

# DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

## Prämixe für UHPC - Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung, Hydratation und Festbetoneigenschaften

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

unter der Leitung von

**Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Elemer Bölcskey**  
**Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer**

ausgeführt am

**Institut für Hochbau und Technologie**  
**Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit**  
der Technischen Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Simon Sacherl**  
01528216

Wien, 12. August 2018



Erklärung:

Ich erkläre, dass die vorliegende Diplomarbeit von mir selbst verfasst wurde und ich keine anderen als die angeführten Behelfe verwendet bzw. mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Ich versichere, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Weiters versichere ich, dass die von mir eingereichten Exemplare (ausgedruckt und elektronisch) identisch sind.

Datum: .....24.9.2018.....

Unterschrift: ..........

## Kurzfassung

An Hochleistungsbeton werden aufgrund seiner Einsatzgebiete hohe Anforderungen gestellt. Eine genaue Kenntnis über diesen Baustoff ist dabei unumgänglich. Daher ist die Zusammensetzung und Verarbeitung des Betons, beziehungsweise seine daraus resultierenden Eigenschaften enorm wichtig, um den Ansprüchen der heutzutage gefertigten Bauwerke gerecht zu werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Verwendung eines zunehmend älter werdenden Prämixes für Hochleistungsbeton. Um herauszufinden, ob Prämixe für Hochleistungsbeton sozusagen ein Ablaufdatum haben, wurden Versuche am Frischbeton sowie am Festbeton unter Verwendung von Prämixen unterschiedlichen Alters durchgeführt.

Dafür wurden zu Beginn der Versuche Prämixe der Trockenbestandteile mit unterschiedlicher Mischdauer hergestellt. Somit wurde neben dem Alter eines Prämixes auch der Einfluss der Trockenmischdauer untersucht. Die Mischdauern bewegten sich dabei zwischen 1,5 und 480 Minuten. Nach Fertigstellung wurden die Prämixe in luftdicht verschlossenen Behältern gelagert. Nach 48 Stunden, vier Wochen und neun Wochen erfolgte dann die Frischbetonherstellung, wobei immer die gewünschte Menge an Prämixen aus den Behältern genommen wurde.

Am Frischbeton wurden dann das Ausbreitmaß, die Trichterauslaufzeit, der Luftporengehalt, die Frischbetonrohichte, die Partikelgrößenverteilung sowie die Thixotropie bestimmt. Anschließend kam der Frischbeton für 24 Stunden in genormte Prismenschalungen, wobei der Hydratationswärmeverlauf gemessen wurde. Nach Ablauf dieser 24 Stunden wurden an den Prismen die Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit geprüft.

Die in dieser Arbeit gezeigten Messdaten zeigen also die Ergebnisse der jeweiligen Versuche in Abhängigkeit der Mischdauer sowie des Alters des Prämixes.

Die Ergebnisse zeigen nicht eindeutig, ob das Alter des Prämixes einen großen Einfluss auf die Fest- und Frischbetoneigenschaften hat. Bezüglich der Mischdauer sind hingegen signifikantere Unterschiede der Materialdaten zu erkennen.

## **Abstract**

Due to its many fields of application, there are high demands for high-performance concrete. A precise knowledge about this building material is crucial. Therefore, an understanding of the composition and processing of concrete, and its resulting properties are enormously important to meeting the demands in today's construction. This work deals with the use of an increasingly aging premix for high performance concrete. In order to find out if premixes for high-performance concrete have, so to speak, an expiration date, tests were carried out on fresh concrete as well as on hardened concrete using premixes of different ages.

For this purpose, premixes of the dry components with varying mixing times were produced at the beginning of the experiments. Consequently, in addition to the age of a premix, the influence of the dry mixing time was also investigated. The mixing times varied between 1.5 and 480 minutes. Upon completion, the premixes were stored in airtight containers. After forty-eight hours, four weeks, and nine weeks the fresh concrete production took place, in which the desired amount of premixes was taken out of the containers.

Regarding the fresh concrete, the slump size, the funnel outlet time, the air pore content, the fresh concrete raw density, the particle size distribution and the thixotropy were categorized. After which the fresh concrete was placed for 24 hours in standardized prism molds, whereby the heat of hydration was measured. At the end of these 24 hours, the bending tensile strength and compressive strength were tested on the prisms.

The measurement data investigated in this work examines the results of the respective experiments regarding mixing duration and age of the premix.

The results do not clearly determine whether the age of the premix has a major influence on solid and fresh concrete properties. However, with regard to the mixing time, more significant differences in the material data can be seen.

## Abkürzungsverzeichnis

Abb	Abbildung
AHWZ	Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe
B	Bauwesen
Bac. Arb.	Bachelorarbeit
bzw	beziehungsweise
ca	circa
CSH	Calciumsilikathydrat
D	Packungsdichte
Dipl. Arb.	Diplomarbeit
etc	et cetera
evtl	eventuell
Fa	Firma
FH	Fachhochschule
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
LKW	Lastkraftwagen
lt	laut
M1,5M	Mischung 1,5 Minuten
M3M	Mischung 3 Minuten
M7M	Mischung 7 Minuten
M15M	Mischung 15 Minuten
M30M	Mischung 30 Minuten
M60M	Mischung 60 Minuten
M120M	Mischung 120 Minuten
M240M	Mischung 240 Minuten
M480M	Mischung 480 Minuten
ÖNORM	Österreichische Norm

SS	Sommersemester
TU	Technische Universität
UHPC	Ultrahochfester Beton
URL	Uniform Resource Locator
W/B-Wert	Wasserbindemittelwert
WS	Wintersemester
z.B.	zum Beispiel

## Schlüsselbegriffe

Hochleistungsbeton	high performance concrete
Alter Prämix	age premix
Mischdauer	mixing time
Frischbetoneigenschaften	fresh concrete properties
Festbetoneigenschaften	established concrete properties

# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>V</b>
<b>SCHLÜSSELBEGRIFFE.....</b>	<b>VII</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Geschichte und Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Beton .....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Zusammensetzung .....	9
2.2.2 Partikelgrößenverteilung und Packungsdichte .....	21
2.2.3 Hydratation.....	25
2.2.4 Frischbetoneigenschaften .....	28
2.2.5 Festbetoneigenschaften.....	29
<b>2.3 Mischprozess .....</b>	<b>32</b>
<b>3 VERSUCHSEINRICHTUNG, VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Herstellung der Prämixe .....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Vorversuche.....	37
3.1.2 Herstellung Trockenprämix .....	38
<b>3.2 Lagerung der Prämixe.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 Herstellung des Frischbetons .....</b>	<b>41</b>
3.3.1 Intensivmischer R02 Vac .....	42
3.3.2 Mischablauf.....	43
<b>3.4 Prüfung der Frischbetoneigenschaften.....</b>	<b>44</b>
3.4.1 Versuchsablauf .....	45
3.4.2 Partikelgrößenverteilung .....	46
3.4.3 Lagerung des Frischbetons .....	58
3.4.4 Hydratationswärme .....	59
<b>3.5 Prüfung der mechanischen Eigenschaften .....</b>	<b>69</b>
3.5.1 Biegezugfestigkeit.....	69
3.5.2 Druckfestigkeit .....	81
<b>4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>92</b>

