschaftlichen Vergleich (Abbildung 2-3) zwischen verschiedenen Festigkeitsklassen von Betonen wurde der Einsatz von UHPC als eine effiziente Lösung zur Verringerung des Energie- und Rohstoffaufwands sowie der Senkung der Kosten auf verschiedenen Gebieten wie z. B. der Lohn- und Transportkosten von *Graubner* und *Hüske* [31] empfohlen.

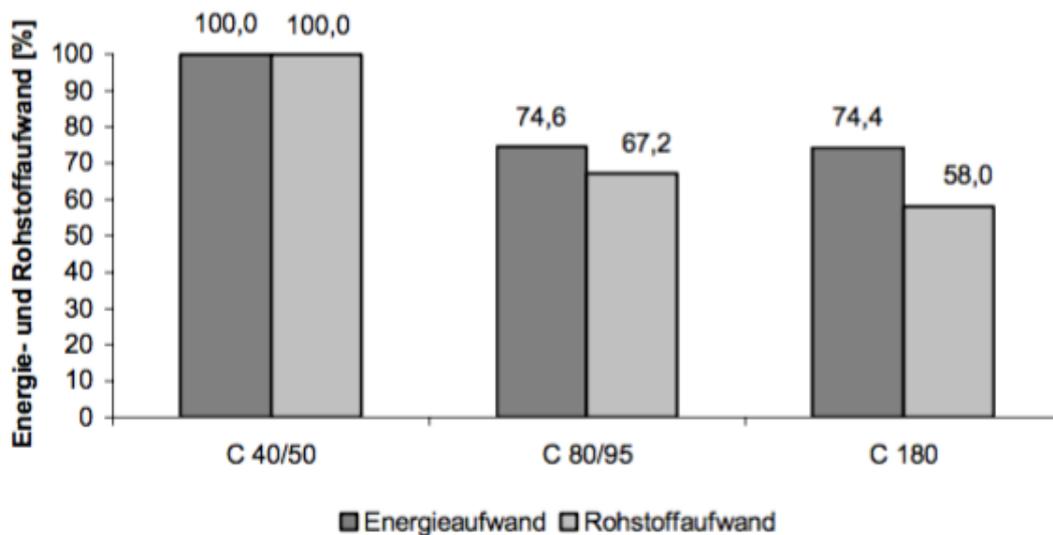


Abbildung 2-3: Vergleich des Energie- und Rohstoffaufwands für eine Stahlbetonstütze in Abhängigkeit von der Betonfestigkeitsklasse [32]

Die Anwendungsgebiete erschließen vielfältige Bereiche und sind vor allem [33], [34], [35]:

- Brückenbau und Bauteile mit großer Spannweite
- Hochhäuser
- Tunnelbau
- Verkehrswegebau: Instandsetzung von Fahrbahnplatten, vorgespannte Bahnübergangsteile
- Industriebau
- Aufstockung von Bestandgebäuden
- Neubau von Wohn- und Geschäftsgebäuden und
- Rohrleitungen: Abwasserrohre, Druckrohrleitungen.

Im Folgenden werden exemplarisch existierende Bauwerke aus UHPC vorgestellt.

### 2.3.1 Ultrahochfester Beton im Brückenbau

1997 erfolgte in Kanada mit dem Bau der „Sherbrooke Footbridge“ (Abbildung 2-4) mit einer Spannweite von 60 m über den Fluss Magong in Sherbrooke der erste großtechnische Einsatz von UHPC [36], [37]. Diese Fußgänger- und Radfahrerbrücke besteht aus einem vorgefertigten, vorgespannten Raumfachwerke ohne konventionelle Stahlbewehrung [9], [36]. Die Brückenplatte ist aus DUCTAL, mit nur 30 mm Dicke, 3,5 m Überbauhöhe und

3,3 m Überbaubreite [38]. Abbildung 2-5 zeigt einen Querschnitt der Sherbrooke.

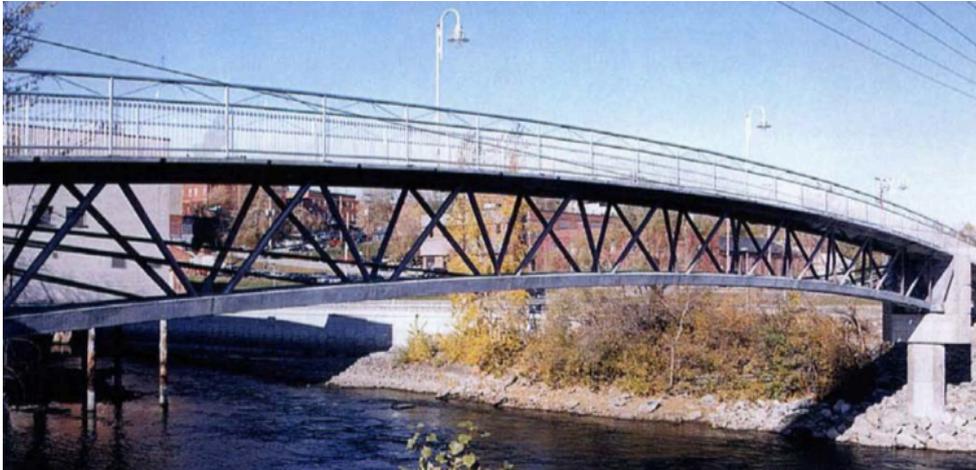


Abbildung 2-4: Fußgänger- und Radfahrerbrücke über den Fluss Magong in Sherbrooke, Kanada [37]

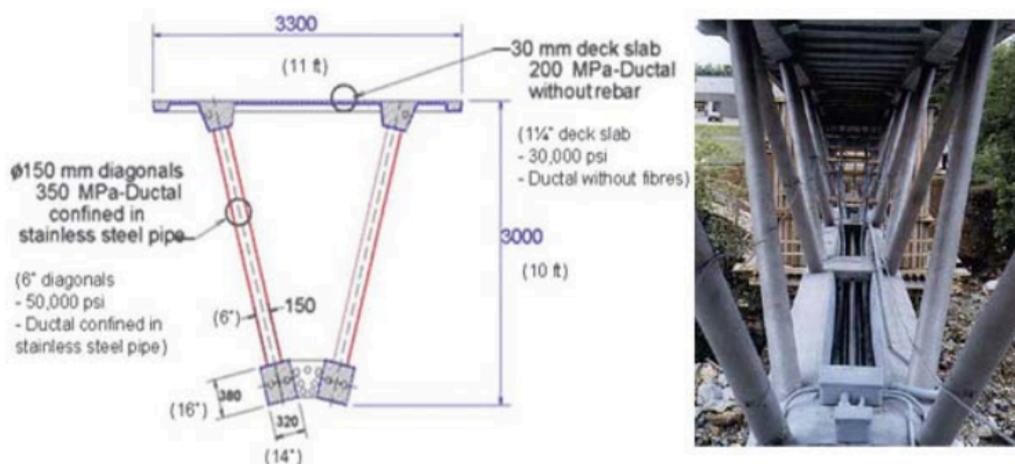


Abbildung 2-5: Querschnitt der Sherbrooke Fußgängerbrücke [39]

Bis jetzt wurden ca. 26 Brücken in Kanada unter Verwendung von UHPC in einer oder mehreren Komponenten gebaut [9]. Die Weiterentwicklung von UHPC erfolgte in den darauffolgenden Jahren in Frankreich. Hier wurden 2002 erste Empfehlungen für die Verwendung von UHPC veröffentlicht. Die Verwendung von UHPC in diesem Zeitraum in Frankreich umfasste die Unterbauten und Rieseleinbauten des Kühlturms des Kraftwerks Cattenom [2], [40].

2001 war „The Bourg Les Valence Bridge“ in Frankreich die erste Fahrzeugbrücke, die aus

UHPC gebaut wurde. Sie erstreckt sich über eine ca. 45 m Spannweite, wobei der Querschnitt aus 5  $\pi$ -förmigen Spannbetonelementen besteht.

In den folgenden Jahren wurden weltweit weitere Brücken gebaut. Eine weitere bekannte Brücke, unter der Verwendung von Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), wurde im Jahr 2002 in Seoul, Südkorea, gebaut. Es ist bis jetzt die größte Spannweite (120 m), die verwirklicht wurde (Abbildung 2-6) [36].

Diese Brücke verbindet die Hauptstadt Seoul mit der Sunycdo-Insel über den Han-Fluss und besteht aus zwei Stahlzugrifen, die von einem Bogen aus DUCTAL getragen werden. Dieser Bogen besitzt einen  $\pi$ -förmigen Querschnitt (Abbildung 2-7), eine Breite von 4,3 m, eine Höhe von 1,3 m und eine Betondruckfestigkeit von 200 MPa. Die Verwendung von DUCTAL für den Bau dieser Brücke ist eine große Innovation und ein wichtiger Schritt in der Entwicklung des UHPCs im Bauingenieurwesen [36], [41].



Abbildung 2-6: Seonyu Fußgängerbrücke, Seoul, Südkorea [42]

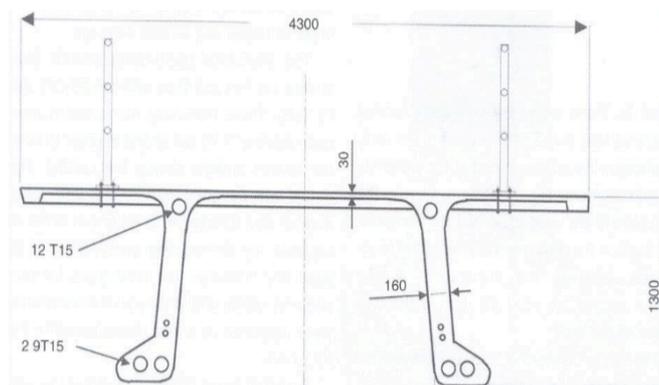


Abbildung 2-7: Querschnitt – Seonyu Fußgängerbrücke [41]

Andere Länder mit Brücken aus UHPC sind Australien, Österreich, Deutschland, Kroatien, Italien, Japan, Malaysia, die Niederlande, New Zealand, Slowenien, Südkorea und die Schweiz [9].

Im Jahre 2007 wurde die längste deutsche UHPC-Brücke in der Kasseler Karlsaue über den Fulda Fluss gebaut. Es ist eine Fußgänger- und Radfahrerbrücke mit einer Länge von 132 m [43].

Eine absolute Weltneuheit bei der Verwendung von UHPC im Brückenbau war 2010, die Wild-Brücke in Völkermarkt, Kärnten. Sie ist die erste Bogenbrücke der Welt aus UHPC mit einer Länge von 157 m, wobei die Stützweite der Bögen 70 m beträgt (Abbildung 2-8) [36], [30].



Abbildung 2-8: Wild-Brücke in Völkermarkt [30], [44]

### 2.3.2 Ultrahochfester Beton am Beispiel von Hochhäusern

In der Praxis ist der Einsatz im Hochbau und für den Turmbau ein bevorzugter Anwendungsbereich von UHPC. In der Abbildung 2-9 ist ein Überblick der Verwendung des UHPCs im Hochhausbau dargestellt.

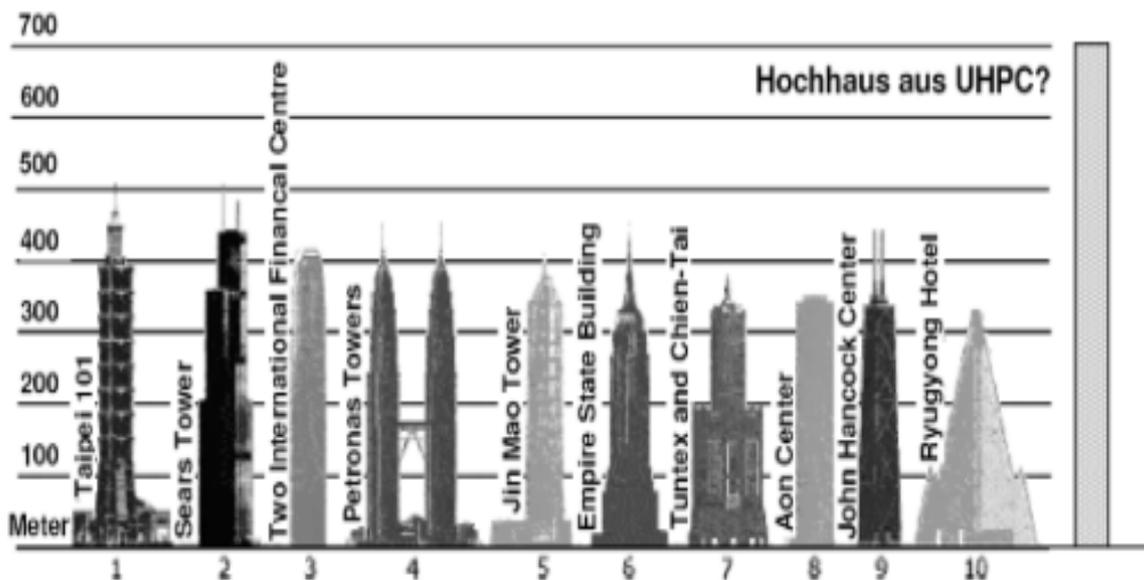


Abbildung 2-9: Perspektiven im Hochhausbau [33]

Bereits 1993 erfolgte in Deutschland die erste praktische Anwendung von hochfestem Beton beim Bau des „Trianon Hochhauses“ mit einer Höhe von 186 m und 45 Obergeschossen. Die Lastabtragung erfolgt auf drei hochbelasteten Innenstützen und Wänden. Über die möglichen Stahlbetonhochhäuser außerhalb von Europa wurde schon wesentlich früher nachgedacht. 1989 wurde in Seattle, USA, das „Two Union Square Building“ mit 226 m Höhe und 56 Etagen oberirdisch fertiggestellt, wobei seine tragende Struktur mit vier runden Stahlbeton-Innenstützen und 14 Stahlbeton-Außenstützen aus konventionellem, hochfestem Beton mit einer Druckfestigkeit von  $131 \text{ N/mm}^2$  ausgeführt wurde. Die Verwendung von hochfesten Betonen im Hochhausbau folgte 1996 bei der Fertigstellung des „Petronas Twin Towers“ in Kuala Lumpur mit 451 m und 2004 in Taiwan bei der Fertigstellung des „Taipe Financial Center – Taipe 101“ mit 509 m Höhe. „Taipe 101“ war bis Anfang 2007 der höchste Wolkenkratzer der Welt mit 101 oberirdischen und fünf unterirdischen Geschossen. Während die Hochhäuser wie z. B. die „Petronas Twin Tower“, als Stahlskelette errichtet wurden, wurde beim höchsten Gebäude der Welt, „Burdj Khalifa“ in Dubai mit einer Höhe von 829 m, bis zur 155ten Etage hochfester Beton verwendet. Diese Struktur führte dazu, dass der Stahl in seinem Inneren nicht das Gewicht tragen muss, sondern nur Zugspannung aufnimmt. Die genannten Hochhäuser sind in der Abbildung 2-10 dargestellt [45], [46].



Abbildung 2-10: Hochhäuser (von links nach rechts): „Trianon Hochhaus“, Deutschland [47]; „Two Union Square Building“, USA[48]; „Petronas Twin Towers“, Malaysia [49]; „Taipe101“, Taiwan [50]; „Burdj Khalifa“, Dubai [51]

Die aktuellen Tragwerksentwicklungen der letzten Jahrzehnte hat ihren derzeitigen Abschluss in der optimierten Konstruktionsform des (mehrzelligen) rahmenartig aufgelösten Hohlkastens (oft mit innerem Kern, sowohl in Stahl, als auch in UHPC-Beton für wachsende Gebäudehöhen über 200m) hervorgebracht.

Die im Folgenden stehende stark vereinfachte Betrachtung von *Rümelin* [45] (ohne Berücksichtigung von Vertikallasten (Wind- und Erdbebenlasten) und die Knickproblematik des außermittig belasteten UHPC-Druckstabes) verdeutlicht aus welchem Grund die Verwendung des UHPCs für zukünftige hohe Bauwerke unverzichtbar sein wird.

Heutige Baumaterialien ermöglichen theoretisch Bauhöhen zwischen 800 und 900 m. Für einen beliebig hohen Stab, der eine Grundfläche von 1x1 m besitzt, lässt sich die maximale Höhe, die s.g. Druckbruchlänge, durch folgende Gleichung (Formel 2-1) darstellen [36], [45].

	$\sigma_{\max}$	.... Druckfestigkeit	
	N	.... Normalkraft	
$\sigma_{\max} = N/A$	A	.... Querschnitt	
$N = \rho \cdot l \cdot b \cdot h$	$\rho$	.... Rohdichte	
$A = l \cdot b$	l	.... Querschnittslänge	Formel 2-1: Maximale Druckbruchlänge [36], [45]
$\Rightarrow \sigma_{\max} = \rho \cdot h$	b	.... Querschnittsbreite	
	h	.... Höhe des Stabes	
	$h_{\max}$	.... maximale Höhe des Stabes	

Die aus der Gleichung resultierende maximale Druckfestigkeit ( $\sigma_{\max}$ ), lässt sich durch das Eigengewicht ermitteln und wurde hier als Grenzwert festgelegt. Die Konstruktionen müssen nicht nur ihr Eigengewicht, sondern auch andere Lasten wie z.B. Einrichtungen, Wind usw. tragen. Dadurch wird praktisch nur eine wesentlich niedrigere Bauhöhe erreicht werden. Darüber hinaus wird 1/5 der maximalen Höhe aus dem Eigengewicht als praktisch erreichbare Bauhöhe angenommen, da zusätzlich ein globaler Sicherheitsfaktor von 50 % als Sicherheitskonzept für alle Baumaterialien angenommen werden muss. Eine Gegenüberstellung der maximal ausführbaren Gebäudehöhen beim Einsatz verschiedener Materialien zeigt Tabelle 2-1 [45].

Tabelle 2-1: Maximal mögliche Bauhöhen mit unterschiedlichen Materialien [45]

Material	Rohdichte [kN/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit bei einem globalen Sicherheitsfaktor von 50 % [MPa]	h <sub>max</sub> aus Eigengewicht (Druckbruchlänge) [m]	h <sub>max</sub> praktisch [m]
Beton C20/25	25	10	400	80
Beton C50/60	25	15	600	120
Beton C100/115	78,5	50	200	400
Stahl S235	78,5	120	1528	305
Stahl S355	25	180	2293	459
UHPC 200	25	100	4000	800
UHPC 400	25	200	8000	1600
UHPC 800	25	400	16000	3200

Baustahl besitzt ein hohes Eigengewicht, aber keine wesentlich höhere Druckfestigkeit im Vergleich zu Beton. Durch das hohe Eigengewicht von Stahlbeton ist die Ausführung von sehr hohen Gebäuden aus diesem Material undenkbar, weil es dadurch mit einer zunehmenden Gebäudehöhe immer zu einem ungünstigeren Verhältnis von Verkehrslast zu Eigengewicht führt. Dementsprechend kommt es zu einer Begrenzung der maximal ausführbaren Bauhöhe. Eine Lösung dafür liegt in der Verwendung von UHPC aufgrund seines geringeren Eigengewichts im Vergleich zum Baustahl [33], [36], [45].

Unabhängig von den heutigen Baumaterialien gibt es viele Pläne für weitere Wolkenkratzer wie beispielsweise „Kingdom Tower“ in Südarabien mit mehr als 1007 m Höhe und der „Bionic Tower der Küste Shanghais“ in China mit 1228 m Höhe. Inwieweit diese Projekte realisierbar werden, hängt mit der Entwicklung der Baumaterialien, insbesondere des UHPCs, zusammen [45].

### 2.3.3 Beispiele sonstiger Anwendungen

UHPC weist eine geringe Porosität, einen hohen Frost-Tausalz widerstand, Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand sowie eine niedrige Wasseraufnahme auf, die insgesamt zu einer hohen und langen Lebensdauer führen. UHPC eignet sich wegen seiner vernachlässigbaren Permeabilität als Verstärkung und Abdichtung stark beanspruchter Bauwerksbereiche wie z. B. Brückenplatten, Pfeiler und Betonschutzwände (Abbildung 2-11) [52]. Obwohl die besonderen Eigenschaften des UHPCs für die Anwendung im Brückenbau, bei turmartigen Gebäuden und im Straßenbau von großer Bedeutung sind, kommt er aber wegen seiner werkstofflichen und mechanischen Eigenschaften auch außerhalb des konventionellen Bauwesens zum Einsatz [36], [53].



(a) Einbau der multifunktionalen UHPC-Schicht ( Verstärkung, Abdichtung und Fahrbahnbelag) [54]



(b) Großförmige Fassadenelemente [55]



(c) UHPC-Stützen für Experimentalbau – Dröbler, Siegen [55]

Abbildung 2-11: Sonstige Verwendungen des UHPCs

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung von UHPC besteht in der Kombination mit Stahl in der Fertigteilindustrie. Der Einsatz findet hauptsächlich im Plattenbau, bei Balkonen, Galerien und Treppen statt. Durch die Herstellung kleiner Bauteile, mit einer Länge von nur 8 bis 12 cm, wurde beispielsweise bei den Balkonplatten der verwendete Edelstahl Druckstab durch UHPC ersetzt. Grundsätzlich erfordert UHPC geringere Bauteilhöhen als herkömmliche Betone (Abbildung 2-12). Dieser Umstand ist auch aus der bauphysikalischen Sicht sehr wichtig, da durch die etwa 8 bis 10-mal niedrigere Wärmeleitfähigkeit des UHPCs gegenüber Stahl die Wärmebrückenbildung verringert wird [36], [56].

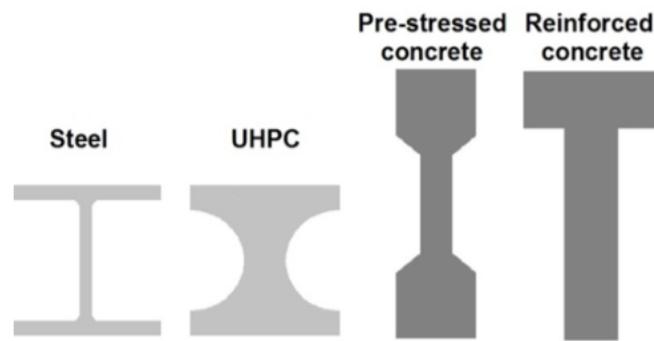


Abbildung 2-12: Unterschiedliche Querschnitte mit gleicher Tragfähigkeit [57]

Die Verwendung des UHPCs im Maschinenbau erfolgt durch die Herstellung von z. B. massiven Maschinenbetten und Maschinengestellen als Basis (Abbildung 2-13), um den Anforderungen hochdynamischer Maschinen gerecht zu werden. Diese Bauteile erfordern keine Bewehrung. Durch die Zugabe eines Schwindreduzierers sowie durch eine Wärmebehandlung wurde das Schwinden für diese Bauteile minimiert, um die erforderliche Präzision im Maschinenbau zu gewährleisten [36], [59].



Abbildung 2-13: Maschinenbetten aus UHPC [55]

Die Anwendung von UHPC im Spezialtiefbau erfolgt durch das Ersetzen der Spezialtiefbausystemteile, die bisher meist aus Stahl hergestellt wurden wie z.B. Bohrspitzen (Abbildung 2-14), Biegeträger für Wandelemente und Ankerplatten. Beim Einsatz von UHPC im Spezialtiefbau stehen neben den mechanischen Eigenschaften auch die ökonomischen und ökologischen Anforderungen im Vordergrund, z.B. ist der Einsatz von Bohrspitzen aus UHPC wesentlich preisgünstiger [60].



Abbildung 2-14: Bohrspitze aus UHPC [36]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass neue Baumaterialien wie UHPC ein starkes Potenzial haben, um den Bau neuer Infrastrukturen robust, nachhaltig und dauerhaft errichten zu können. Dadurch kann etwa 60 % Rohstoffe und bis zu 40 % der Energie und CO<sub>2</sub> Emissionen eingespart werden [61]. Die Entwicklung des UHPCs geht laufend weiter, es finden sich neue Innovationen und Anwendungsmöglichkeiten dieses Materials im Bereich der Konstruktion, Architektur und Design.

### 3 Ausgangsstoffe zur Herstellung von UHPC

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Bestandteile zur Herstellung des UHPCs sowie die Geräte für die Herstellung kurz erläutert und ihre Wirkungen erklärt.

#### 3.1 Grundprinzip zur Herstellung ultrahochfester Betone

Als UHPC werden Betone mit Druckfestigkeiten oberhalb der in der ÖNORM B 4710 [62] definierten Festigkeitsklasse C100/115 bezeichnet. Obwohl UHPC als ein relativ neues Material betrachtet wird, besteht es meist aus den gleichen Bestandteilen wie Normalbeton. Die Normalbetone sind im einfachsten Fall 3-Stoff-Systeme: Wasser, Zement und Gesteinskörnung als Zuschlag. Zur Herstellung von UHPC ist die Zugabe von Betonzusatzstoffen und/oder reaktiven und inerten Betonzusatzmittel erforderlich, es handelt sich also bei UHPC um ein 5-Stoff-System. Zwei zusätzlichen Komponenten sind üblicherweise für UHPC erforderlich, ein leistungsfähiges Fließmittel sowie Silicastaub als Füllstoff. Der W/Z-Wert wird stark reduziert, unter das theoretisch minimale Wasser-Zement Verhältnis für eine vollständige Hydratisierung [63]. Bei optimaler Zusammensetzung der Ausgangsstoffe sowie der entsprechend sorgfältigen Abstimmung aller Bestandteile, wie auch durch die Auswahl einer entsprechenden Mischtechnik sind unter baupraktischen Bedingungen Druckfestigkeiten bis zu  $250 \text{ N/mm}^2$  zu erreichen. Diese Druckfestigkeit kann zusätzlich durch die Zugabe von Stahlfasern noch weiter erhöht werden [38], [64].

Im Wesentlichen können die grundlegenden Entwicklungsprinzipien des UHPCs folgendermaßen zusammenfassen werden [2], [36]:

- Optimierung der Homogenität des Betongefüges durch die Reduktion des Größtkorns der Gesteinkörnungen und Anwendung höherer Anteile an feinen und sehr feinen Stoffen (Abbildung 3-1)
- Minimierung des W/Z-Wertes bis 0,23-0,25 durch die Zugabe von hochleistungsfähigem Verflüssiger und/oder Fließmittel
- Auswahl eines optimalen Mischprozesses
- Auswahl einer geeigneten Zementsorte
- Optimierung der Mikrostruktur durch Wärmebehandlung und

- Verbesserung der Duktilität durch die Zugabe von Fasern.

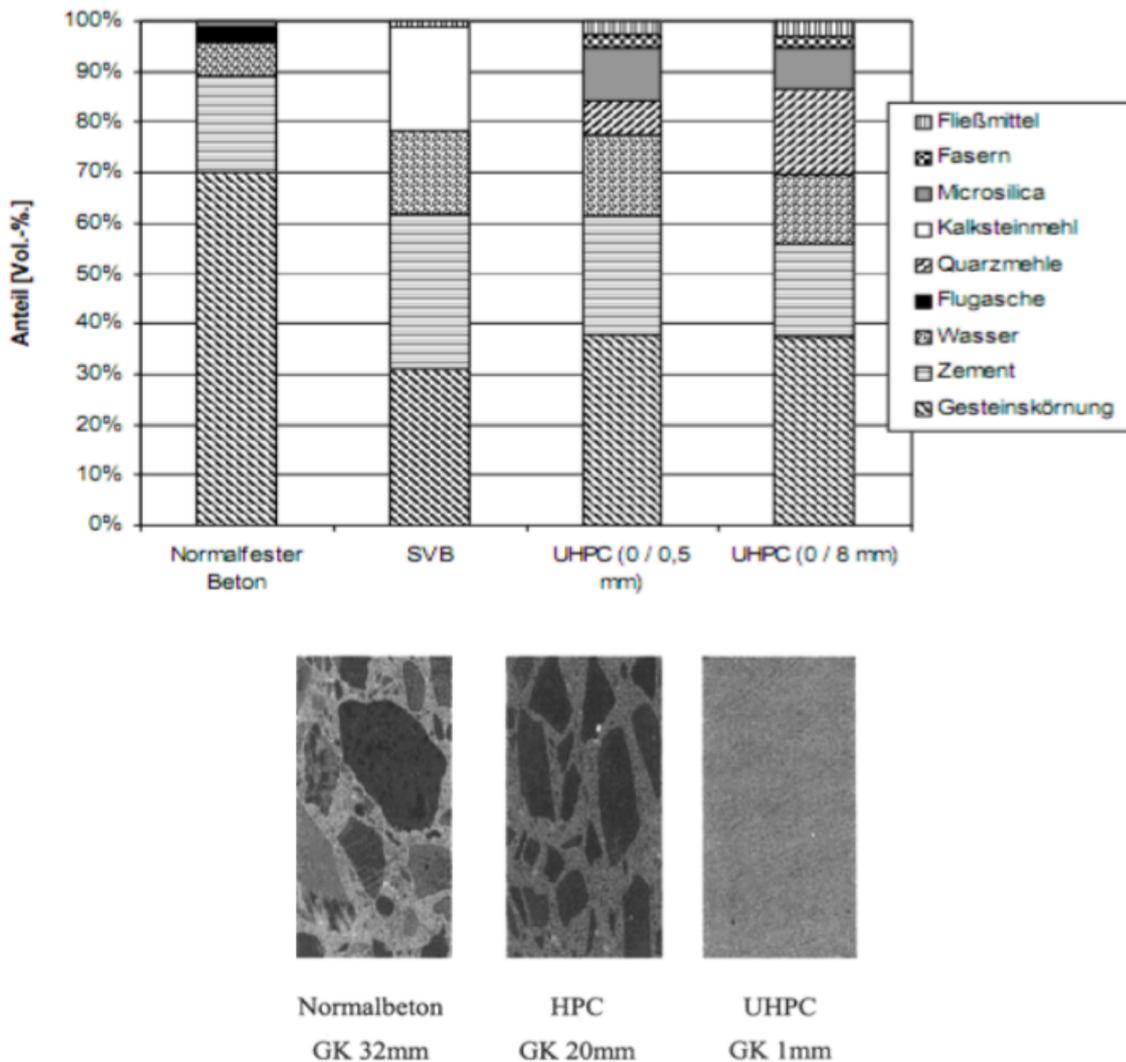


Abbildung 3-1: Vergleich der Mischungszusammensetzung von Normal-, Selbstverdichten- und Ultrahochfestbeton (oben) [65] und Vergleich der Mikrostruktur von Normalbeton, HPC und UHPC (unten) [66]

Eine weitere Möglichkeit, eine höhere Festigkeit bei UHPC zu erreichen, ist eine Wärmebehandlung nach dem Erstarren. Eine ein- bis zweitägige Wärmebehandlung kann zu einer Festigkeitserhöhung von bis zu ca. 20 % führen [68]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Variation der Nachbehandlungen vernachlässigt und die Festigkeiten ausschließlich unter Normalbedingungen gemessen.

Diese Maßnahmen und die verwendeten Bestandteile werden im Folgenden dargestellt und diskutiert.

## 3.2 Mischungsbestandteile

### 3.2.1 Zement

Zement, als ein anorganisches, nichtmetallisches, fein gemahlenes Bindemittel, ist der wichtigste Bestandteil des Betons. Der Zementleim, das Gemisch aus Wasser und Zement, erhärtet nach einer gewissen Zeit sowohl an der Luft als auch unter Wasser zu Zementstein. Dadurch bleibt er fest sowie raumbeständig und weist eine hohe Festigkeit auf [45], [64].

Die Ausgangsstoffe für die Herstellung des Portlandzementklinkers, als wesentliche Hauptbestandteile der Zemente, sind [65]:

- Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ )
- Quarzsand ( $\text{SiO}_2$ )
- Tonerde und Mergel ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Eisenoxidische Minerale ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Die Zugabe von entsprechenden Zusatzstoffen im Zement führt zur Veränderung und/oder Verbesserung der Zementeigenschaften wie z.B. niedrigere Hydratationswärme (NW), hoher Sulfat Widerstand (HS) und niedriger Alkaligehalt (NA). Darüber hinaus ist die chemische Zusammensetzung des Klinkers abhängig von den verwendeten Roh- und Brennstoffen sowie von den Brenn- und Abkühlungsbedingungen [7], [64].

Abbildung 3-2 zeigt die Einteilung der Hauptbestandteile des Zements in einem Dreistoffdiagramm.

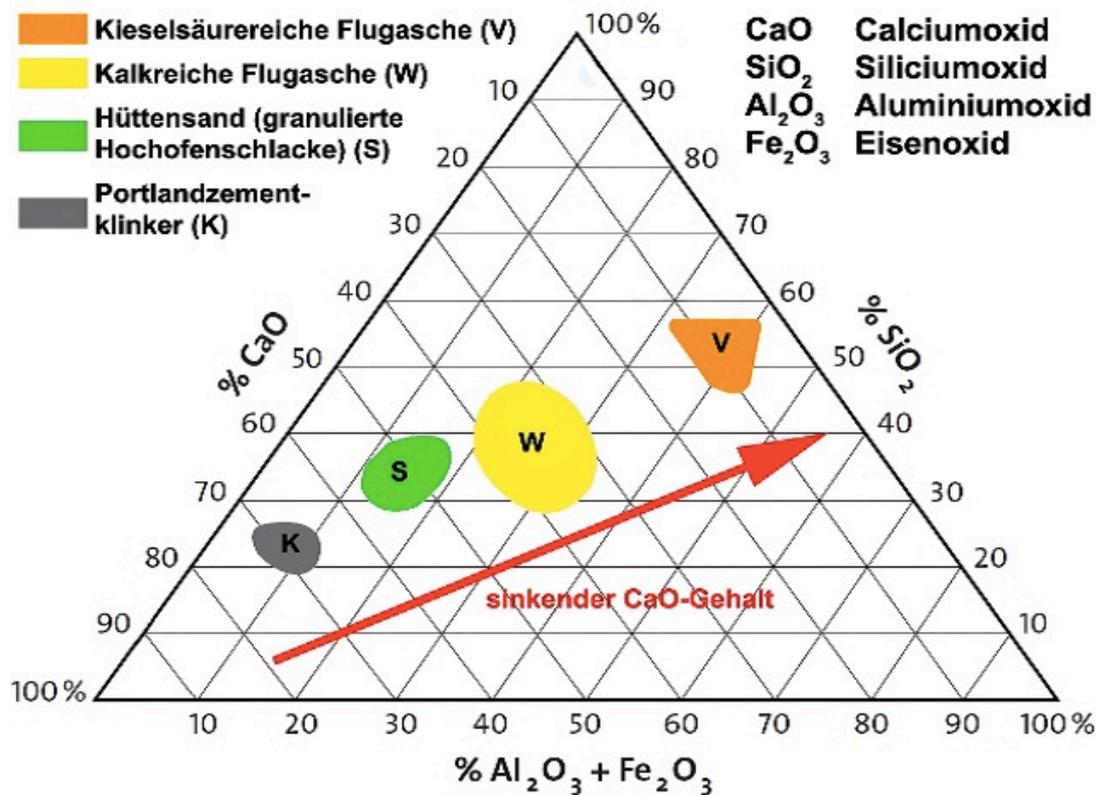


Abbildung 3-2: Einteilung der Hauptbestandteile des Zements in dem Dreistoffdiagramm [69]

Die Herstellung des Zements erfolgt durch Feinmahlen des Zementklinkers und anderer mineralischen Zusatzstoffen. Dabei werden die Ausgangsstoffe zuerst auf 800 °C vorerhitzt und anschließend durch das Brennen und Sintern bei ca. 1450 °C zu Zementklinker umgewandelt [68]. Durch dieses Brennen und Sintern entstehen vier verschiedene Klinkerphasen, welche in der Tabelle 3-1 ersichtlich sind.

Tabelle 3-1: Hauptklinkerphasen im Portlandzementklinker [68]

Mineral		Formel	Kurzform	Gehalt[%]
Tricalciumsilicat	Alit	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	40-80
Dicalciumsilicat	Belit	2CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	2-30
Tricalciumaluminat	Aluminat	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> A	3-15
Calciumaluminatferrit	Aluminatferrit	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> (F,A)	4-15

Abbildung 3-3 zeigt den Herstellungsprozess des Zements.

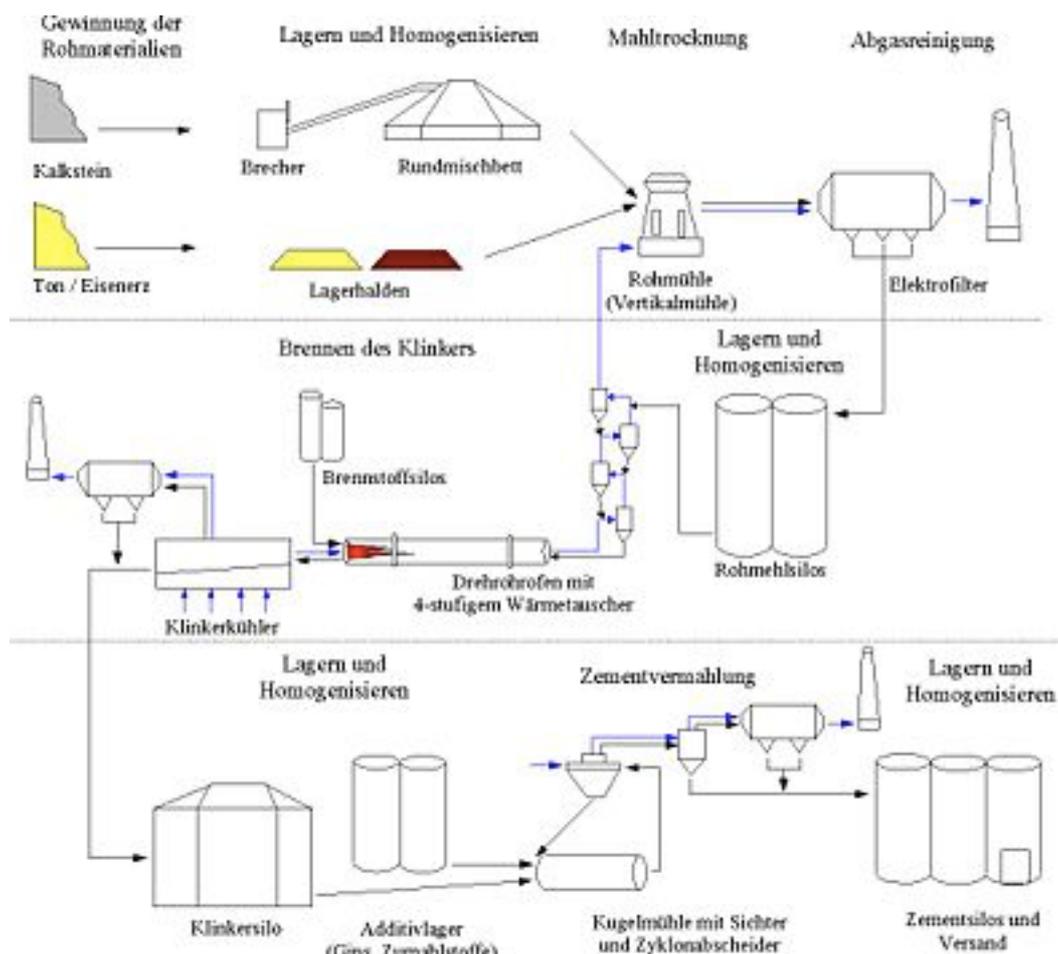


Abbildung 3-3: Herstellungsprozess des Zements [70]

Die unterschiedlichen Beiträge, die die Zementphasen zur Zementfestigkeit beitragen, sind [38], [68]:

- Das Tricalciumsilicat  $C_3S$  ist jene Verbindung, welche dem Zement die wesentlichen Eigenschaften gibt, sehr schnelle Erhärtung im Wasser und hohe Hydratationswärme. Diese hohe Hydratationswärme führt zur schnellen Frühfestigkeit sowie zur hohen Endfestigkeit.
- Das Dicalciumsilicat  $C_2S$  besitzt eine deutlich langsamere und stetige Erhärtung mit einer entsprechend, aufgrund der geringeren Erhärtungsgeschwindigkeit, niedrigeren Hydratationswärme als das  $C_3S$ . Daher erreichte es später als Alit die gleiche Festigkeit, es führt aber trotzdem zu einer hohen Endfestigkeit.
- Das Tricalciumaluminat  $C_3A$  besitzt eine schnelle Reaktion mit Wasser und eine hohe Hydratationswärme. Die Festigkeit ist im Vergleich zur  $C_3S$ - und  $C_2S$ -Phase

niedriger, außerdem ist es anfällig gegen Sulfatwasser.

- Calciumaluminatferrit  $C_4(A, F)$  hat eine langsame und geringe Erhärtung und besitzt keinen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung. Es ist aber widerstandsfähig gegen Sulfatwasser.

Praktisch beinhaltet jeder Portlandzementklinker alle vier Phasen. Daher sind die Mengenanteile je nach dem Bedarf an Eigenschaften unterschiedlich.  $C_3S$  und  $C_2S$  sind die Hauptträger der Zementerhärtung und Festigkeitsbildung. Aus diesem Grund werden bei Zementen für hochfeste Betone möglichst einen großen Anteil dieser zwei Phasen ausmachen, während möglichst eine geringe Menge an  $C_3A$  und  $C_4(A,F)$  vorhanden sein sollen. Diese letzten Anteile können zu einer Ettringitbildung, welche bei der Betonherstellung sehr störend ist, und zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Verarbeitbarkeit führen, da das  $C_3A$  sehr schnell mit dem Wasser reagiert. Zusätzlich erfordert die  $C_3A$ -Phase größere Mengen an Fließmittel. Aus diesem Grund werden für UHPC hauptsächlich Zemente verwendet, die einen niedrigen Wasseranspruch und ein langsames Erstarrungsverhalten besitzen. Sie sollten weiters eine gute Verträglichkeit mit dem Fließmittel haben. Dementsprechend kommen für Hochleistungsbetone aus der Sicht der chemischen Zusammensetzung die  $C_3A$ -armen oder  $C_3A$ -freien Zemente zum Einsatz, um eine gute Verarbeitbarkeit des Betons zu erreichen [38], [71].

Die stoffliche Zusammensetzung und Zementart sind für die Herstellung des Betons besonderes von Bedeutung. Nach Zementnorm ÖNORM EN 197-1 [69] sind derzeit fünf Hauptarten des Zements normativ geregelt:

- CEM I      Portlandzement
- CEM II     Portlandkompositzement
- CEM III    Hochofenzement
- CEM IV     Puzzolanzement
- CEM V     Kompositzement.

Die Norm unterscheidet weiter durch die Zugabe der verschiedenen Zusatzstoffe 27 Zementarten (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Zusammensetzung der Normalzemente nach EN 197-1:2011 [69]

Hauptarten	Bezeichnung der 27 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung (Massenanteile in Prozent <sup>a</sup> )										Nebenbestandteile	
			Hauptbestandteile											
			Klinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolan		Flugasche		Ge-brann-ter Schie-fer	Kalkstein			
						natürlich	natürlich getempert	kiesel-säurereich	kalk-reich		L	LL		
K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandzement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandhütten-zement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silicastaubzement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-puzzolan-zement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-flugaschezement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland-schieferzement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland-kalksteinzement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Portlandkomposit-zement <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->									0-5	
		CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 ----->										
	CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzzolan-zement <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Komposit-zement <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 ----->			-	-	-	-	0-5	

<sup>a</sup> Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.

<sup>b</sup> Der Anteil an Silicastaub ist auf 10 % begrenzt.

<sup>c</sup> In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M und CEM II/B-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/A und CEM IV/B und in den Kompositzementen CEM V/A und CEM V/B müssen die Hauptbestandteile außer Klinker durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden (Beispiele: siehe Abschnitt 8).

### 3.2.2 Gesteinskörnungen

Die Verarbeitbarkeit des Betons ist vorwiegend von der Kornzusammensetzung der Gesteinskörnungen sowie von der Menge und Konsistenz des Zementleims abhängig. Die Gesteinskörnungen besitzen im Beton ungefähr 70 % des Gesamtvolumens und sind somit mit Abstand der größte Anteil des Betons. Die Eigenschaften des Betonzuschlages sind abhängig von der Art und Beschaffenheit des Gesteins. Dieser muss eine möglichst hohe Festigkeit aufweisen, damit die Herstellung eines Betons mit den gewünschten Festigkeiten möglich ist.

In Österreich ist hinsichtlich der Verwendung der Gesteinskörnung für UHPC die ÖNORM EN 12620 [72] zu beachten. Die Wahl der Gesteinskörnungen lässt sich nach folgenden Eigenschaften entscheiden [3], [45]:

- Druckfestigkeit
- E-Modul
- Wasseranspruch
- Kornoberfläche
- Kornform und
- Korngröße.

Der Einfluss der oben genannten Eigenschaften kann wie folgend zusammengefasst werden [38], [45], [64]:

- Gesteinskörnungen mit möglichst hoher Festigkeit ermöglichen auch Betone mit höheren Festigkeiten.
- Je höher der E-Modul der Gesteinskörnungen ist, desto höher ist auch der E-Modul des Betons. Weiters können die Verformungen, die infolge Kriechen, Schwinden und Temperaturdifferenzen entstehen, besser aufgenommen werden.
- Die Gesamtoberfläche des Zuschlages ist abhängig von der Form und Größe der einzelnen Körner, d. h., je kleiner die Einzelkörner sind, umso größer ist die Gesamtoberfläche. Dementsprechend besitzt ein rundes Korn im Vergleich mit einem gedrunenen oder länglichen Korn mit gleichem Volumen eine geringere Oberfläche. Daher kann es zu Hohlräumen kommen, welche durch Zement ausgefüllt werden müssten. Neben den höheren Stoffkosten wird auch das

Schwindmaß erhöht.

- Je geringer der Wasseranspruch der Gesteinskörnung ist, desto geringer ist der W/Z-Wert beim Beton.

Der Wasseranspruch und die Dichte der Gesteinskörnungen, die zum Erreichen einer ausreichenden Verarbeitbarkeit erforderlich sind, werden durch die Kornzusammensetzung des Betonzuschlags bestimmt. Diese Kornzusammensetzung für Normalbeton erfolgt durch Siebversuche mit Prüfsieben im Siebliendiagramm, das die Gewichtsmenge der Siebdurchgänge abhängig von der jeweiliger Lochweite grafisch darstellt. Das Ziel ist eine möglichst dichte Packung der Gesteinskörnung zu erreichen. Abbildung 3-4 zeigt ein Siebliendiagramm für vier verschiedene Gesteinskörnungen [64].

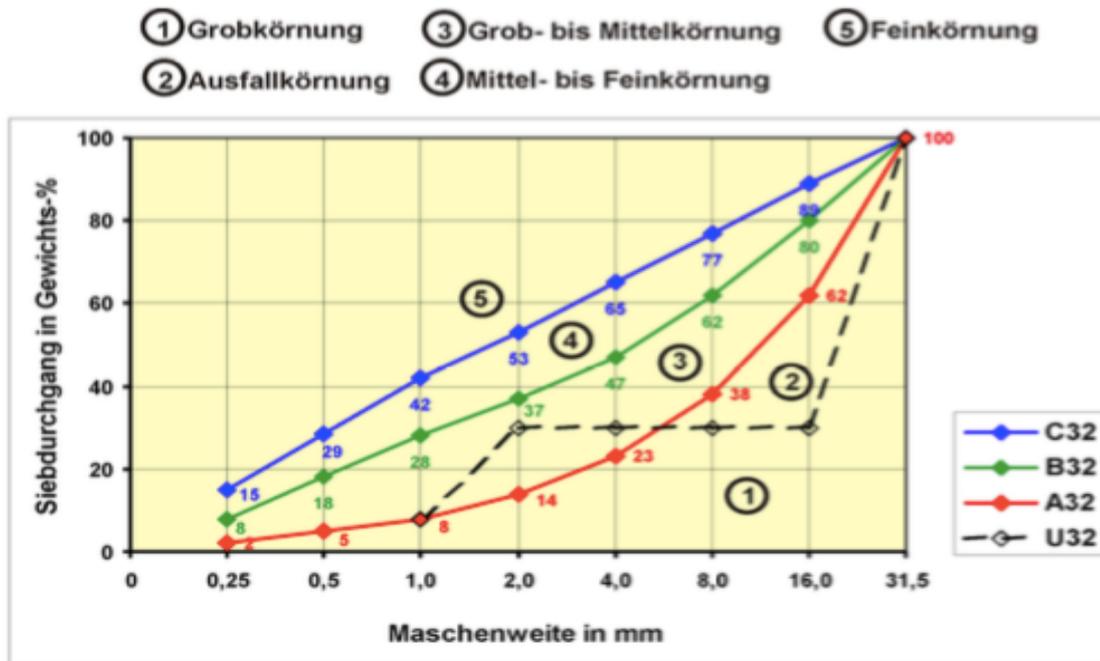


Abbildung 3-4: Beispiel für eine Sieblinie [64]

Als Zuschlagstoff für UHPC kommen vorwiegend feine Sande mit einer Korngröße zwischen  $250\mu\text{m}$  und  $1\text{mm}$  zum Einsatz. Durch die geforderte Feinheit des Zuschlags wird die sehr poröse und heterogene Übergangszone zwischen Gesteinskörnung und Zementleim beseitigt. Da diese Übergangszone beim UHPC nicht mehr ausgebildet wird, kann es nicht mehr zu einer Bildung von „weichen“ Hydratationsprodukten wie Ettringit kommen. Zusätzlich entsteht durch die Verwendung der  $C_3A$ -freien Zemente und auch des niedrigen

W/Z-Werts kein Ettringit [73]. Neben feinen Zuschlägen wurden in letzter Zeit aber auch Gesteinskörnungen (meist Basalt) mit einem Größtkorn bis 16 mm zur Herstellung von Grobkorn-UHPC verwendet. Damit kann ein Grobkorn-UHPC mit einer Druckfestigkeit von über  $150 \text{ N/mm}^2$  mit einer fließfähigen Konsistenz hergestellt werden [36], [74].

### 3.2.2.1 Quarzsand

Zur Herstellung des UHPCs werden üblicherweise quarzitisches Gesteinskörnungen verwendet. Quarzsande besitzen eine hohe Druckfestigkeit, sind leicht verfügbar und haben auch den Vorteil, die feste Übergangszone zwischen Bindemittelmatrix und Gesteinskorn ausbilden zu können [22], [36], [75].

Die wichtigsten Kennwerte bei der Wahl der Quarzsande sind die Kornform und Korngröße. Ungebrochene Sande, die durch ihre gedrungene Kornform eine geringere Oberfläche besitzen, eignen sich besser als gebrochenes Material [45].

Die Korngröße des Sandes spielt neben der Kornform eine wesentliche Rolle. Nach Untersuchungen von *Larrard* und *Sedran* [22] wird ein Größtkorn des Quarzsandes von 0,4mm empfohlen. Dieses Größtkorn führt zu einem geringeren Luftporengehalt und ermöglicht eine ausreichende Verarbeitbarkeit [36].

Nach *Richard* und *Cheyrezy* [75] wurde eine Ober- und Untergrenze für das Korn definiert. Die Obergrenze begründet sich durch die Homogenität und die Untergrenze durch einen erforderlichen Größenunterschied der aufeinanderfolgenden Kornklassen. Daher sollte das Größtkorn einen Durchmesser von 0,6 mm nicht überschreiten und auch das Kleinstkorn einen Durchmesser von  $0,15 \mu\text{m}$  nicht unterschreiten. Um eine hohe Packungsdichte zu erreichen, sollte ein 13-facher Größenunterschied des mittleren Korndurchmessers vorhanden sein. Außerdem erfordert ein mittlerer Korndurchmesser des Zements von  $15 \mu\text{m}$  einen mittleren Korndurchmesser des Sandes größer als  $200 \mu\text{m}$  und ein Größtkorn des Zements von  $50 \mu\text{m}$  ein Kleinstkorn des Sandes von  $150 \mu\text{m}$ .

Da bei der Herstellung des UHPCs die Fließfähigkeit von großer Bedeutung ist, darf die Quarzsandmenge den Grenzwert nicht überschreiten. Die Untersuchungen von *Richard* und *Cheyrezy* [75] zeigen, dass das Bindemittelmittelvolumen mindestens 1,2-mal höher sein muss als der Hohlraumgehalt des unverdichteten Sandes. Zum Erreichen einer fließfähigen Konsistenz bei UHPC ergeben sich Sandvolumen von 360 bis  $410 \text{ l/m}^3$  [1].

---

### 3.2.2.2 Quarzmehl

Da nicht der ganze Zement hydratisiert wird, sollte ein Teil durch ein fein gemahlenes und kristallines Quarzmehl, mit gleicher Kornklasse wie Zement, ersetzt werden. Da natürlicher Quarz sehr beständig und wenig reaktionsfähig ist, werden die Kristalle durch Feinmahlen zerstört und durch Aufreißen des Kristallgitters zusätzliche Reaktionsflächen gebildet [7]. Grundvoraussetzung für eine deutliche Druckfestigkeitssteigerung ist, dass durch die Quarzmehlverwendung der W/B-Wert nicht wesentlich verändert wird. Die Untersuchungen von *Ma* und *Schneider* [76] zeigen, dass bis zu 30 % des Zementgehalts durch Quarzmehl ersetzt werden kann, ohne dass dadurch eine Verringerung der Druckfestigkeit erfolgt. Neben der Verringerung des Zementgehalts verbessert das Quarzmehl auch die Fließfähigkeit der UHPC-Mischung. Die Erhöhung der Fließfähigkeit kann darin liegen, dass die Quarzmehlpartikel etwas kleiner als die Zementteilchen sind und in den ersten Minuten des Mischens weniger Zementbindungsprodukte hergestellt werden.

Nach [77] beteiligt sich das Quarzmehl nur an puzzolanischen Reaktionen, wenn die Wärmebehandlung mit einer Temperatur von mindestens 90 °C länger als acht Stunden dauert. Darüber hinaus verhält sich das Quarzmehl bei einer Probelagerung bei 20 °C inert. Quarzmehl hat den Nachteil, dass es scharfkantige Bruchflächen im Vergleich zum Kalksteinmehl aufweist, was zu negativen Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften des Betons führt [36]. Die Untersuchungen in [78] zeigen, dass die Verwendung von Kalksteinmehl bzw. Hüttensandmehl anstatt Quarzmehl zu einer Reduktion des Fließmittelbedarfs und einer Verbesserung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons führen kann. Dementsprechend können auch Hüttensandmehl und Kalksteinmehl gleichwertig als Alternativen zum Quarzmehl benutzt werden [36].

Zur Herstellung der Probekörper für diese Arbeit wurde Quarzmehl 10000 verwendet.

