



DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Herstellung von UHFB mit verschiedenen Zementsorten

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

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.i.R. Projektass. Baurat h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Elemer Bölskey
Betreuern

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Heinrich Bruckner

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

Institut für Hochbau und Technologie E206
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie
und Brandsicherheit

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Farbod Farhoodi Moghadam

Matrikelnummer 0929279

Wien, am 24.01.2018

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Frühjahr 2015 als Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Heinrich Bruckner für die Anregung zu dieser Arbeit, die wertvollen Ratschläge und die stetige Bereitschaft zur wissenschaftlichen Diskussion, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ebenso gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Dipl.-Ing. Johannes Kiernbauer für die wertvollen Hinweise und fachliche Betreuung, insbesondere bei den gemachten Berechnungen, und für die Durchführung der praktischen Versuche und den Erfahrungsaustausch beim Einsatz von ultrahochfestem Beton sowie die aktuellen Informationen zu dieser Richtlinie.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Ing. Mayerhofer für die Hilfe bei der Einarbeitung und Anwendung des Programms und meiner Laborpartnerin Mahtab Miremadi für ihre Hilfe und Unterstützung bei dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie und Freunden danken, ohne deren Unterstützung das Studium und diese Arbeit nicht möglich gewesen wären.

Kurzfassung

Ultrahochfester Beton (UHFB) ist eine Betonsorte, die sich durch eine sehr hohe Dichtigkeit und Festigkeit auszeichnet. Die wesentliche Unterscheidung zu Normalbetonen ist eine Druckfestigkeit von über 150 N/mm², sowie ein w/z-Wert < 0,25.

Der wichtigste Bestandteil von Beton ist die Zementsteinmatrix, welche im Wesentlichen aus dem Bindemittel Zement und Wasser hergestellt wird. Der Zementleim umhüllt die Zuschläge wie z.B. natürliche Gesteinskörnungen und verklebt diese miteinander. Die Kornzusammensetzung des Feinstkorns beeinflusst die Festigkeit der Zementsteinmatrix wesentlich. Es muss granulometrisch so zusammengesetzt sein, dass eine möglichst dichte Kornpackung entsteht.

Die hohe Festigkeit des UHFB wird in erster Linie dadurch erreicht, dass die Porosität des Zementsteins gesenkt und der Anteil an Feinstkorn im Zementstein erhöht werden. Das heisst, dass Je dichter und porenfreier die Zementsteinmatrix ist, desto dichter, fester und anschließend beständiger wird der Beton.

Weitere Maßnahme zur Optimierung der Eigenschaften von UHFB ist spezielle Wärmenachbehandlungen. Die Druckfestigkeit wärmebehandelter Proben aus sonst gleichem Beton ist generell deutlich höher als bei Normalluftlagerung.

Neben einer sorgfältigen Auswahl der Wärmenachbehandlungen und besonderes Zusammensetzung hat dabei auch der Zementsort einen großen Einfluss auf die Eigenschaften von UHFB. Über den Zement selbst, dessen Einfluss auf die Eigenschaften von UHFB im Zusammenwirken mit unterschiedlichen Wärmenachbehandlungsmethoden, sowie dem Einsatz von verschiedene Zementsorte liegen erst wenige Untersuchungen vor, woraus sich die Motivation für diese Arbeit ableiten lässt.

In umfangreichen Versuchsreihen wurden daher als wesentliche Parameter des Betons, sowie Art des Zementes variiert und die Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Die Einflüsse des Zementes auf die Eigenschaften von UHPC in Kombination mit unterschiedlichen Wärmenachbehandlungsmethoden konnten durch Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften des Betons charakterisiert werden. Dabei wurden neben der Biege- und Druckfestigkeit auch der Frischbeton Kenngrößen, sowie Rohdichte, Luftgehalt im Beton und Trichterauslaufzeit und Ausbreitmaßes des Betons untersucht.

Abstract

Ultra-high-performance concrete is a new type of concrete that is being developed by agencies concerned with infrastructure protection. UHPC is characterized by being cement composite material with compressive strengths in excess of 150 MPa, up to and possibly exceeding 250 MPa.

UHPC is also characterized by its constituent material make-up: typically fine-grained sand, silica fume, small steel fibers, and special blends of high-strength Portland cement. Note that there is no large aggregate. The current types in production (Ductal, Taktl, etc.) differ from normal concrete in compression by their strain hardening, followed by sudden brittle failure. Ongoing research into UHPC failure via tensile and shear failure is being conducted by multiple government agencies and universities around the world.

In addition to a careful selection of heat post-treatments and special composition, the cement site also has a major influence on the properties of UHFB. Only a few studies have been carried out on the cement itself, its influence on the properties of UHFB in combination with different heat aftertreatment methods, as well as the use of different cement types, from which the motivation for this work can be derived.

Extensive series of experiments have therefore varied the essential parameters of the concrete, as well as the type of cement, and examined the effects on the fresh and hardened concrete properties. The influence of the cement on the properties of UHPC in combination with different heat aftertreatment methods could be characterized by investigations of the mechanical properties of the concrete. In addition to the bending and compressive strength, the fresh concrete parameters, as well as the raw density, air content in the concrete and hopper discharge time and slump of the concrete were investigated.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Grundlagen | 3 |
| 2.1 | Hintergrund und Geschichte..... | 3 |
| 2.2 | UHFB – Hochleistungs- und Normalbeton: Unterscheidung nach der Druckfestigkeit | 4 |
| 2.3 | Betontechnologie | 4 |
| 2.3.1 | Gesteinskörnung..... | 5 |
| 2.3.1.1 | Kornrohichte | 5 |
| 2.3.1.2 | Optimierung der Packungsdichte-Kreisscheibenmodel | 6 |
| 2.3.1.3 | Einfluss der Korngröße auf die Höhe der Druckfestigkeit | 7 |
| 2.3.1.4 | Einfluss der Kornform auf die Frischbetonkonsistenz..... | 8 |
| 2.3.2 | Anmachwasser | 8 |
| 2.3.3 | Der Wasserzementwert W/Z..... | 9 |
| 2.3.4 | Zement | 9 |
| 2.3.4.1 | Hydratation und Festigkeitsentwicklung..... | 10 |
| | Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion | 10 |
| | Puzzolanische Reaktion | 11 |
| 2.3.4.2 | Zementleim..... | 11 |
| 2.3.4.3 | Reaktionszeiten von Zement | 13 |
| 2.3.4.4 | Zementsorten - Art und Festigkeit | 13 |
| 2.3.4.5 | Verwendete Zementtypen..... | 15 |
| 2.3.5 | Betonzusatzstoffe | 18 |
| 2.3.5.1 | Silikastaub | 19 |
| 2.3.5.2 | Quarzmehl | 23 |
| 2.3.6 | Betonzusatzmittel..... | 24 |
| 2.3.6.1 | Fließmittel..... | 24 |
| 2.3.6.2 | Zusammenhang zwischen der Frischbetonkonsistenz und dem LP-Gehalt | |

| | |
|---------|---|
| | 27 |
| 2.3.6.3 | Einflüsse auf die Konsistenz und Entlüftungsneigung des Frischbetons in Abhängigkeit mit FM Zugabezeitpunkt28 |
| 2.4 | Mechanische Betoneigenschaften29 |
| 2.4.1 | Druckfestigkeit29 |
| 2.4.1.1 | Versuchsbeschreibung – Druckfestigkeit30 |
| 2.4.1.2 | Verhalten von Normalbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung31 |
| 2.4.1.3 | Verhalten von Ultrahochfestem Beton unter Druckbeanspruchung33 |
| 2.4.1.4 | Querdehnzahl von UHFB und Normalbeton in Abhängigkeit des Belastungsniveaus34 |
| 2.4.1.5 | Technologische Maßnahmen für hohe Druckfestigkeiten36 |
| 2.4.2 | Einfluss der Matrixzusammensetzung auf die 28-Tage-Druckfestigkeit37 |
| 2.4.3 | Biegezugfestigkeit38 |
| 2.4.3.1 | Versuchsbeschreibung – Biegezugfestigkeit39 |
| 2.5 | Charakterisierung der Frischbetoneigenschaften39 |
| 2.5.1 | Rohdichte39 |
| 2.5.2 | Luftgehalt im Beton40 |
| 2.5.2.1 | Reduzierung des Gehaltes an Verarbeitungsporen40 |
| 2.5.2.2 | Entlüfter41 |
| 2.5.3 | Ausbereitmass41 |
| 3 | Versuchsplanung, Versuchsgrundlagen, Versuchseinrichtungen42 |
| 3.1 | Grundlage der Herstellung von UHFB42 |
| 3.2 | Zusammensetzung43 |
| 3.2.1 | Vorbereitung der Proben44 |
| 3.3 | Mischen45 |
| 3.4 | Frischbetonprüfungen48 |
| 3.5 | Prüfzeitpunkt51 |
| 3.6 | Festbetonprüfungen51 |
| 3.7 | Nachbehandlungsmethoden52 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4 | Versuchsdurchführung und Interpretation | 54 |
| 4.1 | Allgemein | 55 |
| 4.2 | Ergebnisse der Frischbetoneigenschaften | 56 |
| 4.2.1 | Bestimmung der Trichterauslaufzeit | 56 |
| 4.2.2 | Bestimmung des Ausbreitmaßes (f) | 57 |
| 4.2.3 | Bestimmung des Luftgehalts Ac mittels Druckausgleichverfahren | 58 |
| 4.2.4 | Bestimmung des Frischbetonrohichte | 59 |
| 4.2.5 | Schlussresultate aus den Untersuchungen zu den Frischbetoneigenschaften | 60 |
| 4.3 | Ergebnisse der Biegezugfestigkeit | 61 |
| 4.3.1 | Ergebnisse der 24 Stunden Biegezugfestigkeit L20 | 61 |
| 4.3.2 | Ergebnisse der 7 Tage - Biegezugfestigkeit | 62 |
| 4.3.2.1 | Ergebnisse der 7 Tagen Biegezugfestigkeit L20 | 63 |
| 4.3.2.2 | Ergebnisse der 7 Tage – Biegezugfestigkeit - HW90 | 64 |
| 4.3.2.3 | Ergebnisse der 7 Tagen Biegezugfestigkeit L250 | 65 |
| 4.3.2.4 | Maximale-und minimale 7 Tage-Biegezugfestigkeit als Überblicksdiagramm | 66 |
| 4.3.3 | Ergebnisse der 28 Tagen Biegezugfestigkeit | 66 |
| 4.3.3.1 | Bestimmung der 28 Tagen Biegezugfestigkeit L20 | 67 |
| 4.3.3.2 | Ergebnisse der 28 Tage - Biegezugfestigkeit HW90 | 68 |
| 4.3.3.3 | Ergebnisse der 28 Tage - Biegezugfestigkeit L250 | 69 |
| 4.3.4 | Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit | 70 |
| 4.3.4.1 | Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit L20 | 70 |
| 4.3.4.2 | Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit HW90 | 71 |
| 4.3.4.3 | Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit L250 | 72 |
| 4.3.5 | überblick über die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsuntersuchungen | 73 |
| 4.4 | Ergebnisse der Druckfestigkeits-Prüfungen | 74 |
| 4.4.1 | Ergebnisse der 24 Stunden - Druckfestigkeit | 74 |
| 4.4.2 | Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit | 75 |
| 4.4.2.1 | Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit L20 | 75 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.4.2.2 | Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit (HW90) | 76 |
| 4.4.2.3 | Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit L250 | 77 |
| 4.4.3 | Ergebnisse der 28 Tage - Druckfestigkeit..... | 78 |
| 4.4.3.1 | Ergebnisse der 28 Tage Druckfestigkeit L20 | 78 |
| 4.4.3.2 | Ergebnisse der 28 Tage - Druckfestigkeit HW90..... | 79 |
| 4.4.3.3 | Ergebnisse der 28 Tage - Druckfestigkeit L250 | 80 |
| 4.4.4 | Ergebnisse der 56- Tage Druckfestigkeit | 81 |
| 4.4.4.1 | Ergebnisse der 56 Tage - Druckfestigkeit L20..... | 81 |
| 4.4.4.2 | Ergebnisse der 56 Tage - Druckfestigkeit HW90..... | 82 |
| 4.4.4.3 | Ergebnisse der 56 Tage Druckfestigkeit L250 | 83 |
| 4.4.5 | überblick über die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen..... | 83 |
| 4.5 | Einflüsse der Nachbehandlungsmethoden auf die Festigkeitsentwicklung pro Serie | 85 |
| 4.5.1 | Serie M1 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250 | 85 |
| 4.5.2 | Serie M1 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 87 |
| 4.5.3 | Serie M2 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250 | 88 |
| 4.5.4 | Serie M2 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 89 |
| 4.5.5 | Serie M3 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250 | 91 |
| 4.5.6 | Serie M3 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 92 |
| 4.5.7 | Serie M4 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250 | 93 |
| 4.5.8 | Serie M4 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 94 |
| 4.5.9 | Serie M5 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 95 |
| 4.5.10 | Serie M5 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 96 |
| 4.5.11 | Serie M6 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 97 |
| 4.5.12 | Serie M6 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250..... | 98 |
| 4.6 | Überblick über die Einflüsse der Nachbehandlungen auf die Festigkeitsentwicklung..... | 99 |
| 4.6.1 | Vergleich der Biegezugfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L20 | 100 |
| 4.6.2 | Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L20 | 101 |
| 4.6.3 | Vergleich der Biegezugfestigkeitsentwicklung allen Serien bei HW90 | 102 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.6.4 | Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung allen Serien bei HW90 | 103 |
| 4.6.5 | Vergleich der Biegezugfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L250..... | 104 |
| 4.6.6 | Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L250 | 105 |
| 4.7 | Resümee – Ergebnisse..... | 109 |
| 5 | Zusammenfassung..... | 111 |
| 6 | Literatur | 114 |
| 7 | Internetressourcen: | 115 |
| 8 | Abbildungsverzeichnis | 125 |
| 9 | Tabellenverzeichnis..... | 129 |
| 10 | Formelverzeichnis | 131 |

1 Einleitung

Ultrahochfester Beton, gebräuchliche Abkürzung UHFB (in Österreich: UHPC für Ultra High Performance Concrete), ist eine in der Bupraxis bereits öfters verwendete Betonsorte, die sich immer noch in der Entwicklungsphase befindet. Als „ultrahochfest“ werden Betone bezeichnet, die Druckfestigkeiten oberhalb der in EN 206-1 definierten Festigkeitsklasse C 100/115, insbesondere über 150N/mm², erreichen.

Die Betonrezeptur kommt an ihre Einsatzgrenzen als Drei-Phasen-Werkstoff aus Zement, Wasser und Gesteinskörnungen, daher wurde schon früh versucht, durch Beimischen entsprechender Komponenten die Materialeigenschaften von Beton positiv zu beeinflussen. Erkenntnisse zum Einfluss des Wasser-Zement-Gehaltes auf die Druckfestigkeiten eines Betons und die Größe des Porenraums, welcher zu Störstellenbildung im Betongefüge führt, leiten die Entwicklung von hoch-und ultrahochfesten Betonen mit einem Wasser-Zement-Gehalt von etwa 0,25 ein.

Dieser niedrige Wert bedingte die Erweiterung der Mischung aus Zement, Zuschlag und Wasser zu einem Fünfkomponentenwerkstoff mit Zusatzstoffen und Zusatzmittel. UHPC wird üblicherweise als Feinkornbeton mit einem Größtkorn von 1 mm hergestellt. Es gibt aber auch Entwicklungen, bei denen das Größtkorn 6 oder 16mm beträgt. Diese grobkörnigen Mischungen werden in plastischer oder erdfeuchter Konsistenz verwendet. Zur Herstellung von UHPC werden üblicherweise alkaliarme oder -freie Portlandzemente CEM I der Festigkeitsklassen 42,5 R und 52,5 R nach EN 196 verwendet. Ihr Vorteil liegt in ihrem geringen Wasseranspruch. Zudem neigen sie zu einer geringeren Bildung von Ettringitkristallen mit der Folge eines stabileren Betongefüges. Für spezielle Bauteile aus UHPC, die keiner Wärmebehandlung unterzogen werden (Ortbetonfahrbahnen im Straßenverkehr) und die durch Temperatur- und Schwindrisse gefährdet sind, kommt Hochofenzement CEM III zum Einsatz.

Mit speziellen Wärme- Nachbehandlungsverfahren kann die Druckfestigkeit noch wesentlich gesteigert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Vergleich der Eigenschaften von UHPC durchgeführt. Die herzustellenden Probekörper besitzen eine gleichbleibende Mischrezeptur, die sich nur in ihrer Zementart unterscheidet.

Die Schwerpunkte dieser Arbeit sind die unterschiedlichen Festigkeitsentwicklungen während der verschiedenen Nachbehandlungsmethoden. Darüber hinaus wurden die Eigenschaften des

Frisch- und Festbetons gemessen und die Ergebnisse gegenüberstellt. Die verwendeten Zementsorten bei dieser Arbeit kann man in die folgenden 6 Prüfserien unterteilen:

- CEM I 52,5 N C3A-frei- (Portlandzement)
- CEM I 42,5 N C3A-frei
- CEM II B-S 32,5 R- (Portlandkompositzement)
- CEM II A-L 42,5 N
- Weißzement
- Zement für Spritzbeton

Die Mischungen werden mit den folgenden drei Methoden nachbehandelt:

- Normlagerung 20°C
- Heißwasserlagerung 90°C
- L250 Luftlagerung 250°C

Aufbau der Arbeit

Anfangs werden die Bestandteile des ultrahochfesten Betons wie Bindemittel, Zuschlag, Anmachwasser, Zusatzstoffe und Zusatzmittel im Kapitel Grundlagen behandelt. In diesem Abschnitt werden auch die Grundlagen der Zementsorten und ihre wesentlichen Merkmale thematisiert.

Der nächste Abschnitt in Kapitel 3 beinhaltet die Versuchsplanung und Versuchsgrundlagen, sowie die Herstellung sämtlicher Probenkörper und Laborversuche, die für die Mischungsberechnungen notwendig waren. Dabei wird in diesem Kapitel auch auf die Fest- und Frischbetonprüfungen eingegangen. Neben dem Misch- und Herstellungskonzept werden die Möglichkeiten zur Erfassung von Schädigungsprozessen unter statischer Belastung im Labor durchgeführt. Hier werden das prinzipielle Tragverhalten und die Festigkeit jeder Probe unter statischer Last aufgezeigt.

Kapitel 4 beinhaltet abschließend eine Gegenüberstellung der Ergebnisse und deren Interpretationen in Diagrammen.

2 Grundlagen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die notwendigen Grundlagen von UHFB und der verwendeten Zementsorten zur Durchführung der Versuchsarbeit beschrieben. Weiters sollen die Vorgehensweise, der Entwurf der Zusammensetzung sowie die Hauptbestandteile von Mischrezepturen und ihre Einflüsse auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfestem Beton erläutert werden.

2.1 Hintergrund und Geschichte

Die Materialeigenschaften von UHFB ermöglichen im Betonbau völlig neue Möglichkeiten, damit kann man schlanke und weit gespannte Tragwerke herstellen, bei denen der konstruktiven Gestaltung eine erhöhte Bedeutung zukommt. Tragstrukturen aus Normalbeton weisen im Vergleich mit UHFB um 30 bis 50% gesenkte Eigenlasten auf. Die hohe Festigkeit ermöglicht wesentlich leichtere, filigrane und dennoch hoch tragfähige und sehr dauerhafte Betonbauten, wie z. B. besonders weit gespannte Brücken, über 700 m hohe Hochhäuser oder hochbelastete Verbundstützen. Die Geschichte des hochfesten Betons begann 1912 in Österreich (Vorarlberg) mit der Herstellung des ersten Zementes mit hoher Anfangsfestigkeit. In den folgenden Jahren wurde immer weiter an der Betonrezeptur geforscht, und 1966 erreichte *Walz* [1.1]

Betonfestigkeiten von 140N/mm^2 mit einem Wasserzementwert von 0,32. In den USA wurde 1968 ein Patent für Schnellzement („Regulated Set Cement“) angemeldet [I.2]. 1970 folgte Japan mit dem „Jet Cement“. Ende der 80er Jahre begannen in Frankreich und Kanada umfangreiche Forschungsaktivitäten im Bereich der Hochleistungsbetone. Der neue Baustoff fand in die Praxis Einzug und 1988 wurde das „Two Union Square Building“ in Seattle, USA mit einem hochfesten Beton (130MPa) errichtet. Seit 1998 überspannt in Kanada die „Sherbrooke Footbridge“ aus ultrahochfestem Beton und einer 30 mm starken, gewellten Obergurtplatte eine Spannweite von 60 m bei einer Konstruktionshöhe von 3,0 m. Diese Konstruktion war weltweit die erste ihrer Art und zeigt in beeindruckender Weise die Leistungsfähigkeit moderner Hochleistungswerkstoffe. Ihr folgte 2002 die „Seonyu Footbridge“ in Südkorea mit einer stolzen Spannweite von 120m. In Deutschland wurde UHPC im Brückenbau vorgespannte Deckenplatte wohl erstmals im Jahre 2005 bei der Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel eingesetzt [I.4].

2.2 UHFB – Hochleistungs- und Normalbeton: Unterscheidung nach der Druckfestigkeit

Beton ist ein künstlich hergestellter Verbundwerkstoff. Den Hauptbestandteil bildet ein Gemisch aus Gesteinskörnungen unterschiedlicher Größe (z. B. Sand, Kies, Splitt), die mit einem erhärteten Bindemittel verkittet werden. Das 3-Stoffsystem hat sich standardmäßig zum 5-Stoffsystem entwickelt und weiter zu einem Hightech-Baustoff, dessen Herstellung teilweise großen Aufwand und Sorgfalt erfordert.

Abbildung 2-1 zeigt die Betondruckfestigkeiten von Normalbeton im Vergleich mit UHPC dargestellt.

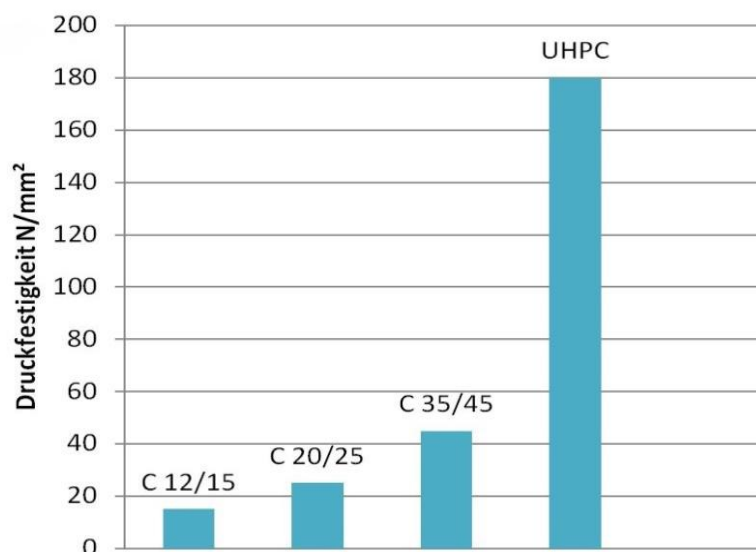


Abbildung 2-1: Betondruckfestigkeiten von Normalbeton im Vergleich mit mit UHFB [I.5]

2.3 Betontechnologie

In diesem Abschnitt werden die Hauptbestandteile von UHPC und die Charakterisierung der Ausgangsstoffe beschrieben.

Die Hauptbestandteile des Betons sind:

- Gesteinskörnung
- Wasser
- Zement
- Zusatzstoffe
- Zusatzmittel.

2.3.1 Gesteinskörnung

Um einen Beton mit möglichst geringem Wasserzementwert herstellen zu können, müssen Gesteinskörnungen mit wenig Wasseranspruch eingesetzt werden. Dies sind überwiegend ungebrochene Sande die durch ihre gedrungene Kornform eine geringere Oberfläche als gebrochenes Material besitzen.

Für die Herstellung von ultrahochfestem Beton wurden in letzter Zeit auch gebrochene Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn bis 16 mm verwendet. Durch die begrenzte Korngröße wird bei UHFB allerdings nur lokal das Schwinden der Zementmatrix durch die kleinen Zuschlagskörner behindert.

Für Beton mit gut korngestuftem Zuschlag und mit größerem Größtkorn wird zur Erzielung vergleichbarer Verarbeitungs- und Festbetoneigenschaften, aufgrund des geringen Hohlraumgehalts des Zuschlags, weniger Bindemittelleim benötigt. Für die Herstellung von Beton werden Gesteinskörnungen verwendet, die entweder durch Aufbereitung natürlicher, industriell hergestellter oder recycelter Materialien entstanden sind. Üblicherweise wird als Gesteinskörnung für ultrahochfesten Beton Quarzsand verwendet. Die Vorteile von Quarzsand sind

- eine leichte Verfügbarkeit bei gleichzeitig günstigem Preis,
- die hohe Gesteinsfestigkeit
- die Ausbildung einer festen und dichten Übergangszone zwischen Bindemittelmatrix und Zuschlag

2.3.1.1 Kornrohichte

Im Hinblick auf die Verwendung in Beton werden Gesteinskörnungen nach ihrer Rohdichte wie folgt unterteilt:

- Gesteinskörnungen für Schwerbeton (Rohdichte $>3000\text{kg/m}^3$)
- Gesteinskörnungen für Normalbeton (Rohdichte zwischen 2000 und 3000kg/m^3)
- Zuschlag für Leichtbeton (Rohdichte $< 2000\text{kg/m}^3$)
- Gesteinskörnungen für Mörtel und Gesteinskörnungen für nicht konstruktive Betone.

Die Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen beträgt je nach Gesteinsart 80 bis 400N/mm^2 , für Zementstein je nach Zementgüte und Wasserzementwert 25 bis 60N/mm^2 .

2.3.1.2 Optimierung der Packungsdichte-Kreisscheibenmodell

Bedingt durch die Zusammensetzung und Herstellungsweise von UHFB werden bei einer Lagerung von 28 Tagen unter Normalbedingungen (20°C) Druckfestigkeiten bis 230N/mm² erreicht. Durch die optimierte Kombination von inerten und reaktiven Feststoffen, bei gleichzeitig kleinem Wasser-Bindemittelwert, ist die erhärtete Matrix besonders feststoffreich. Zusätzlich maßgebliche Faktoren der Herstellung von UHFB sind der Einsatz von Fließmitteln und die Optimierung der Packungsdichte. Die letzten zwei Faktoren ermöglichen es, eine selbstverrichtende und fließfähige Konsistenz des Frischbetons herzustellen und das obwohl der Wassergehalt bezüglich der großen Feststoffoberfläche gering ist [I.1]. In Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3 ist das Prinzip der Kornverteilung in Korngefügemodellen dargestellt. In Abbildung 2-2 (links) behindern die Kreise (2D-Gefügemodellierung mit idealisierten Kreisen), den Teilchentransport zu den Zwischenräumen. Die kleineren Kreise, die nicht in die Zwischenbereiche gelangen können, bilden Hohlräume, die eine höhere Porosität bewirken[D.3].

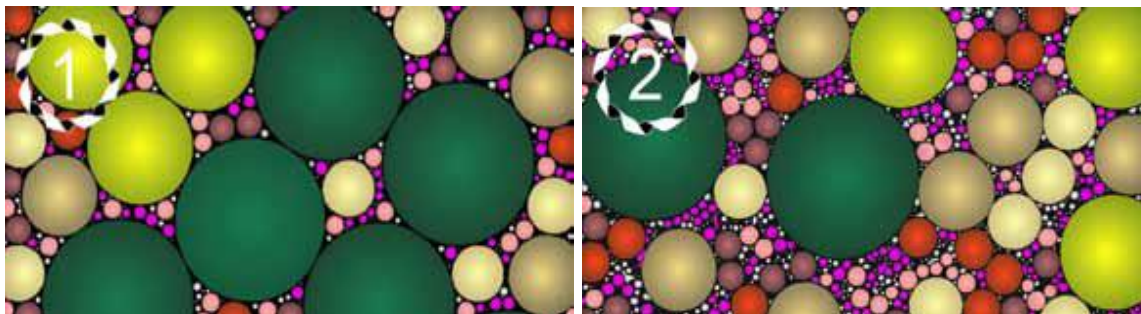


Abbildung 2-2: Korngefügemodelle nach J.E. FUNK et al [2.16]

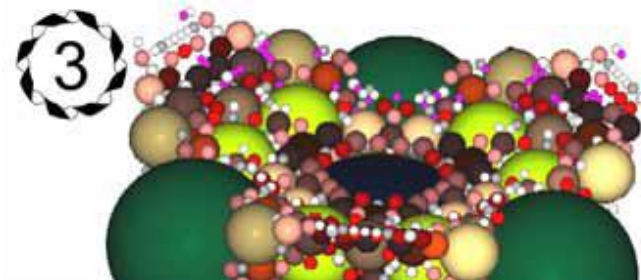


Abbildung 2-3: Korngefügemodell nach C. GEISENHANSLÜCKE [2.17]

Für die Packungsoptimierung eines ultrahochfesten Betons müssen die zur Verfügung stehenden Ausgangsmaterialien, sowie deren Partikelgrößen exakt und eindeutig sein. Nur so kann ein ausgewogener Feinleimgehalt wirtschaftlich hergestellt werden.

Neben diesen zwei oben dargestellten 2D-Modellen wurde eine rechnergestützte 3D-Simulation, die auf den gleichen Grundgleichungen beruht (Abbildung 2-3), dargestellt. Doch auch mit ihrer Hilfe kann nur eine Optimierung der idealisierten Kugelpackungen durchgeführt werden.

Die Kornabstufung wurde so gewählt, dass keine Teilchenbehinderung stattfindet. Auch die kleineren Kornteilchen können ohne Probleme in alle Zwischenräume gelangen, ebenso ist ein wesentlich dichteres Gefüge möglich.

Solche Optimierungen, bei denen das Größtkorn durch mehrere kleinere Gesteinsfraktionen ersetzt wird, bezeichnet man auch als Homogenisierung.

2.3.1.3 Einfluss der Korngröße auf die Höhe der Druckfestigkeit

Die 7-Tage-Druckfestigkeit der nach einem Tag entschalteten und dann nach 2 Tagen bei 90°C warmbehandelten Betone lag weitgehend, unabhängig vom Größtkorn oder der Kornzusammensetzung des Grobkorns, über 2 mm i. M. zwischen 186 und 197N/mm². Laut *Richard* und *Cheyrezy* [2.3] wurde für eine hohe Packungsdichte bei aufeinander folgenden Kornklassen ein mindestens 13-facher Größenunterschied der mittleren Korndurchmesser (d_{50}) empfohlen. In der Regel ist im Falle des Sandes der Zement mit einem mittleren Durchmesser von rund 11-15µm die nächst kleinere Kornklasse. Daraus ergibt sich ein optimaler, mittlerer Korndurchmesser des Sandes von 250µm.

Damit kugelförmige Partikel in die Zwickel größerer Partikel passen, müssen diese laut *Kessler* [2.11] rd. 3,2-mal kleiner sein. Bei der Berücksichtigung des größten Korndurchmessers des Zementes von ca. 50µm wird bei einem Kleinstkorn des Sandes von 150µm diese Forderung ebenfalls erfüllt.

Doch nicht nur die Größe der Gesteinskörnung ist entscheidend, auch das Kristallwachstumspotential des Zementes und der hydraulischen/puzzolanischen Zusatzstoffe beeinflusst die spätere Festigkeit.

2.3.1.4 Einfluss der Kornform auf die Frischbetonkonsistenz

Hinsichtlich der Gewährleistung einer fließfähigen Frischbetonkonsistenz sind Sande mit rundförmigem Korn gegenüber denjenigen mit gebrochener kantiger Kornform vorteilhafter. Nach *Richard* und *Cheyrezy* [2.3] muss zur Erreichung einer fließfähigen Konsistenz das Bindemittelleinvolumen mindestens 1,2fach größer als das Hohlraumvolumen des unverrichteten Sandes sein.

Für die Herstellung von UHFB wird von den oben genannten Autoren der gröbere Sand mit einem Größtkorn von 0,4mm empfohlen, da dieser zu einer besseren Verarbeitbarkeit und einem geringeren LP Gehalt des Frischbetons führt.

Nach Erkenntnissen von *de Larrard* und *Sedran* [2.4] wirkt sich der Einfluss der Zementleimschichtdicke im Bereich 0,046 bis 0,088mm nur geringfügig auf die Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton auswirken. Die Kenntnis der optimalen Zementleimschichtdicken würde eine weitere wirtschaftliche Optimierung der Mischungszusammensetzung ermöglichen.

2.3.2 Anmachwasser

Als Zugabewasser für Beton eignen sich fast alle in der Natur vorkommenden Wässer, solange sie nicht durch z.B. Öl, Fett, Zucker, Ton oder andere huminöse Stoffe verunreinigt sind. Für die Mischungsberechnungen werden folgende Wässer bzw. Flüssigkeiten berücksichtigt:

- Zugabewasser
- Oberflächenwasser der Gesteinskörnungen
- Wasser aus Zusatzmitteln und Zusatzstoffen.

Das Anmachwasser setzt sich aus der Feuchte des Zuschlags sowie der zugegebenen Wassermenge zusammen. Bei Zusatzmittel, die mit Wasser zu einer Dispersion gemischt sind, - dies ist oft bei Mikrosilica der Fall - muss der Wasseranteil bei der Betonrezeptur berücksichtigt werden. Für die Beurteilung und Prüfung von unbekanntem Wässern verweist der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) auf das vom Deutschen Betonverein e.V. (DBV) herausgegebene Merkblatt „Zugabewasser für Beton“ [2.12]. Die dargestellte Bandbreite zum Wassergehalt von UHFB erstreckt sich von 140 bis 220l/m³. In den meisten Fällen liegt der Gesamtwassergehalt jedoch in einem engen Bereich von 180 bis 200 l/m³.

Der für eine gute Verarbeitbarkeit und Entlüftung des Frischbetons erforderliche Wassergehalt hängt im Wesentlichen von der Wirksamkeit des Fließmittels und der Packungsdichte des

Korngemisches ab. Dieser Wassergehalt ist nach *Kordts* und *Grube* [2.13] durch die Frischbetoneigenschaften durch Wasser- und Fließmittelgehalt steuerbar [2.14].

Zugabewasser wird nur in der Menge zugegeben, dass die zur Verarbeitung erforderliche Konsistenz erreicht und die Festigkeit des abgebundenen Materials nicht zu stark beeinträchtigt wird. Zu viel Zugabewasser kann zum „Ausbluten“ und/oder Entmischen führen.

2.3.3 Der Wasserzementwert W/Z

Das Massenverhältnis des wirksamen Wassergehalts zum Zementgehalt, bezogen auf 1 m³ verdichteten Frischbeton, wird als Wasserzementwert definiert.

Wasserzementwert $w/z = \text{Masse des Wassers} / \text{Masse des Zements}$ z

Gesteinskörnungen mit porigem Gefüge saugen zusätzlich Wasser auf, die Kernfeuchte. Diese wirkt sich nicht auf die Konsistenz und den Wasserzementwert aus, kann jedoch eine vorteilhafte, innere Nachbehandlung bewirken, wenn die Kernfeuchte dem noch nicht hydratisierten Zement zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur Verfügung gestellt wird. Wird die Gesteinsfeuchte poriger, mit Wasser nicht gesättigter Gesteinskörnungen beim Gesamtwassergehalt dagegen nicht berücksichtigt, ist mit einer steiferen Konsistenz des Frischbetons und mit Verbundstörungen beim Festbeton zu rechnen [D.2].

Besonders bei warmen Temperaturen oder auch Zugluft müssen die Bauteile gegen zu schnelles Entweichen von Wasser geschützt werden, da ansonsten der Abbindeprozess zum Erliegen kommen kann. Eine Nachträgliche Befeuchtung dieser ausgetrockneten Bauteile kann diesen Abbindeprozess nicht wieder in Gang setzen.

Bei kalten Temperaturen im Winter besteht zudem bei Frost die Gefahr, dass es durch das noch nicht gebundenen Wasser durch Eisdruck zu Schäden kommt. Lediglich flüssiges Wasser ermöglicht den Abbindeprozess weshalb dieser bei Frost unterbrochen wird, wobei sich der Prozess jedoch fortsetzt nachdem das Wasser wieder flüssig wird [I.6].

2.3.4 Zement

Zement (nach ÖNORM EN 197-1) ist ein hydraulisches Bindemittel. Es erhärtet nach dem Anmachen mit Wasser an der Luft und unter Wasser. Zement wird aus Kalkstein, Kalkmergel, Sand und Ton hergestellt. Diese Ausgangsstoffe werden gemischt und zu Rohmehl verarbeitet, das dann bis zur Sinterung bei ca. 1450°C gebrannt wird. Der dadurch entstandene Zementklinker wird gemahlen und mit Zuschlagstoffen vermengt.

Als Endprodukt erhält man Zement, vermischt mit Wasser ergibt es den Zementleim. Dieser kann Zuschlagstoffe verkitten wodurch der Kunststein Beton entsteht.

Beim Aushärten mit Wasser (Hydratation) wachsen Calciumsilicathydrat-Fasern, kurz CSH bzw. $C_3S_2H_3$ ($3 CaO + 2 SiO_2 + 3 H_2O$) und es bildet sich Portlandit, kurz CH ($Ca(OH)_2$).

Außer der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung ist auch die Feinheit eines Zements ausschlaggebend für seine Eigenschaften. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass ein Zement, der feiner ist, auch eine höhere Festigkeit entwickelt.

Die spezifische Oberfläche dient als Maß für die Feinheit und liegt normalerweise zwischen 2.500 und 5.000 cm^2/g [I.6].

2.3.4.1 Hydratation und Festigkeitsentwicklung

Hydraulisch werden Stoffe genannt, die sowohl unter Wasser als auch an der Luft erhärten und beständig sind, wobei dies für Zement der Fall ist. Zement reagiert im Gegensatz zu Luftkalk, der unter Aufnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Luft erhärtet, mit Wasser unter der Bildung von unlöslichen und stabilen Verbindungen. Diese sogenannten Calciumsilikathydrate haben die Eigenschaft feine, nadelförmige Kristalle auszubilden, die sich untereinander verzahnen und somit zu hohen Festigkeiten des Zementmörtels oder Betons führen. Zement wird aus diesem Grund zu einem Bindemittel, das den hohen Anforderungen im Bauwesen gerecht wird. Nebenreaktionen, die bei der Hydratation auftreten können, sind beispielsweise:

- Alkali-Kieselsäure Reaktion, wobei es durch die Volumenzunahme zum Aufbrechen des Betons kommen kann.
- Puzzolanische Reaktion, die ein Ansteigen der Festigkeit innerhalb mehrerer Monate bewirkt

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Als Alkali-reaktion oder auch -treiben, umgangssprachlich auch Betonkrebs bezeichnet, versteht man die chemische Reaktion zwischen Alkalien des Zementsteins im Beton und der Gesteinskörnung mit alkalilöslicher Kieselsäure. Der diesbezügliche Überbegriff Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) fasst mehrere ähnliche Prozesse zusammen, derer die AKR die Wichtigste ist. Durch die Reaktion entstehen aus Löschkalk $Ca(OH)_2$ und Quarz SiO_2 durch die Kristallbildung beispielsweise Wollastonit und auch andere Calciumsilikate wie z.B. $Ca(OH)_2 \cdot SiO_2$ [I.6].

Puzzolanische Reaktion

Unter puzzolanischer Reaktion versteht man die chemische Reaktion der Edukte Calciumhydroxid und Siliziumdioxid zu Produkten wie Calciumsilikathydrat. Bedeutend ist sie vor allem für das Nachhärten von Beton, wobei von einem Zeitraum in Jahren gesprochen werden muss. Es bedarf somit mehrerer Jahrzehnte bis Beton seine größte Festigkeit erreicht [I.6].

2.3.4.2 Zementleim

Die Grundlage von Beton ist eine zähflüssige Mischung aus Wasser sowie Zement. Aus dem genauen Mischungsverhältnis dieser Stoffe wird der sogenannte Wasserzementwert abgeleitet, der wiederum entscheidend für die spätere Güte von Beton und Mörtel ist. Ist der Zementleim ausgehärtet, wird er auch als Zementstein bezeichnet.

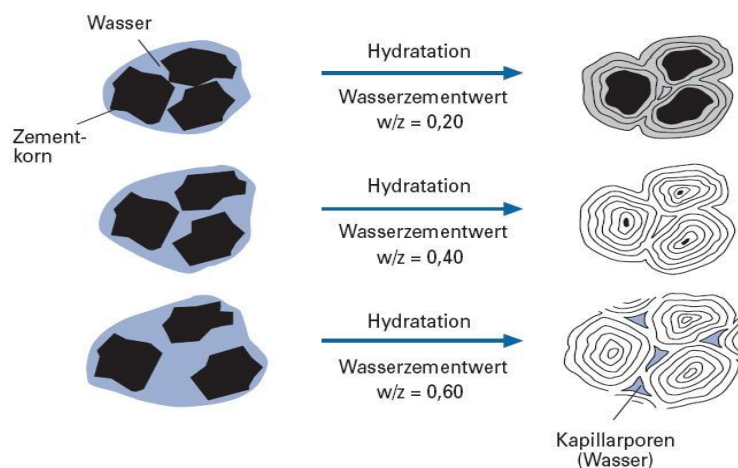


Abbildung 2-4: Reaktion von UHPC-Bestandteile bei der Hydratationsentwicklung [I.6]

Zement erstarrt und erhärtet aufgrund der Bildung wasserhaltiger Verbindungen, die bei der Reaktion der Zementbestandteile mit dem Anmachwasser entstehen. Allgemein reagiert Zement in verhältnismäßig wasserarmen, plastischen Gemischen, die Wasserzementwerte im Bereich von ca. 0,3 bis 0,6 aufweisen. Diese Reaktion wird als die sogenannte Hydratation, die Reaktionsprodukte als Hydrate oder Hydratphasen, bezeichnet.

Einhergehend mit den einsetzenden Reaktionen ist ein Ansteifen des Zementleims zu bemerken, das zu Beginn noch eher gering ist, aber mit Fortschreiten der Zeit verstärkt zum Vorschein kommt. Sobald dieser Ansteifvorgang des Zementleims ein bestimmtes Maß übersteigt, spricht man vom Beginn des Erstarrens. Anschließend wird der weitere Vorgang der Verfestigung des Zementleims als Erstarren bezeichnet, die Zunahme der Verfestigung wird Erhärten genannt.

Begründet wird das Ansteifen, Erstarren und Erhärten durch die Bildung eines mehr oder minder

starrten Gefüges aus Hydratationsprodukten, das zum Ausfüllen des wassergefüllten Zwischenraums der Feststoffpartikeln und des Zementleims, Mörtels oder auch Betons führt.

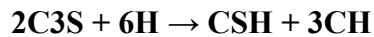
Der zeitliche Verlauf, jedoch nicht die Art der Hydratationsprodukte, hängt in großem Maße vom Wasserzementwert ab. Die festigkeitsbildenden Hydratationsprodukte sind bei den silicatischen Zementen in erster Linie Calciumsilicathydrate und beim Tonerdezement Calciumaluminathydrate. Dazu kommen noch weitere Hydratationsprodukte wie Calciumhydroxid, Calciumferrithydrate, sulfathaltige Hydrate als auch verwandte Verbindungen, Hydrogranat und Gehlenithydrat. Silicatische Zemente bestehen zu über 70 M.-% aus Calciumsilicaten oder silicatischen Bestandteilen weshalb der Hydratation dieser Verbindungen und den Eigenschaften der dabei entstehenden Calciumsilicathydrate besondere Bedeutung geschenkt werden muss. Da die Calciumsilicathydrate CaO-ärmer als die Calciumsilicate des Zementklinkers sind, bildet sich bei der Hydratation des Portlandzementes außerdem Calciumhydroxid [I.6].

Von besonderer Bedeutung ist bei den Hydratationsreaktionen der pH-Wert der Porenlösung, der vergleichsweise hohe Werte annimmt.

Gleich nach dem Kontakt mit Wasser setzt eine intensive Hydratation ein (Prä-Induktionsperiode), wobei Calciumsulfate teilweise und Alkalisulfate nahezu vollständig in der Lösung aufgehen. Aus der Reaktion von Calcium- und Sulfat-Ionen mit Tricalciumaluminat bilden sich auf den Klinkerpartikeloberflächen kurze, hexagonal säulenförmige Ettringitkristalle. Darüber hinaus kommt es, beginnend bei Tricalciumsilicat, zur Bildung von ersten Calciumsilicathydraten (CSH) in kolloidaler Form. Durch die Bildung einer dünnen Lage von Hydratationsprodukten auf eben diesen Klinkerpartikeln nimmt die erste Hydratationsperiode langsam ab und die Ruheperiode oder Induktionsperiode startet, wobei erwähnenswert ist, dass hierbei praktisch keine weitere Hydratation stattfindet. Da die ersten Hydratationsprodukte noch zu klein sind, um den Zwischenraum zwischen den Zementpartikeln zu füllen und ein festes Gefüge aufzubauen, bleiben die Zementpartikel noch beweglich, was bedeutet, dass die Konsistenz des Zementleims nur geringfügig steifer geworden ist.