<b>QUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>96</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>99</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>101</b>

# 1 Einleitung

Beton ist ein sehr vielseitig einsetzbarer Verbundbaustoff mit bemerkenswerten Eigenschaften. Schon seit sehr langer Zeit werden seine positiven Eigenschaften geschätzt und er wird in nahezu allen Bauwerken der Welt eingesetzt. Wie bei jedem Baustoff versucht man auch die Eigenschaften des Betons ständig weiterzuentwickeln. Schon kleinste Veränderungen der verwendeten Ausgangsstoffe und minimale Abweichungen während der Herstellung können die Eigenschaften des Frischbetons, sowie des Festbetons stark beeinflussen.

Motivation ist es also, für jede Betonart und Anwendung, ein perfektes Herstellungsverfahren zu finden. Die verwendeten Bestandteile, das Mischverhältnis, die Mischmenge und Mischdauer, die Temperatur während des Mischens und noch viele weitere Verarbeitungsschritte haben einen großen Einfluss auf die späteren Eigenschaften von Beton. Es wird somit versucht, die eben genannten Verarbeitungsschritte perfekt aufeinander abzustimmen, um bestmögliche Ergebnisse zu erhalten.

## **Aufgabenstellung:**

Ziel dieser Arbeit ist es, herauszufinden ob eine bereits fertige Mischung der Trockenbestandteile (Prämix) von Hochleistungsbeton sich auf die späteren Eigenschaften des Betons auswirkt. Also, ob ein Prämix sozusagen ein Ablaufdatum hat.

Dafür wurden Prämixe mit unterschiedlicher Mischdauer hergestellt. Somit konnte auch der Einfluss der Trockenmischdauer untersucht werden. Nach Ablauf einer beliebig gewählten Lagerungsdauer des hergestellten Prämixes wurde ein Teil davon weiterverarbeitet. Als Lagerungsdauer wurden 48 Stunden, vier Wochen und neun Wochen gewählt. Nach Ablauf der jeweiligen Lagerungsdauer wurden dann die Frischbetoneigenschaften sowie Festbetoneigenschaften untersucht. Die Durchführung der Prüfungen erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM und auch an die DIN.

**Gliederung der Arbeit:**

Zu Beginn werden die, für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche benötigten Grundlagen erklärt. Dies beinhaltet die Bestandteile des Betons, die Partikelgrößenverteilung, die Hydratation, die Frischbetoneigenschaften sowie die Festbetoneigenschaften.

Folgend werden die Versuchseinrichtung, Versuchsdurchführung und die Auswertung beschrieben. Dabei wird auf die Herstellung der Prämixe, über deren Lagerung bis hin zur Prüfung der Partikelgrößenverteilung, des Hydratationswärmeverlaufs sowie die Frischbetoneigenschaften und deren Ergebnisse eingegangen. Am Ende werden noch die Vorgangsweise zur Prüfung der Festbetoneigenschaften und deren Ergebnisse gezeigt.

- Es werden insgesamt neun Prämixe mit unterschiedlicher Trockenmischdauer hergestellt.
- Von diesen hergestellten Prämixen wird nach 48 Stunden, vier Wochen und neun Wochen ein Teil für die Herstellung des Frischbetons entnommen.
- Am Frischbeton werden das Ausbreitmaß, die Trichterauslaufzeit, der Luftporengehalt, die Frischbetonrohichte, die Partikelgrößenverteilung sowie die Thixotropie bestimmt.
- Der Frischbeton kommt dann für 24 Stunden in genormte Prismenschalungen, wobei in dieser Zeit der Hydratationswärmeverlauf gemessen wird.
- Nach Ablauf der 24 Stunden wird der Festbeton ausgeschalt und bis zur Prüfung der 24-Stunden-, Sieben-Tages- und 28-Tagesfestigkeit gelagert.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen beschrieben. Zuerst erfolgt ein kurzer Exkurs über die Geschichte von Beton, anschließend werden einige Beispiele über den Einsatz von Hochleistungsbeton gezeigt. Zum Schluss wird noch genauer auf die Bestandteile von Beton eingegangen.

### 2.1 Geschichte und Anwendungsbeispiele

Beton ist einer der meist eingesetzten Baustoffe im Bauwesen. Die Anfänge reichen zurück bis in die Antike. Vor allem die Römer waren neben den Phöniziern und den Griechen eines der ersten Völker, welche mit Beton, damals „opus caementitium“ genannt, arbeitete. Sie erkannten schnell, dass Beton viele Vorteile mit sich bringt, und damit imposante Bauwerke geschaffen werden können. Viele dieser Bauwerke haben die Zeit bis heute überdauert und zeigen somit, dass Beton ein sehr langlebiges Produkt ist. Eines der bekanntesten Bauwerke des antiken Roms ist das Pantheon, welches in Abb. 1 gezeigt wird.



Abb. 1: Pantheon in Rom, Innenansicht Außenansicht<sup>1</sup>

Das Besondere an diesem Bauwerk ist weniger sein Aussehen von außen, sondern die beeindruckende Kuppelkonstruktion mit einer Spannweite von 43 Metern.

---

<sup>1</sup> Pantheon. In: URL: <http://faculty.etsu.edu/kortumr/09rome/htmdescriptionpages/14pantheon2.htm> (letzter Zugriff 26.03.2018)

Schon damals hatte man zum Ziel, immer größere und beeindruckendere Bauwerke zu schaffen. Dieses Streben nach einzigartigen Baukonstruktionen hat sich bis heute nicht verändert. Hierfür wird jedoch ein Baustoff benötigt, dessen Eigenschaften sämtlichen negativen Einflüssen von außen, wie zum Beispiel Druckbeanspruchungen oder negativen Umwelteinflüssen, entgegenwirken. Deshalb spielt die Forschung und Weiterentwicklung von Beton eine wichtige Rolle, um den immer größer werden Anforderungen entsprechen zu können.

Hochfester Beton und Ultrahochfester Beton können als Weiterentwicklung von Normalbeton verstanden werden. Diese Betonsorten können höhere Lasten als Normalbeton ableiten und sind auch hinsichtlich negativer Umwelteinflüsse beständiger.