### 3.2.3 Zusatzstoffe

Aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Verarbeitbarkeit, die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit der UHPC-Betone ist die Verwendung hochfeiner Zusatzstoffe erforderlich [79].

Betonzusatzstoffe sind fein verteilte Stoffe, die im Allgemeinen in großen Mengen dem Beton zugegeben werden. Der Einsatz der Zusatzstoffe beeinflusst die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons. Diese sind vorrangig die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und die

Dichtigkeit des Festbetons. Aufgrund der großen Zugabemenge sind die Zusatzstoffe bei der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen [80].

Die Grundbedingung beim Einsatz von Zusatzstoffe ist, dass das Erhärten des Zements sowie die Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons nicht beeinträchtigt und der Korrosionsschutz der Bewehrung nicht gefährdet wird. Tabelle 3-3 zeigt die in der Norm angegebenen Zusatzstoffe und deren Kennwerte. Da die Zusatzstoffe auch ungünstiges Nebenwirken haben können, dürfen sie niemals ohne Eignungsprüfung im Beton verwendet werden [80].

Die Zusatzstoffe werden in verschiedene Gruppen eingeteilt [64]:

- Anorganische, mineralische Feinstoffe (Typ I & Typ II)
- Organische Zusatzstoffe wie z. B. Kunststoff-Dispersionen
- Farbpigment
- Fasern wie z. B. Stahlfasern, Glasfasern, Kohlstofffasern.

Die Wirkungsweise unterscheidet sie sich in:

- Inaktive (inerte) Zusatzstoffe
- Puzzolanische Zusatzstoffe
- Latent hydraulische Stoffe
- Organische Zusatzstoffe.

Tabelle 3-3: Zusatzstoffe und deren Kennwerte [80]

Zusatzstoffe	Regel	Typ	Spezifische Oberfläche nach Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Schüttdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]
Quarzmehl	DIN EN 12620 [72]	I	≥ 1000	ca. 2,65	1,3...1,5
Kalksteinmehl	DIN EN 12620 [72]		≥ 3500	2,6...2,7	1,0...1,3
Pigmente	DIN EN 12878 [81]		50000...200000	4...5	-
Flugasche	DIN EN 450 [82]	II	2000...8000	2,2...2,4	0,9...1,1
Trass	DIN EN 51043 [83]		≥ 5000	2,4...2,6	0,7...1,0
Hüttensandmehl	DIN EN 15167 [84]		≥ 2750	-	0,9...1,1
Silicastaub <sup>1)</sup>	DIN EN 13263 [85]		150000...350000	ca. 2,2	0,3...0,6
Silicasuspension <sup>1)</sup>	DIN EN 13263 [85]		-	ca. 1,4	-

<sup>1)</sup>Bei der Verwendung der Zemente, die Silicastaub als Hauptbestandteil enthalten, darf Silicastaub (Silicasuspension) nicht als Zusatzstoffe eingesetzt werden.

Laut ÖNORM EN 206 [86] werden zwei Grundtypen der Zusatzstoffe unterschieden:

- Typ I: nahezu inaktive Zusatzstoffe wie z.B. Quarzmehl, Kalksteinmehl oder Pigmente.
- Typ II: puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe wie z.B. Trasse, Flugasche oder Silicastaub.

Anzumerken ist, dass Zusatzstoffe vom Typ II, soweit ihre Eignung nachgewiesen ist, auf den Zementgehalt und W/Z-Wert angerechnet werden dürfen [80].

Es wurden für die vorliegenden Versuche Silicastaub sowie Nanosilica und Flugasche verwendet, um die Einflüsse auf die Frühfestigkeit und Verarbeitbarkeit des UHPCs zu berücksichtigen. Im Folgenden werden diese Stoffe näher erklärt.

### 3.2.3.1 Silicastaub

Silicastaub ist eine extrem feinkörnige, mineralische Beimischung, welche in Form von Microsilica oder Nanosilica der Betonmischung zugefügt wird. Es fällt als Abfallprodukt bei der Gewinnung von Silicium und Ferrosilicium-Legierungen in elektronischen Lichtbögenöfen bei der Abgasreinigung an. Die so gewonnenen Partikel weisen ein kugelförmiges Korn mit einer durchschnittlichen Korngröße von 0,1 bis 0,15  $\mu\text{m}$  auf. Silicastaub besitzt im Vergleich zu Zement eine 30- bis 100-mal geringere Korngröße (Abbildung 3-5).

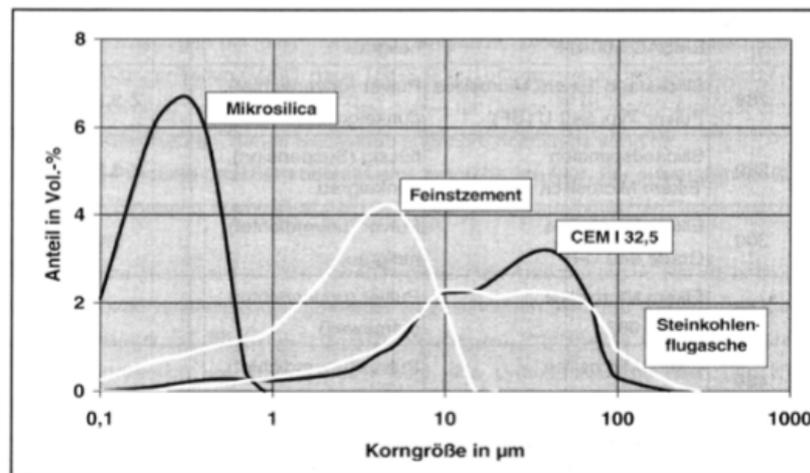


Abbildung 3-5: Korngrößenverteilung bei ausgewählter Stoffe [87]

Silicastaub bewirkt nicht nur eine Verbesserung der Festigkeitseigenschaften, sondern auch zusätzlich eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

Die festigkeits- und dichtigkeitssteigende Wirkung des Silicastaubes ist im Wesentlichen auf folgende Eigenschaften zurückzuführen:

- Aufgrund der Feinheit der Partikel weist Silicastaub einen Mikrofüllereffekt für das Ausfüllen der Porenräume zwischen Zementkörnern auf. Dadurch wird ein gleichmäßiges und dichtes Zementsteingefüge und eine verstärkte Packungsdichte des Betons erreicht werden [3]. Der Füllereffekt von Silicastaub ist in der Abbildung 3-6 dargestellt.

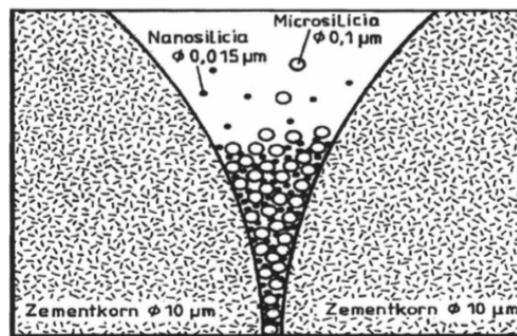


Abbildung 3-6: Füllereffekt von Microsilica und Nanosilica [88]

- Eine weitere wichtige Eigenschaft, die zur Festigkeitssteigerung beiträgt, entsteht durch die puzzolanische Wirkung. Zusätzlich zur Zementhydratation läuft eine sekundäre puzzolanische Reaktion zwischen dem in der primären Hydratation gebildeten Calciumhydroxid  $\text{Ca(OH)}_2$  und dem Silicastaub  $\text{SiO}_2$  ab. Dadurch wird Calciumsilicathydrat CSH gebildet, welches gegenüber den Ausgangsstoffen eine höhere Festigkeit aufweist (Abbildung 3-7) [64].

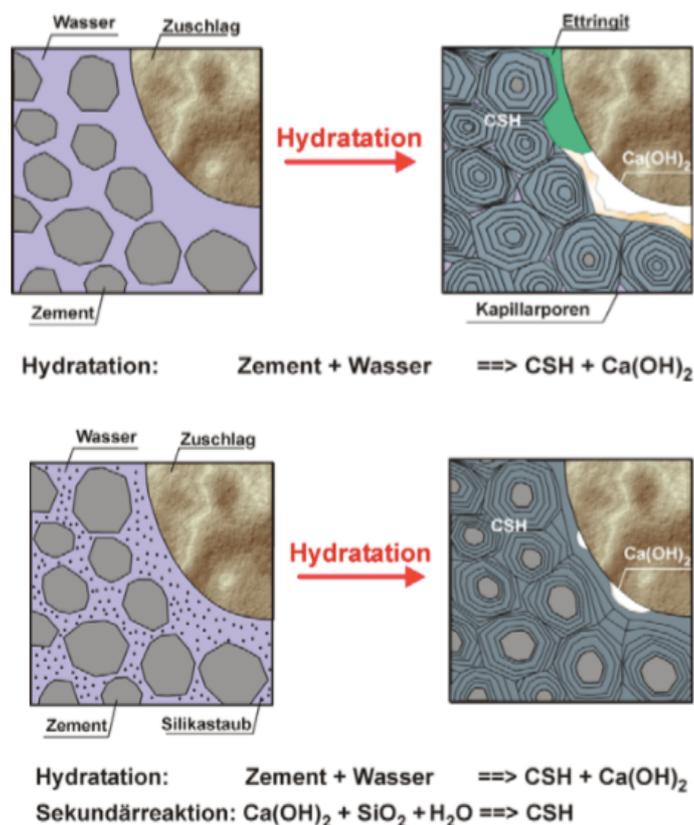


Abbildung 3-7: Hydratation von Normalbeton (oben) und Hydratation von UHPC (unten) [89]

- Die schwache Übergangszone zwischen dem Zementleim und den Gesteinskörnung wird durch die verbesserte Packungsdichte und die Reduzierung des Calcium- und Ettringitgehaltes in der Kontaktzone deutlich verbessert. Dadurch entsteht ein verbesserter Verbund bei der Mikrostruktur [90].
- Der Einsatz von Silicastaub kann aufgrund des Schmierungseffektes zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften führen. Der Schmierungseffekt resultiert aus der nahezu runden Form der Hauptkörner.

Die Zugabemenge für Hochleistungsbetone liegt im Allgemeinen zwischen 5 und 10 % des Zementgewichts, wobei ab 5 % der Menge eine deutliche Steigerung der Festigkeit infolge Silicastaub zu erkennen ist. Wie in der Abbildung 3-8 sichtbar ist, steigt die Festigkeit des Betons mit zunehmendem Silicatanteil, während die Festigkeit des Zementsteins nur leicht ansteigt [91].

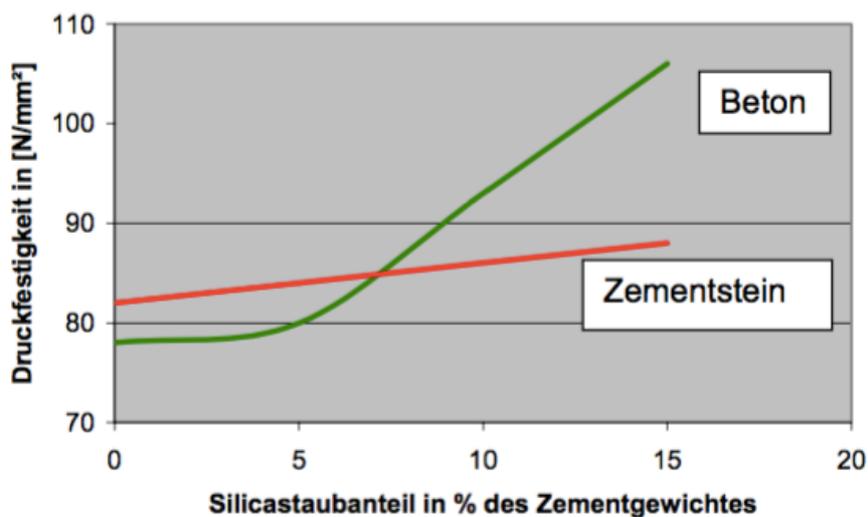


Abbildung 3-8: Einfluss des Silicastaubes auf die Druckfestigkeit [91]

Laut Untersuchungen [92] wurde eine optimale Zugabemenge des Silicastaubes von 20 bis 30 % bezogen auf das Zementgewicht festgelegt. Diese Menge bringt einen verbesserten Verbund zwischen Matrix und Stahlfasern. Eine typische Zugabemenge von Silicastaub für UHPC liegt bei ca. 25 % bezogen auf den Zementgehalt.

Silicastaub wird sowohl pulverförmig in loser und kompakter Form als auch in wässrigen Suspensionen geliefert. Das besondere Qualitätsmerkmal für Silicastäube ist die

Desagglomeration. Deswegen sollte für Hochleistungsbetone unverdichteter Silicastaub verwendet werden. Dementsprechend dürfen Silicatsuspensionen nicht benutzt werden, da ihr Wassergehalt den angestrebten Gesamtwassergehalt der Mischung überschreiten kann. Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit ist zu beachten, dass aufgrund der erhöhten Oberfläche der Zuschläge und Zusatzstoffe durch die Feinheit zur Herstellung des UHPCs mit Silicastaub hochaktive Fließmittel erforderlich sind [68], [93].

Ein Zusatz von Nanopartikeln kann viele Eigenschaften des Betons verbessern und zu einer Erhöhung der Früh- und Endfestigkeit führen. Nanosilica, als eine synthetisch hergestellte Kieselsäure, beträgt einen  $\text{SiO}_2$ -Anteil von annähernd 100 %. Seine puzzolanischen Eigenschaften sind im Vergleich mit Silicastaub gleich, aber seine mittlere Korngröße zehnfach kleiner [36], [94].

Metakaolin wird durch das Erhitzen des natürlich vorkommenden Kaolinit-Minerals im Bereich von 450 bis 800 °C hergestellt. Es ist das doppelt so reaktionsfähig wie Silicastaub mit einer mittlere Korngröße in Abhängigkeit der Mahlfineinheit der Partikelgröße von Silicastaub und Zement [36], [95].

### **3.2.3.2 Flugasche**

Die Verwendung der Flugasche oder Hochofenschlacke ist eine Alternative zum Quarzmehl als Zementersatz. Dies ist feinkörniger Staub, welcher hauptsächlich durch elektrostatische oder mechanische Abscheidung staubartiger Partikel aus Rauchgasen von Feuerungsanlagen gewonnen wird, die mit fein gemahlener Kohle befeuert werden. Flugasche sollte wenigstens zwei Drittel glasige Partikel enthalten und im Wesentlichen aus wirksamen  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sowie geringen Anteilen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und anderen Oxiden bestehen [7]. Sie enthält mindestens 25 M.-% Gehalt an wirksamem  $\text{SiO}_2$  sowie weniger als 5 M.-% Gehalt an reaktionsfähigem CaO und besitzt auch die puzzolanische Eigenschaften sowie die Schmierwirkung von Silicastaub. Die Eigenschaften sind abhängig von der Art und Herkunft der Kohle sowie den Verbrennungsbedingungen [80].

Die Auswirkungen der Flugasche können folgendermaßen zusammengefasst werden [96]:

- Im Frischbeton: Verbesserung der Verarbeitbarkeit, Fließfähigkeit, Pumpbarkeit sowie die Verdichtungswilligkeit.
- Im Festbeton: Verbesserung der Nacherhärtung, Korrosionsschutz der Bewehrung sowie Widerstand gegen Karbonatisierung.

### 3.2.4 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel werden als pulverförmige oder flüssige Zusätze dem Beton beigemischt. Sie beeinflussen durch chemische und/oder physikalische Wirkungen, die Frisch- oder Festbetoneigenschaften wie z. B. die Verarbeitbarkeit, den Frost- bzw. Frosttausalz widerstand, Erstarren, Erhärten oder die Wasseraufnahme. Daher können sie auch gelegentlich zur unerwünschten Änderung anderer Betoneigenschaften führen. Da die Betonzusatzmittel im Vergleich mit Zusatzstoffen in so geringen Mengen zugegeben werden, sind sie prinzipiell nicht als Raumbestandteile des Betons in der Mischrezeptur zu berücksichtigen. Die Höchstzugabemenge beträgt 50 g je kg Zement bei einem Zusatzmittel und 60 g je kg Zement bei mehreren Zusatzmitteln und werden im Allgemeinen in einer Menge von 0,2-2 % des Zementgewichts zugegeben. Übersteigt die Zugabemenge 3 l/m<sup>3</sup> Frischbeton, also mehr als 0,3 Vol. %, dann muss die darin enthaltene Wassermenge beim W/Z-Wert berücksichtigt werden [64], [80].

Betonzusatzmittel werden zurzeit laut Normreihe ÖNORM EN 934-2 [97] in 11 Wirkungsgruppen (Tabelle 3-4) unterteilt.

Tabelle 3-4: Wirkungsgruppe, Kennzeichnung und deren Wirkungen [64], [80]

Wirkungsgruppe	Kurzzeichen	Wirkung
Betonverflüssiger	BV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei gleichem Wassergehalt,</li> <li>• Verbesserung der Festbetoneigenschaften bei Reduktion der Wasserzugabe.</li> </ul>
Fließmittel	FM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stark verflüssigend,</li> <li>• Verminderung des Wasseranspruches,</li> <li>• Verbesserung der Verarbeitbarkeit.</li> </ul>
Luftporenbilder	LP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abbauen der Druck durch die Luftporenerzeugung,</li> <li>• Erhöhung der Frostwiderstand.</li> </ul>
Dichtungsmittel	DM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verminderung der kapillaren Wasseraufnahme.</li> </ul>
Verzögerer	VZ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzögerung des Erstarrens des Zements,</li> <li>• Verlängerung der Verarbeitbarkeit.</li> </ul>
Beschleuniger	BE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschleunigung des Erstarrens bzw. Erhärtens des Zements,</li> <li>• Schnellere Wärmeentwicklung.</li> </ul>
Einpresshilfen	EH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserung der Fließfähigkeit,</li> <li>• Verminderung des Wasseranspruches, sowie des Absetzens.</li> </ul>
Stabilisierer	ST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung des Zementgehaltsvermögens,</li> <li>• Verbesserung der Verarbeitbarkeit,</li> <li>• Verringerung des Entmischens und Blutens.</li> </ul>
Chromatreduzierer	CR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verminderung des löslichen Chroms im Zement.</li> </ul>
Recyclingshilfen	RH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wiederverwendung des Waschwassers.</li> </ul>
Schaumbildner	SB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herstellung eines Schaumbetons durch Einführung eines hohen Gehaltes an Luftporen.</li> </ul>

Grundsätzlich werden alle dieser Zusatzmittel, in Abhängigkeit ihres Einsatzzwecks, zur Herstellung von UHPC verwendet [36]. Folglich werden einige von diesen Betonzusatzmittel, die bei der Durchführung dieser Arbeit verwendet wurden, näher erklärt.

### 3.2.4.1 Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM)

Bei der Herstellung des UHPCs sind Fließmittel, die am häufigsten verwendeten Betonzusatzmittel. Betonverflüssiger und Fließmittel unterscheiden sich wie folgt:

- Betonverflüssiger ermöglichen eine Verminderung des Wasseranspruches bei einer Betonmischung, während die Fließmittel eine wesentliche Verminderung des Wasseranspruches bei gleichbleibender Konsistenz ermöglichen, d.h. die verflüssigende Wirkung von Fließmitteln ist deutlich höher als jene der Betonverflüssiger [36], [97].
- Betonverflüssiger werden auf Basis von Ligninsulfonaten (auch Ligninsulfosäuren) hergestellt, während die neue Generation von Fließmittel auf Basis von Polykondensaten wie z. B. sulfonierte Melaminformaldehydkondensate (MFS) und sulfonierte Naphtalinformaldehydkondensate (NFS) sowie auf Basis von Polycarboxylaten produziert werden [36], [98].

Die Hauptfunktion der Fließmittel im Beton ist, die Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu gewährleisten, ohne dass andere Merkmale wie z. B. die Abbindezeit negativ beeinflusst werden. Um bei der Herstellung des UHPCs trotz geringerer W/Z-Werte von 0,15 bis 0,18 die Verarbeitbarkeit des Betons zu gewährleisten, werden hochleistungsfähige Fließmittel mit höheren Dispersionseigenschaften eingesetzt. Der Vorteil liegt darin, dass sie sich gegenüber herkömmlichen Fließmitteln durch eine wesentlich höhere Wassereinsparung und eine längere Konsistenzerhaltung auszeichnen [38], [99]. Dazu zählen Polyacrylate und Polycarboxylatether (PCE), also die Co-Polymere von Acrylsäure mit Acrylsäureestern. Die PCE unterscheiden sich durch variable und wirkende Seitenketten von den konventionellen Fließmitteltypen die eine geringere verflüssigende Wirkung zeigen [94].

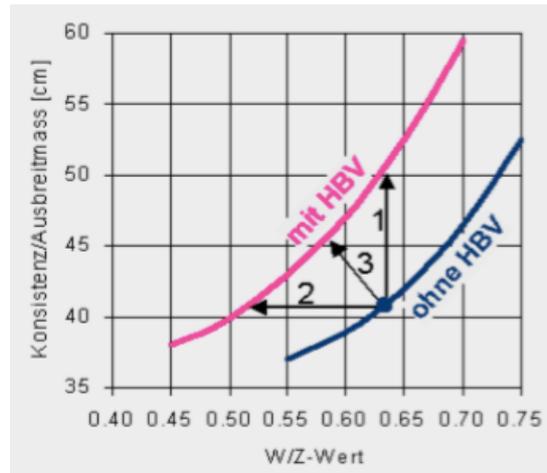


Abbildung 3-9: Abhängigkeit von W/Z-Wert mit oder ohne hochleistungsfähige Fließmittel [7], [100]

Abbildung 3-9 zeigt, dass durch die Verwendung hochleistungsfähiger Fließmittel bei gleichem W/Z-Wert die Verarbeitbarkeit verbessert (1), während bei gleicher Konsistenz der W/Z-Wert vermindert wird (2). Um die geforderte Endqualität mit bester Verarbeitbarkeit zu erreichen (3), lassen sich je nach Anwendung Optimierungen durchführen [7].

Die verflüssigende Wirkung von Fließmittel beruht auf folgenden Mechanismen:

- Die Fließmittelmoleküle werden an der Zementoberfläche absorbiert, sodass eine elektrostatische Abstoßung zwischen den einzelnen Zementpartikeln und eine Reduktion der Oberflächenspannung des Wassers erfolgen. Dadurch entstehen eine Disagglomeration und eine ungehinderte Bewegung der Zementpartikel. Dementsprechend werden die Partikeln dispergiert und Wasser, welches in den Zwischenporen der Agglomerate eingeschlossen war, freigesetzt. Dieses Wasser wird zur Konsistenz- und Verarbeitbarkeitsverbesserung verwendet [36], [38].
- Zunächst bewirken die langen Polyetherketten eine sterische Abstoßkraft und stellen eine zusätzliche räumliche Barriere dar (Abbildung 3-10 (a)). Durch diese Aufladung wird bei einsetzender Hydratation die Verbindung der Zementkörner verhindert, wodurch die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verlängert wird (Abbildung 3-10 (b)). Diese Wirkung wird aber bei einem weiterem Anwachsen der Zementkörner wieder aufgehoben [68], [90].

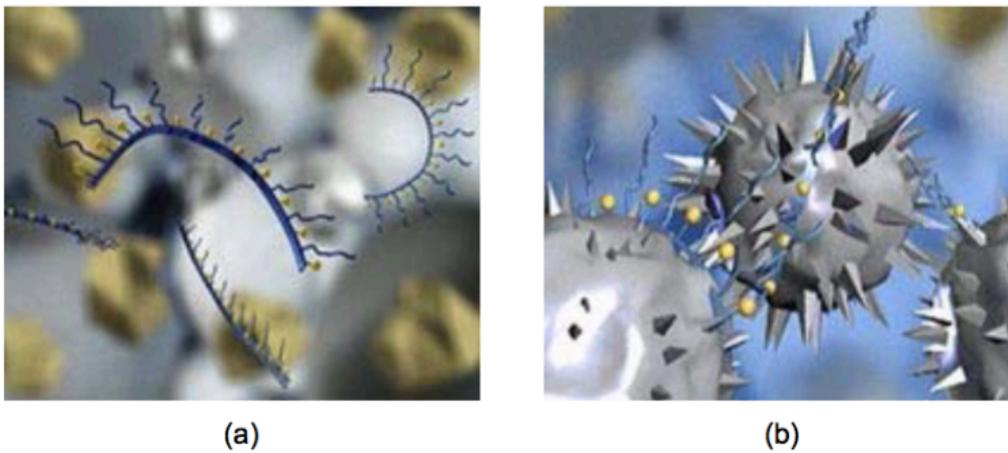


Abbildung 3-10: Wirkungsweise der Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis [101]

Ein Nachteil von Fließmittel auf PCE-Basis ist die verhältnismäßig starke Verzögerung der Hydratation.

Abbildung 3-11 zeigt den Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung des Zementmatrix mit verschiedenen Dosierungen von Fließmittel auf PCE-Basis [158].

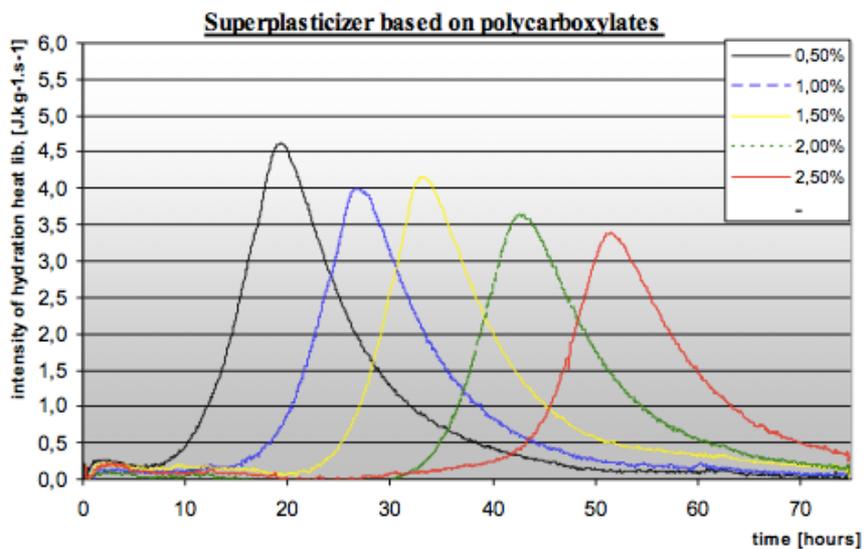


Abbildung 3-11: Verzögernde Wirkung der PCE-Fließmittel auf die Hydratationswärmeentwicklung [158]

Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Hydratationswärmeentwicklung immer später beginnt, je höher der Anteil an PCE-Fließmittel ist. Die Reaktionskinetik an sich ändert sich jedoch nicht wesentlich. Das ist auf einen physikalischen Effekt der Polycarboxylate

zurückzuführen. Während der Wirkung des Fließmittels wird das Eindringen von Wassermolekülen in die Oberfläche der Zementkörner verhindert. Danach läuft die Hydratation in der normalen Intensität ab.

Die Untersuchungen in [158] wurden an Zementleim mit CEM I 42,5 R und einem W/B-Wert von 0,38 durchgeführt. Die maximale Fließmitteldosierung lag bei 2,5% bezogen auf die Zementmasse. UHPC weist jedoch im Allgemeinen einen deutlich niedrigeren W/Z-Wert auf, sodass die Fließmitteldosierung üblicherweise bei 4% oder mehr liegt.

Somit wird klar, dass die Festigkeitsentwicklung von UHPC relativ spät beginnt und ohne besondere Maßnahmen keine nennenswerte Festigkeit während der ersten Stunden erreicht wird.

#### **3.2.4.2 Beschleuniger (BE)**

Die Betonbeschleuniger sind in der Lage, das Erstarren und Erhärten, also den Abbindeprozess des Betons, zu beschleunigen. Sie bewirken aber auch eine schnellere Wärmeentwicklung [80].

Man unterteilt Beschleuniger folgendermaßen [80]:

- Erstarrungsbeschleuniger: Sie bewirken eine Verringerung der Zeit, bis das Erstarren beginnt (also den Übergang zwischen plastischem und festem Zustand).
- Erhärtungsbeschleuniger: Sie bewirken eine Beschleunigung der Frühfestigkeit mit oder ohne Einfluss auf die Erstarrungszeit.

Das Ziel beim Einsatz eines Beschleunigers ist es, möglichst schnell eine ausreichende Betonfestigkeit zu bekommen, um den Beton früher ausschalen zu können.

Mögliche Nebenwirkungen beim Einsatz eines Beschleunigers sind die Verminderung der Endfestigkeit des Betons, d.h. eine geringere Nacherhärtung, eine geringere Wasserdurchlässigkeit sowie das „Umschlagen“. Unter „Umschlagen“ versteht man eine Umkehrung der Wirkung bei einer falschen Dosierung, sodass das Mittel als Verzögerer wirkt [80].

#### **3.2.4.3 Verzögerer (VZ)**

Verzögerer bewirken eine Verlangsamung beim Erstarren des Zementleims. Dadurch bleibt mehr Zeit, um den Beton zu Verarbeiten. Die Wirkungsweise eines Verzögerers beruht darauf, dass die chemische Reaktionen des Zements langsamer abläuft und gleichzeitig die

Wärmeentwicklung reduziert wird. Eingesetzt werden die Verzögerer, um die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, die Wasserdurchlässigkeit, die Nacherhärtung und die Endfestigkeit des Betons positiv zu beeinflussen [64]. Mögliche Nebenwirkungen sind starke Ausblühungen, erhöhte Neigung zum Schwinden sowie Farbunterschiede auf der Betonoberfläche. Bei der Dosierung des Mittels muss besonders darauf geachtet werden, dass die Stoffe nicht zum „Umschlagen“ neigen, da die verzögernde Wirkung bei zu hohen Zugabe in einer beschleunigende Wirkung umschlagen kann [80].

### 3.2.5 Faser

UHPC besitzt eine hohe Druckfestigkeit, ist aber sehr spröde. Zur Verbesserung der Duktilität des Betons werden Fasern, vorwiegend Stahl- und Polypropylen-Fasern zugesetzt. Fasern werden aber auch eingesetzt, um Zugspannung im Beton aufzunehmen [7]. Die typische Zugabemenge von Fasern liegt zwischen 1,5 und 3 Vol.-% [75]. Fasern werden aus unterschiedlichen Stoffen mit unterschiedlichen Größen und Formen hergestellt. Studien unter Verwendung von verschiedenen Fasermaterialien, Mengen, Größen und Formen wurden vielfach durchgeführt, da die Abmessungen der Fasern eine sehr große Auswirkung auf die Festigkeitseigenschaften haben.

Die verschiedenen Faserarten, die üblicherweise für Beton verwendet werden, lassen sich folgendermaßen einteilen [36], [102]:

- Metallfasern:
  - Stahldrahtfasern
  - Spanfasern
  - Blechfasern
- Synthetische Fasern:
  - Glasfasern
  - Kunststofffasern:
    - Polypropylenfasern (PP)
    - Polyacrylnitrilfasern (PAN)
    - Polyvinylalkoholfasern (PVA)
    - Polyethylenfasern (PE)

- Aramidfasern
  - Kohlenstofffasern
- Naturfasern:
- Keramische Fasern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keinerlei Fasern verwendet.

### 3.2.6 Anmachwasser

#### 3.2.6.1 Allgemeines

Als Zugabewasser für UHPC kann jedes Trinkwasser verwendet werden. Dieses Wasser darf keine Bestandteile wie z.B. Öle, Fette, Salzen, Säuren oder Zucker, welche das Erhärten des Betons beeinflussen oder die Bewehrung korrodieren können, enthalten. Das Restwasser, das zum Auswaschen von Restbeton oder Gesteinskörnung und zum Reinigen von Mischertrommeln und Betonpumpen verwendet werden, oder das Niederschlagwasser sind zur Herstellung des UHPCs nicht geeignet [38].

Der Gesamtwassergehalt setzt sich aus der Feuchtigkeit der Gesteinskörnungen, dem Wasseranteil der Zusatzmittel und Zusatzstoffe sowie dem Zugabewasser zusammen [62]. Abbildung 3-12 zeigt die Aufteilung des Gesamtwassergehalts im Beton. Bei den in der Literatur angegebenen UHPC-Mischungen liegt die Gesamtwassermenge in einem Bereich von 140 bis 220 l/m<sup>3</sup> meist 180 bis 200 l/m<sup>3</sup> [1], [36].



Abbildung 3-12: Aufteilung des Gesamtwassergehalts im Beton [103]

Für die Herstellung der Probekörper bei dieser Arbeit wurde Wasser aus dem öffentlichen Netz ohne weitere Untersuchung verwendet.

### **3.2.6.2 W/Z - Wert und W/B- Wert**

Der W/Z-Wert, also das Verhältnis von Masse des Wassers zu Masse des Zements, ist in der Regel der Hauptindikator für UHPC-Herstellung.

Im Allgemeinen werden bei der vollständigen Hydratation des Zements nur etwa 25 % Masse des Wassers chemisch gebunden und 15 % physikalisch in den Gelporen gebunden. Dieses Gelwasser ist aufgrund der starken, physikalisch bedingten Bindung für eine weitere Hydratation nicht mehr verfügbar. Aus diesem Grund benötigt der Zement theoretisch einen W/Z-Wert von 0,25 und praktisch von 0,4 zur vollständigen Hydratation [68], [104]. Obwohl eine vollständige Hydratation bei den W/Z-Werten unter 0,4 nicht möglich ist, kann UHPC mit einem W/Z-Wert  $< 0,2$  erfolgreich hergestellt werden [36]. Untersuchungen von *Richard* und *Cheyrezy* [75] zeigen, dass der Hydratationsgrad des Zements bei niedrigen W/Z-Werten im Bereich von 0,4 bis 0,6 liegt. Bei diesen niedrigen W/Z-Werten werden die großen Zementpartikel an der Kornoberfläche hydratisiert und die nicht hydratisierten Kerne im Inneren des Zementsteins liegen somit als feste und dichte Mikrokörnung eingebettet im Gefüge vor. Anzumerken ist, dass bei niedrigen W/Z-Werten der Einsatz von Verflüssigern bzw. Fließmittel notwendig ist, damit der Zement nicht verklumpt und um die Verarbeitbarkeit zu ermöglichen [68].

Aufgrund der Verwendung von puzzolanischen und latent hydraulischen Zusatzstoffen bei UHPC ist es erforderlich, diese Stoffe auch bei der Berechnung des Wasserbedarfs zu berücksichtigen. Daher wurde laut ÖNORM B 4710-1 [62] der Begriff W/Z-Wert durch den Begriff W/B-Wert abgelöst. Darunter versteht man das Verhältnis von Wasser zu Bindemittel. Das Bindemittel beinhaltet außer Zement auch andere hydraulisch wirksame Zusatzstoffe, die dem Beton beigemischt werden. Darunter fallen z. B. Silicastaub und Flugasche. Beim Normalbeton liegt dieser Wert zwischen 0,4 und 0,65. Prinzipiell gilt, wie beim W/Z-Wert, dass die Festigkeit mit niedrigem W/B-Wert zunimmt. Daher versucht man, mit Betonverflüssigern und/oder Fließmittel den W/B-Wert zu senken [64], [68].

Zusätzlich zum W/Z-Wert wurde der volumenbezogene Wasser/Feinstteilwert ( $V_w/V_F$ ) definiert. Dieser Wert hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften [36]. Beim  $V_w/V_F$ -Verhältnis werden als Feinstteile alle reaktiven und inerten Bestandteile

mit einer Korngröße kleiner als 125 µm bezeichnet [75]. Daneben kann dieser Wert auch ein indirektes Maß für die Kornzusammensetzung und den mit Wasser zu füllenden Hohlraum zwischen den Partikeln darstellen [36]. Dementsprechend kann der Zementgehalt durch die Verwendung von kornoptimalen Ersatzstoffen ohne Festigkeitsverlust verringert werden [36] [75].

Die in dieser Arbeit hergestellten UHPC-Mischungen haben einen W/B-Wert von 0,224.

### **3.3 Wahl der Ausgangsstoffe**

#### **3.3.1 Verwendete Zementsorten**

Es wurden bei den durchgeführten Versuchsreihen die Zementsorten verwendet, welche im Allgemeinen höhere Frühfestigkeiten ermöglichen.

##### **3.3.1.1 Portlandzement – C<sub>3</sub>A frei**

Der C<sub>3</sub>A-freie Portlandzement ist gemäß ÖNORM EN 197-1 [69] ein hydraulisch erhärtendes Bindemittel, welche nach dem Erhärten auch unter dem Wasser fest und beständig bleibt und einen hohen Sulfatwiderstand aufweist. Er ist meistens graues Pulver, welches im industriellen Prozess aus Rohmaterialien Kalkstein, Ton, Sand und Eisenerz hergestellt wird. Aufgrund folgender Eigenschaften ist dieser Zement diejenige Zementsorte, die am häufigsten zur Herstellung des UHPCs eingesetzt wird [105]:

- geringerer Wasseranspruch,
- nicht zu schnelle Erhärtung,
- geringere Wärmeentwicklung und
- relativ hohe Festigkeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Versuchen mit Portlandzement CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei hergestellt. Der wichtigste Hauptanteil dieses Zements ist Portlandzementklinker mit einem Anteil von 90 %. Der Portlandzement CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei ist ein sehr fein gemahlener Zement und übertrifft alle Anforderungen an die Festigkeitsklasse 52,5 N, insbesondere die Anforderungen an die Frühfestigkeiten. Daher wird dieser für Betone eingesetzt, bei denen höhere Festigkeiten erreicht werden müssen und/oder hohe Frühfestigkeiten erforderlich sind [106].

Die Produkteigenschaften können folgendermaßen zusammengefasst werden [106]:

- Ein Zement mit der höchsten Festigkeitsklasse und mit einem schnellen Anstieg der Frühfestigkeit
- kürzere Verarbeitungszeit und
- höhere Festigkeit.

Die technische Daten von Portlandzement CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei werden in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5: Eigenschaften des Portlandzements CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei nach ÖNORM EN 197-1 [69]

Bezeichnung	Raumbeständigkeit [mm]	Erstarrungsbeginn [min]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
			Nach 2 Tagen	Nach 28 Tagen
CEM I 52,5 N	max. 10	ca.45	min. 20	min. 52,5

### 3.3.1.2 Schnellzement – Supracem

Als Schnellzement werden im Allgemeinen Aluminat-Zemente verstanden. In diesem Fall wird jedoch ein spezieller, schnellerhärtender Portlandzement verwendet, welcher im Vergleich zum gewöhnlichen Portlandzement besonders schneller abbindet. Diese Zemente besitzen eine kurze Verarbeitungszeit mit einer relativ großen Festigkeit. Mit Schnellzement hergestellte Betone haben in der Regel eine Verarbeitungszeit von 2-3 Minuten, welche um etwa 50 % kürzer ist. Eine Erstarrung tritt bereits nach 5-7 Minuten ein. Es gelten aber auch Zemente mit einer Verarbeitungszeit bis zu einer Stunde als Schnellzement [108].

In den später beschriebenen Versuchen wurde eine Versuchsreihe unter Verwendung von Supracem als Schnellzement durchgeführt. Besondere Eigenschaften des Supracems sind unter anderem hohe Früh- und Endfestigkeit des Betons, schnelles und gut regulierbares Erstarren, geringes Schwinden bzw. leichtes Quellen und gute Fließfähigkeit. Ebenso dürfen alle betonüblichen Zusatzmittel wie z. B. Beschleuniger, Verzögerer usw. nach entsprechendem Eignungstest beim Schnellzement verwendet werden [105]. Die wesentlichen Merkmale des Supracems sind in der Tabelle 3-6 angegeben.

Tabelle 3-6: Technische Daten des Supracems [105]

Bezeichnung	W/Z-Wert	Erstarrungsbeginn [min]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		
			Nach 1 Tagen	Nach 2 Tagen	Nach 28 Tagen
CEM I 52,5 N	ca. 0,35	ca. 4	ca. 39	ca. 44	ca. 63

### 3.3.1.3 Weißzement – Holcimweiß

Der Weißzement gehört auch zur Gruppe der Portlandzement, der sich durch seinen geringeren Eisenoxidgehalt auszeichnet [109]. Weißzemente sind [110]:

- extrem hochwertig
- Chromatarm
- geringer Eisenoxidgehalt
- güteüberwacht und
- optimal als Sichtbeton oder Putz.

Der verwendete Weißzement bei der durchgeführten Versuchsreihe ist ein hochwertiger und rein weißer Portlandzement CEM I 52,5 N der Fa. Holcim mit einem Portlandzementklinker von besonderer chemischer Zusammensetzung und hoher Früh- und Endfestigkeit. Es kann wie Portlandzement CEM I 52,5 N uneingeschränkt für Beton verwendet werden [111]. Tabelle 3-7 zeigt die Biegezug- und Druckfestigkeitsentwicklung des Weißzements laut ÖNORM EN 197-1 [69].

Tabelle 3-7: Biegezug- und Druckfestigkeitsentwicklung beim Weißzement nach ÖNORM 197-1 [69]

Bezeichnung	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Nach 2 Tagen	Nach 28 Tagen	Nach 2 Tagen	Nach 28 Tagen
CEM I 52,5 N	≥ 5	≥ 6	≥ 30	≥ 56

### 3.3.1.4 Spezialzement für Spritzbeton – Der Blaue SP der Fa. LAFARGE

Spritzbetonzemente oder Spritzbindemittel sind schnell erstarrende, umweltfreundliche Zemente, die keine Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern benötigen und eine sehr rasche Festigkeitsentwicklung besitzen. Das Prinzip basiert im Wesentlichen darauf, dass bei der Herstellung auf die Zumahlung von Rohgips zum Klinker zur Abbindezeitverzögerung verzichtet wird [112]. Dieser Zement ist ein Portlandzement, der einen hervorragenden Erhärtungsverlauf besitzt und sich durch eine gute Verarbeitbarkeit und eine hohe Wärmeentwicklung auszeichnet [69]. Diese Zementsorte eignet sich infolge ihrer Zusammensetzung sowie besonderer Eigenschaften wie z. B. sehr rasche Erhärtung [113]. Die wesentlichen Merkmale sind in der Tabelle 3-8 zusammengefasst.

Tabelle 3-8: Technische Daten des Spritzbetonzements nach ÖNORM EN 197-1 [69]

Bezeichnung	Raumbeständigkeit [mm]	Erstarrungsbeginn [min]	Anteilgehalt [Masse %]	
			Sulfat	Chlorid
CEM I 52,5 R	≤ 10	≥ 45	≤ 4	≤ 0,10

### 3.3.2 Verwendeter Beschleuniger – XSEED 100 der Fa. BASF

Die Betonbeschleuniger fördern in hohem Maße die Frühfestigkeiten des Betons, ohne die weiteren Eigenschaften des Betons und insbesondere die Endfestigkeit zu beeinträchtigen. Um eine höhere Frühfestigkeit mit ausreichender Verarbeitbarkeit beim UHPC zu erreichen, wurde bei dieser Arbeit ein Beschleuniger verwendet. Der verwendete Beschleuniger erfüllt die Anforderungen an Betonzusatzmittel nach ÖNORM EN 934-2 [97] und eignet sich für die Herstellung des UHPCs.

X-Seed ist ein Erhärtungsbeschleuniger für zementgebundene Systeme auf Basis von Calcium-Silikat-Hydrat-Kristallen und besteht aus synthetisch produzierten Kristallkeimen in einer wässrigen Dispersion. Es ist die Hauptkomponente des BASF Crystal Hardening Konzepts [97], das aus synthetisch produzierten Kristallkeimen in einer wässrigen Dispersion besteht. Die chemischen und technischen Kennwerte dieses Beschleunigers sind in Tabelle 3-9 zusammengefasst. X-Seed kann die Frühverfestigung des Betons in allen Temperaturbereichen laut Firmenangaben verdoppeln (Abbildung 3-13) und die Frühfestigkeitsentwicklung des Betons im Bereich von sechs bis zwölf Stunden deutlich beschleunigen, ohne dass die Endfestigkeit und die Dauerhaftigkeit des Betons herabgesetzt werden [115].

Tabelle 3-9: Chemische und technische Daten des X-Seed [116]

Chemische Kennwerte (Anteilgehalt)			Technische Daten		
Chlorid [M-%]	Alkali [M-%]	Nitrat [M-%]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	PH-Wert [-]	Feststoffgehalt [M-%]
0,10	4	10	1,35	11,5	21,5

Die beschleunigte Erhärtung des Betons hat folgende Vorteile:

- Höhere Festigkeit bei gleicher Temperatur
- gleiche Festigkeit bei niedriger Temperatur

- gleiche Festigkeit mit langsamem Zement
- gleiche Festigkeit ohne Wärmebehandlung
- gleiche Festigkeit bei höherem W/Z-Wert und
- früheres Entschalen [115].

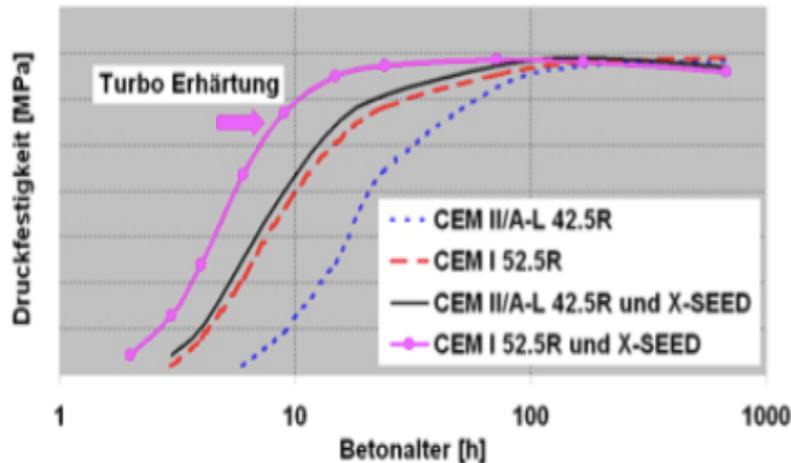


Abbildung 3-13: Festigkeitsentwicklung von Beton-Zementeffekt [116]

Der X-Seed ist im Allgemeinen kompatibel mit Betonfließmitteln, außer in Kombination mit Fließmitteln auf Basis Naphthalinsulfonat. Anzumerken ist, dass der X-Seed für Beton nach ÖNORM EN 206-1 [86] sowie für Spritzbeton nach ÖNORM EN 14487-1 [117] zulässig ist. Er darf aber nicht in Spannbeton verwendet werden [116].

### 3.3.3 Verwendete Verzögerer – Master Pozzolith R 20

In der Betonherstellung werden verschiedene, sowohl organische als auch anorganische, Chemikalien verwendet, die im Beton eine verzögernde Wirkung hervorrufen. Diese Mittel lassen sich nach ihrer Wirkung sowie ihrer Nebenwirkung wie z. B. einer zusätzliche Verflüssigung des Betons unterscheiden. Das Ziel der Anwendung ist, die Verarbeitbarkeit des Betons zu steigern, ohne den Wassergehalt zu erhöhen. Master Pozzolith R20 erlaubt durch die Dosierungswahl, den Endpunkt der Verarbeitbarkeit des Betons entsprechend der Anforderungen zu verzögern. Diese Wirkung hängt von Zementart, Temperatur, W/Z-Wert und Konsistenz ab. Zusätzlich wirkt dieser Verzögerer bei höheren Dosierungen

plastifizierend, sodass Anmachwasser eingepresst werden kann. Die Verwendung von Verzögerern besitzt folgende Vorteile [115]:

- Sichere Anwendungen
- zielsichere Verzögerung des Erstarrungsbeginns
- plastifizierende Wirkung und
- erhöhte Endfestigkeit.

Es wurde bei einer Versuchsreihe dieser Arbeit untersucht, ob die Verwendung dieses Verzögerers hilfreich wäre, um das Ziel der Arbeit zu erreichen.

### 3.3.4 Verwendete Silicastaube

Silicastaub wird hauptsächlich zur Vergütung von trockenem zementgebundenen Mörtel verwendet. Die zwei Arten von Silicastaub, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, werden hier näher erläutert.

#### 3.3.4.1 Silicastaub 1 – Microsilica Grade 940 U der Fa. ELKEM

Microsilica Grade 940 U ist ein graues, unverdichtetes Pulver auf der Rohstoffbasis von Siliciumdioxid [85]. Es wirkt physikalisch als Füller, um die Packungsdichte der Mischung zu optimieren, und chemisch als hochaktives Puzzolan. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften von ELKEM 940 U sind in der Tabelle 3-10 ersichtlich.

Tabelle 3-10: Wesentliche Kenndaten von Microsilica ELKEM 940 U [115]

Anteilgehalt			Siebrückstand auf 45µm Sieb [%]	Glühverlust LOI [M-%]	Schüttdichte Unverdichtet [Kg/m <sup>3</sup> ]
Chlorid [M-%]	SiO <sub>2</sub> [M-%]	H <sub>2</sub> O [M-%]			
max. 0,1	> 90	< 1,0	< 1,5	< 3	200-350

Wird ELKEM 940 U im Beton verwendet, dann sollte es dem Mischgut entweder vor dem Zement oder nach der Wasserzugabe zugegeben werden. Es wurden aber in dieser durchgeführten Arbeit alle Silicastaube vor der Mischung dem Zement beigegeben und dann gleichzeitig gemischt. Laut Hersteller sollte die Gesamtmischzeit mindestens drei Minuten betragen. Anzumerken ist, dass beim Einsatz von ELKEM 940 U in weichen bis fließfähigen Mischungen die Verwendung eines Betonverflüssigers bzw. eines Fließmittels erforderlich ist [115].

### 3.3.4.2 Silicastaub 2 – Microwhite der Fa. ELKEM

Microwhite ist eine hochreine, weiße Kieselsäure mit besonderen Eigenschaften. Die Teilchengrößen sind ca. 100 mal kleiner als jene von Zement und andere puzzolanische Zusatzmitteln. Der Einsatz vom Microwhite verbessert die Eigenschaften sowohl von Frisch- als auch von Festbeton. Die wichtigste Eigenschaft ist dabei die verringerte Permeabilität, die das Eindringen von Wasser oder von Chemikalien reduziert und negative Einwirkungen wie z.B. Sulfatangriffe senkt. Durch die puzzolanische Wirkung, also die Reaktion mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , wird das Bluten reduziert und die Bindung der Zementmatrix zu den Aggregaten verbessert [119].

Die Dosierung hängt von der Anwendung und der gewünschten Leistung ab. Laut Herstellern ist die empfohlene Dosierung 5-10 % bezogen auf das Zementgewicht. Der Einsatz von 5 % ist üblicherweise ausreichend für die meisten Mischungen. Microwhite eignet sich für alle Hochleistungsbetone, bei denen die Vorteile von Silicastaub nützlich sind wie z.B.:

- höhere Festigkeiten
- erhöhte Dauerhaftigkeit und größere Chemikalien- und Abriebbeständigkeit [118].

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Microwhite sind in der Tabelle 3-11 angegeben.

Tabelle 3-11: Wesentliche Merkmale von Microwhite [118]

Spezifische Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	SiO <sub>2</sub> [M-%]	H <sub>2</sub> O [M-%]	Schüttdichte [Kg/m <sup>3</sup> ]
			Verdichtet
>15	> 90	< 1,0	500-700

### 3.3.5 Verwendete Flugasche – Microsit M10

Für besonders hochwertige zementgebundene Baustoffe wird Flugasche auf Basis von Steinkohlenflugasche als Zusatzstoff verwendet. Im Rahmen einer der durchgeführten Versuchsreihen wurde eine Mischung hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit und Festigkeitsentwicklung unter Verwendung von Microsit M10 untersucht. Dieser kugelförmige Zusatzstoff besteht im Wesentlichen aus SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und besitzt eine Partikelgröße  $\leq 10 \mu\text{m}$ , welche direkt unterhalb der Korngrößenverteilung von Zement liegt, womit Hochleistungsbetone hergestellt werden können. Chemische und physikalische

Merkmale des Microsits M10 sind in der Tabelle 3-12 ersichtlich [120], [121].

Tabelle 3-12: Wesentliche Merkmale von Microsit M10 [121]

Chemische Kennwerte (Anteilgehalt)				Physikalische Kennwerte		
SiO <sub>2</sub> [M-%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [M-%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [M-%]	CaO [M-%]	Kornrohddichte [Kg/dm <sup>3</sup> ]	Schüttdichte [Kg/dm <sup>3</sup> ]	
					lose	gerüttelt
52	26	6	5	2,49	0,66	0,87

Eine besondere Eigenschaft vom Microsit ist die sehr feine, stetige und definierte Sieblinie. Die Sieblinie des Betons kann dadurch zielgerichtet im Feinkornbereich optimiert und die Packungsdichte erhöht werden. Dies führt in weiterer Folge zu einer Verminderung des Wasserbedarfs und zu einer Verbesserung der Betoneigenschaften [121].

Microsit eignet sich aufgrund der hervorragenden Verarbeitungseigenschaften und der hohen Reaktivität für die Herstellung eines UHPCs. Durch die spezielle Kornverteilung sowie der nahezu idealen Kugelform können die Frischbetoneigenschaften hinsichtlich Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit sowie die Festbetoneigenschaften bezüglich Festigkeit und Dichtigkeit verbessert werden und führen zu einer besseren Beständigkeit gegen chemischen und physikalischen Angriffe [120].

Der Dosierungsbereich wird laut Hersteller mit 8 bis 15 %, bezogen auf das Zementgewicht, empfohlen. Weiter anzumerken ist, dass dieser Zusatzstoff mit Portlandzement und hydraulischen Bindern verträglich ist [121].

### 3.3.6 Verwendete Nanosilica

Es wurden bei dieser Arbeit zwei Arten von Nanosilica verwendet.

#### 3.3.6.1 Nanosilica 1– KS 300 der Fa. Bagrat

Dieses pulverförmige Nanosilica gehört zur Gruppe der hydratisierten Siliciumdioxide [122]. KS 300 ist eine rein anorganisch gefällte Kieselsäure mit einer Mediumoberfläche in Granulatform (Tabelle 3-13).

Tabelle 3-13: Technische Eigenschaften von KS 300 [122]

Spezifische Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	PH-Wert [-]	Schüttdichte [Kg/m <sup>3</sup> ]	Feuchtigkeitsgehalt [M-%]
125	6,9	330	5

Dieser weißfarbige Zusatzstoff wird zur Herstellung von gleichmäßigen und hellen Sichtbetonen sowie zur Herstellung von Betonen verwendet, bei denen eine hohe Festigkeitssteigerung erforderlich ist [122].