Die Erstarrung von Zementleim setzt ungefähr nach ein bis drei Stunden ein, sobald sich erste, sehr feine Calciumsilicathydratkristalle auf den Klinkerpartikeln ausbilden. Nach Beendigung der anschließenden Ruheperiode ist wiederum eine intensive Hydratation der Klinkerphasen zu beobachten. Diese dritte Periode, auch Beschleunigungsperiode genannt, setzt nach etwa vier

Stunden ein und endet etwa nach 12 Stunden bis einem Tag. Das dabei entstehende Grundgefüge besteht aus CSH-Faserbüscheln bzw. CSH-Blattstrukturen, plattigem Calciumhydroxid und in längsrichtung wachsenden Ettringitkristallen. Die vorkommenden chemischen Reaktionen der Klinkerphasen mit dem Anmachwasser lassen sich wie nachfolgend darstellen:



Die Hydratationsprodukte bilden sich nicht gleichzeitig, sondern, bedingt durch die Reaktionsfähigkeit, mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Zeitspannen. Der Übergang vom Erstarren zum Erhärten kann als fließend bezeichnet werden.

2.3.4.3 Reaktionszeiten von Zement

Beton durchläuft nach dem Anmachen die untenstehenden 3 Phasen:

- Erstarrungsphase:

Sie sollte bedingt durch die Festigkeitsklasse frühestens 75min (CEM I/II 32,5R) - 60min (CEM I/II 42,5R) nach dem Anmachen beginnen und führt erstmals zur Entwicklung von Hydratationswärme.

- Ruhephase:

Abkühlung des Betons bedingt durch die Umgebungstemperatur

- Erhärtungsphase:

in dieser wichtigen Phase entwickelt der Beton zusätzlich Hydratationswärme und wird schnittfest. Die Dauer dieser Phasen wird im Wesentlichen durch die Einbautemperatur, die Umgebungstemperatur und die Witterung (Regen, Wind), sowie die Zementart und -menge (normal ca. 360kg/m³) beeinflusst.

2.3.4.4 Zementsorten - Art und Festigkeit

Die Festigkeit von Zementen wird in Europa durch die Europäische Norm EN 197 geregelt. Es wird zwischen drei verschiedenen Festigkeitsklassen unterschieden, mit Normfestigkeiten von 32,5, 42,5 und 52,5N/mm² nach 28 Tagen Erhärtung. In Abhängigkeit von der Anfangsfestigkeit eines Zements wird dieser zudem innerhalb einer Festigkeitsklasse als langsam- (L), normal- (N) oder schnellerhärtend (R, von engl. rapid) bezeichnet. Die EN 197 klassifiziert neben der

Festigkeit Zemente auch nach ihrer Zusammensetzung. ÖNORM EN 197-1 unterscheidet nachstehende Zementtypen:

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

Die Zementtypen CEM IV und CEM V sind gemäß Tabelle NAD 10 der ÖNORM B 4710-1 für die Betonherstellung nach dieser Norm nicht zulässig.

Die Kurzbezeichnung der Zementarten wurde nach folgender Festlegung gewählt:

- **K** für Portlandzementklinker
- **S** für Hüttensand (granulated blast furnace slag)
- **P** für natürliches Puzzolan (z. B. Trass)
- **Q** für natürliches getempertes Puzzolan
- **T** für gebrannten (Öl)-Schiefer (burnt shale)
- **V** für kieselsäurereiche Flugasche (cendre volante)
- **W** für kalkreiche Flugasche
- **L** für Kalkstein (Limestone)
- **D** für Silicatstaub
- **M** für Portlandkompositzemente mit mehr als zwei Hauptbestandteilen.
- **F** Portlandzement CEM I, der außer Portlandzementklinker keine weiteren Hauptbestandteile enthält

Ein üblicher Zement nach ÖNORM EN 197-1 z. B. CEM II/A-S 32,5 R



Abbildung 2-5: Bezeichnung der Zemente nach ÖNORM EN 197-1

2.3.4.5 Verwendete Zementtypen

Portlandzement

Portlandzement, hergestellt durch die Vermahlung von Klinker und Gips bzw. Anhydrit, besteht chemisch gesehen aus ca. 58 bis 66 % Calciumoxid (CaO), 18 bis 26 % Siliciumdioxid (SiO₂), 4 bis 10% Aluminiumoxid(Al₂O₃) und 2 bis 5% Eisenoxid (Fe₂O₃). Nach dem Calcinieren des Kalks (CaCO₃) zu Calciumoxid, bei dem CO₂ freigesetzt wird, bilden sich beim Brennprozess im Drehrohrofen aus diesen Hauptbestandteilen Mineralien, die für die besonderen Eigenschaften von Zement von entscheidender Bedeutung sind.

Die wichtigsten dieser Verbindungen sind (Tabelle 2-1):

- Tricalciumsilikat (Alit), bauchemisch kurz C₃S (3 CaO·SiO₂)
- Dicalciumsilikat (Belit), kurz C₂S (2 CaO·SiO₂)
- Tricalciumaluminat, kurz C₃A (3 CaO·Al₂O₃)
- Tetracalciumaluminatferrit, kurz C₄(A,F) (4 CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) und C₂(A,F)

Dieser Zement darf, wie auch die anderen Normzemente, maximal 5 M.-% Nebenbestandteile enthalten. Diese sind besonders ausgewählte anorganische, mineralische Stoffe, die bei der Klinkerherstellung entstehen oder hierfür als Ausgangsstoff eingesetzt werden. Stoffe, die schon als Hauptbestandteil verwendet werden, dürfen nicht zusätzlich als Nebenbestandteil eingesetzt werden. Die Auswahl ist auch auf Stoffe natürlichen Ursprungs beschränkt. Nebenbestandteile dienen beispielsweise der Verbesserung der Kornverteilung, insbesondere von konventionell gemahlten Zementen geringerer Mahlfineinheit, und damit auch der Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften und des Wasserrückhaltevermögens, was von besonderer Bedeutung ist.

Tabelle 2-1: Zusammenhang von Zement -,Formel, Kurzzeichen und Ihre Anteile im Klinker in % [I.6]

| Klinkermaterial | Formel | Kurzzeichen | Anteil im Klinker in M-% (imMittel) | Anteil im Klinker in M% (extremwerte) |
|-----------------------|------------------|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Tricalciumsilicat | 3 Cao,Sio2 | C3S | 63 | 45-80 |
| Dicalciumsilicat | 2CaO,SiO2 | C2S | 16 | 0-32 |
| Tricalciumaluminat | 3CaO,Al2O3 | C3A | 11 | 7-15 |
| Calciumaluminatferrit | 4CaO,Al2O3,Fe2O3 | C4AF | 8 | 4-14 |

CEM I 42,5 R - SR 0 WT 33 C₃A-frei (Portlandzement)

ist ein hydraulisch erhärtendes Bindemittel und bleibt somit nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und beständig. Der wichtigste Bestandteil dieses Zements ist Portlandzementklinker. Dieser besteht überwiegend aus Kalziumsilikaten (aus Kalkstein und Mergel hergestellt) und enthält außerdem Aluminium- und Eisenverbindungen. Der Zement ist gemäß ÖNORM EN 197-1 frei von Zumahlstoffen, und C₃A-frei gem. Ö-Norm B 3327 bzw. EN 197-1 und weist daher einen hohen Sulfatwiderstand auf. Dieser Zement wird von der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) fremdüberwacht und ist als Normzement gemäß ÖNORM EN 197-1 freigegeben. Der Zement ist CE-zertifiziert, CE Kennzahl 2523-CPR-0073. Er ist chromatarm gemäß EU-Richtlinie 2003/53/EG und eignet sich speziell zur Herstellung von Transportbeton, für unbewehrten Beton, Stahlbeton, Sicht- und Pumpbeton und wird vor allem dort eingesetzt, wo mit Sulfatangriffen gerechnet werden muss [I.9].

CEM I 42,5 N DER CONTRAGRESS

Diese Zementsorte eignet sich in Folge ihrer Zusammensetzung besonders für Bauwerke und Betonteile gem. österreichischer Betonnorm ON B 4710-1 bzw. ÖBV Richtlinien, welche mit Wässern, Böden und Gesteinen in Berührung kommen, die Gips und/oder andere Sulfate enthalten. Diese Zementart zeichnet sich zudem durch geringe Wärmeentwicklung, gute Verarbeitbarkeit, geringen Wasserbedarf und hervorragende Nacherhärtung aus. Die Anwendung reicht daher vom Spezialtiefbaubeton, Kläranlagenbau, Weißen Wannan, Tunnel-Innenschalen bis zum Hochleistungsbeton (Betondruckfestigkeitsklasse über C 50/60) [I.9].

CEM I 52,5 N C3A-frei

Diese Zementart verbindet die ausgezeichnete chemische Widerstandsfähigkeit von C3A-freien Zementen, insbesondere gegen Sulfatangriff, mit dem Erhärtungsverhalten eines frühhochfesten Portlandzementes. Trotz des raschen Erhärtungsverlaufes zeichnet sich der CEM I 52,5 N - SR 0 WT 38 C3A-frei durch geringe Wärmeentwicklung, gute Verarbeitbarkeit, geringen Wasserbedarf und hervorragende Nacherhärtung aus. Seine Anwendung geht von Fertigteil- bzw. Rohrherstellung zu Tunnel-Innenschalen WDI und Hochleistungsbeton [I.9].

CEM II (Portlandkompositzement)

bestehen aus mehreren Hauptbestandteilen. Der Anteil der Bestandteile außer Klinker darf generell 6 bis 35 M.-% betragen – beim Portlandsilicastaubzement ist der Anteil des Silicastaubs jedoch auf max. 10 M.-% begrenzt. Es gibt neben Portlandzementklinker 7 weitere Hauptbestandteile mit unterschiedlichen Eigenschaften [I.9].

CEM II/A-LL42,5 N

Ist ein universell einsetzbares Bindemittel zur Herstellung von Beton und Mörtel mit einem Anteil von rund 17% an hochwertigem Kalkstein, der gemeinsam mit dem Portlandklinker vermahlen wird. Bei der Verwendung von CEM II/A-LL 42,5 N wird der Frischbeton geschmeidiger und kann leichter gepumpt und verarbeitet werden. Auch für die Herstellung von selbstverdichtendem Beton (SVB) ist dieser Zement dank seines Anteils an Kalksteinmehl sehr gut geeignet. Aufgrund der, im Vergleich zu einem reinen Portlandzement, geringeren

Wärmeentwicklung ist dieser Zement zudem für die Erstellung von massigen Bauteilen geeignet. Mit seinem guten Wasserrückhaltevermögen wird auch die Gefahr einer Entmischung des Betons reduziert. All diese Eigenschaften wirken sich auch positiv auf Betonrezepte mit gebrochenen Zuschlagsmaterialien aus. Im Vergleich zu reinem Portlandzement erhält man mit dem CEM II/A-LL 42,5 N, dank dem zugemahlten Anteil an Kalkstein, eine hellere Betonfarbe und ist damit sehr gut für Sichtbeton geeignet. Der Einsatz von Betonzusatzstoffen und Betonzusatzmitteln ist zulässig, wenn diese den Normanforderungen der EN 206-1 entsprechen und geprüft sind [I.9].

Weißzement

Weißzemente werden aus sehr eisenarmen Rohstoffen hergestellt und hauptsächlich für Terrazzo, Sichtbeton und Putz eingesetzt. Weißzement gehört zur Gruppe der Portlandzemente und zeichnet sich durch seinen geringen Eisenoxidgehalt aus. Weißzement wurde von *Walter Dyckerhoff* erfunden und 1931 erstmals unter dem Markennamen „*Dyckerhoff Weiß*“ vertrieben. Die Herstellung von Weißzement ist aufwendiger als diejenige von gewöhnlichem Portlandzement. Weißzemente werden aus sehr eisenarmen Rohstoffen hergestellt (Fe_2O_3 -Gehalt $< 0,1\%$.) Weißzement-Klinker muss nach dem Brennen schnell und unter Sauerstoffabschluss auf $< 600\text{ °C}$ gekühlt werden, um weiß zu bleiben. Anschließend wird der Klinker gebrochen und kann dann mit Luft gekühlt werden. Er eignet sich nicht nur für hellfarbige Bauteile, sondern lässt sich mit Farbpigmenten besser und leichter einfärben als grauer Portlandzement, da die Farben besser hervortreten [I.9].

2.3.5 Betonzusatzstoffe

Zusatzstoffe sind fein verteilte Stoffe, die dem Beton während des Mischvorganges beigelegt werden, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern bzw. zu erreichen. Der Fünf-Phasen-Stoff Beton wird durch die Zusatzstoffe komplettiert. Sie werden gemäß ÖNORM B 4710-1 in 2 Typen eingeteilt:

- I) Typ I nahezu inaktive Zusatzstoffe (z.B. Gesteinsmehl nach EN 12620 oder Pigmente nach EN 13263)
- II) Typ II puzzolanisch oder latenthydraulische Zusatzstoffe (z.B. Flugasche nach EN 450, aufbereitete hydraulische Zusatzstoffe nach ÖNORM B3309).

Um die Granulometrie des Zementsteins besser optimieren zu können, werden Mikrosilica und fein aufgemahlene Quarzmehle verwendet.

Vorwiegend kommen folgende Zusatzstoffe in ultrahochfestem Beton zur Anwendung:

- Flugasche
- Gesteinsmehl
- Metakaolin
- Silicastaub
- Feinhüttensand, gebrannter Ölschiefer.

2.3.5.1 Silikastaub

Silikastaub ist ein besonders feinkörniger, mineralischer Zusatzstoff, der beim Herstellen von Silizium und Siliziumprodukten entsteht und dessen Anlieferung pulverförmig oder in wässriger Suspension erfolgt und ausgeprägte puzzolanische Eigenschaften besitzt. Durch den hohen Wasseranspruch ist die Verwendung eines Verflüssigers oder Fließmittels unumgänglich um mit dem Silikastaub sehr hohe Betondruckfestigkeiten von über 100 N/mm^2 und eine Verbesserung der Dichtigkeit zu erzielen. Darüber hinaus führt der Einsatz von Silikastaub beispielsweise zu einer Verbesserung des Widerstands gegen chemischen Angriff oder gegen das Eindringen von Chloriden. Die Verwendung von Silikastaub erfordert allerdings eine zuverlässige Qualitätssicherung und besondere Maßnahmen bei der Nachbehandlung, jedoch bestehen keine weiteren Begrenzungen der Zusatzmengen bei der gemeinsamen Verwendung von Silikastaub und Flugasche [D.4].

Silikastaub kommt in der Form von Mikrosilika (hochfeine amorphe Kieselsäure) oder als Nanosilica (glasig erstarrtes, amorphes Siliciumdioxid, synthetische Herstellung) zum Einsatz. Silikastaub entsteht durch die Kondensation aus dem Filterstaub während der Ferrosilizium- bzw. Siliziummetallherstellung bei ca. 1700°C . Siliciumoxid (SiO) reagiert hierbei im Rauchgas bei ca. 1700°C mit Sauerstoff (O_2) und kondensiert sodann als amorphes Siliciumdioxid (SiO_2).

Da beim Zumischen in den Beton der Staub eher zäh und klebrig wird muss die Viskosität mit Fließmitteln gesteuert und wiederum verbessert werden. Bei sehr hohen Mikrosilikagehalten sinkt zudem der pH-Wert, wodurch das alkalische Milieu zur Passivierung des Stahls verloren gehen kann. Da die Agglomerationen von Mikrosilika als Keimzellen für eine Alkali-Kieselsäure- Reaktion (AKR) dienen, ist eine gleichmäßige Verteilung für die Dauerhaftigkeit

von stahlbewehrten Bauwerken (Baustahl oder Fasern) unerlässlich.

Der Anteil des Staubs an reaktivem, amorphem SiO_2 liegt bei Silikatstaub in der Regel über 90 M.-%. Er weist, aufgrund seines Entstehungsprozesses, stets eine kugelförmige Form bei geringem mittlerem Partikeldurchmesser von 0,5 μm auf. Die wichtigen Eigenschaften des Silikastaubes sind maßgeblich durch die Ausgangsstoffe zur Metallgewinnung, die Strömungsverhältnisse des Rauchabzugs und den Temperaturverlauf im Ofen bedingt. Reaktive Silikastäube erhöhen aufgrund ihrer geringen Partikelgröße die Packungsdichte, da sie die Zwickel des Zementes und Sandes füllen und auf Grund der puzzolanischen Reaktion mit dem Ca(OH)_2 feste CSH-Phasen bilden. Diese genannten Effekte führen zur Verbesserung des Verbunds zwischen Bindemittelmatrix und Zuschlag [2.15] bzw. Stahlfaser [2.16]. Weder die Reinheit der Silikastäube, ausgedrückt im Gehalt an amorphem SiO_2 , noch ihre spezifische Oberfläche nach BET (Messverfahren nach *Brunauer, Emmett* und *Teller* beruht auf der isothermen Gasadsorption von Stickstoff) ist nach *de Larrard* [2.17] das für eine gute Verarbeitbarkeit und hohe Festigkeit der Betone entscheidende Kriterium. Untersuchungen an Silikastäuben mit unterschiedlicher Herkunft haben gezeigt, dass erhöhter Kohlenstoffgehalt, erkennbar an der dunkleren Färbung, negative Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften von Bindemittelleim hat.

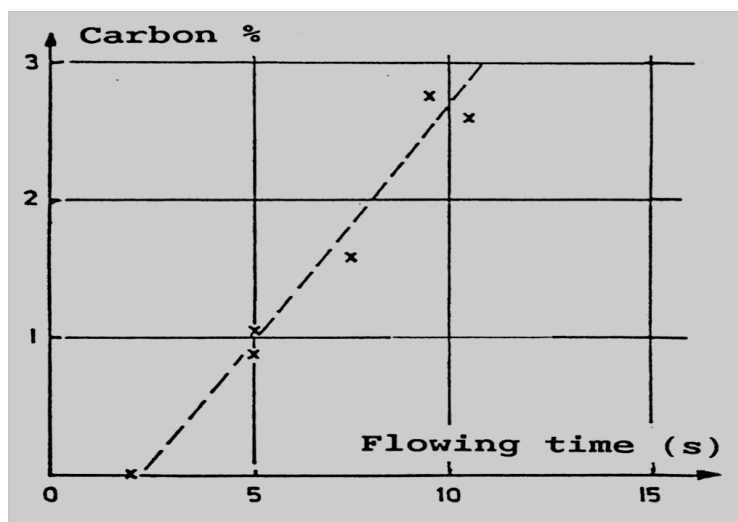


Abbildung 2-6: Verarbeitbarkeit des Bindemittelleimes (Fließzeit = Flowing time) in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt des Silikastaubes [2.17].

Vergleichsuntersuchungen mit gezielt zugesetztem Kohlenstoff (Abbildung 2-6) belegen, dass nicht die Kohlenstoffpartikel für die geringere Fließfähigkeit der Bindemittelleime

verantwortlich sind. *De Larrard* [2.17] vertritt deshalb die Meinung, dass die Kohlenstoffpartikel nur ein Abbild des Temperaturverlaufes während der Herstellung von Silikastaub sind.

Darüber hinaus vermutet er, dass der Temperaturverlauf für die mehr oder weniger ausgeprägte Agglomerationsneigung des Silikastaubes verantwortlich ist. Wider Erwarten, dass die puzzolanische Reaktion des Silikastaubes durch ein erhöhtes Alkaliäquivalent beschleunigt wird, stellte *de Larrard* [2.17] bei Untersuchungen an Mörteln (sf- Gehalt = 18 M.-% bez. a. Z.; w/z-Wert = 0,25) fest, dass mit zunehmendem Alkaligehalt des Silikastaubes die 28-Tage-Druckfestigkeit der Mörtel abnimmt. Bei der Erreichung der gewünschten Frisch- und Festbetoneigenschaften hat der Gehalt an zugesetztem Silikastaub eine maßgebliche Rolle inne. Bei UHFB werden üblicherweise hohe Silikastaubgehalte von 25 bis 30 M.-% bez. auf den Zement eingesetzt [2.18]. Als optimal, für eine infolge der vollständigen Füllung der Zwickel hohe Packungsdichte und auch der daraus folgenden optimalen rheologischen Eigenschaften des Frischbetons, gilt laut Modell von *de Larrard* das Gemisch aus 17 bis 23 % Silikastaub und 83 bis 77 % Zement, als optimal. Besagtes Verhältnis entspricht in etwa einem Silikastaubgehalt von 20 bis 30 Vol.-% bez. auf den Zement bezogen. Berücksichtigt man die Reindichten von Zement und Silikastaub entspräche dies einem optimalen Silikastaubgehalt von 15 bis 23 M.-%, wiederum bezogen auf den Zement.

In der Regel werden aber etwas höhere Gehalte eingesetzt, da einerseits zusätzliches Quarzmehl, mit entsprechender Korngrößenverteilung, eingesetzt und deshalb der Zwickelraum vergrößert wird und andererseits nicht erwartet werden kann, dass alle Silikastaubpartikel den ihnen zugeordneten Platz einnehmen werden.

Letztgenanntes verringert sich in der Theorie mit höherer Mischintensität und entsprechend verbesserter Dispergierung des Silikastaubes. Der optimale Silikastaubgehalt bleibt, wie für die Zwickelfüllung der Wasseranspruch für Normsteife von der Korngrößenverteilung des Zementes, abhängig. Durch diese Vergleichsfunktion wird nahegelegt, dass der als optimal geltende Silikastaubgehalt je nach Korngrößenverteilung des Zementes um maximal $\pm 10\%$ um einen Wert in der Größenordnung von 30 Vol.-% bez. a. Z. schwankt. Daraus kann eine realistische Bandbreite des optimalen Silikastaubgehalts von 27 bis 33 Vol.-% bez. a. Z. abgeleitet werden wobei, wenn man die in dieser Mischung enthaltene Quarzmehlmenge von 35 M.-% bezogen auf den Zement, berücksichtigt, sich ein volumetrisches Verhältnis zwischen Silikastaub und dem durch Zement und Quarzmehl eingenommenen Stoffraum von 20 bis 30 % ergibt. Dieses Verhältnis führt

genau zum im Modell von *de Larrard* geforderten Wert um die höchste Packungsdichte zu erreichen. EN 206 [N.13] unterscheidet 2 Typen entsprechend ihrem Reaktionsvermögen zwischen inerten Zusatzstoffen (Typ 1) und puzzolanischen Zusatzstoffen (Typ 2), die anteilig beim Wasserbindemittelwert angerechnet werden. Mit Zusatzstoffen können zudem physikalische wie auch chemische Effekte erzielt werden und ein Füllen, durch ihre geringe Größe, des Zwischenräume des teilweise hydratisierten Zementes erreicht werden, was letztendlich zu dichterem Gefüge und somit zu einer höheren Packungsdichte führt. Calciumsilikathydrat-Phasen, die eine Festigkeitssteigerung bewirken, werden durch Zusatzstoffe des Typs 2 durch Reaktion mit dem Calciumhydroxid erzeugt. Wenn hohe Feinstkornanteile das Wasser aus den Zwischenräumen verdrängen, kann das so gewonnene Wasser zur Schmierung der Körner verwendet werden. Daraus erklärt sich auch der anfangs sinkende Wasseranspruch bei Zugabe eines Stoffes der eine noch größere Oberfläche als Zement aufweist. Erst dann, wenn das Wasser durch eben diese Feinstteile ersetzt wurde, ist wieder eine Zunahme des Wasseranspruches festzustellen. Theoretisch wird bei Anwendung von Portlandzementen 18 M.-% (vom Zement) an Mikrosilica benötigt, um noch genügend Calciumhydroxid für die Reaktion zur Verfügung zu haben, wobei sich in der Praxis aber bereits Mikrosilicagehalte von ca. 25 M.-% durchgesetzt haben.

In Abbildung 2-7 sind Aufnahmen mit dem Rastertunnelmikroskop dargestellt, die die Größenverhältnisse zwischen Zement (CEM I 52,5-R NA/HS) und Mikrosilica (Elkem Mikrosilica Grade 983) zeigen. Die linke Aufnahme in Abbildung 2-7 (Bild 1) mit den Zementkörnern ist um einen Faktor zehn größer gewählt als die Mikrosilicaaufnahme rechts (Bild 2-7).

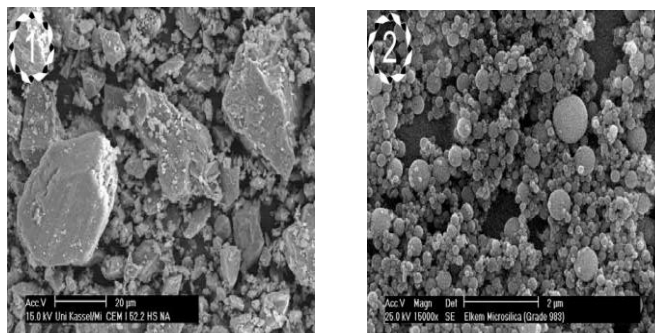


Abbildung 2-7: Korngrößenvergleich Zement und Mikrosilica C. VELLMER, M. GEH., B. MID. [2.29]

2.3.5.2 Quarzmehl

Nach *Richard* und *Cheyrezy* [2.18] ist eine Zugabe von Quarzmehl insbesondere für eine höhere Effektivität der Wärmebehandlung erforderlich. Üblicherweise wird dem UHFB Betone in einer dem Zement ähnlichen Feinheit (spez. Oberfl. n. Blaine = 3800 cm²/g) Quarzmehl zugegeben. Unter folgenden Bedingungen trägt Quarz zur Bildung von festen, dem natürlichen Tobermorit ähnlichen CSH-Phasen bei:

Bei Anwesenheit von Ca(OH)₂, bei Erhöhung der Löslichkeit infolge von frischen Bruchflächen, Rissen und Kanten nach einer Mahlung und bei erhöhten Temperaturen.

Nach *Richard* und *Cheyrezy* ist für die unter Wärmezufuhr auftretende Umwandlung von amorphen Hydraten in Tobermorit, welcher ein C/S Verhältnis von 5/6 aufweist, ein Masseverhältnis SiO₂/Zement von 0,62 optimal [2.3]. Der Anteil an Siliziumoxid (SiO₂) wird dabei durch den Silikastaub und das Quarzmehl abgedeckt. Demnach kann die erforderliche Quarzmehlmenge bei bekanntem Silikastaubgehalt von 25 bis 30 M.-% Zementes. leicht berechnet werden und liegt zwischen 37 und 32 M.-% b. a. Z.. Mittels ²⁹Si-NMR-Spektroskopie wiesen *Zanni et. al* [2.45] an Proben aus ultrahochfestem Beton nach, dass das Quarzmehl sich nur bei einer über acht Stunden andauernden Wärmebehandlung bei Temperaturen von mindestens 90 °C an der puzzolanischen Reaktion beteiligte. Bei einer 20 °C Lagerung der Proben verhielt sich das Quarzmehl selbst nach 28 Tagen absolut inert. Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit ist es erstrebenswert, den Silikastaubgehalt auf den für die gewünschten rheologischen Eigenschaften erforderlichen Mindestgehalt zu begrenzen und zur Einhaltung des C/S-Verhältnisses die Quarzmehlmenge zu erhöhen. Bei Quarzmehlen kann es jedoch zu einer Anätzung der Oberfläche durch Calcium- und Alkalihydroxiden kommen, welche die Festigkeits- und Verbundeigenschaften noch verbessert. Quarz besitzt bei 573°C einen Dehnungssprung der zu Gefügespannungen führen kann. Daher sind Korngrößen > 0,125mm bei feuerfesten Betonen zu vermeiden. Durch die steuerbare Partikelgröße von 0,1 bis 100µm können Gesteinsmehle sehr gut als Füller eingesetzt werden und so die fehlenden Kornfraktionen zwischen Mikrosilica und Zement oder Zement und Sand ersetzen. Als Nachteil bei Verwendung von Quarzstäuben sind jedoch die erhöhten Arbeitssicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung von Silikose-Erkrankung bei Inhalation der Stäube zu nennen. Abbildung 2-8 zeigt grafisch die Korngrößenverteilung der einzelnen Betonbestandteile [D.3].

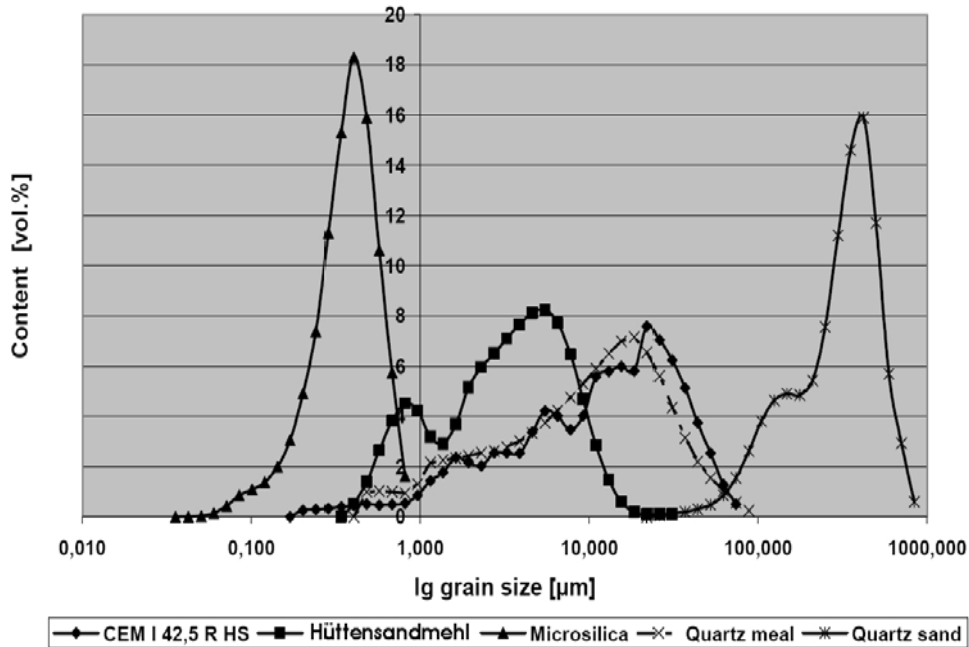


Abbildung 2-8: Korngrößenverteilung K. DROLL [2.30]

2.3.6 Betonzusatzmittel

Zusatzmittel sind Stoffe die in geringen Mengen dem Beton beigemischt werden um dessen Eigenschaften zu verändern. Bei ultrahochfesten Betonen werden hauptsächlich die folgenden Zusatzmittel verwendet. Im Weiteren soll daher die Wirkungsweise dieser fünf Stoffe genauer beleuchtet werden [2.19].

- Betonverflüssiger (BV)
- Fließmittel (FM)
- Luftporenbildner (LP)
- Verzögerer (VZ)
- Stabilisierer (ST)

2.3.6.1 Fließmittel

Fließmittel wirken als Zusatzmittel besonders stark verflüssigend, wobei diese auch nachträglich eingemischt werden dürfen. Dem Beton werden sie in größeren Mengen als Betonverflüssiger zugesetzt um eine erhebliche Verminderung des Wasseranspruchs und/oder eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit zu erreichen. Bei der Herstellung von sehr weichem und fließfähigem Beton (Konsistenzklasse F52 bis F66) oder selbstverdichtendem Beton, aber auch zur Einstellung der Konsistenzen F38 und F45, werden zudem Fließmittel eingesetzt. Die Basis des Fließmittels sind

meist Polycarboxylat und Polycarboxylatether (PCE-Fließmittel) und kann sehr unterschiedliche Verflüssigungswirkung und Konsistenzhaltung aufweisen [2.20].

Die Zugabe von Fließmittel ermöglicht es hierbei, Betone mit sehr geringen w/z-Werten gut verarbeitbar herzustellen. In Abbildung 2-9 ist die Wirkung von Fließmittel allein und gemeinsam mit Silicastaub im Frischbeton dargestellt.

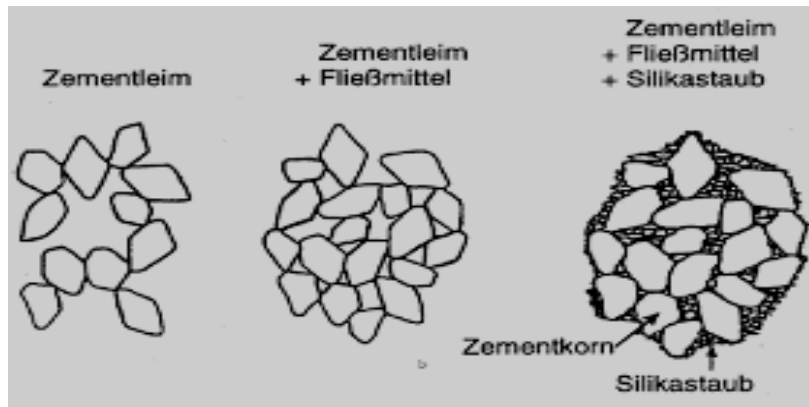


Abbildung 2-9: Qualitative Darstellung der Wirkung von Fließmittel und Füllerwirkung des Silicastaubs [2.46]

Erst durch die Erfindung von Fließmittel war es überhaupt möglich hochfeste Betone herzustellen und auf der Baustelle praxisgerecht einzubauen. Zuvor mussten die Verarbeitungseigenschaften alleine über den Wasser- und Zementgehalt gesteuert werden. Ultra-Hochfester Beton enthält zwischen 350 bis 400l/m³ Mehlkorn $\leq 0,125\text{mm}$. Deswegen und wegen des geringen Wassergehaltes (W/B-Wert $\leq 0,25$) sind wirksame Fließmittel erforderlich, um Ultra-Hochfesten Beton ausreichend verarbeitbar zu machen.

Seit den 30er Jahren werden Ligninsulfonate und seit den 60er Jahren sulfonierte Naphthalininaldehydkondensate als Betonverflüssiger eingesetzt. Als Nebenwirkung war beim Einsatz dieser Verflüssiger immer mit einer Erstarrungsverzögerung zu rechnen. Aus diesem Grund durften keine hohen Dosierungen verwendet werden. Erst als das sulfonierte Melaminformaldehydkondensat 1969 als Fließmittel entdeckt wurde, waren auch höhere Dosierungen ohne negative Verzögerungserscheinungen möglich.

Fließmittel (FM) der neuesten Generation auf Basis von Polycarboxylatethern zeichnen sich gegenüber den herkömmlichen FM durch die Fähigkeit zu einer wesentlich höheren Wassereinsparung und einem Konsistenzerhalt über einen längeren Zeitraum aus. Mit Hilfe dieser FM ist eine hohe Verflüssigung des Frischbetons bei gleichzeitig niedriger FM-Dosierung möglich. Es handelt sich hierbei um polyether-modifizierte Copolymere mit kammartig

aufgebauter Molekülstruktur aus verschiedenen Monomeren wie (Metha)Acrylsäure, Maleinsäureanhydrid, Styrol und Vinyl-/Allylderivaten. Mit Erfindung von hochwirksamen Fließmitteln der dritten Generation aus polyether-modifizierten Copolymeren konnten weitere Wassereinsparungen, bei gleichbleibender Konsistenz, erreicht werden. Für die Herstellung dieser Polyacrylate und Polycarboxylatether werden verschiedene Monomere wie Acrylsäure, Maleinsäureanhydrit, Styrol und Vinyl-/Allderivaten verwendet [2.20]. Ihre Wirkung beruht vorwiegend auf zwei Mechanismen. Durch elektrostatische Ladungen findet eine Abstoßung zwischen den einzelnen Zementpartikeln statt (Dispergierung). Das Fließmittel wird an der Zementoberfläche adsorbiert und eine Reduzierung der Oberflächenspannung des Wassers führt zu einer Art Gleitfilm auf den Zementkörnern (Abbildung 2-10).

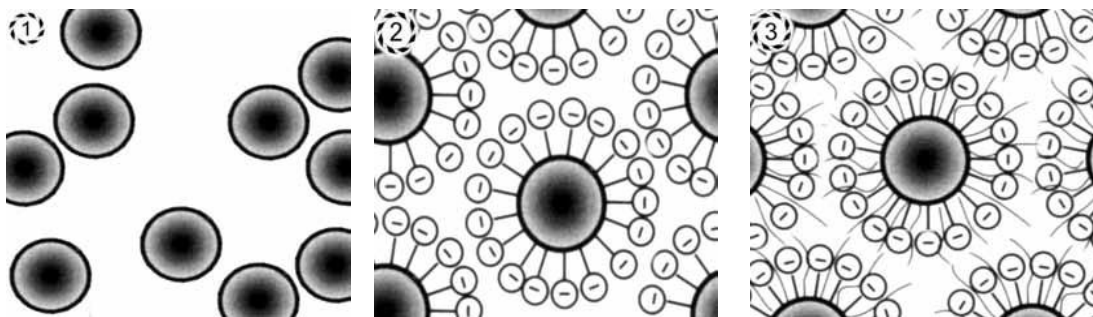


Abbildung 2-10: Wirkungsweise von Fließmitteln W. BRAMSHUBER [2.20]

Um beim Einsatz von FM nicht zu viel Wasser in den ultrahochfesten Beton einzubringen, haben die wässrigen Lösungen meist einen hohen FM-Wirkstoffgehalt von 30 bis 40 M.-% [2.21]. Die Wirkstoffmoleküle dieser FM adsorbieren bevorzugt an die C3A-Phasen und verändern das Oberflächenpotential der Phasen hin zu negativeren Werten, so dass eine elektrostatische Abstoßung zwischen den Zementkörnern erfolgt und deren Agglomeration verhindert wird [2.22]. Durch die geringere Adsorption an die Klinkerphasen C3S und C2S wird deren Hydratation und damit die Entwicklung der Frühfestigkeit weniger beeinflusst. Die Wahl des Fließmittels kann jedoch nicht unabhängig von dem verwendeten Zement getroffen werden.

Konsistenz

Die Konsistenz ist ein Stoff für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Abhängig ist sie maßgeblich vom Wasser- und Zementgehalt sowie der Kornzusammensetzung und -form als auch der Zugabe von Verflüssigern. Einfach gesagt beschreibt die Konsistenz des Frischbetons wie „flüssig“ bzw. „zäh“ der betrachtete Frischbeton ist. Sie muss vorab entsprechend gewählt

werden, sodass der Beton ohne wesentliches Entmischen gefördert, eingebaut und praktisch vollständig verdichtet werden kann wobei die dafür maßgebliche Frischbetoneigenschaft Verarbeitbarkeit zum Tragen kommt.

Die genormten Konsistenzbereiche erstrecken sich von Bezeichnungen wie „(sehr) steif“, über „plastisch“, „weich“ und „sehr weich“ bis hin zu „(sehr) fließfähig“. An diese Konsistenzbereiche sind zudem Messwerte geknüpft, die mit genormten, baustellengerechten Verfahren, wie dem Ausbreitversuch, dem Setzversuch und dem Verdichtungsversuch geprüft und kontrolliert werden können.

2.3.6.2 Zusammenhang zwischen der Frischbetonkonsistenz und dem LP-Gehalt

Wie in Abbildung 2-11 dargestellt wurde, konnten die Luftporen im Frischbeton mit herkömmlichen Methoden selbst bei sehr fließfähiger Konsistenz (Setzfließmaß > 30 cm) nur bis auf einen Gehalt von rd. 2 Vol.-% ausgetrieben werden. Dieser Wert entspricht dem in der Literatur genannten minimalen LP-Gehalt, der sich beim optimalen Wassergehalt und der höchsten relativen Dichte k_{rel} einstellt.

Nach umfangreichen Versuchen mit dem Intensivmischer hatte sich hinsichtlich der Einbaubarkeit, der Entlüftungswilligkeit und der Mischungsstabilität ein Frischbeton mit einem Setzfließmaß von 19 bis 28cm als optimal herausgestellt (siehe Abbildung 2-11). Ein Setzfließmaß < 26 cm führte zu höheren Luftporengehalten, bewirkte jedoch eine geringere Streuung des Nachbruchverhaltens bei Biegezug- bzw. Zugbelastung. Dieser Effekt spielt in der Praxis eine große Rolle und muss nach der französischen Richtlinie [3.27] im Vorfeld der Bemessung von Bauteilen unter möglichst anwendungsnahen Bedingungen ermittelt werden.

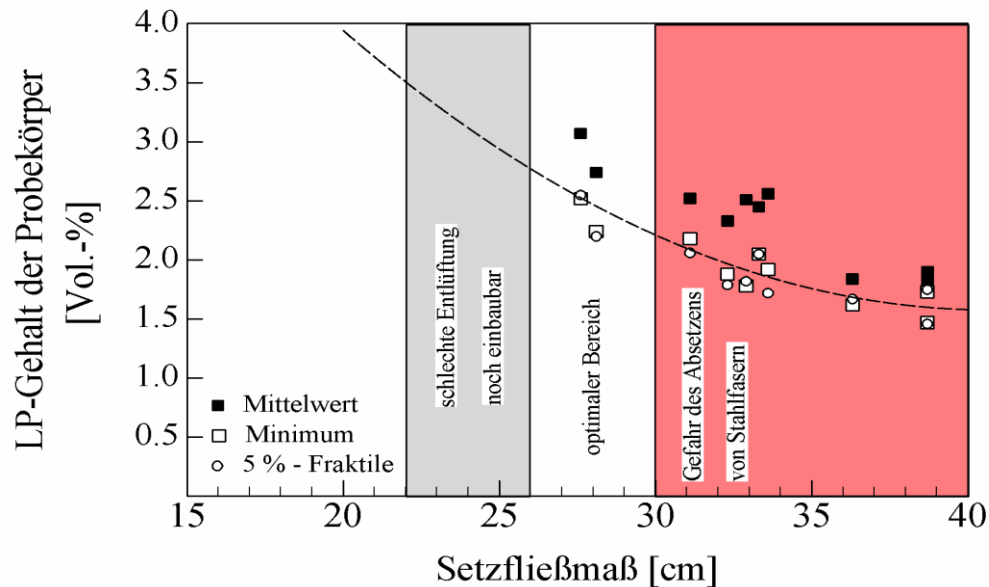


Abbildung 2-11: Einfluss des Setzfließmaßes auf den LP-Gehalt der erhärteten Probekörper [I.11]

Die in Abbildung 2-11 dargestellten Abhängigkeiten sind Ergebnisse einer statistischen Auswertung von jeweils rund 30 Probekörpern je Mischung. Der 5 %-Fraktilewert stimmte sehr gut mit dem minimal gemessenen Wert überein,

Für diese Auswertung wurde der LP-Gehalt der Probekörper über den Unterschied der mittels Tauchwägung bestimmten Probekörperdichte und der Stoffraumdicke berechnet. Da sämtliche Rohdichten der trockenen Ausgangsstoffe mit Hilfe eines He-Pyknometers ermittelt wurden, war es möglich die Stoffraumdicke der Mischungen sehr genau zu berechnen [D.2] [D.3].

2.3.6.3 Einflüsse auf die Konsistenz und Entlüftungsneigung des Frischbetons in Abhängigkeit mit FM Zugabezeitpunkt

Die geringere FM-Dosierung hat nicht nur wirtschaftlich gute Gesichtspunkte sondern auch den positiven Effekt einer geringeren Verzögerung der Hydratation und ermöglicht somit kurze Ausschaltzeiten der Fertigteile. Bei einigen Versuchen mit einem üblichen Normalmischer wurde unter Beibehaltung der Gesamtmischzeit von 90 Sekunden die Pause zwischen dem Einmischen des Anmachwassers und des FM variiert, sodass der Einfluss des FM-Zugabezeitpunktes auf die rheologischen Eigenschaften des Zementleimes bestimmt werden konnte. Der FM-Wirkstoff beeinflusste lediglich die Größe des mini-slump-Maßes zu einem bestimmten Zugabezeitpunkt. In der Praxis bedeutet dies, dass bei der Zugabe eines hochwirksamen FM im Anmachwasser

eine steifere Konsistenz zu erwarten ist als bei Einsatz eines weniger wirksamen Fließmittels zum optimalen Zugabezeitpunkt.

Um den Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf den optimalen FM-Zugabezeitpunkt in einer möglichst großen Bandbreite zu ermitteln, wurden unterschiedliche Zementsorten untersucht und die Ergebnisse in einem Diagramm dem Zement mit der durchschnittlichen Zusammensetzung gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Zugabe des FM im Zeitraum von 2 bis 3 Minuten nach dem ersten Wasserkontakt bei allen Zementen eine ziemlich gute Verflüssigung erreicht wurde.

2.4 Mechanische Betoneigenschaften

2.4.1 Druckfestigkeit

Formel 1: Berechnung der Druckfestigkeit

Als Druckfestigkeit wird die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs bei der Einwirkung von Druckkräften bezeichnet. Die Druckfestigkeit ist der Quotient aus Bruchlast und Querschnittsfläche A eines Prüfkörpers. Sie wird normalerweise ausgedrückt als Kraft pro Fläche (in N/mm^2), hat also die Einheit einer mechanischen Spannung. Ist die anliegende Druckspannung größer als die Druckfestigkeit eines Körpers, so wird er zerstört. Die Druckfestigkeit hat als der charakteristische Kennwert von Beton eine wichtige Rolle, zusätzlich sind für die Klassifizierung eines Betons weitere Eigenschaften festzulegen. Die folgenden Eigenschaften wie die Rohdichte, das Herstellungsverfahren, die Betonklasse, der Widerstand gegen umweltbedingte Einflüsse wie z.B. Klimabedingungen, und die Zusammensetzung sind maßgeblich. Sowohl bei der Bemessung als auch in der Praxis verwendet man die Druckfestigkeit eines bestimmten Probekörpers um die Festbetoneigenschaften anzugeben.

Aus der aufgezeichneten Höchstlast errechnet sich die Druckfestigkeit nach folgender Gleichung:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Formel 1: Berechnung der Druckfestigkeit

σ Einaxiale Druckfestigkeit in N/mm^2 , (MPa)

F Höchstkraft beim Bruch, in N;

A Fläche des Probenquerschnitts, in mm^2

2.4.1.1 Versuchsbeschreibung – Druckfestigkeit

Über die Stirnflächen wird die Last eingeleitet. Der Prüfkörper wird mittig auf die untere Druckplatte gestellt. Die obere Druckplatte liegt ganzflächig am Prüfkörper an. Mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit wird die Last aufgebracht.