Solche Betone werden vorwiegend verwendet für:

- druckbeanspruchte Bauteile, z.B. hoch beanspruchte Stützen und Wände
- biegebeanspruchte Bauteile, evtl. vorgespannt, mit großer Spannweite und Steifigkeit, z.B. Brückenträger, Balken, Bauteile mit hoher mechanischer Belastung und Umweltbelastung, z.B. Tunnel, Industriefußböden, Straßen, Wasser- und Abwasserbauteile, Offshore-Bauwerke
- Bauteile zum Schutz vor umweltgefährdeten Stoffen, z.B. Auffangwannen, Chemikalienlager
- chemisch hoch beanspruchte Bauteile, z.B. Kühltürme, landwirtschaftliche Bauteile beim Angriff von Gär- und Futtersäuren, Abwasserrohre für aggressive Medien, Klärbecken
- Verbundkonstruktionen, z.B. stahlummantelte Stützen, Verbunddecken und Verbundträger
- Spezialkonstruktionen, z.B. Containments, Behälter, Verpressrohre, Tresore, Schraubpfähle<sup>2</sup>

Folgend werden nun einige Beispiele gezeigt, bei welchen Hochleistungsbetone und Ultrahochleistungsbetone verwendet wurden.

---

<sup>2</sup> Hochleistungsbeton. In: URL: <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

## Hochbau



Abb. 2: „Petronas Twin Towers“, Kuala-Lumpur<sup>4</sup>

Im Hochhausbau kamen vorwiegend Skelettbauten aus Stahl zur Anwendung. Heutzutage kommen nun auch vermehrt Skelettbauten aus Stahlbeton zum Einsatz. Bei den „Petronas Twin Towers“ (Abb. 2) in Kuala-Lumpur wurde Hochleistungsbeton für den aussteifenden Kern, sowie für die Stützen in den unten liegenden Geschossen verwendet. Bis zum Dach beträgt die Höhe des Gebäudes 378,6 m, inklusive Antenne erreichen die beiden Hochhäuser 452 m.<sup>3</sup>

## Tiefbau

Auch im Brückenbau wird Hochleistungsbeton immer häufiger, in Form von Spannbeton, verwendet. Ein Beispiel hierfür ist die „Pierre-Pflimlin-Brücke“, welche den Ortsteil Altenheim mit Eschau im Elsass verbindet. Sie ist insgesamt 972 Meter lang und 14,75 Meter breit, wobei die Hauptbrücke selbst 461,7 Meter lang ist. Aufgrund der Anwendung von Hochleistungsbeton war es möglich, sehr schlanke Spannbeton-Hohlkästen herzustellen.<sup>5</sup> Ein Großteil der Hauptbrücke, die den Rhein überquert, ist in Abb. 3 ersichtlich.

<sup>3</sup> Hochleistungsbeton. In: URL: <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

Petronas Towers. Malaysias Twin Wolkenkratzer Fakten und Fotos. In: URL: <http://www.baupedia.de/petronas-towers-malaysias-twin-wolkenkratzer> (letzter Zugriff 02.08.2018)

<sup>4</sup> Petronas Towers. In: URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Petronas\\_Towers](http://en.wikipedia.org/wiki/Petronas_Towers) (letzter Zugriff 26.03.2018)

<sup>5</sup> Pierre-Pflimlin-Brücke. In: URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pierre-Pflimlin-Br%C3%BCcke> (letzter Zugriff 26.03.2018)



Abb. 3: „Pierre-Pfälimlin-Brücke“, Altenheim/ Eschau im Elsass<sup>6</sup>

Im Straßenbau rückt Hochleistungsbeton immer weiter in den Fokus. Dabei werden seine Vorteile, wie zum Beispiel die höhere Beständigkeit gegenüber Asphalt, genutzt. Hochleistungsbeton wird auch für die Sanierung von beschädigten Straßen verwendet. Die Oberfläche der Straße wird dabei aufgeraut (gefräst) und gereinigt und anschließend eine dünne Schicht Hochleistungsbeton aufgetragen. Diese Vorgehensweise wird als „Whitetopping“ bezeichnet und ist in Abb. 4 zu sehen.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Hochleistungsbeton. In: URL: <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

<sup>7</sup> Straßen zukunftsfähig machen. In: URL: [http://www.this-magazin.de/artikel/tis\\_Strassen-zukunftsaehig\\_machen\\_2714458.html](http://www.this-magazin.de/artikel/tis_Strassen-zukunftsaehig_machen_2714458.html) (letzter Zugriff 26.03.2018)



Abb. 4: „Whitetopping: Instandsetzung bzw. Ertüchtigung von geschädigten oder unterdimensionierten Decken aus Asphalt oder Beton“<sup>8</sup>

## Offshore-Bauwerke



Abb. 5: Bohr-/Förderplattform: Gullfaks B<sup>10</sup>

Ölplattformen im Meer sind starken Chloridangriffen und dynamischen Kräften ausgesetzt. Im Vergleich zu Normalbeton und Stahl hat Hochleistungsbeton eine höhere Resistenz gegenüber Chloridangriffen, ist widerstandsfähiger und hat ein geringeres Eigengewicht.<sup>9</sup>

In Abb. 5 ist die Bohr- und Förderplattform Gullfaks B dargestellt, deren Basis aus Hochleistungsbeton gefertigt wurde.

<sup>8</sup> Straßen zukunftsfähig machen. In: URL: [http://www.this-magazin.de/artikel/tis\\_Strassen-zukunftsaehig\\_machen\\_2714458.html](http://www.this-magazin.de/artikel/tis_Strassen-zukunftsaehig_machen_2714458.html) (letzter Zugriff 26.03.2018)

<sup>9</sup> Hochleistungsbeton. In: URL: <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

<sup>10</sup> Gullfaks B. In: URL: <https://structurae.de/bauwerke/gullfaks-b> (letzter Zugriff 27.03.2018)