### 3.3.6.2 Nanosilica 2 – Aerosil 130

Das zweite, im Zuge dieser Arbeit verwendete Nanosilica ist eine hydrophile pyrogene Kieselsäure mit einer spezifischen Oberfläche von 130 m<sup>2</sup>/g. Aerosil ist ein synthetisch hergestelltes, kolloid Material mit definierten Eigenschaften und Teilchengröße, welches als Füllstoff in Kunststoffen verwendet wird. Es besteht vollständig aus amorphen Siliciumdioxid-Partikeln (SiO<sub>2</sub>), die zu größeren Einheiten aggregiert sind. Die hydrophobe Natur von Aerosil bedeutet, dass die Agglomerate leichter auseinander gebrochen werden können. Durch den Einsatz von Nanosilica 2 können die Frisch- und Festbetoneigenschaften verbessert werden [123].

Die physikalisch-chemischen Daten sind in der Tabelle 3-14 eingegeben.

Tabelle 3-14: Technische Eigenschaften von Aerosil 130 [123]

Spezifische Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	PH-Wert [-]	Stampdichte [g/l]	SiO <sub>2</sub> -Gehalt [M-%]
105-155	3,7-4,5	ca. 50	> 99,8

### 3.3.7 Verwendete Fließmittel

Es wurden bei dieser Arbeit zwei Arten von Fließmittel verwendet, die beide auf Polycarboxylatether-Basis hergestellt wurden. Die PCE-Basisformulierungen unterscheiden sich in ihrer Molekülstruktur. Die veränderbaren Parameter bei diesem Fließmittel sind:

- die Art der Monomere in der Hauptkette
- die Länge der Hauptkette
- die Anzahl der negativen Ladungen in der Hauptkette, also die Ladungsdichte
- der Aufbau der Seitenkette und
- die Länge der Seitenkette im Vergleich zur Hauptkette [115].

Die gezielten PCE-Basisformulierungen ermöglichen für jeden Zementtyp und für jede gewünschte Verflüssigungswirkung sowie Konsistenzhaltung ein maßgeschneidertes Fließmittel herzustellen [115].

### 3.3.7.1 Fließmittel 1 – Master Glenium ACE 430 der Fa. BASF

Das sogenannte ACE 430 ist aufgrund seiner guten Wirksamkeit ein ideales Zusatzmittel für die Herstellung von frühhochfesten Betonen (Tabelle 3-15). Dadurch wird die Herstellung von dauerhaften Betone mit sehr niedrigem W/Z-Wert und hohen Früh- und Endfestigkeiten ermöglicht. Durch die besondere Molekülstruktur ergibt sich für die Hydratationsreaktion der Zementpartikel eine größere Oberfläche, eine sehr rasche Adsorption der Moleküle an den Zementteilchen und ein effizienter Dispergierungseffekt (elektrostatische Stabilisierung). Alle dieser Effekte ermöglichen eine frühere Hydratationsreaktion und eine deutlich raschere Festigkeitsentwicklung [115].

Wichtigste Vorteile sind:

- sehr hohe Verflüssigungsleistung
- hohe Dispergierung
- verbesserte Betoneigenschaften,
- sehr gute Frühfestigkeitsentwicklung
- Verkürzung der Ausschulfristen
- keine Verzögerung der Frühfestigkeitsentwicklung und
- hohe Endfestigkeit [115].

Die empfohlene Zugabemenge ist 0,3 bis 1,0 %. Die Beigabe im Mischer sollte nach der Beendigung der Anmachwasserzugabe mit einer Mindestmischdauer von einer Minute sein. Für die Herstellung aller Versuchsmischungen dieser Arbeit wurde jeweil die Hälfte der Fließmittelmenge ins Anmachwasser gegeben und gleichzeitig mit dem Wasser verarbeitet. Es ist zu beachten, dass eine Kombination mit Fließmitte und/oder Betonverflüssiger, welche Naphtalin enthalten, nicht erlaubt ist.

Tabelle 3-15: Chemische und technische Daten von ACE 430 [115]

Chemische Kennwerte (Anteilgehalt)		Technische Daten	
Chlorid [M-%]	Alkali [M-%]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Feststoffgehalt [M-%]
max. 0,10	max. 2,0	1,06	28

### 3.3.7.2 Fließmittel 2 – Master Glenium ACE 500 der Fa. BASF

Das zweite Hochleistungsfließmittel (Tabelle 3-16) bewirkt durch seine Molekülstruktur eine gute verflüssigende Wirkung im Frischbeton, ein moderates Konsistenzhalten und eine geringe Klebrigkeit. Zusätzlich führte es zu einer Frühfestigkeitsentwicklung ohne Endfestigkeitsbeeinträchtigung [115].

Tabelle 3-16: Chemische und technische Daten von ACE 500 [115]

Chemische Kennwerte (Anteilgehalt)		Technische Daten	
Chlorid [M-%]	Alkali [M-%]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	PH-Wert [-]
max.0,10	max.1,0	1,05	5,5 ± 1,0

Die besonderen Wirkungen, die im Rahmen dieser Arbeit wichtig sind, setzen sich zusammen aus:

- sehr gute Verflüssigungseigenschaften
- geringere Klebrigkeit des Frischbetons
- höhere Frühfestigkeit des Betons
- Verkürzung der Aushärtungszeiten und
- die Möglichkeit der Verwendung von weniger reaktiven Zementsorten [115].

Für den Einsatz in UHPC muss ACE 500 etwas höher dosiert werden als ACE 430, um die gleiche Fließfähigkeit zu erreichen.

### 3.3.7.3 Betonkonsistenzhalter – Glenium SKY 911 der Fa. BASF

Der bei dieser Arbeit verwendete Konsistenzhalter besteht auf der Basis von Polycarboxylathether (PCE) (Tabelle 3-17). Da der Konsistenzhalter nur ganz wenig zur Anfangsverflüssigung beiträgt, sollte er in einer Kombination mit anderen Betonverflüssiger/Fließmittel zum Einsatz kommen. Die Wirkung wird üblicherweise etwa 15-25 Minuten nach der Zugabe beginnen und der Effekt bis deutlich über 90 Minuten dauern. Eine Kombination von Konsistenzhalter und Fließmitte ermöglicht die Herstellung von Betonen mit verarbeitungsfreundlicher Konsistenz über einen langen Zeitraum sowie höhere Früh- und Endfestigkeiten mit optimierten Bindemittelgehalten [115].

Der Dosierungsbereich richtet sich nach den gewünschten Eigenschaften. Besonders günstig

erweist sich ein Anteil von 0,1 bis 1,5 %, bezogen auf das Bindemittel. Die Zugabe sollte laut Herstellern nach Beendigung der Anmachwasserzugabe sein und die Mindestmischdauer sollte mindestens eine Minute betragen. Glenium SKY 911 darf nicht in die trockene Mischung dosiert werden. Höhere Zugabemengen können eine Nachverflüssigung bewirken, d. h., dass die Betonkonsistenz die Ausgangskonsistenz übersteigt (die Frischbetonkonsistenz unmittelbar nach dem Mischvorgang) [115]. Bei allen Versuchsmischungen dieser Arbeit wurde eine Menge von 2 %, bezogen auf die Bindemittelmenge, also üblicherweise die Hälfte der Dosierung des verwendeten Fließmittels bei jedem Versuch dem Anmachwasser beigefügt.

Tabelle 3-17: Technische und chemische Eigenschaften von Glenium Sky 911 [115]

Chemische Kennwerte (Anteilgehalt)		Technische Daten		
Chlorid [M-%]	Alkali [M-%]	Dichte [gr/cm <sup>3</sup> ]	PH-Wert [-]	Feststoffgehalt [M-%]
max. 0,10	max. 1,0	1,04	5,5± 1,0	ca. 20,4

### 3.3.8 Verwendete Entlüfter – MasterFinish DF 370 der Fa. BASF

Masterfinish DF 370 ist ein flüssiges Betonzusatzmittel, das Luftporenvolumen im Beton reduziert und dadurch die sichtbaren Poren an der Oberfläche vermindert [115].

Der DDC-Entlüfter bei dieser Arbeit ist eine Emulsion mit einer Dichte von 1,04-1,08 g/cm<sup>3</sup> und einem PH-Wert von 5-7. Durch den Einsatz von Entlüftern wird der Frischbeton während des Mischungsprozesses gut entlüftet [115].

Laut Hersteller sollte der Entlüfter bei der Herstellung des Frischbetons gleichzeitig mit dem Anmachwasser mit einer optimalen Dosierung von 0,75 bis 1 kg/m<sup>3</sup> Frischbeton zugeben werden. Wird dieser Entlüfter für die Herstellung des UHPCs verwendet, sind folgende Hinweise zu beachten:

- Es hat selbst keine verflüssigende Wirkung, kann aber in Kombination mit Fließmittel zum Einsatz kommen und führte dann zu einer Verstärkung der verflüssigenden Wirkung des Fließmittels.
- Es kann nicht in Kombination mit Luftporenbildern verwendet werden [115].

## **4 Versuchseinrichtungen und Versuchsplanung**

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Maschinen und Geräte erläutert. Darüber hinaus werden die Prüfapparaturen dargestellt und die Versuchsdurchführung erörtert. Es ist wesentlich, vorab zu erklären, was in einem Mischprozess geschieht sowie die Begriffe der Festbetonprüfungen, bevor der praktische Teil in Angriff genommen wird.

### **4.1 Herstellung des Frischbetons**

#### **4.1.1 Mischen**

Das Mischen ist eine Grundoperation in der mechanischen Verfahrenstechnik [124] und sein Ziel ist eine homogene und gleichmäßige Verteilung aller Bestandteile. Dadurch können alle Eigenschaften des Frischbetons sowie Festbetons beeinflusst werden. Im Gegensatz zu den homogenen Werkstoffen, wie z. B. Stahl, der zumindest gebietsweise die gleichen Eigenschaften besitzt, ist der Beton grundsätzlich ein heterogener Baustoff, also ein Baustoff mit einheitlichem Bestandteil, aber einer von Ort zu Ort veränderlichen Dichte [125]. Im Vergleich zum Normalbeton und auch zum hochfesten Beton ist aber der Ultrahochfeste Beton noch homogener. Die Gründen sind:

- Geometrischer Grund: Die groben Zuschläge bei UHPC können durch die feinen Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn  $< 1\text{mm}$  ersetzt werden.
- Mechanischer Grund: Die E-Modulldifferenz von Zuschlag und Zementstein wird verringert.
- Physikalischer Grund: Den Wärmeausdehnungskoeffizient von quarzhaltigen Zuschlägen und Zementstein ist bei geringerem W/B-Wert nahezu identisch [126].

Um diese gewünschte Homogenität zu erreichen spielt die Mischtechnik eine große Rolle.

#### **4.1.2 Mischtechnik**

Laut ÖNORM B 4710-1 [62] sollte ein Mischer während seiner Mischdauer eine homogene und gleichmäßige Verteilung der Ausgangsstoffe und eine gleichmäßige Verarbeitbarkeit des Betons erzeugen. Laut ÖNORM B 3303 [127] muss die Mischung in einem Labormischer so durchgeführt werden, dass keine Mischungsbestandteile verloren gehen. Im Allgemeinen können die Ausgangsstoffe des UHPCs mit Zwangsmischer vermischt werden. Die wesentliche Aufgabe des Zwangsmischers ist die optimale Homogenisierung

der Gefügestruktur durch das intensive Mischen der Komponenten [128]. Die gesamten Versuchsmischungen des praktischen Abschnitts dieser Arbeit wurden mit dem Intensivmischer R02 der Firma EIRICH hergestellt (Abbildung 4-1). EIRICH entwickelt seit mehr als 100 Jahren Mischer eigens für den Bereich der Forschung. Der Intensivmischer besitzt einen schrägstellenden drehenden Mischbehälter, einen Wand-Abstreifer, ein schnelldrehendes Mischwerkzeug, wodurch die Feinvermischung erfolgt, und ein Fassungsvermögen von 3-5 Litern. Der Mischbehälter gilt als wesentlicher Unterschied zwischen einem herkömmlichen stehenden Mischbehälter und dem EIRICH-Mischer, der von 2,7kW mit elektrischem Motor angetrieben wird. Die Bedienung des Mixers erfolgt nicht vollautomatisch von einer Computer-Steuerung, sondern es werden alle Funktionen manuell durchgeführt [36].



Abbildung 4-1: Intensivmischer EIRICH R02 mit Sternwirbler

Der Mischprozess des EIRICH-Mischers [Abbildung 4-2] entspricht folgendem Prinzip:

Die Mischwerkzeuge fahren schnell durch das bewegte Mischgut. Der Mischbehälter bleibt nicht still sondern dreht sich. Aus diesem Grund gibt es keine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Mischgut und Mischbehälter. Aufgrund der Drehbewegung wird das Mischgut zu den Mischwerkzeugen transportiert [129].

Dieses Mischprinzip wird für die Herstellung von Betonen mit besonderen Anwendungen verwendet, hauptsächlich bei Betonen mit höheren Feinkornanteilen und Betonen mit feinen

oder reaktiven Zusatzstoffen wie Silicastaub oder Farbpigmenten, um die Agglomerate aufzubrechen. Die Verwendung dieser Mischtechnik bei der Herstellung des UHPCs bringt die Vorteile einer sehr homogenen Endmischung und einer kürzeren Mischungszeit.

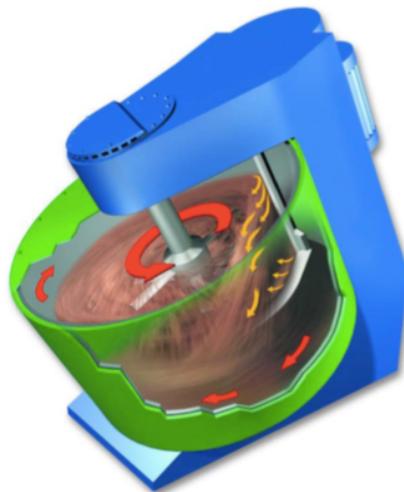


Abbildung 4-2: Mischprinzip des EIRICH R02 [130]

Die Materialbewegung erfolgt durch Wurfkräfte, Fliehkräfte und dadurch freien Fall. Das Mischwerkzeug kann eine Geschwindigkeit zwischen 1m/s bis zu 40m/s erreichen. Eine Besonderheit beim EIRICH-Mischer ist, dass es eine Entkoppelung des Mischguttransports und des eigentlichen Mischprozesses gibt. Die Trennung zwischen Transport des Mischgutes und des Mischvorgangs kann dazu führen, dass die Werkzeuggeschwindigkeit und damit auch der Leistungseintrag in die Mischung beliebig variieren [131].

Die Drehzahl für das Mischwerkzeug ist über einen Frequenzumrichter von 70 bis 4535 Umdrehung pro Minuten regulierbar. Durch das Vertauschen der Riemenscheiben des Motors und der Wirblerwelle besteht die Möglichkeit, den Drehzahlbereich innerhalb der angegebenen Grenzen zu verändern. Hierbei besteht auch die Möglichkeit, die Drehrichtung umzudrehen. Darüber hinaus kann beim Intensivmischer zwischen einem „Gleichstrom“, falls Wirbler und Mischbehälter in gleiche Richtung drehen und einem „Querstrom“, wobei der Wirbler sich gegensinnig zum Mischbehälter dreht, unterschieden werden (Abbildung 4-3) [36].

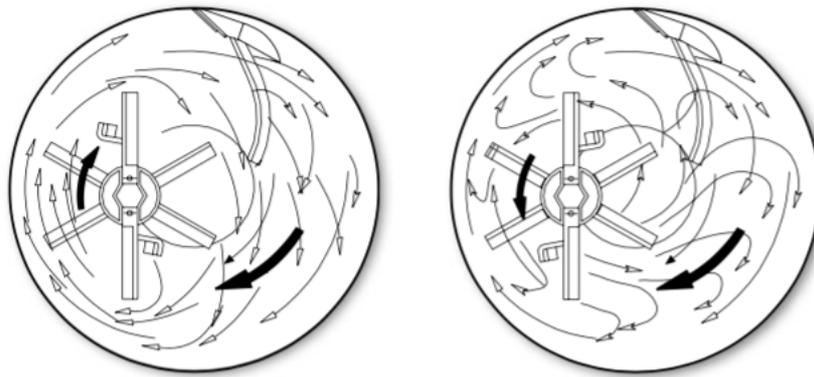


Abbildung 4-3: Gleichstromprinzip (links) und Gegenstromprinzip (rechts) des EIRICH-Mischers [129]

Die Drehzahl des Mischbehälters lässt sich zwischen 42 (Stufe 1) und 83 (Stufe 2) U/min umschalten [Abbildung 4-4]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle Mischungen im „Gleichstrom“ gemischt, bei dem der Wirbler in Drehrichtung des Mischbehälters steuerbar ist, da in diesem Fall ein Maximum an Scherkräften in die Mischung eingebracht werden kann [131].



Abbildung 4-4: Manuelle Bedieneinheit des EIRICH-Mischers

#### 4.1.3 Mischen unter Vakuum

Bei der Herstellung von UHPC ist es gewünscht, den Luftgehalt im Beton soweit wie möglich zu verringern und somit die Festigkeit zu steigern. Der verwendete Intensivmischer ist mit einer Vakuumperipherie ausgestattet. Dadurch ist es möglich, im Mischbehälter einen Unterdruck zu erzeugen. Damit kann bereits während des Mischens die eingeführte Luft größtenteils wieder entfernt werden [36], [129].

Das Vakuum entsteht in der Vakuumkammer, die durch eine ringförmige Behälterwand um den Mischbehälter gebildet wird (Abbildung 4-5). Die Vakuumpumpe wird auch als Flüssigkeitsringpumpe bezeichnet. Diese Bauart der Pumpe ist sehr robust und unempfindlich z. B. gegen angesaugten Staub aus dem Mischbehälter [36], [132]. Flüssigkeitsringpumpen werden verwendet, um sowohl trockene als auch feuchte Gase zu fördern oder abzusaugen. Sie können einen Unterdruck von 900 mbar bis 33 mbar erzeugen [64]. Abhängig von der Wassertemperatur ist das maximal mögliche Vakuum bei diesem Mischer mit etwa 30 mbar begrenzt [36].



Abbildung 4-5: Intensivmischer EIRICH R02 (rechts) mit Vakuumpumpe Fa. Sterling (links) [36]

Wenn im Mischer eine Entgasung stattfinden soll, dann verfügt er meist über konusartige Einbauten. Darüber wird das Mischgut gefördert, um so eine effektive Entgasung zu ermöglichen (sog. Dünnschichtentgasung) [133].

Beim Betonmischen unter Vakuum muss man besonders auf die Temperatur des Mischgutes achten, weil das Wasser bei verschiedenen Umgebungsdrücken unterschiedliche Siedetemperaturen besitzt (Abbildung 4-6) [64].

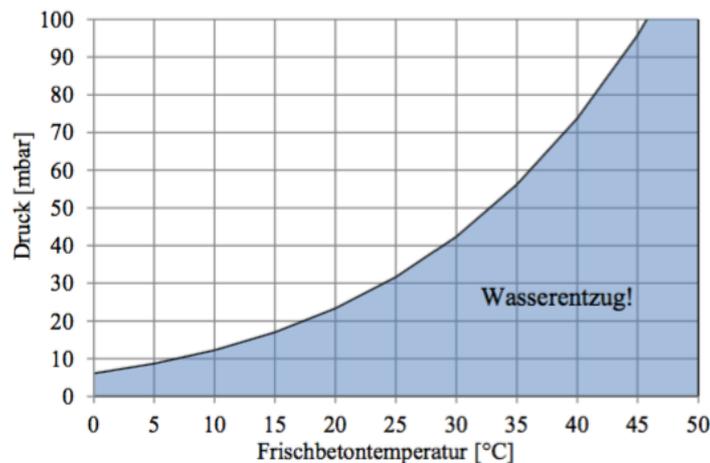


Abbildung 4-6: Zusammenhang zwischen Unterdruck und Temperatur [1]

Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit wurden in manchen Mischserien die Mischungen unter Vakuumbedingungen durchgeführt, um die Frühfestigkeiten der Proben vergleichen zu können.

#### 4.1.4 Mischwerkzeuge

Als Mischwerkzeuge für den EIRICH-Intensivmischer stehen ein Stiftenwirbler und ein Sternwirbler zur Verfügung, die in der Abbildung 4-7 dargestellt sind.



Abbildung 4-7: Mischwerkzeuge für EIRICH R02, Stiftenwirbler (links) und Sternwirbler (rechts) [36]

Die Untersuchungen von *Safranek* [68] zeigen, dass die Verwendung der verschiedenen Wirbler zu unterschiedlichen Festigkeitsentwicklungen des Betons führen kann. Dieser Unterschied liegt darin, dass bei der Verwendung des Stiftenwirblers eine höhere Mischleistung erwartet werden kann, also die Druckfestigkeit nach 24 Stunden um 5,5 %, ...

nach 7 Tagen um 2,1 % und nach 28 Tagen um 1,3 % höher ist als bei der Verwendung des Sternwirlers. Abbildung 4-8 zeigt den Vergleich zwischen Mischleistungen eines Stern- und Stiftenwirlers unter gleichen Mischbedingungen [36].

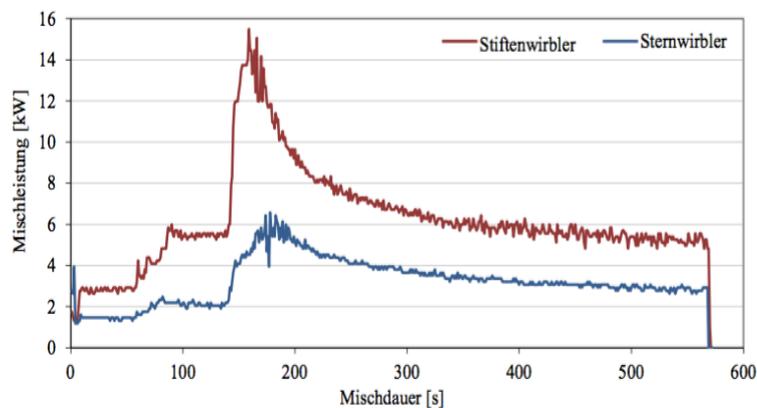


Abbildung 4-8: Mischleistungen des Stern- und Stiftenwirlers [36]

Auf der anderen Seite ist der Stiftenwirlер zur Verteilung von Wasser sowie Fließmittel besser geeignet als der Sternwirlер, der eher zur Homogenisierung trockener Pulver dient [36]. Unter Berücksichtigung dieser Merkmale wurde ein Stiftenwirlер eingesetzt.

Allerdings muss bei der Auswahl der Wirblergeschwindigkeiten nach *Mazanec* [134] beachtet werden, dass bei höheren Geschwindigkeiten Wasser und Fließmittel schneller verteilt und das Leistungsmaximum früher erreicht werden kann. Die höhere Geschwindigkeit führt jedoch durch die Reibung zwischen den Partikeln zu höheren Temperaturen des Mischgutes [36].

#### 4.1.5 Mischdauer

Die erforderliche Mischdauer des Betons ist abhängig von verschiedenen Parameter wie z. B. der Art des Betons, Zusammensetzung der Rezeptur, Bauart und Zustand des Mixers, der Mischwerkzeuge und der Mischleistung oder der Reaktion der einzelnen Komponenten aufeinander [68].

Bei der Auswahl der Mischdauer ist darauf zu achten, eine ausreichende Durchmischung der Komponenten zu ermöglichen und auch deren Einfluss auf das Ansteifen des Betons zu berücksichtigen, da grundsätzlich je länger die Mischdauer ist und je intensiver der Beton gemischt wird, desto schneller steift der Beton an. Die Untersuchungen zeigen, dass in den ersten 120 Sekunden des Mischvorgangs, insbesondere beim Zwangsmischer, die

Druckfestigkeit wesentlich beeinflusst wird und in den ersten Minuten der größte Wert erreicht wird. Durch eine Verlängerung der Mischdauer auf ca. zwei Minuten kann es zu erheblich höheren Festigkeiten kommen. Aber bei einer Verlängerung auf mehr als zwei Minuten kommt es kaum noch zu einer Festigkeitssteigerung [135].

#### 4.1.6 Mischleistung

Bei jedem Mischer wird durch den Elektromotor eine elektrische Mischarbeit in das Mischgut eingebracht, die zu einer Materialbewegung führt. Die Bewegungsenergie der Mischwerkzeuge bewirkt eine Beschleunigungsarbeit [136].

Die Verwendung des EIRICH-Mischers erlaubt, die Mischarbeit in Form der Mischleistung aufzuzeichnen [68]. Im Unterschied zu normalen Betonmischern bleibt beim EIRICH-Mischer der Mischbehälter nicht still, sondern rotiert. Durch die Rotation wird das Mischgut zusätzlich bewegt (keine Wand- und Bodenreibung). Aufgrund dessen gibt es keinen Geschwindigkeitsunterschied zwischen Behälter und Mischgut. Grundsätzlich kann man zusammenfassen, dass beim EIRICH-Mischer die Mischleistung nicht verloren geht, sondern im Mischgut erhalten bleibt [68].

Zusätzlich spielt die Mischgutkonsistenz eine große Rolle, d. h., die verbrauchte Energie des Mischguts ist abhängig von der Konsistenz der Mischung. Je feuchter die Mischung, desto mehr Energie ist bei gleichen Mischwerkzeuggeschwindigkeiten nötig [68]. Abbildung 4-9 zeigt den Zusammenhang zwischen spezifischer Mischleistung und Wassereintrag.

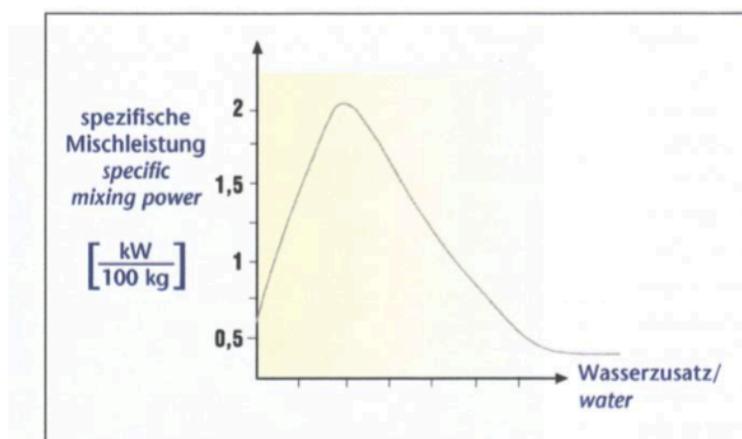


Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen spezifische Mischleistung und Wassereintrag [136]

#### 4.1.7 Mischreihenfolge

In Tabelle 4-1 sind Angaben von herkömmlichen Mischreihenfolgen zusammengestellt. Die Untersuchungen von *Marchuk* [137] zeigen, dass die Zugabe des Silicastaubs zum angemischten Zementleim unter Verwendung eines hochoberigen Mixers zu einer Klumpenbildung des Silicastaubs führen kann. Darüber hinaus sollte die Hälfte des Fließmittels gleichzeitig mit dem Wasser beigefügt werden.

Tabelle 4-1: Angaben zur Mischtechnik und Mischreihenfolge [1]

Literaturstelle	<i>Larrad u. Sedran</i> 1994 [22]	<i>Bonneau et. Al.</i> 1997 [138]	<i>Bonneau et. Al.</i> 1997 [138]
Mischer	Üblicher Mischer mit drei Geschwindigkeitsstufen	Transportbetonmischfahrzeug	Ringtrommischer im Fertigteilwerk
1.Mischphase	Mischen des Wasser + Silicastaub und 33 % des FM bis die Mischung homogen aussieht	Trockenes Homogenisieren aller Pulver bis einheitliche Farbe	Trockenes Homogenisieren aller Pulver in drei Min
2.Mischphase	Stetiges Einmischen des Zementes und 59 % des FM	Zugabe Wasser und der Hälfte des FM	Zugabe Wasser 20l und der Hälfte des FM
3.Mischphase	Einmische des Sandes	Mischen	2 Min Mischen
4.Mischphase	Mischen eine min bei höchster Geschwindigkeit	Zugabe restl. FM gelöst in gleichem Wasservolumen	Zugabe restl. FM gelöst in den 20 l Wasservolumen
5.Mischphase	Zugabe des restl. FM 17 %	Zugabe der Stahlfasern	Mischen vier Min
6.Mischphase	Mischen eine Min bei höchster Geschwindigkeit	Mischen	Zugabe der Stahlfasern und Einmischen neun Min

In dieser Arbeit wurde folgende Mischreihenfolge für die Herstellung des UHPCs verwendet:

1. Am Anfang sollten alle Feinanteil (der Zement, der Silicastaub und das Quarzmehl) erstmals in den Mischer und dann die Zuschlagstoffe (das Quarzsand) mittels eines Trichters eingebracht werden.
2. 90 sekundenlang trockenmischen und homogenisieren.

3. Der dritte Schritt ist die Zugabe des Anmachwassers. Laut ÖNORM B 3303 [128] sind bei der Verwendung von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen die Verwendungsvorschriften der Hersteller zu beachten. Bei flüssigen Zusatzmitteln wie z. B. Fließmittel, Beschleuniger (wenn es diese bei der Rezeptur gibt) und Entlüfter, wenn vom Hersteller nicht anders gefordert, wird die Hälfte des Fließmittels zur Vermeidung von Agglomerationen des Silicastaubs mit dem Anmachwasser vorgemischt und während einer halben Minute in den Mischer hineingegeben.
4. Hier werden für eine Minute das Wasser und die trockenen Bestandteile durchgemischt.
5. Den Rest des Fließmittels und auch des Konsistenzhalters werden während einer halben Minute langsam und gleichmäßig hineingegeben. Die Mischung wird in dieser Phase ca. zehn Grad wärmer.
6. Das Gesamtmischen nach der Zugabe aller Materialien in den Mischer muss ausreichend zur Erzielung einer homogenen Mischung sein [128]. Im Normalfall wird die Mischung zwei Minuten stetig und mit gleichbleibender Mischgeschwindigkeit durchgeführt.
7. Die Phase 7 gilt nur beim Mischen unter Vakuum. In dieser Phase wird durch die Mischung im geschlossenen Mischbehälter ein Unterdruck erzeugt und der Frischbeton entlüftet.

Es wurde diese Mischungsreihenfolge für unterschiedliche Mischungsrezepturen erprobt, um zu sehen, welche Rezeptur die besten Ergebnisse bezüglich der Frühfestigkeit und Verarbeitbarkeit des Betons liefert.

#### **4.1.8 Probekörperherstellung und Lagerung**

Unmittelbar nach der Herstellung des Frischbetons wurde bei dieser Arbeit der Frischbeton in Schalungsformen gegossen.

Die Prüfkörper, die für die in Abschnitt 5 durchgeführten Untersuchungen verwendet werden, sowie die wesentlichen Prüfverfahren sind in der Tabelle 4-2 zusammengestellt.

Tabelle 4-2: Prüfkörper und Prüfverfahren der verschiedenen Versuche

Art der Prüfung	Prüfkörper L/B/H [mm]	Lagerung	Prüfung nach
Hydratationswärme	Würfel 10x10x.10	Normklima	ÖNORM EN 196-9 [140]
Biegezugfestigkeit	Prismen 160x40x40	Normklima	ÖNORM EN 196-1 [139]
Druckfestigkeit	Prismen 80x40x40	Normklima	ÖNORM EN 196-1 [139]

Es werden Prismenformen aus Stahl verwendet, in denen jeweils drei prismenförmige Probekörper hergestellt werden (Abbildung 4-10).

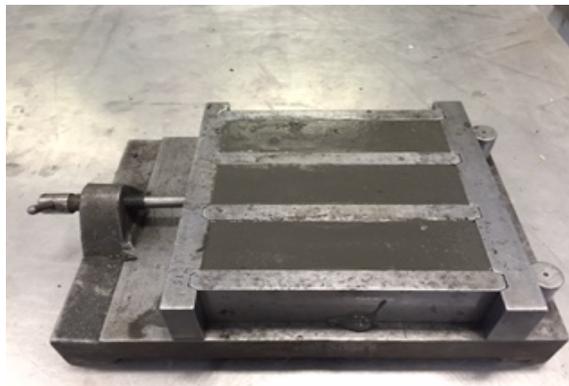


Abbildung 4-10: Prismen aus Stahl nach ÖNORM EN 196-1 (oben)  
 Würfelförmige Schalungen nach ÖNORM EN 196-9 (unten)

Bevor der Beton eingefüllt und verdichtet wird, muss man diesen reinigen und die Schalungen mit Schalöl ganz dünn bestreichen, um das Ausschalen zu erleichtern. Anschließend werden bei manchen Mischungen, wegen der schlechten Verarbeitbarkeit, der

Probekörper noch ca. 20 Sekunden auf dem Rütteltisch verdichtet. Alle Proben werden nach ihrer Herstellung ausgeschalt und bis zu ihrer Festbetonprüfung bei Raumtemperatur gelagert. Um das Austrocknen der Oberfläche zu verhindern, wird PE-Folie darüber gespannt.

Jeder Probekörper wird vor den Prüfungen abgemessen und gewogen. Dafür wurde mittels einer elektronischen Waage ihre Gewicht, die Breite, Dicke, Länge und die Höhe genau festgelegt.

## **4.2 Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung**

### **4.2.1 Abbindephasen von Beton**

In diesem Unterkapitel werden die chemischen Reaktionen und die Zusammenhänge des Betonalters mit den Eigenschaften des Betons genauer beschrieben.

Beton erhärtet durch die chemische Reaktion zwischen den Zementbestandteilen und dem Anmachwasser. Dieser als Hydratation bezeichnete Vorgang setzt sich nach *Taylor* [142] aus drei Phasen zusammen. Die Anfangsphase (Sulfat Phase) ist das Ansteifen des Zementleims. In dieser Phase bleibt der Beton gut verarbeitbar. Nach einem bestimmten Maß des Ansteifens beginnt die zweite Phase der Hydratation (Calciumsilikathydrat-Phase CSH). Als Erstarren wird die Viskositätszunahme eines Zementleims in der frühen Reaktionsphase der Zementphasen durch Wasserbindung bezeichnet. In dieser Phase ist der Beton immer noch verarbeitbar, verliert aber mit der Zeit zunehmend an Verformbarkeit. Das Erstarren wird gemäß ÖNORM EN 12350 [141] geprüft [7]. In dieser Phase verfestigt sich der Zement zeitlich. Diese sogenannte Erstarrensphase beginnt frühestens nach einer Stunde und dauert normalerweise bis zu zwölf Stunden. Durch die Zugabe von verschiedenen Zusatzmitteln kann das Erstarren des Betons verzögert oder beschleunigt werden. Erreicht der Beton das Erstarren, soll er allerdings nicht mehr verarbeitet werden [143].

Die letzte Phase ist die Erhärtung des Zements bis zum 28 Tag. Als Erhärten wird die Umwandlung des Zementleims zu Zementstein bezeichnet. Dieser Vorgang ist der Übergang zwischen Frisch- und Festbeton und erfolgt durch die Reaktion des Anmachwassers mit den Zementphasen, also die Hydratation, zur kristallinen Hydratphase. Durch die steigende gegenseitige Durchdringung wachsender Kristalle kommt es zur gegenseitigen Abstützung der Kristalle und schließlich zu einer Festigkeitsentwicklung des

Betons. Die Betonfestigkeit nimmt mit dem Alter zu. Der Beton erreicht schon nach sieben Tagen ca. 75 % der 28-Tag-Festigkeit. Trotz des Erreichens der Normfestigkeit beim Beton ist das Erhärten immer noch nicht abgeschlossen und kann weiterhin dauern. Dementsprechend wird die Endfestigkeit unter Umständen erst nach Jahren erreicht [68].

Das rasche Ansteifen und der sehr frühen Erstarrungsbeginn des UHPCs (Abbildung 4-11) kann zu Verarbeitungsschwierigkeiten bei diesem Beton führen.

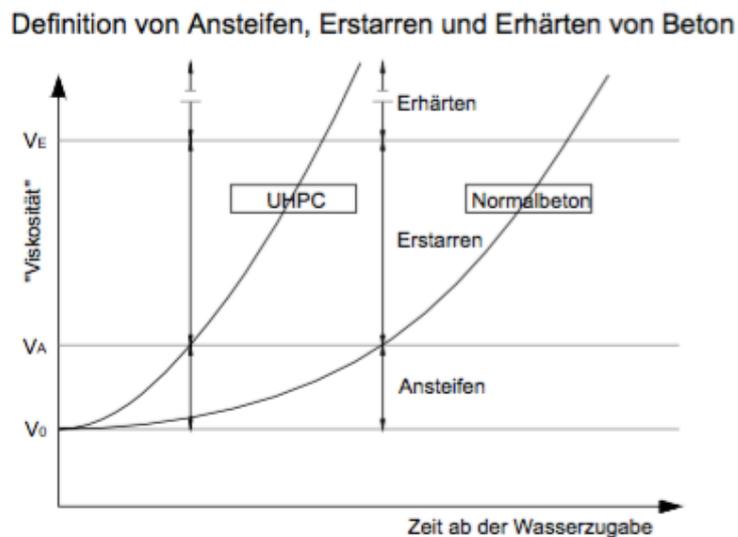


Abbildung 4-11: Unterschiedliche Abbindeigenschaften von Normalbeton und UHPC [7]

Das Erhärten des Betons wird wie andere chemische Vorgänge durch niedrige Temperaturen verzögert und durch höhere Temperaturen beschleunigt. Die Erhärtungsentwicklung hängt von der Bindemittelart und dessen Wärmeentwicklung ab [71].

Der Hydratationsablauf des Zements wird zeitlich in fünf Phasen eingeteilt. Diese Phasen werden in Tabelle 4-3 genauer erklärt [64].

Tabelle 4-3: Einteilung der Hydratation des Portlandzements in 5 Phasen [64] [144]

Hydratationsphasen	Chemische Prozesse	Einfluss auf die Betoneigenschaften
1. Anfangshydrolyse	Beginn der Hydrolyse, Bildung von Ettringit und Syngenit, Inlösungsgehen von Ionen	Anstieg des PH-Wertes auf über 12,3
2. Ruhephase	Kontinuierliche Lösung von Ionen	Bestimmung der Dauer der Verarbeitbarkeit und des ersten Ansteifens
3. Beschleunigungsphase	Beginn der Bildung von CSH-Phasen	Bestimmung des Ansteifens und der Frühfestigkeitsentwicklung
4. Entschleunigungsphase	Kontinuierliche Bildung von CSH-Phasen und Portlandit	Bestimmung der Frühfestigkeitsentwicklung
5. Stetige Phase	Langsame Bildung von Hydratationsprodukten	Bestimmung der Endfestigkeitsentwicklung

Abbildung 4-12 zeigt schematisch den zeitlichen Ablauf der Bildung von Hydratationsphasen beim Portlandzement.

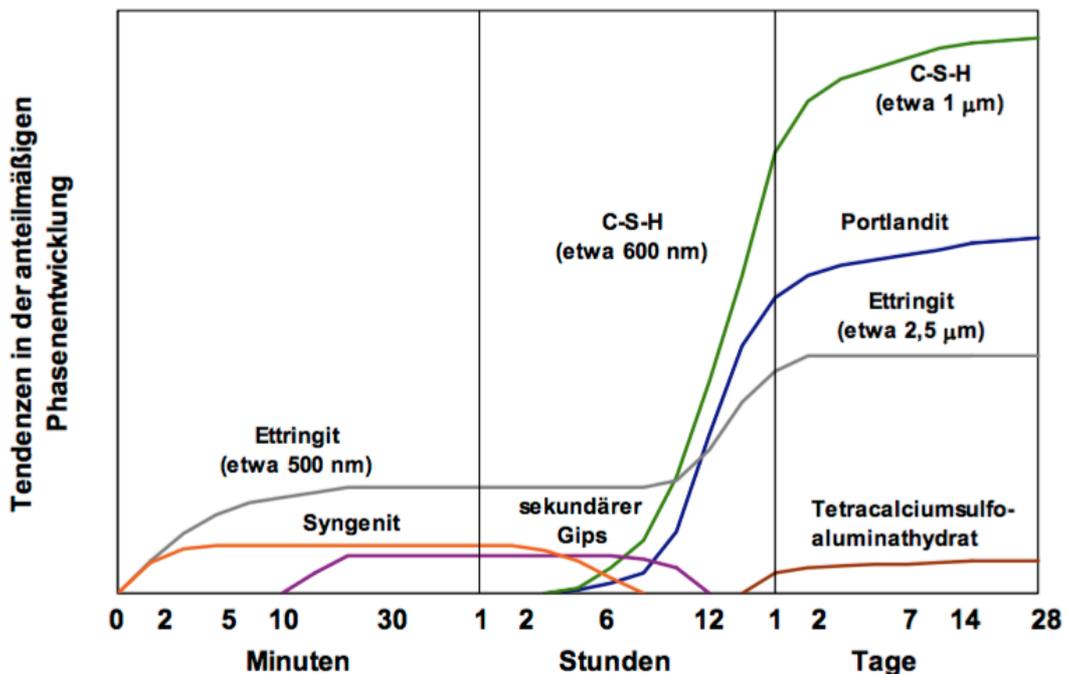


Abbildung 4-12: Schema Hydratation von Portlandzement nach Stark et al. [144]

### 4.2.2 Hydratationswärme

Unter Hydratationswärme versteht man die Wärme, die sich durch die Hydratation des Zements freisetzt. Aufgrund der relativ schlechten Wärmeleitfähigkeit des Betons heizt er sich durch die Hydratationswärme auf. Diese Hydratationswärme lässt sich beeinflussen durch:

- Zementart: Die Hauptbestandteile des Zements sind Portlandzementklinker und Hüttensand. Im Allgemeinen ist Portlandklinker der wichtigste Hauptbestandteil des Zements, welcher hydraulisch reagieren kann. Je weniger Portlandzementklinker, umso geringer ist die Hydratationswärme und auch die Festigkeit. Die Ausschulfristen und erforderlichen Nachbehandlungen sind dementsprechend zu verlängern [146].
- Zementmenge: Je geringer die Zementmenge ist, umso geringer wird die Hydratationswärme
- Frischbetontemperatur
- Umgebungstemperatur
- Schalungsart
- Bauteildicke.

Die Freisetzung der Hydratationswärme des Zements wird sich durch die Zugabe von Zusatzstoffen gemäß ÖNORM B 4710-1 [62] verändern. Anzumerken ist die Unterscheidung zwischen Zusatzstoffen ÖN EN 450 [82] und Aufbereiteten **Hydraulisch Wirksamen Zusatzstoffen AHWZ** gemäß ÖN B 3309 [146].

- Nicht aufbereitete Zusatzstoffe weisen oft keine optimale Kornverteilung auf und wirken daher schlechter.
- AHWZ sind optimal abgestimmte Mischungen aus Flugasche, Hüttensand und Kalkstein [147].

### 4.2.3 Hydratationswärmeentwicklung

Die Hydratationswärmeentwicklung spielt besonders im jüngeren Betonalter eine wesentliche Rolle. Die freigesetzte Wärmemenge richtet sich nach den chemischen Zusammensetzungen des Zements und dem Hydratationsgrad. Aus diesem Grund ist die Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung von besonderer Bedeutung.

Der gemäß ÖNORM EN 196-9 [140] ermittelte Verlauf der Hydratationswärme [J/g] wird

numerisch nach der Zeit abgeleitet. Somit erhält man die Wärmeentwicklung über die Zeit. Wie in Abbildung 4-13 ersichtlich ist, wird zwischen fünf Stadien beim Temperatur- und Spannungsverlauf unterschieden [148]:

- Im ersten Stadium, welches ein Alter von ca. null bis drei Stunde hat, beginnt die Hydrolyse. Hier gibt es keinen Temperaturanstieg.
- Nach drei Stunden bis ca. sechs Stunden fängt das zweite Stadium an. Hier beginnt das Temperaturanstieg durch die Hydratation, aber der Beton bleibt ohne Spannungsaufbau. Die erste Nullspannungstemperatur ( $T_{01}$ ) befindet sich am Ende des Stadiums II.
- Das Stadium III beginnt nach der sechsten Stunde und dauert bis ca. 22 Stunden an. In diesem Bereich baut der Beton progressive Druckspannungen durch die zunehmende Betonfestigkeit auf und erreicht die Höchsttemperatur.
- Im Alter zwischen der 22en bis 40en Stunde nimmt die Betontemperatur durch Abfluss der Wärme ab. Darüber hinaus verringert sich die Betondruckspannungen bis zur zweiten Nullspannungstemperatur ( $T_{02}$ ), bei der die Betondruckspannung null ist.
- Im letzten Stadium, ab der 40en Stunde, kühlt der Beton weitere ab. Dadurch steigt die Zugspannung an. Wenn die Zugspannung die kritische Zugfestigkeit erreicht, dann erscheinen im Beton die ersten Risse.

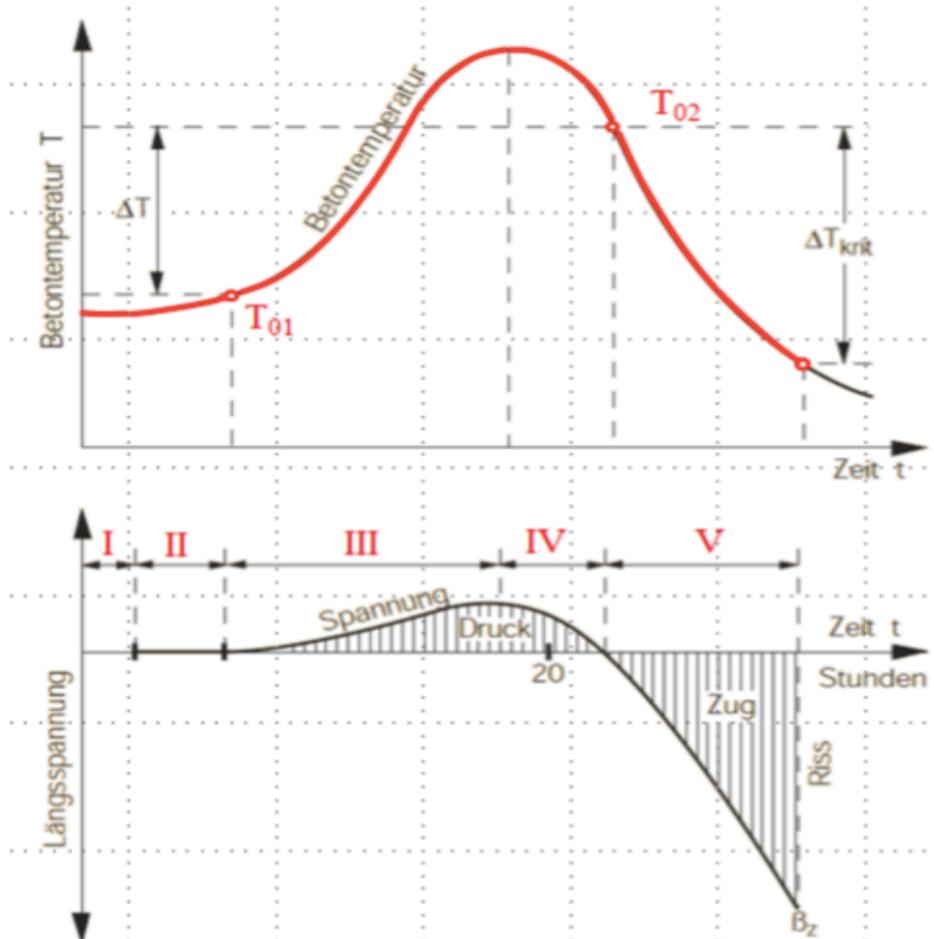


Abbildung 4-13: Schematische Temperatur- und Spannungsverlauf [149]

#### 4.2.4 Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung

Die Wärmeentwicklung wird über die Zeit erfasst. Die Hydratationswärmeentwicklung wird im Abschnitt 5 in orientierenden Versuchen in Anlehnung an das Verfahren von *Grube* und *Hintzen* [150] am Beton mit verschiedenen Mischungsrezepturen gemessen.

Der Hydratationswärmeverlauf wird zum Vergleichen der Verarbeitungszeit und der Festigkeitsentwicklung des UHPCs benutzt. Die Verläufe erlauben zumindest einen relativen Vergleich des Hydratationsfortschritts und somit der Festigkeitsentwicklung der verschiedenen Mischungen.

In Rahmen dieser Arbeit wurde die Hydratationswärme durch die Benutzung von Thermoelementen anhand DIN EN 60584-1 [151] und einem Messgerät ermittelt. Ein Thermoelement besteht aus zwei Drähten unterschiedlicher Werkstoffe, die einerseits an der Fläche des Probekörpers (Abbildung4-14) und andererseits mit einem Multimeter verbunden

sind. Durch einen thermoelektrischen Effekt, den sogenannten *Seebeck* Effekt [152], wird immer die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Drähten gemessen. Diese kann anschließend in eine Temperatur umgerechnet werden.

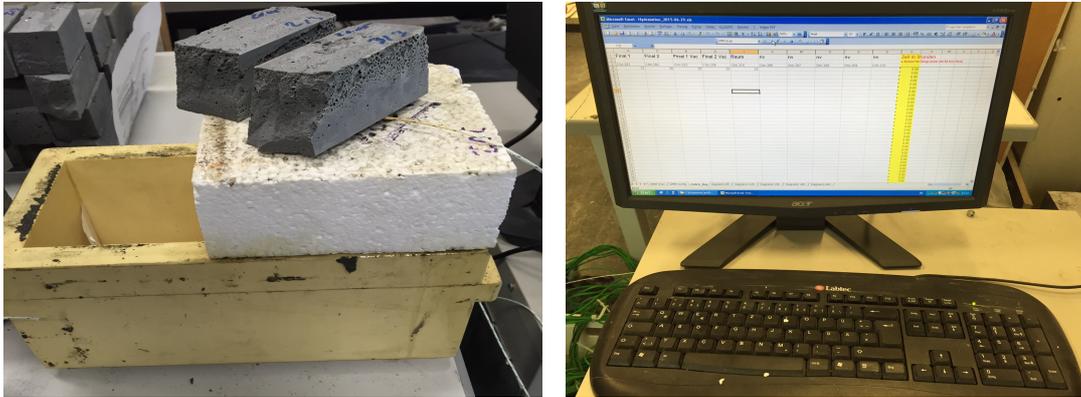


Abbildung 4-14: Abgedeckte Betonwürfel mit Thermoelementen (links) und Datenerfassung der Temperaturmessung (rechts)

### 4.3 Prüfung der mechanischen Eigenschaften

In der durchgeführten Arbeit wurden bei den mechanischen Eigenschaften im Rahmen der Optimierung der Frühfestigkeit des UHPCs nur die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit untersucht. Um Festigkeitsentwicklungsverläufe darstellen und auch vergleichen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Biegezugfestigkeitsprüfung und die Druckfestigkeitsprüfung bei unterschiedlichem Alter des Frischbetons durchgeführt. Dabei werden die Festigkeitsentwicklungen dokumentiert und das früheste Maximum festgelegt. Die Wahl einer geeigneten Betonrezeptur ist zur Erreichung der maximalen Frühfestigkeit zufolge Biegezug- und Druckbeanspruchung von entscheidender Bedeutung.

#### 4.3.1 Ermittlung der Biegezugfestigkeit

Eine der wichtigen Eigenschaften des Betons ist seine Biegezugfestigkeit. Sie hängt von den Eigenschaften des Zementsteins, den Eigenschaften des Zuschlags und der Haftung dieser beiden Komponenten aneinander ab [38]. UHPC weist grundsätzlich nicht nur eine höhere Druckfestigkeit als Normalbeton, sondern auch eine höhere Biegezugfestigkeit auf.

Die Biegezugfestigkeit wird an Betonbalken geprüft, die auf zwei Stützen gelagert sind und mit einer Einzellast in Feldmitte oder in den Drittelpunkt belastet werden [153]. Die beiden

Belastungsanordnungen sind in Abbildung 4-15 dargestellt.

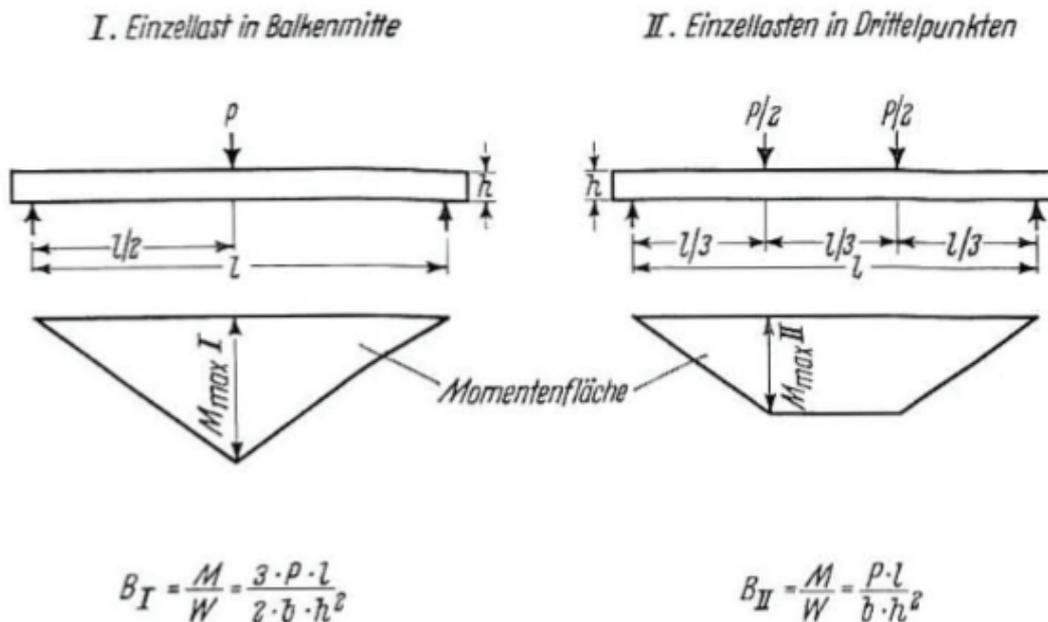
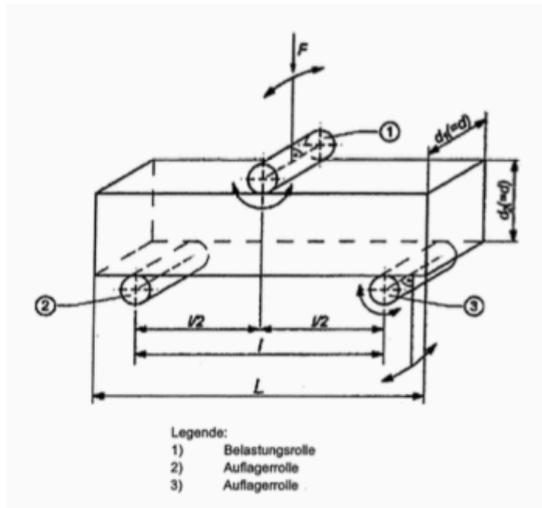


Abbildung 4-15: Prüfung des Betons auf Biegezugfestigkeit [153]

In dieser Arbeit wurde die Biegezugfestigkeit in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 [139] immer an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm ermittelt. Die Versuche wurde mit einer Universalprüfmaschine vom Typ Zwick Z250 (Abbildung 4-16), einer Materialprüfmaschine für Zug-, Druck- und Biegeversuche, durchgeführt. Diese Prüfmaschine hat den Vorteil, dass während des Tests ein sehr guter Kraftfluss mit direkter Kraftübertragung auf die Probe erhalten wird. Sie besteht aus [154]:

- Beanspruchungseinheit 250 kN
- Standmodell
- Prüfraumbereite 600 mm,
- Traversenhub 1370 mm
- Prüfungsgeschwindigkeit 0,0001 bis 600 mm/min



(a)



(b)

Abbildung 4-16: Schematische Darstellung der Biegezugprüfung (a) und Prüfmaschine Zwick Z250 (b)

[68] [155]

Es werden die Prismen so in das Prüfgerät auf zwei beweglichen Stützrollen gelegt, dass die Längsachse rechtwinklig zur Achse dieser Rollen liegt und die abgezogene Fläche nach vorne gerichtet ist. Die Lastaufbringung erfolgt mittig durch einen weiteren Stahlzylinder mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $50 \pm 10$  N/s. Die Lastenteilung erfolgt bei einer Stützenweite von 100 mm. Die Prismen werden mittels eines Prüfstempels bis zum Bruch belastet. Aus dieser Bruchlast wird nach Formel 4-1 die Biegezugfestigkeit errechnet [155].