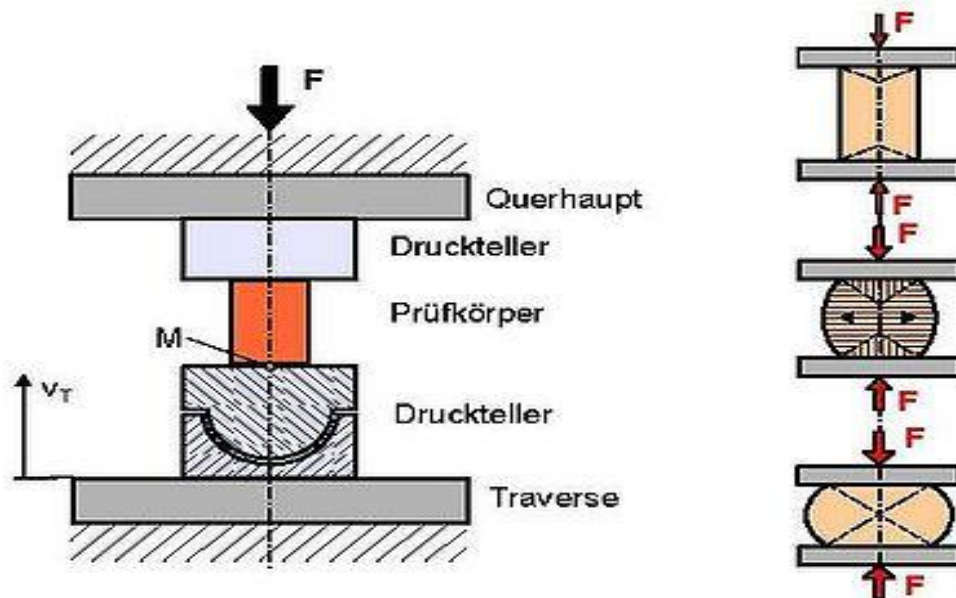


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung –Druckversuch [I.12]

Die messtechnischen Voraussetzungen für die exakte Durchführung eines Druckversuches sind:

- Druckplatten und Prüfmaschine müssen im Prüfkörper einen einachsigen Last- und Spannungszustand erzeugen
- Punkt M muss zentrisch in der Druckfläche und der Lastlinie der Materialprüfmaschine liegen (selbstständiges Parallelstellen der Druckteller)

2.4.1.2 Verhalten von Normalbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung

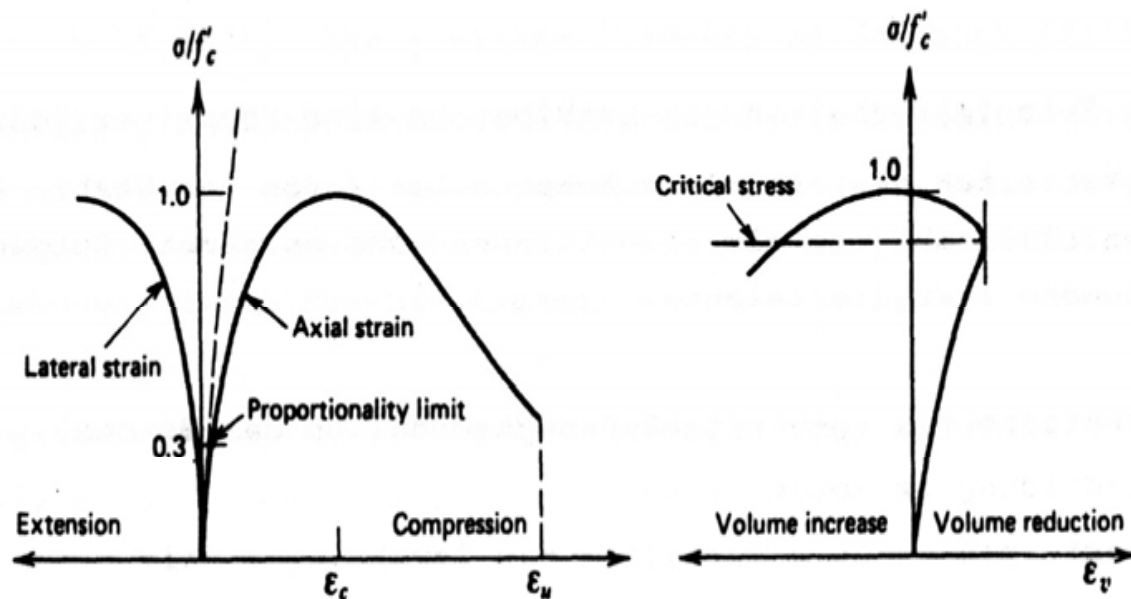


Abbildung 2-13: Axiale Dehnung und Volumenänderung bei axialer Druckbelastung W.-F. CHEN, A.F. SALEEB [2.25]

Die Abbildung 2-13 stellt das prinzipielle Verhalten von Normalbeton unter einaxialer Druckbelastung dar.

Die Spannungsdehnungslinie folgt bis ca. 30% der maximalen Druckfestigkeit einem linear ansteigenden Ast. Danach „kippt“ die Linie ab, die Dehnungen nehmen überproportional zu den Spannungen zu. Gleichzeitig ist eine Volumenabnahme (Stauchung) des Betons festzustellen. Diese Volumenabnahme erreicht kurz vor der maximal aufgebrauchten Druckspannung ihr Maximum und wird dann durch die Zerstörung des Betongefüges positiv (Volumendilatation). Mit ansteigendem Betonvolumen fällt die Spannung immer weiter ab, bis keine Druckkräfte mehr übertragen werden können [2.25]. Die von Normalbeton bekannte Mikrorissbildung in der Kontaktzone, zwischen Zementstein und Zuschlag, bei Erreichen von ca. 40% der Druckfestigkeit, kann bei ultrahochfesten Betonen nicht festgestellt werden. Dies liegt zum einen an der besseren Verbundwirkung in der Kontaktzone, als auch an einer veränderten Bruchmechanik. So ist die Rissflächenreibung, die bei Normalbeton zur Absorption der Bruchenergie beiträgt, nur sehr gering. Des Weiteren kann bei ultrahochfesten Betonen der E-Modul des Zuschlags kleiner sein als der des Zementsteins. Bei statischer Belastung zieht der

steifere Stoff einen grösseren Teil der äußerlich aufgebrachten Spannungen an. Somit erfolgt ein Versagen (Rissbildung) in Abhängigkeit der Steifeverhältnisse von Zement und Zuschlag, immer an der Stelle der geringsten Festigkeit.

Bei Normalbeton ist der schwächste Bestandteil meist die Zementmatrix. Die Risse verlaufen entlang der Gesteinskörnung in der schon geschwächten Übergangszone. Bei ultrahochfesten Betonen ist der Zuschlag das schwächste Glied. Dies ist der Grund, weshalb die Bruchbilder (Risse) meist durch die Gesteinskörner verlaufen.

Selbst bei ideal gleichmäßig einachsiger Belastung stellt sich aufgrund des inhomogenen Gefüges des Betons ein räumlicher Spannungszustand ein. Durch die Querdehnung entstehen rechtwinklig zu der Belastungsebene im Gleichgewicht stehende Druck- und Zugspannungen. Die Höhe der Druckfestigkeit wird durch jeden Parameter bei der Mischung, die Herstellung, dem Einbau sowie der Nachbehandlung beeinflusst [D.3].

2.4.1.3 Verhalten von Ultrahochfestem Beton unter Druckbeanspruchung

Unter Druckbeanspruchung zeigt sich bei UHFB ein ausgeprägtes lineares Werkstoffverhalten kombiniert mit einem sehr spröden Versagen deshalb muss die im Vergleich zu Normalbetonen

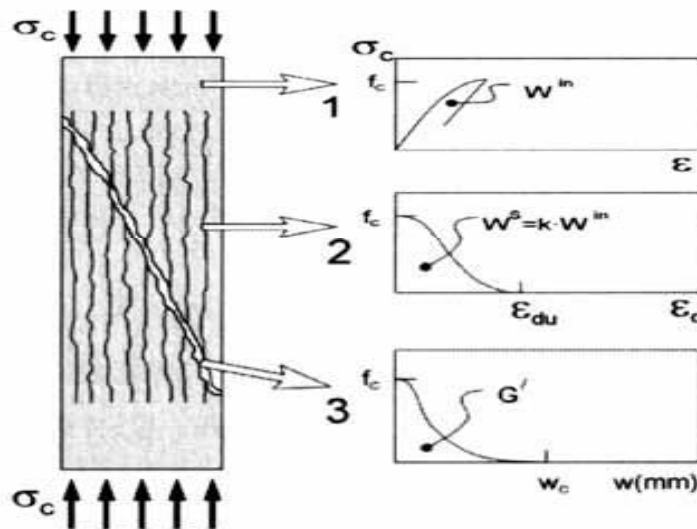


Abbildung 2-14: Schubbandausbildung – [2.26]

üblicher Festigkeit hohe Sprödigkeit des Materials bei der Anwendung ausreichend berücksichtigt werden. Dieser Aspekt kann bei der Bemessung durch vorsichtigere Feststellung des Sicherheitsabstandes aber auch durch den Einsatz von Stahlfasern erfolgen. Unbewehrte Betonquerschnitte versagen bei zentrischer Druckbelastung durch Ausbildung eines Schubbandes wie in Abbildung 2-14 ersichtlich ist. Zur Beschreibung eben dieses Spannungs-Dehnungsverhaltens hat sich das CDZ-Modell (compression damage zone) von *Markeset* [2.26] als geeignet herausgestellt. Dieses Versagen wird durch parallel aufgebrachte Spannung verlaufende Mikrorisse angekündigt, die durch Energiebetrachtungen beschrieben werden können. Sobald die Druckfestigkeit überschritten wird, bildet sich ein unter 1:2,5 zur Hauptspannungsrichtung geneigtes Schubband aus wobei die Schädigung zumeist lokal stattfindet und die restlichen Bereiche entlastet werden und somit mit einem unelastischen Anteil an der Energiebilanz berücksichtigt werden [D.3].

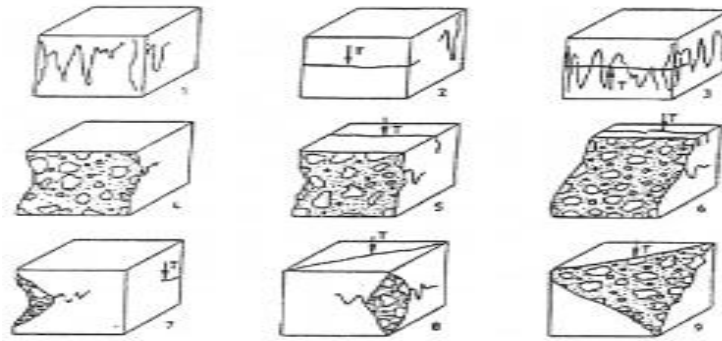


Abbildung 2-15: Unterschiedliche Zerstörungstypen des Betons unter Druckbeanspruchung

2.4.1.4 Querdehnzahl von UHFB und Normalbeton in Abhängigkeit des Belastungsniveaus

Die Entwicklung der Querdehnzahl, als Verhältnis von Querdehnung zu Längsstauchung, unterscheidet sich nach Untersuchungen von *König et. al.* [2.28] erheblich von der bei Normalbeton (siehe Abbildung 14).

Bei UHFB entspricht der E-Modul der erhärteten Bindemittelmatrix etwa dem des Quarzsandes [2.3]. Wegen des niedrigen w/z-Wertes und dem hohem Silikastaubgehalt von über 20% weist die Kontaktzone zwischen Sandkorn und Matrix nicht die vom Normalbeton bekannte Porosität und Anreicherung von schwachem Portlandit auf [2.27].

Infolge der hohen mechanischen Eigenschaften der Bindemittelmatrix und der Gesteinskörnung, sowie des exzellenten Verbundes findet bei UHFB im Bereich von Spannungen bis rd. 70 % der Bruchspannung nahezu keine Rissbildung statt. Dies kann gut anhand des Verlaufes der Querdehnzahl in Abbildung 2-16 nachvollzogen werden. Im linear elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Linie von UHFB ermittelten verschiedene Autoren Querdehnzahlen von 0,18 bis 0,24 [2.27][2.28][2.29][D.3] (siehe Abbildung 2-17).

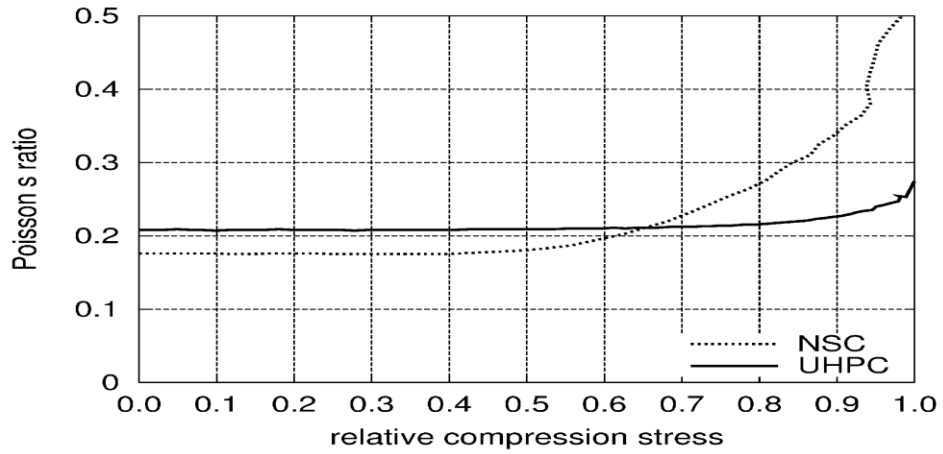


Abbildung 2-16: Vergleich der Querdehnzahl von UHFB und Normalbeton ($\varnothing/H = 100/300$ mm) in Abhängigkeit vom Belastungsniveau

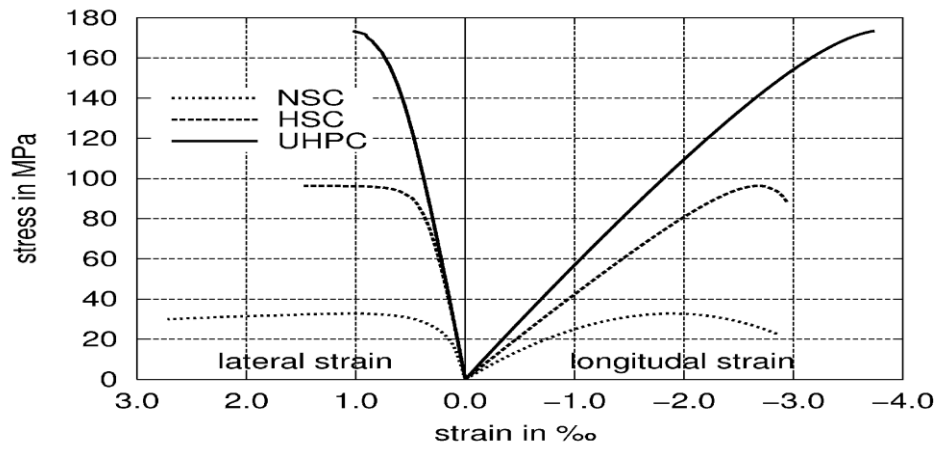


Abbildung 2-17: Vergleich der Spannungs-Dehnung von UHPC-Hochleistungsbeton(HSC) und Normalbeton (NSC) unter Druckbeanspruchung [2.31]

2.4.1.5 Technologische Maßnahmen für hohe Druckfestigkeiten

Den zahlreichen Veröffentlichungen, über die für eine hohe Druckfestigkeit erforderlichen betontechnologischen Maßnahmen, kann man entnehmen, dass die Optimierung der Packungsdichte und die Erhöhung der Gefügehomoogenität durch die Verringerung des Größtkorns ebenso wie eine drastische Reduzierung der Matrixporosität und das Vermeiden von Fehlstellen die diesbezüglich maßgebenden Parameter darstellen.

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur zielsicheren Erreichung hoher Druckfestigkeiten untergliedern sich in drei folgenden Schwerpunkte:

- Maßnahmen zur Reduzierung des Verarbeitungsporengehalts
- Optimierung der Packungsdichte
- Ermittlung der optimalen Bindemittelmatrixzusammensetzung.

Mit Hilfe einer speziellen Mischtechnik konnte durch das Anlegen eines Unterdrucks von 50 mbar im geschlossenen Mischsystem der Frischbeton unabhängig von der Konsistenz nahezu vollständig entlüftet werden. Neben der Mischungszusammensetzung und der geeigneten Auswahl der Ausgangsstoffe spielt bei der Einstellung einer fließfähigen, selbstverdichtenden Frischbetonkonsistenz (Setzfließmaß von 19 - 28cm) die Mischreihenfolge und –zeiten eine maßgebende Rolle. Bei der Mischreihenfolge ist sich eine zweigeteilte FM-Zugabe als besonders wirkungsvoll herausgestellt. Nach Einmischen der ersten Hälfte des FM mit dem Anmachwasser wird eine Mischpause eingehalten, um die Zugabe des Restfließmittels zum optimalen Zeitpunkt – rd. 5 Minuten nach dem ersten Kontakt des Zementes mit Wasser - zu ermöglichen. Die Optimierung der Packungsdichte erfolgte mittels rheologischer Messungen anhand der Bestimmung der relativen Viskosität, als Maß für die innere Reibung der Frischbetone. Bei Untersuchungen wurde der Einfluss des Sandes über die Variation der Korngrößenverteilung und des Gehaltes sowie der Einfluss des Silikastaubgehaltes auf die Frischbetoneigenschaften untersucht. Höhere Sandgehalte bewirkten eine deutliche Verschlechterung der Frischbetoneigenschaften. Frischbetone mit einem Silikastaubgehal von 24 Vol.-%, bezogen auf den durch Zement und Quarzmehl eingenommenen Stoffraum, weisen eine geringe Viskosität und somit eine hohe Packungsdichte auf. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde Der Einfluss der Zementart, des W/Z-Wertes und des Silikastaubgehaltes auf die 28-, bzw. 56-Tage-Druckfestigkeit untersucht. Das nach einer 28-tägigen Lagerung bei 20 °C angestrebte

Druckfestigkeitsniveau von 180 bis 200 N/mm² konnte nur bei Verwendung von Portlandzement realisiert werden. Ein Ausschöpfen des mit den eingesetzten Ausgangsstoffen erreichbaren Festigkeitspotentials im Alter von 28 Tagen ist bei den UHFB mit Portlandzement nur möglich, wenn der W/Z-Wert und der Silikastaubgehalt in einem bestimmten Verhältnis zueinander standen [D.1].

2.4.2 Einfluss der Matrixzusammensetzung auf die 28-Tage-Druckfestigkeit

Die für die Bemessung maßgebende Kenngröße, die charakteristische Druckfestigkeit, wird bei Beton unter Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten aus der mittleren 28-Tage-Druckfestigkeit berechnet. Der Bemessungsansatz für UHFB bezieht sich dagegen nicht auf ein bestimmtes Betonalter. Grund hierfür könnte zum einen die große Nacherhärtung oder die bei einer Wärmebehandlung des UHFB bereits in einem jungen Alter von weniger als 7 Tagen erreichbare hohe Druckfestigkeit sein. Dennoch wird zur Charakterisierung der Festigkeitsklasse von UHFB meist die 28-Tage-Druckfestigkeit der bei 20 °C gelagerten Probekörper herangezogen. Im Falle einer Beschleunigung des Erhärtungsvorganges durch eine Wärmebehandlung wird diese immer bei Nennung der Druckfestigkeit als Zusatz angegeben. Die bisherigen Untersuchungen belegen, dass die nach einer 28-tägigen Lagerung bei 20 °C erreichbare Druckfestigkeit bei 173,01 N/mm² liegt. Mit zunehmendem w/z-Wert steigt der für eine hohe 28-Tage-Druckfestigkeit erforderliche Silikastaubgehalt an. Dies ist vor dem Hintergrund, dass durch einen bis zu diesem Zeitpunkt höheren Hydratationsgrad des Zementes mehr Portlandit gebildet wird und somit zur Bildung der festen CSH-Phasen mehr Silikastaub mit dem Portlandit puzzolanisch reagieren kann, einleuchtend. Da die puzzolanische Reaktion des Silikastaubes bei 20 °C nur langsam abläuft können UHFB, im hohen Alter (trotz sehr ähnlicher Silikastaub und Quarzmehlgehalt) nicht die gleich hohen Druckfestigkeiten aufweisen. Wegen des geringen Klinkeranteils wird eine geringere Menge an Portlandit gebildet, so dass weniger Silikastaub für die puzzolanische Reaktion benötigt wird. Der geringe Anteil an Portlandzementklinker ist auch eine Ursache fuer den großen Einfluss des w/z-Wertes auf die 28-Tage-Druckfestigkeit [D.1]. Durch Reduktion des Größtkorndurchmessers werden homogenere Mischungen erzeugt, die weniger Fehlstellen aufweisen. Man spricht in diesem Fall von Feinmatrix-Beton bzw. von Compact Granular Matrix Concrete. Die physikalische Gefügeoptimierung hat eine möglichst dichte Kornpackung zum Ziel. Dabei dürfen sich die

einzelnen Kornfraktionen nicht gegenseitig in ihrer Bewegungsfreiheit behindern. Ziel ist auch hier eine möglichst dichte Packung.

2.4.3 Biegezugfestigkeit

Die Biegefestigkeit ist die beim Bruch oder Fließen in der Randfaser einer durch eine Biegemoment belasteten Probe herrschende Zug- oder Druckspannung. Die Biegefestigkeit ist nicht wie die Zug- oder Druckfestigkeit ein regulärer Materialkennwert, da das Eintreten des Bruchs von der Sprödigkeit des Werkstoffs und von der Geometrie des Probenquerschnitts abhängt. Die Biegefestigkeitsprüfung ist physikalisch eine Kombination von Zugversuch und Druckversuch, weil bei der Biegung eine Druckspannung an der Innenseite und eine Zugspannung an der Außenseite des Materialquerschnitts entstehen.

Die Biegezugfestigkeit wird in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 immer an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160mm in einem 3-Punkt-Biegeversuch und mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 N/s ermittelt. Die Stützweite betrug bei mittiger Lasteinleitung immer 100 mm. Die Biegezugfestigkeit wird durch diese Formel darstellen:

$$\text{Biegezugfestigkeit } \beta_f = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

$F = \text{Bruchlast} - l = \text{Länge} - b = \text{Breite} - d = \text{Dicke}$

Formel 2: Berechnung der Biegezugfestigkeit

Aus versuchstechnischen Gründen wird bei UHFB das Nachbruchverhalten in der Regel im Biegezugversuch geprüft. Bekanntlich nimmt die Biegezugfestigkeit mit steigender Druckfestigkeit der Betone nur unterproportional zu. Die Querschnittshöhe beeinflusst den Wert der Biegezugfestigkeit signifikant. Dieser „Maßstabseffekt“ entsteht durch die Verringerung der Spannungen an der Rissspitze infolge der „vorausseilenden“ Mikrorissbildung. Ein „ideal-spröder“ Werkstoff zeigt diesen Effekt nicht [2.32].

2.4.3.1 Versuchsbeschreibung – Biegezugfestigkeit

Die Ermittlung der Biegezugfestigkeit erfolgt an einem balkenförmigen Probekörper. Die Last (F) greift in den Mittelpunkten der Stützweite an. Die Last wird mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit bis zum Bruch gesteigert. Der Versuchskörper zeigt bis zum Bruch keine mit bloßem Auge erkennbaren Verformungen. Die Biegezugfestigkeit wurde in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 immer an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm in einem 3-Punkt-Biegeversuch und mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 N/s ermittelt. Die Stützweite betrug bei mittiger Lasteinleitung immer 100 mm. Zur Berechnung der Biegezugfestigkeit wurde Formel 2 herangezogen.

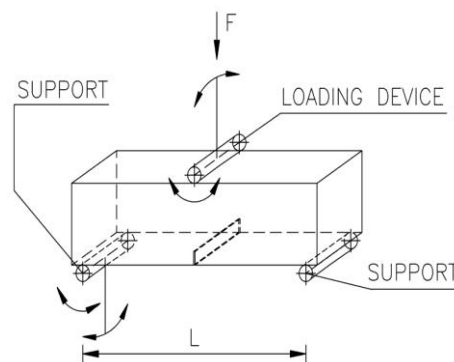


Abbildung 2-18: Probekörper unter Belastung bei der Biegezugfestigkeitsprüfung

2.5 Charakterisierung der Frischbetoneigenschaften

- Bestimmung Frischbetonrohichte
- Bestimmung des Luftgehalts A_c mittels Druckausgleichverfahren
- Bestimmung des Ausmassbereites f

2.5.1 Rohdichte

Das Verhältnis der Masse eines Körpers zum Volumen nennt man Dichte. Es weist aus, ob ein Körper für seine Größe leicht oder schwer ist. Die Dichte lässt sich mit der Formel ρ (Dichte) = m (Masse) dividiert durch V (Volumen) berechnen. Jedes Material ist durch eine ihm eigene Dichte gekennzeichnet. Die Dichte von Normalbeton, festgeschrieben als Kennwert in der ÖNORM B4710-1, muss 2000 - 2600 kg/m³ betragen. Die relative Dichte beschreibt das Verhältnis der Festbetonrohichte zu der Reindichte des Korngemisches. Die Rohdichte des Betons hängt vom Zuschlag und von der erreichten Packungsdichte direkt ab.

2.5.2 Luftgehalt im Beton

Der Luftgehalt gibt Hinweise auf die Verdichtbarkeit des Frischbetons und die daraus zu erwartenden Festbetoneigenschaften (Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit). Durch das Verdichten des Betons wird, die beim Schütten und Mischen, eingetragene Luft ausgetrieben. Auch gut zusammengesetzter Beton enthält nach sorgfältiger Verdichtung noch Verdichtungsporen. Selbst nach sorgfältiger Verdichtung bleibt der Luftgehalt beispielsweise bei 32 mm Größtkorn noch 1 Vol.-% bis 2 Vol.-%, bei feinkörnigem Beton bis zu 6 Vol.-%, d.h. $60 \text{ dm}^3/\text{m}^3$. Durch luftporenbildende Zusatzmittel LP kann absichtlich Luft im Beton erzeugt werden. Der Frost- und Taumittel-Widerstand des erhärteten Betons wird dadurch erhöht. Grundsätzlich beeinträchtigt zu hoher Luftgehalt die Festigkeit. Der Luftgehalt ist von der erreichten Packungsdichte direkt abhängig [I.1].

2.5.2.1 Reduzierung des Gehaltes an Verarbeitungsporen

Das intensive Mischen führte zu einem Einschlagen von Luftporen mit Durchmessern von 0,1-1 mm, so dass der Frischbeton in Abhängigkeit der Konsistenz einen LP-Gehalt von bis zu 4 Vol.-% aufweist. Selbst durch längere Vibration bei der Probekörperherstellung können diese Luftporen nur teilweise ausgetrieben werden. Die Luftporen in der Größe des Größtkorns stellen im erhärteten UHFB Schwachstellen dar. Sie beeinträchtigen die für eine hohe Festigkeit erforderliche Homogenität des Gefüges und sind somit der Ausgangspunkt für eine Rissbildung auf mittlerem Spannungsniveau. Aufgrund des spröden Bruchverhaltens von faserfreiem UHFB kommt es nach der Erstrissbildung zum frühzeitigen Versagen der Probekörper.

Zur Verbesserung der Entlüftungsneigung werden ultrahochfeste Betone üblicherweise durch eine sorgfältige Auswahl von Fließmittel, Zement und Silikastaub in Kombination mit einer optimierten Packungsdichte und einer abgestimmten Mischreihenfolge in einer fließfähigen, nahezu selbstverdichtenden Konsistenz hergestellt.

2.5.2.2 Entlüfter

Entlüfter sind besonders für hochwertige, flüssige Vorsatz- und Sichtbetonmischungen geeignet.

Durch die Verwendung von Entlüftern wird das Luftporenvolumen im Beton vermindert und dadurch die sichtbaren Poren an der Betonoberfläche wesentlich reduziert.

Der Entlüfter ist eine weißfarbige Flüssigkeit deren Dichte $0,99 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Die minimale Verarbeitungstemperatur des Entlüfters beträgt $+5^\circ\text{C}$. Bezogen auf den Zement wird ca. $0,2 - 0,8 \%$ M verbraucht wobei die genauere Dosiermenge u.a. von der Betonrezeptur und der Reaktivität des Zementes abhängt und im Rahmen einer Erstprüfung ermittelt werden muss.



Abbildung 2-19: linke Bildseite: schalungsseitige Betonoberfläche mit ENTLÜFTER, rechts ohne[2-20]

2.5.3 Ausbreitmass

Der Ausbreitversuch ist ein Verfahren zur Bestimmung des Ausbreitmaßes, einer Kenngröße für die Konsistenz von Frischbeton. Durch den einfachen Versuchsaufbau ist diese Betonprüfung auch direkt auf der Baustelle möglich. Großer Vorteil des Versuchs ist der einfache Versuchsaufbau und die schnelle Durchführbarkeit. Ausbreittische sind robust gebaut, leicht zu säubern und benötigen keine Stromversorgung. Dadurch kann die Frischbetonkonsistenz auf der Baustelle ohne große Vorbereitungen geprüft werden. Ist der Frischbeton zu zähflüssig (steif), kann es beim Einbau zu Hohlräumen (größere Poren, Kiesnester) kommen. Oft stellen Hohlräume lediglich einen optischen Mangel dar, können bei einer Häufung aber auch die Tragfähigkeit des Bauteils beeinträchtigen. Außerdem ist freiliegende Bewehrung nicht vor Korrosion geschützt, so dass häufig Sanierungsmaßnahmen erforderlich werden [I.13].

3 Versuchsplanung, Versuchsgrundlagen, Versuchseinrichtungen

In diesem Kapitel werden die erforderlichen Parameter für die Versuchsdurchführung, sowie die Versuchsplanung, Mischungskonzepte und die Mischungsentwürfe bzw. die erforderliche Mischmethode und die Herstellungsgrundlagen dargestellt und erläutert. Weiters werden die Mischgeräte und Maschinen, sowie die Prüf- und Messapparaturen für die Prüfungen am Frisch- und Festbeton und die für die versuche erforderlichen Probekörper erwähnt.

Die unten dargestellten Versuchsparameter werden im folgenden erläutert:

- Betonzusammensetzung
- Vorbereitung der Probe
- Mischen
- Frischbetonprüfungen
- Festbetonprüfungen.

3.1 Grundlage der Herstellung von UHFB

Eine wesentliche Aufgabe bei der Herstellung von UHFB besteht allerdings im Erreichen der optimalen Verarbeitungseigenschaften weshalb hierfür die Dosiergenauigkeit und die Mischintensität der Mischanlage eine entscheidende Rolle spielen.

Die Eigenschaften des Frischbetons werden auch durch die Mischreihenfolge und die zugehörigen Mischdauern beeinflusst.

Man kann zur Herstellung, zum Mischen von UHFB auch ein Vakuummischer verwenden, wodurch ein Frischbeton mit deutlich reduziertem Luftporengehalt herstellbar ist.

Der Unterdruck ist jedoch vorsichtig und nicht zu groß zu wählen, da sonst bereits bei niederen Temperaturen (25°C) das Wasser während des Mischens verdampfen kann und sodann zur Hydratation des Betons fehlt.

Der zudem angelegte Unterdruck in den letzten Mischpausen kann dazu führen, dass die durch das intensive Mischen eingeschlagene Luft ausgetrieben wird, weshalb das Teilvakuum so gewählt werden muss, dass bei der Mischtemperatur von 30°C kein Wasser verdampft.

Bedingt durch die Kombination der Ausgangsstoffe kann ein übertriebenes Mischen des UHFBs zu einem schnellen Ansteifen des Frischbetons oder aber dagegen zu einer starken Verflüssigung führen.

3.2 Zusammensetzung

Beim Entwurf der Mischungszusammensetzung für UHFB sind folgende Parameter zur Erzielung der gewünschten Frisch- und Festbetoneigenschaften als betontechnologisch optimale Bestandteile erforderlich:

- W/Z-Wert
- Silikastaubgehalt und Sandgehalt
- FM-Dosierung.

Die Korngrößenverteilung sämtlicher Feststoffe ist einerseits abhängig von der FM-Verträglichkeit der Bindemittel und andererseits auch vom Wasseranspruch.

Neben der Homogenität und Packungsdichte sind dies die wichtigsten Parameter um die gewünschte Festigkeit zielsicher zu erreichen. Aufbauend auf einer Ausfallsieblinie und darüber hinaus auf den Untersuchungen von *Fuller, Thompson* [3.1] wie auch *Andreasen* [3.2], zur Minimierung des verbleibenden Hohlraums wurde eine möglichst hohe Packungsdichte der mineralischen Ausgangsstoffe als Ziel gesetzt. Durch die Eigenschaft der Ausgangsstoffe von Zement und Sand, ist es nötig, sie entsprechend zu einer geeigneten Kombination zusammenzuführen[3.3] (Abbildung 3-1).

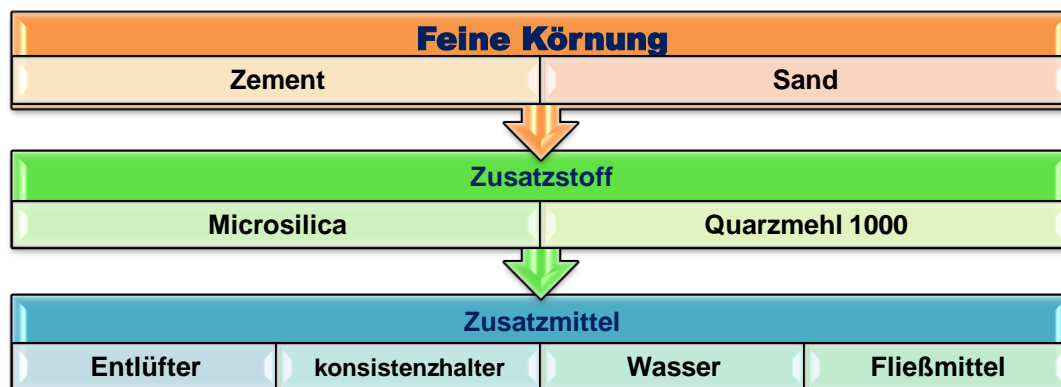


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Zusammensetzung von UHPC

Die Untersuchung basierten maßgeblich auf sechs Versuchsreihen und jenachdem eine Mischserie.

Es wurden 6 Verschiedene Mischungen hergestellt, die sich entsprechend dem Ziel dieser Arbeit durch die Zementsorten unterscheiden (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Mischungszusammensetzung im [kg/m³] für 1 m³ Beton der Mischung alle Mischserien

| Mischserien | M1 | M2 | M3 | M4 | M5: Spritzbeton | M6: Basis mit |
|------------------------------|---|--|--|---|---|---|
| Name | M1 : Basis 52,5 | M2: Basis mit Holcim Weiß | M3: Ladce | M4 :Bau mit CEM II A-L | M5: Basis mit Blaue SP | Contragres 42,5 N |
| Zementat (Portlandzement) | Portlandzement CEM I 52,5 N C ₃ A-frei | Portlandzement weiß CEM I 52,5 N | Portlandzement CEM I 52,5 R Blau | Portlandzement CEM I 42,5 N C ₃ A-frei | Portlandkomposi tzent CEM II A-L 42,5 N | Portlandkomposi tzent CEM II B-S 32,5 R |
| Zementanteil | 678.00 | 677.00 | 677.00 | 677.00 | 677.00 | 678.00 |
| Silikafume | 169.5 | 169.3 | 169.3 | 169.3 | 169.3 | 169.5 |
| Quarzmehl | 339 | 338.6 | 338.6 | 338.6 | 338.6 | 339 |
| Quarzsand 0,1- 0,5 | 927.5 | 927.5 | 927.5 | 927.5 | 927.5 | 927.5 |
| Fließmittel | 27.1 | 30.50 | 30.50 | 30.50 | 30.50 | 27.1 |
| Konsistenzhalter | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Wasser | 189.80 | 189.60 | 189.60 | 189.60 | 189.60 | 189.80 |
| w/z=0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| w/b=0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 |
| Vw/Vf=0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 |

3.2.1 Vorbereitung der Proben

Von beachtlicher Bedeutung für die nachfolgende Bemessung von Bauwerken ist ein vorab aussagekräftiger Kennwert der zu erwartenden Festigkeit. Bei Normalbeton ist nahezu jede Baustoffprüfstelle in der Lage die entsprechend benötigten Kennwerte zu ermitteln. Bei ultrahochfesten Betonen hingegen ist dies nicht mehr als selbstverständlich anzusehen. Ausschlaggebend ist hierbei ist auch oft der Probekörper selbst, der bei heute üblicherweise verwendeten Abmessungen die Prüfgeräte sehr schnell an ihre Leistungsgrenze bringen kann, weshalb vorab immer abgeklärt werden sollte, welche Probekörpergröße vom ausgewählten Labor geprüft werden bzw. welche Maschinen für die Prüfung eingesetzt werden können. Die prinzipielle Möglichkeit kleinere Probekörperabmessungen zu vereinbaren beinhaltet jedoch die wichtige Bedingung, dass die ermittelten Werte dann entsprechend umzurechnen und zu

verifizieren sind. Bei der Übertragung auf entsprechend größere Bauteile muss deshalb die Möglichkeit eines negativen Maßstabeffektes immer in Betracht gezogen werden. Insgesamt standen daher 54 Probekörper für die Festbetonprüfungen zur Verfügung. Für die Herstellung aller 54 für die Versuche benötigten Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm wurden insgesamt 6 Mischungen gemischt. Der Frischbeton wird in Prismen-schalungen gefüllt, und mit einer Folie abgedeckt. Am nächsten Tag wurden die Prismen ausgeschalt, wieder mit Folie abgedeckt und bis zur Festbetonprüfung im Labor gelagert. Aus jeder Mischung wurden mindestens drei Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm hergestellt. Unmittelbar nach dem Mischen erfolgten wieder die Frisch-betonprüfung und die Herstellung der Probekörper. (Abbildung 3-2)



Abbildung 3-2: Verarbeitung des Betons

3.3 Mischen

Mischen beeinflusst fast sämtliche Eigenschaften des Betons wobei beim Mischen von UHFB spezifischen Randbedingungen wie z.B. die geringe Wassermenge bezogen auf die Oberfläche und die für eine gute Entlüftung erforderliche fließfähige Konsistenz, zu beobachten sind.

Bei der Herstellung des Frischbetons sind dazu noch erhöhte Anforderungen an die Mischtechnik und auch die Mischreihenfolge zu stellen, darüber hinaus müssen die Mischzeiten abgestimmt werden (Abbildung 3-3).

Durch die fließfähige Konsistenz des Frischbetons besteht die Gefahr des Absetzens während des Einbringens und Verdichtens. Die Frischbetoneigenschaften wie auch die Festbetoneigenschaften werden maßgeblich von der Herstellung des Betons beeinflusst. Die Betone für kleine Prüfkörper und/oder kleine Prüfkörperserien wurden in einem 30l – Zwangsmischer gemischt. Beim Mischen werden zuerst die Gesteinskörnungen lang trocken vorgemischt und nebenbei die Feinbestandteile (wie Zement, Quarzmehl und Mikrosilica) zugegeben und insgesamt 90 Sekunden lang trocken eingemischt, bevor das Wasser und

unmittelbar darauf das Fließmittel zugegeben werden. Danach wird Wasser als auch Fließmittel und Entlüfter 30s lang untergemischt. Auffällig ist, dass die Temperatur des Betons beim Herstellungsprozess im Zwangsmischer während des Mischvorganges durch die hohe innere Reibung, der trocken vorgemischten Bestandteile, von rund 20°C auf bis zu 40°C ansteigt. Durch die hohe Frischbetontemperatur verringerte sich die Verarbeitungszeit des Frischbetons auf circa 240 Sekunden.



Abbildung 3-3: Mischung-Verfahrensprozess im Labor (Foto)

Mischverfahren im Rahmen dieser Arbeit

Zuerst werden alle trockenen Bestandteile (feine und grobe Gesteinskörnungen, Zement, Gesteinsmehle, mehlfeine/reaktive Betonzusatzstoffe) des UHFB in die Mischtrommel gegeben, zu denen, nach einer entsprechenden Trockenmischzeit, zum Vermischen der Bestandteile alle flüssigen Ausgangsstoffe in einer festgelegten Menge und Reihenfolge hinzukommen. Dabei gibt es unterschiedlichste Ansätze, wie beispielsweise die getrennte Dosierung von Fließmittel und Wasser. Betonzusatzmittel und Wasser sollten grundsätzlich abschließend in den Mischer gegeben werden.

Wird dem ultrahochfesten Beton auch Silikasuspension zugegeben, muss durch die Erstprüfung die Mischreihenfolge derart festgelegt werden, dass Klumpenbildung ausgeschlossen werden kann [I.1].

Die Herstellung von Mischungen erfolgt mit einem Intensivmischer der Firma Eirich.

Die Mischreihenfolge und die Dauer der einzelnen Mischphasen, sowie die Mischwerkzeuggeschwindigkeiten sind in der nachfolgenden Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Reihenfolge der Mischphasen, Dauer der Mischphasen und Werkzeuggeschwindigkeit

| Mischphase | [S] | [min] | Mischbehälter | Wirbler[U/min] | [M/S] |
|----------------------|-----|-------|---------------|----------------|-------|
| CEM,MS,QM | 90 | 01:30 | | 1200 | 7,9 |
| WASSER+FM+Entluefter | 30 | 00:30 | | 1200 | 7,9 |
| Mischen | 120 | .2:00 | | 1200 | 7,9 |
| Summe | 240 | 04:00 | | 0 | 0,0 |



Abbildung 3-4: Verfahrenprozess – Mischreihenfolge; Laborfoto

3.4 Frischbetonprüfungen

Es werden folgende versuche durchgeführt:

- Bestimmung des Luftgehalts
- Trichterauslaufzeit
- frischbetonrohddichte

3.4.1 Bestimmung des Luftgehalts

Der Luftgehalt (Verdichtungsporen, Luftporen) lässt sich mit dem Druckausgleichsverfahren bestimmen. Gleichzeitig wird meist auch die Frischbetonrohddichte ermittelt. Außerdem kann auf die Gleichmäßigkeit der Betonzusammensetzung geschlossen werden. Dazu wurde ein Luftporentopf, dargestellt in Abbildung 3-5, mit einem Fassungsvermögen verwendet.



Abbildung 3-5: Luftporentopf mit einem Fassungsvermögen

Um nun den Einfluss der Frischbetonrohddichte auf den Luftgehalt abzuschätzen, kann ein eindeutiger Einfluss des Luftgehalts auf die Festigkeitseigenschaft des Betons abgeleitet werden. Eigentlich führt ein geringer Luftgehalt zu einer höheren Frischbetonrohddichte, was bedeutet, dass je höher der Luftgehalt, desto geringer ist die Frischbetonrohddichte und desto höher die Festigkeitsentwicklung.

3.4.2 Trichterauslaufzeit

Die Viskosität des SVB (Selbstverdichtender Beton) wird mit der Trichterauslaufzeit (t_{Tr}) ermittelt (Abbildung 3-6).

Hierbei wird die Zeit gemessen, die der SVB benötigt, um in einem zusammenhängenden Strahl aus dem V-Trichter auszulaufen. Bei üblichen SVB liegt diese Zeit zwischen 5 sec. und 20 sec.

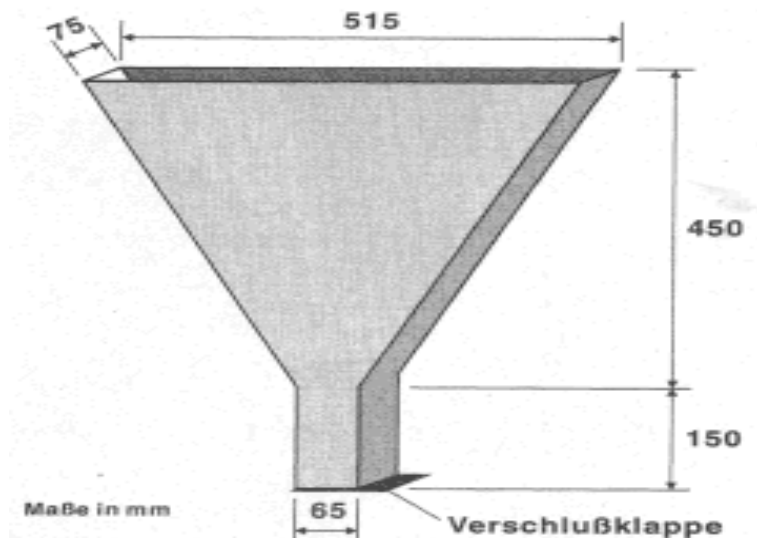


Abbildung 3-6: V-Trichter zur Ermittlung der Auslaufzeit für selbstverdichtenden Beton

3.4.3 Setzfließmaß, Ausbreitmaß bzw. Ausbreitfließmaß

Zur Feststellung der Konsistenz wird das Setzmaß sowie das Fließmaß wie im Abschnitt Grundlagen dargestellt, bestimmt. Auch eine augenscheinliche Begutachtung konnte oft erste Erkenntnisse über die Verarbeitbarkeit der Mischung geben. Eine qualitative Aussagen über die Verarbeitungseigenschaften konnten zumeist direkt aus dem Verarbeitungsprozess bei den Frischbetonprüfungen gewonnen werden.