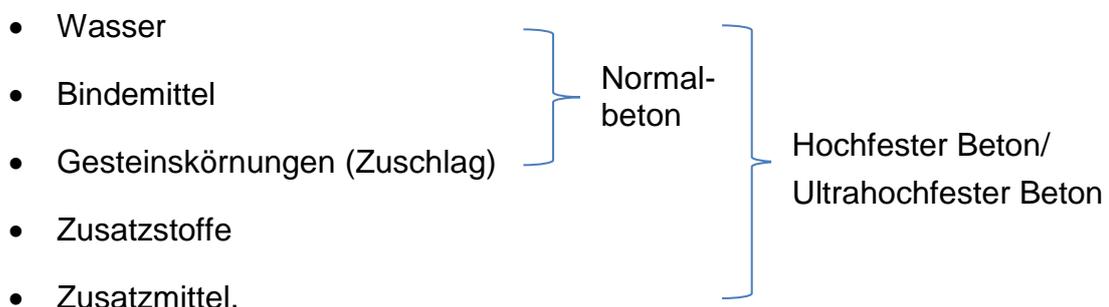


In den für diese Arbeit durchgeführten Versuchen wurden Druckfestigkeiten erreicht, die sich im Bereich um 150 N/mm<sup>2</sup> befinden. Man ist somit im Bereich von Ultrahochfestem Beton, für welchen bereits entsprechende Normenwerke bzw. Regelwerke in Bearbeitung sind. Solch hohe Druckfestigkeiten werden durch Verwendung eines 5-Stoff-Gemisches (Wasser, Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe, Zusatzmittel) und aufgrund einer entsprechenden Nachbehandlung des Festbetons erreicht.

### 2.2.1 Zusammensetzung

Wie oben erwähnt, sind die Eigenschaften von Beton von den Bestandteilen sowie von deren Mengenverhältnis zueinander abhängig. Es ist also wichtig, bereits vor Beginn der Betonierarbeiten zu wissen, welche Frischbetoneigenschaften und welche Festbetoneigenschaften man erzielen möchte.

Bezüglich der Zusammensetzung von Beton unterscheidet man zwischen einem 3-Stoff-Gemisch und einem 5-Stoff-Gemisch. Beim 3-Stoff-Gemisch handelt es sich um Normalbeton, bestehend aus Wasser, Bindemittel und Gesteinskörnung. Bei einem 5-Stoff-Gemisch spricht man von Hochleistungsbeton. Hier kommen zusätzlich zu den Bestandteilen von Normalbeton noch Zusatzstoffe und Zusatzmittel hinzu, welche die Eigenschaften von Beton noch mehr beeinflussen.<sup>11</sup> Man erhält somit ein Zusammenwirken von:



<sup>11</sup> Peck, Martin: Baustoff Beton. Planung Ausführung Beispiele. 1. Auflage. München: 2005. S.10.

Diese Bestandteile müssen, je nach gewünschtem Ergebnis, in den richtigen Mengen vermischt werden. Folgend wird näher auf die Bestandteile eingegangen.

### **Bindemittel (Zement)**

Unter Bindemitteln werden Stoffe verstanden, welche andere Stoffe miteinander verkleben bzw. auf einer Unterlage verklebt werden. Im Fall von Beton werden durch das Bindemittel die Gesteinskörnungen miteinander verklebt. In der Regel werden Bindemittel in flüssiger Form den zu verbindenden Zuschlagstoffen (Gesteinskörnung) beigegeben.<sup>12</sup>

Es werden zwei Arten von Bindemitteln unterschieden:<sup>13</sup>

- **Hydraulische Bindemittel:** Diese Art von Bindemittel erhärtet sowohl an der Luft, als auch unter Wasser. Dazu gehören zum Beispiel Zement, hydraulischer Kalk (Trass), Putz- und Mauerbinder auf Zement/Acryl Basis.
- **Nicht hydraulische Bindemittel:** Nicht hydraulische Bindemittel, auch als Luftbindemittel bezeichnet, erhärten wiederum nur an der Luft. Dazu gehören zum Beispiel Luftkalk, Gips und Magnesiabinder.

Für Beton wird in der Regel Zement als Bindemittel verwendet. Das hydraulische Bindemittel Zement erhärtet unter Zugabe von Wasser nach etwa zwei bis vier Stunden zu einem festen Zementstein. Zement bestimmt maßgebend die Eigenschaften von Beton und ist somit ein sehr wichtiger Bestandteil.<sup>14</sup>

Die wesentlichen Ausgangsstoffe für die Herstellung von Zement sind Kalk, Ton und Mergel. Der Herstellungsprozess wird nun kurz erläutert:<sup>15</sup>

#### Schritt 1: Rohmaterialgewinnung:

In Steinbrüchen wird das Rohmaterial abgetragen, zerkleinert und mithilfe von LKWs in das Zementwerk transportiert.

---

<sup>12</sup> Bruckner, Heinrich: Bindemittel 1.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. WS 2012/13. S.9ff.

<sup>13</sup> Bruckner, Heinrich: Bindemittel 1.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. WS 2012/13. S.9ff.

<sup>14</sup> Peck, Martin: Baustoff Beton. Planung Ausführung Beispiele. 1. Auflage. München: 2005. S.12.  
Peck, Martin: Baustoff Beton. Planung Ausführung Beispiele. 1. Auflage. München: 2005. S.12.

<sup>15</sup> Herstellungsprozess. In: URL: <http://www.lafarge.at/zement/alles-ueber-zement/herstellungsprozess/> (letzter Zugriff 27.03.2018)

### Schritt 2: Rohmaterialaufbereitung:

Das Rohmaterial wird im Werk getrocknet und gemahlen, dabei entsteht das Rohmehl. Bei Bedarf werden dem Rohmehl sogenannte Korrekturmaterialien, Quarzsande und eisenoxidhaltige Stoffe beigegeben. Dadurch wird beim darauffolgenden Brennvorgang die Sinterung erleichtert. Das erzeugte Rohmehl wird dann in Silos zwischengelagert und bis zum Brennvorgang gelagert.

### Schritt 3: Brennvorgang:

Der Brennvorgang wird in zwei Schritten durchgeführt, der Entsäuerung und dem Sinterprozess.

#### Schritt 3.1: Entsäuerung

Bei der Entsäuerung wird das Rohmehl auf etwa 900°C erhitzt. Ab einer Temperatur von ca. 550°C zerlegt sich der Kalkstein in Kohlendioxid und Calciumoxid. Diese Zerlegung wird als Entsäuerung bezeichnet.

#### Schritt 3.2: Sintervorgang

Das Material wird nach der Entsäuerung in einen schräg gelagerten Drehofen gegeben. Durch die drehende Bewegung des Ofens wird das Material in runde „Klinkergranalien“ geformt. Diese Klinkergranalien kommen beim Durchlaufen des Drehofens in immer heißere Zonen und erreichen dabei eine Temperatur von bis zu 1450 °C, bis sie schließlich am Ofenauslauf auf einen Rost des Klinkerkühlers fallen. Dabei wird das Material rasch abgekühlt, wobei die hydraulischen Eigenschaften des Klinkers erzeugt werden.