	$f_{ct}$	Biegezugfestigkeit	
	M	Biegemoment	
$f_{ct} = M/W$ [N/mm <sup>2</sup> ]	F	Die einwirkende Kraft in der Mitte	
$M = (F \times L)/4$ [N.mm]	L	Auflagerabstand (100mm)	Formel 4-1: Biegezugfestigkeit [155]
$W = (b \times h^2)/6$	W	Widerstandmoment	
	b	Breite der Prisma (40mm)	
	h	Dicke der Prisma (40mm)	

In der Abbildung 4-17 ist der Probekörper vor und nach dem Biegezugversuch dargestellt.

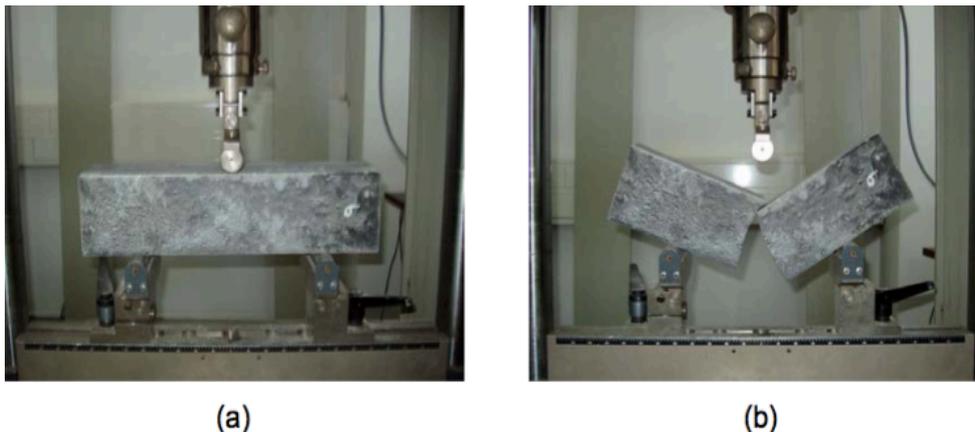


Abbildung 4-17: Prismen vor (a) und nach (b) dem Biegezugversuch

Durch die Biegezugfestigkeitsprüfung wird das Betonprisma in zwei fast identische Teile getrennt, die anschließend für die Druckversuche verwendet werden.

### 4.3.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit des Betons ist eine der wichtigsten Kenngrößen zur Klassifizierung des Betons insbesondere ist die Erhöhung dieser bei der Herstellung von UHPC das Ziel. Somit zeichnet sich der Beton durch seine Druckfestigkeit aus und wird demnach in Klassen geteilt. Der Beton hat üblicherweise eine Mindestfestigkeit von 20 N/mm<sup>2</sup> und kann in

manchen Fällen wie z. B. Hochleistungsbetone und Ultrahochfestbetone über  $150 \text{ N/mm}^2$  Festigkeit erreichen. Alle Betone können jedoch Zugspannungen nur in geringem Umfang aufnehmen. Laut ÖNORM EN 206 -1 [86] werden die Betone mit Druckfestigkeiten von mehr als  $100 \text{ N/mm}^2$  als ultrahochfest und unter dem Namen C100/115 klassifiziert. Nach *A. Hummel* [156] besteht zwischen Druck- und Biegezugfestigkeit des Betons keine geradlinige, sondern eine parabolische Abhängigkeit. Dieses Verhältnis wird durch das Alter und auch durch alle Maßnahmen beeinflusst, welche die Festigkeit des Betons verbessern, wie z. B. die Verminderung des W/Z-Werts beim UHPC. Die Druckfestigkeit des UHPCs ist abhängig von verschiedenen Parametern. Bei Verwendung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Ausgangsstoffe, einer sorgfältigen Verarbeitung und einer passenden Nachbehandlung sind Druckfestigkeiten von ca.  $200 \text{ N/mm}^2$  und höher erreichbar. In der Abbildung 4-18 sind die Bezeichnungen der genormten Druckfestigkeitsklassen und deren Anwendungsbereiche dargestellt.

Festigkeitsklasse nach ÖNORM B4710-1	Festigkeitsklasse nach ÖNORM B4700	Mindestwert der characteristischen Zylinderdruckfestigkeit in $\text{N/mm}^2$	Mindestwert der characteristischen Würfeldruckfestigkeit in $\text{N/mm}^2$	Anwendungsbereiche		
C8/10		8	10			
C12/15	B15	12	15			
C16/20	B20	16	20			
C20/25	B25	20	25			
C25/30	B30	25	30			
C30/37		30	37			
	B40		40		z.Bs.: Spannbeton	Stahlbeton, Spannbeton für massige Bauteile
C35/45		35	45			
C40/50	B50	40	50			
C45/55		45	55			
C50/60	B60	50	60			
C55/67		55	67	Hochfester Beton		
C60/75		60	75			
C70/85		70	85			
C80/95		80	90			

Abbildung 4-18: Druckfestigkeiten von Beton [64]

Die physikalischen Eigenschaften des Betons hängen sehr stark von der Betonzusammensetzung, der verwendeten Zement- und Zuschlagsart ab und werden auch durch die Probekörperabmessungen und die Nachbehandlung beeinflusst [38].

Ein Nachteil extremer Festigkeitssteigerungen sind ein Spröbruchverhalten und ein somit fehlendes Fließplateau. Um einem Spröbruch entgegenzuwirken werden dem UHPC Fasern beigegeben, um die Duktilität zu erhöhen [38].

Die Druckfestigkeit des Betons wird durch einen Druckversuch in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 [140] mit eigenen hergestellten Proben ermittelt. Die zwei durch den Biegezugversuch getrennten Prismen werden für den Druckversuch verwendet. Die Druckprüfung erfolgt mit der Zwick Z 250 (Abbildung 4-19) bei einer Erhärtungsdauer weniger als 24 Stunden bzw. mit einer Prüfmaschine vom Type Toni Technik Modelle 2040 mit einer maximalen Prüflast von 3000 kN (Abbildung 4-20) für Versuche ab 24 Stunden.

Die Prüfmaschine Zwick besitzt eine Druckfläche von 40 x 40 mm. Dazu ist zuerst die Kopfplatte des Biegezugversuchs mit der Kopfplatte des Druckversuchs zu wechseln.

Bei der Prüfmaschine Toni Technik wurden die Prismenhälften so auf der Prüfplatte der Maschine platziert, dass sie seitlich innerhalb  $\pm 0,5$  mm ausgerichtet sind, ferner muss in Längsrichtung die Endfläche des Prismas ungefähr 10 mm über die Platte hinausragen können, um die gleiche Belastungsfläche bei verschiedenen Versuchen zu gewährleisten (Abbildung 4-19).



Abbildung 4-19: Druckfestigkeitsprüfung mittels Zwick Z250

Die Lastaufbringung erfolgte kraftgeregelt und die Belastungsgeschwindigkeit wurde

abhängig vom Probenalter gewählt und manuell angeben. Für ein Probenalter bis 24h betrug die Laststeigerung 1 N/mm<sup>2</sup>/s und zu späteren Zeitpunkten 3 N/mm<sup>2</sup>/s.

Das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung wird in dieser Arbeit immer als Mittelwert der Festigkeit von jeweils drei geprüften Prismenhälften angegeben.



Abbildung 4-20: Druckfestigkeitsprüfung mittels Toni Technik Modelle 2040 [36]

Die Druckfestigkeit ergibt sich dabei aus folgenden Formeln:

	$f_c$ .... Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	F .... Höchstkraft beim Bruch [N]	
$f_c = F/A_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	A .... Fläche des	Formel 4-2: Druckfestigkeit [157]
$A = b \times h$ [mm <sup>2</sup> ]	Probenquerschnittes [mm <sup>2</sup> ]	
	b .... Breite der Prisma [mm]	
	h .... Dicke der Prisma [mm]	

## 5 Versuchsdurchführung und Auswertung

### 5.1 Versuchsaufbau und Versuchsplanung

Der experimentelle Teil dieser Arbeit setzt sich aus eigenen Versuchen an Frisch- sowie Festbeton, die im institutseigenen Labor durchgeführt wurden, und deren Ergebnissen zusammen. Es galt herauszufinden, auf welche Art und Weise der Verwendung unterschiedlicher Ausgangsstoffe die Frühfestigkeit, sowie die optimale Homogenität und Verarbeitbarkeit des UHPCs beeinflusst werden. Dabei variieren, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, nur die Art und die Menge der Feinstoffe sowie der Flüssigkeiten, also die wichtigsten Stoffe. Um darüber Aussagen zu tätigen und Ergebnisse einfach vergleichen zu können, wurden verschiedene Mischungsserien hergestellt, wobei bei jeder Mischungsserie der Einfluss der einzelnen Ausgangsmittel geprüft wurde. Die zu variierenden Komponenten sind:

- Zementsorte (Art, Menge)
- Silicastaub (Art, Menge)
- Nanosilica (Art, Menge)
- Flugasche
- Fließmittel (Art, Menge)
- Beschleuniger (Art, Menge)
- Verzögerer.

Die Topf- und Wirblergeschwindigkeit und die Mischungsdauer bleiben immer gleich. Weitere Variable war die Verwendung der Mischungsprozesse unter Vakuum. Die erreichbare möglichst früheste Festigkeit bei ausgewählten Mischungen sowie die Frühfestigkeit nach 24 Stunden bei allen Mischungen und auch die Homogenität werden sowohl durch den Vergleich der Hydratationswärmeentwicklung, Erhärtungsverlauf, als auch durch die Gegenüberstellung der Festigkeiten, Druck- und Biegezugfestigkeit (siehe Abschnitt 4.3) gemessen.

Im Detail wurde wie folgt vorgegangen:

- Es wurden Probekörper (Würfel und Prismen) aus UHPC unmittelbar nach dem

Entleeren des Mixers hergestellt. Die Dauer der Homogenisierung und die Geschwindigkeit des Wirbels blieben bei jeder Mischung gleich. Variabel waren die Rezepturen für die Mischgutherstellung und die Mengen bei jeder Mischung.

- Die Würfelprobekörper wurden gleich nach der Herstellung für die Ermittlung der Temperatur durch die Thermolemente für die Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung verwendet (siehe Abschnitt 4.2.4).
- Die Betonprismen werden in der Schalung bei Raumtemperatur gelagert, bis ein Ausschalen möglich ist, ohne den Probekörper zu zerstören.
- Jeder Probe der Mischungsserie wurde nach 24 Stunden bei Biegezug- und Druckversuch untersucht, um seine Festigkeit nach 24 Stunden zu ermitteln.
- Im Rahmen von Vorversuchen wird von einem Rezept „Basismischung“ als Indikator für den Vergleich der Festigkeiten ausgegangen. Der Beton wird einmal mit und einmal ohne Vakuum hergestellt. Zu Vergleichszwecken werden Mischserie mit exakt derselben Rezeptur aber mit Veränderung eines einzelnen Parameters hergestellt.
- Die Interpretation der Ergebnisse wird auf eine hohe Frühfestigkeit der Mischungen ausgerichtet, jeweils im Vergleich zur Basismischung mit und ohne Vakuum.

## 5.2 Mischungsentwurf

Zur Versuchsdurchführung wurden bei jeder Mischungsrezeptur zwei bzw. drei Liter Frischbeton hergestellt. Die Zusammensetzung der sogenannten Basismischung als Referenzmischung ist in der Tabelle 5-1 angegeben. Um eine optimale Verarbeitbarkeit und Konsistenz des Frischbetons zu erreichen, ist eine Zugabe von Fließmittel sowie Konsistenzhalter, normalerweise die Hälfte der Fließmittelmenge, erforderlich. Bei diesem Rezept ist 4% Fließmittelgehalt, bezogen auf die Zementmenge notwendig. Weiters wurde der Wassergehalt auf 190 l erhöht, der Luftgehalt auf 2% angepasst und der W/Z-Wert auf 0,28 reduziert. Mit diesen Mengen lässt sich eine gute Konsistenz des Betons erzielen. Anzumerken ist, dass bei allen Mischungen die Art des Quarzmehls und Quarzsandes sowie die Art und die Menge des Konsistenzhalters und Entlüfters gleichzubleiben ist.

Tabelle 5-1: Mischungszusammensetzung der Basismischung für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Anteil [%]	Masse [kg]
Portlandzement CEM I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei [PZ- C <sub>3</sub> A-frei ]	100	677,9
Silicastaub 1 [ELKEM 940U]	25	169,5
Quarzmehl 10000 [QM]	50	339
Quarzsand 0,1-0,5 [QS]	100	927,5
Fließmittel 1 [ACE 430]	4	27,13
Konsistenzhalter [SKY 911]	2	13
Entlüfter [DCC]	0,15	1
Anmachwasser	28	170,83
Wasserzementwert [W/Z]	0,28	
Wasserbindemittelwert [W/B]	0,224	
Volumenverhältnis Wasser/Feinteile [V <sub>w</sub> /V <sub>F</sub> ]	0,452	

Weiters wurde eine optimale Mischreihenfolge der Zutaten erprobt, d.h. welche liefert die besten Ergebnisse bezüglich der Verarbeitbarkeit des Betons als auch der Herstellung. Der Mischvorgang sowie die Dauer der einzelnen Mischphasen als auch die Mischwerkzeuggeschwindigkeit sind aus der Tabelle 5-2 zu entnehmen.

Zuerst beginnt der Mischvorgang mit einer Homogenisierungsphase des Feinanteils also Zement, Quarzmehl, Silicastaub und der Sand. Je länger die Trockenmischung dauert, desto homogener und flüssiger ist die Mischung. Auf der anderen Seite wirken sich längere Homogenisierungszeiten günstig auf die Druckfestigkeit aus [68]. Nach der Trockenmischung wurden die flüssigen Bestandteile, das Wasser mit der halben Menge des Fließmittels und des Entlüfters, zugegeben, erst dann erfolgte die erste Intensivmischungsphase. Danach wurde das restliche Fließmittel zugefügt und es erfolgte eine weitere Intensivmischphase [36], [68].

Um hohe Festigkeiten zu erreichen, wurde eine hohe Wirblergeschwindigkeit gewählt, obwohl dies zu einem Temperaturanstieg des Mischgutes führen kann. Untersuchungen von *Safranek* [68] zeigen, dass bei einem Vergleich zwischen Stift- und Sternwirbler, Stiftwirbler höhere Festigkeiten erreichen können. Aus dem Grund wurden alle Mischungen bei dieser Arbeit mit dem Stiftwirbler hergestellt.

Tabelle 5-2: Mischreihenfolge, Dauer der Mischvorgänge und die Werkzeuggeschwindigkeit

Mischphase	Dauer [s]	Wirbler	
		Drehzahl [U/min]	Geschwindigkeit [m/s]
Trockenmischen (CEM, MS, QM, QS)	90	1200	7,9
Zugabe Wasser + ½-FM + DCC	30	1200	7,9
Intensivmischen	60	1200	7,9
Zugabe restliches FM	30	1200	7,9
Intensivmischen	120	1200	7,9
Entlüften [60 mbar] <sup>1)</sup>	180	300	2,0

1) Für Vakuummischung

Im Folgenden werden die durchgeführten Mischserien beschrieben, die Ergebnisse dargestellt und bezüglich des Einflusses der einzelnen Ausgangsstoffe interpretiert. Es wurden sieben Versuchsserien untersucht. Jede Serie unterscheidet sich durch einen Parameter von den anderen Serien.

Pro Versuchsserie wurden für jede Mischrezeptur mindestens sechs Probekörper hergestellt.

Die Mischserien mit den variablen Parametern sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Unterteilung der Mischungsserien nach ihrer variablen Parameter

Mischserie	Variable Parameter
1. Mischungsserie	Menge des Zements bei der Verwendung des Schnellzements
2. Mischungsserie	Zementarten
3. Mischungsserie	Menge und Art des Silicastaubes und Flugasche
4. Mischungsserie	Menge und Art des Nanosilica
5. Mischungsserie	Menge und Art des Fließmittel
6. Mischungsserie	Menge und Art des Beschleunigers
7. Mischungsserie	Menge des Verzögerers

### 5.3 Prüfzeitpunkt

Die Prüfzeitpunkte zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit wurden je nach Versuchsserie unterschiedlich gewählt. Alle Serien wurden unmittelbar nach dem Ausschalen der Probekörper nach einem Tag (24 h) geprüft. Die Serien mit den höchsten Druckfestigkeiten nach 24 h wurden wiederholt und schon zu früheren Zeitpunkten z.B.

nach vier, sechs oder acht Stunden geprüft. An einigen Serien wurden die Festigkeitswerte nach sieben Tagen und 28 Tagen bestimmt.

## 5.4 Bezeichnung

Bei den durchgeführten Versuchen und deren Ergebnissen wurden in diesem Kapitel immer wieder Abkürzungen für Mischungsbestandteile und Versuchsbezeichnungen im Text und in den Abbildungen verwendet. Diese Abkürzungen und deren Bedeutung sind in der Tabelle 5-4 zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Abkürzungen für Mischungsbestandteile und Versuchsbezeichnungen und deren Bedeutung

Abkürzung	Bedeutung
Vac	Vakuummischprozess
PZ	Portlandzement, CEM I 52,5 N, C <sub>3</sub> A-frei
PZ-S	Portlandzement, Schnellzement
PZ-W	Portlandzement, Weißzement
PZ-SP	Portlandzement, Spritzbetonzement
QM	Quarzmehl
QS	Quarzsand
SF	Silicafume / Silicastaub
FM	Fließmittel
KH	Konsistenzhalter
BE	Beschleuniger
VE	Verzögerer
NS	Nanosilica
FA	Flugasche
BZ	Biegezugfestigkeit
D	Druckfestigkeit

## 5.5 Durchführung der Versuchsserien

### 5.5.1 Einfluss der Zementmenge bei der Verwendung von Schnellzement

#### 5.5.1.1 Mischungszusammensetzung

Diese Serie basiert auf der Verwendung von Schnellzement. Dabei kommt jedoch nicht nur Schnellzement zum Einsatz, sondern immer eine Kombination von Portlandzement CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei (PZ) mit Schnellzement (PZ-S) in verschiedenen Verhältnissen.

Im Allgemeinen zeichnet sich der Schnellzement durch seine besonderen Eigenschaften wie z.B. hohe Früh- und Endfestigkeit, schnelles Erstarren und Erhärten aus (Abschnitt 3.3.1.2).

Es wurden bei dieser Mischungsserie die Auswirkungen von Schnellzement auf die Frühfestigkeit und Konsistenz des UHPCs geprüft. Dabei wurde grundsätzlich die Rezeptur der Basismischung beibehalten. Anstatt des reinen Portlandzements wurden hier aber unterschiedliche Kombinationen von Schnellzement und Portlandzement verwendet. Die Verhältnisse dieser Kombinationen sind in der Tabelle 5-5.

Tabelle 5-5: Verhältnisse von PZ-S und PZ-C<sub>3</sub>A frei bei der 1.Mischungsserie

Mischung	Anteil des PZ-S [M.% v. Z]	Anteil des PZ-C <sub>3</sub> A frei [M.% v. Z]
M 1-1	5	95
M1-2	10	90
M1-3	15	85
M1-4	20	80
M1-5	30	70
M1-6	50	50

Die Zusammenstellung der Ausgangsstoffe für die Mischungen dieser Serie sind in der Tabelle 5-6 zusammengestellt.

Tabelle 5-6: Mischungszusammensetzung für 1 m<sup>3</sup> Beton der Versuchsserie mit PZ-S

Ausgangsstoffe	Masse [kg]						
	Basis	M1-1	M1-2	M1-3	M1-4	M1-5	M1-6
PZ	678	644	610,13	576,23	542,33	474,6	329,4
PZ-S	-	33,9	67,8	101,7	135,6	203,4	329,4
SF 1	169,5	169,5	169,5	169,5	169,5	169,5	164,7
QM	339	339	339	339	339	339	329,4
QS	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5
FM 1	27,13	27,13	27,13	27,13	27,13	27,13	18,13
KH	13	13	13	13	13	13	19
Entlüfter	1	1	1	1	1	1	1
Wasser	170,83	170,83	170,83	170,83	170,83	170,83	185
W/Z	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,3
W/B	0,224	0,224	0,224	0,224	0,224	0,224	0,24
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452	0,484
Fließmittel [ M.% v. Z]	4	4	4	4	4	4	5,5

Wie in der Tabelle 5-6 sichtbar ist, verändern sich bei dieser Serie nur die Zementanteile. Die Anteile der anderen Bestandteile des Betons bleiben unverändert. Aus diesem Grund bleibt auch der W/Z-Wert von 0,28 konstant. Es gibt nur eine Ausnahme bei der Mischung M1-6. Da der hohe Anteil des Schnellzements von 50 % zu einem sehr frühen Erstarrungsbeginn führte, wurden bei dieser Mischung der FM-Anteil von 4 auf 5,5 % und der KH-Anteil von 2 % auf 3 % erhöht. Trotzdem war der hergestellte Beton nicht verarbeitbar. Deswegen musste auch der W/Z-Wert von 0,28 auf 0,3 erhöht werden, damit der Beton verarbeitet werden konnte.

Das Problem liegt darin, dass bei der Verwendung des PZ-S, insbesondere bei Anteilen von mehr als 15 %, die Erstarrung sehr früh eintritt und die Verarbeitungszeit sehr kurz ist. Bei der Mischung M1-4 (20 % PZ-S) ergab sich eine Verarbeitungszeit von ca. zehn Minuten und bei der Mischung M1-5 (30 % PZ-S) von ca. sieben Minuten. Die Mischung M1-6 war bereits unmittelbar nach dem Einbau in die Schalungen fest.

#### **5.5.1.2 Hydratationswärmeentwicklung**

Die Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung wurde nach Abschnitt 4.2 bestimmt. In Abbildung 5-1 sind die Verläufe der Hydratationswärme der einzelnen Mischungen dieser Versuchsserie im Vergleich zu den Referenzmischungen Basis und Basis Vac dargestellt. An dieser Stelle soll auch auf den Unterschied zwischen Basis und Basis Vac eingegangen werden. Die Mischung Basis Vac erreicht die höchste Wärmeentwicklung nach der selben Zeit wie die Mischung Basis, nämlich nach etwa 12 Stunden, die Temperatur liegt aber deutlich höher. Nach einem anfänglichen Abkühlen, des vom Mischen gewärmten Frischbeton, steigt die Temperatur früher als bei der Mischung Basis. Allein durch das Vakuummischen wird offenbar die Hydratation beschleunigt. Möglicherweise ist dies auf die durch den geringen Luftgehalt erhöhte Rohdichte und somit dichte Lagerung des Frischbetongefüges zurückzuführen.

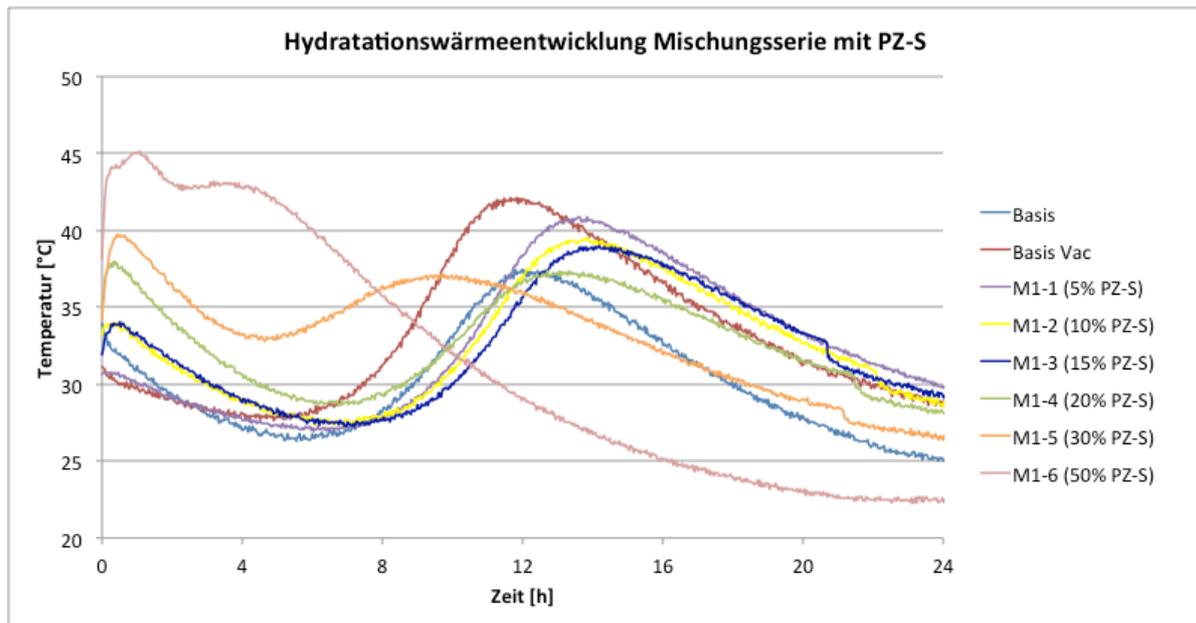


Abbildung 5-1: Hydratationswärmeentwicklung bei 1.Mischungsserie

Mit zunehmendem Anteil an PZ-S verändert sich der anfänglich monomodale Temperaturverlauf hin zu einem bimodalen Verlauf. Dabei verringern sich die Höhen des rechten Peaks, während sich die ersten Peaks deutlich erhöhen. Bereits ab einem Anteil von 10 % PZ-S erfolgt kein anfängliches Abkühlen mehr, sondern unmittelbarer Temperaturanstieg. Der Temperaturabfall zwischen den Peaks wird immer geringer, je höher der Anteil an PZ-S ist.

Die frühe Wärmeentwicklung mit steigendem PZ-S-Anteil lässt auf eine frühere bzw. schnellere Festigkeitsentwicklung schließen.

### 5.5.1.3 Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit wurde, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, durchgeführt. Die Druckfestigkeit wurde nach 24 Stunden bestimmt und das Ergebnis ist in der Tabelle 5-7 zusammengefasst. Die angegebenen Werte sind jeweils die Mittelwerte der Druckfestigkeiten von drei Prismenhälften.

Tabelle 5-7: Druckfestigkeit der 1.Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	51,12
Basis Vac	60,55
M1-1 (5 % PZ-S)	49,35
M1-2 (10 % PZ-S)	52,4
M1-3 (15 % PZ-S)	47,07
M1-4 (20 % PZ-S)	49,46
M1-5 (30 % PZ-S)	52,22

Betrachtet man die 24h- Druckfestigkeit aller Mischungen in Abbildung 5-2 zeigt sich, dass bei den Ergebnissen der Druckfestigkeit der 1. Mischungsserie die Mischungsproben M1-2 (bei Verwendung 10% PZ-S) mit 52,40 N/mm<sup>2</sup> und M1-5 (bei Verwendung 30% PZ-S) mit 52,22 N/mm<sup>2</sup> die höchsten Werte nach 24h erreichten.

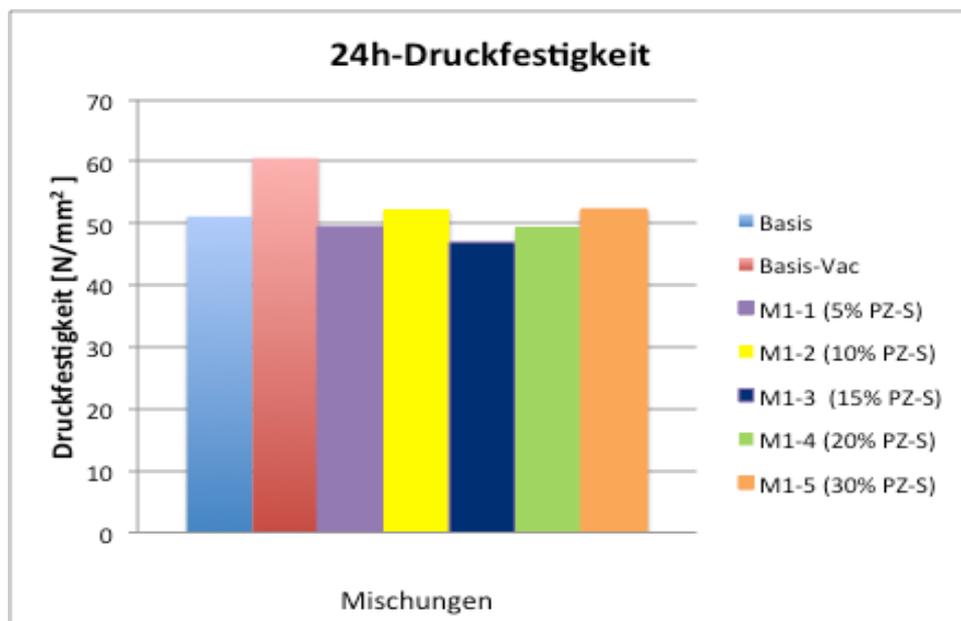


Abbildung 5-2: 24h-Druckfestigkeit aller Mischungen der 1.Mischungsserie

Da Mischung M1-5 (30% Schnellzement) deutlich schlechtere Verarbeitungseigenschaften aufwies, wurde die Verwendung einer Kombination vom 10 % Schnellzement mit 90 % normalem Portlandzement bevorzugt.

Dementsprechend wurde die Mischung M1-2 aus dieser Mischungsserie neben Basis und

Basis Vac gewählt, noch einmal hergestellt und die Frühfestigkeit zum ehest möglichen Zeitpunkt geprüft. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-8 zusammengefasst.

Tabelle 5-8: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M1-2
	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	1,52	1,94	1,47
Prüf 2: 10 Stunden	4,03	5,22	3,49
Prüf 3: 12 Stunden	12,14	13,11	9,11
Prüf 4: 24 Stunden	51,12	60,55	52,40

Um nun eine Aussage über den Einfluss der Benutzung des Schnellzements machen zu können, werden im Folgenden die Ergebnisse grafisch dargestellt (Abbildung 5-3).

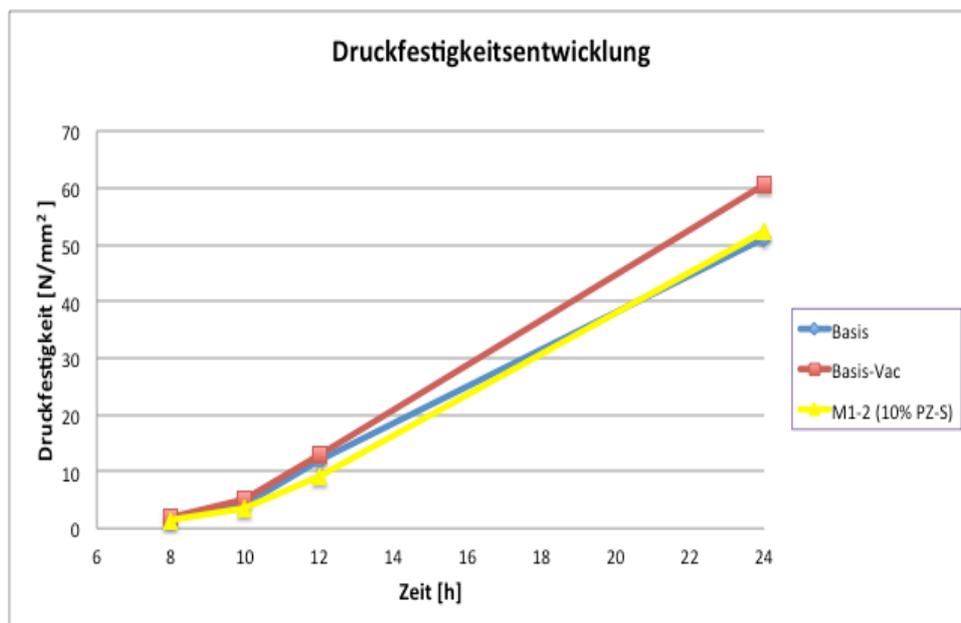


Abbildung 5-3: Übersicht über die Druckfestigkeit der 1. Mischungsserie

Der früheste Zeitpunkt zum Ausschalen der Proben und zur Festigkeitsprüfung war nach 8 Stunden. Die Ergebnisse der Druckfestigkeiten zeigen, dass die 8h-Festigkeit noch sehr niedrig war. Bereits nach 10 Stunden verdoppelten sich die Festigkeiten und nach 12 Stunden stieg die Festigkeit ungefähr um das Dreifache. Nach 12h besteht zwischen Basismischung und Basis Vac kaum ein Unterschied in der Druckfestigkeit, die Mischung M1-2 weist zu diesem Zeitpunkt eine etwas geringere Druckfestigkeit auf.

Nach 24h liegt die Festigkeit der Mischung M1-2 nur knapp über jener der Basismischung. Die Druckfestigkeit der Mischung Basis Vac liegt etwa 20% darüber.

Nach der Überprüfung der Frühfestigkeit wurde auch die Druckfestigkeit nach 7, 14 und 28 Tagen ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-9 zusammengefasst.

Tabelle 5-9: Druckfestigkeit der 1.Mischungsserie nach 7, 14, und 28 Tagen

Mischung	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	14d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	28d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	96,3	105,92	132,83
Basis - Vac	97,95	126,34	154,68
M1-1 (5 % PZ-S)	-	-	-
M1-2 (10 % PZ-S)	92,86	105,64	117,09
M1-3 (15 % PZ-S)	91,79	-	-
M1-4 (20 % PZ-S)	97,15	-	-
M1-5 (30 % PZ-S)	89,99	-	-

Nach 7 Tagen wies die Basismischung höhere Festigkeit als die Mischung M1-2 auf. Die höchste Festigkeit lag hier bei der Mischung Basis Vac.

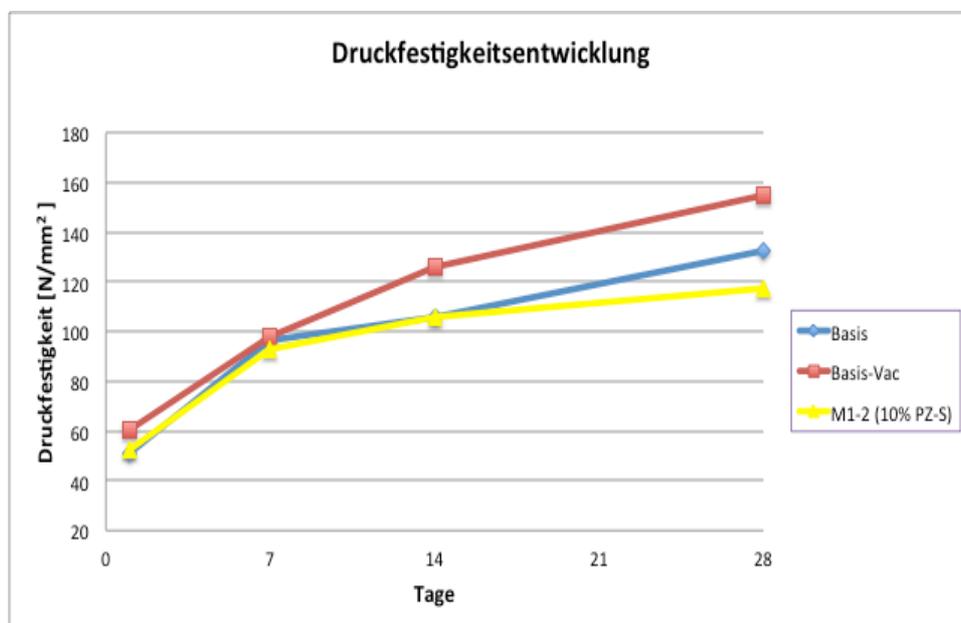


Abbildung 5-4: Übersicht über die Druckfestigkeit der 1. Mischungsserie

In Abbildung 5-4 zeigt sich, dass - obwohl es kaum Unterschied zwischen den Frühfestigkeiten der Mischungsprobe M1-2 und der Basismischung gab - die Verwendung von 10 % Schnellzement zu einer deutlich geringeren Druckfestigkeit nach 28 Tagen führte.

#### 5.5.1.4 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, durchgeführt. Die Biegezugfestigkeit wurde ebenfalls bis zu einem Betonalter von 24 Stunden bestimmt und das Ergebnis ist in der Tabelle 5-10 zusammengefasst.

Die angegebenen Werte sind jeweils die Mittelwerte der Biegezugfestigkeit von drei Probekörpern (Prismen).

Tabelle 5-10: Biegezugfestigkeit der 1. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis Vac	10,36
M1-1 (5 % PZ-S)	8,07
M1-2 (10 % PZ-S)	8,23
M1-3 (15 % PZ-S)	7,21
M1-4 (20 % PZ-S)	8,02
M1-5 (30 % PZ-S)	7,69

Die Biegezugfestigkeit aller Probekörper, die aus den Mischungen mit Schnellzement hergestellt wurden, ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

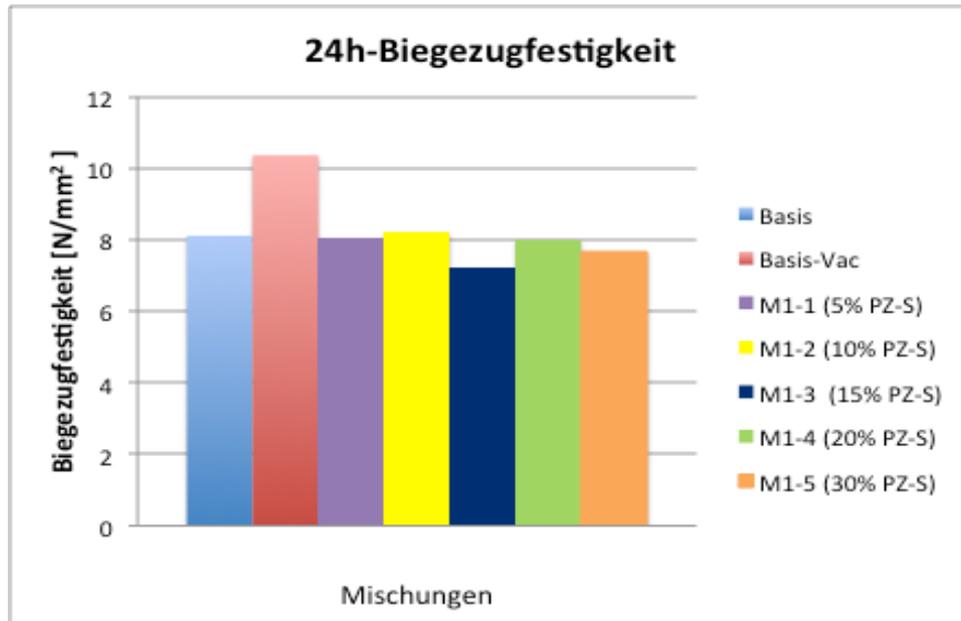


Abbildung 5-5: 24h-Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 1. Mischungsserie

Der höchste Wert der Biegezugfestigkeit nach 24 Stunden von 8,23 N/mm<sup>2</sup> konnte bei Verwendung von 10 % Schnellzements erreicht werden.

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit zu früheren Zeitpunkten sind in der Tabelle 5-11 zusammengefasst.

Tabelle 5-11: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M1-2
	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	0,76	0,77	0,76
Prüf 2: 10 Stunden	1,51	1,88	1,28
Prüf 3: 12 Stunden	3,22	3,30	2,44
Prüf 4: 24 Stunden	8,11	10,36	8,23

Wie schon bei der Betrachtung der Druckfestigkeit zeigt sich auch hier, dass nach 12h zwischen Basismischung und Basis Vac kaum ein Unterschied in der Biegezugfestigkeit besteht, die Mischung M1-2 weist zu diesem Zeitpunkt eine etwas geringere Biegezugfestigkeit auf.

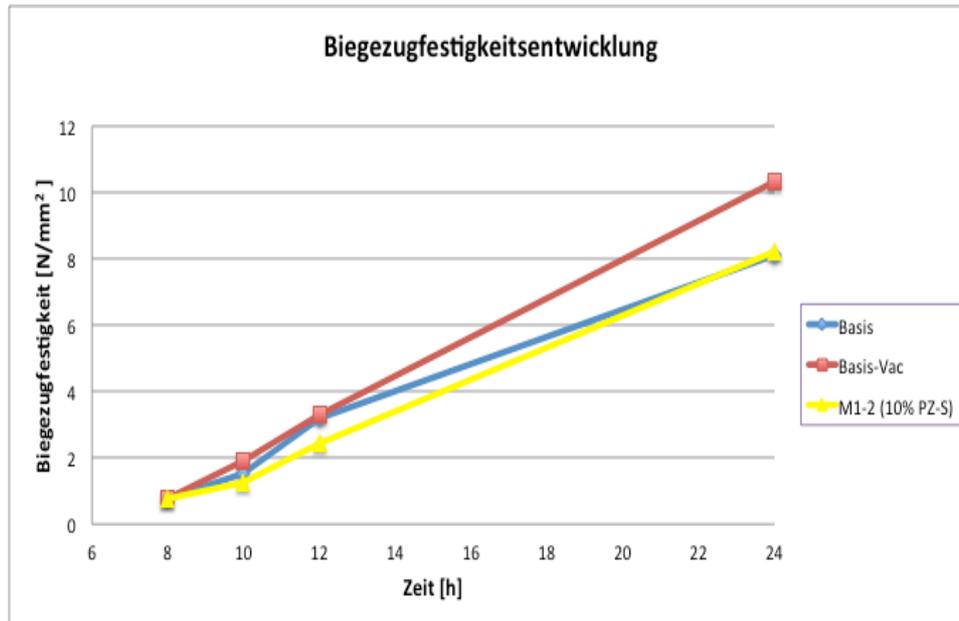


Abbildung 5-6: Übersicht über die Biegezugfestigkeit der 1. Mischungsserie

Wie die Abbildung 5-6 zeigt, erreicht die Mischungsprobe M1-2 zu keinem Zeitpunkt eine höhere Biegezugfestigkeit als die Mischungen Basis und Basis Vac.

#### 5.5.1.5 Erkenntnisse aus der 1. Versuchsreihe

Die durchgeführten Versuche bezüglich der 1. Mischungsserie zeigen, dass sich mit steigender Menge des Schnellzements die Verarbeitbarkeit der Mischungen verschlechtert. Unter Umständen könnte jedoch mit weiteren Maßnahmen, wie zum Beispiel der Verwendung eines geeigneten Verzögerers, die Verarbeitbarkeit der Mischungen verbessert werden. Darauf wurde aber im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die Frühfestigkeit (sowohl Druck- wie auch Biegezugfestigkeit) der Mischung M1-2 nicht höher ist als die der Basismischung und deutlich unter jener der Mischung Basis Vac liegt. Die Druckfestigkeit liegt nach 28 Tagen unter denen der beiden Referenzmischungen.

Die Mischung M1-2 bzw. die Verwendung von Schnellzement wird deshalb nicht weiter untersucht.

## 5.5.2 Einfluss der Zementsorte auf die Festigkeitsentwicklung

### 5.5.2.1 Mischungszusammensetzung

In der zweiten Versuchsreihe wird die Verwendung unterschiedlicher Zementsorten untersucht. Es handelt sich im Grunde um die gleiche Mischung, nur die Zementsorte wird variiert. Die verwendeten Zementsorten in dieser Versuchsserie sind:

- **Basis:** Portlandzement CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei,
- **M2-1:** Portlandzement-Weißzement,
- **M2-2:** Portlandzement-Spritzbetonzement.

Die Auswahl dieser Zementsorten für diese Versuchsreihe basiert darauf, dass alle diese Zemente aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften höchste Anforderungen betreffend Früh- und Endfestigkeit erfüllen sollten (siehe Abschnitt 3.3.1). Das Ziel dieser Serie ist es herauszufinden, welche dieser Zemente den günstigsten Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung des UHPCs haben könnten.

Zuerst wurden die Probekörper nach den Mischungsrezepturen laut Tabelle 5-12 hergestellt.

Tabelle 5-12: Mischungszusammensetzung bei verschiedene Zementsorte für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]		
	Basis	M2-1	M2-2
PZ	678	-	-
PZ-G	-	-	-
PZ-W	-	678	-
PZ-SP	-	-	678
SF 1	169,5	169,5	169,5
QM	339	339	339
QS	927,5	927,5	927,5
FM 1	27,13	30,5	30,5
KH	13	13	13
Entlüfter	1	1	1
Wasser	170,83	168,26	168,26
W/Z	0,28	0,28	0,28
W/B	0,224	0,224	0,224
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,452	0,452	0,452
Fließmittel [M.% v. Z]	4	4,5	4,5

### 5.5.2.2 Hydratationswärmeentwicklung

In Abbildung 5-7 sind die Verläufe der Hydratationswärme der Mischungen dieser Versuchsreihe im Vergleich mit den Referenzmischungen Basis und Basis Vac dargestellt. Auf den Unterschied, zwischen der Hydratationswärme den Referenzmischungen, ist in Abschnitt 5.5.1.2 bereits näher eingegangen worden.

Die Mischung M2-1 und M2-2 erreichten die höchste Wärmeentwicklung nach etwa 10 Stunden und damit früher als die beiden Referenzmischungen. Die Temperatur lag aber deutlich höher als bei den Referenzmischungen, welche auf einen früheren Hydratationsbeginn und eine schnellere Festigkeitsentwicklung hinweist.

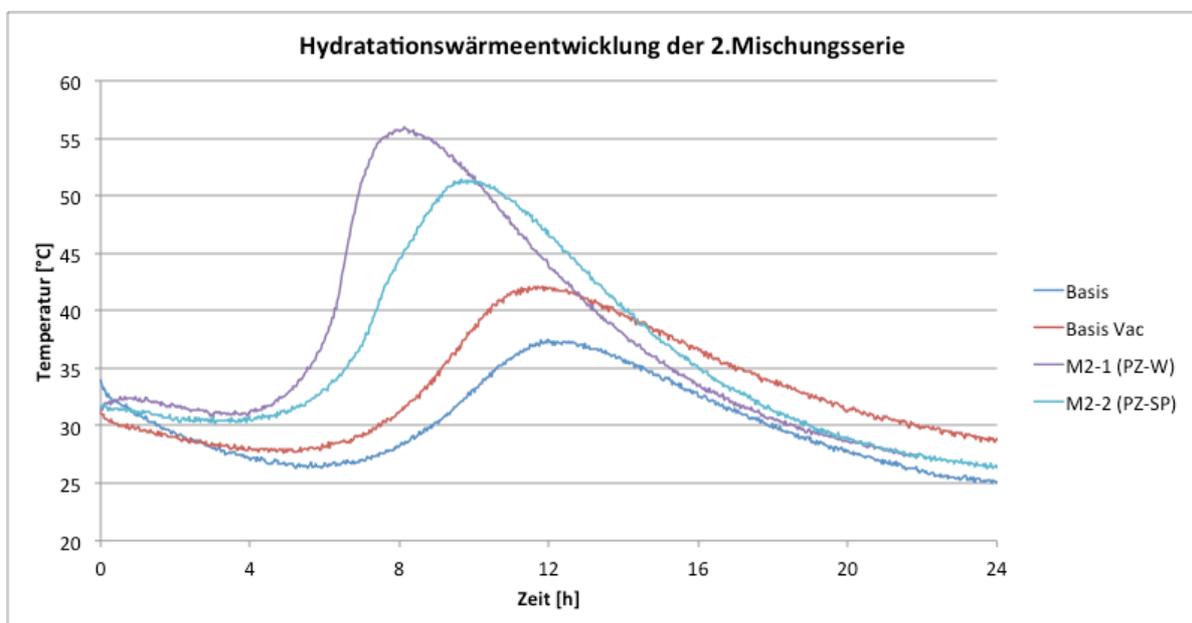


Abbildung 5-7: Hydratationswärmeentwicklung der 2. Mischungsserie

### 5.5.2.3 Druckfestigkeit

Es wurden auch in dieser Versuchsserie zuerst die Festigkeiten nach 24h ermittelt.

Die Ergebnisse der 24h-Druckfestigkeiten dieser Mischungsreihe sind in der Tabelle 5-13 zusammengefasst.

Tabelle 5-13: Druckfestigkeit der 2. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	51,12
Basis Vac	60,55
M2-1 (PZ-W)	65,15
M2-2 (PZ-SP)	65,96

So wie die Ergebnisse in Abbildung 5-8 dargestellt sind, lässt sich erkennen, dass die Verwendung von PZ-SP mit 65,96 N/mm<sup>2</sup> sowie PZ-W mit 65,15 N/mm<sup>2</sup> zu deutlich höheren Frühfestigkeiten führen als die Mischungen Basis mit 51,12 N/mm<sup>2</sup> und Basis Vac mit 60,55 N/mm<sup>2</sup>. Der Unterschied zwischen der Mischung PZ-SP und der Mischung mit PZ-W ist sehr gering.

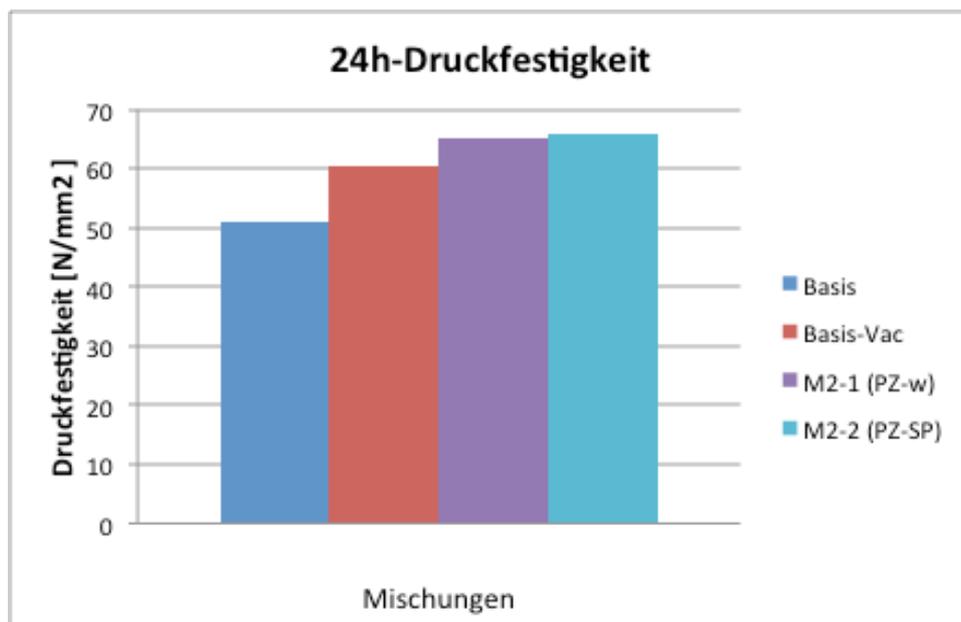


Abbildung 5-8: 24h Druckfestigkeit aller Mischungen der 2. Mischungsserie

Bei den Ergebnissen der Druckfestigkeit sieht man, dass die Mischung M2-2 mit PZ-SP nach 24 Stunden die höchsten Werte erreicht. Aus diesem Grund wurde diese Mischung noch einmal hergestellt und die Festigkeiten zu früheren Zeitpunkten geprüft. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-14 und grafisch in der Abbildung 5-9 ersichtlich.

Tabelle 5-14: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M2-2
	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	1,52	1,94	4,96
Prüf 2: 10 Stunden	4,03	5,22	11,46
Prüf 3: 12 Stunden	12,14	13,11	23,56
Prüf 4: 24 Stunden	51,12	60,55	65,96

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung von PZ-SP bereits nach 8h, 10h und 12h deutlich höhere Druckfestigkeiten erreichen als die beiden Referenzmischungen.

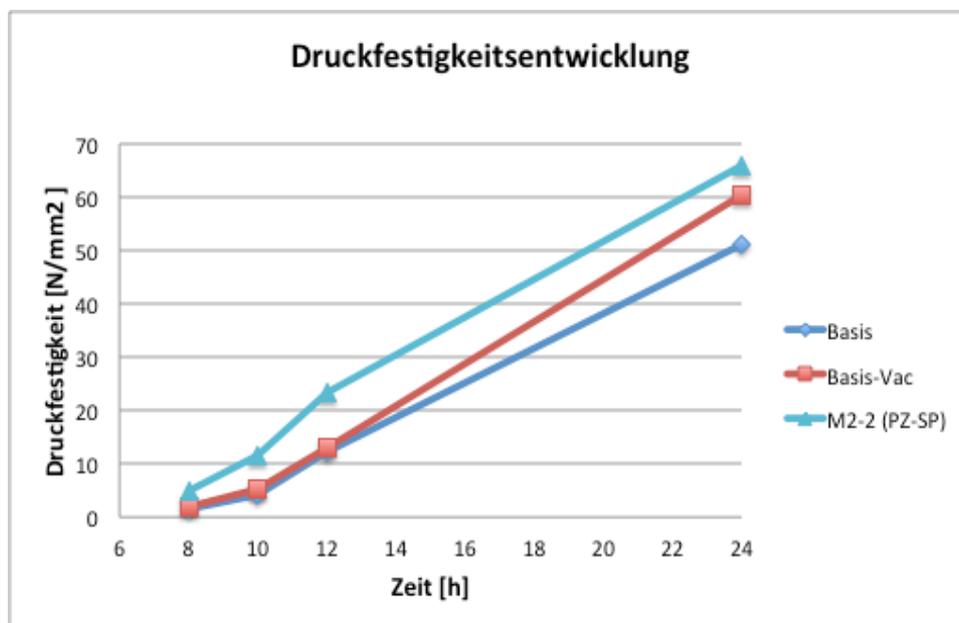


Abbildung 5-9: Übersicht über die Druckfestigkeit der 2. Mischungsserie

Auch hier wurden die Druckfestigkeiten nach 7, 14 und 28 Tagen überprüft (Tabelle 5-15).