Das Setzfließmaß ist ein Ausbreitversuch, bei dem auf das Schocken des Ausbreittisches verzichtet wird [3.25], [3.26].

Der mini-slump-Versuch eignet sich besonders zur Untersuchung von Bindemittelleimen. Nachdem die Ausbreitung des Frischbetons zum Stillstand gekommen war, wurde der Durchmesser des Frischbetonkuchens zweimal um 90° versetzt mit einer Genauigkeit von 1 mm gemessen. Während die Angabe des Setzfließmaßes in cm erfolgte, wurde für das mini-slump-

Maß, anhand des mittleren Durchmessers der Ausbreitfläche in cm^2 , unter der Annahme einer Kreisfläche berechnet. Das Ausbreitmaß bzw. das Ausbreitfließmaß sind wesentliche Kenngrößen für die Konsistenz und somit auch für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

Die für dieses Prüfverfahren notwendigen Geräte sind ein Ausbereittisch und eine Kegelstumpfförmige Form sowie ein Stößel zum Verdichten des Betons. Der frische Beton wird in zwei Schichten in die Form gefüllt. Dabei ist jede Schicht zehnmal mit dem Stößel durch leichte Stöße zu verdichten. Die Oberfläche wird plan abgestrichen. Danach wird die Form an den Handgriffen vertikal nach oben entfernt (Abbildung 3-7).



Abbildung 3-7: schematisches Foto der Bestimmung des Fließmaßes mit dem Setztrichter (Foto)

Durch folgende Einflüsse kann das Prüfergebnis verfälscht werden:

- Nachschwingen (sog. „Springen“) des Ausbreittisches meist durch unrichtige Lagerung oder ungeeigneten Untergrund.
- Erschütterungen durch hartes Anschlagen an der oberen Hebebegrenzung (Prüffehler)
- Verringerung der Fallgeschwindigkeit der Tischplatte durch zu langsames Öffnen der Finger.

Infolge der beiden erstgenannten Prüfeinflüsse werden zu große Ausbreitmaße gemessen. Dies sollte stets beachtet werden, insbesondere dann, wenn eine obere Grenze des Ausbreitmaßes als „hartes“ Abnahmekriterium vereinbart wurde. Im letzten Fall wird ein zu kleines Ausbreitmaß gemessen [D.3].

3.5 Prüfzeitpunkt

Die Mischungen wurden zeitlich versetzt hergestellt, sodass die Prüfung von Biegezug- und Druckfestigkeit nach 7-28- und 56 Tagen durchgeführt werden konnte. Dabei handelt es bei den Angaben immer um den Mittelwert aus drei Prüfungen. Die angegebenen Ergebnisse stellen den Mittelwert aus fünf Prüfungen dar.

3.6 Festbetonprüfungen

Versuchsbeschreibung der Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte, wie bereits zuvor erwähnt, an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm. Sie wurden in der Prüfmaschine der Firma Zwick (Typ z250, Güteklasse 1) nach ÖNORM B 3303 geprüft. Der prismenförmige Probekörper wird in der Prüfeinrichtung zwischen der oberen und den unteren Platt platziert. Die abgezogene Fläche hat dabei nach vorne zu zeigen. Die Lastaufbringung erfolgt mittels einer max. Prüflast von 3000 kN und eine Belastungsgeschwindigkeit von 20 N/ mm²s. Die Last ist bis zum Bruch des Probekörpers zu steigern. Aus der aufgezeichneten Höchstlast errechnet sich die Druckfestigkeit.

Versuchsbeschreibung – Biegezugfestigkeit

Die Ermittlung der Biegezugfestigkeit erfolgt an einem balkenförmigen Probekörper Die Last (F) greift in den Müttelpunkten der Stützweite an. Die Last wird mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit bis zum Bruch gesteigert. Der Versuchskörper zeigt bis zum Bruch keine mit bloßem Auge erkennbaren Verformungen. Die Biegezugfestigkeit wurde in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 immer an Prismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm in einem 3-Punkt-Biegeversuch und mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 N/s ermittelt. Die Stützweite betrug bei mittiger Lasteinleitung immer 100 mm.

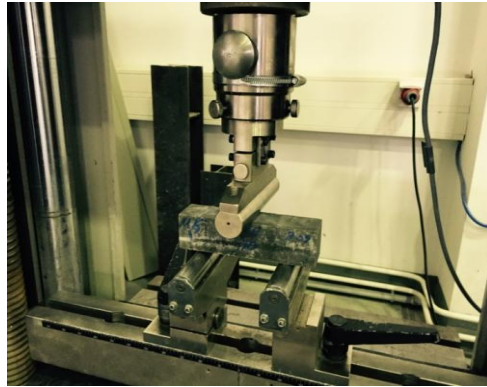


Abbildung 3-8: Biegezugfestigkeit-Prüfmaschine (Foto)

3.7 Nachbehandlungsmethoden

Da die Druckfestigkeit allein keine Dauerhaftigkeit garantiert, ist eine ausreichend lange Nachbehandlung des Betons unerlässlich, damit er vor allem in den oberflächennahen Bereichen die aufgrund ihrer Zusammensetzung gewünschten Eigenschaften auch tatsächlich erreicht, denn je geringer die Porosität und Permeabilität, d.h. je dichter der Zementstein, desto höher ist auch der Widerstand gegen die äußeren Einflüsse. Folgenden Nachbehandlungen sollen eingesetzt werden:

1. Normlagerung (NL): In Anlehnung an ÖNORM B 3303 [N.18] werden die Proben bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser bei Raumtemperatur gelagert. Danach erfolgte die weitere Lagerung an Raumluft bis zur Festbetonprüfung.
2. Luftlagerung bei Raumtemperatur 20°C (L20): Die Proben werden nach dem Ausschalen mit Folie abgedeckt und bis zur Prüfung gelagert.
3. Heißwasserlagerung bei 90°C (W90): Die Proben werden nach dem Ausschalen noch 24 h mit Folie abgedeckt gelagert. Danach werden sie im Heißwasserbecken auf 90 °C aufgeheizt. Die Wassertemperatur von 90°C wurde für 48 h aufrecht gehalten und danach wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Die weitere Lagerung erfolgt bei Raumtemperatur an Luft.
4. Heißluft 250°C (L250): Gleich wie bei L90, die maximale Temperatur von 250°C wurde hier über 6 Tage aufrecht gehalten. Die Proben werden im Anschluss daran allerdings nicht abgekühlt, sondern direkt in einen auf 90°C vorgeheizten Ofen umgelagert und sofort weiter auf 250°C aufgeheizt. Die Temperatur von 250°C wurde für 48 h gehalten. Nach der Abkühlung auf Raumtemperatur erfolgte die weitere Lagerung an Raumluft. Die Aufheiz- und Abkühlraten sind bei allen Wärmebehandlungen gleich und betragen 10 K/h.

Der zeitliche Verlauf der Lagerungsbedingungen bei den unterschiedlichen Nachbe-

handlungsarten ist übersichtlich in der nachfolgenden Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-3: Verlauf der Lagerungsbedingungen (NL Normlagerung, W90 Heißwasserlagerung 90°C, L90

| <u>Bezeichnung</u> | Lagerungsbedingungen |
|---------------------------|--|
| L20 | Lagerung an Raumluft – Temperaturraum 20°C |
| W90 | Lagerung im Heißwasser-Wassertemperatur 90°C |
| L250 | Lagerung im Heißluft-Lufttemperatur 250°C |

4 Versuchsdurchführung und Interpretation

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse als Diagramm dargestellt und interpretiert.

Die Sortierungsmerkmale der Gliederung sind:

- Zementsorte
- Festigkeit
- Erhärtungsgeschwindigkeit.

Bei den Interpretation der Ergebnisse werden die Ergebnisse je nach Zementart, Festigkeitsklasse sowie Erhärtungsgeschwindigkeit, dargestellt und verglichen (Abbildung 4).

Es wird beispielsweise innerhalb der ersten Gruppe (alle CEM I) das höchste bzw. niedrigste Ergebnis bestimmt und danach mit den Ergebnissen der zweiten Zementgruppe verglichen.

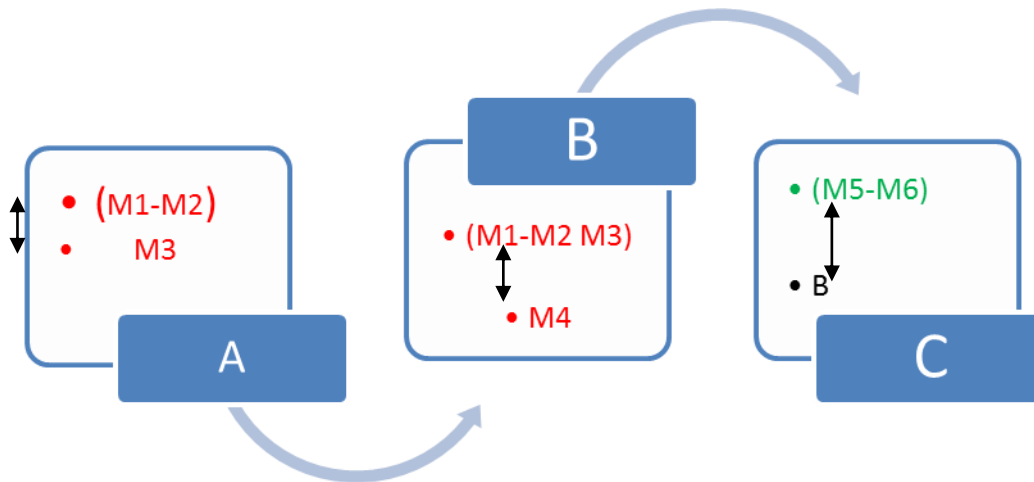


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Interpretationsmechanismus

Die Tabelle 4 zeigt, dass die verwendeten Zemente in zwei Hauptgruppen aufteilen kann.

Tabelle 4: Gruppierung der Mischungen nach Zementsorte und Festigkeitsklasse

| Zementgruppe I | Zementgruppe II |
|--|----------------------|
| M1 :CEM I 52,5 N C ₃ A-frei) | M5:CEM II B-S 42,5 N |
| M2:CEM I 52,5 N Weiss | M6:CEM II A-L 32,5 R |
| M3:CEM I 52,5 R Blau | |
| M4:CEM I 42,5 N C ₃ A-frei | |

4.1 Allgemein

Dabei kommen immer wieder Abkürzungen für Mischungs- und Probekörperbezeichnungen vor. Die Abkürzungen werden laufend im Text und in den Abbildungen erläutert, eine erste Übersicht ist in Tabelle 4-1 angegeben.

Tabelle 4-1: Abkürzungen für Mischungs- und deren Bedeutung

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|-----------------------------|
| L20 | Luftlagerung bei 20°C |
| HW90 | Heißwasserlagerung bei 90°C |
| L250 | Heißluftlagerung bei 250°C |

Bezeichnungen und Farbcode

Die farbliche Gestaltung ist in allen Diagrammen der verschiedenen Versuchsreihen durchgehend gleich. Die Farben und deren Bedeutung werden immer angegeben, in Tabelle 4-2 sind sie als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Verwendete Farben und deren Bedeutung

| Farbe | Unterscheidungsmerkmal |
|-----------|-------------------------------|
| Grau | 24 Stunden- Druckfestigkeit |
| Orange | 7 Tage- Druckfestigkeit |
| Lila | 28 Tage- Druckfestigkeit |
| Grün | 56 Tage- Druckfestigkeit |
| Schwarz | 24 Stunden-Biegezugfestigkeit |
| Rot | 7 Tage- Biegezugfestigkeit |
| Türkis | 28 Tage Biegezugfestigkeit |
| Blau | 56 Tage Biegezugfestigkeit |
| Lila | Ausbreitmaß |
| Rot | Luftgehalt |
| Orange | Frischbetonrohddichte |
| Hell Grün | Trichterauslaufzeit |

Die Versuchsauswertung erfolgt in folgende Reihenfolge:

- Bestimmung der Frischbetoneigenschaften
- Bestimmung der Festbetoneigenschaften mit verschiedenen Nachbehandlungsmethoden zu vier unterschiedlichen Prüfzeitpunkten (24S,7D,28D,56D)

4.2 Ergebnisse der Frischbetoneigenschaften

Es wurden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Bestimmung der Trichterauslaufzeit
- Bestimmung des Ausbreitmaßes f
- Bestimmung des Luftgehalts A_c mittels Druckausgleichverfahren
- Bestimmung der Frischbetonrohichte.

4.2.1 Bestimmung der Trichterauslaufzeit

Bei der Bestimmung der Trichterauslaufzeit wurde pro Mischserie jeweils einmal die Trichterauslaufzeit gemessen.

Wie Abbildung 4-1 zeigt, weist die Mischserie M1 (hergestellt mit Portlandzement CEM I 52,5 N C3A-frei) die kürzeste Auslaufzeit auf (13 Sekunden).

Die Mischserie M3 (hergestellt mit Portlandzement CEM I 52,5 R Blau) zeigt die längste Auslaufzeit und beträgt etwa 150 Sekunden.

Bei der Gruppe der CEM I Zement zeigt sich, dass sich die Trichterauslaufzeiten um mehr als das 11-fache unterscheiden.

Bei der Gruppe der CEM II Zemente ist dieser Unterschied wesentlich geringer (ca. das 3-fache). Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente eine ca. 15% längere Auslaufzeit als die CEM II Zemente besitzen. Beim Vergleich innerhalb der Zementsorte CEM I zeigt sich, dass Zemente mit schnellster Früherhärtung (R) eine höhere Trichterauslaufzeit aufweisen. Dieses Phänomen lässt sich bei den gewählten Zementen der Klasse CEM II nicht nachweisen.

Ein Zusammenhang zwischen der Zementfestigkeitsklasse und der Trichterauslaufzeit lässt sich ebenfalls nicht ableiten.

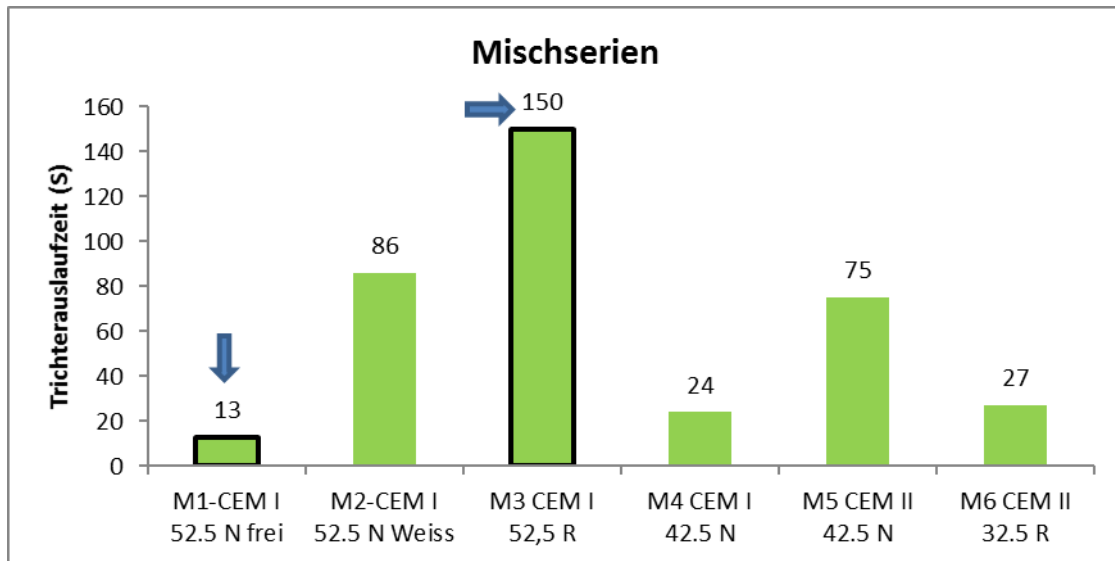


Abbildung 4-1: Trichterauslaufzeit aller Mischserien in Sekunden

4.2.2 Bestimmung des Ausbreitmaßes (f)

Die Abbildung 4-2 stellt die Ergebnisse zur Bestimmung des Ausbreitmaßes jeder Mischung dar.

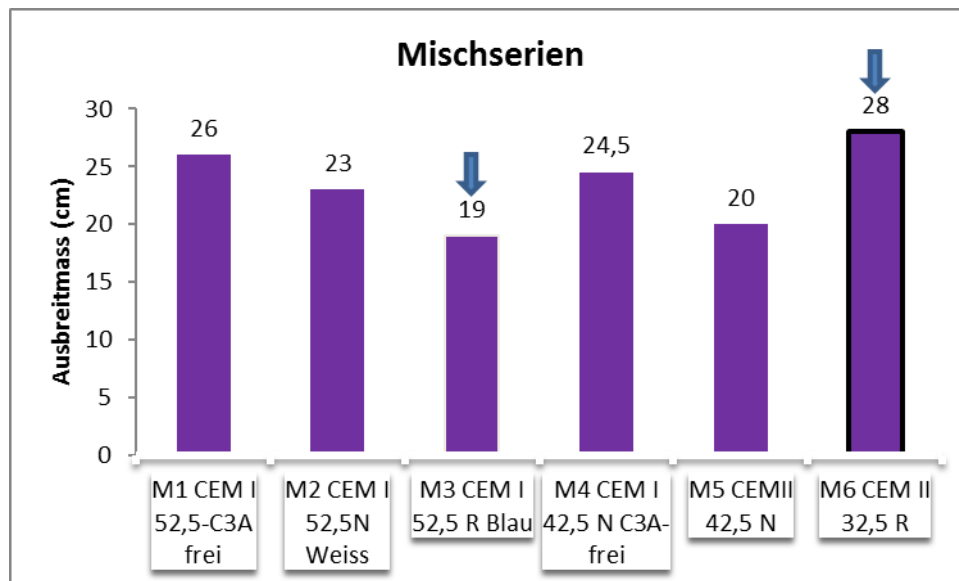


Abbildung 4-2: Ausbreitmaß aller Mischserien

Das Ausbreitmaß aller Mischserien beträgt für alle Mischungen zwischen 19 und 28 cm. Eine Verringerung des Ausbreitmaßes, als Maß für die Konsistenz des Frischbetons, weist auf eine schlechtere Verarbeitbarkeit des Frischbetons hin.

Mischungen wie M3 (hergestellt mit Portlandzement CEM I 52,5 R), die ein niedriges Ausbreitmaß zeigen, weisen eine plastischere Konsistenz als jene mit einem höheren Ausbreitmaß auf.

Eine eindeutige Tendenz beim Ausbreitmaß zwischen CEM I und CEM II Zementen lässt sich aufgrund der durchgeführten Versuche nicht nachweisen.

Innerhalb der Gruppe der CEM I Zemente zeigt sich auch hier ein eindeutiger Trend, im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse der jeweiligen Zemente und dem Ausbreitmaß. Dieses Bild zeigt sich auch beim Vergleich zwischen CEM I und CEM II Zementen, wobei sich jedoch ein Zusammenhang zwischen der Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R) und der Zementsorte nicht herstellen lässt. Bei gleichbleibendem W/Z-Wert und Microsilicagehalt war der Beton M6 fließfähig (Ausbreitmaß = 28 cm) und der Beton M3 dagegen deutlich steifer (Ausbreitmaß=19 cm).

4.2.3 Bestimmung des Luftgehalts Ac mittels Druckausgleichverfahren

Neben der Trischterauslaufzeit und dem Ausbreitmass wurde im Rahmen dieser Arbeit der Luftgehalt des Frischbetons bestimmt. Selbst vollständig verdichteter Beton enthält noch eine geringe Menge an Luft in Form von kleinen Bläschen (Verdichtungsperen).

Wesentlich für die Homogenität des Betons ist ein möglichst geringer Luftgehalt. Der Luftgehalt des Frischbetons wurde in allen Mischungen gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-3 ersichtlich. Der Frischbeton wurde immer ohne Rütteln in die Schalungen eingebracht. Der Luftgehalt des Frischbetons liegt bei allen Mischungen zwischen 3,6% und 4,8 %. Die Abbildung 4-3 zeigt, dass die Mischserie M6 (CEM II B-S 32.5) den höchsten Luftgehalt aufweist. Weiters sieht man, dass die Mischserie M2 (Portlandzement weiß CEM I 52,5 N) und M5 (CEM II A-L 42,5) den gleichen Luftgehalt aufweisen (4,1%). Wie im Diagramm dargestellt, haben die Mischserie M3 sowie M4 mit 3,6% den niedrigsten Luftgehalt.

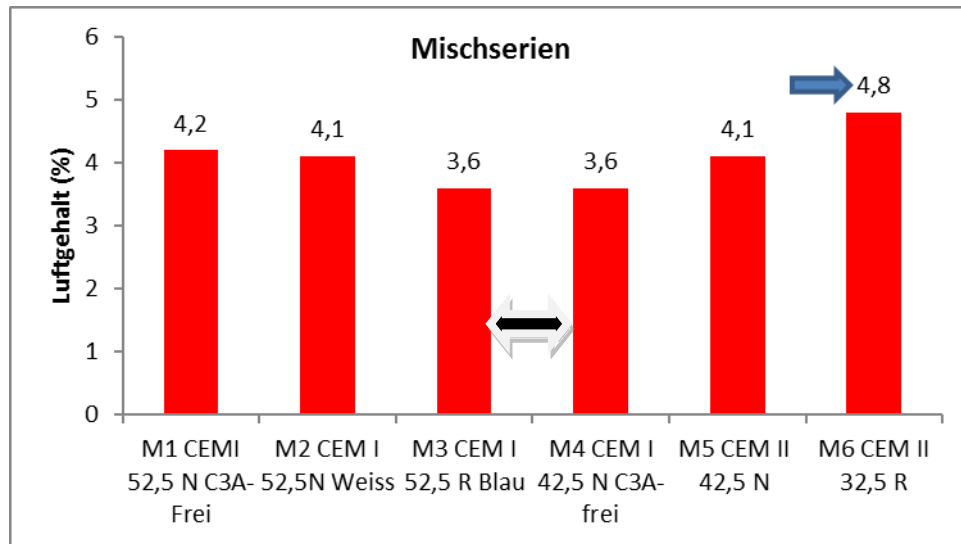


Abbildung 4-3: Frischbetonluftgehalt aller Mischserien

4.2.4 Bestimmung des Frischbetonrohichte

In Abbildung 4-4 wird ein Überblick über alle Ergebnisse der Frischbetonrohichte gegeben. Die Frischbetonrohichte beträgt für alle Mischungen zwischen 2250 und 2310 kg/m³.

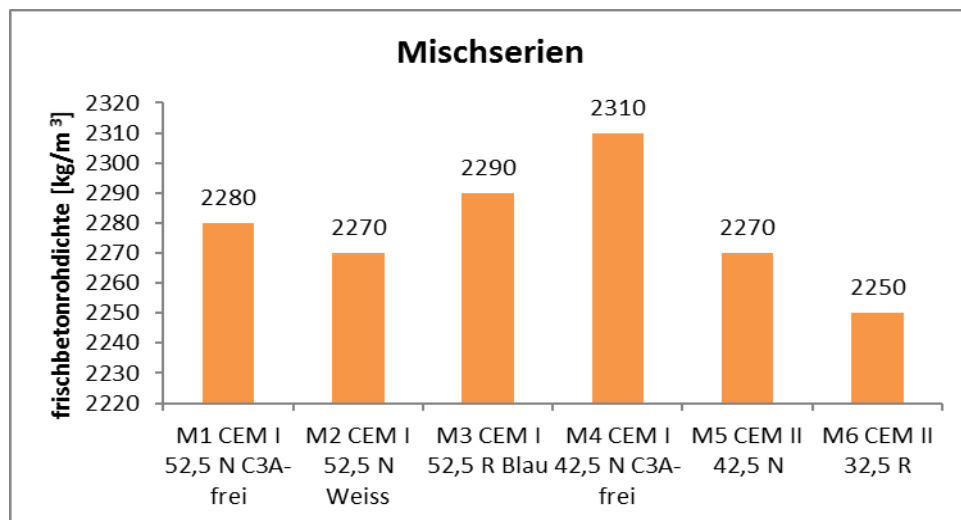


Abbildung 4-4: Frischbetonrohichte aller Mischserien

Es bestätigt sich bei den Ergebnissen, dass die Mischserie M6 mit dem höchsten Luftgehalt 4,8% die geringste Frischbetonrohichte mit 2250 kg/m³ aufweist. Die höchste Frischbetonrohichte wurde bei der Mischserie M4 festgestellt und beträgt 2310 kg/m³.

Der Vergleich der Mischserien M6 und M4 zeigt die maximale Differenz der

Frischbetonrohddichte von 60 kg/m^3 . Innerhalb der zweiten Zementgruppe wurde eine Minderung der Frischbetonrohddichte um 0.88% festgelegt.

Bei den Maximal werten innerhalb der beiden Zementgruppen,d.h der Mischung M4 und Mischung M5, liegt dieser Unterschied etwa bei 40 kg/m^3 . Das oben dargestellte Diagramm zeigt, dass die Mischserien mit gleichem Massenanteil von Zusatzstoffen oder Zusatzmittel nicht immer gleiche Ergebnisse liefern. Wie bereits gesagt, können hier andere Parameter sowie die Zementart des Betons die Ergebnisse beeinflussen. Der Einfluss der unterschiedlichen Zementsorten auf die Frischbetoneigenschaften ist auch hier bei der Frischbetonrohddichte deutlich zu erkennen.

4.2.5 Schlussergebnisse aus den Untersuchungen zu den Frischbetoneigenschaften

Tabelle 4-3: Minimal- und Maximalwerte der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit von der Zementart

| Mischungen | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
|-----------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| Zementsorten | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I 52,5R Blau | CEM I 42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N | CEM II 32,5 R |
| Trichterauslaufzeit | 13 | 86 | 150 | 24 | 75 | 27 |
| Ausbreitmass | 26 | 23 | 19 | 24.5 | 20 | 28 |
| Frischbetonrohddichte | 2280 | 2270 | 2290 | 2310 | 2270 | 2250 |
| Luftgehalt | 4.2 | 4.1 | 3.6 | 3.6 | 4.1 | 4.8 |

Grundsätzlich hat die Verringerung des Luftgehaltes, wie bereits bekannt, einen Einfluss auf die Frischbetonrohddichte. Ein geringerer Luftgehalt führt zu einer höheren Frischbetonrohddichte. Versucht man aus dem Ergebnis der Tabelle 4-4 eine Gesamtbewertung der einzelnen Zementsorten im Vergleich der gewählten Zemente herzustellen, so kann man das einfache Notenverfahren anwenden. Das bedeutet, dass z.B. der Zement mit der kürzesten Trichterauslaufzeit (positiv), die Note „eins“ bekommt und der Zement mit der längsten Trichterauslaufzeit die höchste Note „sechs“.

Tabelle 4-4: Beurteilungssystem - Gesamtergebnisse der Frischbetoneigenschaften

| Zementsorten | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
|---|----------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I 52,5R Blau | CEM I 42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N | CEM II 32,5 R |
| Trischterauslaufzeit (gering ist positiv) | 1 | 5 | 6 | 2 | 4 | 3 |
| Ausbreitmass (gering ist positiv) | 5 | 3 | 1 | 4 | 2 | 6 |
| Frischbetonrohddichte (gering ist positiv) | 5 | 4 | 3 | 1 | 4 | 6 |
| Luftgehalt (gering ist positive) | 5 | 3 | 1 | 1 | 3 | 6 |
| Gesamt | 16 | 15 | 11 | 8 | 13 | 21 |

Beim Versuch, eine Gesamtbeurteilung der gewählten Zementsorten und in Anbetracht der in diesem Zusammenhang definierten positiven bzw. negativen Eigenschaften, zeigt sich, dass die CEM I 42,5 Zemente in Bezug auf Frischbetoneigenschaften positive Eigenschaften aufweisen.

4.3 Ergebnisse der Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit wurde an allen Proben bei einem Betonalter von 24 Stunden, 7, 28 und 56 Tage bestimmt. Bei den Festigkeitsangaben handelt es sich dabei immer um den Mittelwert aus drei geprüften Probekörpern (Prismen).

4.3.1 Ergebnisse der 24 Stunden Biegezugfestigkeit L20

Abbildung 4-4 zeigt einen Überblick über alle Ergebnisse als Mittelwerte der 1 Tag Biegezugfestigkeiten. In Hinsicht auf die Biegezugfestigkeit, liefert die Mischung M3 das beste Ergebnis; diese beträgt $11,8 \text{ N/mm}^2$. Die Festigkeitsentwicklung der Mischungsserie M6 (Ladce CEM II B-S 32.5) war derart langsam, dass nach 24 Stunden keine Biegezugfestigkeit bestimmt werden konnte.

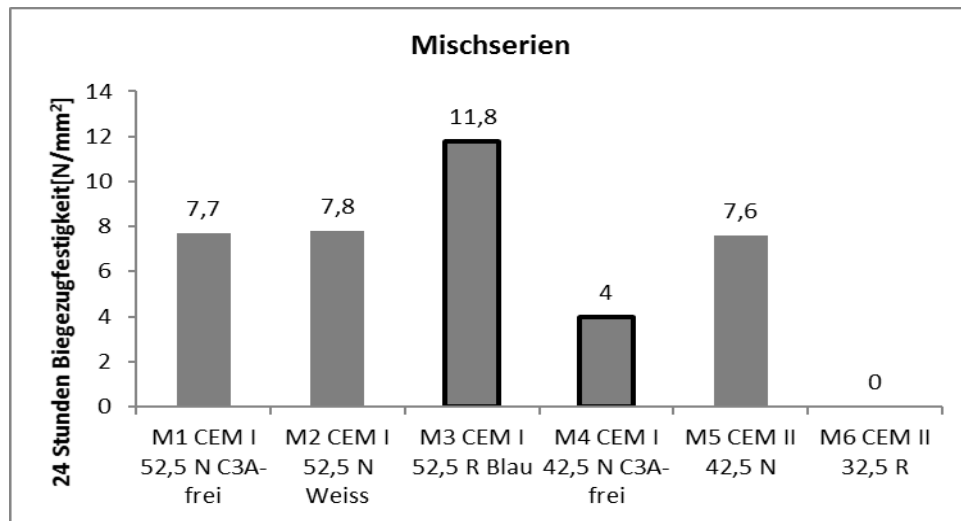


Abbildung 4-4: 24 Stunden-Biegezugfestigkeit

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente durchschnittlich bessere Werte als die der CEM II Zemente erzielen. Die absolut höchste 24 Stunden-Biegezugfestigkeit zeigt die Mischung M3 (bei Verwendung CEM I 52,5 R Blau), welche 11,8 N/mm² beträgt. Innerhalb der Gruppe der CEM I Zemente zeigt sich auch, dass die Biegezugfestigkeit der Mischung M3 fast das Dreifache von Mischung M4 beträgt.

Bei der Festigkeitsentwicklung innerhalb der CEM I Zemente mit definierter normaler Festigkeitsentwicklung (N) wurde kein wesentlicher Unterschied zwischen den Mischungen M1 und M2 erkannt. Innerhalb der CEM I Zemente und bei gleicher Festigkeitsklasse (siehe die Mischungen M1/M2/M3) zeigt sich, dass die Zemente mit der schneller Früherhärtung (R), erwartungsgemäß die höchste 24 Stunden-Biegezugfestigkeit aufweisen. In Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit innerhalb der beiden Zementgruppen, ist der CEM I 52,5 R Blau Zement besser geeignet. Hinsichtlich der Festigkeitsklasse (42,5) innerhalb der CEM I und CEM II Zemente, ist die CEM II 42,5 N (Mischung M5) besser als CEM I 42,5 C3A frei Zemente (Mischung M4). Betreffend der Festigkeitsklasse zeigt der CEM I 52,5R Blau Zement innerhalb der CEM I Zemente im Vergleich zu anderen CEM I Zementen eine bessere Festigkeitsentwicklung.

4.3.2 Ergebnisse der 7 Tage - Biegezugfestigkeit

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsentwicklung bei allen Mischungen sind in 4-5 bis 4-14

dargestellt und werden im Detail betrachtet.

4.3.2.1 Ergebnisse der 7 Tagen Biegezugfestigkeit L20

Die Prüfergebnisse der 7 Tage-Biegezugfestigkeit, die bei L20 nachbehandelt wurden, sind in Abbildung 4-5 dargestellt.

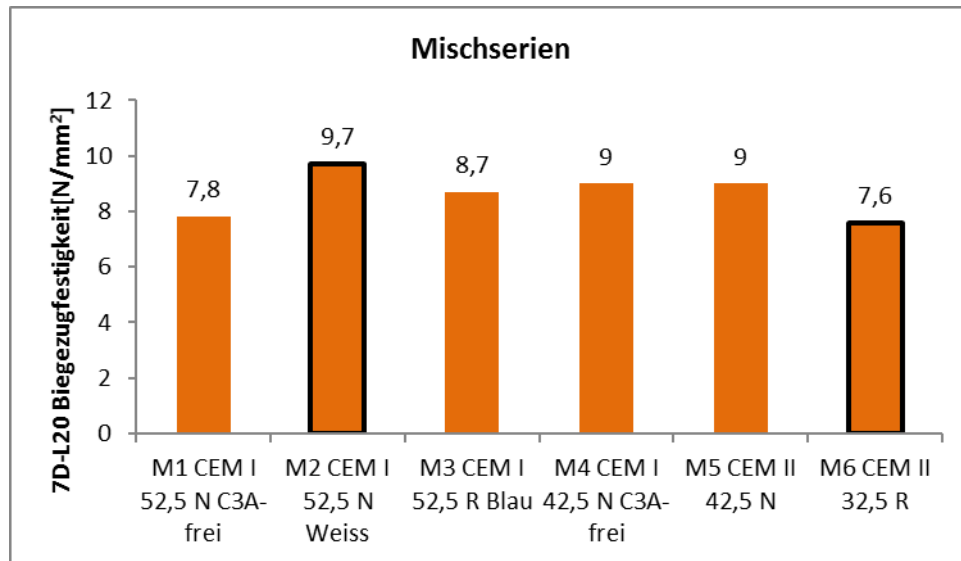


Abbildung 4-5: Ergebnisse der 7 Tage-Biegezugfestigkeit, bei L20

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente ähnliche Werte besitzen wie jene der CEM II Zemente.

Die Mischung M2 besitzt die absolut höchste 7 Tage-Biegezugfestigkeit (bei Verwendung des Portlandzements weiß CEM I 52,5 N), diese beträgt 9,7 N/mm². Die geringste Biegezugfestigkeit erreichte die Mischung M6 bei Verwendung des Portlandkompositzements CEM II B-S 32,5 R (7,6 N/mm²). Bei der Mischung M2 wurde eine Biegezugfestigkeit von 9,7 N/mm² festgestellt, was einen um 2,1 N/mm² hohen Unterschied zur Mischung M6 aufweist. Bezüglich der Festigkeitsklasse (52,5) zeigt der CEM I 52,5 N Weiß innerhalb der CEM I Zemente bessere Eigenschaften. Dieses Bild zeigt sich beim Vergleich zwischen den Mischungen M4 und M5 in Bezug auf die (42,5) Festigkeitsklasse, wobei kein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der Biegezugfestigkeit erkennbar ist. Innerhalb der CEM I und CEM II Zemente, im Zusammenhang mit der Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R), zeigt sich, dass die Zemente mit der schnellen Früherhärtung (R) nicht immer die höhere Festigkeit liefern (siehe die Mischungen M3/M6).

4.3.2.2 Ergebnisse der 7 Tage – Biegezugfestigkeit - HW90

Die Prüfergebnisse der 7 Tage-Biegezugfestigkeit, nachbehandelt bei HW90, sind in Abbildung 4-6 dargestellt.

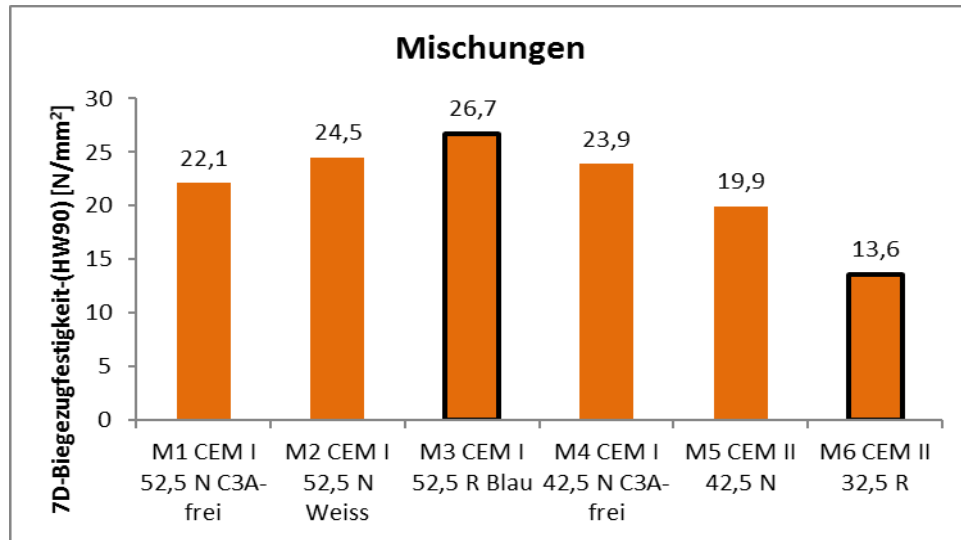


Abbildung 4-6: Ergebnisse der 7 Tage-Biegezugfestigkeit bei HW90

Die Mischung M3 (CEM I 52,5 R Blau) zeigt die absolut höchste Festigkeit, diese beträgt 26,7N/mm². Die Mischung M6 (hergestellt mit CEM II 32,5 N Zemente) zeigt die absolut niedrigste Biegezugfestigkeit, die 13,6 N/mm² beträgt.

Vergleicht man die gewählten Gruppen der nachbehandelten Zementsorten bei 90°C gelagerten Probekörpern im Heißwasser, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine bessere Festigkeit als die der CEM II Zemente besitzen. Betrachtet man bei diesem Diagramm die Schwankungsbereite innerhalb der Festigkeitsentwicklung, so erkennt man, dass bei der Zementfestigkeitsklasse 42,5 eine Schwenkung um 32% und bei der Zementfestigkeitsklasse 52,5 eine Steigerung um 18% gemessen wurde. Ein Zusammenhang zwischen der Erhärtungsgeschwindigkeiten (N, R) und der Festigkeitsentwicklung ist hier nicht erkennbar. Innerhalb der CEM II Zemente – in Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit (R, N) – zeigt die Mischung M6 (Zemente mit schnellster Früherhärtung R) eine geringere Biegezugfestigkeit als die Mischung M5. Weiters zeigt die Mischung M3 (Zemente mit der schnellsten Früherhärtung), innerhalb der CEM I Zemente, eine höhere Festigkeit. In Hinblick auf die Zementfestigkeitsklasse (52,5), zeigt sich bei den gewählten Zementgruppen (siehe die Mischungen M1/M2/M3) kein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit dem jeweiligen Zement und der Festigkeitsentwicklung.

4.3.2.3 Ergebnisse der 7 Tagen Biegezugfestigkeit L250

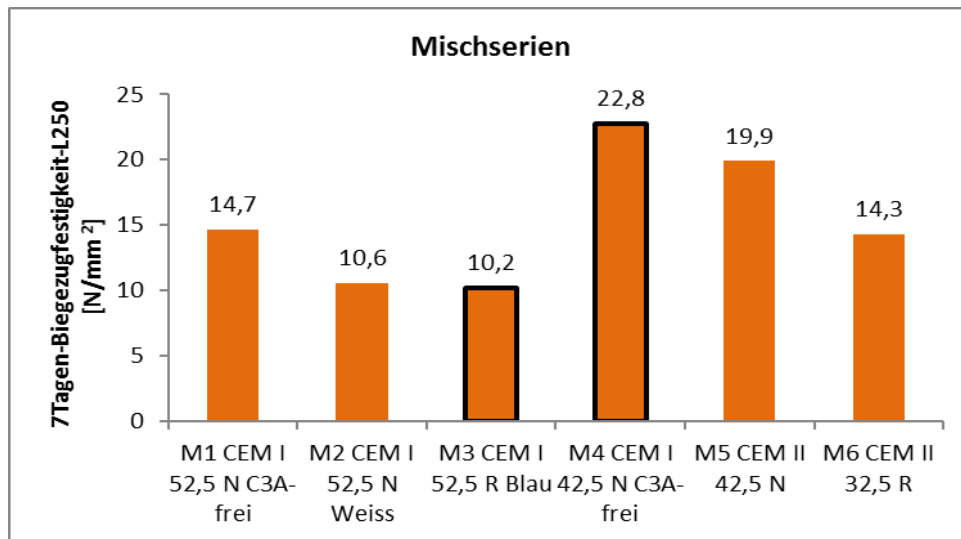


Abbildung 4-7: Ergebnisse 7 Tage Biegezugfestigkeit (L250)

Betrachtet man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt geringere Wert für die Biegezugfestigkeit besitzen, als die CEM II Zemente. Innerhalb der beiden CEM I Zemente hat die Mischung M4 die höchste 7 Tage-Biegezugfestigkeit (22,8 N/mm²) und die Mischserie M3 die niedrigste Biegezugfestigkeit (10,2 N/mm²).

Vergleicht man die Mischungen M3/M4, so erkennt man, dass die Mischung M4 (hergestellt mit CEM I 42,5 N frei) eine ca. 2,24-fache Festigkeit der Mischung M3 (CEM I 52,5 R Blau) besitzt. Innerhalb der Gruppe der CEM I Zemente in Bezug auf die Festigkeitsklasse 52,5 (siehe die Mischungen M1/M2/M3), zeigt sich betreffs der Festigkeitsklasse 52,5 (siehe die Mischungen M1/M2/M3) kein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der jeweiligen Festigkeitsentwicklung. Diesbezüglich (z.B. bei der Zementfestigkeitsklasse 42,5) zeigen der CEM I 42,5 N Zement und der CEM II 42,5 N Zement eine bessere Eigenschaft als andere Zementsorten. Innerhalb der CEM I Zemente (siehe Mischungen M1/M2/M3) und CEM II Zemente (Mischung M5/M6), ist bei der Festigkeitsentwicklung eine Schwankungsbreite erkennbar. Betrachtet man die Schwankungsbreite in Bezug auf die Zementfestigkeitsklassen (52,5 und 42,5), so zeigt sich, dass bei der Zementfestigkeitsklasse 52,5 eine Festigkeitsabnahme um 30% zur Zementfestigkeitsklasse 42,5 und eine Minderung um 12,8% zur Festigkeitsklasse 32,5 gemessen wurde. In Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit innerhalb der beiden

gewählten Zementsorten treten hier die CEM I 42,5 N C3A-frei Zemente und dann die CEM II 42,5 N Zemente mit besseren Eigenschaften hervor. Insofern (Erhärtungsgeschwindigkeit) wird erkennbar, dass Zemente mit schnellster Früherhärtung (R) die geringste Festigkeit aufweisen.

4.3.2.4 Maximale-und minimale 7 Tage-Biegezugfestigkeit als Überblicksdiagramm

In Abbildung 4-8 ist ein Überblicksdiagramm in Bezug auf die niedrigste und höchste Festigkeit der 7-Tage-Biegezugfestigkeit als Mittelwert gegeben.

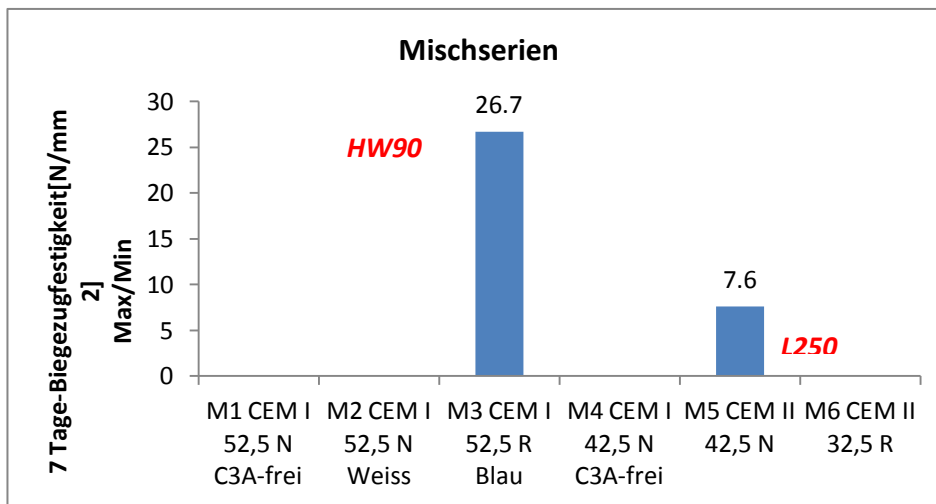


Abbildung 4-8: Maximale und minimale 7-Tage Biegezugfestigkeit

Die absolut höchste Biegezugfestigkeit erreichte die Mischserie M3 (CEM I 52,5 R), die bei der Heißwasserlagerung nachbehandelt und nach einer Woche gemessen wurde. Diese beträgt 26.7 N/mm². Die niedrigste 7 Tage-Biegezugfestigkeit erreichte die Mischung M6 (CEM II B-S 32,5R) bei L250, welche 7.6 N/mm² beträgt. Dieses Bild veranschaulicht auch, dass ein Zusammenhang zwischen der Erhärtungsgeschwindigkeit (N,R) und der Festigkeitsentwicklung innerhalb CEM I und CEM II Zemente erkennbar ist, obwohl die Mischung M3 (max.) das 3.51-fache der Mischung M6 (min) betragen kann.