### Schritte 4: Zement mahlen

Der entstandene Zementklinker wird mit Hüttensand, Flugasche, Kalkstein und Gips vermahlen. Durch die Art und Menge der einzelnen Bestandteile sowie der Mahlfineinheit des Zements werden die späteren physikalischen und technologischen Eigenschaften des Endproduktes sehr stark beeinflusst.

In der ÖNORM EN 197-1:2011 10 15 („Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“) werden fünf Zementtypen unterschieden:

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

Die Wahl des Zements ist für die späteren Frischbeton- sowie Festbetoneigenschaften von entscheidender Bedeutung. Für Hochleistungsbeton wird vorwiegend  $C_3A$ -freier Portlandzement (CEM I) verwendet.  $C_3A$  ist das in manchen Zementarten enthaltene Tricalciumaluminat, welches sehr viel Wasser aufnehmen kann und sich somit negativ auf die spätere Festigkeit von Beton auswirkt. Um eine hohe Festigkeit des Betons zu erreichen, ist es zielführend, einen möglichst geringen Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert) im Beton anzustreben. In Abb. 6 wird die Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/B-Wertes dargestellt.

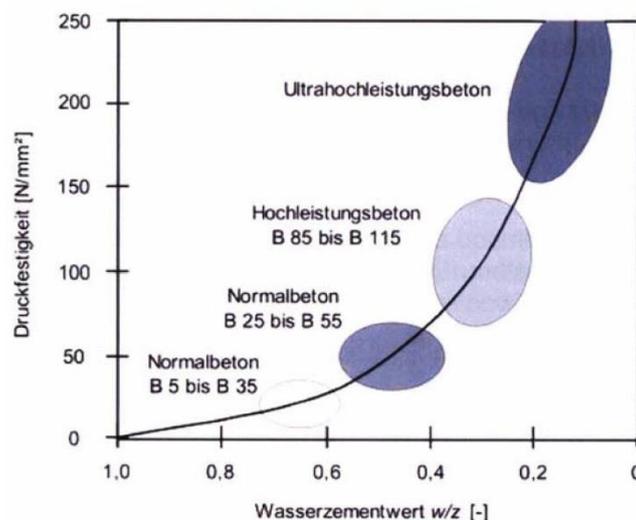


Abb. 6: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/B-Wertes<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Schneider, Ulrich: Schriftreihe des Instituts für Hochbau und Technologie Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz Heft 13. 1. Auflage. Wien: TU – Institut für Hochbau und Technologie 2008. S.2.

Für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde C<sub>3</sub>A-freier Portlandzement der Festigkeitsklasse 52,5 mit normaler Erhärtungsgeschwindigkeit (CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei) verwendet.

### **Gesteinskörnungen (Zuschlag)**

Gesteinskörnungen bilden mengen- und volumenmäßig den größten Bestandteil von Beton. Somit ist es naheliegend, dass der Zuschlag die Eigenschaften des Betons stark beeinflusst. Dabei sind die Kornform, die Korngrößenverteilung (Sieblinie), die mechanischen Eigenschaften und die chemischen Wechselbeziehungen zwischen Zuschlag und Zementstein von entscheidender Bedeutung. Gesteinskörnungen können aus

- natürlichem
- künstlichem
- dichtem oder
- porigem

Gestein bestehen. Diese Gesteinskörnungen werden nach den Korngrößen in Korngruppen unterteilt und später in der gewünschten Korngrößenverteilung (Sieblinie) dem Beton beigegeben. Die Sieblinie zeigt die prozentuellen Anteile der Korngrößen innerhalb eines Zuschlagsgemisches für Beton. Der Zementleim (Zement + Wasser) hat die Aufgabe die Gesteinskörner miteinander zu einem festen Gefüge zu verbinden. Um so wenig Zementleim als möglich zu benötigen, ist es erforderlich, dass die Sieblinie eines Zuschlagsgemisches stetig verläuft. Das bedeutet, dass neben den gröberen Anteilen des Zuschlagsgemisches auch ausreichend feinere Anteile enthalten sind, um somit die Hohlräume zwischen den groben Anteil auszufüllen (Abb. 7).<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.14ff.

Hochleistungsbeton. In: URL: <http://www.bvfs.at/html/pub/hlбетon.htm> (letzter Zugriff 28.03.2018)

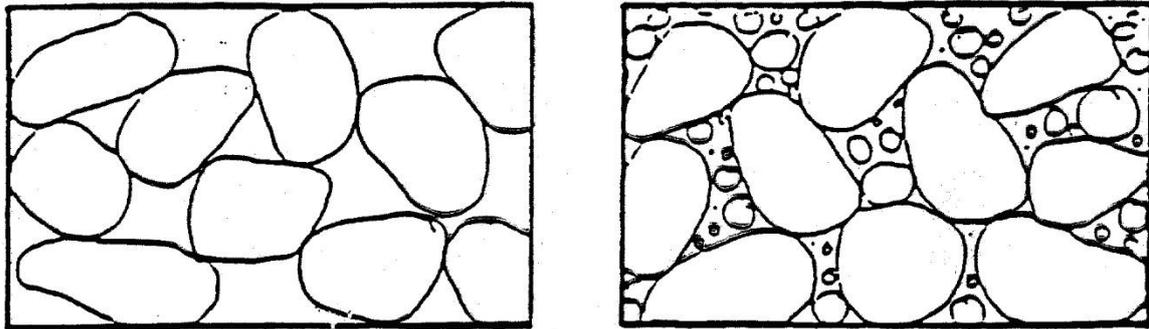


Abb. 7: Grober Zuschlag ohne (links) und mit (rechts) Füllkörner<sup>18</sup>

Als Beispiel eines stetigen Sieblinienverlaufs wird in Abb. 8 der Verlauf eines Zuschlagsgemisches mit einem Größtkorn von 16 mm gezeigt.