Tabelle 5-15: Druckfestigkeit der 2. Serie nach 7, 14, und 28 Tagen

Mischung	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	14d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	28d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	96,3	105,92	132,83
Basis Vac	97,95	126,34	154,68
M2-1 (PZ-W)	110,49	-	-
M2-2 (PZ-SP)	102,91	104,42	136,57

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, werden sie im folgenden Diagramm (Abbildung 5-10) grafisch dargestellt.

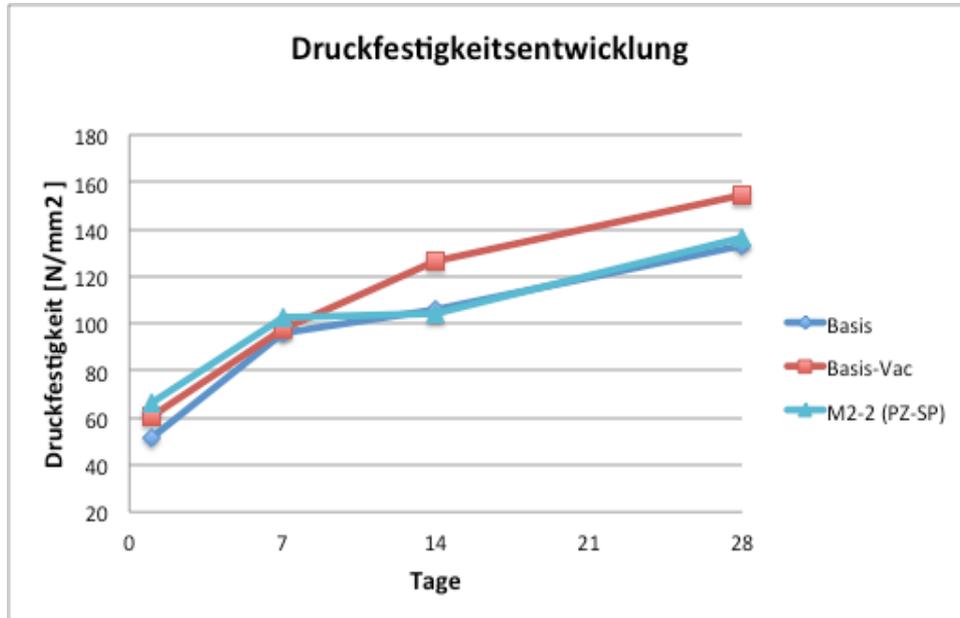


Abbildung 5-10: Übersicht über die Druckfestigkeit der 2. Mischungsserie

Es ist erkennen, dass die Mischung M2-2 den höchsten Festigkeitsanstieg innerhalb der ersten 7 Tage aufweist. Danach sinkt sie allerdings auf das Niveau der Mischung Basis ab.

#### 5.5.2.4 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde wie in den vorherigen Versuchsreihen nach 24h bestimmt und die Ergebnisse in der Tabelle 5-16 zusammengefasst.

Tabelle 5-16: Biegezugfestigkeit der 2. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis Vac	10,36
M2-2 (PZ-W)	9,61
M2-3 (PZ-SP)	10,97

Nach 24 Stunden wies hier auch die Mischung M2-3 mit PZ-SP die höchste Biegezugfestigkeit von 10,97 N/mm<sup>2</sup> auf (Abbildung 5-11).

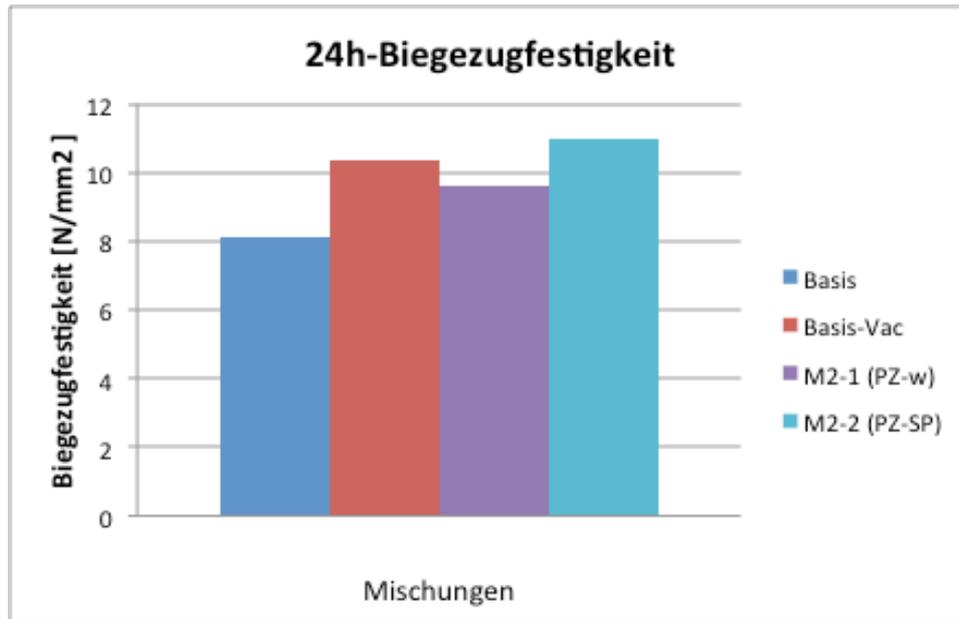


Abbildung 5-11: 24h Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 2. Mischungsserie

Die durchgeführten Biegezugversuche in früheren Zeitpunkten führten zu den Ergebnissen, in Tabelle 5-17.

Tabelle 5-17: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M2-2
	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	0,76	0,77	1,63
Prüf 2: 10 Stunden	1,51	1,88	2,93
Prüf 3: 12 Stunden	3,22	3,30	4,22
Prüf 4: 24 Stunden	8,11	10,36	10,97

In diesem Vergleich ist zu sehen, dass die Mischung M2-2 mit PZ-SP auch nach 8h, 10h und 12h wesentlich höhere Biegezugfestigkeiten liefert als die beiden Referenzmischungen (Abbildung 5-12).

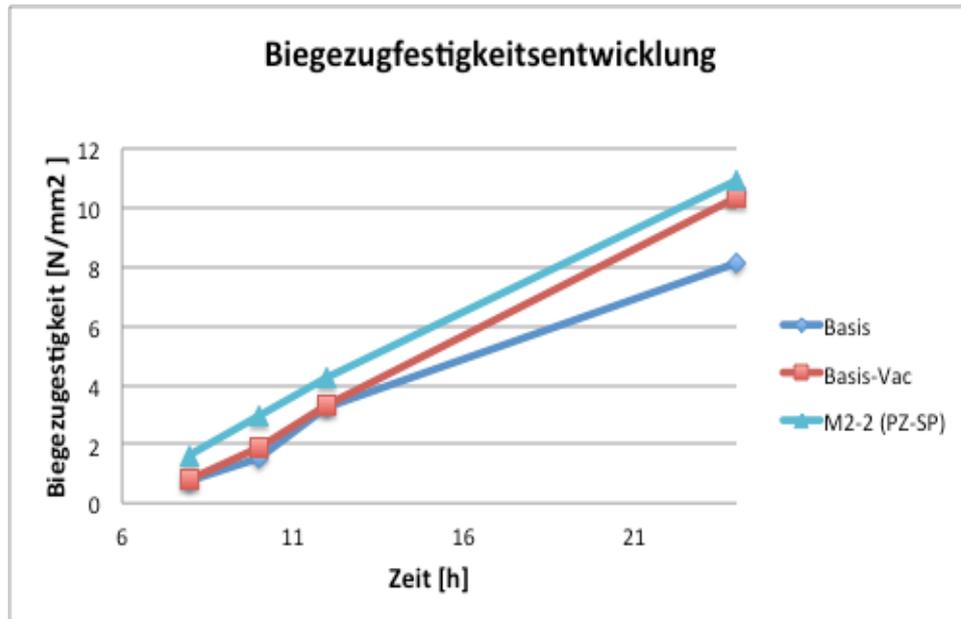


Abbildung 5-12: Übersicht über die Biegezug- und Druckfestigkeit der 2. Mischungsserie

### 5.5.2.5 Erkenntnisse aus der 2. Versuchsreihe

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verwendung der PZ-SP und PZ-W für die Herstellung von UHPC mit hoher Frühfestigkeit geeignet sind. Zwischen PZ-SP und PZ-W erkennt man nach 24h kaum einen Unterschied in der Druckfestigkeit. Die Mischung mit PZ-SP weist gegenüber der Mischung mit PZ-W eine etwas höhere Biegezugfestigkeit auf.

Beide Zemente werden daher in später folgenden Mischungsentwürfen nochmals verwendet.

## 5.5.3 Einfluss von Silicastaub und Flugasche auf die Festigkeitsentwicklung

### 5.5.3.1 Mischungszusammensetzung

Die Verwendung dieser feinsten Zusatzstoffe führt im Allgemeinen zu höheren Druckfestigkeiten von UHPC. Aus diesem Grund werden üblicherweise bei der Herstellung von UHPC Silicastaub oder gegebenenfalls auch geeignete Flugaschen verwendet. Die Festigkeitseigenschaften verbessern sich durch die puzzolanische Reaktion dieser Stoffe. Darüber hinaus kann die Packungsdichte der eingesetzten Materialien (siehe Abschnitt 3.3.4) erhöht werden.

In dieser Mischungsserie wurden einerseits die Auswirkungen der Verwendung von Microsilica Elkem 940 U als SF1 in verschiedenen Dosierungen (Abschnitt 3.3.4.1) sowie eine Kombination von Elkem und Flugasche (FA) im Verhältnis von 50:50 untersucht. Für

diese Mischungen wurde Portlandzement CEM I C<sub>3</sub>A-frei verwendet

Auf der anderen Seite wurde die Verwendung von Elkem Microwhite als SF2 (Abschnitt 3.3.4.2) mit Portlandzement CEM I C<sub>3</sub>A-frei, aber auch mit dem Weißzement (Abschnitt 3.3.1.3) verglichen. Die Nummerierungen der Mischungen und der Anteil des verwendeten Silicastaubs sind in der Tabelle 5-18 dargestellt.

Tabelle 5-18: Nummerierungen der Mischungen und SF-Anteile der Mischungen

Mischung	Zementsorte	Anteil des SF1 [M.% v. Z]	Anteil des SF2 [M.% v. Z]	Anteil der FA [M.% v. Z]
M 3-1	PZ	0	-	-
M3-2	PZ	10	-	-
M3-3	PZ	20	-	-
Basis	PZ	25	-	-
M3-4	PZ	12,5	-	12,5
M3-5	PZ	-	25	-
M3-6	PZ-W	-	25	-
M3-7 <sup>1)</sup>	PZ-W	25	-	-

1) Diese Mischung ist die gleiche Mischung wie M2-1, um den Einfluss der Verwendung von verschiedenen Arten des Silicastaubs mit Weißzement vergleichen zu können.

Die Zusammensetzung der verwendeten Materialien zur Herstellung der Mischungen dieser Serie sind in der Tabelle 5-19 zusammengefasst.

Tabelle 5-19: Mischungszusammensetzung bei Verwendung verschiedener Mengen von SF und FA für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]							
	M3-1	M3-2	M3-3	Basis	M3-4	M3-5	M3-6	M3-7 (M2-1)
PZ	781	741,7	705,6	678	678	678	678	-
PZ-W	-	-	-	-	-	-	-	678
SF 1	-	74	141	169,5	85	-	-	169,5
FA	-	-	-	-	85	-	-	-
SF2	-	-	-	-	-	169,5	169,5	-
QM	390,85	370,85	352,85	339	339	339	339	339
QS	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5
FM 1	35,2	33,4	31,75	27,13	27,13	27,13	30,5	30,5
KH	15,65	14,85	14,1	13	13	13	13	13
Entlüfter	1	1	1	1	1	1	1	1
Wasser	181,8	171,5	164,1	170,83	170,83	170,83	168,26	168,26
W/Z	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
W/B	0,28	0,25	0,23	0,224	0,249	0,224	0,224	0,224
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,55	0,50	0,47	0,452	0,455	0,452	0,452	0,452
Fließmittel [M.% v. Z]	4,5	4,5	4,5	4	4	4	4,5	4,5

### 5.5.3.2 Hydratationswärmeentwicklung

Gleich wie bei den anderen Versuchsserien wurde bei dieser Reihe auch die Hydratationswärmeentwicklung gemessen. Anzumerken ist, dass bezüglich der Verarbeitbarkeit alle Mischungen dieser Versuchsserie eine fließfähige Konsistenz aufwiesen. Die Hydratationswärmeentwicklung ist in der Abbildung 5-13 grafisch dargestellt.

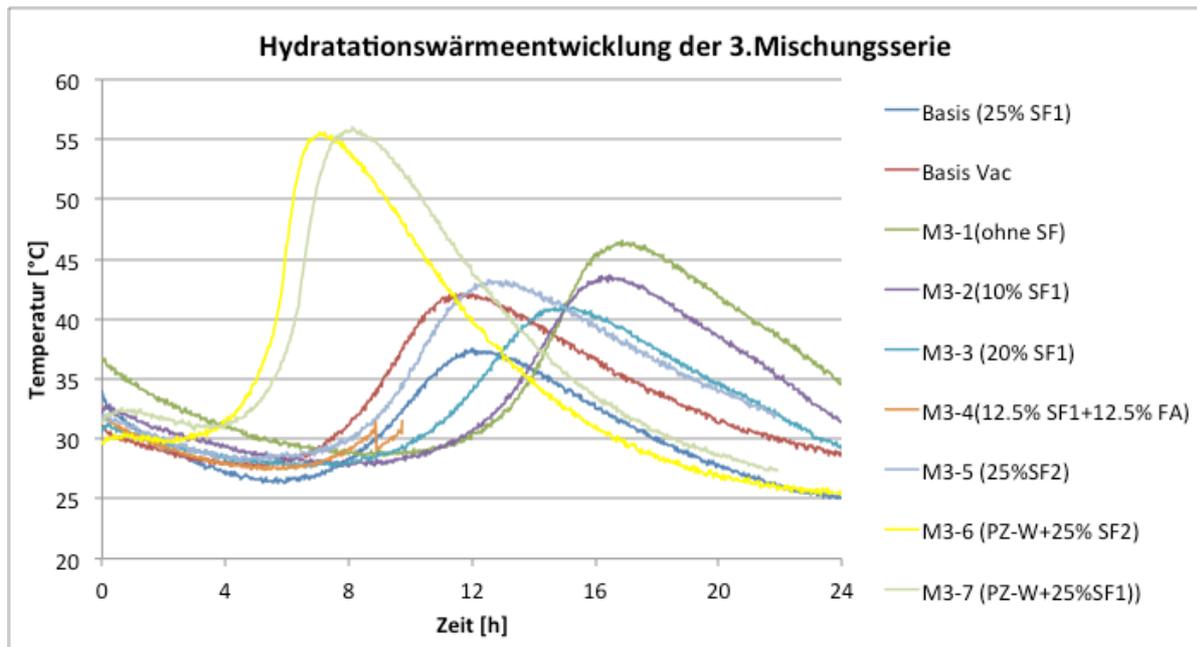


Abbildung 5-13: Hydratationswärmeentwicklung der 3. Mischungsserie

Wenn die Mischungen M3-1 (ohne SF) und M3-2 (10% SF-1) mit den anderen Mischungen verglichen werden, stellt man fest, dass diese zwei Mischungen später mit dem Temperaturanstieg beginnen (nach etwa 12 Stunden) und die höchste Temperatur nach ca. 17 Stunden erreichen. Ab einem Anteil von 20% SF1 mit PZ, tritt der Temperaturanstieg früher ein, so dass bei der Basismischung mit einem 25%-igen Anteil von SF1 der Anstieg nach ca. 6 Stunden beginnt. Das Diagramm zeigt auch, dass die Maximaltemperatur abnimmt, je mehr SF1 mit PZ verwendet wird. Die Begründung liegt darin, dass die Zementmenge die durch SF ersetzt wird, d.h. das SF langsamer bzw. später reagiert (puzzolanische Reaktion).

Durch die Verwendung von Weißzement beginnt der Temperaturanstieg relativ früh und erreicht auch eine sehr hohe Temperatur (wie bereits in der vorhergehenden Versuchsreihe festgestellt wurde).

Der Vergleich zwischen der Verwendung von PZ mit SF1 und SF2 sowie der Verwendung von PZ-W mit SF1 und SF2 zeigen, dass in dem Fall beide (SF1 und SF2) praktisch gleich reagieren.

Über die Wärmeentwicklung bei Verwendung von Flugasche kann keine Aussage getroffen werden, weil der Temperatursensor ausgefallen ist.

### 5.5.3.3 Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Druckfestigkeiten nach 24 Stunden lieferte folgende Ergebnisse (Tabelle 5-20).

Tabelle 5-20: Druckfestigkeit der 3. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis (25% SF1)	51,12
Basis Vac	60,55
M3-1 (ohne SF)	41,53
M3-2 (10% SF1)	43,86
M3-3 (20% SF1)	44,17
M3-4 (12.5% SF1+12.5%FA)	50,44
M3-5 (25% SF2)	52,47
M3-6 (PZ-W+25% SF2)	67,51
M3-7 (PZ-W+25% SF1)	65,15

Anhand der dargestellten Ergebnisse im folgenden Diagramm (Abbildung 5-14) lässt sich feststellen, dass sich mit steigendem Anteil von SF 1 die 24h-Festigkeit etwas erhöht. Die Verwendung der Kombination SF1:FA liefert eine nur leicht geringere Druckfestigkeit als die Mischung Basis mit 25% SF1. Die Flugasche reagiert in diesem Fall offenbar genauso schnell wie der Silicastaub.

Es ist praktisch kein Unterschied zwischen SF1 und SF 2 (Anteil 25 %), sowohl mit PZ als auch mit PZ-W, zu erkennen. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Probe M3-6 betreffend die Frühfestigkeit höhere Werte liefert, was auf den Weißzement zurückzuführen ist.

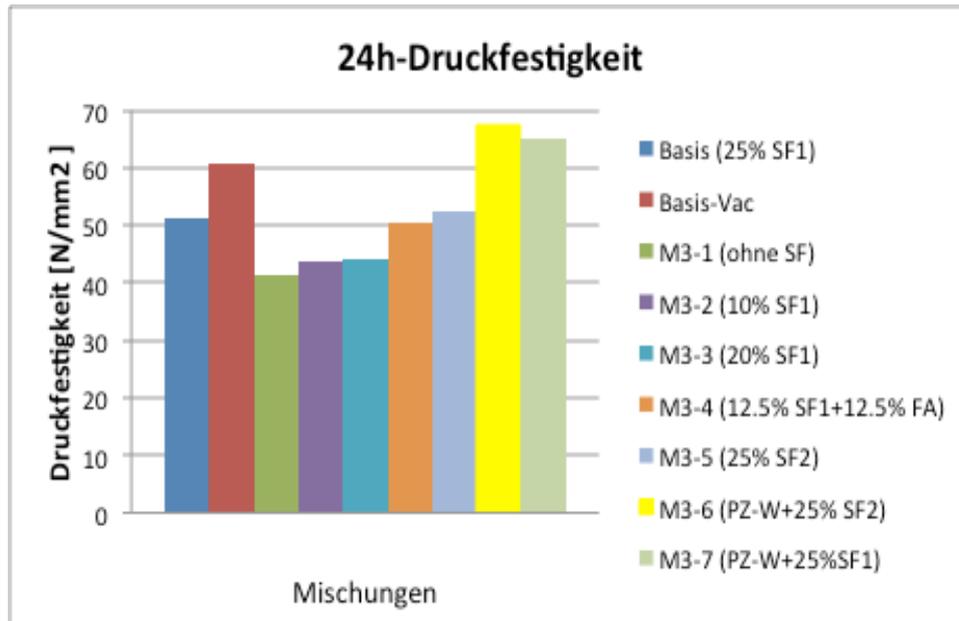


Abbildung 5-14: 24h Druckfestigkeit aller Mischungen der 3. Mischungsserie

Da die Mischung M3-6 (Weißzement mit 25% Microwhite) die höchste Festigkeit nach 24 Stunden erreichte, wurde für diese die Festigkeit zu früheren Zeitpunkten geprüft. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-21 erfasst.

Tabelle 5-21: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M3-6
	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 4 Stunden	-	-	3,1
Prüf 2: 6 Stunden	-	-	10,28
Prüf 3: 8 Stunden	1,52	1,94	28,39
Prüf 4: 10 Stunden	4,03	5,22	41,84
Prüf 3: 12 Stunden	12,14	13,11	49,97
Prüf 4: 24 Stunden	51,12	60,55	67,51

Die erhaltenen Ergebnisse sind in der Abbildung 5-15 dargestellt.

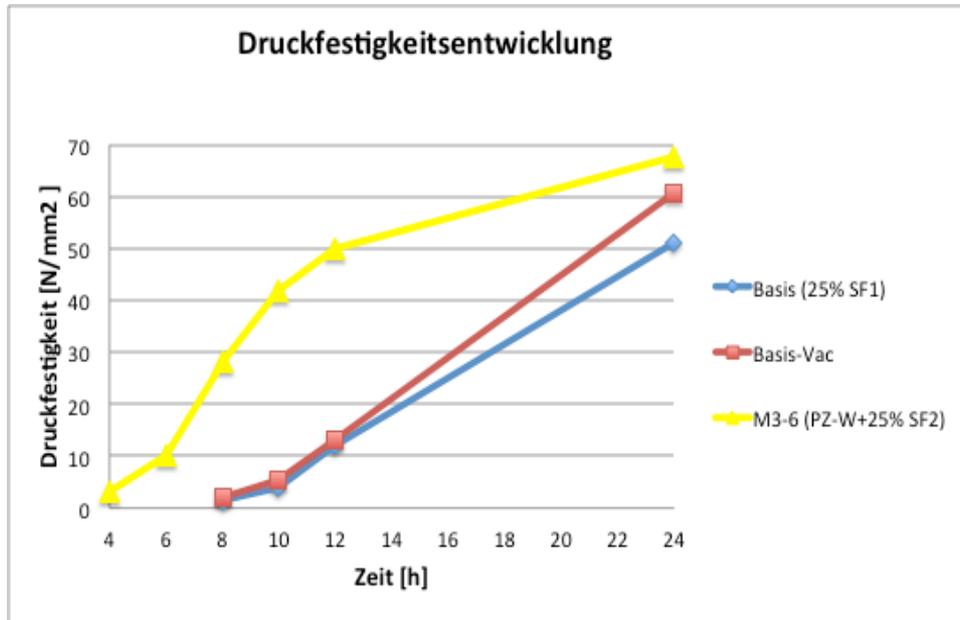


Abbildung 5-15: Übersicht über die Druckfestigkeit der 3. Mischungsserie

Die Mischung M3-6 lieferte bereits nach 8h, 10h, und 12h enorme Druckfestigkeiten, die deutlich höher lagen als bei der Mischung M2-2 mit PZ-SP aus der vorigen Versuchsserie.

Wie bei allen anderen Versuchsserien, wurde auch hier die Druckfestigkeit nach 7, 14 und 28 Tagen bestimmt und in der Tabelle 5-22 zusammengefasst.

Tabelle 5-22: Druckfestigkeit der 3. Mischungsserie nach 7, 14, und 28 Tagen

Mischung	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	14d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	28d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	96,3	105,92	132,83
Basis Vac	97,95	126,34	154,68
M3-6	94,38	112,14	125,03

Die Ergebnisse zeigen, dass -trotz der wesentlich höheren Werte der Frühfestigkeit der Mischung M3-6 wieder die beiden Referenzmischungen die höchsten Festigkeiten erreichen.

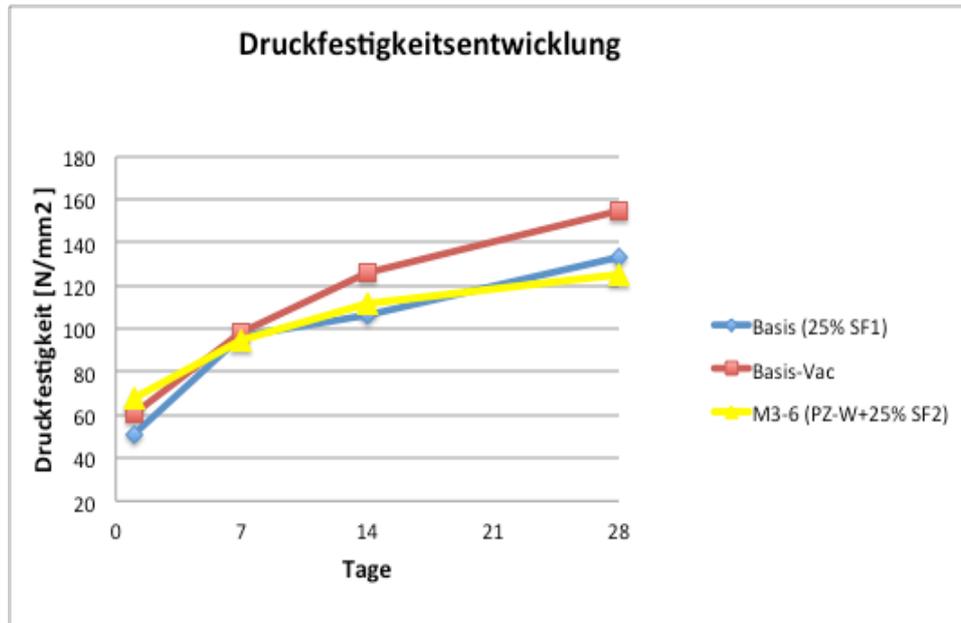


Abbildung 5-16: Übersicht über Druckfestigkeit der 3. Mischungsserie

In der Abbildung 5-16 ist zu erkennen, dass die Mischung M2-2 den höchsten Festigkeitsanstieg innerhalb der ersten 7 Tage aufweist. Danach sinkt sie allerdings auf das Niveau der Mischung Basis ab.

### 5.5.3.4 Biegezugfestigkeit

Wie bei den vorherigen Versuchen wurde die Biegezugfestigkeit nach 24h geprüft, die Daten findet man in der Tabelle 5-23.

Tabelle 5-23: Druckfestigkeit der 3. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis - Vac	10,36
M3-1 (ohne SF)	6,43
M3-2 (10% SF1)	7,00
M3-3 (20% SF1)	8,03
M3-4 (12.5% SF1+12.5%FA)	7,67
M3-5 (25% SF2)	8,14
M3-6 (PZ-W+25% SF2)	10,92

Wie in dem folgenden Diagramm (Abbildung 5-17).

zu sehen ist, erreicht die Probe M3-6 die höchste 24h-Biegezugfestigkeit. Alle Erkenntnisse, die man während der Druckversuche erhielt, gelten hier auch für die Biegezugfestigkeit.

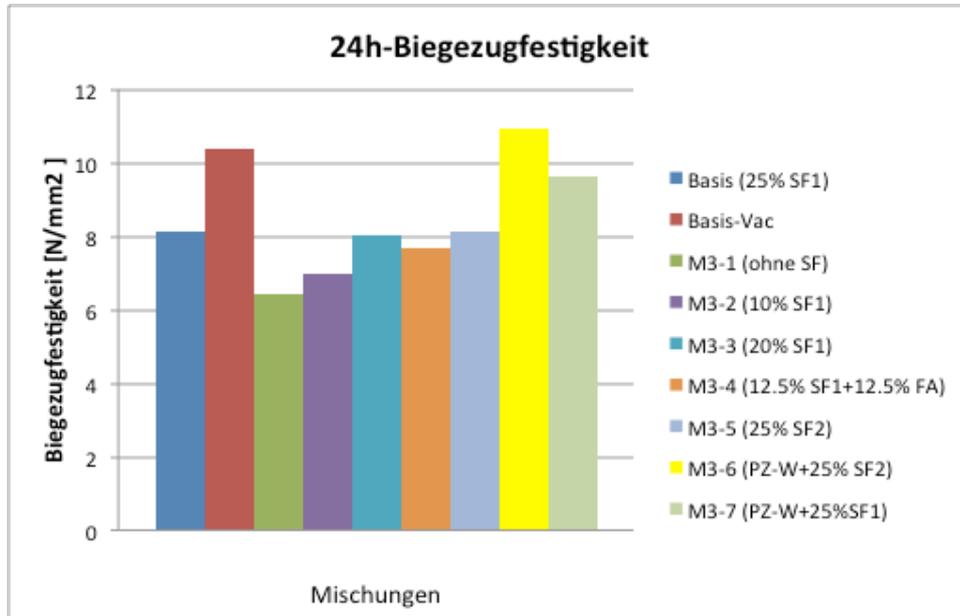


Abbildung 5-17: 24h Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 3. Mischungsserie

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit zu früheren Zeitpunkten sind in der Tabelle 5-24 zusammengefasst.

Tabelle 5-24: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M3-6
	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	0,76	0,77	5,42
Prüf 2: 10 Stunden	1,51	1,88	8,21
Prüf 3: 12 Stunden	3,22	3,30	9,06
Prüf 4: 24 Stunden	8,11	10,36	10,92

Wie bei der Druckfestigkeit, erreicht hier auch die Mischung M3-6 die maximale Biegezugfestigkeiten innerhalb der ersten 24 Stunde (Abbildung 5-18).

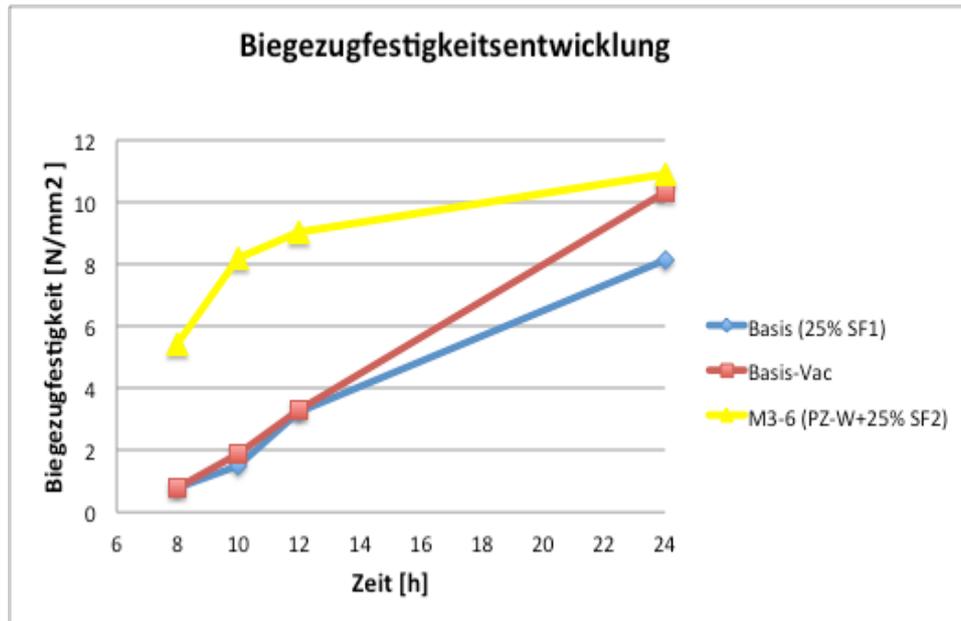


Abbildung 5-18: Übersicht über die Biegezugfestigkeit der 3. Mischungsserie

### 5.5.3.5 Erkenntnisse aus der 3. Versuchsreihe

Die Verwendung von Silicastaub trägt zur Steigerung der Frühfestigkeit bei. Je höher der Anteil des Silicastaubes in der Mischung ist, desto höher ist auch die Festigkeit nach 24h. Diese Steigerung ist aber im Verhältnis zur eingesetzten Menge relativ gering.

Es besteht praktisch kein Unterschied zwischen den beiden verwendeten Typen (SF1 und SF2) bei der Festigkeit nach 24h.

### 5.5.4 Einfluss von Nanosilica auf die Festigkeitsentwicklung

#### 5.5.4.1 Mischungszusammensetzung

Aufgrund des steigenden Interesses an der Verwendung von Nanopartikeln als reaktive Zusatzstoff im Beton, wird in dieser Versuchsserie der Einfluss der Zugabe von Nanosilica (NS) auf die Festigkeitsentwicklung des UHPCs untersucht (siehe Abschnitt 3.3.6). Dementsprechend wurden die Auswirkungen von zwei verschiedenen Nanosilica in unterschiedlichen Dosierungen laut Tabelle 5-26 ermittelt. Die Mischungsserie unterteilt sich wie folgt:

- NS1: KS 300 mit 1 %, 3 % und 5 % Anteil
- NS2: Aerosil 130 mit 0,15 % und 3 % Anteil.

Tabelle 5-25: NS-Anteile der Mischungen

Mischung	Anteil von NS1 [M.% v. Z]	Anteil von NS2 [M.% v. Z]
M4-1	1	-
M4-2	3	-
M4-3	5	-
M4-4	-	0,15
M4-5	-	3
Basis	-	-

Anzumerken ist, dass in dieser Studie bei der Verwendung von KS 300 kein Silicastaub mehr benutzt wurde, aber Aerosil in einer Kombination mit SF1, in einem Anteil von 25% bei M4-4 und 22% bei M4-5 verwendet wurde. Die Zusammensetzung der verwendeten Materialien zur Herstellung der Mischungen dieser Serie sind in der Tabelle 5-26 zusammengefasst.

Tabelle 5-26: Mischungszusammensetzung bei Verwendung verschiedene Menge und Art von NS für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]					
	M4-1	M4-2	M4-3	M4-4	M4-5	Basis
PZ	777,3	768,7	760,25	705,6	705,6	678
SF 1	-	-	-	169,5	149	169,5
NS1	7,75	23,05	38	-	-	-
NS2	-	-	-	1	20,33	-
QM	389	384,35	380,15	339	339	339
QS	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5
FM 1	35,0	34,6	34,2	27,13	27,13	27,13
KH	15,55	15,35	15,2	13	13	13
Entlüfter	1	1	1	1	1	1
Wasser	180,8	178,8	176,8	170,7	170,7	170,83
W/Z	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
W/B	0,28	0,27	0,27	0,224	0,23	0,224
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,54	0,53	0,52	0,451	0,451	0,452
Fließmittel [ M.% v. Z]	4,5	4,5	4,5	4	4	4

Nach der Herstellung der Proben war zu sehen, dass die Mischung M4-1 praktisch flüssig, die Mischung M4-2 immer noch fließend, aber nicht so flüssig wie M4-1 und die Mischung

M4-3 zähflüssig bis plastisch ist.

#### 5.5.4.2 Hydratationswärmeentwicklung

In der Abbildung 5-19 sind die Hydratationswärmeverläufe aller Mischungen dieser Versuchsreihe dargestellt.

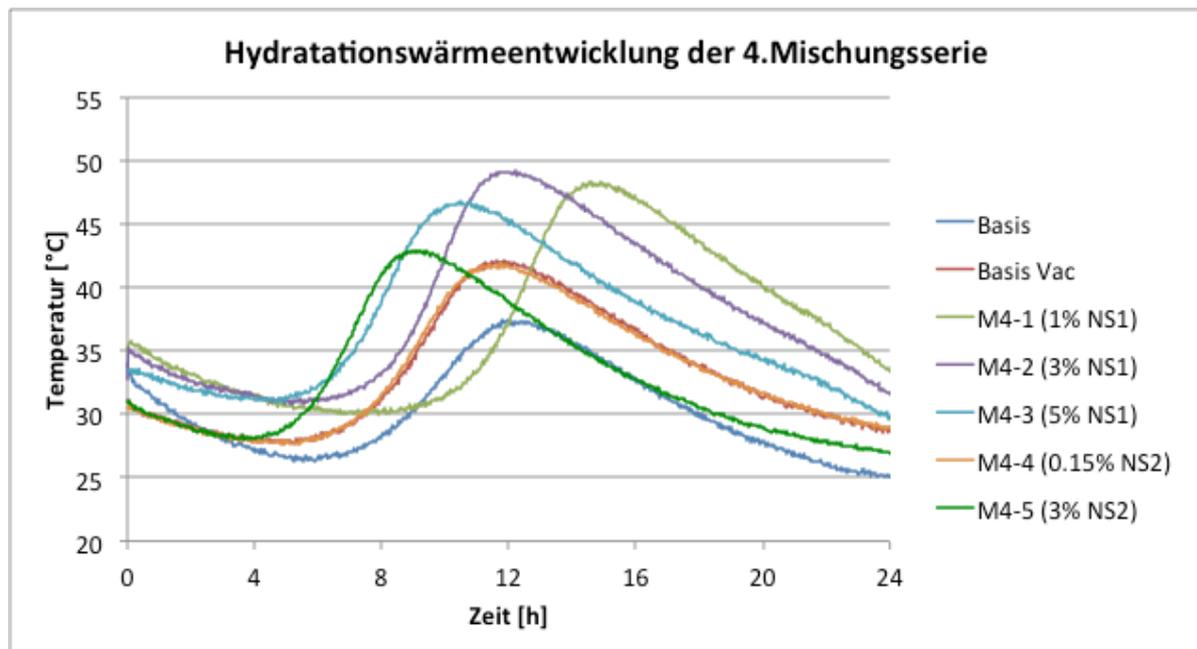


Abbildung 5-19: Hydratationswärmeentwicklung der 4. Mischungsserie

Der Anstieg aller Kurven ist sehr ähnlich, der Unterschied liegt nur am Zeitpunkt des Anstieges und der maximalen Temperatur. Die Verwendung von 1% an NS1 in der Mischung M4-1 führt zum spätesten Beginn der Erwärmung. Der Temperaturanstieg der Mischung M4-2 mit 3% von NS1 erfolgte deutlich früher als bei M4-1. Die Mischungsprobe M4-3 mit 5% von NS1 wies den frühesten Temperaturanstieg auf. Man kommt zum Ergebnis, dass mit steigendem Anteil NS1 die Hydratation früher beginnt. Die Mischungen mit NS2 anstatt NS1 zeigen, dass mit 0,15 % NS2 fast idente Temperaturkurven wie bei Basis Vac erreicht wurden. Mit einer Erhöhung der NS2 Menge auf 3% begann auch der Temperaturanstieg früher. Die Maximaltemperatur war aber geringer als bei den Mischungen mit NS1.

### 5.5.4.3 Druckfestigkeit

In der Tabelle 5-27 sind die Werte der Druckfestigkeiten nach 24 Stunden aller Mischungen dieser Versuchsreihe zusammengestellt. Die weiteren Ergebnisse nach 7, 14, und 28 Tagen sind der Tabelle 5-29 zu entnehmen.

Tabelle 5-27: Druckfestigkeit der 4. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	51,12
Basis Vac	60,55
M4-1 (1% NS1)	45,64
M4-2 (3 % NS1)	48,41
M4-3 (5% NS1)	51,22
M4-4 (0,15 % NS2)	52,59
M4-5 (3 % NS2)	58,39

Die höchste Druckfestigkeit lag hier mit 58,39 N/mm<sup>2</sup> bei der Mischung M4-5, hergestellt mit 3% von Aerosil (NS2). Interessant bei der Betrachtung dieser Werte ist, dass die Mischung Basis Vac (ohne NS bei einem Unterdruck von 60mbar und einer Entlüftungsdauer von 3 Minuten) höhere Festigkeiten im Vergleich bei der Mischung M4-5 aufweist. Die Abbildung 5-20 zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeit nach 24 Stunden.

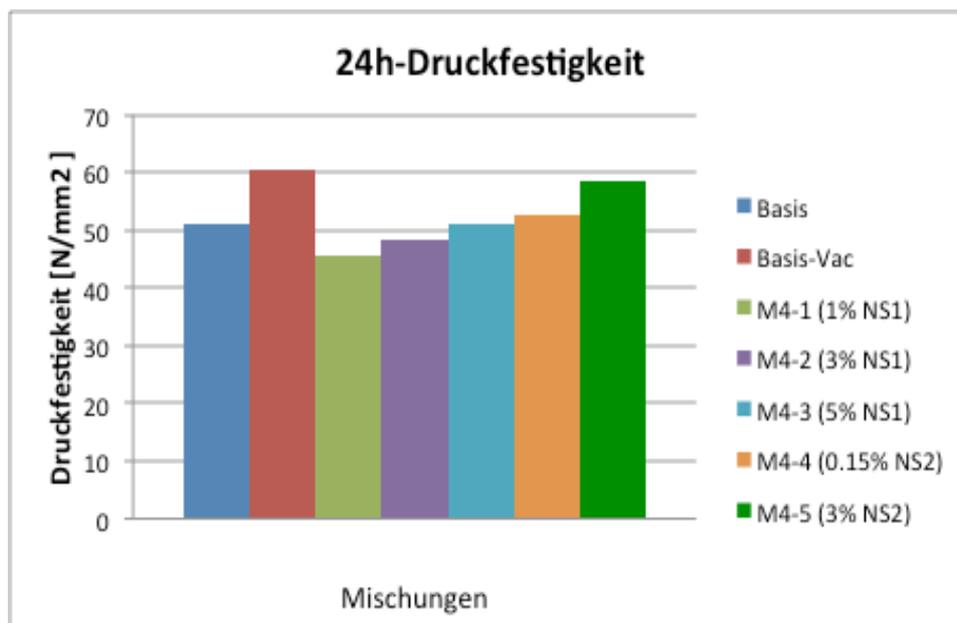


Abbildung 5-20: 24h-Druckfestigkeit aller Mischungen der 4. Mischungsserie

Das Diagramm zeigt, dass sich bei den Mischungen mit NS1, die 24h-Druckfestigkeit mit steigendem NS1-Anteil erhöht. Weiters kann man erkennen, dass die Mischung M4-3 mit 5% NS1 etwa die gleiche 24h-Druckfestigkeit wie die Basismischung mit 25% SF1 aufweist, wobei sich die Konsistenz jedoch etwas verschlechtert.

Außerdem weist die Mischung M4-4 mit 0,15% NS2 etwa die gleiche 24h-Druckfestigkeit wie die Basismischung mit 25% SF1 auf. Die Mischung M4-5 mit 3% NS2 weist eine höhere Druckfestigkeit als die Mischung Basis und die Mischung M4-4 auf.

Da die Mischung M4-5 bessere Ergebnisse im Bezug der 24h-Druckfestigkeit liefert, wurde sie für die Festigkeitsprüfung zu früheren Zeitpunkten ausgewählt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-28.

Tabelle 5-28: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M4-5
	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	1,52	1,94	3,30
Prüf 2: 10 Stunden	4,03	5,22	9,17
Prüf 3: 12 Stunden	12,14	13,11	18,92
Prüf 4: 24 Stunden	51,12	60,55	58,39

Aus der obigen Tabelle ist ersichtlich, dass die Mischung M4-5 höhere Frühfestigkeiten als Basis und Basis Vac liefert. Die Festigkeit nach 10 Stunden ist fast doppelt so hoch. Nach 24 Stunden liegt die Festigkeit der Mischung M4-5 jedoch knapp unter jener der Mischung Basis Vac.

Zur Veranschaulichung, werden die Ergebnisse in der Abbildung 5-21 grafisch dargestellt.

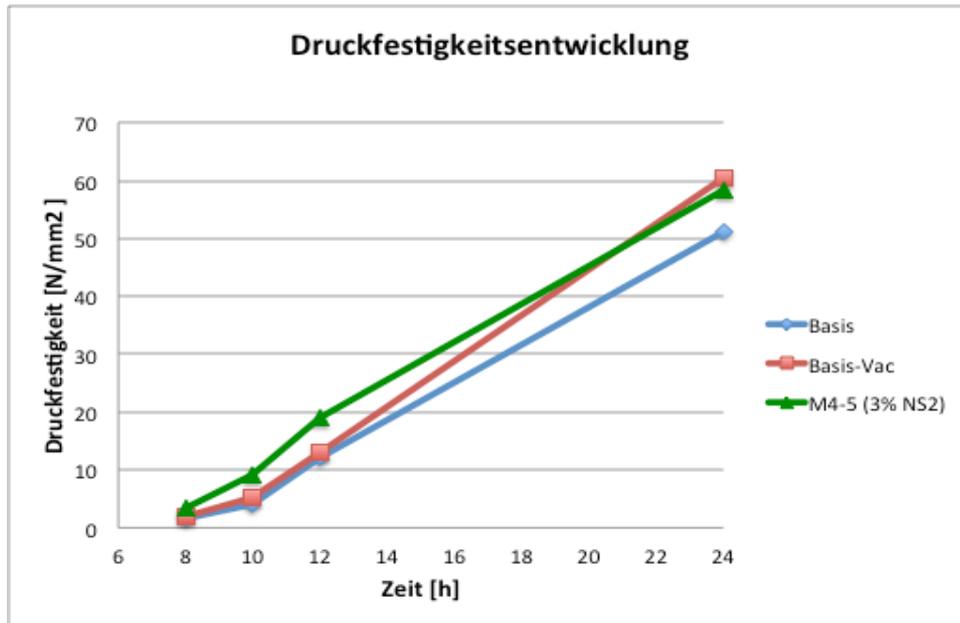


Abbildung 5-21: Übersicht über die Druckfestigkeit der 4. Mischungsserie

Es wurden ebenfalls die Druckfestigkeiten nach 7, 14 und 28 Tagen geprüft und in der Tabelle 5-29 zusammengefasst.

Tabelle 5-29: Druckfestigkeit der 4. Mischungsserie nach 7, 14, und 28 Tagen

Mischung	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	14d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	28d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	96,3	105,92	132,83
Basis - Vac	97,95	126,34	154,68
M4-1 (1% NS1)	88,26	-	-
M4-2 (3% NS1)	88,10	-	-
M4-3 (5% NS1)	95,08	-	-
M4-4 (0,15% NS2)	99,33	-	-
M4-5 (3% NS2)	99,69	106,72	125,51

Nach 7 und 14 Tagen liegt die Druckfestigkeit der Mischung M4-5 leicht über jener der Basismischung, nach 28 Tagen jedoch erreicht die Basismischung eine höhere Druckfestigkeit.

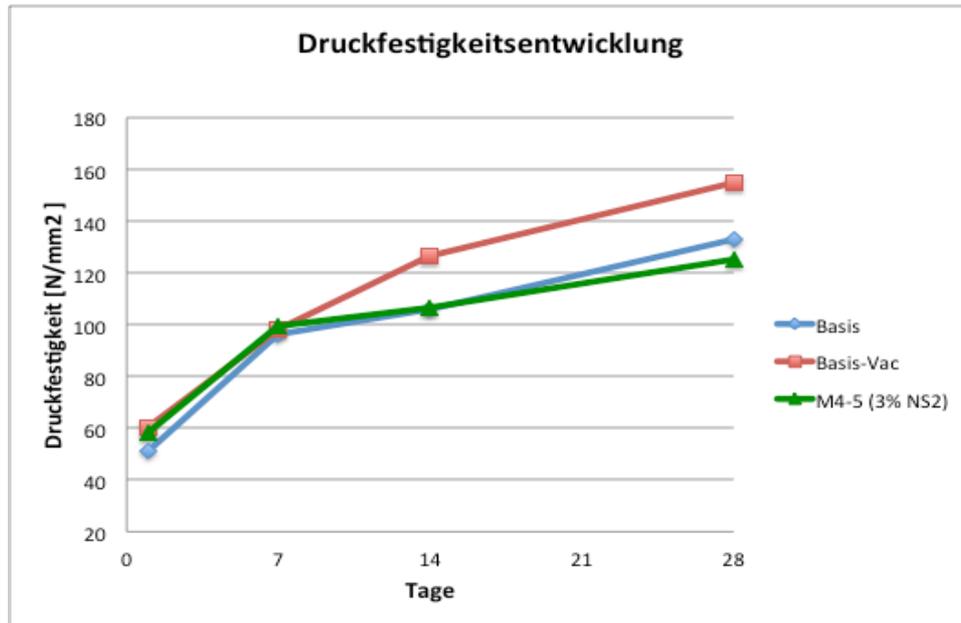


Abbildung 5-22: Übersicht über die Druckfestigkeit der 4. Mischungsserie

Aus der Abbildung 5-22 ist eindeutig erkennbar, dass sich der Druckfestigkeitsanstieg der Mischung M4-5 nach 7 Tagen verringert.

#### 5.5.4.4 Biegezugfestigkeit

Auch hier wurde die 24h-Biegezugfestigkeit ermittelt. Die erhaltenen Ergebnisse sind in der Tabelle 5-30 ersichtlich.

Tabelle 5-30: Biegezugfestigkeit der 4. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis Vac	10,36
M4-1 (1 % NS1)	7,30
M4-2 (3 % NS1)	7,62
M4-3 (5 % NS1)	7,49
M4-4 (0,15 % NS2)	9,54
M4-5 (3 % NS2)	9,70

Wie bei der Druckfestigkeit erreichte auch hier die Mischung M4-5 die höchste 24h-Biegezugfestigkeit dieser Mischungsserie, welche im Vergleich mit den Referenzmischungen zwischen der Biegezugfestigkeit der Basismischung und jener der Mischung Basis Vac liegt (Abbildung 5-23).

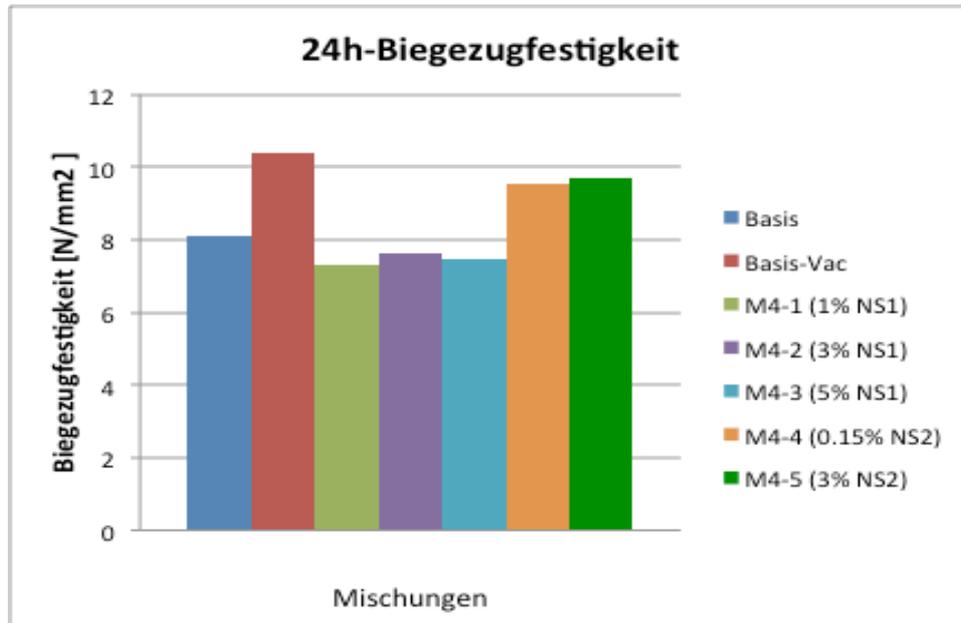


Abbildung 5-23: 24h-Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 4. Mischungsserie

Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass die Verwendung von 3% von NS2 die höchste Biegezugfestigkeit dieser Serie liefert.

Im Folgenden werden die Biegezugfestigkeiten der 4. Mischungsserie nach 8h, 10h, 12h und 24h in der Tabelle 5-31 zusammengefasst.

Tabelle 5-31: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M4-5
	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	0,76	0,77	1,31
Prüf 2: 10 Stunden	1,51	1,88	2,66
Prüf 3: 12 Stunden	3,22	3,30	4,19
Prüf 4: 24 Stunden	8,11	10,36	9,70

Wie in der Abbildung 5-24 zu sehen ist, innerhalb der ersten 24 Stunden entfiel auf die Mischung M4-5 jeweils die höchste Biegezugfestigkeit. Danach sinkt diese allerdings auf das Niveau der Mischung Basis Vac ab.

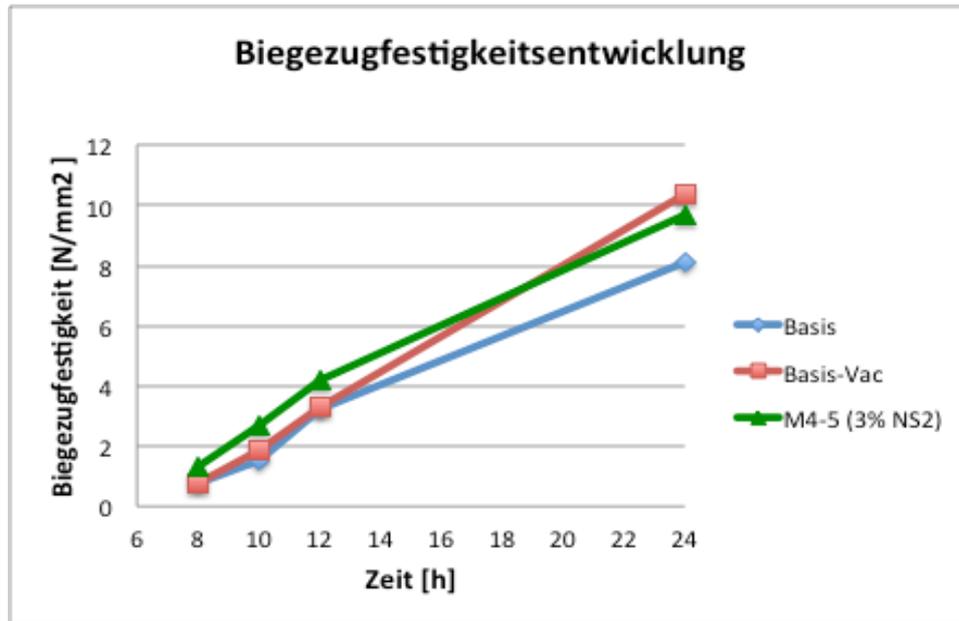


Abbildung 5-24: Übersicht über die Biegezugfestigkeit der 4. Mischungsserie

#### 5.5.4.5 Erkenntnisse aus der 4. Versuchsreihe

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich erwartungsgemäß die 24h-Druckfestigkeit mit der steigenden Menge Nanosilica erhöht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung von nur 5% NS1 (ohne Silicafume) nach 24h zur gleichen Druckfestigkeit führt wie die Verwendung von 25% SF1. Die Konsistenz der Mischung verschlechtert sich aber etwas.