4.3.3 Ergebnisse der 28 Tagen Biegezugfestigkeit

Die Prüfergebnisse der 28 Tage-Biegezugfestigkeit bei (L20, HW90, L250) sind ebenfalls als Säulendiagramm dargestellt.

4.3.3.1 Bestimmung der 28 Tagen Biegezugfestigkeit L20

In Abbildung 4-9 ist ein Überblick von allen Ergebnissen bei der Festigkeitsentwicklung der 28 Tage-Biegezugfestigkeit (L20) als Mittelwert dargestellt.

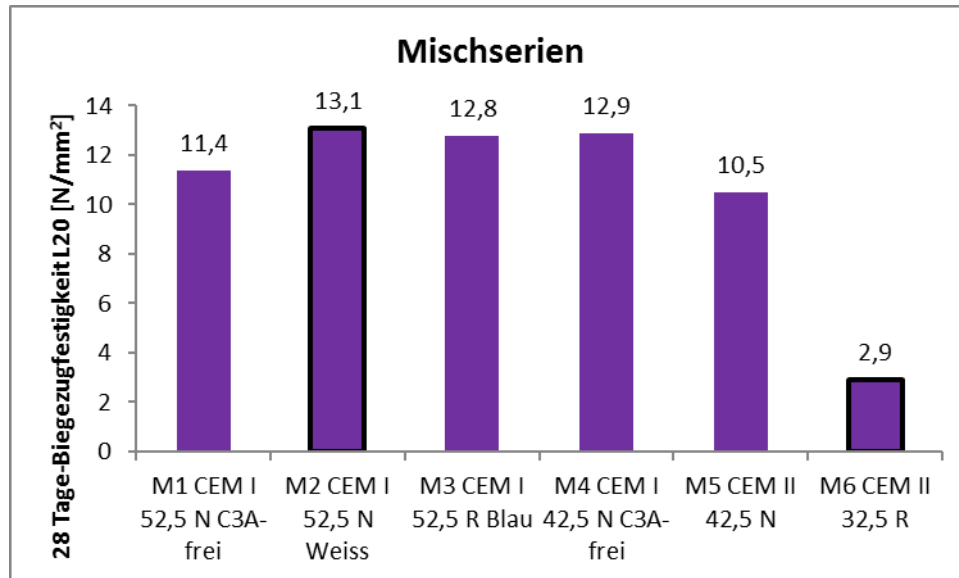


Abbildung 4-9: Ergebnisse der 28-Tage Biegezugfestigkeit des hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt L20

Vergleicht man die gewählten Zementgruppen, so geht hervor, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine bessere Festigkeit als die CEM II Zemente besitzen.

Die absolut höchste Biegezugfestigkeit, nachbehandelt bei L20, zeigt die Mischung M2 bei Verwendung der Zementart Portlandzement CEM I 52,5 N-Weiss (13,1 N/mm²) und die absolut niedrigste 28 Tage Biegezugfestigkeit zeigt die Mischung M6 (bei Verwendung der Zementart Portlandkompositzement CEM II 32,5 R), diese beträgt 2,9 N/mm². Ein Zusammenhang zwischen der Zementfestigkeitsklasse (52,5) und der Festigkeitsentwicklung innerhalb der CEM I Zemente lässt sich hier nicht ableiten (siehe M1/M2/M3). Ein Zusammenhang mit der Festigkeitsentwicklung innerhalb CEM II Zemente (Mischungen M5/M6) ist zu sehen. Was die Festigkeitsklassen (42,5-32,5) und der Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R) betrifft, wurde eine Minderung innerhalb der CEM II Zemente ein Unterschied von 7,6 N/mm² gemessen. Innerhalb der CEM II Zemente haben Zemente mit normaler Erhärtungsgeschwindigkeit (N) eine höhere Festigkeit als Zemente mit schnellerer Früherhärtung (R) (siehe die Mischung M6/M5).

4.3.3.2 Ergebnisse der 28 Tage - Biegezugfestigkeit HW90

In Abbildung 4-10 ist ein Überblick über die Proben der 28 Tage-Biegezugfestigkeit nachbehandelt mit Heißwasserlagerung bei 90°C dargestellt. Die als Mittelwert veranschaulichten Versuchswerte werden wie folgt interpretiert.

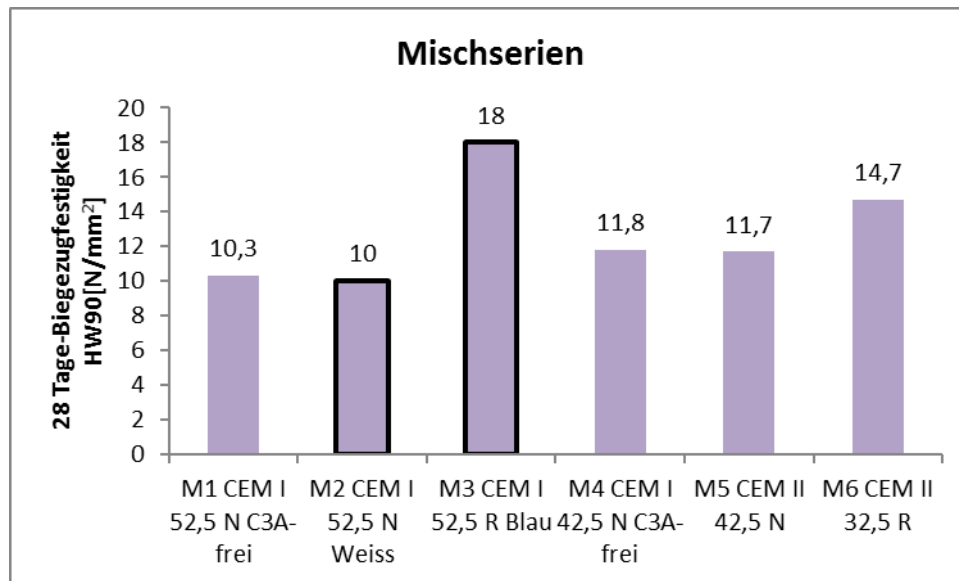


Abbildung 4-10: Ergebnisse der 28-Tage Biegezugfestigkeit des UHPC, nachbehandelt HW90

Vergleicht man die gewählten Zementgruppen, so stellt sich heraus, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt geringere Werte als CEM II Zemente besitzen. Die Mischung M3 misst innerhalb der CEM I Zemente die höchste 28 Tage-Biegezugfestigkeit (18 N/mm²), die Mischung M2 die niedrigste Biegezugfestigkeit (10 N/mm²). Betrachtet man in der Grafik der 28 Tage-Biegezugfestigkeit die Gruppen der CEM I Zemente, so weist die Mischung M3 einen Unterschied in Höhe des 1,8-fachen der Mischungen M2 auf. In Anbetracht der Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R) innerhalb der CEM I und CEM II Zemente geht hervor, dass die Zemente mit schneller Früherhärtung (R) die höchste Biegezugfestigkeit aufweisen. Betreffend der Zementfestigkeitsklasse (42,5) wurde bei den Mischungen M4/M5 fast die gleiche Biegezugfestigkeit gemessen. Innerhalb der Gruppe CEM II Zemente zeigt sich hier ein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse der jeweiligen Zemente bzw. der Biegezugfestigkeit dar. Die Mischserie M6 verfügt im Vergleich zur Mischung M5 eine höhere Biegezugfestigkeit (14,7 N/mm²).

4.3.3.3 Ergebnisse der 28 Tage - Biegezugfestigkeit L250

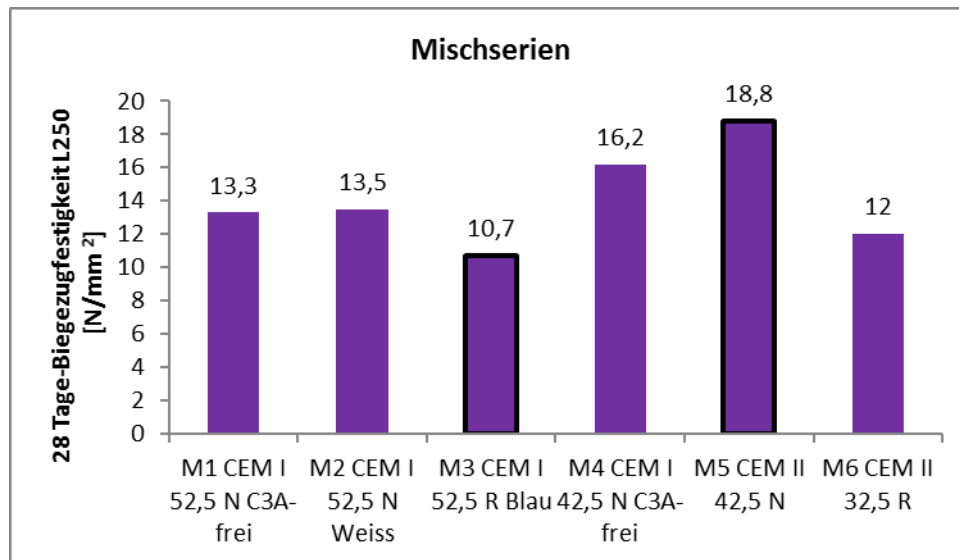


Abbildung 4-11: Ergebnisse der 28-Tage Biegezugfestigkeit des UHPC, nachbehandelt L250

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten (Abbildung 4-11), so fällt auf, dass sich die Gruppe der CEM II Zemente im Durchschnitt durch einen besseren Wert kennzeichnen als die CEM I Zemente. Die Abbildung lässt indes erkennen, dass beim Vergleich zwischen CEM I und CEM II Zementen ein Zusammenhang zwischen der Erhärtungsgeschwindigkeit (R) und der Festigkeitsentwicklung erkennbar ist. Innerhalb der beiden Zementsorten und beim Vergleich zwischen den Mischungen mit der Erhärtungsgeschwindigkeit (N), ist erkennbar, dass Zemente mit schneller Früherhärtung (R) die geringeren 28 Tage-Biegezugfestigkeiten aufweisen. Innerhalb der Gruppe der CEM II Zemente wird ein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse der jeweiligen Zemente und der Biegezugfestigkeit sichtbar. Demzufolge ist die Mischung M5 (CEM II 42,5 N) innerhalb der CEM II Zemente im Vergleich zur Mischung M6 besser. Bei der Gruppe der CEM I Zemente besitzt die Mischung M3 im Vergleich zu M4 eine geringere 28 Tage-Festigkeit, die sich um $5,5 \text{ N/mm}^2$ unterscheidet. Hier wurde die absolut höchste 28 Tage-Biegezugfestigkeit, im Vergleich zu allen anderen Mischserien, bei der Mischung M5 (CEM II A-L 42,5 N) gemessen, welche $18,8 \text{ N/mm}^2$ beträgt. Die geringste Biegezugfestigkeit zeigt die Mischung M3 mit $10,7 \text{ N/mm}^2$.

4.3.4 Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit

In Abbildung 4-12 ist ein Überblick über die Proben der 56 Tage-Biegezugfestigkeit nachbehandelt mit Heißwasserlagerung bei 90°C dargestellt. Die als Mittelwert veranschaulichten Versuchswerte werden wie folgt interpretiert.

4.3.4.1 Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit L20

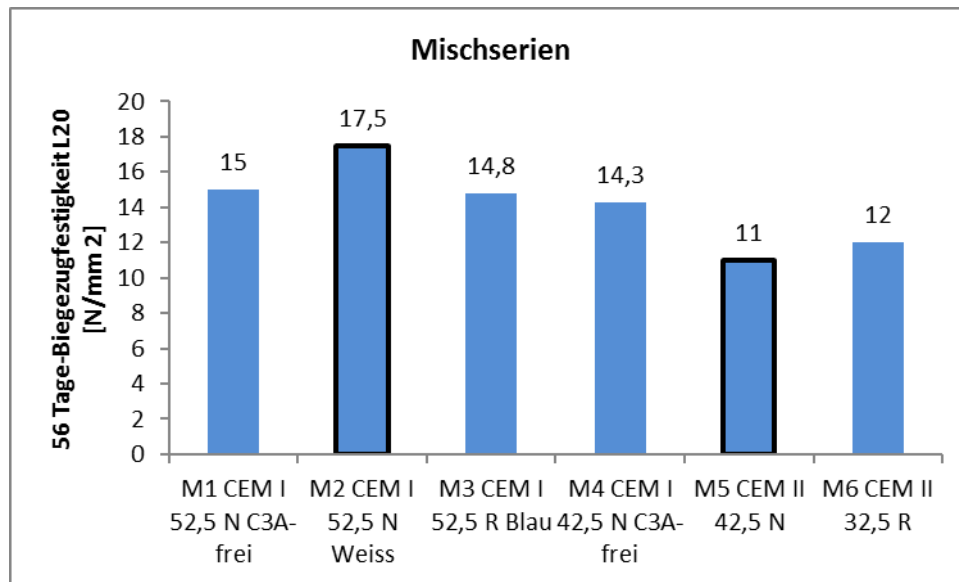


Abbildung 4-12: Ergebnisse 56 Tage-Biegezugfestigkeit des hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt L20

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten (Abb.4-12), so geht hervor, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine bessere Festigkeit besitzt, als jene der CEM II Zemente. Die Mischung M2 besitzt (bei Verwendung der Zementart Portlandzement CEM I 52,5 N Weiss) die höchste 56 Tage-Biegezugfestigkeit, welche 17.5 N/mm² beträgt. Die Mischung M5 zeigt innerhalb der CEM I und CEM II Zemente die absolut niedrigste 56 Tage-Biegezugfestigkeit (11 N/mm²).

Innerhalb der CEM II Zemente wurde eine Festigkeitssteigerung um 1 N/mm² von der Festigkeitsklasse 42,4 zur Festigkeitsklasse 32,5 gemessen (siehe M5/M6). Ein Zusammenhang zwischen der Erhärtungsgeschwindigkeit und der Festigkeitsentwicklung lässt sich innerhalb CEM II Zemente eindeutig ableiten. Dieser Zusammenhang ist innerhalb der CEM I Zemente nicht zu sehen. Beim Vergleich innerhalb der CEM II Zemente zeigt sich, dass Zemente mit der schnellen Früherhärtung (R) eine höhere Biegezugfestigkeit aufweisen.

Abbildung 4-12 zeigt auch, dass innerhalb der CEM I Zemente in Bezug auf die Zementfestigkeitsklasse kein Zusammenhang mit der Biegezugfestigkeitsentwicklung hergestellt werden kann.

4.3.4.2 Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit HW90

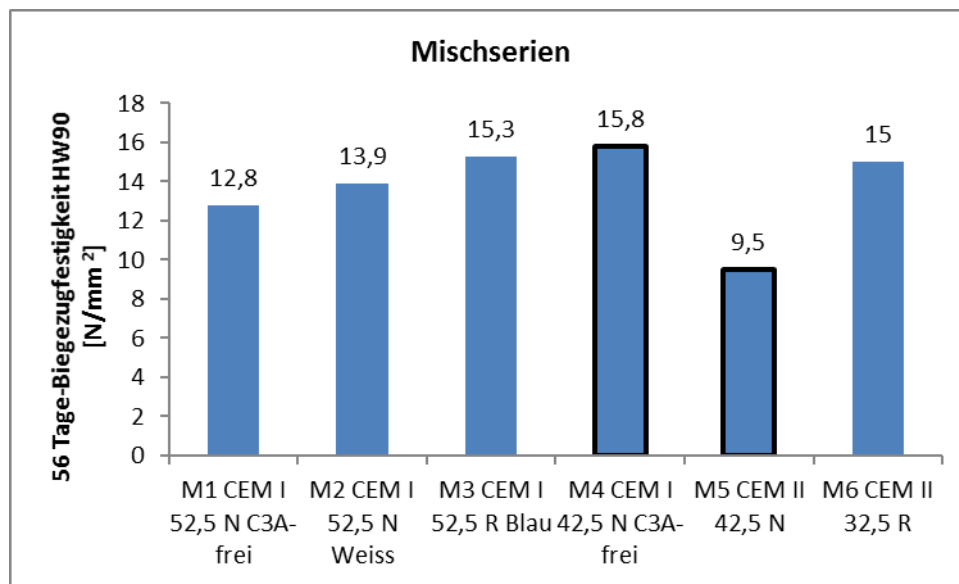


Abbildung 4-13: Ergebnisse 56Tage-Biegezugfestigkeit des hergestellte UHPC –nachbehandelt HW 90

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten (Abb.4-13), so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine bessere Festigkeit besitzt, als jene der CEM II Zemente. In Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit innerhalb der CEM II Zemente zeigt die Mischserie M6 (CEM II 32,5 R) eine höhere Biegezugfestigkeit als die Mischserie M5. Aus dem Vergleich innerhalb der CEM I Zemente bezüglich Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R) und Festigkeitsklasse folgt, dass Zemente mit schnellerer Früherhärtung (R) und Festigkeitsklasse 52,5 eine geringere Biegezugfestigkeit aufweisen (siehe die Mischungen M3/M4). Innerhalb der Gruppe CEM II Zemente zeigt sich ein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse der jeweiligen Zemente und der Festigkeitsentwicklung. Ein Zusammenhang zwischen der Zementfestigkeitsklasse und der Festigkeitsentwicklung lässt sich innerhalb der CEM I Zemente (bei Mischungen M1/M2/M3) nicht ableiten. Die absolut höchste 56 Tage – Biegezugfestigkeit, nachbehandelt bei (HW90), im Vergleich zu allen anderen Mischserien, zeigt die Mischung M4 (CEM I 42,5 N C₃A-frei) mit 15,8 N/mm². Die absolut niedrigste 56 Tage -

Biegezugfestigkeit hat die Mischung M5 bei Verwendung der Zementart CEM II A-L 42,5 N (9,5 N/mm²).

4.3.4.3 Ergebnisse der 56 Tage - Biegezugfestigkeit L250

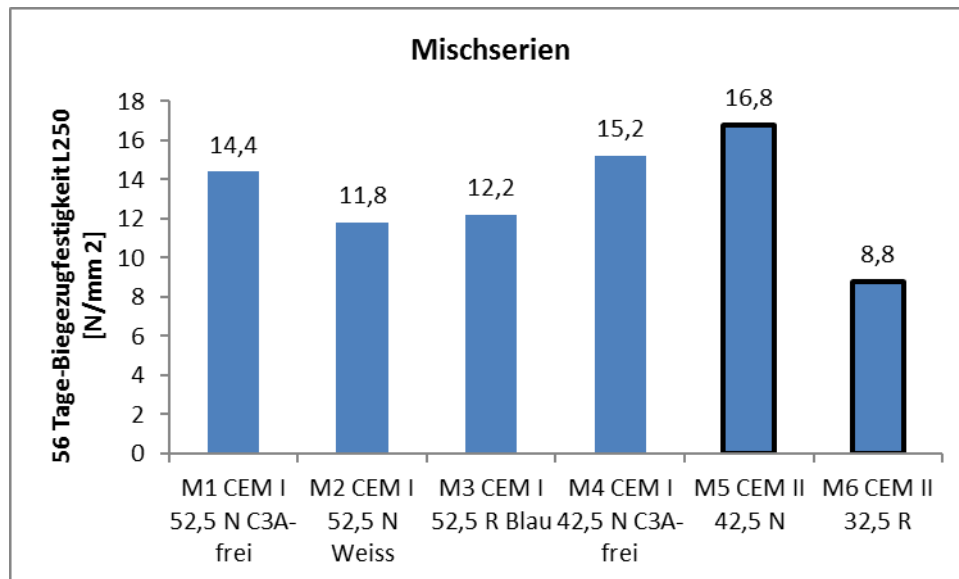


Abbildung 4-14: 56 Tage-Biegezugfestigkeit des hergestellten UHPC Proben nachbehandelt bei L250

Vergleicht man die Biegezugfestigkeit bei der Lagerung L250 der gewählten Gruppen der Zementsorten, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine bessere Festigkeit besitzen als jene der CEM II Zemente. Die Ergebnisse zeigen, dass innerhalb der CEM II Zemente ein Zusammenhang zwischen der Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R) und der Biegezugfestigkeit erkennbar ist. In Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit innerhalb der CEM II Zemente zeigt der CEM II 32,5 R eine geringere Festigkeit (8,8 N/mm²) als CEM II 42,5 N (16,8N/mm²). Innerhalb der CEM II Zemente zeigt sich ein Festigkeitsunterschied um 48%. Ein Zusammenhang zwischen der Zementfestigkeitsklasse lässt sich innerhalb der CEM I Zemente bei Mischungen (M1/M2/M3) nicht ableiten.

4.3.5 Überblick über die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsuntersuchungen

Abschließend ist in Tabelle 4-6 ein Beurteilungssystem der Gesamtergebnisse der Biegezugfestigkeiten dargestellt.

Tabell 4-6 Beurteilungssystem-Gesamtergebnisse der Biegezugfestigkeiten

| <u>Mischung</u> Zementsorten | <u>M1</u> CEM I 52,5N C3A- frei | | <u>M2</u> CEM I 52,5N weiß | | <u>M3</u> CEM I 52,5R Blau | | <u>M4</u> CEM I 42,5 N C3A-frei | | <u>M5</u> CEM II 42,5 N | | <u>M6</u> CEM II 32,5 R | |
|---------------------------------|--|------|----------------------------------|------|----------------------------------|------|---------------------------------------|------|-------------------------------|------|-------------------------------|------|
| | | | | | | | | | | | | |
| 24 h | 3 | 7,7 | 2 | 7,8 | 1 | 11,8 | 5 | 4 | 4 | 7,6 | 6 | 0 |
| 7d-L20 | 5 | 7,8 | 1 | 9,7 | 4 | 8,7 | 2 | 9 | 2 | 9 | 6 | 7,6 |
| 7d-HW90 | 4 | 22,1 | 2 | 24,5 | 1 | 26,7 | 3 | 23,9 | 5 | 19,9 | 6 | 13,6 |
| 7d-L250 | 3 | 14,7 | 5 | 10,6 | 6 | 10,2 | 1 | 22,8 | 2 | 19,9 | 4 | 14,3 |
| 28d-L20 | 4 | 11,4 | 1 | 13,1 | 3 | 12,8 | 2 | 12,9 | 5 | 10,5 | 6 | 2,9 |
| 28d-HW90 | 5 | 10,3 | 6 | 10 | 1 | 18 | 3 | 11,8 | 4 | 11,7 | 2 | 14,7 |
| 28d-L250 | 4 | 13,3 | 3 | 13,5 | 6 | 10,7 | 2 | 16,2 | 1 | 18,8 | 5 | 12 |
| 56d-L20 | 2 | 15 | 1 | 17,5 | 3 | 14,8 | 4 | 14,3 | 6 | 11 | 5 | 12 |
| 56d-HW90 | 5 | 12,8 | 4 | 13,9 | 2 | 15,3 | 1 | 15,8 | 6 | 9,5 | 3 | 15 |
| 56d-L250 | 3 | 14,4 | 5 | 11,8 | 4 | 12,2 | 2 | 15,2 | 1 | 16,8 | 6 | 8,8 |
| Gesamt | Festigkeit | 38 | | 30 | | 30 | | 25 | | 36 | | 47 |

Mechanismus der Beurteilungssysteme

Der Zement mit der besten Biegezugfestigkeit (positiv), bekommt die Note „eins“ und der Zement mit der niedrigsten Biegezugfestigkeit entsprechend (negativ) die Note „6“. Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so geht hervor, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine bessere Biegezugfestigkeit besitzt, als die der CEM II Zemente. Beim Versuch einer Gesamtbeurteilung der gewählten Zementsorten und der in diesem Zusammenhang definierten positiven bzw. negativen Eigenschaften zeigt sich, dass innerhalb der CEM I und CEM II Zemente bezüglich Erhärtungsgeschwindigkeit (N), die Mischungen M4 (CEM I 42,5 N C3A-frei) am besten geeignet sind. Beim Vergleich innerhalb der CEM II Zemente ist zu sehen, dass Zemente mit schnellen Früherhärtung (R) die geringsten Biegezugfestigkeiten aufweisen. Hinsichtlich der Festigkeitsklasse 52,5 zeigt der CEM I 42,5 N C3A-frei innerhalb der CEM I Zemente die höchste Biegezugfestigkeit. Auch in dieser Hinsicht zeigt die Mischung M6 (CEM II 32,5 R) innerhalb der CEM II Zemente die niedrigste Biegezugfestigkeit. In Bezug auf die Zementsorte innerhalb der beiden Zementgruppen besitzt

hier der CEM II 32,5 R Zement die Niedrigste und der CEM I 42,5 N C3A-frei die höchste Biegezugfestigkeit.

4.4 Ergebnisse der Druckfestigkeits-Prüfungen

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsentwicklung bei allen Mischungen sind in 4-15 bis 4-24 dargestellt und werden im Detail betrachtet.

4.4.1 Ergebnisse der 24 Stunden - Druckfestigkeit

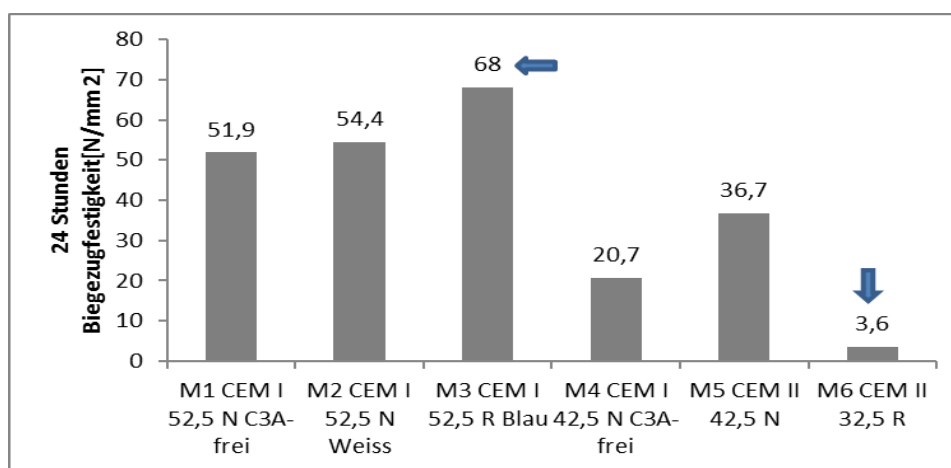


Abbildung 4-15: Diagramm der Ergebnisse der 24 Stunden-Druckfestigkeit L20

Abbildung 4-15 zeigt die Ergebnisse der gewählten Gruppen der Zementsorten. Hier sieht man, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt einen besseren Wert als die der CEM II Zemente besitzt. Wie in Abbildung 4-15 ersichtlich, zeigt sich, dass bei der Festigkeit der Mischserie M3 (CEM I 52,5 R) die besten Ergebnisse gemessen wurden (68 N/mm^2). Die Mischserie M6 zeigt die geringste 24 Stunden-Druckfestigkeit – sie beträgt $3,58 \text{ N/mm}^2$. Dieses Diagramm zeigt, dass innerhalb der CEM I Zemente ein Zusammenhang zwischen der Zementfestigkeitsklasse (52,5) und Festigkeitsentwicklung abgeleitet werden kann. Innerhalb dieser Gruppe zeigt sich der Zusammenhang der Erhärtungsgeschwindigkeit (R, N) mit der Druckfestigkeitsentwicklung. In Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit (R) innerhalb der CEM I Zemente zeigt hier der CEM I 52,5 R Zement die beste Festigkeitsentwicklung. Innerhalb der CEM I Zemente (siehe M1/M2/M3) ist ein Festigkeitsunterschied von $16,1 \text{ N/mm}^2$. Beim Vergleich innerhalb der Zementsorte CEM II zeigt sich, dass Zemente mit der schnelleren

Früherhärtung (R) eine niedrige Druckfestigkeit liefert ($3,6 \text{ N/mm}^2$). Bei den CEM II Zementen, in Bezug auf die Festigkeitsklasse, weist die Mischserie M6 (Festigkeitsklasse 32,5) im Vergleich zur 42,5 Zementfestigkeitsklasse (M5), eine geringere 24 Stunden - Druckfestigkeit auf ($3,6 \text{ N/mm}^2$).

4.4.2 Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit

Die Prüfergebnisse der 7 Tage-Druckfestigkeit, nachbehandelt bei L20, HW90 L250, wurden zwecks Interpretation als Säulendiagramm dargestellt.

4.4.2.1 Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit L20

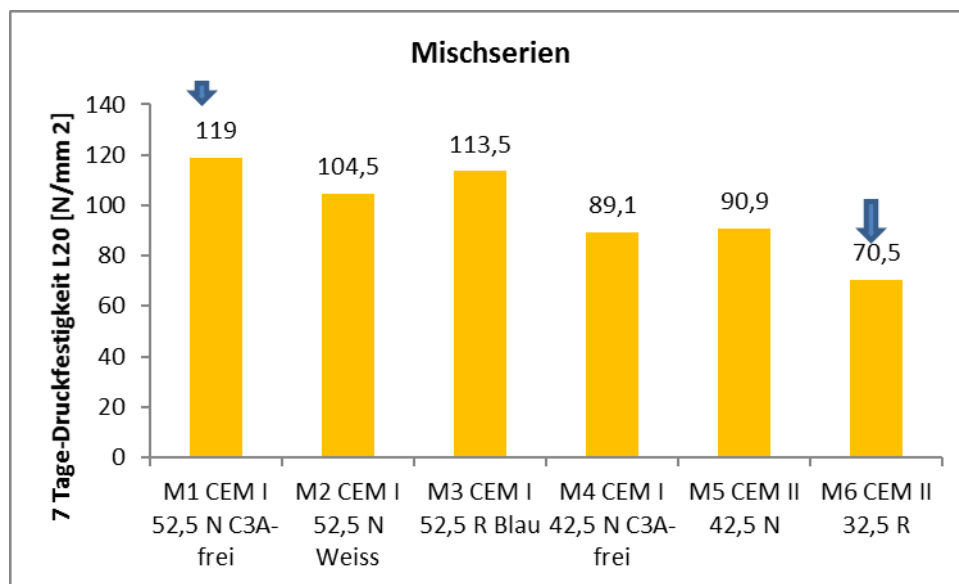


Abbildung 4-16: Ergebnisse der 7 Tage-Druckfestigkeit (L20)

Beim Vergleich der gewählten Zementgruppen, zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt einen besseren Wert besitzt, als die der CEM II Zemente (Abbildung 4-16). Die absolut höchste 7 Tage-Druckfestigkeit-(L20) im Vergleich zu allen anderen Mischserien, erreicht die Mischung M1 (CEM I 52,5N C3A frei), sie beträgt 119 N/mm^2 .

Die absolut niedrigste 7 Tage-Druckfestigkeit, besitzt die Mischung M6 bei Verwendung von Portlandkompositzement CEM II B-S 32,5 R, sie beträgt $70,5 \text{ N/mm}^2$. Beim Vergleich innerhalb der CEM II Zemente zeigt sich, dass Zemente mit schneller Früherhärtung (R) eine kleinere Druckfestigkeit als Zemente mit langsamer Früherhärtung (N) aufweisen. Innerhalb der CEM I

Zemente zeigt sich, dass Zemente mit schneller Früherhärtung (R) CEM I 52,5 R Blau eine ziemlich hohe Festigkeit aufweisen. Eine eindeutige Tendenz in Bezug auf die Festigkeitsklasse (52,5) innerhalb CEM I Zementen lässt sich aufgrund der durchgeführten Versuche nicht nachweisen (siehe M1/M2/M3). Ein genauer Zusammenhang zwischen der Zementfestigkeitsklasse (42,5) mit der Festigkeitsentwicklung lässt sich ebenfalls innerhalb der CEM I und CEM II Zemente bei den Mischungen (M4/M5) nicht ableiten. Betrachtet man diese Grafik, so findet sich kein großer Unterschied zwischen den Mischungen M4 und M5.

4.4.2.2 Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit (HW90)

Die Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit, der nach 2 Tagen bei 90°C warmbehandelten Prüferkörper (Wasserlagerung), die ausgeschaltet werden, ist in Abbildung 4-17 dargestellt.

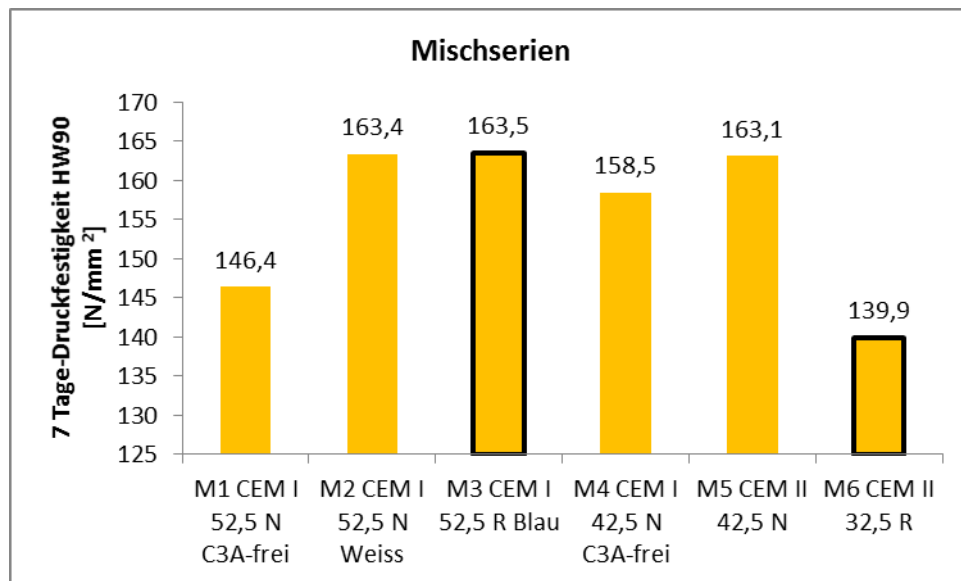


Abbildung 4-17: Ergebnisse der 7-Tage Druckfestigkeit des UHPC nachbehandelt im Heißwasser (HW90)

Die Mischung M3 (hergestellt mit CEM I 52,5 R-Blau) besitzt die höchste 7 Tage-Druckfestigkeit, sie beträgt 163,5N/mm². Die absolut niedrigste 7 Tage-Druckfestigkeit, nachbehandelt bei (HW90), wurde verglichen mit allen anderen Mischserien bei der Mischung M6 (CEM II 32,5 N) festgestellt; sie beträgt 139,9 N/mm². Dieses Bild zeigt, dass innerhalb der CEM II Zemente ein Zusammenhang zwischen der Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R) und der Festigkeitsklasse mit der jeweiligen Festigkeitsentwicklung der Mischung abgeleitet werden kann (siehe M5/M6). Innerhalb der CEM II Zemente zeigt sich, dass die Zemente mit der schnellen Früherhärtung (R) eine geringere Druckfestigkeit aufweisen. Eine eindeutige Tendenz

in Bezug auf die Festigkeitsklasse (52,5 N) innerhalb der CEM I Zemente lässt sich nicht nachweisen. Betrachtet man die Grafik, so zeigt sich, dass bei der Festigkeitsentwicklung innerhalb der Zementgruppen CEM I und CEM II, z.B. die Mischungen M2/M3/M5 im Durchschnitt fast die gleichen Werte besitzen (ca. 163N/mm²).

4.4.2.3 Ergebnisse der 7 Tage - Druckfestigkeit L250

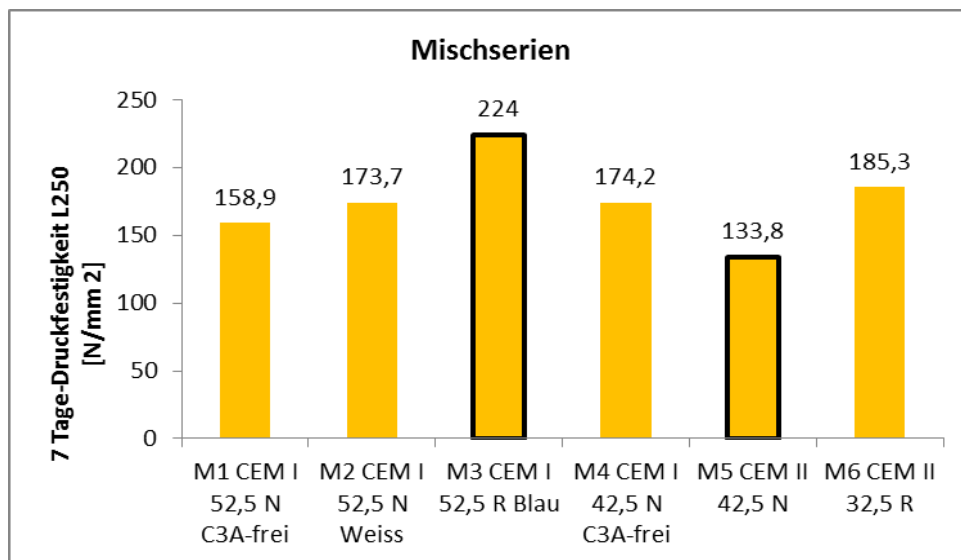


Abbildung 4-18: Ergebnisse der 7 Tage-Druckfestigkeit (L250)

Bei der Betrachtung der Druckfestigkeit der gewählten Gruppen von Zementsorten, kommt man zum Schluss, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine höhere festigkeit besitzt, als die der CEM II Zemente. Die Mischung M3 (hergestellt mit CEM I 52,5 R Blau) zeigt im Vergleich zu anderen Mischserien die höchste 7-Tage Druckfestigkeit (224 N/mm²) und die Mischung M5 (CEM II 42.5 N Zement) die niedrigsten Werte, welche 133,8 N/mm² betragen.

Beim Vergleich innerhalb der CEM I und CEM II Zemente zeigt sich hier, dass Zemente mit der schnellen Früherhärtung (R) eine höhere Druckfestigkeit aufweisen. In Bezug auf der Absolutwert der Druckfestigkeit innerhalb der CEM I Zemente hat hier der CEM I 52,5 R Blau Zement die besten Eigenschaften. Innerhalb der CEM I Zemente, mit einer Nennfestigkeit von 52,5 N/mm² wurden Festigkeitsunterschiede von 65,1 N/mm² ermittelt. Hinsichtlich der Festigkeitsklasse (52,5) zeigt der CEM I 52,5 R Blau innerhalb der CEM I Zemente bessere Eigenschaften. Innerhalb der CEM II Zemente, in Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit, zeigt die Mischung M6 mit der schnellsten Früherhärtung (R) im Vergleich zur Mischung M5 eine bessere Festigkeit, die 185,3 N/mm² beträgt. Ein Zusammenhang zwischen der

Zementfestigkeitsklasse und der Festigkeitsentwicklung, innerhalb der CEM I Zemente bei den Mischungen M1/M2/M3, lässt sich hier nicht ableiten.

4.4.3 Ergebnisse der 28 Tage - Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der 28 Tage - Druckfestigkeitsentwicklung bei allen Mischungen sind in 4-19 bis 4-21 dargestellt und werden im Detail betrachtet.

4.4.3.1 Ergebnisse der 28 Tage Druckfestigkeit L20

Die Prüfergebnisse der 28 Tage-Druckfestigkeit bei L20 ist als Diagramm in Abbildung 4-19 dargestellt.

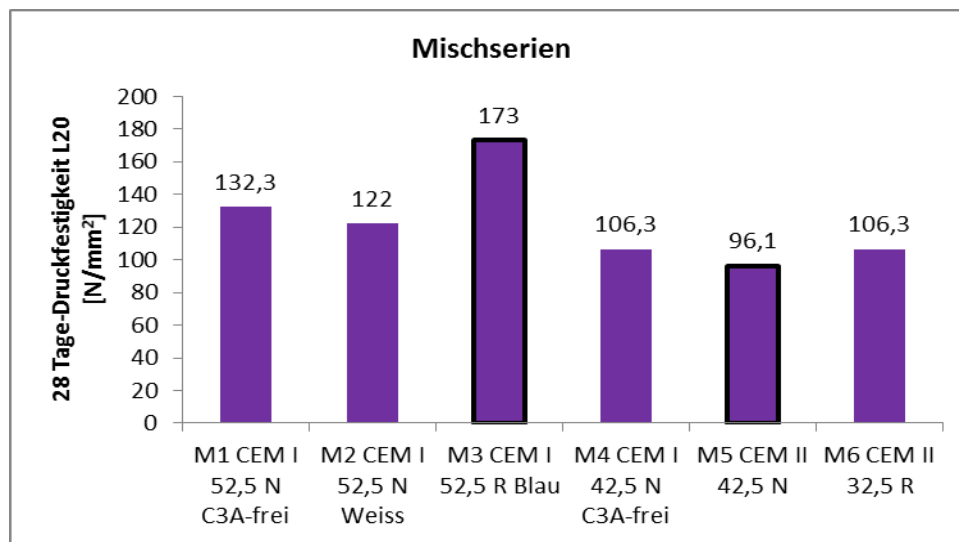


Abbildung 4-19: Ergebnisse der 28-Tage Druckfestigkeit des UHPC Betons, L20

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so stellt man fest, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt bessere Werte als die CEM II Zemente besitzen. Die Mischung M3 (CEM I 52,5 R Blau) zeigt innerhalb der CEM I und CEM II Zemente die absolut höchste Festigkeit (173 N/mm²). Die Mischung M5 (CEM II 42,5 N) besitzt die absolut niedrigste Druckfestigkeit (96.1 N/mm²). Beim Vergleich innerhalb der CEM I und CEM II Zemente, wird sichtbar, dass Zemente mit schneller Früherhärtung (R) eine höhere Druckfestigkeit aufweisen, insofern zeichnen sich der CEM I 52,5 R Zement und der CEM II 32,5 R Zement durch bessere Eigenschaften aus. Innerhalb der Gruppe der CEM II Zemente zeigt sich auch hier hinsichtlich der Festigkeitsklasse ein eindeutiger Trend. Vergleicht man die Ergebnisse der Zemente der Zementfestigkeitsklasse (42,5), so zeigt sich, dass die Mischung M4, der CEM I Zement eine größere Druckfestigkeit besitzt als die der Mischung M5, d.h der CEM II Zement.

4.4.3.2 Ergebnisse der 28 Tage - Druckfestigkeit HW90

Die Prüfergebnisse der 28 Tage-Druckfestigkeit bei einer Heißwasserlagerung sind im nachfolgenden Diagramm in Abbildung 4-20 dargestellt.

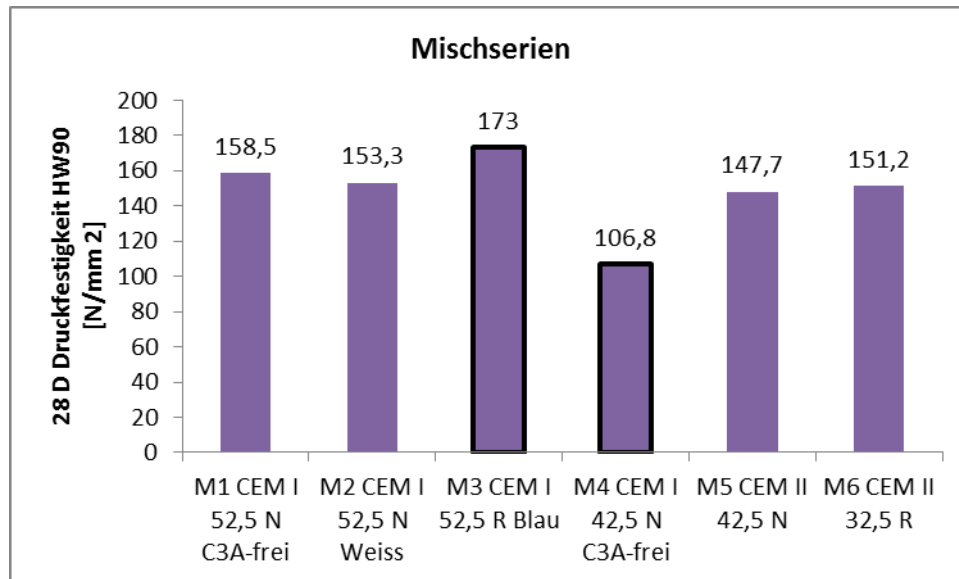


Abbildung 4-20: Ergebnisse der 28 Tage-Druckfestigkeit des UHPC, nachbehandelt HW90

Die Mischung M3 (CEM I 52,5 R Blau) zeigt die höchste Druckfestigkeit, sie beträgt 173N/mm². Die niedrigste hingegen wurde bei der Mischung M4, ebenfalls ein CEM I Zement, gemessen und beträgt 106,8 N/mm².

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM II Zemente im Durchschnitt fast einen besseren Wert besitzt, als die CEM I Zemente.

Betrachtet man in der Grafik die 28-Tage-Druckfestigkeit innerhalb CEM II Zemente, so zeigt sich, dass die Mischung M5 keinen großen Unterschied zur Mischung M6 liefert (3,5 N/mm²). In Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit innerhalb der CEM I Zemente zeigen hier die Zemente mit schnellster Früherhärtung (R), z.B. der CEM I 52,5 R Blau Zement, die beste Festigkeitsentwicklung. Der CEM II 32,5 R weist auch in dieser Hinsicht innerhalb der CEM II Zemente eine höhere Festigkeit auf (151,2 N/mm²).

Betrachtet man die Grafik der 28 Tage-Druckfestigkeit in Bezug auf die Festigkeitsklasse, so zeigt die Mischung M4 (Festigkeitsklasse 42,5) eine wesentlich kleinere Druckfestigkeit als die Mischung M5 (40,9 N/mm² Unterschied). Das bedeutet, dass sich innerhalb der CEM I und CEM II Zemente ein Zusammenhang zwischen Zementfestigkeitsklasse (42,5) und

Festigkeitsentwicklung, nicht ableiten lässt. Innerhalb der Gruppe CEM I Zemente zeigt sich hier bei den Mischungen M1/M2/M3 kein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse (52,5) der jeweiligen Zemente und der Festigkeitsentwicklung.