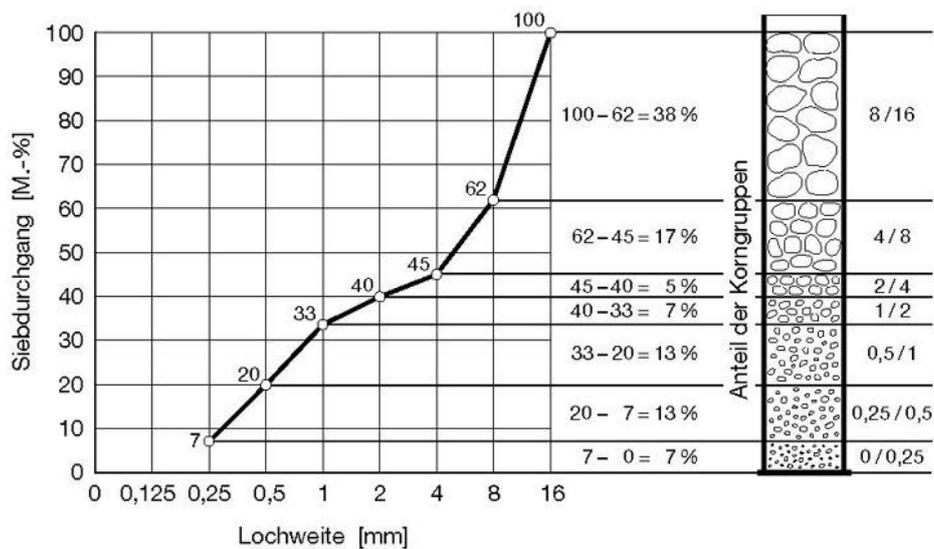


Abb. 8: Beispiel Sieblinienverlauf<sup>19</sup>

Grundsätzlich sollte der Durchmesser des Größtkorns so gewählt werden, dass das Mischen, Fördern, Einbringen und Verarbeiten des Betons nicht behindert wird. Bei der in Abb. 8 gezeigten Korngrößenverteilung handelt es sich um Normalbeton. Für Hochleistungsbeton ist eine derartige Sieblinie ungeeignet.

<sup>18</sup> Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.77.

<sup>19</sup> Sieblinie. In: URL: <https://www.beton.wiki/index.php?title=Sieblinie> (letzter Zugriff 28.03.2018)

Bei Hochleistungsbeton wird als Zuschlag in der Regel Quarzsand mit einem Größtkorn von einem Millimeter verwendet. Für Hochleistungsbetone wird ein Zuschlag benötigt, dessen Druckfestigkeit nicht zu gering für die Zementsteinfestigkeit ist, da sich bei einem niedrigen W/B-Wert die Druckfestigkeit des Zementsteins immer mehr der Druckfestigkeit des Zuschlags nähert. Weiteres ist eine geringe Menge an Zementleim erwünscht, somit wird ein Zuschlag benötigt, dessen Oberfläche möglichst gering ist, um nur wenig Zementleim für seine Umhüllung zu benötigen. Diese beiden Eigenschaften werden von Quarzsand erfüllt. Quarzsand hat ausreichend Festigkeit und aufgrund seiner runden Formgebung eine kleine Oberfläche. Um den Zementleimbedarf weiter zu verringern, wird zusätzlich zum Quarzsand noch Quarzmehl mit einem Größtkorn  $<125\ \mu\text{m}$  als Zusatzstoff beigegeben. Dieses entsteht durch das Zermahlen von Quarzsand. Quarzmehl setzt sich in den Zwischenräumen von Quarzsand an und hat ein geringes Wasseraugvermögen (Abb. 9).

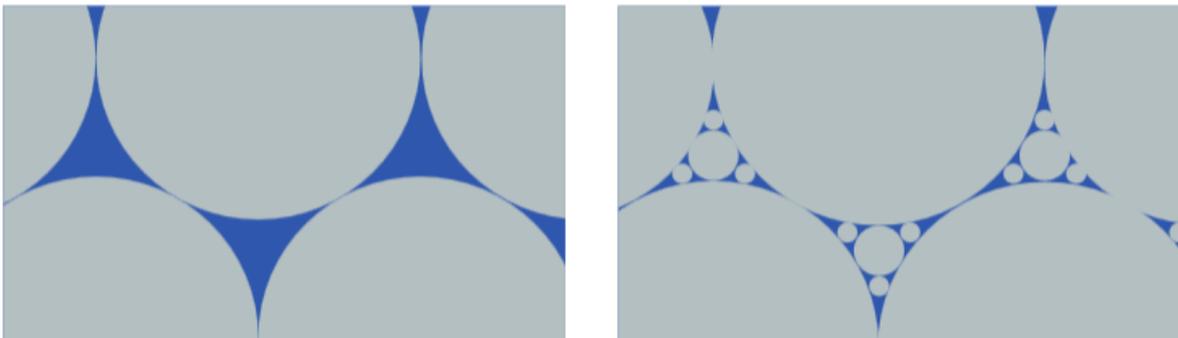


Abb. 9: Hohlraum mit (rechts) und ohne Quarzmehl (links)<sup>20</sup>

Für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde Quarzsand mit einer Körnung von 0,1-0,5 mm (QS 0,1-0,5) verwendet.

---

<sup>20</sup> Sacherl, Simon: Einfluss der Mischdauer auf das Festigkeitsverhalten von Hochleistungsbeton. – Wien: FH – Campus Wien, Bac. Arb., 2014. S.16.

## Zugabewasser

Zugabewasser wird benötigt, um die chemische Reaktion (Hydratation) mit dem Zement auszulösen. Die Wassermenge ist vom gewünschten W/B-Wert und der Betonart (Abb. 6) abhängig. Für Beton kann im Allgemeinen jedes in der Natur vorkommende Wasser verwendet werden, welches die Eigenschaften von Beton nicht negativ beeinflusst. Dabei ist zu beachten, dass das Wasser keine Verunreinigungen aufweisen und der Salzgehalt 3,5% nicht übersteigen darf. Als schadhafte Wässer gelten zum Beispiel Moorwasser und Meerwasser. In der Regel wird als Anmachwasser für Beton Trinkwasser verwendet. Für Normalbeton darf auch Restwasser aus Frischbetonrecycling verwendet werden. Für Hochleistungsbeton kann Restwasser jedoch nicht verwendet werden. Für Betonwerke in der Nähe von Gewässern kann auch dieses Wasser verwendet werden, solange es laufend auf Verunreinigungen untersucht wird.<sup>21</sup>

Bei der Berechnung des Gesamtwassergehalts von Beton muss neben dem Zugabewasser auch die an der Oberfläche des Zuschlags haftende Feuchtigkeit, eventuell das Wasser aus den Zusatzmitteln und das Wasser aus den Zusatzstoffen berücksichtigt werden.<sup>22</sup>

Primär ist der Gesamtwassergehalt vom Wasseranspruch des Zuschlags abhängig. Deshalb sind Gesteinskörnungen vorteilhaft, welche eine geringe Oberfläche und eine geringe Wassersaugfähigkeit aufweisen.<sup>23</sup>

---

<sup>21</sup> Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.99ff.

<sup>22</sup> Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.99ff.