Die Verwendung von NS2 in Kombination mit SF1 führt zu hohen Frühfestigkeiten, nach 28 Tagen liegt die Druckfestigkeit allerdings unter jener der Basismischung.

#### 5.5.5 Einfluss des Fließmittels auf die Festigkeitsentwicklung

##### 5.5.5.1 Mischungszusammensetzung

Eine der wichtigsten Komponenten bei der Herstellung des UHPCs ist das Fließmittel. Um eine Aussage über den Einfluss des Fließmittels auf die Frühfestigkeiten machen zu können, werden bei dieser Versuchsserie zwei besonders leistungsfähige Verflüssiger (siehe Abschnitt 3.3.7) in verschiedenen Dosierungen verwendet. Die Versuchsserie unterteilt sich wie folgt (Tabelle 5-32):

- FM1: ACE 430 mit einem Anteil von 4% bezogen auf die Zementmasse
- FM2: ACE 500 mit Anteilen von 6%, 8 % und 10 % bezogen auf die Zementmasse.

Tabelle 5-32: FM-Anteile der Mischungen

Mischung	Anteil von FM1 [M.% v. Z]	Anteil von FM2 [M.% v. Z]
Basis	4	-
M5-1	-	6
M5-2	-	8
M5-3	-	10

Die Zusammensetzung des Betons für diese Versuchsreihe ist in der Tabelle 5-33 angegeben. Anzumerken ist, dass es sich bei der Mischung mit einem Anteil von 4 % FM1 um die Basismischung handelt.

Tabelle 5-33: : Mischungszusammensetzung verschiedener Dosierungen und Art von FM für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]			
	Basis	M5-1	M5-2	M5-3
PZ	678	686	682	678
SF 1	169,5	171,5	170,5	169,5
QM	339	343	341	339
QS	927,5	927,5	927,5	927,5
FM 1	27,13	-	-	-
FM2	-	41,15	54,6	67,85
KH	13	12,35	13,65	13,55
Entlüfter	1	1	1	1
Wasser	170,83	152,35	141,95	131,7
W/Z	0,28	0,28	0,28	0,28
W/B	0,224	0,22	0,22	0,22
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,452	0,45	0,45	0,45
Fließmittel [ M.% v. Z]	4	3,43	4,57	5,81

Die Konsistenz der Betone wurde augenscheinlich vom Fließmittel beeinflusst.

Die Mischung M5-1 mit 6% FM2 war von ähnlicher Konsistenz wie die Mischung Basis mit 4% FM1. Die Mischung M5-2 mit 8% FM2 war etwas flüssiger, die Mischung M5-3 mit 10% FM2 war sehr dünnflüssig.

Das Ziel dieser Versuchsserie war es nicht, festzustellen, dass Beton mit mehr Fließmittel flüssiger wird, sondern wie sich die hohe Dosierung von FM2 auf die Festigkeitsentwicklung des Betons auswirkt. Fließmittel auf PCE-Basis sind bekannt für

ihre verzögernde Wirkung.

### 5.5.5.2 Hydratationswärmeentwicklung

Die Hydratationswärmeentwicklung ist in der Abbildung 5-25 dargestellt.

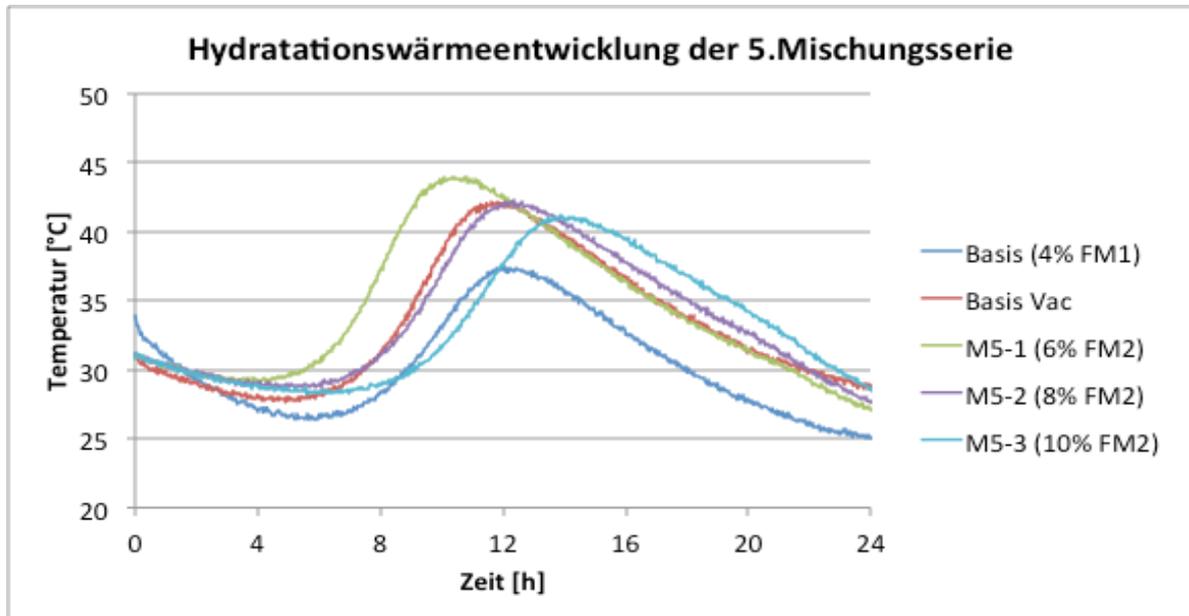


Abbildung 5-25: Hydratationswärmeentwicklung bei der 5. Mischungsserie

In dem Diagramm lässt sich ablesen, dass die Erwärmung bei den Mischungen M5-1 (6% FM2) und M5-2 (8% FM2) deutlich früher eintritt als bei der Mischung Basis mit nur 4% FM1. Erst die sehr hohe Dosierung von 10% FM2 bewirkt eine ähnliche Verzögerung der Hydratation wie 4% FM1.

### 5.5.5.3 Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit wurde nach 24h durchgeführt. Tabelle 5-34 enthält die Ergebnisse dieser Druckversuche.

Tabelle 5-34: Druckfestigkeit der 5. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis (4% FM1)	51,12
Basis - Vac	60,55
M5-1 (6% FM2)	52,88
M5-2 (8% FM2)	49,74
M5-3 (10% FM2)	42,95

Die höchste Druckfestigkeit nach 24 Stunden dieser Versuchsreihe mit  $52,88 \text{ N/mm}^2$  wurde mit der Mischung M5-1 erreicht, die mit 6% Anteil von FM2 hergestellt wurde.

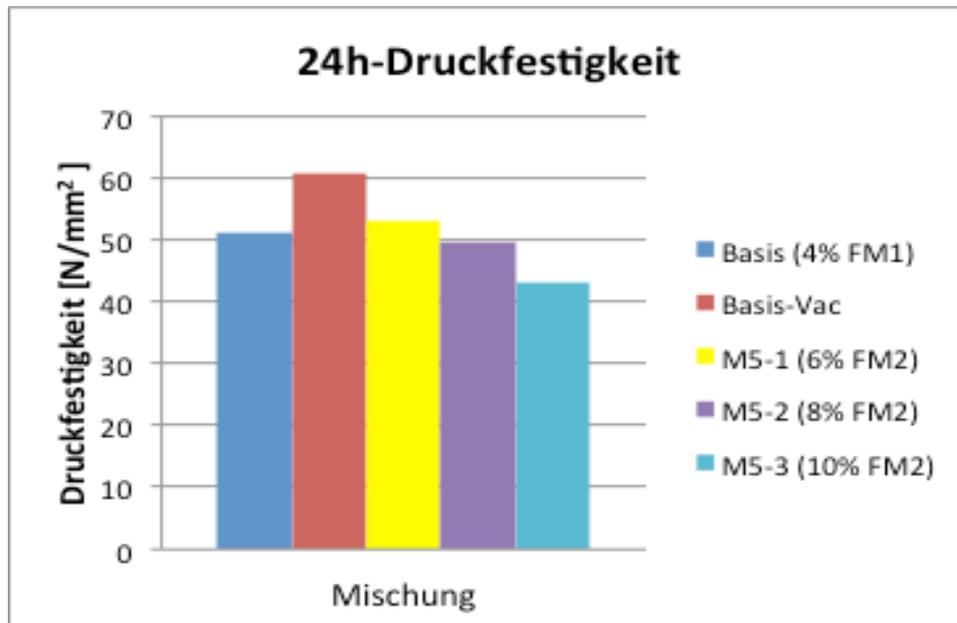


Abbildung 5-26: 24h-Druckfestigkeit aller Mischungen der 5. Mischungsserie

Die Ergebnisse, welche in Abbildung 5-26 ersichtlich sind, lassen erkennen, dass bei Verwendung von 6% FM2 eine etwas höhere Festigkeit als jene der Basismischung (4% FM1) erreicht werden kann. Der Grund dafür ist, dass FM1 die Hydratation stärker verzögert. Um eine gleiche Konsistenz des Betons zu erreichen, muss FM2 höher dosiert werden. Trotz dieser höheren Dosierung erhärtet der Beton früher und die 24h-Druckfestigkeit liegt etwas höher. Eine höhere Dosierung führt jedoch im Vergleich zur Mischung Basis zu einer deutlich niedrigeren Druckfestigkeit nach 24 h, obwohl die Hydrationswärmeentwicklung früher bzw. ähnlich jener der Basismischung verläuft.

Die erhaltenen Druckfestigkeiten nach 7 Tagen zeigt Tabelle 5-35.

Tabelle 5-35: Druckfestigkeit der 5. Mischungsserie nach 7 Tagen

Mischung	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis (4 % FM1)	96,3
Basis Vac	97,95
M5-1 (6 % FM2)	98,29
M5-2 (8 % FM2)	97,40
M5-3 (10 % FM2)	96,17

Nach 7 Tagen erreicht die Mischung M5-1 (6% FM2) mit 98,29 N/mm<sup>2</sup> die höchste Druckfestigkeit. Der negative Einfluss der hohen Dosierungen des FM2 ist nach 7 Tagen kaum mehr zu erkennen.

### 5.5.5.4 Biegezugfestigkeit

Der Biegezugversuch wurde nach 24 Stunden durchgeführt, die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 5-36 ersichtlich.

Tabelle 5-36: Biegezugfestigkeit der 5. Mischungserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis (4 % FM1)	8,11
Basis Vac	10,36
M5-1 (6 % FM2)	8,15
M5-2 (8 % FM2)	7,93
M5-3 (10 % FM2)	8,11

Wie beim Druckversuch liegt hier auch die 24h-Biegezugfestigkeit der Mischung M5-1 nur knapp über jener der Basismischung, aber unter jener der Mischung Basis Vac.

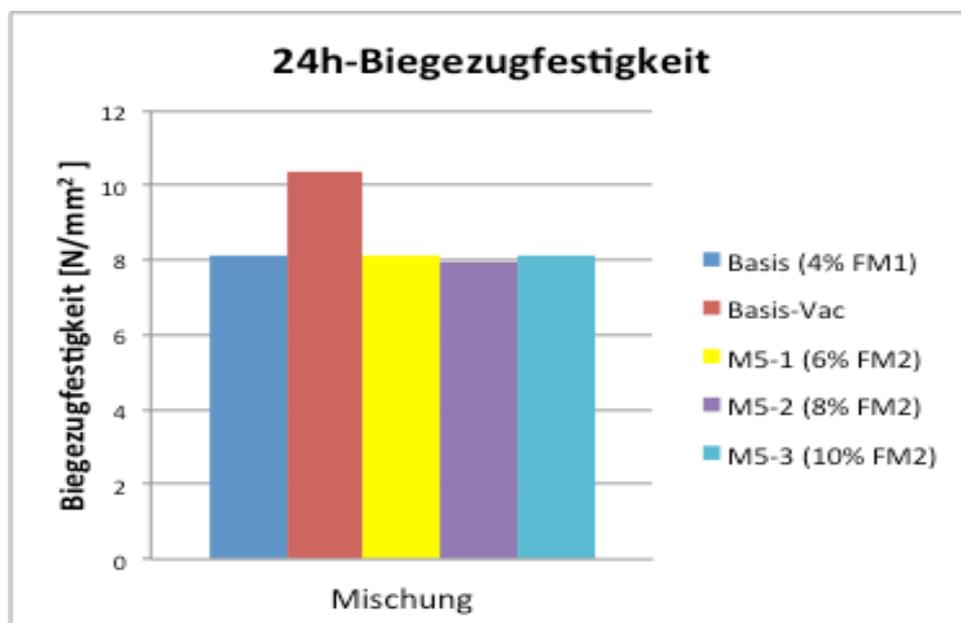


Abbildung 5-27: 24h-Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 5. Mischungserie

In der Abbildung 5-27 ist ersichtlich, dass der Einfluss der hohen Dosierungen von FM2 auf

die Biegezugfestigkeit, im Gegensatz zur Druckfestigkeit, vernachlässigbar ist.

#### 5.5.5.5 Erkenntnisse aus der 5. Versuchsreihe

Die Ergebnisse des 24h-Druckfestigkeit zeigen klar, dass die Mischung mit 6% FM2 gegenüber den anderen Mischungen eine höhere Druckfestigkeit liefert.

Eine höhere Dosierung des Fließmittels kann die Festigkeitsentwicklung des Betons negativ beeinflussen. Dieser Einfluss ist bei der Verwendung von FM2 auf die Druckfestigkeit wesentlich stärker als auf die Biegezugfestigkeit.

Da die Mischung M5-1 die höchste Druckfestigkeit erreichte, wurde das verwendete FM2, also ACE 500, mit einem Anteil von 6 % in später folgenden Mischungsentwürfen wieder verwendet.

#### 5.5.6 Einfluss eines Beschleunigers auf die Festigkeitsentwicklung

##### 5.5.6.1 Mischungszusammensetzung

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde der Einfluss eines Beschleunigers (siehe Abschnitt 3.3.2) mit unterschiedlichen Anteilen im Vergleich zur Basismischung ohne Beschleuniger, untersucht. Der Beschleuniger und seine Anteile sind in Tabelle 5-37 angegeben. Der verwendete Beschleuniger ist X-Seed 100 (BE).

Tabelle 5-37: BE-Anteile der Mischungen

Mischung	Anteil von BE [M.% v. Z]
Basis	-
M6-1	4
M6-2	8

Die Zusammensetzungen der Mischungen sind in der Tabelle 5-38 zusammengefasst.

Von der Verarbeitbarkeit her wurden bei den Mischungen dieser Serie kaum Unterschiede festgestellt.

Tabelle 5-38: Mischungszusammensetzung bei der Verwendung verschiedener Mengen und Sorten von BE für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]		
	Basis	M6-1	M6-2
PZ	678	653	630
SF 1	169,5	163,3	157,5
QM	339	326,5	315
QS	927,5	927,5	927,5
FM 1	27,13	26,13	25,2
BE	-	23,2	44,40
KH	13	12,5	12
Entlüfter	1	1	1
Wasser	170,83	164,6	158,8
W/Z	0,28	0,28	0,28
W/B	0,224	0,224	0,224
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,452	0,45	0,45
Fließmittel [M.% v. Z]	4	4	4

### 5.5.6.2 Hydratationswärmeentwicklung

Um den Hydratationsverlauf zu vergleichen, wurde die Hydratationswärmeentwicklung in der Abbildung 5-28 grafisch dargestellt.

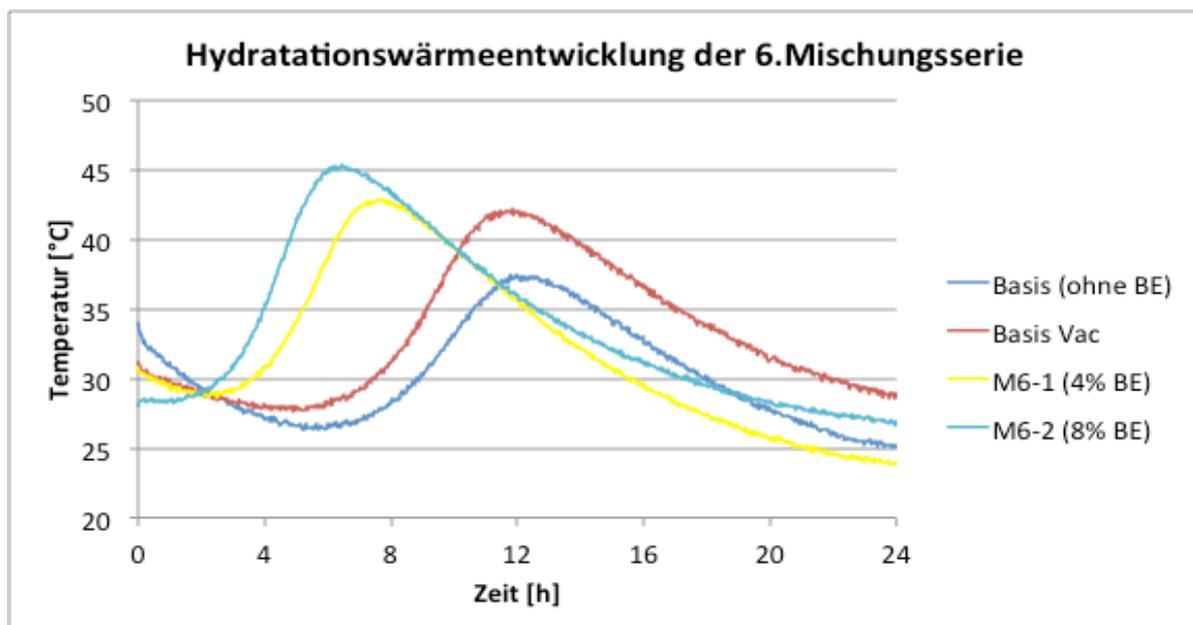


Abbildung 5-28: Hydratationswärmeentwicklung der 6. Mischungsserie

Die Verläufe der Kurven sind bei beiden Mischungen M6-1 (4% BE) und M6-2 (8% BE) sehr ähnlich. Die Verwendung von 4% und 8% BE beschleunigt oder führt zu einem früheren Temperaturanstieg. Deshalb kann man sagen, je höher der Anteil von BE ist, desto früher tritt die Hydratation ein und desto höher ist die maximale Temperatur.

### 5.5.6.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsprüfung wurde wie bei den vorherigen Versuchsreihen durchgeführt. Die Ergebnisse nach 24 Stunden sind in der Tabelle 5-39 zusammengefasst.

Tabelle 5-39: Druckfestigkeit der 6. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis (ohne BE)	51,12
Basis Vac	60,55
M6-1 (4 % BE)	54,84
M6-2 (8 % BE)	51,41

Die höchste Festigkeit nach 24 h dieser Versuchsreihe lag mit 54,84 N/mm<sup>2</sup> bei der Mischung, die mit 4% BE hergestellt wurde.

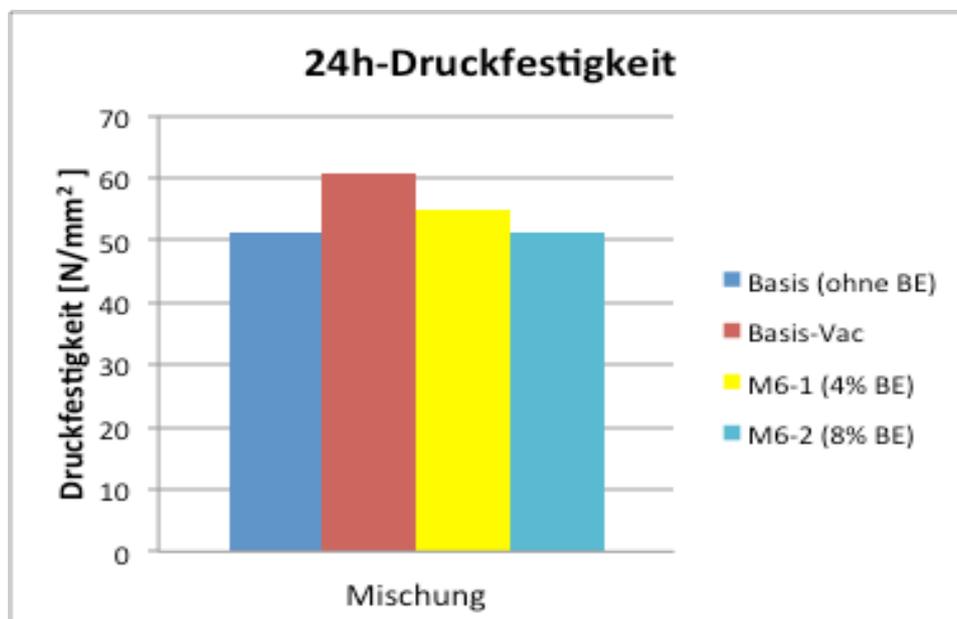


Abbildung 5-29: 24h-Druckfestigkeit aller Mischungen der 6. Mischungsserie

So wie es in der Abbildung 5-29 ersichtlich ist, erreicht man bei der Verwendung von 4%

BE die höchste Druckfestigkeit, sogar höher als bei der Basismischung. Eine höhere Dosierung verringert die 24h-Druckfestigkeit.

Betrachtet man die Ergebnisse der Tabelle 5-39, so zeigt sich, dass bei einer Mischung mit 4% BE eine höhere Frühfestigkeit resultiert. Deshalb wurde die Mischung M6-1 auch zu früheren Zeitpunkten geprüft (Tabelle 5-40).

Tabelle 5-40: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M6-1
	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]	D [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	1,52	1,94	10,35
Prüf 2: 10 Stunden	4,03	5,22	16,04
Prüf 3: 12 Stunden	12,14	13,11	24,67
Prüf 4: 24 Stunden	51,12	60,55	54,84

Die Ergebnisse der 8h, 10h, 12h und 24h-Druckfestigkeitsüberprüfungen, zeigen einen bemerkenswerten Unterschied zwischen M6-1 und der Basismischung. Die Abbildung 5-30 stellt die Festigkeitsentwicklung dieser Mischungsserie im Vergleich mit der Basismischung und der Mischung Basis Vac dar, um den Einfluss des Beschleunigers betrachten zu können.

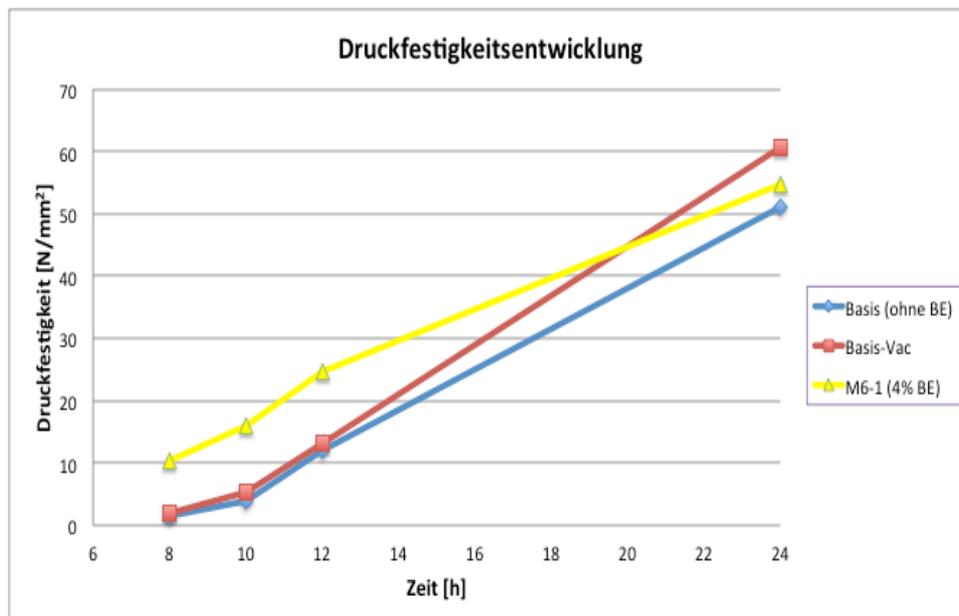


Abbildung 5-30: Übersicht über die Druckfestigkeit der 6. Mischungsserie

Es zeigt sich, dass die Festigkeit der Mischung M6-1 zu den frühen Prüfzeitpunkten deutlich über jenen der Mischungen Basis und Basis Vac liegt. Nach 24 h liegt die Druckfestigkeit nur mehr knapp über jener der Mischung Basis und unter jener der Mischung Basis Vac.

So wie vorher wurde auch hier die Druckfestigkeit der Mischung M6-1 nach 7, 14 und 28 Tagen geprüft und die Ergebnisse in der Tabelle 5-41 zusammengefasst.

Tabelle 5-41: Druckfestigkeit der 6. Mischungsserie nach 7, 14, und 28 Tagen

Mischung	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	14d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	28d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis (ohne BE)	96,3	105,92	132,83
Basis - Vac	97,95	126,34	154,68
M6-1 (4% BE)	101,70	105,30	128,13

Die Abbildung 5-31 stellt eine Übersicht über die Druckfestigkeitsentwicklung bis zum 28 Tag dar.

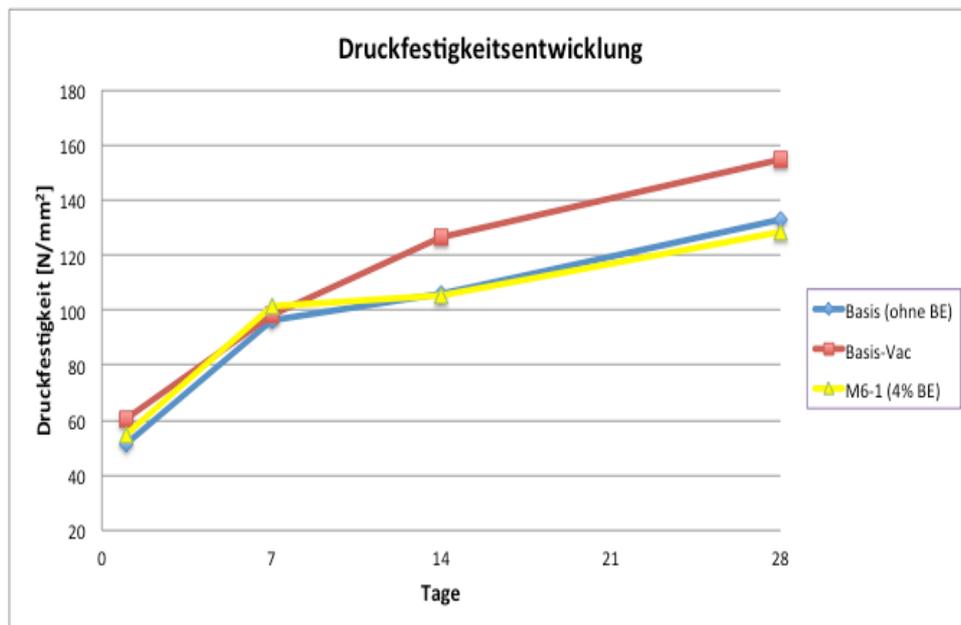


Abbildung 5-31: Übersicht über die Druckfestigkeit der 6. Mischungsserie

Die Mischung M6-1 mit 4% Anteil von BE weist innerhalb der ersten 7 Tage eine höhere Druckfestigkeit als die beiden Referenzmischungen auf. Danach sinkt sie allerdings im Vergleich mit den beiden.

### 5.5.6.4 Biegezugfestigkeit

Der Biegezugversuch wurde nach 24 Stunden durchgeführt, die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-42 ersichtlich.

Tabelle 5-42: Biegezugfestigkeit der 6. Serie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis (ohne BE)	8,11
Basis - Vac	10,36
M6-1 (4% BE)	9,69
M6-2 (8% BE)	7,71

Die höchste 24h-Biegezugfestigkeit lag hier, genau wie die Druckfestigkeit, bei der Mischung M6-1 (4% BE).

Tabelle 5-43 zeigt eine Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse der Biegezugfestigkeit zu früheren Zeitpunkten.

Tabelle 5-43: Frühfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Mischungen

Prüfzeitpunkt	Basis	Basis-Vac	M6-1
	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]	BZ [N/mm <sup>2</sup> ]
Prüf 1: 8 Stunden	0,76	0,77	2,62
Prüf 2: 10 Stunden	1,51	1,88	3,76
Prüf 3: 12 Stunden	3,22	3,30	5,37
Prüf 4: 24 Stunden	8,11	10,36	9,69

Die Abbildung 5-32 enthält eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der 24h-Biegezugfestigkeit.

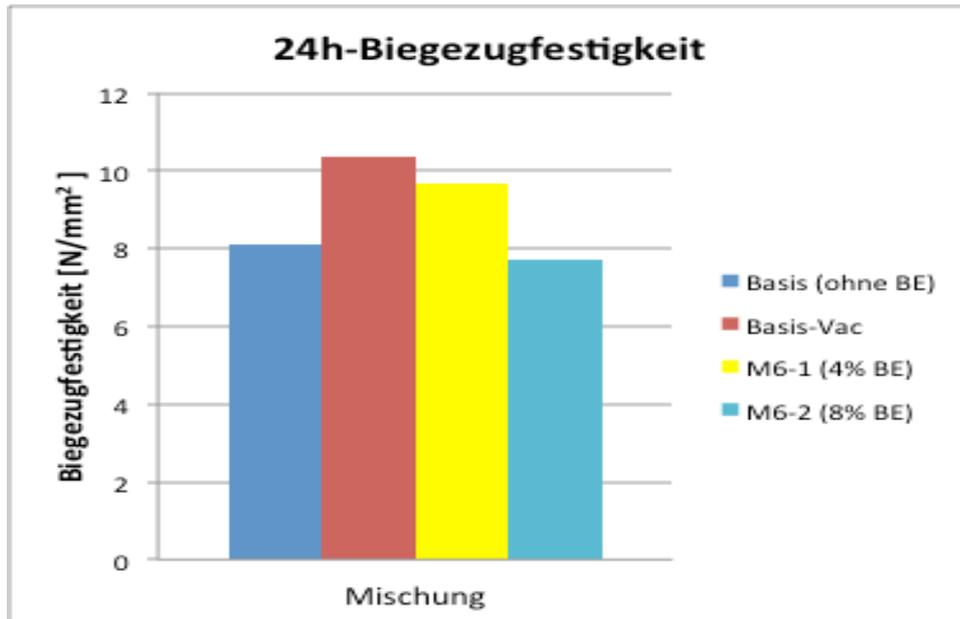


Abbildung 5-32: 24h-Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 6. Mischungsserie

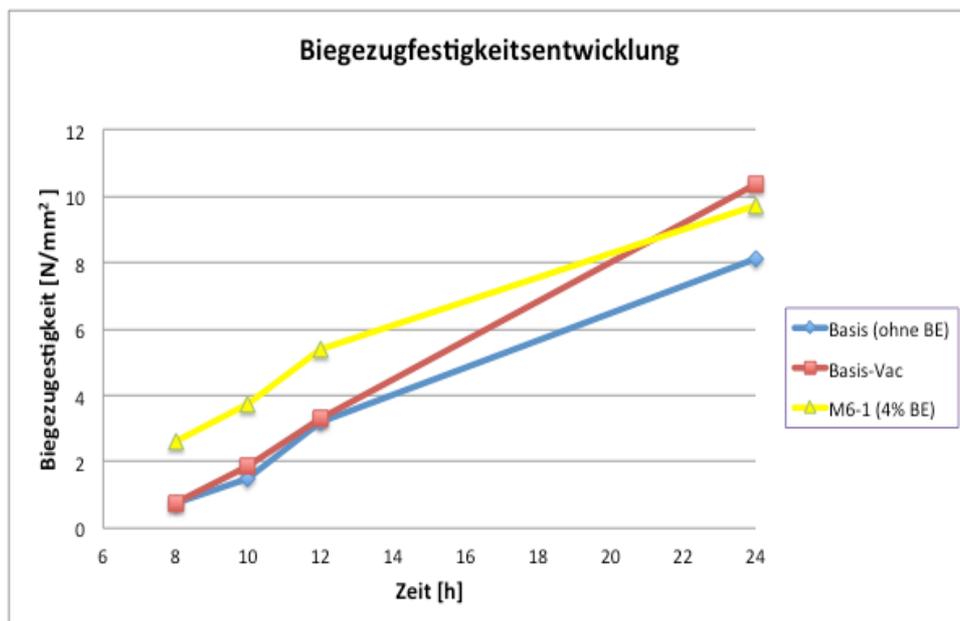


Abbildung 5-33: Übersicht über die Biegezugfestigkeit der 6. Mischungsserie

Die Abbildung 5-33 zeigt, dass die Biegezugfestigkeit der Mischung M6-1 innerhalb der ersten 24 Stunden über dem Niveau der Referenzmischungen liegt. Nach 24 Stunden liegt jedoch die Biegezugfestigkeit der Mischung Basis Vac etwas höher.

#### 5.5.6.5 Erkenntnisse aus der 6. Versuchsreihe

Die in dieser Versuchsreihe erhaltenen Werte zeigen, dass sich bei der mit 4% BE

hergestellten Mischung eine deutliche Steigerung der Frühfestigkeit im Vergleich mit den Referenzmischungen erreichen lässt. Eine höhere Dosierung führt zu einer Verringerung der Festigkeitswerte nach 24h.

### 5.5.7 Einfluss eines Verzögerers auf die Festigkeitsentwicklung

#### 5.5.7.1 Mischungszusammensetzung

Bei der Mischungszusammensetzung dieser Versuchsserie handelt es sich um eine Kombination von verschiedenen Komponenten, die in den vorangegangenen Versuchsserien gute Ergebnisse in Bezug auf die Frühfestigkeitsentwicklung lieferten. Da zu erwarten war, dass diese Mischungszusammensetzung eine besonders kurze Verarbeitungszeit aufweist, wurde ein Verzögerer in unterschiedlichen Dosierungen verwendet. Der Mischungsentwurf für diese Versuchsreihe setzt sich aus folgenden Hauptbestandteilen zusammen:

- Spritzbetonzement: Blaue SP (PZ-SP)
- Silicastaub: Elkem 940U (SF1) mit einem Anteil von 22 %
- Nanosilica: KS 300 (NS1) mit einem Anteil von 3 %,
- Beschleuniger: X-Seed (BE) mit einem Anteil von 4 % und
- Fließmittel: ACE 500 (FM2) mit einem Anteil von 6 %.

Die Versuchsserie wird wie nach Tabelle 5-44 unterteilt.

Tabelle 5-44: Eingeteilte Mischungsproben und deren VE-Anteile

Mischung	Anteil von VE [M.% v. Z]
Basis	-
M7-1	-
M7-2	0,5
M7-3	1
M7-4	1,5

Die verwendete Rezeptur zur Herstellung der Mischproben ist in der Tabelle 5-45 zusammengefasst.

Tabelle 5-45: Mischungszusammensetzung bei Verwendung verschiedener Menge von VE für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]				
	Basis	M7-1	M7-2	M7-3	M7-4
PZ	678	-	-	-	-
PZ-SP	-	682,65	682,65	682,65	682,65
SF 1	169,5	150,20	150,20	150,20	150,20
NS 1	-	20,50	20,50	20,50	20,50
QM	339	341,35	341,35	341,35	341,35
QS	927,5	927,5	927,5	927,5	927,5
FM 1	27,13	-	-	-	-
FM 2	-	40,95	40,95	40,95	40,95
BE	-	27,3	27,3	27,3	27,3
KH	13	13,65	13,65	13,65	13,65
Entlüfter	1	1	1	1	1
VE	-	0	3,40	6,85	10,25
Wasser	170,83	130,15	130,15	130,15	130,15
W/Z	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
W/B	0,224	0,22	0,22	0,22	0,22
V <sub>w</sub> /V <sub>F</sub>	0,452	0,45	0,45	0,45	0,45
Fließmittel [ M.% v. Z]	4	6	6	6	6

Während der Herstellung und Verarbeitung hat sich folgendes gezeigt:

Die Mischung M7-1 war augenscheinlich steif-plastisch, so dass 10 ml Wasser zugegeben wurde, um sie besser verarbeiten zu können. Dementsprechend wurde für alle anderen Mischungen dieser Reihe 10 ml Wasser zugegeben. Dadurch wurde der W/Z-Wert geringfügig erhöht.

Die Mischung M7-2 und M7-3 waren ebenfalls sehr schwer verarbeitbar. Die Konsistenz der Mischung M7-4 war noch schlechter im Vergleich zu den anderen Mischungen und war gerade noch verarbeitbar.

Im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit hat die Verwendung des Verzögerers nicht den gewünschten Erfolg gebracht. Je höher die Dosierung war, desto schlechter war die Verarbeitbarkeit.

### 5.5.7.2 Hydratationswärmeentwicklung

Wie in der Abbildung 5-34 deutlich erkennbar ist, ist der grundsätzliche Verlauf der Kurven bei den Mischungen dieser Serie sehr ähnlich.

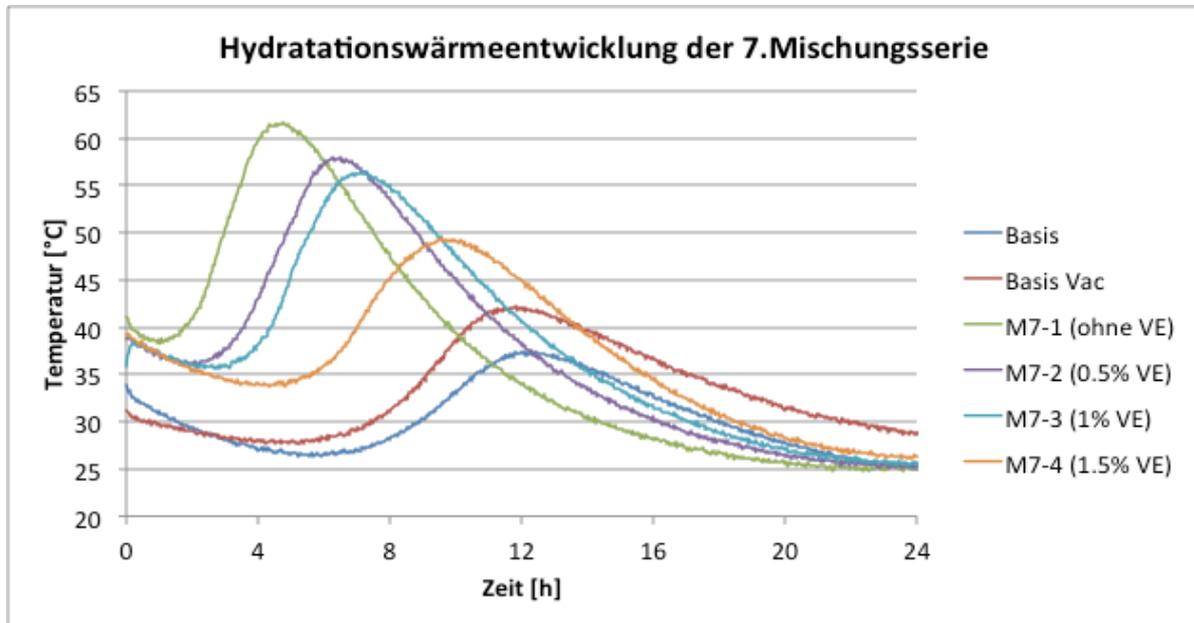


Abbildung 5-34: Hydratationswärmeentwicklung der 7. Mischungsserie

So sieht man bei der Verwendung von VE einen späteren Erstarrungsbeginn, d.h. je höher der Anteil an VE, desto mehr verzögert sich der Hydratationsbeginn und desto niedriger ist die maximale Temperatur. Das steht im Widerspruch zu den Beobachtungen während des Herstellens und Verarbeitens. Diese Mischungszusammensetzung reagiert derart schnell, da die Dosierung des VE offenbar zu gering war. Eine höhere Dosierung wurde aber nicht untersucht, weil der negative Einfluss auf die Festigkeit zu groß war (vgl. nächster Abschnitt).

### 5.5.7.3 Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit nach 24 Stunden wurde durchgeführt. Die resultierenden Ergebnisse der 24h-Druckversuche sind in der Tabelle 5-46 zusammengefasst.

Tabelle 5-46: Druckfestigkeit der 7. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	51,12
Basis - Vac	60,55
M7-1 (ohne VE)	67,62
M7-2 (0,5% VE)	63,87
M7-3 (1% VE)	60,75
M7-4 (1,5% VE)	52,69

Nach 24 Stunden wies die Mischung M7-1 die höchste Druckfestigkeit von 67,62 N/mm<sup>2</sup> auf. Die geringste Festigkeit lag hier mit 51,12 N/mm<sup>2</sup> bei der Basismischung.

Die Ergebnisse der 24h-Versuche wurden grafisch in der Abbildung 5-35 dargestellt.

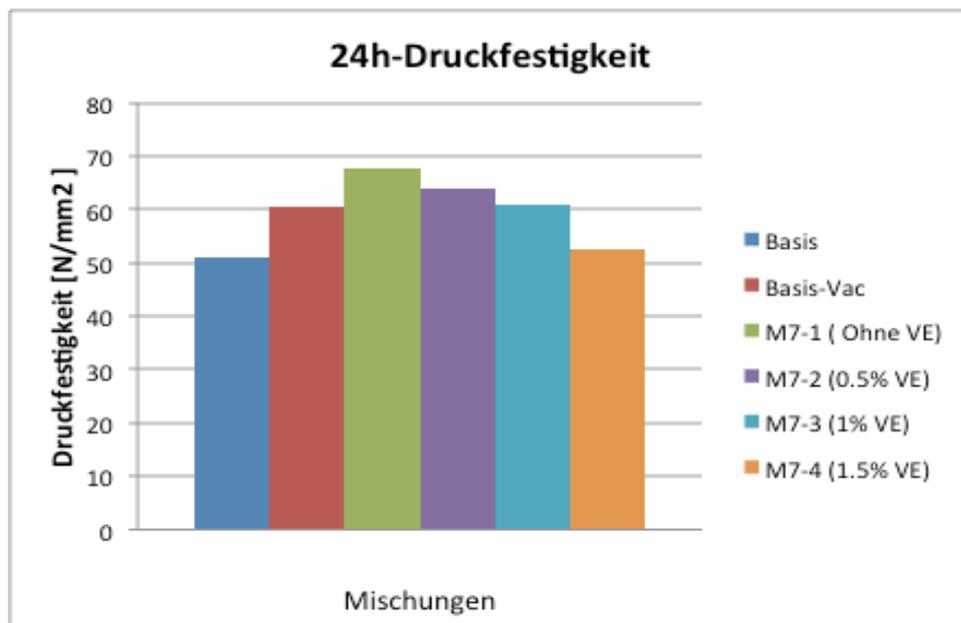


Abbildung 5-35: 24h-Druckfestigkeit aller Mischungen der 7. Mischungsserie

Wie in der Abbildung erkennbar ist, liefert die Mischung M7-1 die höchsten Ergebnisse der 24h-Druckfestigkeit. Zwischen den Mischungen mit verschiedenen Anteilen an VE ist ersichtlich, dass je höher der Anteil ist desto geringer ist die Druckfestigkeit. Dennoch liefern diese Mischungen höhere 24h-Druckfestigkeiten als die Basismischung. Der Grund dafür kann die Verwendung von PZ-SP, NS und BE sein.

Es wurde weiters die Druckfestigkeit nach 7 Tagen geprüft. Die erhaltenen Ergebnisse sind

in der Tabelle 5-47 zusammengefasst.

Tabelle 5-47: Druckfestigkeit der 7.Mischungsserie nach 7 Tagen

Mischung	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	96,3
Basis - Vac	97,95
M7-1	109,79
M7-2	109,51
M7-3	101,45
M7-4	94,16

Nach 7 Tagen erreicht wieder die Mischung M7-1 die höchste Festigkeit, diesmal mit 109,79 N/mm<sup>2</sup>.

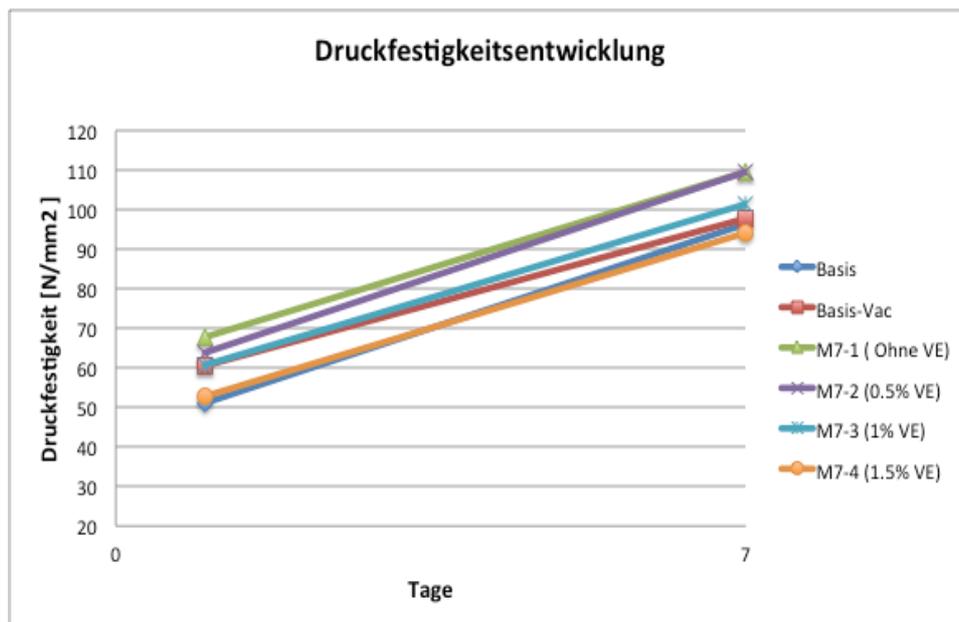


Abbildung 5-36: Übersicht über die Druckfestigkeit der 7. Mischungsserie

In der Abbildung 5-36 dargestellten Ergebnissen ist deutlich zu erkennen, dass unter Verwendung des Verzögerers für die Herstellung dieser Mischung in dieser Versuchsreihe die Druckfestigkeiten nach 24 Stunden sowie nach 7 Tagen sinken.

#### 5.5.7.4 Biegezugfestigkeit

Hier wurde die Biegezugfestigkeit nach 24 Stunden für alle Mischungen dieser Versuchsreihe bestimmt und in der Tabelle 5-48 zusammengefasst.

Tabelle 5-48: Biegezugfestigkeit der 7. Mischungsserie nach 24 Stunden

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis - Vac	10,36
M7-1 (ohne VE)	10,07
M7-2 (0,5% VE)	9,01
M7-3 (1% VE)	8,77
M7-4 (1,5% VE)	8,32

Die Abbildung 5-37 zeigt eine Übersicht zwischen der 24h-Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 7. Mischungsserie im Vergleich mit Basismischung und Mischung Basis Vac.

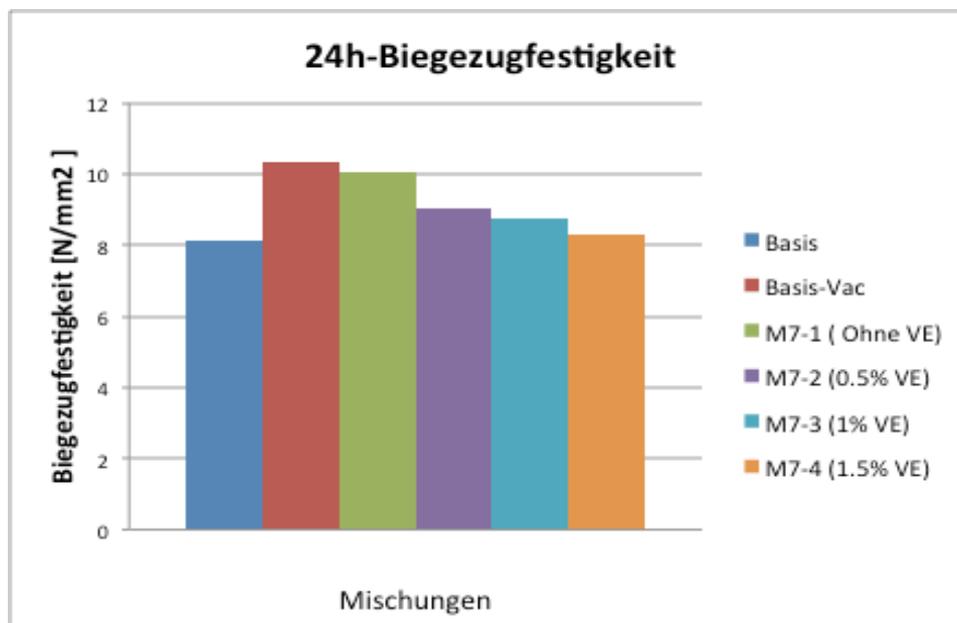


Abbildung 5-37: 24h-Biegezugfestigkeit aller Mischungen der 7. Mischungsserie

Wie bei der Druckfestigkeit, erreicht auch hier die Mischung M7-1 die höchste Biegezugfestigkeit. Außerdem zeigt sich je höher der VE Anteil ist, desto niedriger ist auch die Biegezugfestigkeit.

### **5.5.7.5 Erkenntnisse aus der 7. Versuchsreihe**

Im Allgemeinen kann man bei den ausgeführten Versuchsreihen der Mischung M7-1 im Vergleich mit Basis und Basis-Vac feststellen, dass die Kombination von Zusatzmittel des UHPCs eine höhere Früh- und Endfestigkeiten liefern kann, obwohl keine gute Konsistenz erreicht wird.

Bei dieser Versuchsreihe konnte man feststellen, dass kein geeigneter VE verwendet wurde, d.h. der verwendete VE bewirkt einen umgekehrten Einfluss sowohl auf die Druckfestigkeit als auch auf die Biegezugfestigkeit.

### **5.5.8 Optimierung der Mischungsrezeptur**

Hier wurden die Materialien jeder Versuchsserie, welche den größten positiven Einfluss auf die Frühfestigkeitsentwicklung aufweisen, ausgewählt. Danach wurde der Beton aus einer Kombination der ausgewählten Ausgangsstoffe hergestellt, um die Frühfestigkeiten zu prüfen. Es wurden fallweise die Festigkeiten auch früher als 24 Stunden geprüft.

#### **5.5.8.1 Mischentwurf 1 (ME1)**

Die Zusammensetzung des UHPCs bei Mischentwurf 1 ist in der Tabelle 5-49 angegeben. Es handelt sich im Grunde um die gleiche Mischung, wie sie von den Untersuchungen aus dem vorigen Abschnitt bekannt ist, also die 7. Mischserie (siehe Abschnitt 5.5.7). Zu Vergleichszwecken werden die Probekörper mit exakt derselben Rezeptur, aber mit einigen Änderungen bei der Menge von FM und SF folgendermaßen hergestellt:

- Spritzbetonzement: Blaue SP (PZ-SP)
- Silicastaub: Elkem 940U (SF1) mit einem Anteil von 15 %
- Nanosilica: KS300 (NS1) mit einem Anteil von 3 %
- Beschleuniger: X-Seed (BE) mit einem Anteil von 4 % und
- Fließmittel: ACE 500 (FM2) mit einem Anteil von 8 %.

Durch den erhöhten wässrigen Anteil des Fließmittels reduziert sich bei gleichbleibendem W/Z-Wert der Wasseranteil. Um die erzielte Konsistenz zu erhalten, wurde der Konsistenzhalteranteil von 2 % auf 3 % gesteigert. Die verwendeten Rezepturbestandteile sind in Tabelle 5-49 angegeben.

Tabelle 5-49: Mischungszusammensetzung Mischentwurf 1 für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]
	Mischentwurf 1
PZ	-
PZ-SP	700,7
SF 1	150,20
NS 1	21
QM	350,35
QS	927,5
FM 1	-
FM 2	56,05
BE	28,05
KH	21
Entlüfter	1
VE	0
Wasser	118,20
W/Z	0,28
W/B	0,24
V <sub>w</sub> /V <sub>F</sub>	0,47
Fließmittel [ M.% v. Z]	8

Bei der Herstellung der Probekörper wurde die Trockenmischdauer auf drei Minuten gesteigert, um die Verarbeitbarkeit zu verlängern. Bei der vergleichenden Betrachtung der mit 90 Sekunden Trockenmischdauer hergestellten Mischungen ergab sich eine durchschnittliche Verbesserung der Konsistenz durch eine längere Trockenmischdauer. Im Vergleich zur Mischung M7-1 zeigte diese daher eine leicht bessere plastische Konsistenz.

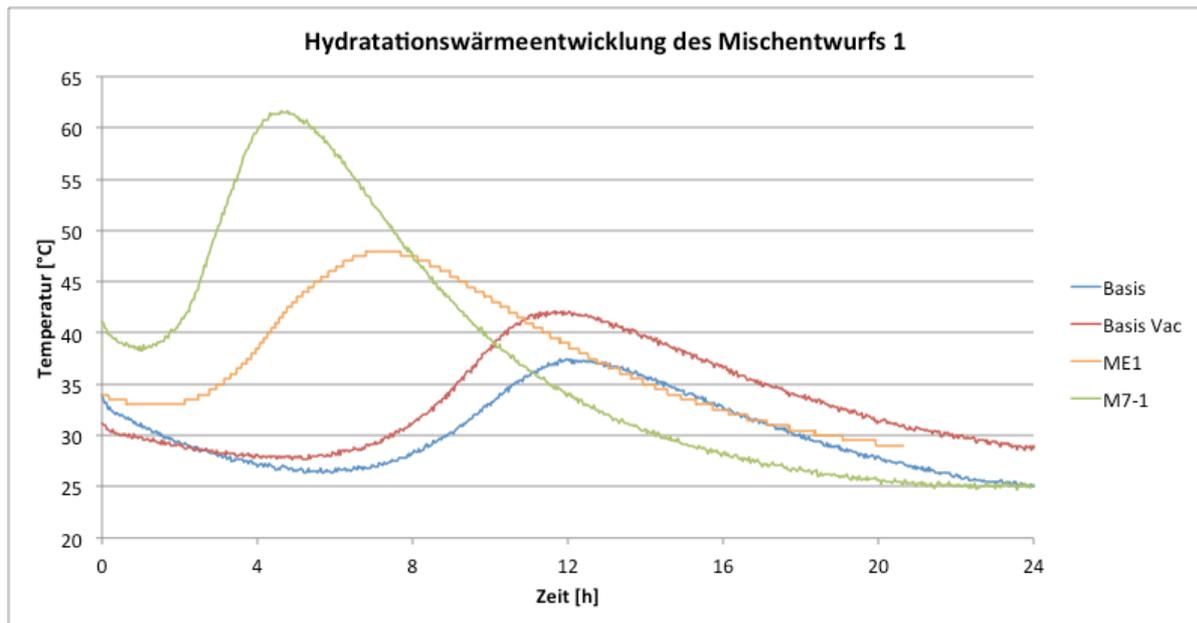


Abbildung 5-38: Hydratationswärmeentwicklung Mischentwurf 1

Wie in der Abbildung 5-38 ersichtlich ist, tritt die Hydratationswärmeentwicklung bei Mischentwurf 1 schneller ein als bei der Basismischung und der Mischung Basis Vac, aber etwas später als bei der Mischung M7-1. Die maximale Temperatur des Mischentwurfs 1 liegt unter jener der Mischung M7-1, aber höher als bei beiden Referenzmischungen.