4.4.3.3 Ergebnisse der 28 Tage - Druckfestigkeit L250

Abbildung 4-21 zeigt die Ergebnisse der 28 Tage-Druckfestigkeit bei der Nachbehandlungsmethode L250.

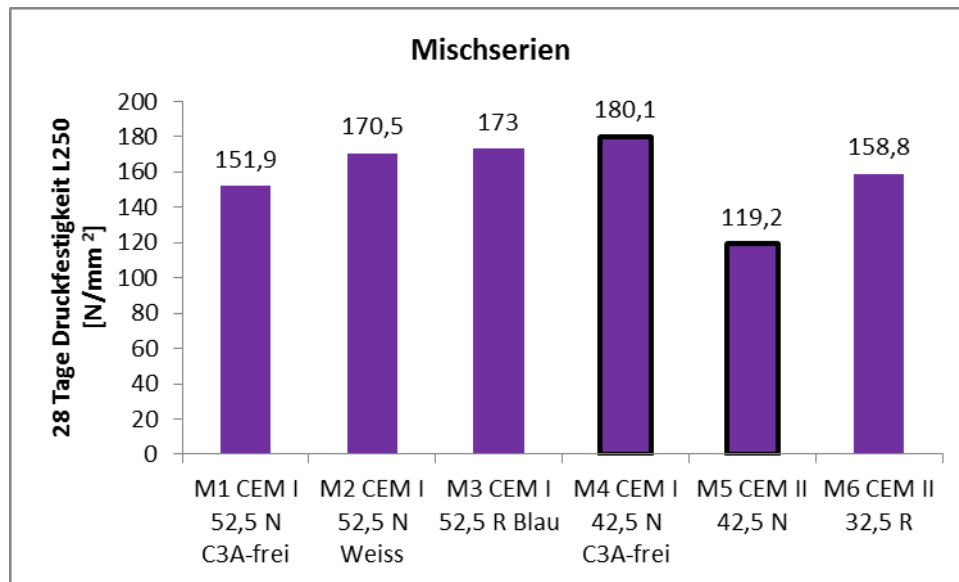


Abbildung 4-21: Ergebnisse der 28 Tage-Druckfestigkeit, nachbehandelt L250

Die Mischung M4 (CEM I 42,5 N C3A Frei) zeigt die absolut höchste Festigkeit, sie beträgt 180,1 N/mm². Die absolut niedrigste Druckfestigkeit zeigt die Mischung M5 (Portlandkompositzement CEM II 42,5 N) und beträgt 119,2 N/mm². Vergleicht man die gewählten Zementgruppen, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt einen besseren Wert besitzt, als die der CEM II Zemente.

Die Festigkeit der CEM II 32,5 R Zemente deutet darauf hin, dass die Zemente mit schneller Früherhärtung (R) eine höhere Festigkeit erreichen als Zemente mit höhere festigkeitsklassen.

Ein Zusammenhang mit der Erhärtungsgeschwindigkeit (R) lässt sich innerhalb der CEM I Zemente nicht ableiten (Siehe Abbildung 4-21). In Bezug auf die Festigkeitsklasse (42,5) innerhalb der CEM I und CEM II Zemente, zeigt die Mischung M4 (CEM I 42,5 N C3A frei Zemente) bessere Werte als die Mischung M5. Innerhalb der Gruppe der CEM I Zemente, zeigt sich auch hier kein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse der jeweiligen

Zemente mit der Druckfestigkeit. Man sieht, dass innerhalb der CEM I Zemente bei den Mischungen (M1/M2/M3) kein Zusammenhang zwischen der Festigkeitsklasse (52,5 bzw. 42,5) und der Festigkeitsentwicklung bestimmt werden kann.

Bei der Gruppe der CEM II Zemente zeigt sich, dass unabhängig von der Festigkeitsklasse die Festigkeitsentwicklung der Mischung M6 im Verhältnis zu Mischung M5 um mehr als das 1,33-fache größer ist.

4.4.4 Ergebnisse der 56- Tage Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der 56 Tage- Druckfestigkeit bei allen Mischungen sind in 4-22 bis 4-24 dargestellt und werden im Detail betrachtet.

4.4.4.1 Ergebnisse der 56 Tage - Druckfestigkeit L20

Die Prüfergebnisse der 56 Tage – Druckfestigkeit, nachbehandelt bei L20 sind in der nachfolgenden Abbildung 4-22 wiederum als Säulendiagramm dargestellt.

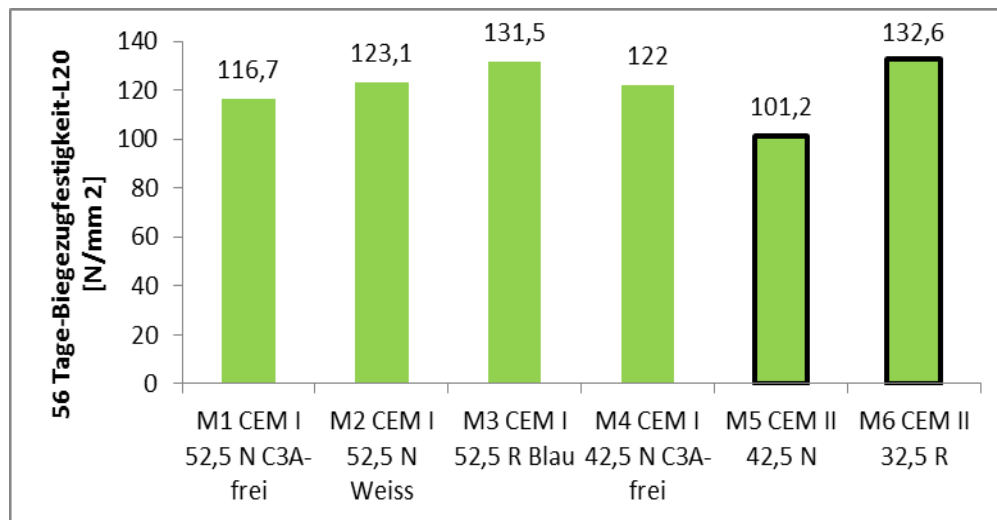


Abbildung 4-22: Ergebnisse der 56 Tage-Druckfestigkeit der hergestellten UHPC-Proben nachbehandelt L20

Vergleicht man die beiden Zementgruppen (CEM I und CEM II Zemente), so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt eine höhere Druckfestigkeit besitzt, als die der CEM II Zemente. Die Mischung M6 (Portlandzement CEM II 32,5 R) hat innerhalb der CEM I und CEM II Zemente die absolut höchste Festigkeit (132,6 N/mm²). Die Mischung M5 (hergestellt mit Portlandkompositzement CEM II 42,5 N) zeigt die absolut niedrigste Druckfestigkeit (101,2 N/mm²). Innerhalb der gewählten Zementgruppen, in Bezug auf die

Erhärtungsgeschwindigkeit, zeigt sich, dass die Zemente mit der schnellsten Früherhärtung (R) eine höhere Druckfestigkeit aufweisen (z.B. die Mischungen M3 und M6). Innerhalb der CEM I Zemente zeigt die Mischung M3 (hergestellt mit CEM I 52,5 R Zemente) die beste Festigkeitsentwicklung ($131,5 \text{ N/mm}^2$). Bei den CEM I Zementen, wurde bei der Festigkeitsklasse 52,5, ein Festigkeitsunterschied von $14,8 \text{ N/mm}^2$ gemessen.

Innerhalb der Gruppe der CEM II Zemente zeigt sich auch hier ein eindeutiger Trend im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse der jeweiligen Zemente und der Druckfestigkeit.

4.4.4.2 Ergebnisse der 56 Tage - Druckfestigkeit HW90

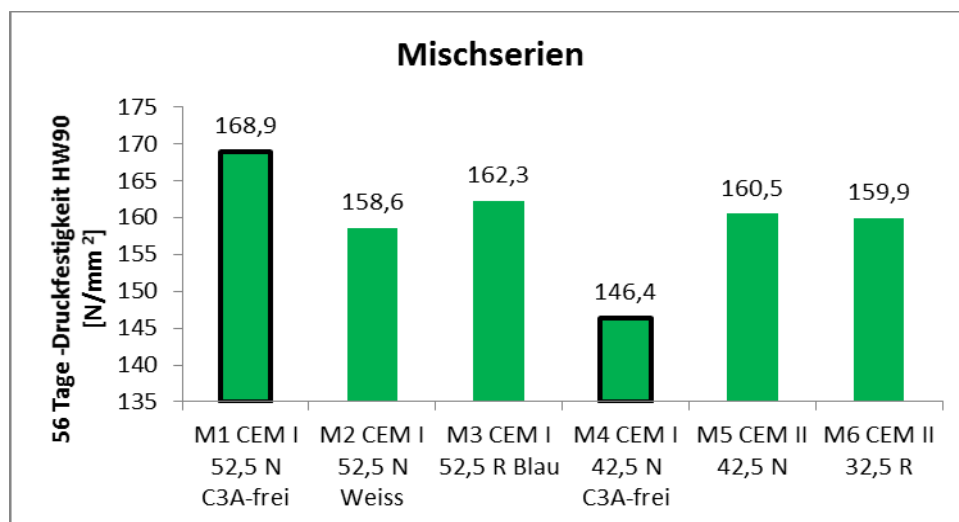


Abbildung 4-23: Ergebnisse der 56-Tage-Druckfestigkeit des hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt HW 90

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten (Abb. 4-23), so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM II Zemente im Durchschnitt eine höhere Festigkeit als die CEM I Zemente besitzen. Die höchste 56 Tage-Druckfestigkeit lag hier bei der Mischung M1 (CEM I 52,5 N C₃A-frei) und beträgt $168,9 \text{ N/mm}^2$. Die geringste 56 Tage Druckfestigkeit wurde bei der Mischung M4 ermittelt ($146,4 \text{ N/mm}^2$). Eine eindeutige Tendenz innerhalb der CEM I Zemente, in Bezug auf die Erhärtungsgeschwindigkeit (N, R), lässt sich nicht eindeutig nachweisen.

Ein Zusammenhang zwischen der Zementfestigkeitsklasse (52,5) und der Festigkeitsentwicklung der jeweiligen Zementsorte, innerhalb der CEM I Zemente, lässt sich hier nicht ableiten (siehe Mischung M1/M2/M3). Innerhalb der CEM I Zemente ist hier erkennbar, dass die Festigkeitsklasse 52,5 im Vergleich zur Festigkeitsklasse 42,5 geringfügig höhere Festigkeit liefert.

4.4.4.3 Ergebnisse der 56 Tage Druckfestigkeit L250

Die Prüfergebnisse der 56-Tage-Druckfestigkeit, nachbehandelt bei L250, sind nachfolgend als Diagramm in Abbildung 4-24 dargestellt.

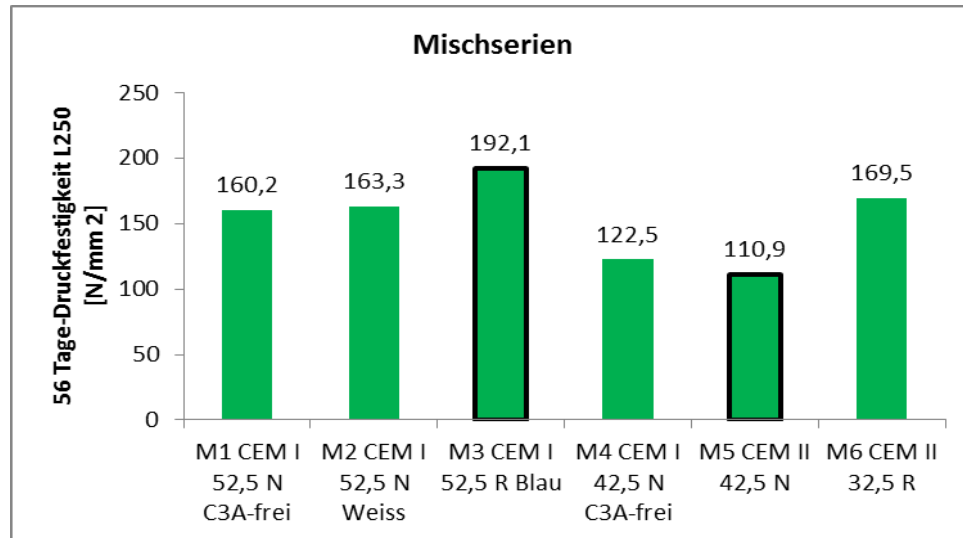


Abbildung 4-24: Ergebnisse 56 Tage-Druckfestigkeit der hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt L250

Die Mischung M3 (hergestellt mit CEM I 52,5 R Blau,) zeigt innerhalb der CEM I und CEM II Zemente die absolut höchste Festigkeit und beträgt 192,1 N/mm². Die Mischung M5 (hergestellt mit Portlandkompositzement CEM II 42,5 N) zeigt die absolut niedrigste Druckfestigkeit (110,9 N/mm²).

Vergleicht man die gewählten Gruppen der Zementsorten, so zeigt sich, dass die Gruppe der CEM I Zemente im Durchschnitt einen besseren Wert besitzt, als die der CEM II Zemente. Betrachtet man die Grafik der 56 Tage-Druckfestigkeit, so wird augenscheinlich, dass ein Festigkeitsunterschied innerhalb der CEM I 52,5 Zemente um ca.31 N/mm² gemessen wurde.

In dieser Hinsicht innerhalb der CEM I Zemente zeigt sich, dass Zemente mit schneller Früherhärtung (R) eine höhere Festigkeit aufweisen. Innerhalb der Gruppe der CEM I Zemente zeigt sich der erwartete Trend im Zusammenhang mit der Festigkeitsklasse (52,5 42.5) der jeweiligen Zemente mit der Druckfestigkeitsentwicklung. In Bezug auf die Festigkeitsklasse innerhalb der CEM II Zemente, sind die Ergebnisse gegenläufig zur Druckfestigkeitsklasse.

4.4.5 Überblick über die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen

In Tabelle 4-7 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsermittlungen der Prüferien zusammengestellt.

Tabelle 4-7; Versuchsergebnisse der Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit der Zementart

| Mischung Zementsorten | M1 CEM I 52,5N C3A-frei | M2 CEM I 52,5N weiß | M3 CEM I52,5R Blau | M4 CEM I42,5 N C3A-frei | M5 CEM II 42,5 N | M6 CEM II 32,5 R |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| 24 h | 51,9 | 54,4 | 68 | 20,7 | 36,7 | 3,6 |
| 7d-L20 | 119 | 104,5 | 113,5 | 89,1 | 90,9 | 70,5 |
| 7d-HW90 | 146,4 | 163,4 | 163,5 | 158,5 | 163,1 | 139,9 |
| 7d-L250 | 158,9 | 173,7 | 224 | 174,2 | 133,8 | 185,3 |
| 28d-L20 | 132,3 | 122 | 124,7 | 106,3 | 96,1 | 106,3 |
| 28d-HW90 | 158,5 | 153,3 | 140,19 | 106,8 | 147,7 | 151,2 |
| 28d-L250 | 151,9 | 170,5 | 173,1 | 180,1 | 119,2 | 158,8 |
| 56d-L20 | 116,7 | 123,1 | 131,5 | 122 | 101,2 | 132,6 |
| 56d-HW90 | 168,9 | 158,6 | 162,3 | 146,4 | 160,5 | 159,9 |
| 56d-L250 | 160,2 | 163,3 | 192,1 | 122,5 | 110,9 | 169,5 |

Versucht man aus den Ergebnissen der Tabelle 4-8 eine Gesamtbewertung der einzelnen Zementsorten im Vergleich der gewählten Zemente herzustellen, kann man das einfache Notenverfahren anwenden. Das bedeutet, dass z.B. der Zement mit der höchsten Druckfestigkeit die Note „eins“ bekommt und der Zement mit der niedrigsten Festigkeit die (negative) Note „6“ bekommt. Beim Versuch einer Gesamtbeurteilung der gewählten Zementsorten und der in diesem Zusammenhang definierten positiven bzw. negativen Eigenschaften zeigt sich, dass die Mischung M3, hergestellt mit CEM I52,5R Blau, am besten geeignet ist.

Tabell 4-8 Beurteilungssysteme-gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten

| Mischung Zementsorten | M1 CEM I 52,5N C3A-frei | M2 CEM I 52,5N weiß | M3 CEM I52,5R Blau | M4 CEM I42,5 N C3A-frei | M5 CEM II 42,5 N | M6 CEM II 32,5 R |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| 24 h | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 6 |
| 7d-L20 | 1 | 3 | 2 | 5 | 4 | 6 |
| 7d-HW90 | 5 | 2 | 1 | 4 | 3 | 6 |
| 7d-L250 | 5 | 4 | 1 | 3 | 6 | 2 |
| 28d-L20 | 1 | 3 | 2 | 4 | 6 | 4 |
| 28d-HW90 | 1 | 2 | 1 | 6 | 5 | 3 |
| 28d-L250 | 5 | 3 | 2 | 1 | 6 | 4 |
| 56d-L20 | 5 | 3 | 2 | 4 | 6 | 1 |
| 56d-HW90 | 1 | 5 | 2 | 6 | 3 | 4 |
| 56d-L250 | 4 | 3 | 1 | 5 | 6 | 2 |
| Gesamt | 31 | 30 | <u>15</u> | 43 | <u>49</u> | 38 |

4.5 Einflüsse der Nachbehandlungsmethoden auf die Festigkeitsentwicklung pro Serie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Nachbehandlungsmethode und deren Einflüsse auf Biegezug- und Druckfestigkeit interpretiert. Die dargestellten Säulendiagramme in den Abbildungen zeigen den Einfluss der Nachbehandlungsmethode auf jede Mischung, wobei die Ergebnisse prozentuell verglichen werden. Die Vergleichswerte sind die 7 Tage- Festigkeiten der Mischungen ohne Nachbehandlungsmethode L20 (7d-L20), im Vergleich zur jeweiligen Mischung mit Nachbehandlungsmethode sowie W90, L250. Die Heißwassernachbehandlung bei 90 °C führt bei jeder Mischung und zu jedem Prüfzeitpunkt zu einer Steigerung aller betrachteten Festigkeiten. Diese festigkeitssteigernde Wirkung der Heißwassernachbehandlung fällt generell etwas höher aus, als jene, die durch Normalluftlagerung erreicht wird. Auch die Heißluftlagerung bei 250° hatte in dieser Versuchsreihe überaus positive Effekte auf die Biegezug- und Druckfestigkeit. Die Festigkeit aller Mischungen M1 bis M6 bei normaler Wasserlagerung und nach einer 90 °C Heißwasserbehandlung und Luftlagerung L250 sind in den Abbildungen 4-25 bis 4-35 dargestellt. Die Festigkeiten wurden an allen Proben bei einem Betonalter von 1, 7, 28 und 56 Tagen bestimmt. Bei den Festigkeitsangaben handelt es sich dabei immer um den Mittelwert aus drei Prüfkörpern.

Bezeichnungen und Farbcode

Die farbliche Gestaltung in allen Diagrammen der Nachbehandlungsmethode sowie die Abkürzungen und deren Bedeutung sind in Tabelle 4-9 als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 4-9: Verwendete Farben und deren Bedeutung

| <u>Farbe</u> | <u>Unterscheidungsmerkmal</u> | <u>Abkürzung</u> |
|--------------|-------------------------------|------------------|
| <u>Blau</u> | Luftlagerung bei 20°C | L20 |
| <u>Rot</u> | Heißwasserlagerung bei 90°C | HW90 |
| <u>Grün</u> | Heißluftlagerung bei 250° | L250 |

4.5.1 Serie M1 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

In Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26, sind die Festigkeitsentwicklung der Mischung M1, aufgrund der Nachbehandlungsmethoden dargestellt.

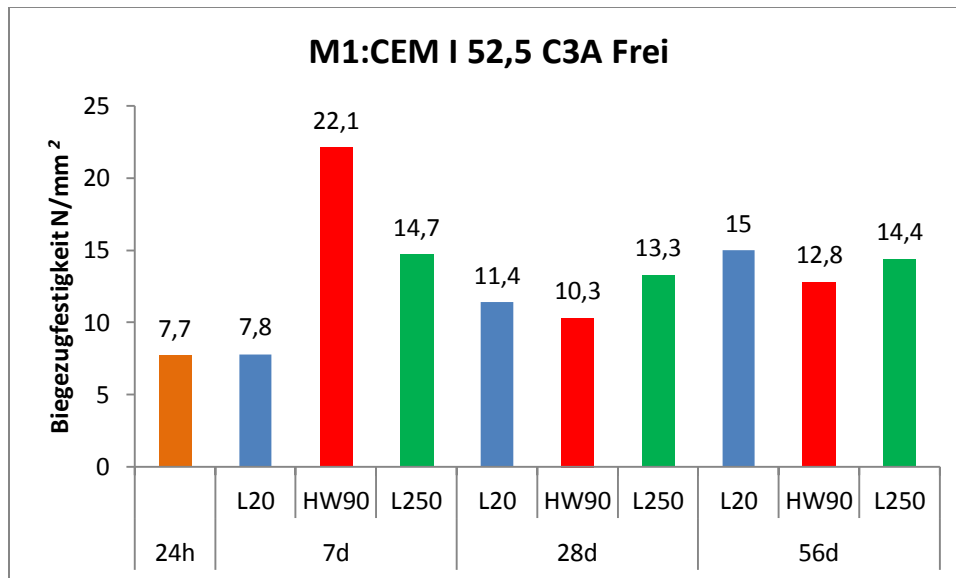


Abbildung 4-25: Entwicklung der Biegezugfestigkeit von Serie M1 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-25 zeigt die Entwicklung der Festigkeit der Mischung M1 (CEM I 52,5 C3A-frei) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden. Vergleicht man die Nachbehandlungsmethoden so erkennt man folgendes: Nach 7 Tagen findet bei einigen Nachbehandlungsmethoden eine Festigkeitssteigerung statt, die anschließend wieder abfällt.

Bei Luftlagerung (L20) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen ca. 93% über der 7 Tage-Festigkeit liegt. Die 28 Tage-Biegezugfestigkeit liegt unabhängig von der Heißlagerungsmethode (L20) bei ca. 11,4 N/mm², dies entspricht einer Steigerung um ca. 46% verglichen mit der 7 Tage Festigkeit

Sowohl die Heißluftlagerung (L250), als auch die Heißwasserlagerung (HW90), bewirken nach 7 Tagen eine stärkere Erhöhung der Festigkeit (89% bzw. 184%) gegenüber der Normalluftlagerung (L20), die aber nach 28 Tagen wieder abfällt. Nach 56 Tagen zeigen die Nachbehandlungsmethoden (HW90) und (L250) im Vergleich zur 28 Tage-Biegezugfestigkeit eine Festigkeitssteigerung. Bei der Heißwasserlagerung (HW90) steigert sie sich um ca. 24% und bei der L250 um ca. 8,3%. Die höchste Festigkeitsentwicklung zeigt die 7 Tage-Biegezugfestigkeit mit einer Heißwasserlagerung bei 90°C, (HW90), welche 22,1 N/mm² beträgt. Das heißt, dass die Nachbehandlungsmethode HW90 bei dieser Mischung im Vergleich zu den anderen Nachbehandlungsmethoden eine sehr schnelle Festigkeitsentwicklung liefert, die anschließend wieder abfällt.

4.5.2 Serie M1 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

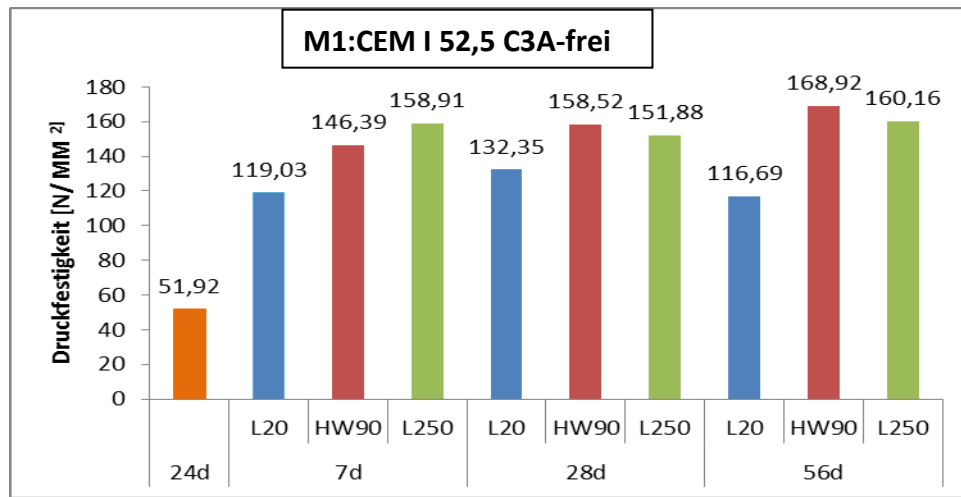


Abb 4-26: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M1 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-26 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit der Mischung M1 (CEM I 52,5 C3A-frei) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden. Vergleicht man die Nachbehandlungsmethoden, so erkennt man folgendes nach 7 Tagen geht bei bei einigen Nachbehandlungsmethoden im Vergleich zur 24 Stunde Festigkeit eine deutliche Festigkeitssteigerung einher, die nach 56 Tagen wieder abfällt.

Bei der Luftlagerung (L20) ist nach 28 Tagen eine deutliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen wieder abfällt.

Bei der Heißwasserlagerung (HW90) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen ($168,92 \text{ N/mm}^2$), ca. das 3,25 fache der 24 Stunden-Festigkeit ($51,92 \text{ N/mm}^2$) aufweist.

Eine Heißluftbehandlung (L250) bei 250 °C im Vergleich zu Heißwasserbehandlung (HW90) wirkt sich nach 7 Tagen besser auf die Druckfestigkeitsentwicklung aus.

Betrachtet man den Zeitraum zwischen 28 und 56 Tagen, so sieht man, dass sich bei dieser Mischung eine Heißwasserbehandlung (HW90), im Vergleich zu Heißluftbehandlung bei 250 °C besser auf die Druckfestigkeitsentwicklung auswirkt.

Es auch ist auffallend, dass es nach 28 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode (L250) eine Festigkeitsminderung gibt, die anschliessend wieder steigt. Vergleicht man die Ergebnisse so erkennt man, dass die höchste Druckfestigkeit der Mischung M1 (hergestellt mit Portlandzement

CEM I 52,5 N C₃A-frei) hier bei 168,92 N/mm² lag, die mit einer Heißwasserlagerung bei 90°C nachbehandelt wurde. Das heißt, dass die Nachbehandlungsmethode HW90 bei dieser Mischung im Vergleich zu anderen Nachbehandlungsmethode, die beste Festigkeitsentwicklung liefert.

Die niedrigste Druckfestigkeit wurde nach 56 Tagen bei einer Luftlagerung (L20) bestimmt, jene beträgt 116,7 N/mm². Das bedeutet, dass die Nachbehandlungsmethode L20 bei dieser Mischung im Vergleich zu anderen Nachbehandlungsmethoden am wenigsten geeignet ist.

4.5.3 Serie M2 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

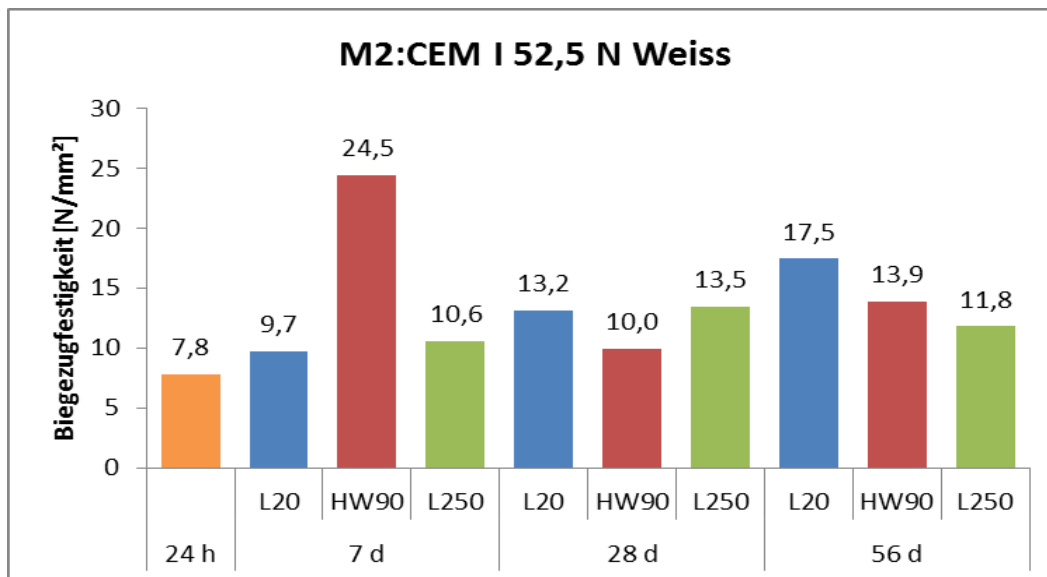


Abbildung 4-27 Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M2 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-27 zeigt die Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Mischung M2 (CEM I 52,5 N Weiss) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden.

Bei der Betrachtung dieses Diagramms stellt man fest, dass man innerhalb verschiedener Zeitspannen zu nachfolgenden Ergebnissen kommt.

Bei der Luftlagerung (L20) ist eine kontinuierlich Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen ca. 80% über der 7 Tage Festigkeit (L20) liegt.

Nach 7 Tagen erfolgt bei der Nachbehandlungsmethode (HW90) eine deutliche Festigkeitssteigerung, welche nach 28 Tagen abfällt und im Anschluss nach 56 Tagen wieder steigt. Nach 56 Tagen vermerken die Nachbehandlungsmethoden HW90 im Vergleich zu der 7 Tage Festigkeit (HW90) eine deutige Festigkeitsminderung (10,6 N/mm²). Die Steigerung der Festigkeit bei Heißluftlagerung (L250) nach 7 Tagen beträgt mit 10,6 N/mm² nahezu das 1,4-

fache der 24 Stunde Festigkeit ($7,8 \text{ N/mm}^2$).

Betrachtet man den Zeitraum zwischen 7 und 28 Tagen, so fällt auf dass es bei der Nachbehandlungsmethode (L250) eine Festigkeitsteigerung gibt, die anschliessend nach 56 Tagen wieder abfällt.

Die höchste Festigkeitsentwicklung zeigt die 7 Tage-Biegezugfestigkeit bei der Heißwasserlagerung (HW90), welche $24,5 \text{ N/mm}^2$ beträgt. Das heißt, dass die Nachbehandlungsmethode HW90 bei dieser Mischung im Vergleich zu anderen Nachbehandlungsmethoden eine rasche Festigkeitsentwicklung liefert, allerdings sinkt diese wieder stark ab. Der geringste Anstieg der Festigkeitsentwicklung der Mischung M2 nach 7 Tagen bei Normalluftlagerung L20 ermittelt wurde.

Die Normalluftlagerung zeigt hier einen langsameren aber stetigen Anstieg der Biegezugfestigkeit. Nach 56 Tagen erreicht man mit dieser Form der Nachbehandlung jedoch die höchsten Festigkeitswerte.

4.5.4 Serie M2 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

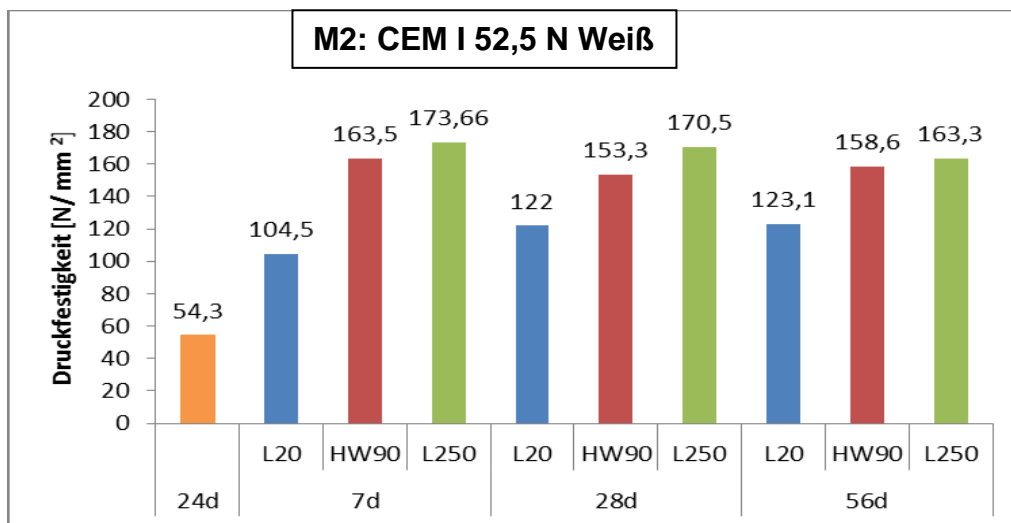


Abbildung 4-28: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M2 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-28 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit der Mischung M2 (CEM I 52, N Weiß) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden. Betrachtet man die Ergebnisse stellt man fest, dass innerhalb verschiedener Zeitspannen folgende Daten eruiert wurden: Bei der Nachbehandlungsmethode (L20) wurde eine kontinuierliche Festigkeitsteigerung

ermittelt, die nach 56 Tagen $68,8 \text{ N/mm}^2$ über der 24 Stunden Festigkeit liegt. Im Laufe der Festigkeitsentwicklung innerhalb dieser 56 Tage stellt sich jedoch heraus, dass bei L20 verglichen mit der 7 Tage Festigkeit eine nicht stetige Festigkeitssteigerung auftritt. Das heißt, dass die kontinuierliche Festigkeitssteigerung der Mischung M2 nach 56 Tagen im Vergleich zur 7 Tage Festigkeit ca. um 18 % und im Vergleich zu 28 Tagen um 0,9 % (mehr) beträgt.

Es ist zu sehen, dass es nach 7 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode HW90 eine Festigkeitssteigerung gibt, die anschliessend nach 56 Tagen wieder abfällt. Die Steigerung der Festigkeit bei der Heißwasserlagerung (HW90) nach 7 Tagen beträgt mit $163,5 \text{ N/mm}^2$ etwa das 3-fache der 24 Stunden-Festigkeit ($54,3 \text{ N/mm}^2$). Innerhalb von 7 bis zu 28 Tagen wurde bei der Heißwasserbehandlung (HW90) eine Festigkeitsminimierung von 6,7% gemessen. Nach 56 Tagen zeigt die Mischung M2 im Vergleich zu der 28 Tage Festigkeit bei der Heißwasserbehandlung (HW90) wieder eine Festigkeitssteigerung, die $158,6 \text{ N/mm}^2$ was 3.5% entspricht beträgt.

Bei der Heißluftlagerung (L250) ist eine kontinuierlich Festigkeitsminderung festzustellen, die nach 56 Tagen $10,36 \text{ N/mm}^2$ um ca. 6% unter der 7 Tage Festigkeit liegt. Eine Heißluftlagerung bei $250 \text{ }^\circ\text{C}$ wirkte sich im Vergleich zu (HW90) besser auf die Druckfestigkeitsentwicklung aus. Die Nachbehandlungsmethode L250 bei dieser Mischung (M2) verglichen mit anderen Nachbehandlungsmethoden, eine bessere Festigkeitsentwicklung liefert ($173,66 \text{ N/mm}^2$). Den geringste Anstieg der Festigkeitsentwicklung, bei dieser Mischung wurde nach 7 Tagen bei Normalluftlagerung L20 gemessen ($104,5 \text{ N/mm}^2$).

4.5.5 Serie M3 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

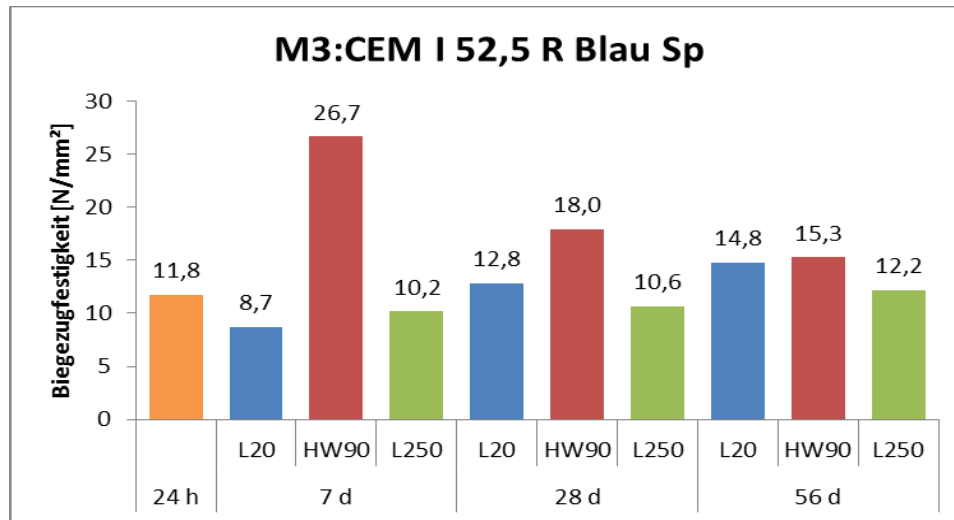


Abbildung 4-29: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M4 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-29 zeigt die Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Mischung M3 (hergestellt mit CEM I 52,5 R Blau Sp) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden. Auf den ersten Blick ist auffallend, dass es nach 7 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode (L20) im Vergleich zur 24 Stunde Festigkeit eine Festigkeitsminderung gibt, die anschliessend bis zum 56 Tagen kontinuierlich steigt (ca.70,12 %.).

Die Steigerung der Festigkeit bei Heißwasserlagerung (HW90) beträgt nach 7 Tagen mit 26,7 N/mm² nahezu das 2,26-fache der 24 Stunden-Festigkeit (11,8 N/mm²), die anschließend bis zum 56 Tage wieder kontinuierlich abfällt. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die festigkeitssteigernde Wirkung der Heißwassernachbehandlung (HW90), unabhängig von Prüfzeitpunkt, generell etwas höher ausfällt als jene der Heißluftlagerung.

Bei der Heißluftlagerung (L250) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen ca. 19,6% über der 7 Tage Festigkeit liegt. Die mittlere Zunahme der Biegezugfestigkeit bei der Heißluftbehandlung zwischen 7 Tagen und 28 Tagen ist mit 0,4 N/mm² sehr gering. Eine eindeutige Aussage darüber hinaus, welche Nachbehandlungsmethode bei diesem Zement am besten ist, lässt sich nicht treffen.

4.5.6 Serie M3 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

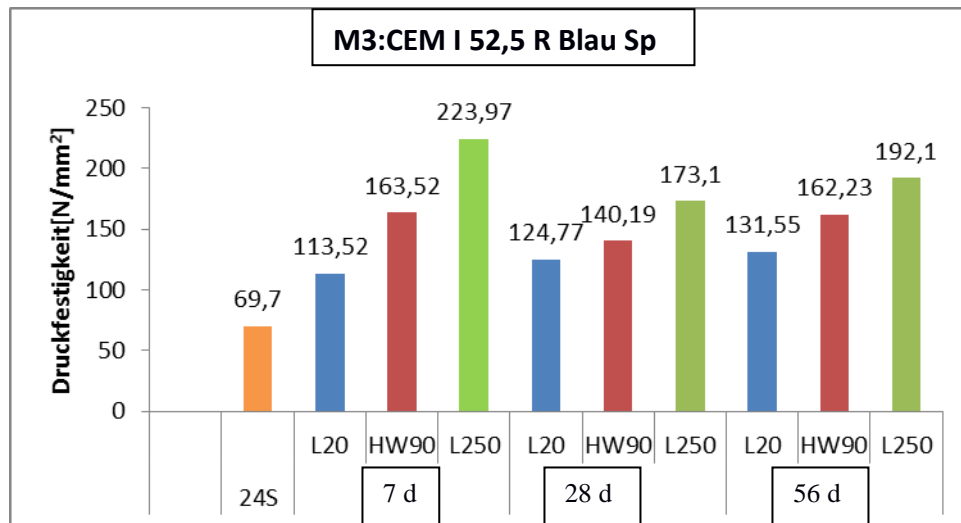


Abbildung 4-30: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M3 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-30 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit der Mischung M3 (hergestellt mit CEM I 52,5 R Blau Sp) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden.

Als Erstes fällt auf, dass nach 7 Tagen bei allen Nachbehandlungsmethoden eine deutliche Festigkeitssteigerung stattfindet. Sowohl die Heißwasserbehandlung (HW90), als auch die Heißluftbehandlung (L250) wirkten sich im Vergleich zur Normalluftlagerung (L20) deutlich positiver auf die Druckfestigkeitsentwicklung aus. Die Heißluftbehandlung (L250) wirkte sich hier besser als die Heißwasserbehandlung, (HW90) auf die Druckfestigkeitsentwicklung aus, allerdings fällt bei beiden Nachbehandlungsmethoden anschließend die Festigkeit wieder bis zum 28. Tage deutlich ab. Anschließend steigt die Druckfestigkeit wieder langsam an.

Bei der Luftlagerung (L20) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen 62 N/mm^2 (ca. 189%) über der 24 Stunden-Festigkeit liegt.

Die Steigerung der Festigkeit bei Heißwasserlagerung (HW90) nach 7 Tagen beträgt mit $163,52 \text{ N/mm}^2$ nahezu das 2,35-fache der 24 Stunde Festigkeit. Es ist zu sehen, dass es nach 28 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode HW90 im Vergleich zur 7 Tage Festigkeit eine Festigkeitsminderung gibt, die nach 56 Tagen wieder steigt.

4.5.7 Serie M4 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

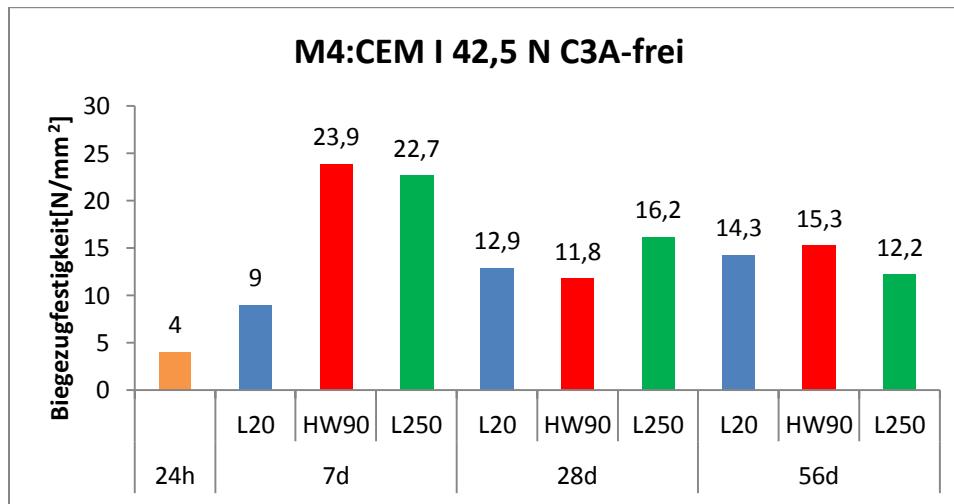


Abbildung 4-31: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M4 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-31 zeigt die Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Mischung M4 (CEM I 42,5 N C3A-frei) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden. Betrachtet man dieses Diagramm stellt man fest, dass innerhalb verschiedener Zeitspannen folgende Ergebnisse ermittelt wurden:

Bei normaler Luftlagerung (L20) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung zu bemerken, die nach 56 Tagen $6,3 \text{ N/mm}^2$ über der 7 Tage Festigkeit liegt. Außerdem ist auffallend, dass es nach 7 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode (HW90) eine Festigkeitssteigerung gibt, die anschliessend wieder abfällt. Die Steigerung der Festigkeit nach 7 Tagen bei Heißwasserlagerung (HW90) beträgt mit $23,9 \text{ N/mm}^2$ nahezu das 6-fache der 24 Stunden Festigkeit. Bei dieser Nachbehandlungsmethode (HW90) wurde nach 28 Tagen im Vergleich zur 7 Tage Biegezugfestigkeit eine Festigkeitsminderung, um $12,1 \text{ N/mm}^2$, ermittelt.

Bei der Heißluftlagerung (L250) ist eine kontinuierliche Festigkeitsminderung festzustellen, die nach 56 Tagen $1,5 \text{ N/mm}^2$ weniger als die 7 Tage Festigkeit und ca. 3,8-fach größer als die 24 Stunden Festigkeit ist.

4.5.8 Serie M4 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

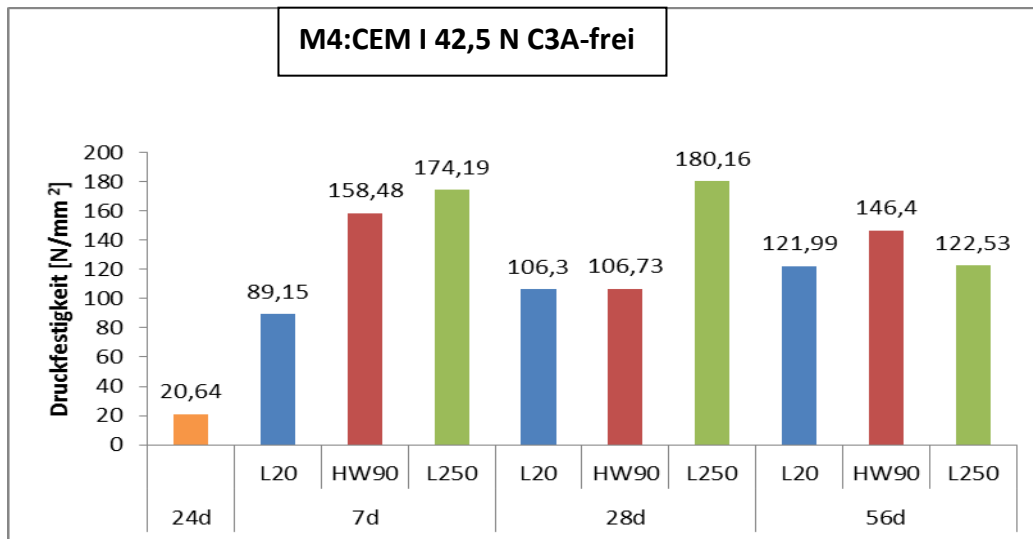


Abbildung 4-32: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M4 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-32 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit der Mischung M4 (CEM I 42,5 N C3A-frei) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden. Betrachtet man die Nachbehandlungsmethoden so sieht man auf den ersten Blick, dass nach 7 Tagen bei allen Nachbehandlungsmethoden eine deutliche Festigkeitssteigerung einhergeht, die nach 56 Tagen (abgesehen von L20) wieder abfällt.