<sup>23</sup> Kirnbauer, Johannes: Der Vakuummischprozess zu Herstellung von Ultra High Performance Concrete. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2013. S.39.

$$\begin{aligned} & \text{Zugabewasser} \\ & + \\ & \text{Oberflächenfeuchte des Zuschlags} \\ & + \\ & \text{eventuell Wasser aus Zusatzmittel} \\ & + \\ & \text{Wasser aus Zusatzstoffen} \\ \hline & \text{=Gesamtwassergehalt} \end{aligned}$$

Die ÖNORM EN 1008 („Zugabewasser von Beton – Festlegungen für Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton“) beschäftigt sich mit den Anforderungen an das Zugabewasser und zeigt Verfahren für die Beurteilung über die Eignung.<sup>24</sup>

Für die in dieser Arbeit gezeigten Versuche wurde Trinkwasser aus dem öffentlichen Netz verwendet.

### **Zusatzstoffe**

In der ÖNORM B 4710-1 werden Zusatzstoffe als fein verteilte Stoffe definiert, welche dem Beton beigegeben werden um die Frischebeton- oder Festbetoneigenschaften zu verbessern. Dabei werden zwei Arten von Zusatzstoffen unterschieden:

- Nahezu inerte Zusatzstoffe (Typ I): Unter nahezu inerten Zusatzstoffen, versteht man Stoffe, welche nicht mit Wasser und Zement reagieren. Dazu gehören Gesteinsmehle (Quarzmehl, Kalksteinmehl) und Pigmente.

---

<sup>24</sup> Austrian Standards. In: URL: [https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/-101444/OENORM\\_EN\\_1008\\_2002\\_10\\_01;jsessionid=C4F7B467CED182150BCE38C4B13A51AB](https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/-101444/OENORM_EN_1008_2002_10_01;jsessionid=C4F7B467CED182150BCE38C4B13A51AB) (letzter Zugriff 30.03.2018)

Gesteinsmehle werden dem Zuschlag beigegeben, um die Zuschlagsverteilung (Siebkurve) zu verbessern. Pigmente werden dem Beton zur Farbgebung beigegeben.

- Puzzolanische oder latenthydraulische Zusatzstoffe (Typ II). Darunter fallen jene Zusatzstoffe, die mit Wasser und Zement reagieren und somit einen Beitrag zur Erhärtung leisten. Als Beispiel können Flugasche, Silikastaub und aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) nach ÖNORM B 3309 genannt werden.

Da die Zusatzstoffe des Typs II mit Wasser und Zement reagieren, dürfen diese, sofern ihre Eignung nachgewiesen ist, an den Zementgehalt und den Wasserzementwert angerechnet werden. Die maximal erlaubte Zugabemenge an Zusatzstoffen des Typs II, bezogen auf den Bindemittelgehalt, werden in Tabelle 2 gezeigt.<sup>25</sup>

Tabelle 2: Maximale Zugabemenge von Zusatzstoffen des Typs II<sup>26</sup>

<b>Zementsorte</b>	<b>Flugasche nach EN 450</b>	<b>AHWZ nach B3309</b>
CEM I	25 %	30 %
CEM II/A 32,5	15 %	15 %
CEM II/A 42,5	20 %	20 %
CEM II/B 32,5	0 %	0 %
CEM II/B 42,5	10 %	10 %

Für die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Zusatzstoffe wurden Quarzmehl (inaktiv) und Silikastaub (reaktiv) eingesetzt. Die Eigenschaften von Quarzmehl wurden bereits im Abschnitt Gesteinskörnungen beschrieben.

<sup>25</sup> Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.106ff.

<sup>26</sup> Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.107.

Silikastaub (Mikrosilika) entsteht als Nebenprodukt bei der Erzeugung von Aluminium, Silicium, Ferrosilicium und anderen Metallen. Mikrosilika besitzt eine runde Kornform mit einem durchschnittlichen Korndurchmesser von  $0,15\ \mu\text{m}$  und ist somit 100-mal feiner als Zement. Bei der Zugabe reagiert Mikrosilika mit dem im Anmachwasser enthaltenen Calciumhydroxid, wodurch weitere festigkeitsfördernde CSH-Phasen (Calciumsilikathhydrat) entstehen. Wegen des kleinen Korndurchmessers setzt sich Mikrosilika zwischen den Zementpartikeln an, wodurch der Verbund zwischen Zementstein und Zuschlägen und die Zementsteinfestigkeit verbessert werden. Dadurch werden Zementsteinfestigkeiten erreicht, welche die Festigkeit der Gesteinskörnung überschreiten können. Somit ist, wie vorhin schon erwähnt, die Festigkeit des Zuschlags ein wichtiges Kriterium. Das Verhältnis Silikastaub/Zement darf  $0,11$  nicht überschreiten. Da Silikastaub mit Wasser und Zement reagiert, muss dieser bei der Berechnung des W/B-Werts mitberücksichtigt werden. Versuche haben gezeigt, dass wegen der hohen Zementsteinfestigkeit die Bruchfläche bei Hochleistungsbeton durch den Zuschlag verläuft. Bei Normalbeton wiederum verläuft die Bruchfläche entlang des Zementsteins. Aufgrund der feinen Bestandteile (Quarzsand, Quarzmehl, Silikastaub) ist Hochleistungsbeton verglichen mit Normalbeton ein nahezu homogener Baustoff (Abb. 10).<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Kirnbauer, Johannes: Der Vakuummischprozess zu Herstellung von Ultra High Performance Concrete. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2013. S.33

Schneider, Ulrich: Schriftreihe des Instituts für Hochbau und Technologie Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz Heft 13. 1. Auflage. Wien: TU – Institut für Hochbau und Technologie 2008. S.33ff.

Richter, Thomas: Hochfester Beton – Hochleistungsbeton. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 1999. S18ff.

Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.106ff.

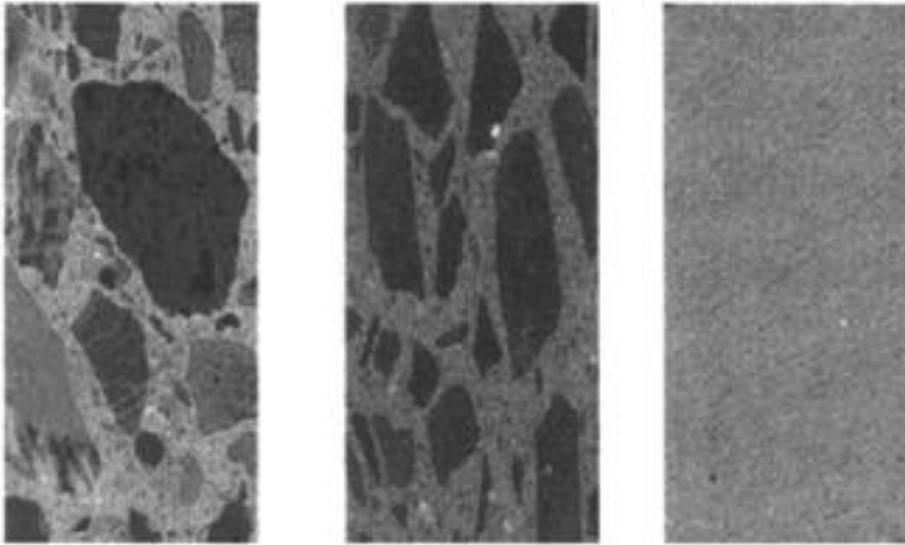


Abb. 10: Vergleich Mikrostruktur von Normalbeton, Hochfester Beton und Ultrahochfester Beton