Die Verarbeitungszeit beim Mischentwurf 1 ist wesentlich länger als bei Mischung M7-1.

Die erhaltenen Ergebnisse der durchgeführten Druckversuche nach 24h sowie 7 Tagen sind in der Tabelle 5-50 zusammengefasst.

Tabelle 5-50: Druckfestigkeitsentwicklung Mischentwurf 1

Mischung	24h-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	7d-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	51,12	96,3
Basis Vac	60,55	97,95
M7-1	67,62	109,79
ME1	48,58	91,31

Die höchsten Druckfestigkeiten sowohl nach 24 Stunden als auch nach 7 Tagen erreicht wieder die Mischung M7-1. Die Druckfestigkeit des Mischentwurfs 1 liegt unter jenen der beiden Referenzmischungen.

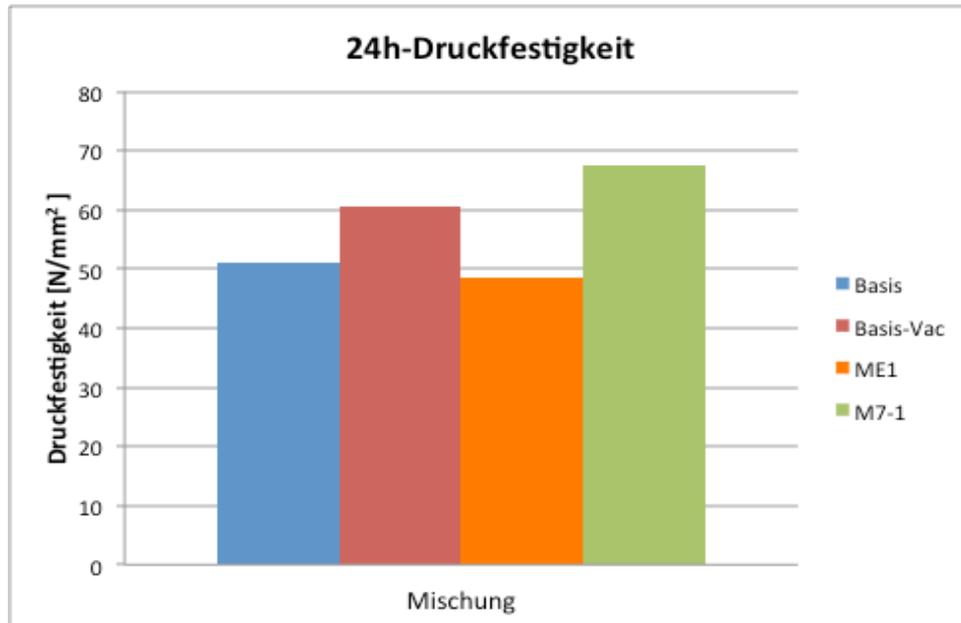


Abbildung 5-39: 24h-Druckfestigkeit Mischentwurf 1 im Vergleich

Wie in der Abbildung 5-39 ersichtlich ist, reduziert sich die 24h-Druckfestigkeit beim Mischentwurf 1 durch einen niedrigeren Anteil an SF1 und höheren Anteil an FM2.

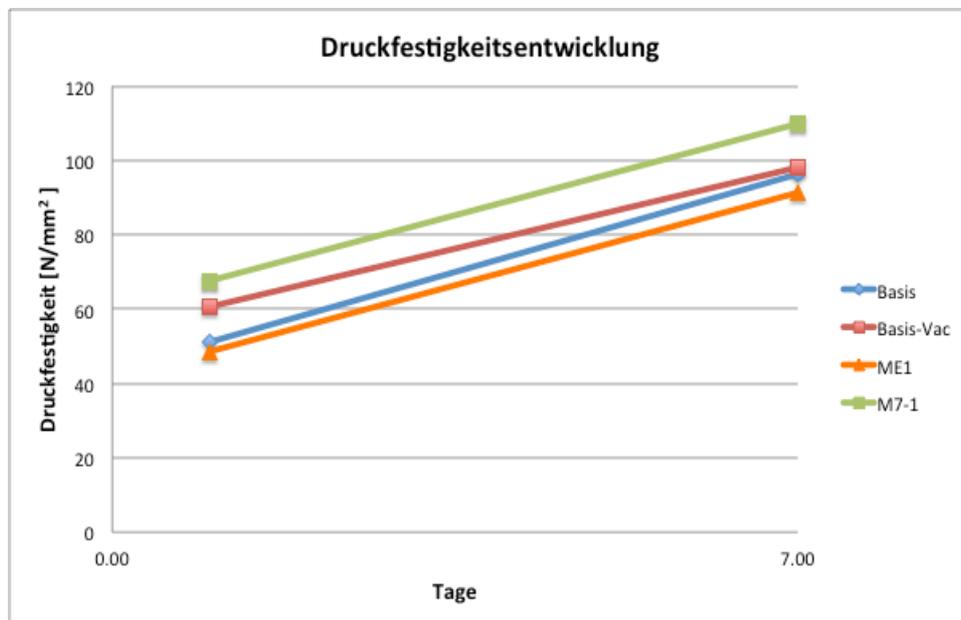


Abbildung 5-40: Einen Vergleich der Festigkeitsentwicklung von Mischentwurf 1 und M7-1 und Basis

Die Druckfestigkeit des Mischentwurfs 1, im Vergleich mit der Basismischung und der Mischung Basis Vac, ist in Abbildung 5-40 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Druckfestigkeit des Mischentwurfs 1 auch nach 7 Tagen unter jenen der beiden Referenzmischungen liegt.

Die Ergebnisse für die 24h-Biegezugfestigkeit sind in der Tabelle 5-51 ersichtlich.

Tabelle 5-51: Biegezugfestigkeitsentwicklung Mischentwurf 1

Mischung	24h-Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis Vac	10,36
M7-1	10,07
ME1	8,20

Nach 24h liefert der Mischentwurf 1 eine leicht höhere Biegezugfestigkeit als die Basismischung, liegt jedoch unter jener der Mischung M7-1 und der Mischung Basis Vac.

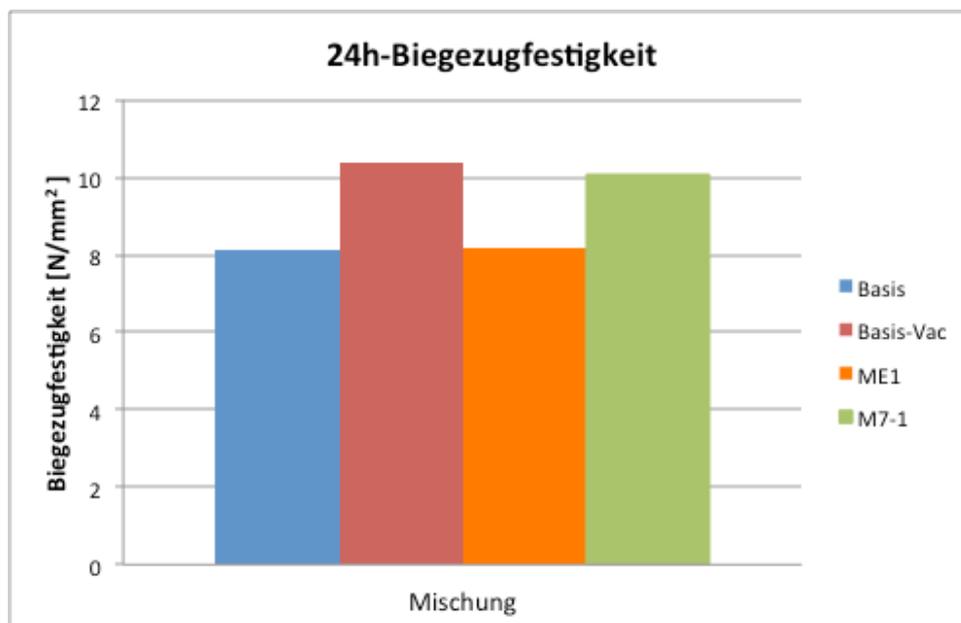


Abbildung 5-41: 24h-Biegezug- und Druckfestigkeit Mischentwurf 1 im Vergleich

Die Abbildung 5-41 zeigt, dass Mischentwurf 1 im Vergleich zu M7-1 und der Basismischung, auch die geringste 24h-Biegezugfestigkeit liefert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Druckfestigkeit des Mischentwurfs 1 durchgehend niedriger ist als bei Mischung M7-1 und den beiden Referenzmischungen. Generell werden bei der Verwendung von weniger Fließmittelanteil bessere Ergebnisse erreicht. Auf Grund dessen, dass Mischentwurf 1 keine bemerkenswerten Ergebnisse

lieferte, wurde auf weitere Untersuchungen dieser Zusammensetzung des Betons verzichtet.

### 5.5.8.2 Mischentwurf 2 (ME2)

Dieser Mischentwurf ist wieder jene Rezeptur, die im Verlauf der 7. Versuchsserie die besten Ergebnisse lieferte. In der adaptierten Version der Rezeptur M7-1 wurde lediglich die Art des Nanosilica geändert. Das bedeutet, dass KS 300 durch Aerosil ersetzt wurde, wobei ein gleichbleibender Gehalt an Aerosil verwendet.

Der Mischentwurf 2 setzt sich aus folgenden Hauptbestandteilen zusammen (Tabelle 5-52):

- Spritzbetonzement: Blaue SP (PZ-SP)
- Silicastaub: Elkem 940U (SF1) mit einem Anteil von 22 %
- Nanosilica: Aerosil 130 (NS2) mit einem Anteil von 3 %
- Beschleuniger: X-Seed (BE) mit einem Anteil von 4 % und
- Fließmittel: ACE 500 (FM2) mit einem Anteil von 6 %.

Tabelle 5-52: Mischungszusammensetzung Mischentwurf 2 für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]
	Mischentwurf 2
PZ	-
PZ-SP	682,65
SF 1	150,20
NS 2	20,50
QM	341,35
QS	927,5
FM 1	-
FM 2	40,95
BE	27,3
KH	13,65
Entlüfter	1
VE	0
Wasser	130,15
W/Z	0,28
W/B	0,22
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,45
Fließmittel [ M.% v. Z]	6

Im Vergleich zur Mischung mit NS1 zeigte diese nur eine etwas schlechtere plastische Konsistenz mit ca. 5 Minuten Verarbeitbarkeit. Da der hergestellte Beton ziemlich fest war, wurden die Prismen auf der Rüttelplatte gefüllt.

Die Festigkeitsentwicklung dieses Mischentwurfes ist in der Tabelle 5-53 zusammengefasst.

Tabelle 5-53: Druckfestigkeitsentwicklung Mischentwurf 2

Mischung	4 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	6 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	24 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M7-1	-	-	67,62	109,79	-
ME2	8,18	21,54	59,73	97,42	118,14

Der Mischentwurf 2 weist zu früheren Zeitpunkten gute Festigkeiten auf. Nach 24 Stunden sowie nach 7 Tagen besitzt wieder die Mischung M7-1 die höchste Festigkeit. Die Ergebnisse der 24h-Druckfestigkeit sind in der Abbildung 5-42 dargestellt.

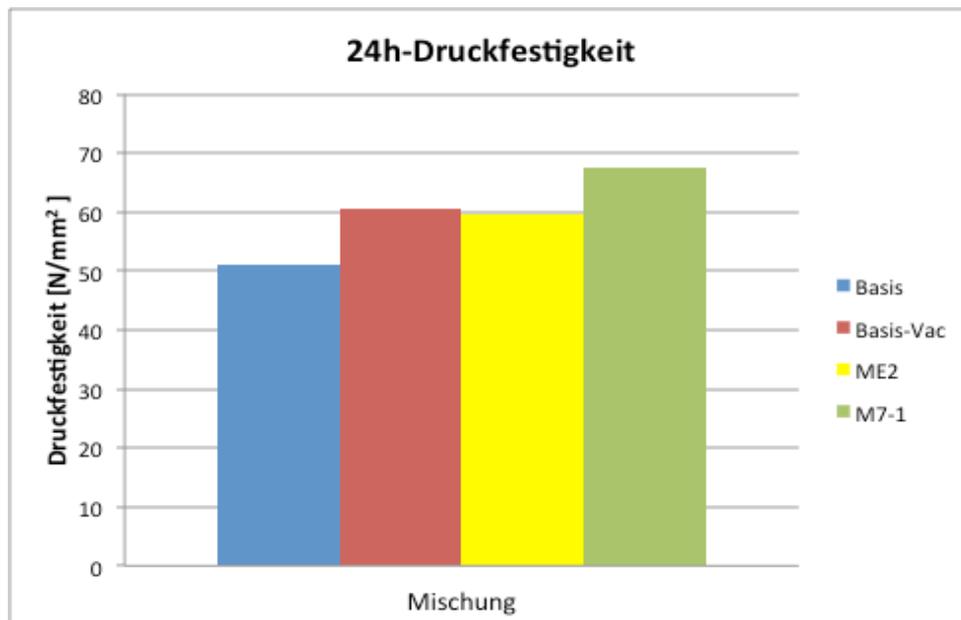


Abbildung 5-42: 24h- Druckfestigkeit Mischentwurf 2 im Vergleich

Die Abbildung zeigt, dass bei der gleichbleibenden Rezeptur und durch den Einsatz von NS1 eine höhere Druckfestigkeit nach 24h erreicht werden kann.

Um nun einen Vergleich zwischen der Verwendung von NS1 und NS2 machen zu können, werden im Folgenden (Abbildung 5-43) die Ergebnisse von Mischentwurf 2 und M7-1

grafisch dargestellt.

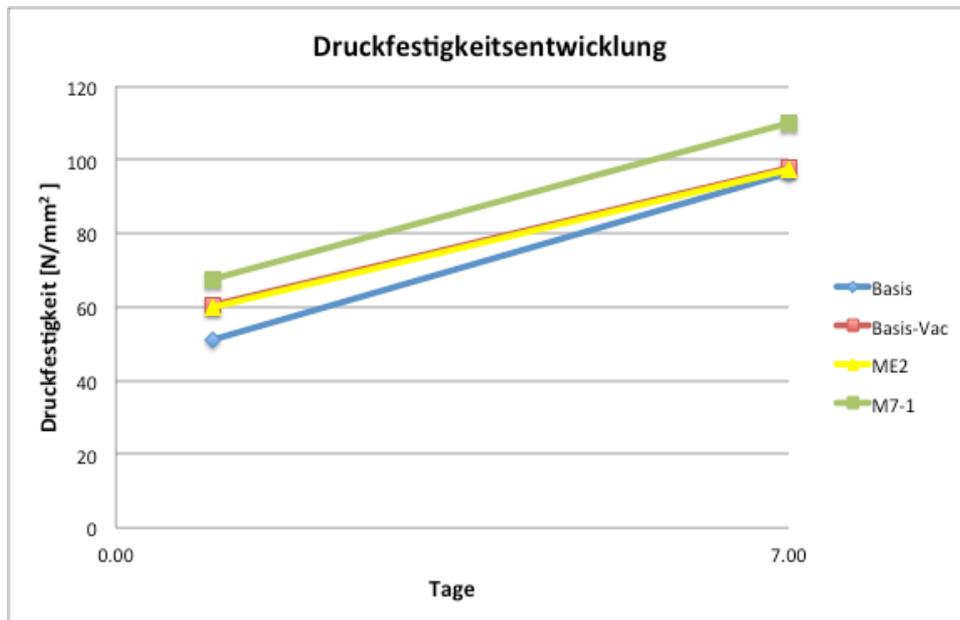


Abbildung 5-43: Einen Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung Mischentwurf 2, M7-1 und Basismischung

Die Grafik lässt einige Schlussfolgerungen zu. Einerseits zeigt sie, dass sich eine Kombination von SF und NS, mit einem entsprechenden Verhältnis günstiger, auf eine hohe Frühfestigkeit auswirkt. Andererseits sei aber auch gesagt, dass diese Kombinationen nicht immer die besten Endfestigkeiten liefern.

Auffallend bei der Abbildung 5-43 ist, dass KS300 besser als Aerosil auf die Frühfestigkeit und Konsistenz wirkt und auch wirtschaftlicher ist.

Die Ergebnisse der 24h-Biegezugfestigkeiten sind in der Tabelle 5-54 zusammengefasst.

Tabelle 5-54: Biegezugfestigkeitsentwicklung Mischentwurf 2

4 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	6 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	24 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
1,72	4,47	8,90	-	-

Wie bei der Druckfestigkeit werden auch hier gute Ergebnisse bei der Biegezugfestigkeit erzielt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5-44 grafisch dargestellt.

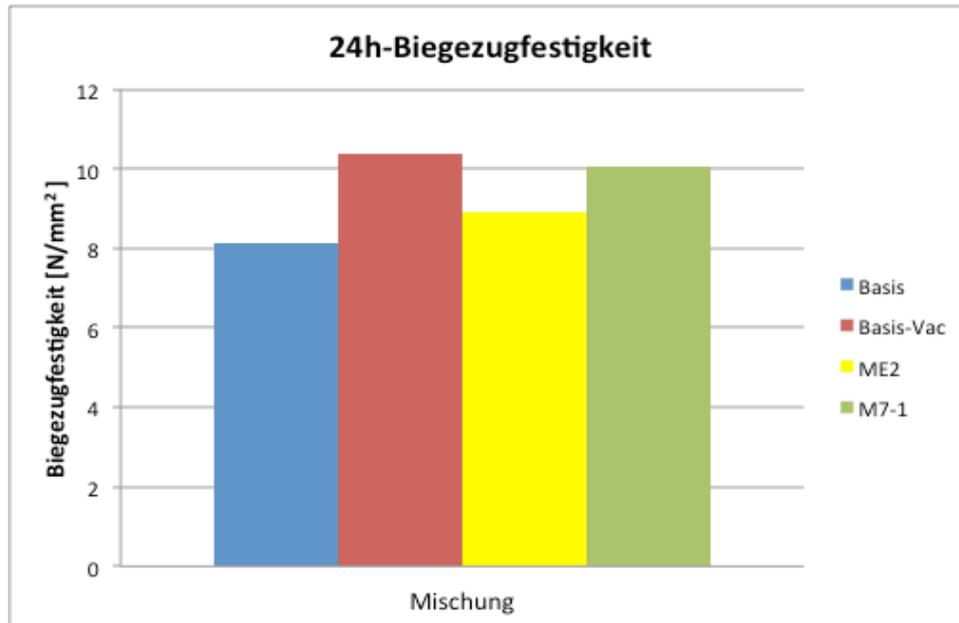


Abbildung 5-44: 24h-Biegezugfestigkeit der Mischentwurf 2 im Vergleich

Obwohl der Mischentwurf 2 wesentlich bessere Ergebnisse bezüglich der Frühfestigkeit lieferte, wurde für die weiteren Versuche in dieser Arbeit auf den Mischentwurf 2 verzichtet, da dieser eine schlechte Konsistenz hatte und auch die Verarbeitungszeit sehr kurz war.

### 5.5.8.3 Mischentwurf 3 (ME3)

Bei sämtlichen Versuchen liefert die Mischung M7-1 sehr gute 24h-Ergebnisse. Das Problem lag allerdings darin, dass bei dieser Mischung die Konsistenz schlecht und die Verarbeitungszeit sehr kurz war. Diese negativen Eigenschaften könnten unter Umständen durch folgende Maßnahmen verbessert werden:

- Einsatz von weniger Sand, was im Allgemeinen zu einer weicherer Konsistenz führt
- Ersatz von Spritzbetonzement durch Portlandzement CEM I 52,5 C<sub>3</sub>A-frei (PZ)
- Verwendung eines geringeren Anteils an SF.

Auf die Verringerung der Sandmenge wurde jedoch verzichtet, weil als Folge der Zementgehalt gestiegen wäre. Der Zementgehalt der untersuchten Mischungen sollte in dieser Arbeit aus verschiedenen Gründen (z.B. Schwinden des Betons) rund 700 kg/m<sup>3</sup> nicht übersteigen.

Bei Mischentwurf 3 wurde daher ausgehend von der Mischung M7-1 der Ersatz von

Spritzbetonzement durch Portlandzements (PZ) untersucht. Diese Mischung wurde einmal mit und einmal ohne Beschleuniger hergestellt.

Die Betonzusammensetzung dieser Versuchsreihe ist in der Tabelle 5-55 ersichtlich. Die Hauptbestandteile sind:

- Portlandzement CEM I C<sub>3</sub>A-frei (PZ)
- Silicastaub: Elkem 940U (SF1) mit einem Anteil von 22 %
- Nanosilica: KS 300 (NS1) mit einem Anteil von 3 %
- Beschleuniger: X-Seed (BE) mit einem Anteil von 4 % und
- Fließmittel: ACE 500 (FM2) mit einem Anteil von 6 %.

Tabelle 5-55: Mischungszusammensetzung Mischentwurf 3 für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]
	Mischentwurf 3
PZ	682,65
PZ-SP	-
SF 1	150,20
NS 1	20,50
QM	341,35
QS	927,5
FM 1	-
FM 2	40,95
BE	27,3/-
KH	13,65
Entlüfter	1
VE	0
Wasser	130,15
W/Z	0,28
W/B	0,22
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,45
Fließmittel [ M.% v. Z]	6

Während der Herstellung und Verarbeitung des Betons war folgendes erkennbar:

- Die Konsistenz des Mischentwurfs 3 ohne BE war etwas weniger steif-plastisch als die Ausgangsmischung M7-1.

- Mit BE war die Mischung besser zu verarbeiten, die Konsistenz kann als plastisch beschrieben werden.

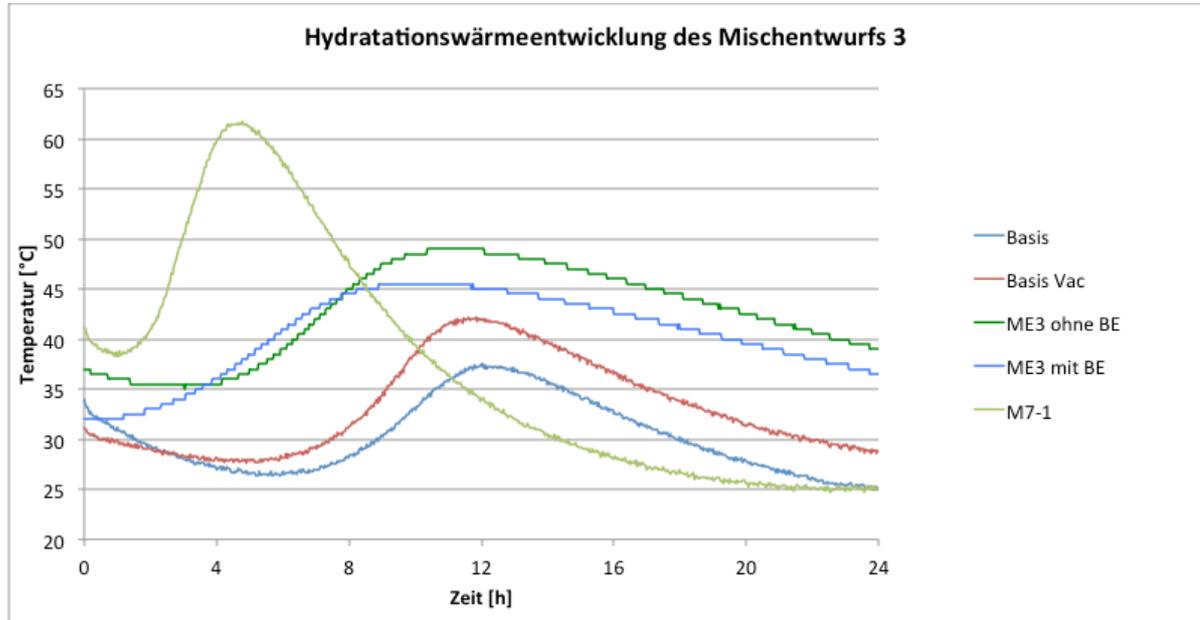


Abbildung 5-45: Hydratationswärmeentwicklung Mischentwurf 3

Die Hydratationskurven zeigen, dass sich der Mischentwurf 3 ohne BE etwas später zu erwärmen begann als der Mischentwurf 3 mit BE. Der Mischentwurf 3 mit BE begann zwar früher mit der Erwärmung und die Temperatur war niedriger als bei dem Mischentwurf 3 ohne BE. Generell liegen die Temperaturverläufe von Mischentwurf 3 zwischen jenen von M7-1 und den Referenzmischungen.

Die Prüfung der Druckfestigkeit wurde nach 24 h und nach 7 Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse der Festigkeitsentwicklung dieser Proben in der Table 5-56 zusammengefasst.

Table 5-56: Festigkeitsentwicklung Mischentwurf 3

Mischung	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Nach 24 Stunden	Nach 7 Tagen
Basis	51,12	96,3
Basis Vac	60,55	97,95
M 7-1	67,62	109,79
ME3 ohne BE	70,83	125,85
ME3 mit BE	59,14	121,14

Nach 24h wies der Mischentwurf 3 ohne Beschleuniger mit 70,83 N/mm<sup>2</sup> die höchste Druckfestigkeit auf. An der nächsten Stelle liegt wieder die Mischung M7-1 mit 67,62 N/mm<sup>2</sup>. Nach 7 Tagen ändert sich die Reihenfolge nicht.

Die erhaltenen Ergebnisse sind in der Abbildung 5-46 dargestellt.

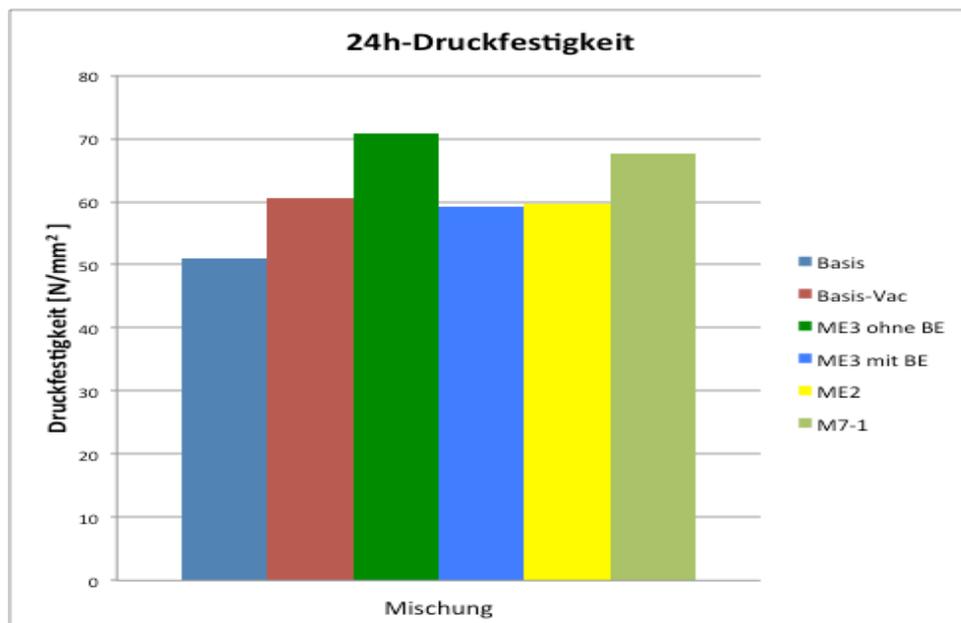


Abbildung 5-46: 24h-Druckfestigkeit Mischentwurf 3 im Vergleich

Vergleicht man die Festigkeiten, ist zu erkennen, dass der Mischentwurf 3 ohne BE die höchsten Festigkeiten, sowohl nach 24h wie auch nach 7 Tagen (Abbildung 5-47) aufweist.

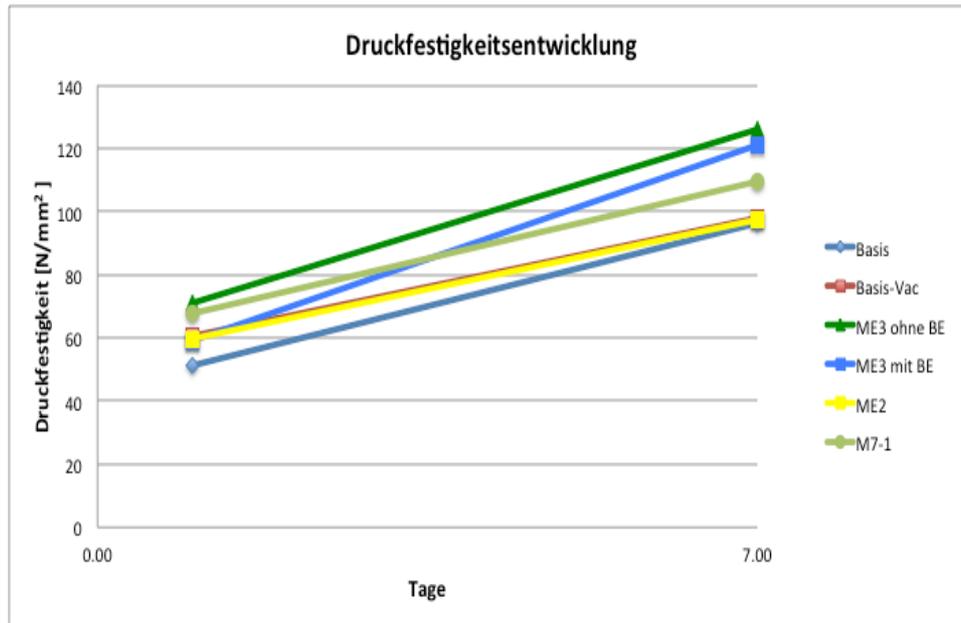


Abbildung 5-47: Festigkeitsentwicklung von Mischentwurf 3 im Vergleich

Auffallend ist, dass die höchste Druckfestigkeit nach 24 h und auch nach 7 Tagen ohne der Verwendung des Beschleunigers erreicht wurde. Dieser Zusammenhang zwischen Beschleuniger und Frühfestigkeit ist zwar bei dieser Mischung gegeben, jedoch kann dieser auf Grund der Erkenntnisse aus den anderen Versuchsreihen nicht generell bestätigt werden.

Die Biegezugprüfung wurde nach 24 Stunden durchgeführt und die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-57 zusammengefasst.

Tabelle 5-57: 24h-Biegezugfestigkeit Mischentwurf 3

Mischungsentwurf 3	24h-Biegezugfestigkeit[N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis Vac	10,36
M 7-1	10,07
Mischentwurf 3 ohne BE	7,22
Mischentwurf 3 mit BE	7,74

Interessant bei der Betrachtung der Biegezugfestigkeit nach 24h ist, dass die höchsten Werte mit der Mischung Basis Vac erreicht wurde und nicht mit dem Mischentwurf 3 (wie bei der Druckfestigkeit). An dieser Stelle sei angemerkt, dass Maßnahmen, die zu einer Druckfestigkeitssteigerung führen, nicht unbedingt auch die Biegezugfestigkeit erhöhen.

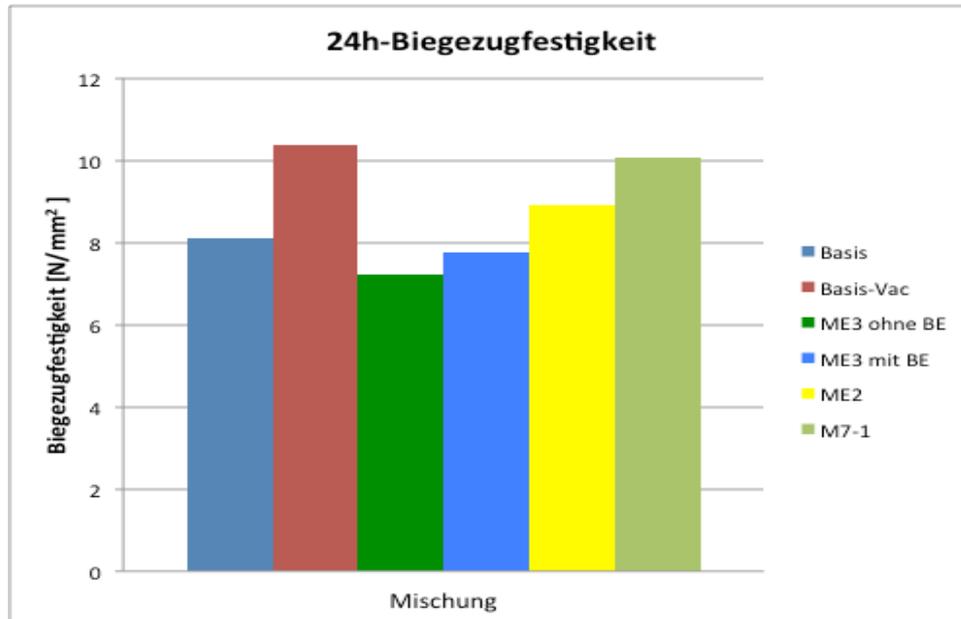


Abbildung 5-48: 24h-Biegezug- und Druckfestigkeit Mischentwurf 3 im Vergleich

#### 5.5.8.4 Mischentwurf 4 (ME4)

Es wurde hier der Mischentwurf 4, einmal ohne und einmal mit Vakuum hergestellt.

Ausgehend von der Mischung M7-1 wurde der Anteil von Silicastaub von 22% auf 10% reduziert. Anzumerken ist, dass bei beiden Proben eine Trockenmischdauer von fünf Minuten gewählt wurde, da, je länger die Trockenmischung ist, desto flüssiger die Mischung wird.

Die Hauptbestandteile für den Mischentwurf 4 sind:

- Portlandzement CEM I C<sub>3</sub>A-frei (PZ)
- Silicastaub: Elkem 940U (SF1) mit einem Anteil von 10 %
- Nanosilica: KS 300 (NS1) mit einem Anteil von 3 %
- Beschleuniger: X-Seed (BE) mit einem Anteil von 4 % und
- Fließmittel: ACE 500 (FM2) mit einem Anteil von 6 %.

Zusätzlich wurde in dieser Serie eine Mischung ohne Beschleuniger X-Seed mit dem Vakuummischprozess hergestellt.

Die Zusammensetzung der verwendeten Materialien zur Herstellung des Mischentwurfs 4 ist in der Tabelle 5-58 zusammengefasst.

Tabelle 5-58: Mischungszusammensetzung des Mischentwurfs 4 mit/ohne Vac für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]
	Mischentwurf 4
PZ	723,60
SF 1	72,35
NS 1	21,70
QM	361,80
QS	927,5
FM 2	43,40
BE	28,95/-
KH	14,45
Entlüfter	1
VE	0
Wasser	137,95
W/Z	0,28
W/B	0,25
V <sub>W</sub> /V <sub>F</sub>	0,49
Fließmittel [ M.% v. Z]	6

Es war ersichtlich, dass der Vakuummischprozess zu einem deutlich flüssigeren Frischbeton führt, auch bei der Mischung ohne Beschleuniger.

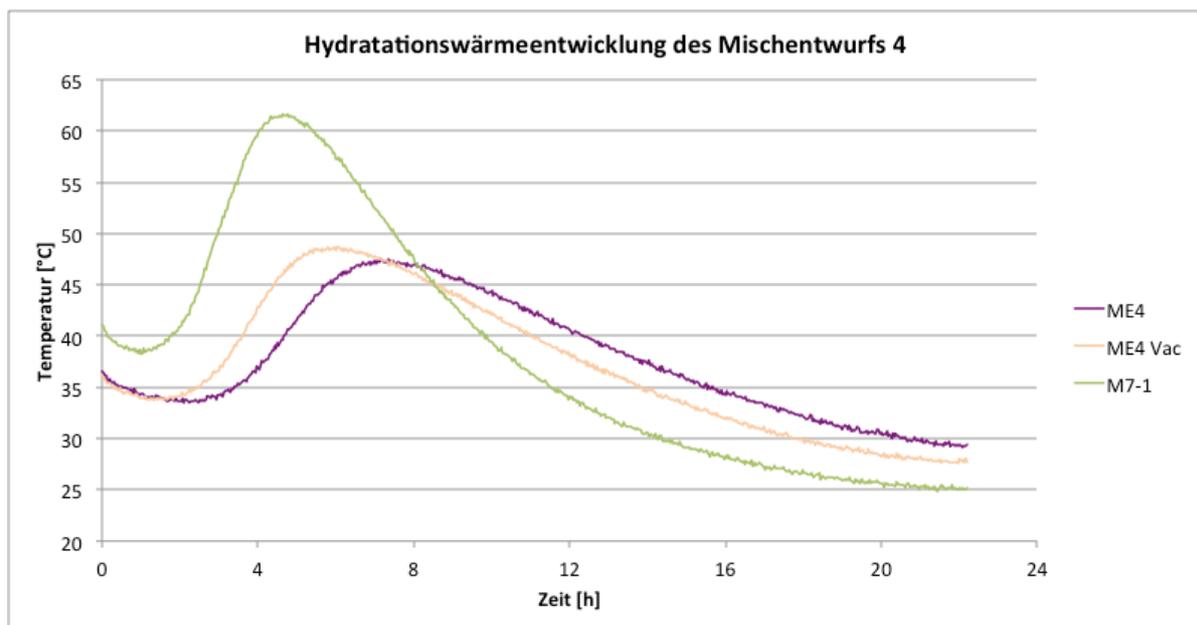


Abbildung 5-49: Hydratationswärmeentwicklung des Mischentwurfs 4 mit/ohne Vac

Die Temperaturverläufe der beiden Mischungen in der Abbildung 5-49 verlaufen sehr ähnlich, der Temperaturanstieg der Mischentwurf 4 mit Vac tritt jedoch etwas früher ein.

Im Vergleich mit Mischentwurf 3 (vgl. vorheriger Abschnitt) beginnt die Hydratationswärmeentwicklung deutlich früher, aber immer noch später als bei der Mischung M7-1.

Die Druckversuche wurden auch hier nach 24h durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse der Festigkeitsprüfung sind in der Tabelle 5-59 zusammengefasst.

Tabelle 5-59: Festigkeitsentwicklung des Mischentwurfs 4

Mischung	24 -Stunde [N/mm <sup>2</sup> ]	7-Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	51,12	96,3
Basis Vac	60,55	97,95
M 7-1	67,62	109,79
ME4	53,52	106,30
ME4 Vac	61,99	123,8
ME4 Vac ohne BE	61,94	-

Die Druckfestigkeit zu früheren Zeitpunkten des Mischentwurfs 4 Vac ist in der Tabelle 5-60 zusammengefasst.

Tabelle 5-60: Frühfestigkeitsentwicklung Mischentwurf 4 mit Vac

4 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	6 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	8 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	10 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	12 Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]
3,30	9,15	21,18	36,8	45,21

Beim Mischentwurf 4 ohne BE konnten die Festigkeitsversuche trotz Anwendung des Vakuummischprozesses nicht früher als nach 24 Stunden durchgeführt werden, da die Mischung noch nicht fest genug war, um die Probekörper auszuschalen.

Die mit dem Vakuummischprozess hergestellten Mischungen wiesen mit und ohne Beschleuniger höhere Druckfestigkeiten auf, als die bei Normaldruck hergestellte Mischung, die Druckfestigkeit der Mischung M 7-1 war aber noch höher. Die erhaltenen Ergebnisse sind in der Abbildung 5-50 ersichtlich.

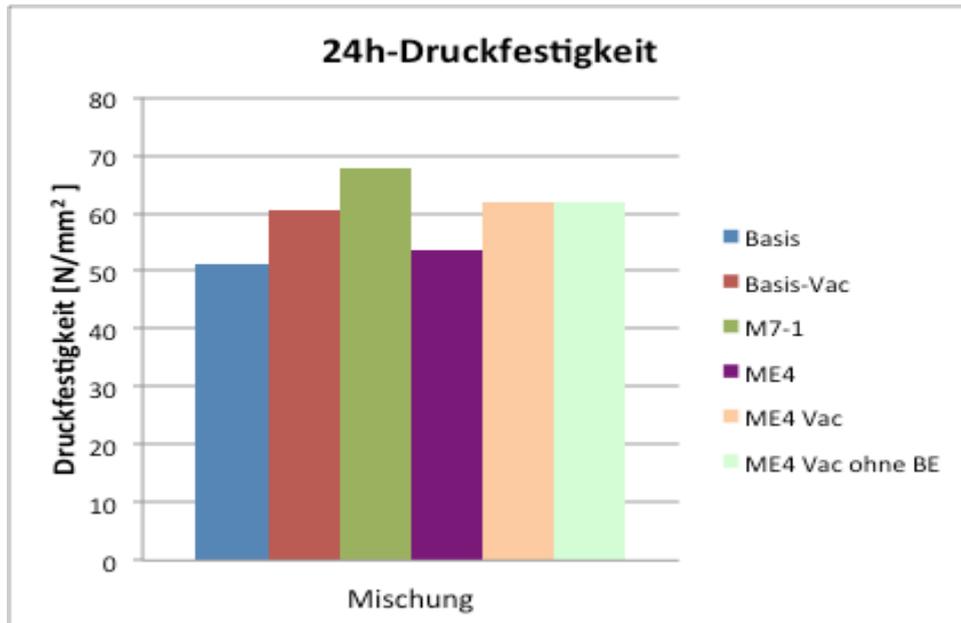


Abbildung 5-50: 24h Festigkeit des Mischentwurfs 4 im Vergleich

Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurde in der Abbildung 5-51 die Druckfestigkeitsentwicklung aller Varianten des Mischentwurf 4 im Vergleich mit den beiden Referenzmischungen sowie der Mischung M 7-1 dargestellt.

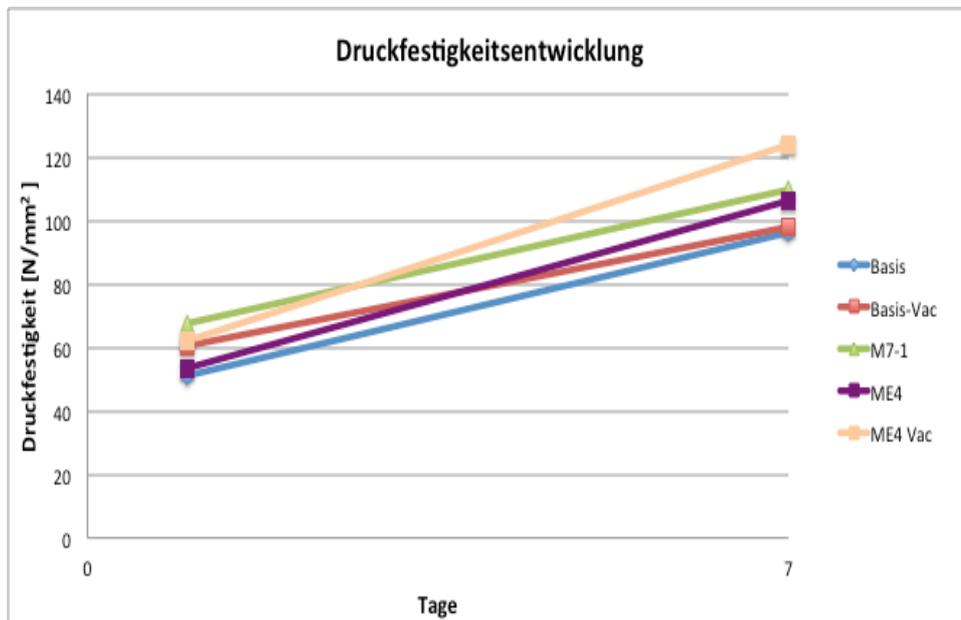


Abbildung 5-51: Festigkeitsentwicklung des Mischentwurfs 4 im Vergleich

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass der Mischentwurf 4 mit Vac und BE nach 7 Tagen die höchste Druckfestigkeit im Vergleich aufweist.

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde nach 24 Stunden durchgeführt. Die Ergebnisse der 24h-Biegezugfestigkeiten sind in der Tabelle 5-61 ersichtlich.

Tabelle 5-61: Biegezugfestigkeitsentwicklung des Mischentwurfs 4

Mischung	4 -Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	6-Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	24 –Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	-	-	8,11
Basis Vac	-	-	10,36
M 7-1	-	-	10,07
ME4	-	-	7,67
ME4 Vac	0,58	2,31	9,56
ME4 Vac ohne BE	-	-	9,10

Die Abbildung 5-52 enthält die zusammenfassende Darstellung aller erhaltenen Ergebnisse.

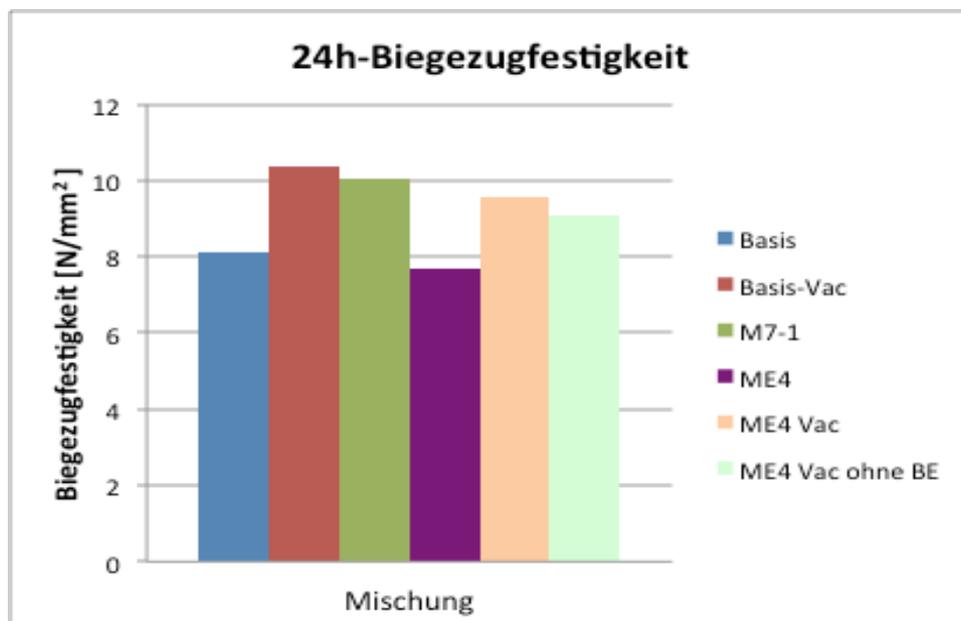


Abbildung 5-52: 24h Festigkeit des Mischentwurfs 4 im Vergleich

Wie bei der 24h-Druckfestigkeit weisen die Mischung M7-1 und alle Mischungen, die mit dem Vakuummischprozess hergestellt wurden, die höchsten Werte auf.

### 5.5.8.5 Mischentwurf 5 (ME5)

Es handelt sich wieder um eine Variation der Mischung M 7-1, aber mit unterschiedlichen Anteilen von SF1 und NS1. Das bedeutet, dass beim Mischentwurf 5 der SF1-Anteil von 22% auf 15% und der NS1-Anteil von 3% auf 1% verringert wird (Tabelle 5-62). Im Gegensatz zu Mischentwurf 3 und 4 wurde wieder der Spritzbetonzement verwendet. Die Hauptbestandteile für den Mischentwurf 5 sind:

- Spritzbetonzement: Blaue SP(PZ-SP)
- Silicastaub: Elkem 940 U (SF1) mit einem Anteil von 15 %
- Nanosilica: KS 300 (NS1) mit einem Anteil von 1%
- Beschleuniger: X-Seed (BE) mit einem Anteil von 4 % und
- Fließmittel: ACE 500 (FM2) mit einem Anteil von 6 %.

Tabelle 5-62: Mischungszusammensetzung des Mischentwurfs 5 mit/ohne Vac für 1 m<sup>3</sup> Beton

Ausgangsstoffe	Masse [kg]
	Mischentwurf 5
PZ-SP	713,2
SF 1	107
NS 2	7,15
QM	356,6
QS	927,5
FM 2	42,8
BE	28,55
KH	14,25
Entlüfter	1
VE	0
Wasser	136
W/Z	0,28
W/B	0,24
V <sub>w</sub> /V <sub>F</sub>	0,48
Fließmittel [ M.% v. Z ]	6

Die Konsistenz des Frischbetons war mit und ohne Vakuummischprozess steif-plastisch und entsprechend schwierig zu verarbeiten.

Der Hydratationswärmeverlauf des Mischentwurfs 5 ist in der Abbildung 5-53 dargestellt.

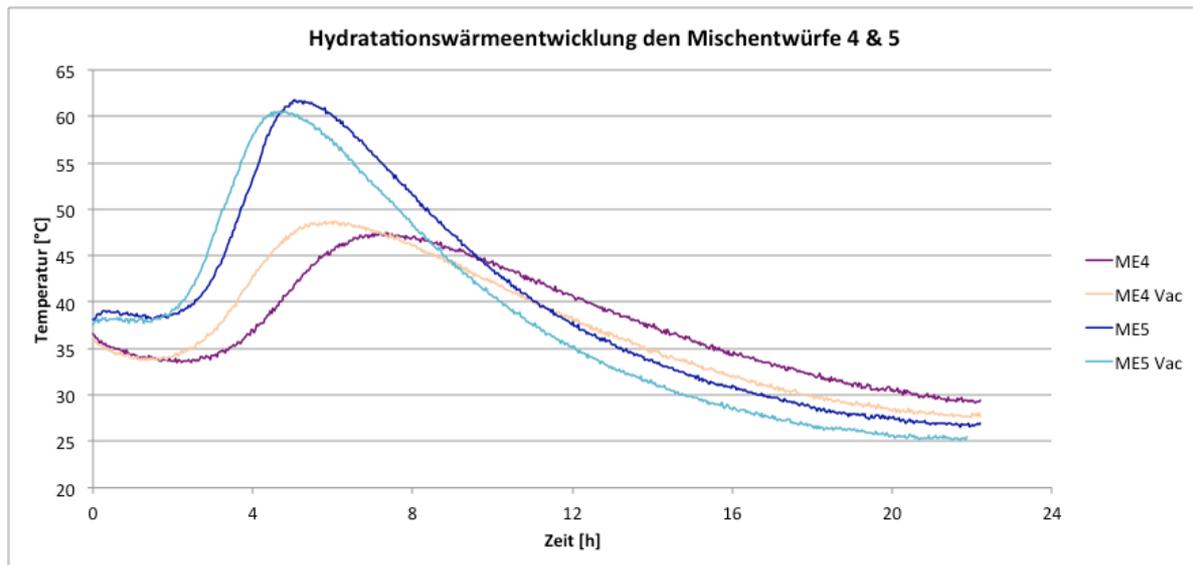


Abbildung 5-53: Hydratationswärmeentwicklung des Mischentwurfs 5 mit/ohne Vac im Vergleich mit Mischentwurf 4

Die Temperaturverläufe der beiden Mischungen verlaufen sehr ähnlich dem der Mischung M7-1, der Temperaturanstieg des Mischentwurfs 5 mit Vac tritt jedoch etwas früher ein. Im Vergleich mit Mischentwurf 4 ist der Einfluss des schnell reagierenden Spritzbetonzements deutlich zu erkennen.

Die Prüfung der Druckfestigkeit wurde nach 24h und 7 Tagen durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse sind der Tabelle 5-63 zu entnehmen.

Tabelle 5-63: Druckfestigkeitsentwicklung des Mischentwurfs 5

Mischung	Nach 24-Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]	Nach 7-Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	51,12	96,3
Basis Vac	60,55	97,95
M 7-1	67,62	109,79
ME4	53,52	106,30
ME4 Vac	61,99	123,80
ME5	65,63	104,81
ME5 Vac	67,49	105,71

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass der Mischentwurf 5 mit/ohne Vac höhere Druckfestigkeiten als beide Referenzmischungen liefert.

Nach 24h wies der Mischentwurf 5, der bei Unterdruck hergestellt wurde, eine höhere

Druckfestigkeit auf, die fast gleich hoch war, wie jene der Mischung M7-1.

Die Abbildung 5-54 enthält eine zusammenfassende Darstellung einiger Ergebnisse.

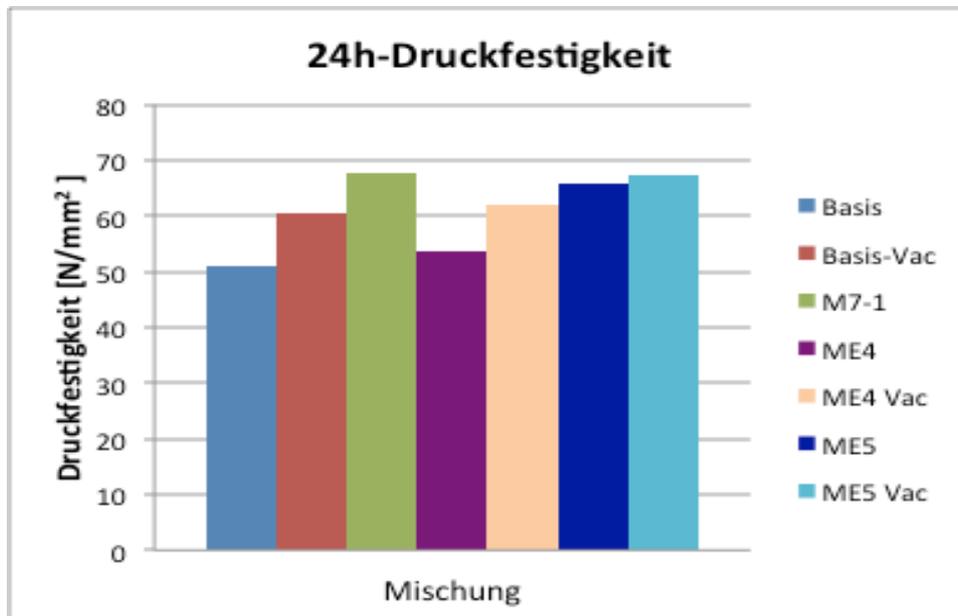


Abbildung 5-54: 24h Druckfestigkeit des Mischentwurfs 5 im Vergleich

In dem Diagramm ist zu erkennen, dass die 24h-Druckfestigkeit des Mischentwurfs 5 mit/ohne Vac im Vergleich zum Mischentwurf 4 höher ist. Die 24h-Druckfestigkeit der Mischung M7-1 liegt immer noch knapp an höchster Stelle.