Bei Normalluftlagerung (L20) wurde nach 56 Tagen eine kontinuierliche Steigerung der Festigkeit ermittelt (122 N/mm²). Im Laufe der weiteren Festigkeitsentwicklungen stellt sich heraus, dass bei L20 verglichen zur Wärmebehandlung HW90 nach 28 Tagen eine fast gleiche Festigkeitssteigerung gemessen wurde (ca. 106 N/mm²).

Es ist weiteres zu sehen, dass es nach 28 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode HW90 eine Festigkeitsminderung gibt, die nach 56 Tagen wieder steigt.

Die festigkeitssteigernde Wirkung der Heißluftnachbehandlung L250 nach 28 Tagen fällt etwas höher aus als jene die durch die Heißwassernachbehandlung herbeigeführt wurde. Es ist auch erkennbar, dass bei der Heißluftbehandlung (L250) nach 28 Tagen im Vergleich zur 7 Tage-Festigkeit eine mittlere Druckfestigkeitsteigerung um ca. 3,43 % gemessen wurde.

Innerhalb der Prüfzeit von 28 bis zu 56 Tagen zeigt die Nachbehandlungsmethode (L250) eine Festigkeitsminderung um 68%.

4.5.9 Serie M5 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

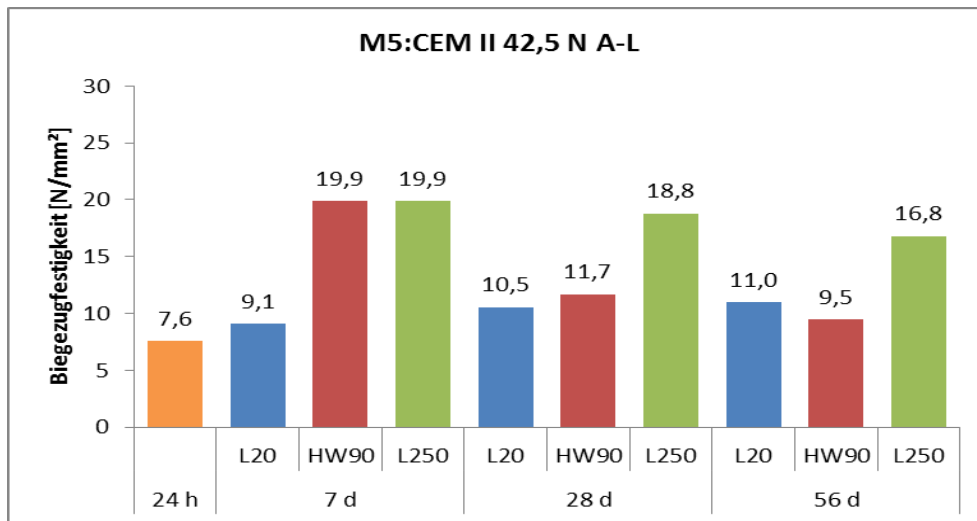


Abbildung 4-33: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M5 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-33 zeigt die Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Mischung M5 (CEM II 42,5 N A-L) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden.

Bei der Begutachtung dieses Diagramms, nimmt man wahr, dass innerhalb verschiedener Zeitspannen folgende Ergebnisse eruiert wurden:

Bei der Luftlagerung (L20) ist bis zum 56. Tag eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die mit 11 N/mm^2 ca. 21% über der 7 Tage-Festigkeit liegt.

Sowohl die Heißluftlagerung L250, als auch die Heißwasserlagerung HW90 zeigen nach 7 Tagen eine starke Erhöhung der Festigkeit, die ca.162% über der 24 Stunden-Festigkeit liegt und anschliessend nach 56 Tagen wieder kontinuierlich abfällt.

Bei der Heißwasserlagerung (HW90) ist nach 56 Tagen eine kontinuierliche Festigkeitsminderung festzustellen, die mit $9,5 \text{ N/mm}^2$ ca. 109,5% unter der 7 Tage-Festigkeit liegt.

Bei der Heißluftlagerung (L250) ist ebenfalls zwischen dem 7 und 56 Tag eine kontinuierliche Festigkeitsminimierung festzustellen, die mit $16,8 \text{ N/mm}^2$ ca. 18,5% unter der 7 Tage-Biegezugfestigkeit liegt. Das heißt, dass die Heißwassernachbehandlung bei $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (HW90) sowie, Heißluftnachbehandlung bei $250 \text{ }^\circ\text{C}$ (L250) bei der Mischung M5 ab 7 Tag (Prüfzeitpunkt), zu einer kontinuierliche Minderung aller betrachteten Biegezugfestigkeiten führt. Es ist zu sehen, dass nach 7 Tagen bei den Nachbehandlungsmethoden (HW90) und (L250) eine ähnliche Festigkeitssteigerung ermittelt wurde ($19,9 \text{ N/mm}^2$).

4.5.10 Serie M5 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

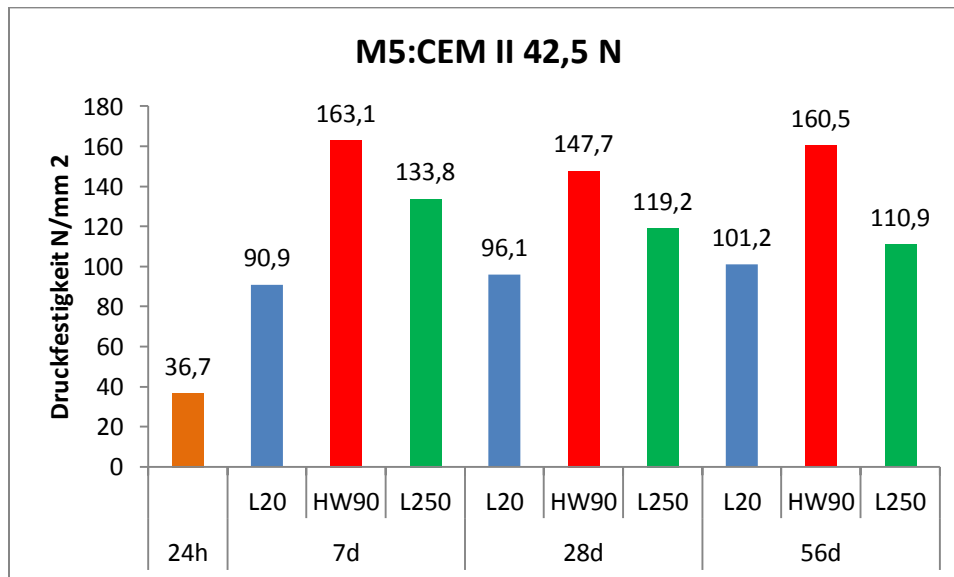


Abbildung 4-34: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M5 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-34 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit der Mischung M5 (CEM II 42,5 N) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden.

Bei der Luftlagerung (L20) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen mit $101,2 \text{ N/mm}^2$ ca. 11,3% über der 7 Tage-Festigkeit liegt.

Es ist zu sehen, dass es nach 7 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode (HW90) eine sehr starke Festigkeitssteigerung gibt, die nach 28 Tagen abklingt und anschliessend nach 56 Tagen wieder steigt. Es ist zu sehen, dass die 56 Tage-Druckfestigkeit bei der Nachbehandlungsmethode (HW90) mit $160,5 \text{ N/mm}^2$, ca. 9% über der 28 Tage-Festigkeit liegt.

Die Nachbehandlungsmethode HW90 liefert nach 7 Tagen die höchste festigkeit, sie beträgt $163,1 \text{ N/mm}^2$. Die Festigkeitsteigerung bei der Heißluftbehandlung (L250) beträgt nach 7 Tagen mit $133,8 \text{ N/mm}^2$ ungefähr das 3,65-fache der 24 Stunden-Festigkeit. Anschließend ist eine kontinuierliche Festigkeitsminderung festzustellen, die nach 56 Tagen mit $110,9 \text{ N/mm}^2$ ca. 17% unter der 7 Tage-Festigkeit liegt.

4.5.11 Serie M6 Biegezugfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

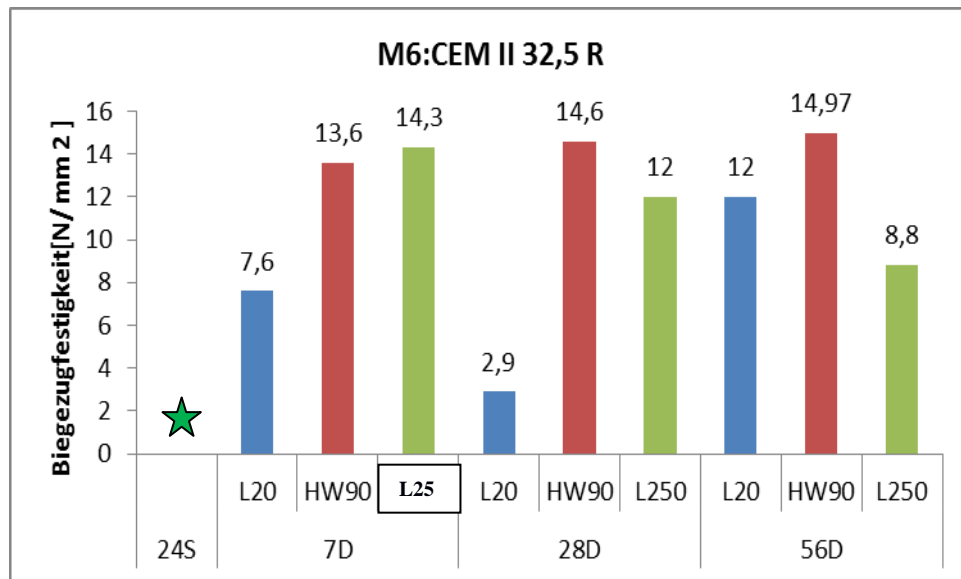


Abbildung 4-35: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M6 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-35 zeigt die Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Mischung M6 (CEM II 32,5 R) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden.

Da die Mischung M6 innerhalb von 24 Stunden zu wenig ausgehärtet war, sodass man überhaupt keine Biegezugfestigkeit bestimmen konnte, war die Festigkeitsprüfung nicht möglich.

Wie auf dem Diagramm zu sehen, ist nach 7 Tagen bei einigen Nachbehandlungsmethoden eine Festigkeitssteigerung gemessen worden, die anschließend wieder abfällt.

Vergleicht man die Festigkeitsentwicklung bei der Nachbehandlungsmethode (L20) so stellt man fest dass die Nachbehandlungsmethode (L20) nach 28 Tagen im Vergleich zur 7 Tage-Festigkeit eine sehr starke Festigkeitsminderung aufweist, die anschliessend nach 56 Tagen wieder steigt. Es ist zu sehen, dass bei der Normalluftlagerung (L20) nach 56 Tagen im Vergleich zu der 7 Tage-Biegezugfestigkeit eine Festigkeitssteigerung um ca. 58% gemessen wurde.

Bei der Heißwasserlagerung (HW90) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen mit $14,97 \text{ N/mm}^2$ ca. 10% über der 7 Tage-Festigkeit liegt.

Die Nachbehandlungsmethode (HW90) verglichen zur Heißluftbehandlung (L250) wirkte sich bei der 28 Tage Festigkeit positiver auf die Druckfestigkeitsentwicklung aus. Dieses Phänomen wurde auch bei der 56 Tage-Festigkeit beobachtet.

Bei der Heißluftbehandlung (L250) ist eine kontinuierliche Festigkeitsminderung festzustellen, die nach 56 Tagen mit $8,8 \text{ N/mm}^2$ ca. 61,54% unter der 7 Tage-Festigkeit liegt. Die

Festigkeitsentwicklung bei der Heißwasserlagerung (HW90) zeigt nach 56 Tagen die höchste Festigkeit, sie beträgt $14,97 \text{ N/mm}^2$. Das heisst, dass bei Mischung M6 die Nachbehandlungsmethode (HW90) für einen Zement der Sorte CEM II 32,5 R in Bezug auf die Druckfestigkeit am günstigsten ist.

4.5.12 Serie M6 Druckfestigkeit bei Nachbehandlung L20, HW90, L250

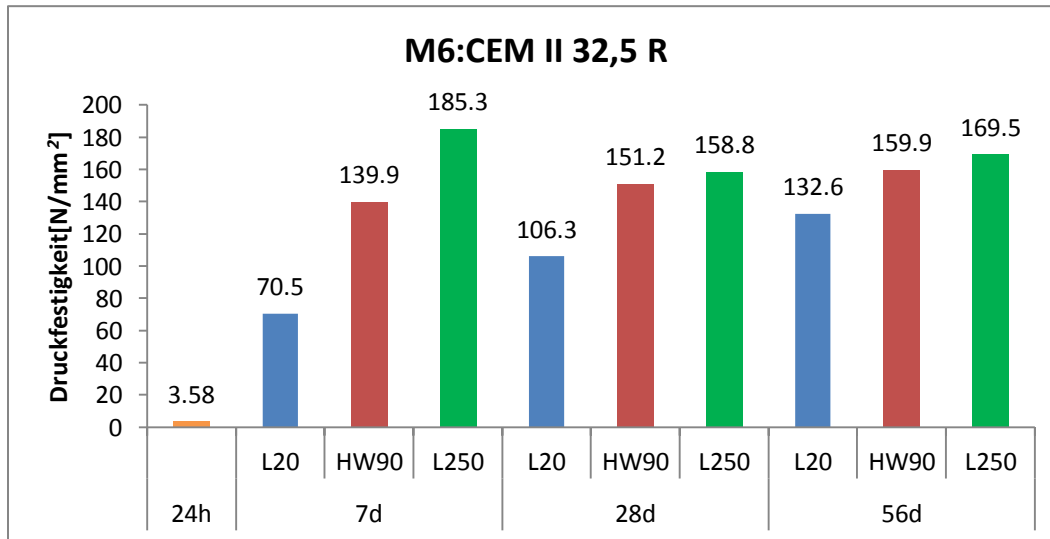


Abbildung 4-36: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M6 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-36 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit der Mischung M6 (CEM II 32,5 R) bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden.

Bei der Nachbehandlungsmethode (L20) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen mit $132,6 \text{ N/mm}^2$ ca. 88% über der 7 Tage-Festigkeit liegt. Auch bei der Heißwasserbehandlung (HW90) erfolgt eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung, die nach 56 Tagen mit $159,9 \text{ N/mm}^2$ ca. 14,3% über der 7 Tage Festigkeit liegt.

Die Heißluftlagerung (L250) zeigt nach 7 Tagen im Vergleich zu den anderen Nachbehandlungsmethoden eine starke Erhöhung der Festigkeit, die nach 28 Tagen abklingt und anschliessend bis zum 56 Tage wieder steigt. Bei näherer Betrachtung ist zu sehen, dass bei der Nachbehandlungsmethode (L250) nach 56 Tagen im Vergleich zur 7 Tage-Festigkeit eine Festigkeitsminderung um etwa 8,5% gemessen wurde. Es ist zu bemerken, dass bei der Festigkeitsentwicklung der Mischung M6 unabhängig von dem Prüfzeitpunkt, von der Heißluftbehandlung (L250) positiver als die Heißwasserbehandlung (HW90) beeinflusst wurde.

Die Nachbehandlungsmethode (L250) zeigt mit $185,3 \text{ N/mm}^2$ nach 7 Tagen im Vergleich zu den anderen Nachbehandlungsmethoden die höchste Festigkeit. Das heisst, dass die Nachbehandlungsmethode (L250) bei Mischung M6 für einen Zement der Sorte CEM II 32,5 R in Bezug auf die Druckfestigkeit am günstigsten ist.

4.6 Überblick über die Einflüsse der Nachbehandlungen auf die Festigkeitsentwicklung

In diesem Abschnitt wird die Festigkeitsentwicklung hinsichtlich der Nachbehandlungsmethode und ihre Einflüsse auf Biegezug- und Druckfestigkeit innerhalb der verschiedenen Zeitperioden bei allen Mischungen interpretiert.

Das dargestellte Säulendiagramm in jeder Abbildung, veranschaulicht auch den Einfluss der Nachbehandlung innerhalb der verschiedenen Prüfzeitpunkte auf die Festigkeitsentwicklungen der Mischungen, die prozentuell verglichen werden müssen.

Die Basiswerte sind die 24 Stunden-Festigkeiten der Mischungen im Vergleich zur jeweiligen Mischung mit den Nachbehandlungsmethoden L20, HW90, L250.

Die Festigkeiten aller Mischungen bei verschiedenen Nachbehandlungsmethoden und bei einem Betonalter von 1, 7, 28 und 56 Tage, sind in den Abbildungen 4-37 bis 4-43 dargestellt. Bei den Festigkeitsangaben handelt sich dabei immer um den Mittelwert aus drei Prüfkörpern. Die Festigkeitsentwicklung der Mischungsserie M6 (Ladce CEM II B-S 32.5) war derart langsam, dass nach 24 Stunden keine Biegezugfestigkeit bestimmt werden konnte.

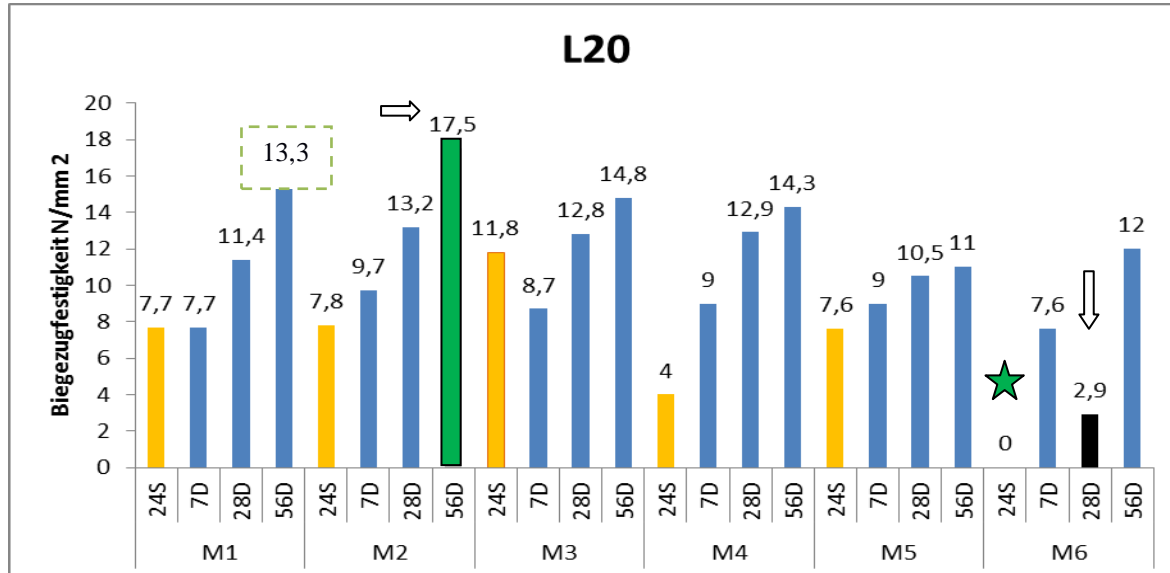
Bezeichnungen und Farbcode

Die farbliche Gestaltung in allen Diagrammen der Nachbehandlungsmethode, die Abkürzungen und deren Bedeutung sind in den Tabellen 4-10 als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 4-10: Verwendete Farben und deren Bedeutung

| Farbe | Unterscheidungsmerkmal |
|---------|---|
| Grün | Die Höchste Festigkeit in Abhängigkeit der Zementart |
| Orange | 24 Stunden-Festigkeit in Abhängigkeit der Zementart |
| Schwarz | Die niedrigste Festigkeit in Abhängigkeit der Zementart |

4.6.1 Vergleich der Biegezugfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L20



Überblicksdiagramm 4-37: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L20 auf Biegezugfestigkeit aller Mischungen

In Abbildung 4-37 ist die Biegezugfestigkeitsentwicklung aller Mischungen, nachbehandelt bei normaler Luftlagerung (L20) dargestellt. Betrachtet man dieses Diagramm, stellt man fest, dass innerhalb der verschiedenen Zeitspannen folgende Ergebnisse ermittelt wurden:

Bei der Mischung M1 (hergestellt mit CEM I 52,5N C3A-frei) wurde nach 7 Tagen im Vergleich zur 24 Stunden-Festigkeit eine konstante Festigkeitsentwicklung, die anschliessend innerhalb 56 Tagen kontinuierlich steigt, ermittelt.

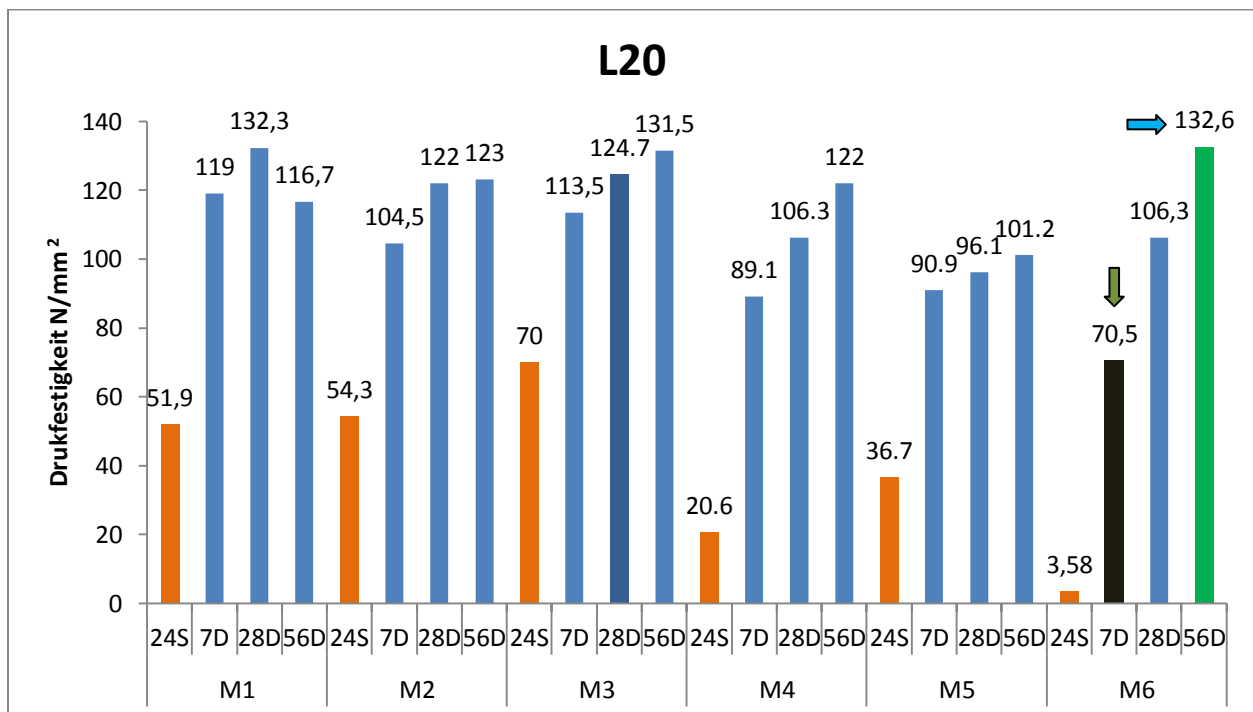
Bei der Mischung M2 (hergestellt mit CEM I 52,5N weiß) ist eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festzustellen, die nach 56 Tagen ca.124,5% über der 24 Stunden- Festigkeit liegt. Vergleicht man die Festigkeitsentwicklung bei der Mischung M2, so zeigt sich, dass die Mischung M2 im Durchschnitt einen besseren Wert besitzt, als die anderen Mischungen der Gruppe CEM I 52,5 Zemente. Das heisst, dass die Nachbehandlungsmethode L20 bei der Mischung M2 für den Zement der Sorte CEM I 52,5 N weiß im Bezug auf die Biegezugfestigkeit am günstigsten ist.

Hier stellt die Mischung M3 (hergestellt mit CEM I52,5R Blau) nach 7 Tagen bei der Nachbehandlungsmethode L20 im Gegensatz zu allen anderen Mischungen einen markanten negativen Einfluss dar. Es ist zu sehen, dass es nach 7 Tagen bei der Mischung M3 eine Festigkeitsminderung gibt, die sich nach 56 Tagen kontinuierlich steigert. Das heisst, die 7 Tage-Festigkeit nimmt bei der Mischung M3 im Vergleich zur 24 Stunden-Festigkeit ab.

Beim Vergleich der Zemente mit der Festigkeitsklasse 42,5 werden bei Luftlagerung (L20) bei CEM I Zementen (M4) höhere Festigkeit erreicht wie bei CEM II Zementen (M5).

Vergleicht man die CEM II Zemente so werden im Rahmen dieser Versuchsreihe mit dem CEM II 32,5 (M6) Zement nach 56 Tagen höhere Festigkeiten erreicht wie beim Zement der Festigkeitsklasse 42,5 (M5).

4.6.2 Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L20



Überblicksdiagramm 4-38: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L20 auf Druckfestigkeit alle Mischungen

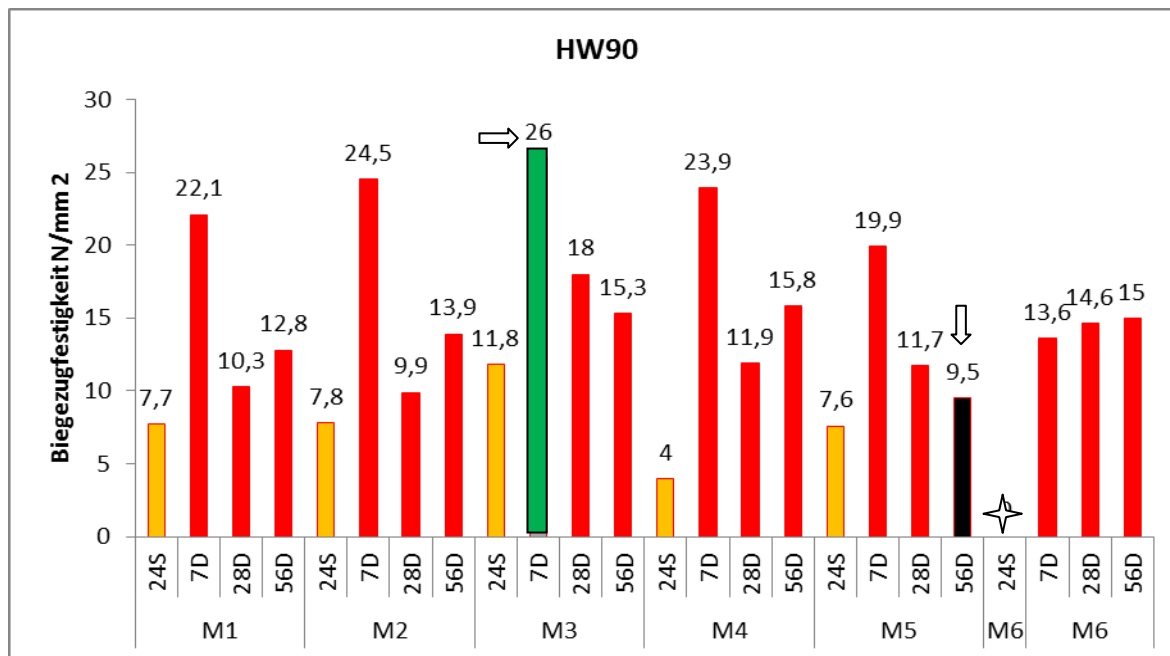
In Abbildung 4-38 ist die Druckfestigkeitsentwicklung aller Mischungen bei normaler Luftlagerung (L20) dargestellt. Auf den ersten Blick ist auffallend, dass bei den Mischungen (M2/M3/M4/M5/M6) innerhalb der 56 Tage eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung auftritt. Bei der Mischung M1 ist ab dem 28 Tag. wieder eine Reduktion der Festigkeit zu beobachten.

Vergleicht man die Ergebnisse der Zemente der Festigkeitsklasse 52,5, so zeigt sich, dass die Mischung M3 im Durchschnitt eine höhere Festigkeit besitzt, als die anderen Mischungen. Die absolut höchste 24 Stunden-Druckfestigkeit im Vergleich zu allen anderen Mischserien, zeigt die Mischung M3 (hergestellt mit CEM I 52,5 R-Blau) mit 70 N/mm².

Beim Vergleich der Zemente mit einer Nennfestigkeit von 42,5 N/mm² erreicht der Zement der Sorte CEM I (M4) höhere Festigkeit als der Zement der Sorte CEM II (M5).

Erstaunlicherweise erreicht der Zement der Festigkeitsklasse 32,5 (M6) absolut gesehen die höchsten Festigkeiten. Wobei die Zemente der Festigkeitsklasse 52,5 der Mischungen M1 und M2 defacto die gleiche Festigkeit erreichen. Eine Nachbehandlung bei Luftlagerung L20 ist für die Zemente der Mischungen M1,M3 und M6 empfehlenswert.

4.6.3 Vergleich der Biegezugfestigkeitsentwicklung allen Serien bei HW90



Überblicksdiagramm 4-39: Einfluss der Nachbehandlungsmethode HW90 auf Biegezugfestigkeit aller Mischungen

In Abbildung 4-39 sind die Biegezugfestigkeitsentwicklungen aller Mischungen bei der Heißwasserbehandlung (HW90) dargestellt. Vergleicht man die Ergebnisse so sieht man, dass die Nachbehandlungsmethode (HW90) sich eindeutig besser auf die 7 Tage-Druckfestigkeit auswirkt, als bei anderen Prüfzeiten. Es ist zu sehen, dass es nach 7 Tagen bei den Mischungen (M1/M2/M3/M4/M5) eine sehr starke Festigkeitssteigerung gibt, die daraufhin bis zum 56 Tag wieder abfällt.

Um für diese Art der Nachbehandlung genauere Aussage treffen zu können wäre es erforderlich die Festigkeitsentwicklung weiter zu beobachten. Die Erkenntnisse dieser Versuchsreihe zeigen, dass eine Nachbehandlung HW90 im Hinblick auf die Biegezugfestigkeit nicht zu empfehlen ist.

4.6.4 Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung allen Serien bei HW90

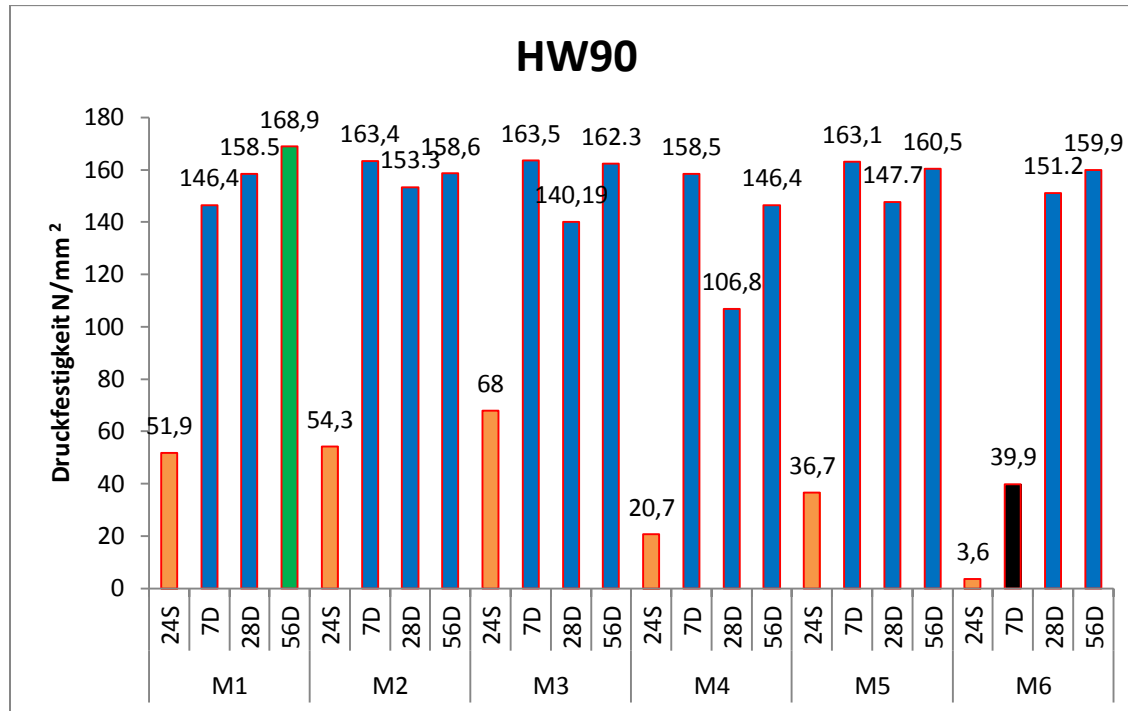


Diagramm 4-40: Einfluss der Nachbehandlungsmethode HW90 auf Druckfestigkeit aller Mischungen

Bei der Auslegung dieses Diagramms stellt man fest, dass innerhalb verschiedener Zeitspannen folgende Ergebnisse ermittelt wurden:

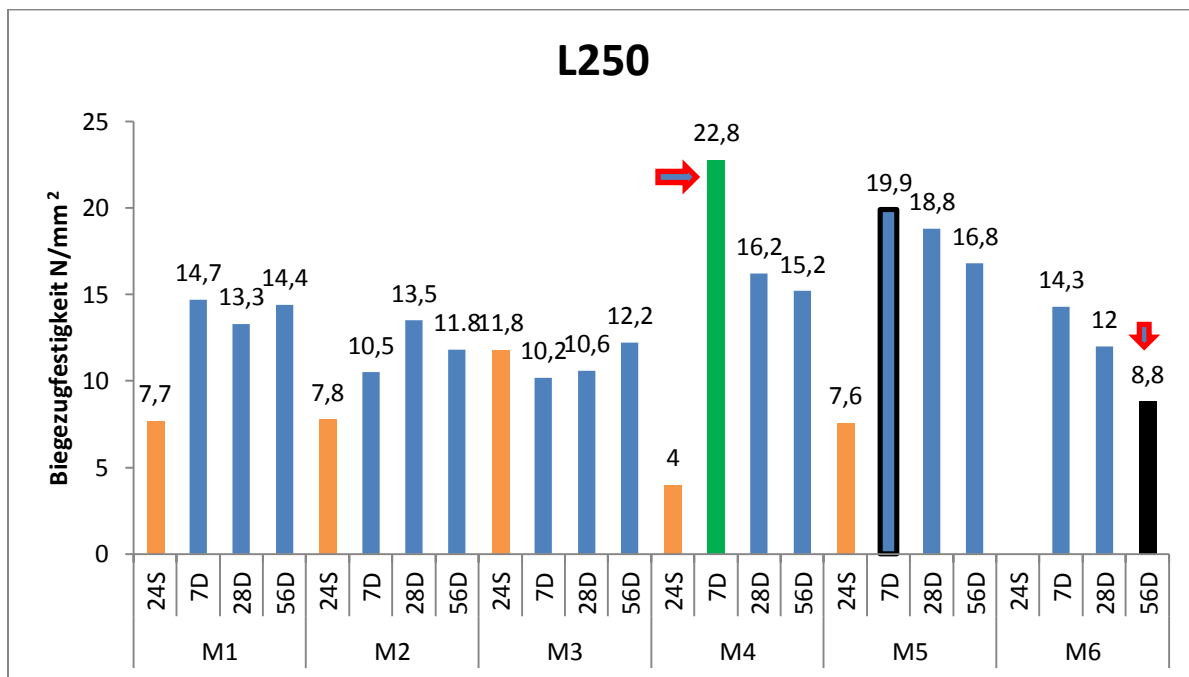
Die Heißwasserbehandlung bei 90° C nach 56 Tagen, wirkt sich im Vergleich zur 24 Stunden-Festigkeit, in dieser Versuchsreihe bei allen Mischungen eindeutig stark auf die Druckfestigkeit aus.

Bei der Betrachtung von heißwasserbehandelten Mischungen (M1 und M6), stellt sich nach 56 Tagen, verglichen zur 24 Stunden-Festigkeit eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung ein. Dieses Verhalten wurde bei anderen Mischungen nicht beobachtet. Bei näherer Betrachtung ist zu sehen, dass es nach 28 Tagen bei einigen Mischungen (M2/M3/M4/M5) im Vergleich zur 7 Tage-Festigkeit eine Festigkeitsminderung gibt, die sich anschliessend nach 56 Tagen steigert. Im Laufe der weiteren Festigkeitsentwicklungen stellt sich jedoch heraus, dass bei der Mischung M1 (CEM I 52,5 N C3A-Frei) die höchste Festigkeit nach 56 Tagen ermittelt wurde (168,9 N/mm²). Das heisst, dass bei Mischung M1 ist die Nachbehandlungsmethode (HW90) für einen Zement der Sorte CEM I 52,5 N-frei in Bezug auf die Druckfestigkeit am günstigsten ist.

Bei der Mischung M4 ist in der Prüfzeit von 7 bis 28 Tagen eine Festigkeitsminderung zu vermerken, die im Durchschnitt 67,4% beträgt.

Die Versuchsreihe zeigt, dass eine Nachbehandlung in Heisswasser (HW90) bei allen Zementen zu einer raschen Festigkeitssteigerung führt. Beim C3A freien Zement und beim CEM II 32,5 R kann eine kontinuierliche Festigkeitssteigerung festgestellt werden, die anderen Zemente verlieren zwischen dem 7 und 28 Tag wieder an Druckfestigkeit. Bei den letzteren Zementen besteht nur ein geringer Unterschied zwischen der 7 Tage und 56 Tage Festigkeit.

4.6.5 Vergleich der Biegezugfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L250



Überblicksdiagramm 4-41: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L250 auf Biegezugfestigkeit aller Serien

In Abbildung 4-41 ist die Biegezugfestigkeitsentwicklungen aller Mischungen bei der Heißluftbehandlung (L250) dargestellt.

Es zeigen sich bei den verschiedenen Zementarten sehr unterschiedliche Entwicklungen in der Biegezugfestigkeit. Auffallend ist jeweils die hohe 7-Tage Festigkeit bei den Zementen der Festigkeitsklasse 42,5. Allerdings sinkt die Festigkeit genauso wie beim CEM II 32,5 anschließend rasch wieder ab.

Eine besonders positive Wirkung der Heissluftnachbehandlung L250 auf die Biegefestigkeit bei der Verwendung der Zemente dieser Arbeit ist nicht erkennbar.

4.6.6 Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung allen Serien bei L250

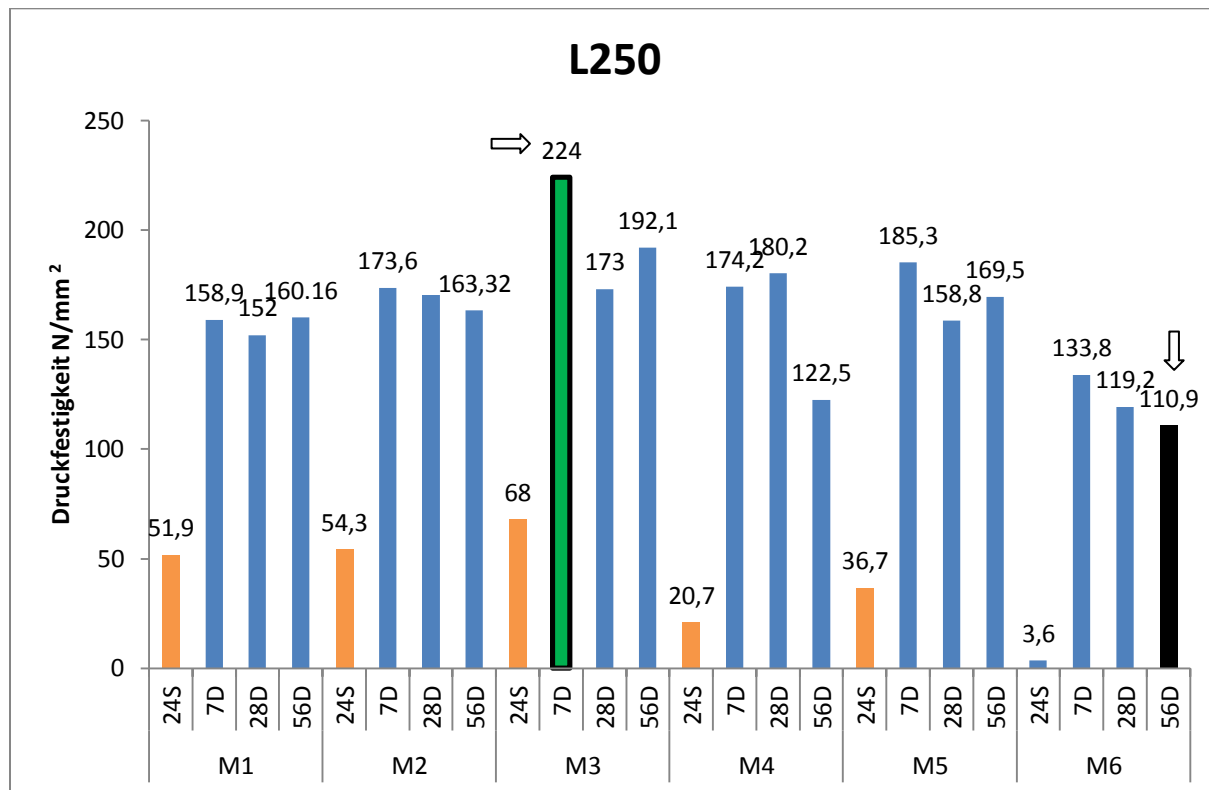


Abbildung 4-42: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L250 auf Druckfestigkeit aller Mischungen

In Abbildung 4-42 ist die Festigkeitsentwicklungen aller Mischungen bei der Heißluftbehandlung (L250) dargestellt. Bei der Interpretation dieses Diagramms, sieht man, dass innerhalb verschiedener Zeitspannen folgende Ergebnisse ermittelt wurden:

Bei den Mischungen M2/M3/M5/M6 ist die festigkeitssteigernde Wirkung dieser Nachbehandlungsmethode bei der 7 Tage-Druckfestigkeit, generell etwas höher als bei den anderen Prüfzeitpunkten der jeweiligen Mischung. Dieses Ereignis wurde bei den Mischungen M1 und M4 nicht beobachtet.

Außerdem fällt auf, dass es nach 56 Tagen bei den Mischungen M2 und M6 verglichen zur 7 Tage-Festigkeit eine kontinuierliche Festigkeitsminderung gibt. Es ist zu sehen, dass es nach 28 Tagen bei den Mischungen M1/M3/M5 im Vergleich zur 7 Tage-Festigkeit eine Festigkeitsminderung gibt, die anschliessend nach 56 Tagen steigt.

Wenn man die Werte der Festigkeiten vergleicht, so zeigt sich, dass die Mischung M3 im Durchschnitt einen besseren Wert innehat, als die anderen Mischungen. Die Mischung M3 (CEM I 52,5 R Blau) weist nach 7 Tagen bei Nachbehandlungsmethode L250 die absolut höchste Druckfestigkeit auf, welche 224 N/mm^2 beträgt. Was heißt, dass bei Mischung M3 die Nachbehandlungsmethode (L250) für einen Zement der Sorte CEM I 52,5 R-Blau in Bezug auf die Druckfestigkeit am günstigsten ist.

Die Nachbehandlungsmethode L250 bringt bei allen Zementsorten relativ gleichmäßig gute Ergebnisse wobei die Druckfestigkeiten beim CEM I 52,5 R (Blau) heraussticht. Hier werden auch absolut die höchsten werte erreicht.

Abhängig von der Nachbehandlungsmethode und der Zementsorte werden im Durchschnitt verglichen zur 24 Stunden-Festigkeit folgende Festigkeitsteigerungen in % erreicht und tabellarisch dargestellt.

Tabelle 4-11; Prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Biegezugfestigkeit.

| L20 | <u>M1</u> | <u>M2</u> | <u>M3</u> | <u>M4</u> | <u>M5</u> |
|------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I52,5R Blau | CEM I42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N |
| 7 Tage | | 124,36% | -73,8% | 225% | 118,42% |
| 28 Tage | 148% | 169,24% | 108,5% | 322,5% | 138,16% |
| 56 Tage | 172,8% | 224,36% | 125,43% | 357,5% | 144,74% |

Tabelle 4-12; Prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Druckfestigkeit.

| L20 | <u>M1</u> | <u>M2</u> | <u>M3</u> | <u>M4</u> | <u>M5</u> |
|------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I52,5R Blau | CEM I42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N |
| 7 Tage | 129,3% | 92,5% | 62,15 | 332,5% | 147,7% |
| 28 Tage | 154,9% | 124,7% | 78,15% | 416% | 161,9% |
| 56 Tage | 124,9% | 126,7% | 87,86% | 492,24% | 175,75% |

Tabelle 4-13; Prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Biegezugfestigkeit.

| HW90 | <u>M1</u> | <u>M2</u> | <u>M3</u> | <u>M4</u> | <u>M5</u> |
|-------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I52,5R Blau | CEM I42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N |
| 7 Tage | 187% | 214% | 120,34% | 497,5% | 161,85% |
| 28 Tage | 33,77% | 26,93% | 52,54% | 197,5 | 54% |
| 56 Tage | 66,24% | 78,2% | 29,66% | 295% | 29% |

Tabelle 4-13; Prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Druckfestigkeit.

| HW90 | <u>M1</u> | <u>M2</u> | <u>M3</u> | <u>M4</u> | <u>M5</u> |
|-------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I52,5R Blau | CEM I42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N |
| 7 Tage | 182% | 201% | 140,45% | 665,7% | 344,42% |
| 28 Tage | 205,4% | 182,32% | 160,17% | 416% | 302,46% |
| 56 Tage | 225,44% | 192% | 138,7% | 607,25% | 337,33% |

Tabelle 4-14; Prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Biegezugfestigkeit.

| L250 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
|-------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I 52,5R Blau | CEM I 42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N |
| 7 Tage | 90,9% | 34,61% | -15,7% | 470% | 161,85% |
| 28 Tage | 72,72% | 73% | -11,32% | 305% | 147,37% |
| 56 Tage | 87% | 51,41% | 3,4% | 280% | 121% |

Tabelle 4-15; Prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Druckfestigkeit.

| L250 | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
|-------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---------------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM I 52,5R Blau | CEM I 42,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N |
| 7 Tage | 206,17% | 219,7% | 229,5 | 741,6% | 404,9% |
| 28 Tage | 193% | 213% | 154,4% | 332,7% | 332,7% |
| 56 Tage | 208,5% | 201% | 182,5% | 361,9% | 361,9% |

Die Festigkeitsentwicklung der Mischungsserie M6 (Ladce CEM II B-S 32.5) war derart langsam, dass nach 24 Stunden keine Biegezugfestigkeit bestimmt werden konnte. Aus diesem Grund wurde bei der Mischung M6, abhängig von der Nachbehandlungsmethode im Durchschnitt, verglichen zu 7 Tage-Festigkeit extra eine Tabelle dargestellt.

Tabelle 4-16; Prozentuale Steigerung verglichen zu 7 Tage Biegezugfestigkeit bei M6

| Mischung M6 | L20 | HW90 | L250 |
|--------------------|------------|-------------|-------------|
| 28 Tage-Festigkeit | -162% | 7,35% | -19,17% |
| 56 Tage-Festigkeit | 57,9% | 10,3% | -62,5% |

Tabelle 4-17; Prozentuale Steigerung verglichen zu 7 Tage Druckfestigkeit bei der Mischung M6

| Mischung M6 | L20 | HW90 | L250 |
|--------------------|------------|-------------|-------------|
| 28 Tage-Festigkeit | 50,8% | 279% | -12,25% |
| 56 Tage-Festigkeit | 88,1% | 300,75% | -20,65% |

4.7 Resümee – Ergebnisse

Höchste, bzw. niedrigste Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeit

Abschließend ist in der Tabelle 4-18 und 4-19 ein Beurteilungssystem der Gesamtergebnisse der Druck- und Biegezugfestigkeit dargestellt. Aus Tabelle 4-17 und 4-18, geht hervor, dass bei welchen Mischungen die besten Ergebnisse erreicht werden können.

Tabell 4-18 Best- und Gesamtergebnisse der **Druckfestigkeit**

| Zementsorten | <u>M1</u> | <u>M2</u> | <u>M3</u> | <u>M4</u> | <u>M5</u> | <u>M6</u> |
|----------------|-------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|----------------|----------------|
| Nachbehandlung | CEM I 52,5N C3A-frei | CEM I 52,5N weiß | CEM 152,5R Blau | CEM 142,5 N C3A-frei | CEM II 42,5 N | CEM II 32,5 R |
| 24 h | 51,9 | 54,4 | 68 | 20,7 | 36,7 | 3,6 |
| 7d-L20 | 119 | 104,5 | 113,5 | 89,1 | 90,9 | 70,5 |
| 7d-HW90 | 146,4 | 163,4 | 163,5 | 158,5 | 163,1 | 139,9 |
| 7d-L250 | 158,9 | 173,7 | 224 | 174,2 | 133,8 | 185,3 |
| 28d-L20 | 132,3 | 122 | 124,7 | 106,3 | 96,1 | 106,3 |
| 28d-HW90 | 158,5 | 153,3 | 140,19 | 106,8 | 147,7 | 151,2 |
| 28d-L250 | 151,9 | 170,5 | 173,1 | 180,1 | 119,2 | 158,8 |
| 56d-L20 | 116,7 | 123,1 | 131,5 | 122 | 101,2 | 132,6 |
| 56d-HW90 | 168,9 | 158,6 | 162,3 | 146,4 | 160,5 | 159,9 |
| 56d-L250 | 160,2 | 163,3 | 192,1 | 122,5 | 110,9 | 169,5 |
| BEST | <u>56d-HW90</u> | <u>28d-L250</u> | <u>7d-L250</u> | <u>28d-L250</u> | <u>7d-HW90</u> | <u>7d-L250</u> |



Tabell 4-19 Best- und Gesamtergebnisse der **Biegezugfestigkeit**

| | <u>M1</u> | | <u>M2</u> | | <u>M3</u> | | <u>M4</u> | | <u>M5</u> | | <u>M6</u> | |
|-------------|-------------------------|------|---------------------|------|--------------------|----------------|-------------------------|------|---------------|------|---------------|------|
| | CEM I 52,5N C3A-frei | | CEM I 52,5N weiß | | CEM 152,5R Blau | | CEM 142,5 N C3A-frei | | CEM II 42,5 N | | CEM II 32,5 R | |
| 24 h | Min | 7,7 | min | 7,8 | | 11,8 | Min | 4 | Min | 7,6 | ✦ | 0 |
| 7d-L20 | | 7,8 | | 9,7 | Min | 8,7 | | 9 | | 9 | | 7,6 |
| 7d-HW90 | | 22,1 | max | 24,5 | Max | 26,7 | Max | 23,9 | max | 19,9 | | 13,6 |
| 7d-L250 | | 14,7 | | 10,6 | | 10,2 | | 22,8 | | 19,9 | | 14,3 |
| 28d-L20 | | 11,4 | | 13,1 | | 12,8 | | 12,9 | | 10,5 | | 2,9 |
| 28d-HW90 | | 10,3 | | 10 | | 18 | | 11,8 | | 11,7 | max | 14,7 |
| 28d-L250 | | 13,3 | | 13,5 | | 10,7 | | 16,2 | | 18,8 | | 12 |
| 56d-L20 | Max | 15 | | 17,5 | | 14,8 | | 14,3 | | 11 | | 12 |
| 56d-HW90 | | 12,8 | | 13,9 | | 15,3 | | 15,8 | | 9,5 | | 15 |
| 56d-L250 | | 14,4 | | 11,8 | | 12,2 | | 15,2 | | 16,8 | | 8,8 |
| BEST | | | | | | 7d-HW90 | | | | | | |



Zum Schluss wurde in der nachfolgenden Abbildung 4-43 eine diagrammatische Darstellung der besten Festigkeitsentwicklung pro Mischserie bei allen drei Nachbehandlungsmethoden dargestellt.

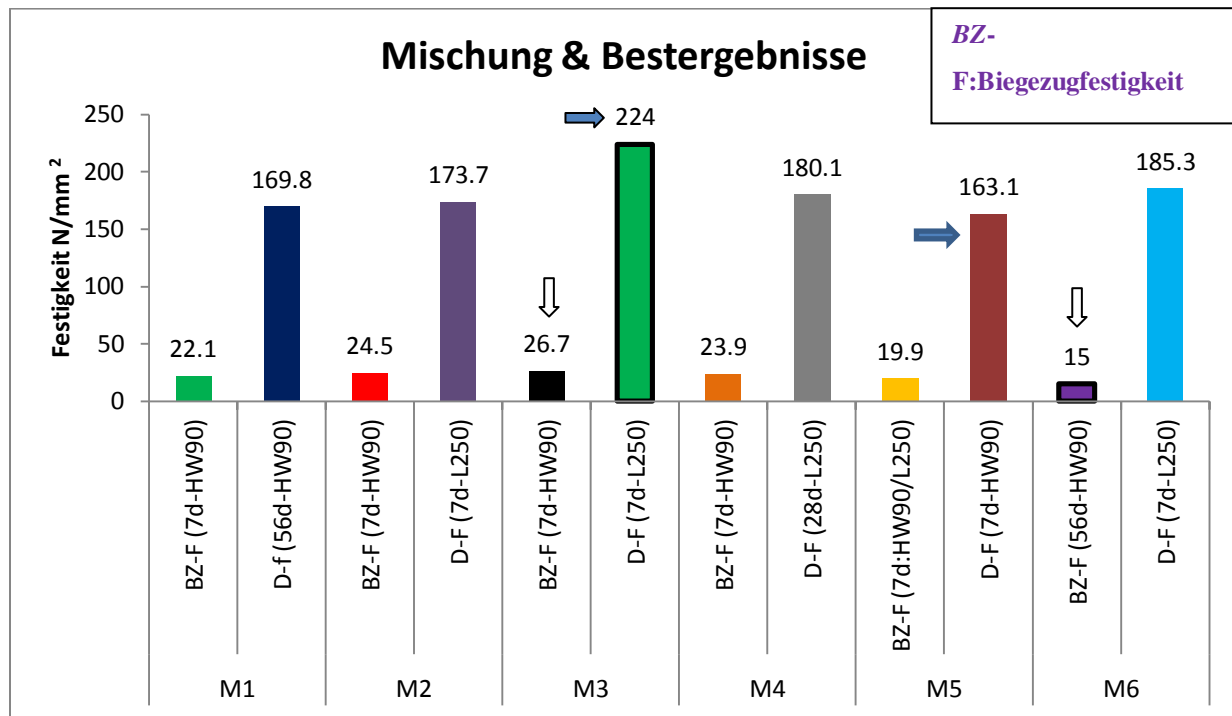


Abbildung 4–43: Bestergebnisse pro Mischserie bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Betrachtet man die Ergebnisse der Festigkeitsentwicklung, so erkennt man, dass innerhalb 56 Tagen die Mischung M3, unabhängig von Nachbehandlungsmethoden, eindeutig an Festigkeit annahm.

Bemerkenswert ist auch, dass mit der untersuchten Mischserie M3 bei den drei Nachbehandlungsmethoden ziemlich hohe Festigkeiten erreicht wurden. Die untersuchte Mischung M3 (CEM I 52,5 R-Blau) erreichte die Maximale Druckfestigkeit bei Heissluftlagerung (250°C) von 224 N/mm².

Die absolut höchste Biegezugfestigkeit erreichte ebenfalls die Mischung M3 (CEM I 52,5 R) bei der Nachbehandlungsmethode HW90, die nach 7 Tagen geprüft wurde und beträgt 26.7 N/mm².

Bemerkenswert ist, dass mit der untersuchte Mischungen M5 (CEM II B-S 42,5 N) bei der Nachbehandlungsmethode (HW90) niedrigste Druckfestigkeit erreicht wurde (163,1 N/mm²).

5 Zusammenfassung

Ultra High Performance Concrete (UHPC) ist ein gefügedichter und korrosionsbeständige Hochleistungs-Werkstoff, der durch seine spezielle Zusammensetzung im Nano- und Mikrostrukturbereich (Partikelgröße unter 0,125 mm) widerstandsfähiger gegen problematischen Umwelteinflüsse als herkömmlicher Beton herausragende Eigenschaften besitzt.

Das Ziel dieser Arbeit war es, Einflüsse der Zementsorten als wesentliche Betonparameter in Kombination mit der Anwendung unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden und die aus einer Variation dieser Parameter resultierenden Einflüsse auf die Eigenschaften des Betons darzustellen. Die in dieser Arbeit angegebenen Erkenntnisse leisten einen Beitrag, die Auswirkungen des Zements auf einige wichtige Eigenschaften von UHPC überblicksmäßig abzuschätzen.

Die dazu ausgeführten Versuchsreihen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Es erfolgten Untersuchungen über die Auswirkungen der Art des Zements auf Kenngrößen des Betons, sowie die Biegezug- und Druckfestigkeit, in Kombination mit drei unterschiedlichen Nachbehandlungs-methoden. Die Frischbetoneigenschaften wurden hier ebenfalls untersucht.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesen Versuchsreihen, für die 54 Probekörper aus 6 Mischungen hergestellt und geprüft wurden, können zusammenfassend wie folgt angegeben werden:

- Die Frischbetonrohddichte korreliert mit dem Luftgehalt und dementsprechend gering ist auch hier der Einfluss der Zementsort.

Eine eindeutige Tendenz beim Ausbreitmaß zwischen CEM I und CEM II Zementen lässt sich aufgrund der durchgeführten Versuche nicht nachweisen.

- Der Zusammenhang von Luftgehalt und Ausbreitmaß bzw. Ausbreitfließmaß hängt von der Konsistenz des Frischbetons ab. Dass heisst, je steifer die Konsistenz ist, desto mehr wird das Ausbreitmaß durch ein Entlüften verringert.

- Die 7 Tag Biegezugfestigkeit der Mischungen bei HW90, die mit dem CEM I Zemente hergestellt wurden, liegen deutlich über jenen der Mischungen, die mit dem CEM II Zemente hergestellt wurden.

- Die 56 Tag Biegezugfestigkeit der Mischungen bei L20, die mit dem CEM I Zemente hergestellt wurden, liegen deutlich über jenen der Mischungen, die mit dem CEM II Zemente hergestellt wurden.
- Je nach betrachteter Festigkeit und Prüfzeitpunkt kann eine Festigkeitssteigerung durch den Wärme nachbehandelt größer ausfallen als jene ohne eine Nachbehandlung. Das heisst, dass Die festigkeitssteigernde Wirkung der Wärmebehandlung generell etwas höher, als jene durch die Normluftlagerung ausfällt.
- Die Wirkung des Zements wird, sowohl bei einer 90 °C- Heißwasserbehandlung als auch bei einer 250 °C-Heißluftbehandlung, dadurch im Allgemeinen verstärkt. Das gilt prinzipiell für alle untersuchten Festigkeiten. Die Auswirkungen einer 90 °C-Heißwasser- und einer 250 °C-Heißluftnachbehandlung auf die genannten Betoneigenschaften Kenngrößen sind im Verhältnis zur Zement merkbar.

Die Heißluftbehandlung beeinflusste die 7 Tag Druckfestigkeit positiver als die Heißwasserbehandlung (siehe die Mischungen M1/M2/M3/M4/M6). Eine Heißwasserbehandlung bei 90 °C im Vergleich zu Heißluftbehandlung (L250) wirkte sich besser auf die Biegezugfestigkeitsentwicklung aus (siehe M1/M2/M3/M4/M5). Interessant ist dabei, dass die Mischungen mit Bau mit CEM II A-L 32.5 R die niedrigsten Biegezugfestigkeiten mit 15 N/mm^2 bei der Nachbehandlungsmethode (HW90) erreichten.

Abschließend bleibt festzustellen, dass, obwohl sich zwar im Einzelfall auch negative Auswirkungen des Zementsortes einstellen können, die positiven Einflüsse bei Weitem überwiegen.

Ausblick

Ultra High Performance Concrete wurde bereits für die Errichtung einiger beeindruckender Bauwerke verwendet. Auf Grund seiner herausragenden Eigenschaften konnten bereits auch Anwendungsgebiete außerhalb des klassischen Bauwesens, etwa im Maschinenbau oder im Architektur- und Designbereich, erschlossen werden. In nächster Zeit werden wohl weitere Einsatzgebiete hinzukommen, etwa im Hochhausbau, bei Off-Shore-Windkraftanlagen oder in Kombination mit textilen Bewehrungssystemen für dünnwandige Schalentragwerke, um nur einige zu nennen.

Derzeit ist UHPC an sich noch ein nicht geregeltes Bauprodukt. Jedes Bauvorhaben erfordert daher eine Zustimmung im Einzelfall oder eine Bauartzulassung von der obersten Baurechtsbehörde. Um die dafür notwendigen Nachweise erbringen zu können, ist es meist notwendig, zeit- und kostenintensive Versuche an maßstabsgetreuen Modellen oder an Bauteilen in Originalgröße durchzuführen.

Sobald die Bemühungen, Richtlinien für die Herstellung und Bemessungen von Bauteilen aus UHPC Ergebnisse liefern, aus denen verbindliche Regelwerke entstehen können, wird einer breiten Verwendung von UHPC vermutlich nichts im Wege stehen.

Eine klassische Mischungszusammensetzung, wie sie auch für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet wurde, enthält jedoch verhältnismäßig viel Zement. Da die Herstellung von Zement aber ca. fünf bis acht Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen verursacht, zielen viele Forschungsarbeiten darauf ab, den Zementgehalt von UHPC zu reduzieren, ohne dass der Beton an Festigkeit und Dauerhaftigkeit verliert. Durch den teilweisen Ersatz des Portlandzements durch Hüttensand oder Flugasche, die als Nebenprodukt aus anderen industriellen Prozessen entstehen, ist das bereits gelungen. Wird der Zementgehalt aber zu sehr reduziert, ist mit geringeren Festigkeiten zu rechnen, und eine Wärmebehandlung des Betons ist dann nahezu zwingend erforderlich.

6 Literatur

Da diese Arbeit nicht den Anspruch erhebt, ein Lehrbuch zu sein, wird auf eine Wiedergabe allgemein bekannter Grundlagen sowie der Aufzählung aller möglichen Sonderfälle durchwegs verzichtet. Dennoch werden an den betreffenden Stellen Verweise auf weiterführende Literatur gegeben. Verweise auf Literaturstellen entsprechen immer der Form [X.XX] wobei die Zahl hinter dem Punkt den Zähler repräsentiert. Vor dem Punkt steht bei gewöhnlichen Literaturquellen die Kapitelnummer. Handelt es sich um einen Verweis auf eine Internetseite so wird dies mit [I.XX] gekennzeichnet. Des Weiteren wird für Normen die Bezeichnung [N.XX], für Richtlinien [R.XX] und für Merkblätter [M.XX] und für Diplom- bzw. Doktorarbeiten [D.xx] verwendet. Die entsprechenden Quellverzeichnisse finden sich geordnet in Kapitel Vier ab Seite 114. Einheiten werden nach dem SI-System angegeben, wobei landestypische Bezeichnungen entsprechend der Quelle übernommen werden. So wird beispielsweise die Druckfestigkeit in den Einheit N/mm^2 , angegeben.

7 Internetressourcen:

- [I.1] UHPC Wikipedia
- [I.2] “<http://www.zement.at/zement/zement/zementsorten-bezeichnungenennormen>”
- [I.2] [A] ‘ ‘ <http://www.uni-kassel.de/upress/publi/abstract.php?978-3-89958-376-2>’ ’
- [I.3] [D] ‘ ‘ <http://www.uni-kassel.de/spp-uhpc>’ ’
- [I.4] <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/>
- [I.5] (<http://monumentals.com/ultra-hochfester-beton-uhpc-uhfb>)
- [I.6] Zement wikipedia
- [I.7] Pdf.Datei ; <http://www.beton.org/fileadmin/betonorg/media/Dokumente/PDF/Service/>
- [I.8] <http://www.kirchdorfer-zement.at>
- [I.9] <http://www.schretter-vils.co.at/>
- [I.10] <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-518-6.volltext.frei.pdf>
- [I.11] <https://mediatum.ub.tum.de> Pdf.Datei
- [I.12] tunnel.de
- [I.13] Ausbereitversuch Wikipedia
- [D.1] Pdf.datei; Doktorarbeit- von Axel Ingo Schachinger TU-München- Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität
- [D.2] Pdf.datei: Doctoral Thesis -Vacuum Mixing of Ultra High Performance Concrete von Dipl.-Ing. Johannes Kirnbauer
- [D.3] Pdf.datei; Diplomarbeit von Andreas Timo Rümmelin Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik University of Applied Sciences Stuttgart 2005 – Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen
- [D.4] Pdf.datei Zement-Merkblatt Betontechnik 2.2014

Normen, Richtlinien und Merkblätter

- [N.1] DIN EN 197-1 „Zement“ Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien für Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2000 + A1:2004; Ausgabe 08/2004; Beuth-Verlag Berlin 2004
- [N.2] Zementeigenschaften –Druckfestigkeit. HeidelbergCement, abgerufen am 19. August 2013.
- [N.4] DIN EN 12620 „Gesteinskörnung für Beton“; Deutsche Fassung EN 12620:2002; Ausgabe 04/2003; Beuth-Verlag Berlin 2003
- [N.5] DIN EN 934-2 „Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel“ Teil 2: Betonzusatzmittel; Definitionen und Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung; Deutsche Fassung EN 934-2:2001; Ausgabe 02/2002; Beuth-Verlag Berlin 2002
- [N.11] DIN 4226-1 „Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel“ Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen, Ausgabe 07/2001; Beuth-Verlag Berlin 2001
- [N.12] DIN 52 105 „Prüfung von Naturstein“ Ausgabe 08/1988 ersetzt durch ISO R 438
- [N.13] DIN EN 206-1 „Beton“ Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000 Ausgabe 07/2001 Beuth-Verlag Berlin
- [N.15] DIN 18555 „Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln“ Teil 2: Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts; Teil 3: Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte Ausgabe 09/1982; Beuth-Verlag Berlin
- [N.16] AFGC ; SETRA : (2002) Interim Recommendations on ”Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concretes” ; ”Bétons fibrés à ultra-hautes performances. Recommandations provisoires. Documents scientifiques et techniques” (Association Française de Génie Civil) / SETRA
- [N.17] ÖNORM B 4710-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis. 2007.
- [N.18] ÖNORM B 3303: Betonprüfung. 2002.
- [N.19] ÖNORM EN 459-2: Baukalk - Prüfverfahren. 2010.
- [N.20] ÖNORM EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton, Luftgehalt - Druckverfahren. 2009.
- [N.21] ÖNORM EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Bestimmung der Festigkeit. 2005.

[N.23] DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

[R.1] Interim Recommendations for Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes.

Association Francaise de Genie Civil (AFGC) / Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA), working group on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Januar 2002.

Literatur

- [1.1] WALZ, K.: (1966) „Über die Herstellung von Betonen mit höchster Festigkeit“; beton Heft 8, 1966,S.339-340
- [2.2] (Dehn, F.; Ultrahochfester Beton, In: Koenig, G. Tue. N.V.,Zink, M.; Hochleistungsbeton-Herstellung, Bemessung,Anwendung, Verlag Ernst&Sohn, Berlin)(Deutsche Ausschuss fuer Stahlbeton (DAFStb), Richtlinie Hochfester Beton, Ausgabe 09/1997)(Ergaenzung und Aenderungen zu DIN 1045-2:2001 und DIN EN 206-1:2001)
- [2.3] Richard, P.; Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concretes. Cem. Concr. Res. Vol. 25, No. 7, S. 1501-1511, 1995.
- [2.4] de Larrard, F.; Sedran, Th.: Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model, Cem. Concr. Res., Vol. 24, (6) S. 997-1008, 1994.
- [2.5] de Larrard, F.; Sedran, T.: Mixture-Proportioning of High-Performance Concrete. Cem.Concr. Res. Vol.32, S. 1699- 1704, 2002.
- [2.6] ANDREASEN, A.H.M.; ANDERSEN, J.: (1930) „Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern“; Kolloid-Zeitung 50 S.217-228
- [2.7] FULLER, W.B.; THOMPSON, S.E.: (1907) “The laws of proportioning concrete”; Proc.Am.Soc.Civil Engr. 22
- [2.8] PUNTKE, W.: (2002) „Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken“; beton 52; Heft 5; S.242-248
- [2.9] OKAMURA, H.; KAZUMASA, O.: (1995) “Design of Self-Compacting Concrete” JSCE 25; S.107-120
- [2.10] PIERRE, R.; CHEYREZY, M.: (1995) „Composition of reactive powder concretes“; Cement and Concrete Research, Vol. 25; No. 7; S.1501-1511
- [2.11] Kessler, H.; G.: Kugelmodell für Ausfallkörnungen dichter Betone. Betonwerk+Fertigteil- Technik, Heft 11, S. 63-76, 1994.
- [2.12] Deutscher Betonverein: (1982, redaktionell überarbeitet 1996) „Zugabewasser für Beton“.Merkblatt zur Vorabprüfung und Beurteilung vor Baubeginn sowie die Prüfungswiederholung während der Bauausführung; Deutschen Beton und Bautechnik Verein e.V. (DVB); DBV Merkblattsammlung, Ausgabe April 1997; Eigenverlag
- [2.13] Kordts, S.; Grube, H.: Steuerung der Verarbeitungseigenschaften von

selbstverdichtendem Beton als Transportbeton. In: Beton 52 (2002), Heft 4, S. 217-223.

[2.14] Thielen, G.; Kordts, S.: Verarbeitungseigenschaften von Hochleistungsbetonen. In: Jahrbuch 2002 Bautechnik / VDI-Gesellschaft Bautechnik (Hrsg.) – Düsseldorf: VDI Verl., 2002

[2.15] Ping, X.; Beaudoin, J. J.: Modification of Transition Zone Microstructure – Silica Fume Coating of Aggregate Surfaces. Cem. Concr. Res., Vol. 22, 1992, S. 597-604.

[2.16] Chan, Yin-Wen; Chu, Shu-Hsien: Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in

reactive powder concrete. Cem. Concr. Res., Vol. 34, (7), 2004, S. 1167-1172

[2.17] de Larrard, F.: Ultrafine Particles for Making Very High Performance Concretes, LCPC, Paris, France. High Performance Concrete: From material to structure. Edited by Yves Malier. Published by E & FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN. ISBN 0 419 176004, 1992.

[2.18] Richard, p.; Cheyrezy, M., H.: Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPA Compressive Strength. ACI, SPI 144-24, S. 507-518, 1994.

[2.19] DROLL, K.: (2003) „Einfluss von Zusatzstoffen auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von UHFB“ in „Ultrahochfester Beton“; Bauwerk Verlag Berlin S.25-44

[2.19] „Grundsätze für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel“ in Zulassungs- und Überwachungsgrundsätze Betonzusatzmittel; (2002) Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik; Reihe B Heft 10; Berlin

[2.20] GAY, M.; KLEEN, E.; NIEPMANN, D.: (2003) „Zusatzmittel für Ultrahochleistungsbeton“ in „Ultrahochfester Beton“; Bauwerk Verlag Berlin S.45-53

[2.21] Bonneau, O.; Lachemi, M.; Dallaire, E.; Dugat, J.; Aitcin, P.-C.: Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes. ACI Materials Journal, S. 286-290, Juli-August 1997.

[2.22] Gay, Matthias; Kleen, Eugen; Niepmann, Dirk: Zusatzmittel für Ultrahochleistungsbeton. Tagung „Ultrahochfester Beton“ aus der Reihe: Innovation im Bauwesen, Beiträge aus Praxis und Wissenschaft der Uni und HTWK Leipzig, Nov. 2003, S. 45-53.

[2.23] Bonneau, O.; Vernet, Ch.; Moranville, M.: Optimization of the Rheological Behavior of Reactive Powder Concretes (RPC). Tagungsband – International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes. Sherbrooke, Kanada, August, 1998, Band 3, S. 99-

118.

[2.25] SCHMIDT, M.: (2003) „Ultra-Hochleistungsbeton – Ausgangsstoffe, Eigenschaften und Leistungsfähigkeit“ in „Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa“ Tagungsbeiträge zu den 3. Kassler Baustoff- und Massivbautagen am 10. September 2003; Heft 2; S.5-20

[2.26] MARKESET, G.: (1993) “Failure of concrete under compressive strain gradients”; Dissertation; University of Trondheim, Norwegen; Department of Structural Engineering

[2.27] Dugat, J.; Roux, N.; Bernier, G. : Mechanical properties of reactive powder concretes. Materials and Structures, Vol. 29, May 1996, S. 233-240.

[2.28] König, Gert; Schneider, Holger; Dehn, Frank; Schmidt, Detlef; Wagner, Jörg-Peter: Verbundkonstruktionen mit ultrahochfestem Beton für den Brücken- und Hochbau. In: Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003) Nr. 4, S. 240-246.

[2.29] Dugat, J.; Roux, N.; Bernier, G. : Mechanical properties of reactive powder concretes. Materials and Structures, Vol. 29, May 1996, S. 233-240.

[2.30] Aitcin, P.-C.; Lachemi, M.: The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge. Structural Engineering International 2/98, S. 140-144.

[2.31] Tue, Ngyen, Viet; Schneider, Holger; Simsch, Gert; Schmidt, Detlef: Bearing Capacity of Stub Columns made of NSC, HSC and UHPC confined by a Steel Tube. International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, September 13 - 15, 2004, S. 339-350

[2.32] Schmidt, M.; Fehling, E.; Teichmann, T.; Bunje, K.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultra-hochfester Betone. DFG Endbericht.

[2.33] Hillerborg, A.; Modéer, M.; Peterson, P.-E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, Vol. 6, 1976.

[2.34] DafStb UA UHFB: „Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton“. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2005.

[2.35] Chanvillard, G.; Rigaud, S.: Complete characterisation of tensile properties of ductal® UHPFRC according to the french recommendations. Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Ann Arbor, USA, 2003, S. 21-34.[35, 67, 70, 71]

[2.36] Hillerborg, A.; Modéer, M.; Peterson, P.-E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research,

Vol. 6, 1976.

{2.37}

[A] Bornemann, R.; Schmidt, M.; Fehling, E.; Middendorf, B.: Ultra-Hochleistungsbeton UHPC – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. Sonderdruck aus: Beton- und Stahlbetonbau 96, H. 7, S. 458-467, 2001.

[B] Chanvillard, G.; Rigaud, S.: Complete characterisation of tensile properties of ductal® UHPFRC according to the french recommendations. Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Ann Arbor, USA, 2003, S. 21-34.

[C] Reineck, Karl-Heinz; Greiner, Stefan; Lichtenfels, Achim: Wasserspeicher aus UHFB – Bemessung. Tagung „Ultrahochfester Beton“ aus der Reihe Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft an der Universität und HTWK Leipzig, 2003, S. 257-268 von UHFB“ in „Ultrahochfester Beton“; Bauwerk Verlag Berlin S.25-44

[2.40] TEICHMANN, T.; BUNJE, K.; SCHMIDT, M.; FEHLING, E.: (2002) „Durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC)“; Proceedings to the 6th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete; S.1367-1376; Leipzig

[2.43] RILEM TC 117-FDC: (1995) „Draft recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete, Test with water (CF) or with sodium chloride solution (CDF)“; Materials and Structures Vol.28; S.175-182

[2.44] AUBERG, R.: (1998) „Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test“; Dissertation; Universität Gesamthochschule Essen

[2.45] Pdf.datei-/http://www.vigier-ciment.ch/fileadmin/media/vigierciment/downloads/3.3_vigierCiment_Produktinfo_CEM_II-ALL_42.5N_D.pdf

[2-46] [Stark, J.; Wicht, B.: Zement und Kalk. F.A. Finger Institut Bauhaus Universität]

[3.1] Fuller, W., B., Sanford, E., T.: The Laws of Proportioning Concrete; American Society of Civil Engineers, Vol. 33, March 1907

[3.2] Aitcin, P.; Richard, P.: The pedestrian/bikeway bridge of Sherbrooke. In: Proc. 4th International symposium on utilization of high strength concrete, S. 1399-1403, Paris 1996.

[3.3] Bornemann, R., Schmidt, M., Fehling, E., Middendorf, B.: Ultra-Hochleistungsbeton UHPC – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten; Beton und Stahlbetonbau,

Heft 7, 2001, S. 458-467

[3.4] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik, 3. Aufl. Berlin: Springer, 2009.

[3.5] Nold, P.: Warum mischen nicht alle Beton-Mischer „gut“?. bft international, Bd. 01, S. 36–42, 2012.

[3.6] Löbe, R.; Nold, P.: „Guter Mischer, guter Beton: der erste Schritt auf dem Weg zum Erfolg“. BetonWerk International, Nr. 3, S. 54-77, Jun. 2004.

[3.7] Juhart, J.: Adhäsion von UHPC an Stahl und Glas. Dissertation. TU Graz. Graz, 2011.

[3.8] Schneider, U.; Horvath, J.: Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen. Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz. Heft 8. Wien: TU Wien, 2003.

[3.9] Seiler, A.; Kasten, K.; und Seidel, M.: „Aufbereitung und betrieblicher Transport von UHPC“. Betonwerk und Fertigteil-Technik, Bd. 70, Nr. 4, S. 14–20, 2004.

[3.10] Dils, J.; De Schutter, G.; Boel, V.: „Influence of vacuum mixing on the microstructure of RPC“, In: 3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures : Book of Abstracts. Belfast, 2012, S. 1–5.

[3.11] Heuer, D.: „Eine ganz andere Mischtechnik“. Betonwerk und Fertigteil-Technik, Bd. 1, 2011

[3.12] Perry, V.: Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – more than a new material – a solution for the construction chain! Österreichischer Betonverein – Schriftenreihe, Heft 43, S. 25-31, 2000.

[3.13] Marchuk, Viktor: Dispergierbarkeit der Silicastaub-Suspension im Zementleim und Mörtel. in Beton, 2000, Heft 7, S. 393-398.

[3.14] Safranek, K.: Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone. Diplomarbeit, TU Wien, Wien, 2007.

[3.15] Schachinger, A. I.: Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität. Dissertation, TU München, München, 2007.

[3.16] Gerlicher, T.; Heinz, D.; Urbonas, L.: „Effect of Finely Ground Blast Furnace Slag on the Properties of Fresh and Hardened UHPC“, In: Fehling, E.; Schmidt, M.; Stürwald, S. (Hrsg.): Ultra high performance concrete (UHPC). Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany, March 05-07, 2008. S. 425–432.

- [3.17] Mazanec, O.; Lowke, D.; Schießl, P.: „Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time“. *Materials and Structures*, vol. 43, no. 3, pp. 357–365, Apr. 2010.
- [3.19] Naaman, A.; Wille, K.: „The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress“, In: Schmidt, M.; Fehling, E.; -Glotzenbach, C.; Fröhlich, S.; Poitrowsky, S. (Hrsg.): *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction. Proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. S. 3–15
- [3.19] Schachinger, A. I.: *Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität. Dissertation, TU München, München, 2007.*
- [3.20] Flatt, R. J.; Houst, Y. F.: „A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers“. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 8, pp. 1169–1176, Aug. 2001.
- [3.21] Fernández-Altable, V.; Casanova, I.: „Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures“. *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1222–1230, Jul. 2006.
- [3.22] Lowke, D.; Pötz, M.; Schießl, P.: „Optmierung des Mischablaufs für selbstverdichtende Betone“. *beton*, Nr. 12, S. 614–617, 2005.
- [3.23] Dils, J.; De Schutter, G.; Boel, V.: „Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review“. *Materials and Structures*, vol. 45, no. 11, pp. 1673-1683, Nov. 2012.
- [3.24] Chopin, D.; de Larrard, F.; Cazacliu, B.: „Why do HPC and SCC require a longer mixing time?“. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 12, pp. 2237–2243, Dec. 2004.
- [3.25] Zielinsky, K.; Olszewski, V.: „Der Einfluss von Basaltfasern auf ausgewählte physische und mechanische Eigenschaften von Zementmörtel“. *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, Nr. 3, S. 28–33, 2005.
- [3.26] Jesse, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Dissertation, TU Dresden, Dresden, 2004.*
- [3.27] Kirnbauer, J.: „UHPC als Spritzbeton zur Herstellung von luftig-leichten Skulpturen und Schalenträgerwerken“, In: Bruckner, H. (Hrsg.): *EVENTMATERIALS - Materialtechnologie & Eventinnovationen. Beiträge zum internationalen Symposium vom 18.-19.10.2012 am Institut*

für Hochbau und Technologie an der TU Wien und an der NDU St. Pölten. Wien: TU Wien – Institut für Hochbau und Technologie, 2012, Bd. 1, S. 14–27.

[3.28] Schmidt, M. (Hrsg.): Ultrahochfester Beton. Sachstandsbericht. Berlin; Wien; Zürich: Beuth Verlag, 2008.

[3.29] Dehn, F.: „Herstellung, Verarbeitung und Qualitätssicherung von UHPC“, In: Schmidt, M.; Fehling, E. (Hrsg.): Ultra-hochfester Beton. Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa. Tagungsbeiträge zu den 3. Kasseler Baustoff- und Massivbautagen. Kassel: Kassel University Press, 2003, S. 37–47.

[3.30] Kirnbauer, J.; Deix, K.: „UHPC als Spritzbeton zur Herstellung von luftig-leichten Skulpturen“ In: Kolloquium 2011 - Forschung & Entwicklung für Zement und Beton. Kurzfassung der Beiträge. Wien: Vereinigung der österreichischen Zementindustrie, 2011.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Betonfestigkeiten im Vergleich Mit UHFB [I.5]

Abbildung 2-2: Korngefügemodelle J.E. FUNK et al [2.16]

Abbildung 8-1-3-:D Korngefügemodell C. GEISENHANSLÜCKE [2.17]

Abbildung 2-4: Reaktion von UHPC-Bestandteile bei der Hydratationsentwicklung [I.6]

Abbildung 2-5: Bezeichnung der Zemente nach ÖNORM EN 197-1

Abbildung 2-6: Verarbeitbarkeit des Bindemittelleimes (Fließzeit = Flowing time) in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt des Silikastaubes [2.17].

Abbildung 2-7: Korngrößenvergleich Zement und Mikrosilica C. VELLMER, M. GEH., B. MID. [2.29]

Abbildung 2-8: Korngrößenverteilung K. DROLL [2.30]

Abb 2-9:Qualitative Darstellung der Wirkung von Fließmittel und Füllerwirkung des Silicastaubs[2-46]

Abbildung 2-10: Wirkungsweise von Fließmitteln W. BRAMSHUBE .[2.20]

Abbildung 2-11: Einfluss des Setzfließmaßes auf den LP-Gehalt der erhärteten Probekörper [I.11].

Abbildung 2-12: schematische Darstellung –Druckversuck [I.12]

Abbildung 2-13: Axiale Dehnung und Volumenänderung bei axialer Druckbelastung W.-F. CHEN, A.F. SALEEB [2.25]

Abbildung 2-14: Schubbandausbildung – [2.26]

Abbildung 2-15: Unterschiedliche Zerstörungstypen des Betons unter Druckbeanspruchung

Abbildung 2-16: Vergleich der Querdehnzahl von UHFB und Normalbeton ($\emptyset/H = 100/300$ mm) in Abhängigkeit vom Belastungsniveau

Abbildung 2-17: Vergleich der Spannungs-Dehnung von UHPC-Hochleistungsbeton(HSC) und Normalbeton (NSC) unter Druckbeanspruchung [2.31]

Abbildung 2-18: Probekörper unter Belastung bei der Biegezugfestigkeitsprüfung

Abbildung 2-19: linke Bildseite: schalungsseitige Betonoberfläche mit ENTLÜFTER, rechts ohne [2-20].

- Abbildung 3-1: Mischung-Verfahrensprozess im Labor (Foto)
- Abbildung 3-2: Verfahrenprozess – Mischreihenfolge; Laborfoto
- Abbildung 3-3: Luftporentopf mit einem Fassungsvermögen
- Abbildung 3-4: V-Trichter zur Ermittlung der Auslaufzeit für selbstverdichtenden Beton
- Abbildung 3-5: schematisches Foto der Bestimmung des Fließmaßes mit dem Setztrichter
- Abbildung 3-6; Vorbereitung der Proben(Lborfoto)
- Abbildung 3-7:Biegezugfestigkeit-Prüfmaschine (Foto)
- Abbildung 4: Trichterauslaufzeit aller Mischserien in Sekunden
- Abbildung 4-1: Ausbreitmaß aller Mischserien
- Abbildung 4-2: Frischbetonluftgehalt aller Mischserien
- Abbildung 4-3: Frischbetonrohichte aller Mischserien
- Abbildung 4-4: 24 Stunden-Biegezugfestigkeit
- Abbildung 4-5: Ergebnisse der 7 Tage-Biegezugfestigkeit, bei L20
- Abbildung 4-6: Ergebnisse der 7 Tage-Biegezugfestigkeit bei HW90
- Abbildung 4-7: Ergebnisse 7 Tage Biegezugfestigkeit (L250)
- Abbildung 4-8: Maximale und minimale 7-Tage Biegezugfestigkeit
- Abbildung 4-9: Ergebnisse der 28-Tage Biegezugfestigkeit des hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt L20
- Abbildung 4-10: Ergebnisse der 28-Tage Biegezugfestigkeit des UHPC, nachbehandelt HW90
- Abbildung 4-11: Ergebnisse der 28-Tage Biegezugfestigkeit des UHPC, nachbehandelt L250
- Abbildung 4-12: Ergebnisse 56 Tage–Biegezugfestigkeit des hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt L20
- Abbildung 4-13: Ergebnisse 56Tage-Biegezugfestigkeit des hergestellte UHPC –nachbehandelt HW 90
- Abbildung 4-14: 56 Tage-Biegezugfestigkeit des hergestellten UHPC Proben nachbehandelt bei L250
- Abbildung 4-15: Diagramm der Ergebnisse der 24 Stunden-Druckfestigkeit L20
- Abbildung 4-16: Ergebnisse der 7 Tage-Druckfestigkeit (L20)
- Abbildung 4-17: Ergebnisse der 7-Tage Druckfestigkeit des UHPC nachbehandelt im Heißwasser (HW90)
- Abbildung 4-18: Ergebnisse der 7 Tage-Druckfestigkeit (L250)

Abbildung 4-19: Ergebnisse der 28-Tage Druckfestigkeit des UHPC Betons, L20

Abbildung 4-20: Ergebnisse der 28 Tage-Druckfestigkeit des UHPC, nachbehandelt HW90

Abbildung 4-21: Ergebnisse der 28 Tage-Druckfestigkeit, nachbehandelt L250

Abbildung 4-22: Ergebnisse der 56 Tage-Druckfestigkeit der hergestellten UHPC-Proben nachbehandelt L20

Abbildung 4-23: Ergebnisse der 56-Tage-Druckfestigkeit des hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt HW 90

Abbildung 4-24: Ergebnisse 56 Tage-Druckfestigkeit der hergestellte UHPC –Proben nachbehandelt L250

Abbildung 4-25: Entwicklung der Biegezugfestigkeit von Serie M1 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abb 4-26: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M1 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-27 Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M2 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-28: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M2 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-29: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M4 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-30: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M3 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-31: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M4 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-32: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M4 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-33: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M5 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-34: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M5 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-35: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der Serie M6 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

Abbildung 4-36: Entwicklung der Druckfestigkeit der Serie M6 bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden
Überblicksdiagramm

Abbildung 4-37: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L20 auf Biegezugfestigkeit alle Mischungen

Überblicksdiagramm 4-38: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L20 auf Druckfestigkeit alle Mischungen

Überblicksdiagramm 4-39: Einfluss der Nachbehandlungsmethode HW90 auf Druckfestigkeit alle Mischungen

Diagramm 4-40: Einfluss der Nachbehandlungsmethode HW90 auf Druckfestigkeit alle Mischungen

Überblicksdiagramm 4-41: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L250 auf Biegezugfestigkeit aller Serien

Abbildung 4-42: Einfluss der Nachbehandlungsmethode L250 auf Druckfestigkeit aller Mischungen

Abbildung 4-43: Bestergebnisse pro Mischserie bei unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zusammenhang von Zement ,-Formel, Kurzzeichen und Ihre Anteile im Klinker in % [I.6]

Tabelle 3-1: Mischungszusammensetzung im $[\text{kg}/\text{m}^3]$ für 1 m^3 Beton der Mischung alle Mischserien

Tabelle 3-2: Reihenfolge der Mischphasen, Dauer der Mischphasen und Werkzeuggeschwindigkeit

Tabelle 3-2: Verlauf der Lagerungsbedingungen (NL Normlagerung, HW90 Heißwasserlagerung 90°C,

Tabelle 4-1: Abkürzungen für Mischungs- und deren Bedeutung

Tabelle 4-2: Verwendete Farben und deren Bedeutung

Tabelle 4-4 ; Minimal- Maximalwerte der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit von der Zementart

Tabelle 4-5 Beurteilungssystem - Gesamtergebnisse der Frischbetoneigenschaften

Tabell 4-6 Beurteilungssystem-Gesamtergebnisse der Biegezugfestigkeiten

Tabelle 4-7; Versuchsergebnisse der Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit der Zementart

Tabell 4-8 Beurteilungssysteme-gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten

Tabelle 4-9: Verwendete Farben und deren Bedeutung

Tabelle 4-10: Verwendete Farben und deren Bedeutung

Tabelle 4-11; prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Biegezugfestigkeit.

Tabelle 4-12; prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Druckfestigkeit.

Tabelle 4-13; prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Biegezugfestigkeit.

Tabelle 4-13; prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Druckfestigkeit.

Tabelle 4-14; prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Biegezugfestigkeit.

Tabelle 4-15; prozentuale Steigerung im Vergleich zur 24 Stunde Druckfestigkeit.

Tabelle 4-16; prozentuale Steigerung verglichen zu 7 Tage Biegezugfestigkeit bei M6

Tabelle 4-17; prozentuale Steigerung verglichen zu 7 Tage Druckfestigkeit bei der Mischung M6

Tabell 4-18 Best-und Gesamtergebnisse der Druckfestigkeit

Tabell 4-19 Best-und Gesamtergebnisse der Biegezugfestigkeit

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Druckfestigkeitsformel

Formel 2: Biegezugfestigkeitsformel