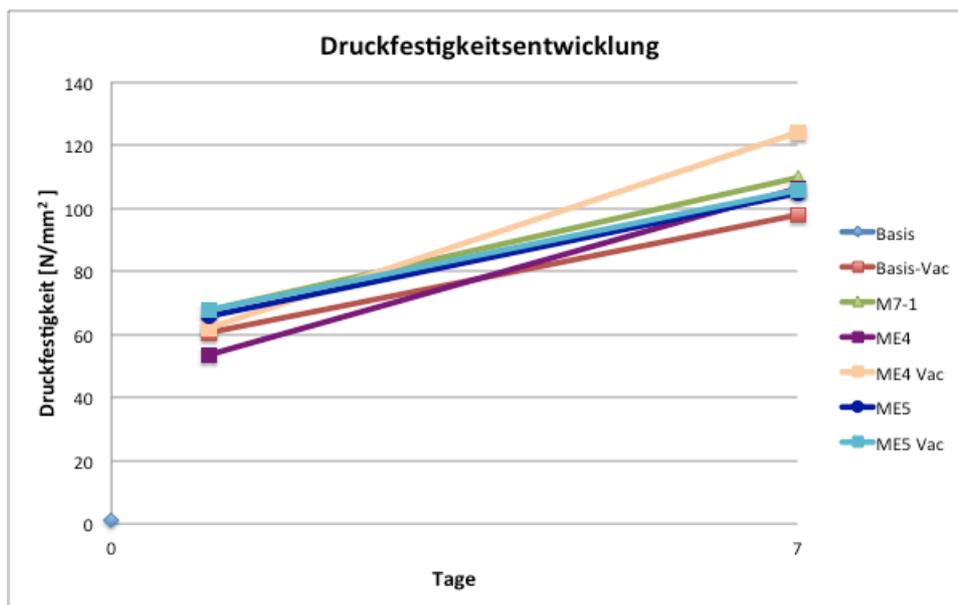


Abbildung 5-55: Festigkeitsentwicklung des Mischentwurfs 5 im Vergleich

Nach 7 Tagen wies wieder der Mischentwurf 4 Vac die höchste Druckfestigkeit auf (Abbildung 5-55).

Wie bei allen anderen Versuchen wurde auch hier die Biegezugfestigkeit nach 24h untersucht. Die erhaltenen Ergebnisse sind in der Tabelle 5-64 zusammengestellt.

Tabelle 5-64: 24h-Biegezugfestigkeit des Mischentwurfs 5

Mischung	24-Stunden [N/mm <sup>2</sup> ]
Basis	8,11
Basis Vac	10,36
M 7-1	10,07
Mischentwurf 4 ohne Vac	7,67
Mischentwurf4 mit Vac	9,56
Mischentwurf 5 ohne Vac	10,26
Mischentwurf 5 mit Vac	10,67

Hier lag der höchste Wert beim Mischentwurf 5 mit Vakuummischprozess. Die Darstellung der Ergebnisse sind der Abbildung 5-56 zu entnehmen.

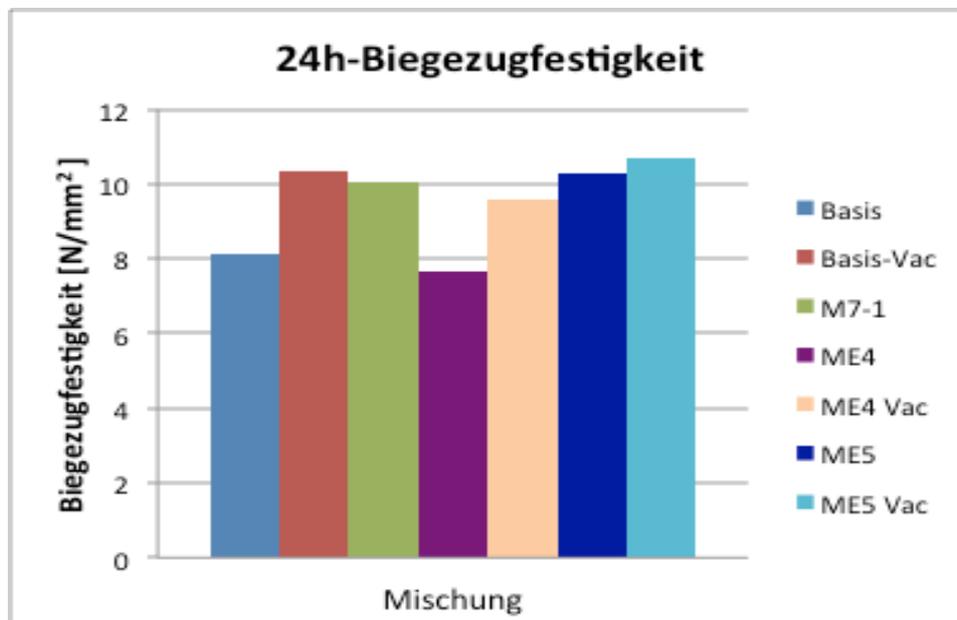


Abbildung 5-56: 24h Festigkeit des Mischentwurfs 5 im Vergleich

### 5.5.9 Ausgewählte Mischungen im Vergleich

In diesem Abschnitt werden die Mischungen aus jeder Versuchsserie, welche die besten Ergebnisse bezüglich Frühfestigkeit lieferten, in einer Übersicht dargestellt.

Dabei handelt es sich um folgende Mischungen:

- Mischung M1-2 (10% PZ-S, 25% SF1, 4% FM1)
- Mischung M2-1 (PZ-W, 25% SF1, 4% FM1)
- Mischung M2-2 ( PZ-SP, 25% SF1, 4% FM1)
- Mischung M3-6 (PZ-W, 25% SF2, 4% FM1)
- Mischung M4-5 (PZ, 22% SF1, 3% NS2)
- Mischung M5-1 (PZ, 25% SF1, 6% FM2)
- Mischung M6-1 (PZ, 22% SF1, 4% BE)
- Mischung M7-1 (PZ-SP, 22% SF1,3% NS1, 4% BE, 6% FM2)
- Mischentwurf 2 (PZ-SP, 22% SF1,3% NS2, 4% BE, 6% FM2)
- Mischentwurf 3 (PZ, 22% SF1, 3% NS2, 4% BE, 6% FM2)
- Mischentwurf 4 (PZ, 10% SF1,3% NS1, 4% BE, 6% FM2) mit Vac
- Mischentwurf 5 (PZ-SP, 15% SF1,1% NS1, 4% BE, 6% FM2)

Die Abbildung 5-57 zeigt einen Überblick über diese Mischungen im Vergleich mit den Referenzmischungen Basis und Basis Vac.

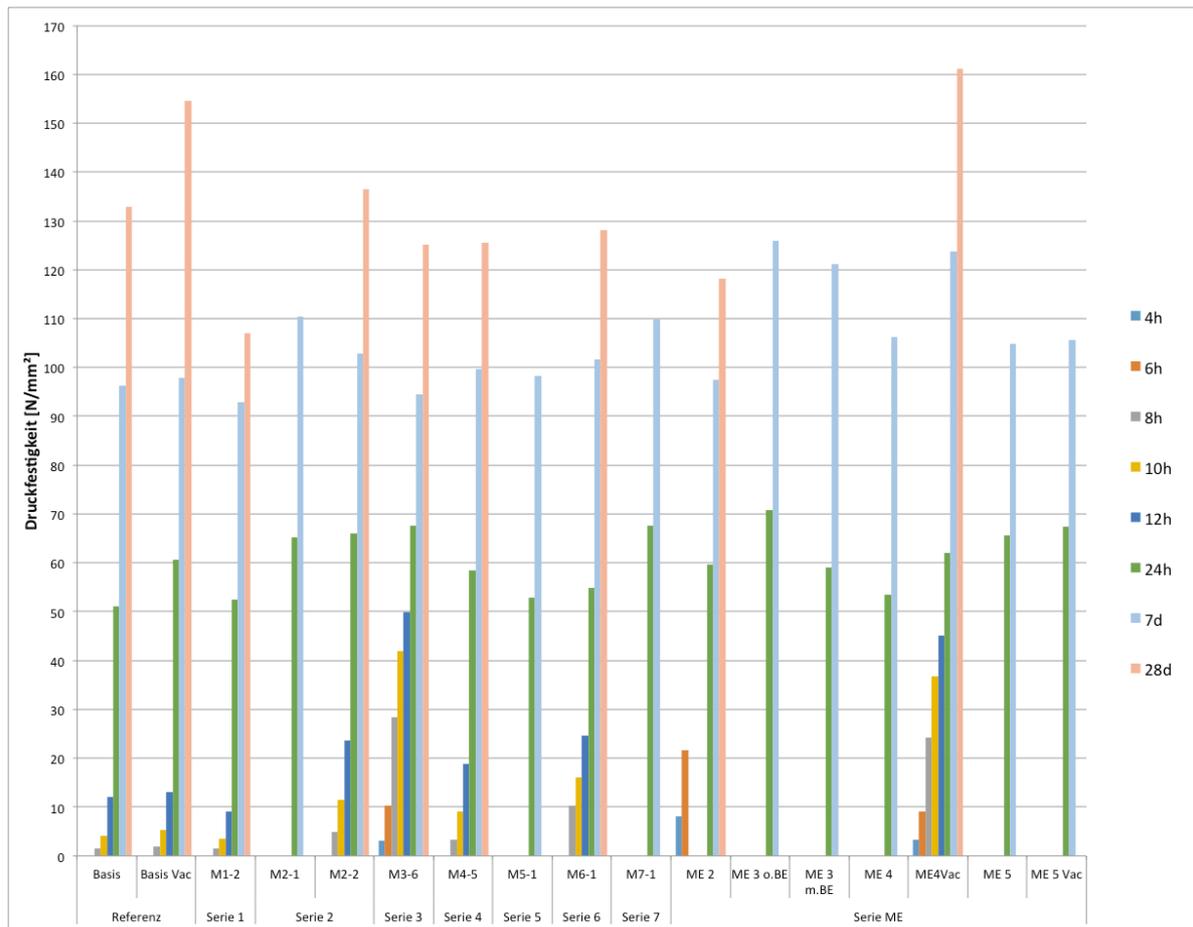


Abbildung 5-57: Mischungen mit den besten Frühfestigkeitsentwicklungen aus jeder Versuchsserie

Alle diese Mischungen weisen nach 24h mindestens die gleiche Druckfestigkeit wie die Mischung Basis auf. Einige davon weisen auch eine höhere Druckfestigkeit als die Mischung Basis Vac, obwohl sie ohne Vakuummischprozess hergestellt wurden.

Die Mischungen M1-2 und M5-1 wurden trotz der besten Ergebnisse in der jeweiligen Mischungsserie nicht bevorzugt, da die Druckfestigkeiten nach 24h nicht signifikant höher als jene der Referenzmischung Basis waren.

Wie bereits bei der Beschreibung der einzelnen Mischungen erwähnt wurde, waren einige Betone kaum zu verarbeiten.

Die Mischung M7-1 und die Mischentwürfe ME2, ME3 mit/ohne Vac und ME5 können ohne weitere Optimierungsmaßnahmen aufgrund der schlechten Verarbeitbarkeit nicht verwendet werden. Deswegen wurden auch diese nicht in die Schlussbetrachtung miteinbezogen.

Die verbleibenden Mischungen, die eine gute Frühfestigkeitsentwicklung und eine gute Verarbeitbarkeit aufweisen, sind daher:

- Mischung M2-2 ( PZ-SP, 25% SF1, 4% FM1)
- Mischung M3-6 (PZ-W, 25% SF2, 4% FM1)
- Mischung M4-5 (PZ, 22% SF1, 3% NS2)
- Mischung M6-2 (PZ, 22% SF1, 4% BE)
- Mischentwurf 4 (PZ, 10% SF1,3% NS1, 4% BE, 6% FM2).

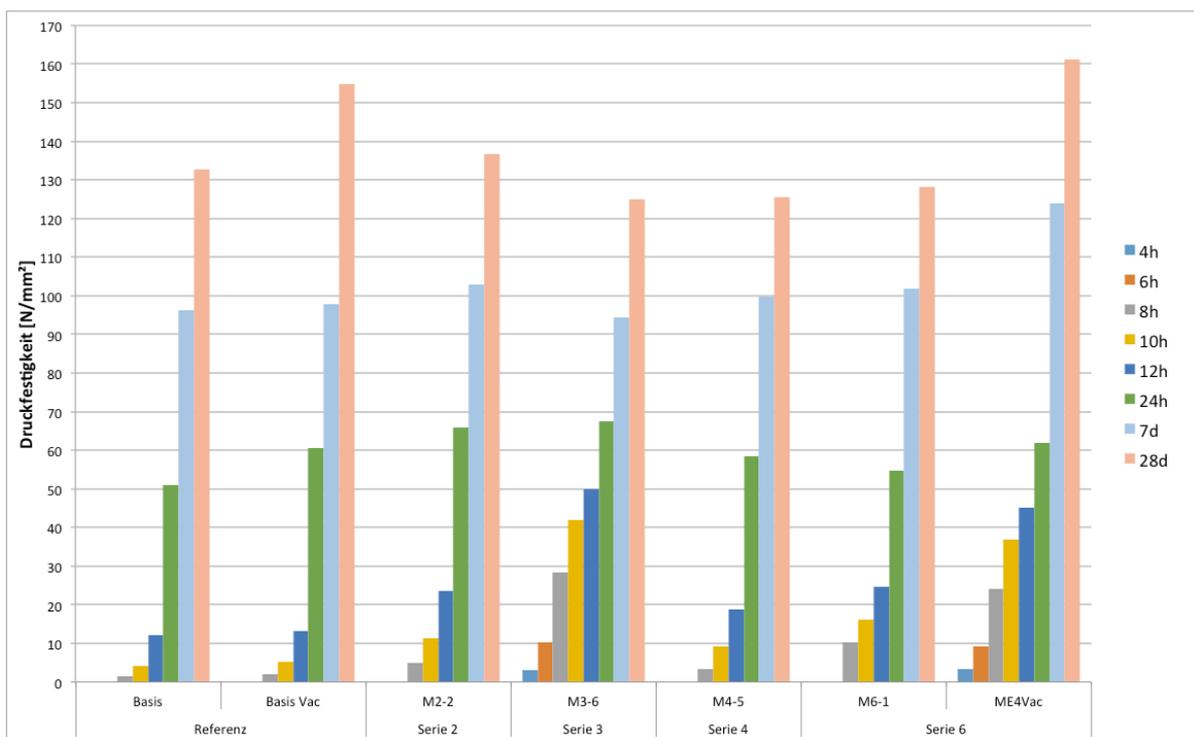


Abbildung 5-58: Mischungen mit guter Frühfestigkeitsentwicklung und guter Verarbeitbarkeit

Betrachtet man die die Druckfestigkeiten nach 24h, ist zu erkennen, dass die Mischungen M2-2, M3-6 und ME4Vac nicht nur die Druckfestigkeit der Mischung Basis, sondern auch jene der Mischung Basis Vac überschreiten. Auffallend ist auch die hohe 7-Tagesdruckfestigkeit der Mischung ME4Vac. Diese Mischung erreicht auch die höchste Druckfestigkeit nach 28 Tagen (Abbildung 5-58).

Bezüglich der Festigkeitsentwicklung bis 24h stechen die Mischungen M3-6 und ME4Vac hervor. Im Gegensatz zu den anderen Mischungen konnten diese beiden bereits nach 4h geprüft werden und wiesen schon eine Druckfestigkeit von rund 3 N/mm<sup>2</sup> auf. Die

Festigkeitsentwicklung dieser zwei Mischungen ist in Abbildung 5-59 dargestellt.

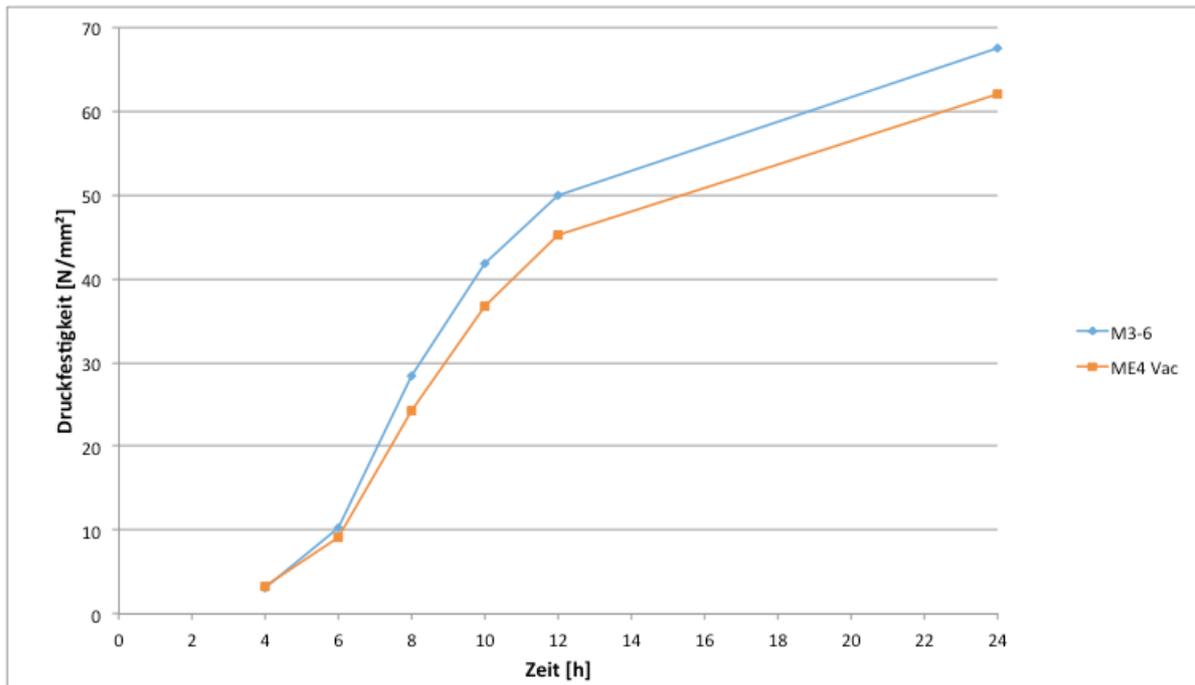


Abbildung 5-59: Festigkeitsentwicklung der Mischungen M3-6 und ME4Vac

Nach 6 h betragen die Druckfestigkeiten bereits ca. 10 N/mm<sup>2</sup>. Ab diesem Zeitpunkt erfolgte der Festigkeitsanstieg bei der Mischung M3-6 etwas schneller, so dass diese nach 12h bereits eine Druckfestigkeit von 50 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

Die Mischung M3-6 wurde mit Weißzement hergestellt. Es war etwas überraschend, dass die Mischungen mit diesem Zement eine derart schnelle Festigkeitsentwicklung aufwiesen, ohne dass die Verarbeitbarkeit des Frischbetons wesentlich verschlechtert wurde. Diese Mischung enthält keinen Beschleuniger und wurde nicht mit dem Vakuummischprozess hergestellt.

Die Mischung ME4Vac wurde mit CEM I C<sub>3</sub>A-frei hergestellt, der wiederum für eine etwas langsamere Festigkeitsentwicklung bekannt ist. Durch die Verwendung von Nanosilica, Beschleuniger und dem Vakuummischprozess konnte jedoch eine vergleichbar schnelle Festigkeitsentwicklung bei ebenfalls guten Verarbeitungseigenschaften erreicht werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ultra High Performance Beton (UHPC) ist ein relativ junger, zementgebundener Baustoff, welcher durch seine spezielle Zusammensetzung außergewöhnliche Eigenschaften erhält. Diese Eigenschaften können durch die Verwendung unterschiedlicher Ausgangsstoffe sowie durch den Mischprozess maßgeblich beeinflusst werden.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Einflüsse der Verwendung sowohl unterschiedlicher Ausgangsstoffe wie auch einer Kombination verschiedener, aufeinander abgestimmter reaktiver und inerter Zusatzstoffe auf die Frühfestigkeitsentwicklung zu untersuchen. Daher wurden nur die Art und die Menge der Ausgangsstoffe variiert. Es sollte dadurch der Verzögerungseffekt des Fließmittels kompensiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sieben Mischungsserien durchgeführt, wobei bei jeder Mischungsserie der Einfluss einzelner Ausgangsstoffe untersucht wurde. Daraus ergab sich die Einteilung der Versuchsserien:

- 1. Mischungsserie: Verwendung von Schnellzement
- 2. Mischungsserie: Verwendung unterschiedlicher Zementsorten
- 3. Mischungsserie: Variation Menge und Art des Silicastaubes und Flugasche
- 4. Mischungsserie: Variation Menge und Art des Nanosilica
- 5. Mischungsserie: Variation Menge und Art des Fließmittel
- 6. Mischungsserie: Variation Menge und Art des Beschleunigers
- 7. Mischungsserie: Variation Menge des Verzögeres.

Die Ausgangsrezeptur war die sogenannte Basismischung, die einmal ohne und einmal mit Vakuummischprozess hergestellt wurde (Basis bzw. Basis Vac). Diese beiden Mischungen wurden als Referenzmischungen für den Vergleich der Festigkeit verwendet. Um eine Vergleichbarkeit der Mischungsserien zu gewährleisten, wurde ausgehend von der Basismischung immer nur eine Komponente variiert.

Für jede Mischungsserie wurden Probekörper (Würfel und Prismen) hergestellt. Die Würfel wurden für die Ermittlung der Hydratationswärme verwendet.

Die Festigkeitsentwicklung wurde anhand folgender Versuche beschrieben:

- Ermittlung der Hydratationswärmeentwicklung

- Biegezugfestigkeitsprüfung
- Druckfestigkeitsprüfung.

Auf eine Frischbetonprüfung wurde verzichtet. Die Konsistenz und die Verarbeitbarkeit wurden nach Augenschein beurteilt und beschrieben.

### **Zement**

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Es wurde die Auswirkung von Schnellzement in Kombination mit Portlandzement C<sub>3</sub>A-frei untersucht. Bei den Prüfungen dieser Mischungsserie konnte beobachtet werden, dass mit steigendem Schnellzement-Anteil die Wärmeentwicklung früher einsetzt, was auf eine schnellere Festigkeitsentwicklung hindeutet. Die Verarbeitbarkeit der Mischungen verschlechterte sich mit zunehmendem Schnellzement-Anteil zusehends. Bei der Druckfestigkeitsprüfung war auffällig, dass die Druckfestigkeit nach 8h noch sehr gering war, aber die Werte bereits nach 10h stark anstiegen. Sowohl Druck- wie auch Biegezugfestigkeit lagen dabei nicht über jener der Basismischung und deutlich unter jener der Mischung Basis Vac. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen lag sogar unter denen der beiden Referenzmischung. Die Verwendung von Schnellzement wurde aufgrund dieser Resultate nicht weiter untersucht.
- Die Untersuchungen mit unterschiedlichen Zementsorten zeigten, dass die Mischungen mit Weißzement und Spritzbetonzement einen früheren Hydratationsbeginn und eine schnellere Festigkeitsentwicklung aufweisen. Die Verwendung von Spritzbetonzement sowie Weißzement führte zu deutlich höheren Frühfestigkeiten als bei beiden Referenzmischungen mit normalem Portlandzement. Die Verarbeitbarkeit der Mischungen mit Weißzement war wesentlich besser als mit Spritzbetonzement.

### **Reaktive Zusatzstoffe**

- Erwartungsgemäß kann zur Verwendung von Silicastaub und Flugasche gesagt werden, dass deren Einsatz einen Beitrag zur Steigerung der Frühfestigkeit leistet, diese Steigerung aber im Verhältnis zur eingesetzten Menge relativ gering ist. Die puzzolanische Reaktion läuft sehr langsam ab, sodass Silicastaub und Flugasche ihre festigkeitssteigernde Wirkung erst zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt entfalten.

- Im Gegensatz dazu beschleunigt die Verwendung von Nanosilica die Hydratation. Generell kann gesagt werden, dass mit zunehmendem Anteil von Nanosilica die Hydratation früher beginnt und die 24h-Druckfestigkeit steigt. Eine entsprechende Kombination von Silicastaub und Nanosilica kann zu einer hohen Frühfestigkeit und einer hohen Endfestigkeit führen.

### **Zusatzmittel**

- Eine höhere Dosierung von Fließmittel kann die Festigkeitsentwicklung des Betons negativ beeinflussen, dies zeigte sich deutlicher in der Druckfestigkeit als bei der Biegezugfestigkeit. Die verzögernde Wirkung des Fließmittels hängt von dessen Molekülstruktur ab. Das Fließmittel 2 weist eine völlig andere Molekülstruktur als Fließmittel 1 auf. Dadurch ist die verzögernde Wirkung weniger ausgeprägt, obwohl es für eine vergleichbare Konsistenz etwas höher dosiert werden muss. Es eignet sich sehr gut, wenn eine schnelle Festigkeitsentwicklung gewünscht ist.
- Die Wirkung des Beschleunigers konnte mit Hilfe der Temperaturmessungen beobachtet werden. Mit steigendem Beschleunigeranteil setzte die Wärmeentwicklung früher ein. Bei der Verwendung von 4% Beschleuniger konnte die höchste Druckfestigkeit nach 24h erreicht werden. Die Zugabe größerer Mengen an Beschleuniger wirkt sich jedoch negativ aus.
- Die Verwendung eines Verzögeres führte zu widersprüchlichen Ergebnissen. Der Temperaturanstieg verzögerte sich mit zunehmendem Anteil an Verzögerer. Trotzdem brachte die Verwendung keine Verlängerung der Verarbeitungszeit, da die Mischungen sehr schnell erstarrten. Die Druckfestigkeiten nach 24h sanken mit zunehmendem Anteil an Verzögerer. Für diese Untersuchungen wurde ein Spritzbetonzement verwendet. Möglicherweise war dieser Verzögerer nicht für diese Zementsorte geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aber auf weitere Untersuchungen diesbezüglich verzichtet.

### **Kombination der Ausgangsstoffe**

- Die Verwendung von Spritzbetonzement in einer Kombination mit Silicastaub (Elkem), Nanosilica (KS 300), Fließmittel (ACE 500) und Beschleuniger (X-Seed) führte zu einem sehr schnellen Hydratationseintritt. Diese Kombination lieferte eine hohe Früh- und Endfestigkeit, die Verarbeitbarkeit war jedoch sehr schlecht.

- Bei der Verwendung der gleichen Ausgangsstoffe, aber mit geringerem Anteil an Silicastaub und höherem Anteil an Fließmittel, trat die Hydratationswärmeentwicklung etwas später ein und die Verarbeitungszeit war wesentlich länger. Die Druckfestigkeit war allerdings durchgehend niedriger.
- Wird der verringerte Anteil an Silicastaub teilweise durch Nanosilica ersetzt, verbessert sich zwar die Frühfestigkeitsentwicklung, aber nicht die Verarbeitbarkeit.
- Der Vergleich zwischen beiden Nonasilicatypen zeigte, dass KS 300 einen günstigeren Einfluss auf die Frühfestigkeitsentwicklung und die Konsistenz ausübt als Aerosil 130.
- Durch die Verwendung von Portlandzement CEM I C<sub>3</sub>A-frei in einer Kombination mit Silicastaub (Elkem), Nanosilica (KS 300), Fließmittel (ACE 500) mit/ohne Beschleuniger (X-Seed) konnte eine gute Verarbeitbarkeit erreicht werden (insbesondere die Mischung ohne Beschleuniger war gut zu verarbeiten). Die Mischung ohne Beschleuniger führte auch zu den höchsten Festigkeiten.
- In Kombination mit CEM I führte ein reduzierter Anteil an Silicastaub zu einem früheren Hydratationsbeginn und die Konsistenz verbesserte sich.

### **Mischprozess**

- Eine Verlängerung der Trockenmischdauer führte generell zu einer weicherer Konsistenz. Bereits eine Verlängerung von 3 min auf 5 min Trockenmischdauer verbesserte die Konsistenz wesentlich. Ein signifikanter Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung konnte nicht festgestellt werden.
- Eine weitere Verbesserung der Konsistenz konnte durch den Vakuummischprozess erreicht werden. Dazu wurde nach dem Ende des normalen Mischprozesses mit reduzierter Werkzeuggeschwindigkeit bei einem Unterdruck von 60mbar für 3 min entlüftet. Der Vakuummischprozess führte zu einem früheren Hydratationsbeginn und somit zu einer schnelleren Festigkeitsentwicklung. Die Endfestigkeit des Betons war auf Grund der höheren Rohdichte der guten Entlüftung ebenfalls höher als bei vergleichbaren Mischungen, die ohne Vakuummischprozess hergestellt wurden.

### **Ausblick**

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, durch die sorgfältige Auswahl der Komponenten Mischungsrezepturen zu entwickeln, die bereits nach wenigen Stunden zu beachtlichen

Druckfestigkeiten führten. Der Einfluss des Mischprozesses konnte ebenfalls aufgezeigt werden.

Diese Arbeit lässt aber auch das vorhandene Optimierungspotential erkennen. Im Hinblick auf die Verwendung von Zusatzmittel und die Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Betons sind sicherlich noch weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Die Entwicklung von UHPC mit hoher Frühfestigkeit könnte weitere Einsatzgebiete für diesen jungen Baustoff erschließen.

Dies könnte etwa die Sanierung von Fahrbahn- oder Flugbetriebsflächen sein, wo bereits nach wenigen Stunden sehr hohe Festigkeiten gefordert sind und der Beton außerordentliche Dauerhaftigkeitseigenschaften aufweisen muss.

Ein weiteres Anwendungsgebiet könnte etwa die Verstärkung von Holzdecken sein. Die Verwendung eines schnell erhärtenden UHPCs würde es ermöglichen, eine Holz-Beton-Verbundkonstruktion in mehreren Schichten an einem Tag herzustellen. Durch die nur geringen Lasten der dünnen Betonschichten könnte unter Umständen auf eine aufwändige Unterstellung der Holzdecke verzichtet werden.

Generell könnten verkürzte Ausschulfristen im Fertigteilwerk und auf der Baustelle die Verwendung dieses innovativen Baustoffes fördern.

---

## 7 Literatur

- [1] Schachinger, A., I.: „Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteile aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität“, Dissertation, TU München, München, 2007.
- [2] Horvath, J.: „Beiträge zum Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, Dissertation, TU Wien, 2003.
- [3] Horvath, J.: „Entwicklung von hochfesten Blähglasbeton“, Diplomarbeit, TU Wien, 1998.
- [4] Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: „Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone“, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, Forschungsbericht DFG FE 497/1-1.
- [5] Vande Voort, T.; Suleiman, M., Sritharan, S.: „Design and Performance Verification of ultra-high Performance Concrete Piles for Deep Foundations“, Final report, November 2008, The Iowa Highway research Board and the Iowa Department of Transportation. CTRE Project 06-264.
- [6] Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslüke, C.: „Ultrahochfesten Beton“, Heft 3, Kassel, Kassel University Press, 2004, ISBN 3-89958-086-9.
- [7] Jenny, N.: „Schwindverhalten von Ultrahochfestem Beton und die Auswirkung von Polypropylen Fasern auf die Frühschwindrissbildung“, Diplomarbeit, TU Wien, März 2003.
- [8] Naaman, A. E.; Wille, K.: „The path to Ultra high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC): Five Decade of Progress.“ Proceeding of Hipernat 2012 3rd International Symposium on Ultra high Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Ed. Schmidt, M.; Fehling, E.; Glotzbach, C.; Fröhlich, S.; Piotrowski, S.: Kassel University Press. Kassel, Germany, 2012, pp. 3-15.
- [9] UHPC: A State- of- the- Art Report fort he Bridge Community, US-Department of Transportation / Publication No. FHWA – HRT-13-060.
- [10] Buitelaar, P.: „Heavy Reinforced Ultra high Performance Concrete“, Proceeding of Hipernat 2012 3rd International Symposium on Ultra high Performance Concrete and

- 
- Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Ed. Schmidt, M.; Fehling, E.; Geisenhanslücke, C.: Kassel University Press. Kassel, Germany, 2012, pp. 25-35.
- [11] Richard, P.: „Reaktive Powder Concrete: A new Ultra High Strength Cementitious Material“, Proceeding of the Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength / High-Performance Concrete, 29-31 May 1996, Paris, France, Ed. de Larrard, F. and Lacorix, R., Vol. 3, pp. 1343-1357.
- [12] Rossi, P.: „Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, A French Perspective on Approaches used to Produce High Strength, Ductile Fiber-Reinforced Concrete.“, Concrete International, Vol. 23, No.12, December 2001, pp. 46-52.
- [13] Freyssinet, E., Cem. Concr. Manufacture, vol.9, pp.71, 1936.
- [14] Korpa, A.; Kowald, T.; Trettin, R., American Journal of Materials Science and Applications: „Principle of development phase composition and nanostructural features of multiscale UHPC modified with pyrogenic nanoparticles.” – A review Article.
- [15] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraren, J.; Leutbecher, T.; Fröhlich, S.: Ultra-High-Performance Concrete UHPC, Fundamentals-Design-Example / Betonkalender.
- [16] Giovanni Martnola: Ultrahochfeste, duktil- Zementgebunde, moderne, dauerhafte und wirtschaftliche Faserbetone.
- [17] Bache HH.: „Densified Cement Ultra fined particle-based materials.“, 2nd International conference on super plasticizers in concrete, Ottawa, p.33, June 10-12-1981.
- [18] Alford, NM.; Groves, GW.; Double, DD.: Cem. Concr. Res., Vol.12 (2) pp. 349-358, 1982.
- [19] Fracls Joung, J.; Berg, M.; Marco-defect-free cement: A novel organoceramic composite. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 271, 1992.
- [20] European Patent Specification, Publ. Number: EP0275288B1.
- [21] Richard, P. ; Cheyrezy, M. : (1995) – Les Béton de poudres réactives, Annales de IITBTP, S32, PP 85-102.
- [22] De. Larrarde, F.; Sedran, Th.: „Optimization of UHPC by the use of a packing model, Cem. Concr. Res. Vol. 24, S.997-1008, 1994.
- [23] Jungwirth, J.; Mutoni, A.; Structural use of ultra-high performance fiber reinforced

- 
- concrete, in: FCR in Switzerland: research, applications and perspectives, conference: FRC- from theory to practice, Bergamo, Italy, 2004.
- [24] Moallem, M.: „Flexrual Redistribution in Ultra-High Performance Concrete“, Lab Specimens Master Thesis, June 2010, Ohio University, USA.
- [25] <https://de.wikipedia.org>, „Lafarge“, [Zugegriffen: 18.02.2016].
- [26] <https://de.wikipedia.org>, „Bouggues“, [Zugegriffen: 18.02.2016].
- [27] <https://de.wikipedia.org>, „Rhodia“, [Zugegriffen: 18.02.2016].
- [28] <https://www.ductal.com>, [Zugegriffen: 18.02.2016].
- [29] „Anwendung von UHPC als direkt befahrener Aufbeton bei der Internalisierung eines bestehenden Brückenbauwerks in Österreich“, Dip.-Ing Phillpp Hadl; Dip.-Ing Regina della Pletra; MSC Kim Huy Hoang; Prf. Dr., Ing. habil. Nguyen Viet Tue and Dipl.- Ing Erwin Pilch.
- [30] <https://www.Betonmarketing.at>, [Zugegriffen: 20.02.2016].
- [31] Graubner, C.-A.; Hüske, K.: Nachhaltigkeit im Bauwesen Verlag Ernst & Sohn, 2003.
- [32] Schmidt, M.: „Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücken mit UHPC in Europa“, Heft 2. In: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Kassel: Kassel University Press GmbH, S. 53, 2003.
- [33] Schmidt, M; Fehling, E.: Ultrahoch fester Beton, Heft 7: Kassel University Press, 2007, ISBN: 978-3-89958-347-2.
- [34] Kurka, G.: „Einfluss des Vakuummischprozesses auf die Herstellung von UHPC mit verschiedenen Faserarten“, TU Wien, Wien, 2012.
- [35] Fischer, O.; Lechner, T.; Mensinger, M.; Ndogno, J.; Seidl, G.; Stambuk, M.: „Entwicklung dünnwandiger, flächenhafter Konstruktionselemente aus Ultrahochfesten Beton und geeigneter Verbindungstechniken zum Einsatz im Hoch- und Industriebau“, Abschlussbericht, TU München, München, 2014.
- [36] Kirnbauer, J.: „Der Vakuummischprozesse zur Herstellung von UHPC“, Wien, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwese, Diss. 2013.
- [37] Blaise, P.Y. ; Couture. M.: Precast, Prestressed Pedastrian Bridge- World’s First Reactive Powder Concrete Structure, PCI Journal, Vol. 44, PP.60-71. Oct 1999.

- 
- [38] Berger, M.: „Einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften ultrahochfester Betone“, TU Wien, Wien, 2008.
- [39] [www.Lafargenorthamerica.com](http://www.Lafargenorthamerica.com), [Zugegriffen: 20.02.2016].
- [40] Béton Fibrés á Ultra- Hautes Performances, Recommendations Provisoires, (Ultra high Performance Fiber-Reinforced Concretes), Interim Recommendations, SETRA-AF GC, Group de travail BFUP, Paris, France, January 2002. (in French and English). Available at <http://www.afgc.asso.fr/status-de-lassociation-francaise-de-genie-civil.html>.
- [41] Behloul, M.; Lee, K.C.: „DUCTAL Seongyu Footbridge“, 2003.
- [42] <http://www.baublatt.de/archiv/2002-5/7.pdf>, [Zugegriffen: 21.02.2016].
- [43] Fehling, E.; Schreiber, W.; Bunje, K.; Schmidt, M.: „Brücke aus Ultrahochfesten Beton in Kassel über die Fulda; Band 79; Heft 7/8, 2004; Springer-VDI-Verlag: Düsseldorf.
- [44] Hecht, M.: „Practicak use of fiber-reinforced UHPC in Construction-Production of Precast elements for Wild-Brücke in Völkermarkt“. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Glotzenbach, C.; Fröhlich, S. ; Piotrowsky, S. (Hrsg): Ultra-hich performance concrete and nanotechnology in construction, Proceeding of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Perfomance Construction Materials. Kassel, March 7-7, 2012, S. 889-896.
- [45] Rummelin, A.T. ; „ Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von Ultra hochfesten Betonen.“ Diplomarbeit, Fachhochschule, Stuttgart- Hochschule für Technik, Stuttgart, 2005.
- [46] [www.Süddeutsch.de](http://www.Süddeutsch.de), [Zugegriffen: 24.02.2016]
- [47] <http://wikipedia.de>, „Trianon Hochhaus“, [Zugegriffen: 24.02.2016].
- [48] <http://wikipedia.de> , „Two Union Square Building“, [Zugegriffen: 24.02.2016].
- [49] <http://wikipedia.de>, „Petronas Twin Towers“, [Zugegriffen: 24.02.2016].
- [50] <http://wikipedia.de>, „Taipe 01“, [Zugegriffen: 24.02.2016].
- [51] <http://wikipedia.de>, „Burdj Kalifa“, [Zugegriffen: 24.02.2016].
- [52] Brühwiler, E.; Denarié, E. ; Rehabilitation of concrete structures using UHPFRC, in: Proceeding UHIPC-2008: The 2nd International symposium on UHPC, March 2008, Kassel, Germany.

- 
- [53] V.Shann, S.: „Application of UHPC as a thin-bonded overlay for concrete beidge decks“, Michigan Technological University. 2012.
- [54] <http://www.zement.zt>, [Zugegriffen: 25.02.2016].
- [55] Bindemittelcompound: Zur praxisgerechten Herstellung von UHPC Thomas Deuse, Dyckerhoff AG Wiesbaden (Bundesministerium für Bildung und Forschung).
- [56] Schachinger, I. Schubert, J.; Stengel, T.; Schmidt, K.; Hilbig, H.: „Ultrahochfester Beton- Bereit für die Anwendung?“, In: Heinz, D. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Schiessl. München: Centrum Baustoffe und Materialprüfung. TU München, 2005.
- [57] <http://www.observatorynano.eu/project/filesystem/images/2co.ce.1.pol.jpg>.
- [58] <http://Sudholt-Waseman.de>, [Zugegriffen: 24.02.2016].
- [59] Sagmeister, B.; Schmidt, M.; Fehling, E.; Glotzenbach, C.; Fröhlich, S.; Piotrowsky, S. (Hrsg.): UHPC and nontechnology in construction. Proceeding of Hipermat 2012, 3rd International symposium on UHPC and nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7-9, 2012, S 819-823.
- [60] Forschungsbericht: Forschung neuer Anwendungen für UHPC im Spezialtiefbau (13N10456).
- [61] Ausschreibung zum DFG-Schwerpunktprogramm „ Nachhaltigen Bauen mit Ultra-Hochfestem; 11/2004; URL, <http://www.unikassel.de/fb14/baustoffkunde/spp/spp-UHPC-Ausschreibung.pdf> ; Zugriff 31.10.2008.
- [62] ÖNORM B 4710-1: Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis 2007.
- [63] Bornemann, R.; Schmidt, M; Fehling, E.; Middendorf, B.: Ultra-Hochleistungsbeton UHPC-Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten in Beton- und Stahlbau 96, Heft 7, p. 458-467, 2001.
- [64] Rossbache, R.: „Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften Vakuumgemischter ultrahochfester Betone“, TU Wien, Wien, 2010.
- [65] Schmidt, M.; Geisenhanslücke, C.: „Optimierung der Zusammensetzung der Feinstkorn von ultra-Hochleistungs- und von Selbstverdichtenden Beton“, Beton 36, 2005.
- [66] Michael Lins: „Verhalten von UHPC unter Brandbeanspruchung“, Diplomarbeit, TU

- 
- Wien, Wien, 2004.
- [67] Richard, P. and Cheyrezy, M.: Composition of Reaktiven Powder Concrete, Cement & Concrete Research, 1995.25(7), P. 1501-1511.
- [68] Safranek, K.: „Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone“ Diplomarbeit, TU Wien, Wien, 2007.
- [69] ÖNORM EN 197-1: „Zusammensetzung, Anforderungen und Kornformitätskriterien von Normalzement.
- [70] <http://wikipedia.de>, „Herstellung von Zement“, [Zugegriffen: 01.03.2016].
- [71] Schneider, U.: Bindemittel-Wiener Baustofflehre-Blätter, 17. Auflage, 2001.
- [72] ÖNORM EN 12620: „Gesteinskörnungen für Beton“.
- [73] Schneider, U.; Diederichs, U; Horvath, J.: Zum Abplatzverfahren von Hochleistungsbetonen unter Brandangriff, Heft 7, S. 14-30, 2001.
- [74] Schmidt, M.; Fehling, E.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.: „Ultrahochfester Beton, Perspektive für Betonfertigteilindustrie“, Betonwerk und Fertigteil – Technik, Nr. 3, S. 16-29, 2003.
- [75] Richard, P.; Cheyrezy, M.: „Composition of reactive powder concretes“, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, pp. 1491-1500.
- [76] Ma & Schneider, 2002
- [77] Zanni, H.; Cheyrezy, M.; Maret, V.; Philippot, S.; Nleto, P.: „Investigation of hydration and pozzolanic reaction in Reactive Powder Concrete using 29SINMR“, Cement and Concrete Research, Vol.26, pp. 93-100, Jan. 1996.
- [78] Stengel, T.; Lowke, D.; Mazanec, O.; Schiessl, P.; Gehlen, C.: „Ultrahochfester Beton mit alternativen Zusatzstoffen- Rheologie und Faserverbund“, Beton und Stahlbetonbau, Bd. 106, N. 1, S. 31-38, 2011.
- [79] <http://wikipedia.de>, „Hochleistungsbetone“, [Zugegriffen: 01.03.2016].
- [80] Zement-Merkblatt, Betontechnik, B3, 2.2014.
- [81] ÖNORM EN 12878: „Pigmente zum Einfärben von Zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen, Anforderungen und Prüfverfahren“.
- [82] ÖNORM EN 459: „Flugasche für Beton, Teil 1: Definition, Anforderungen und

- 
- Kornformitätskriterien, Teil 2: Kornformitätsbewertung“.
- [83] ÖNORM EN 51043: „Trass, Anforderung, Prüfung“.
- [84] ÖNORM EN 15167: „Hüttensand zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel, Teil 1: Anforderungen und Kornformitätskriterien, Teil 2: Kornformitätsbewertung“.
- [85] ÖNORM EN 13262-1: „Silicastaub für Beton, Teil 1: Definition, Anforderungen und Kornformitätskriterien, Teil 2: Kornformitätsbewertung“.
- [86] ÖNORM EN 206: „Beton: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Kornformität; Anwendungsregeln zu DIN 206“.
- [87] König, R.; Wagner, J.P.: „Mikrosilika“, Handbuch der Firma Woemann.
- [88] Lins, M.: „Verhalten von UHPC unter Brandbeanspruchung“, Diplomarbeit, TU Wien, Wien, 2004.
- [89] Hrunek, M.: „Festigkeitsentwicklung eines hochfesten Tunnelbetons mit Stahlfasern unter Temperaturbeanspruchung“, Diplomarbeit, TU Wien, Wien, 2003.
- [90] Schneider, U; Horvath, J.: Herstellung und Eigenschaften von Ultrahochfestem beton, Heft 8, TU Wien, S.14, Wien, 2003.
- [91] König, G.; Wagner, J.P.: Sonderdruck aus dem Betonkalender Hochleistungsbeton, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1996.
- [92] Chan, Y.; Chu, S.-H.: „Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete“, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 7, pp. 1167-1172, July 2004.
- [93] Schneider, U; Horvath, J.; König, G.: „Materialverhalten von Ultrahochfestem beton“, Ultrahochfester Beton, S. 38-45, Stuttgart, 2004.
- [94] Dehn, F.: „Ultrahochfester Beton“, in: Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (Hrsg.): Arconis Spezial, Ultrahochfester Beton, Forschungsergebnisse, Entwicklung, Projekte, Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2004, S. 60-64.
- [95] König, G.; Tue, N.V.; Zink, M.: Hochleistungsbeton, Bemessung, Herstellung und Anwendung, Berlin: Ernst & Sohn, 2001.
- [96] <http://www.steng-powerminerals.com>, [Zugegriffen: 27.03.2016].

- 
- [97] ÖNORM EN 934-2: „Zusatzmittel für Beton und Einpressmörtel, Teil 2: Betonzusatzmittel-Definition, Anforderungen und Kornformität, Kennzeichnung und Beschriftung, 2012“.
- [98] Hirsch, C.: „Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen polymeren Fließmittel und Zemente bzw. Mineralphasen der frühen Zementhydratation, Dissertation, TU München, München, 2005.
- [99] Gay, M.; Kleen, E.; Niepmann, D.: „Zusatzmittel für Ultrahochleistungsbetone“, In: Ultrahochfester Beton, Bauwerk Verlag Berlin, S. 45-53, 2005.
- [100] Betonlexikon: <http://www.ch.skw-mbt.com>,  
<http://www.beton-lexikon.de>, [Zugegriffen: 27.03.2016].
- [101] Pfeiler, A.: „Auswirkungen der Nachbehandlung bei höheren Temperaturen auf die Druckfestigkeit von Reactive Powder Concrete, Diplomarbeit, TU Wien, Wien, 2000.
- [102] Holschemacher, K.; Dehn, F.; Klug Y.: „Grundlagen des Faserbetons“, In: Bergmeister, K.; Fingeiloos, F.; Wörner, J.D. (Hrsg.): Beton-Kalender, Berlin, Ernst & Sohn, 2011, S.19-88
- [103] Richter, T.: „Hochfester Beton-Hochleistungsbeton“. Verlag Bau + Technik. Düsseldorf, 1999.
- [104] Schneider, U.: „Frischbeton“, Wiener Baustofflehre Blätter-TU Wien, „Festbeton“, Wiener Baustofflehre Blätter, TU Wien, Schriftenreihe der Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Wien, 1992.
- [105] <http://www.schrelder-vils.ca.at>, Schrelder & CIE, [Zugegriffen: 28.03.2016].
- [106] <http://www.ciamlux.lu>, [Zugegriffen: 26.03.2016].
- [107] <http://www.Zement.wup.at>, [Zugegriffen: 27.03.2016].
- [108] LKG- Ingenieurbüro für Bautechnik, Dipl. Ing. Wilfried Kunze M. Eng.
- [109] Barten, B.: Grundwissen Bau, Handwerk und Technik Verlag, Stuttgart, 2003, ISBN 3-582-03500-X, S.113.
- [110] <http://wikipedia.de>, „Weißzement“, [Zugegriffen: 28.03.2016].
- [111] <http://www.holcim.at>, [Zugegriffen: 28.03.2016].
- [112] <http://wikipedia.de>, „Spritzbeton“, [Zugegriffen: 28.03.2016].

- 
- [113] <http://www.Lafarge.at>, [Zugegriffen: 29.03.2016].
- [114] <http://www.sika.at>, [Zugegriffen: 29.03.2016].
- [115] <http://www.master-builders-solution.basf.de>, [Zugegriffen: 28.03.2016].
- [116] <http://www.basf-cc.at>, [Zugegriffen: 28.03.2016].
- [117] ÖNORM EN 14487-1: „Spritzbeton, Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Kornformität“.
- [118] <http://www.elkem.com>, [Zugegriffen: 29.03.2016].
- [119] <http://orientalcexim.com/Micro-White-Silica-fume.html>, [Zugegriffen: 29.03.2016].
- [120] Mailbaum, C.; Hottl, H. & R.: Verbesserung von Frisch- und Festbetoneigenschaften, „Neuer Zusatzstoff für Hochleistungsbeton“, Berlin.
- [121] <http://www.newchem.info>, [Zugegriffen: 29.03.2016].
- [122] Technische Merkblatt, Bagrat-KS 300.
- [123] <http://www.aerosil.com>, [Zugegriffen: 29.03.2016].
- [124] <http://de.wikipedia.org>, „Mischen“, [Zugegriffen: 12.12.2015].
- [125] <http://de.wikipedia.org>, „Heterogenität“, [Zugegriffen: 12.12.2015].
- [126] Schneider, U.; Horvath, J.: „Herstellung und Eigenschaften von Ultrahochfesten Beton“, Heft 8, S. 81, 2003.
- [127] ÖNORM B 3303: „Betonprüfung“, Abschnitt 4.3: „Dosieren und Mischen“.
- [128] Röhling, S.; Erfert, H.; Jablinski, M.: Betonbau, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013, ISBN 978-3-8167-8646-7.
- [129] [www.birkenmayer.co.za/pdf/EIRICH-RVIS-intensive-mixer.pdf](http://www.birkenmayer.co.za/pdf/EIRICH-RVIS-intensive-mixer.pdf).
- [130] Nold, P.: Warum Mischen nicht alle Beton – Mischer, gut “?”, bft international, Bd. 01, S.36-42, 2012.
- [131] BWI Beton Wert International: „Mischen von Beton–eine ständige Herausforderung“, Heft 3, 2004.
- [132] <http://www.wikipedia.org> „Vakuummischer“, [Zugegriffen: 15.12.2015].
- [133] Gottfried W. Ehrenstein; Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften, 2., völlig überarbeitete Auflage, Hanser München u.a. 2006, S.189.

- 
- [134] Mazanec, O.; Lowke, D.; Schiessl, P.: „Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time“ Materials and structure, vol. 43, Nr. 3, pp. 357-365, Apr 2010.
- [135] Grübl, P.; Wiegler, H.; Karl, S.: Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften.
- [136] Betonwerk+ Festigkeit –Technik: Symposium „Mischen- Steuern- Protokolieren“, Heft 5, 2005, S. 68-73.
- [137] Marchuk, V.: Dispergierbarkeit der Silicatstaub- Suspension im Zementleim und Mörtel in Beton, Heft 7, S.393-398, 2000.
- [138] Bonneau, O.; Lachemi, M.; Dallaire, E.; Dugat, J.; Aitcin, P.- C.: „Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes“. ACI Material Journal, S.286-290, July- August 1947.
- [139] ÖNORM EN 196-1: „Prüfverfahren für Zement – Bestimmung der Festigkeit“, 2005.
- [140] ÖNORM EN 196-9: „Prüfverfahren für Zement“, Teil 9 Hydratationswärme – Teiladiabatische Verfahren.
- [141] ÖNORM EN 12350: „Prüfung von Frischbeton“.
- [142] Taylor, H. F. W.: Cement chemistry, 2<sup>nd</sup> edition, Thomas Telford, London, 1997.
- [143] <http://www.wikipedia.de>, „Erstarren und Erhärten von Zement“, [Zugegriffen: 02.04.2016].
- [144] Stark, J.; Wicht, B.: Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff; Birkhäuser Verlag, Basel, 2000.
- [145] [www.beton.org](http://www.beton.org), [Zugegriffen: 12.12.2015].
- [146] ÖNORM B 3309: „Aufbereitete wirksame Zusatzstoff ffür die Betonherstellung“.
- [147] <http://www.Schretter-vills.ac.at>, „ Zemente für Betone mit geringer Wärmeentwicklung“, [Zugegriffen: 12.12.2015].
- [148] Bedeutung der Hydratationswärme ffür die Weiße Wanne, Zentrum Betontechnik, Mag. Dip.-Ing. Dr. Stefan KRISPEL.
- [149] Eigendarstellung von Mag. Dip.-Ing, Dr. Stefan KRISPEL nach Springenschmid / Nischer: Untersuchungen über die Ursachen von Querrissen in jungen Beton, Beton und Stahlbetonbau 9/1973.

- 
- [150] Grube, H.; Hintzen, W.: Prüfverfahren zur Voraussage der Temperaturerhöhung in Beton infolge Hydratationswärme des Zements, Düsseldorf.
- [151] DIN EN 60584-1: 2014-07: „Thermoelemente“ – Teil 1: Thermospannung und Grenzabweichungen.
- [152] Seebeck, T.J. 1825: „Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz“, Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, PP. 265-373.
- [153] Über die Biegezugfestigkeit des Betons von Justus Bonzel, Düsseldorf, Nach einem Vortrag auf der Zementtagung des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. vom 3. Bis 5. Oktober 1962 in Würzburg.
- [154] [www.Zwick.de](http://www.Zwick.de), [Zugegriffen: 12.12.2015].
- [155] ÖNORM EN 12390-5; 2002: „Prüfung von Festbeton- Teil5: Biegezugfestigkeit von Probekörper“.
- [156] Hummel, A.; Das Beton-ABC, 12. Aufl Verlag von Wilh, Erns & Sohn, Berlin 1959, S. 15, 9, 120 und 201.
- [157] ÖNORM EN 12390-3; 2002: „Prüfung von Festbeton- Teil3: Druckfestigkeit von Probekörper“.
- [158] Stastnik, S.; Vesely, S.; Zach, J.: „Regulation of generation hydration heat of Portland cement dependent on plasticizers, Special Concrete“, Sekurkon, Otrokovice 2002, Czech Republic, ISBN: 80-86604-04