### Zusatzmittel

Zusatzmittel werden in flüssiger oder pulverförmiger Form dem Beton beigegeben um in erster Linie die Frischbetoneigenschaften gezielt zu beeinflussen. Solche Zusatzmittel können sein:<sup>28</sup>

- Betonverflüssiger (Verminderung des Wasseranspruchs, Verbesserung der Verarbeitbarkeit)
- Fließmittel (Verflüssiger, Verminderung des Wasseranspruchs, W/B-Wert < 0,4 möglich bei guter Verarbeitbarkeit)
- Stabilisierer (Verbesserung des Zusammenhaltevermögens und der Verarbeitbarkeit)
- Verzögerer (Verzögerung des Erstarrens)
- Beschleuniger (Beschleunigung des Erstarrens)
- Entlüfter (Entlüftung des Betons während des Mischvorgangs)

---

<sup>28</sup> Bruckner, Heinrich: Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S.111f.

Für Hochleistungsbeton ist ein niedriger W/B-Wert anzustreben, was sich negativ auf die Verarbeitung des Frischbetons auswirkt. Durch die Zugabe von Fließmittel wird die Verarbeitbarkeit verbessert. Die Zementteilchen werden dabei von den Fließmitteln umhüllt, wodurch sich diese auftrennen und das eingeschlossene Wasser befreit wird (Abb. 11). Durch das nun zur Verfügung stehende Wasser wird die Konsistenz des Frischbetons maßgebend verbessert.<sup>29</sup>

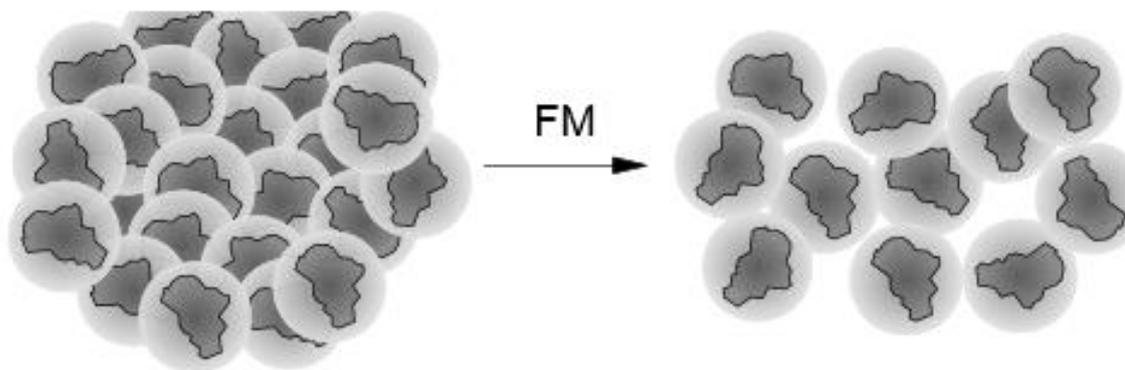


Abb. 11: Auftrennung der Zementteilchen<sup>30</sup>

Für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden Fließmittel (ACE 430), Konsistenzhalter (Sky 911) und Entlüfter (DCC-Entlüfter) verwendet.

### 2.2.2 Partikelgrößenverteilung und Packungsdichte

Bei Hochleistungsbeton spricht man wegen des großen Anteils an Mehlkörnern (Quarzmehl, Silikastaub) von Partikelgrößenverteilung. Der Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf die Eigenschaften von Hochleistungsbeton kann mit dem Einfluss der Korngrößenverteilung (Sieblinie) auf Normalbeton verglichen werden. Die Partikelgrößenverteilung bestimmt die Eigenschaften der Verarbeitbarkeit, den Zementleimanteil, den Gehalt an Hohlräumen und den Frostwiderstand des Betons, sowie die Packungsdichte und auch den Widerstand

<sup>29</sup> Kirnbauer, Johannes: Der Vakuummischprozess zu Herstellung von Ultra High Performance Concrete. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2013. S.35ff

<sup>30</sup> Sacherl, Simon: Einfluss der Mischdauer auf das Festigkeitsverhalten von Hochleistungsbeton. – Wien: FH – Campus Wien, Bac. Arb., 2014. S.18.

gegen chemische Angriffe. Deshalb ist eine optimale Zusammensetzung der einzelnen Bestandteile von Hochleistungsbeton wichtig.

Eine geeignete Zusammensetzung muss jedoch nicht bedeuten, dass der Hochleistungsbeton später auch die gewünschten Eigenschaften aufweist. Bereits während des Trockenmischvorgangs entstehen aufgrund der Verwendung sehr feiner Stoffe interpartikuläre Kräfte zwischen den Mehlkörnern, welche zu Agglomerationen führen können. Unter Agglomerat versteht man in der Verfahrenstechnik einen festen Verbund von zuvor losen Teilchen, welche im Zuge von technischen Vorgängen (z.B.: Mischvorgang) entstehen. Somit wird aus mehreren kleinen Teilchen ein größeres Teilchen. Betrachtet man dies in Verbindung mit der Partikelgrößenverteilung, erhöht man während der technischen Vorgänge den Anteil an größeren Teilchen im Gemisch. Dies wirkt sich negativ auf die Verdichtbarkeit des Betons aus. Weiteres führt die Bildung von Agglomeraten zu einer Verringerung der spezifischen Oberfläche der Teilchen, wodurch die Wasserfilmdicke vergrößert wird. Dies kann sich wiederum negativ auf die spätere Druckfestigkeit des Betons auswirken.<sup>31</sup>

Im Zuge der Versuche wurde geprüft, ob mit zunehmender Mischdauer auch die Agglomerationsbildung erhöht wird. Die Partikelgrößenverteilung des Frischbetons wurde dabei mit einem Laserbeugungs-Partikelgrößenmessgerät bestimmt. Die Funktionsweise dieses Messgeräts wird nun kurz beschrieben.

### **Funktionsweise Laserbeugungs-Partikelgrößenmessgerät der Fa. *Malvern***

„Der Mastersizer 3000 misst die Größe von Partikeln mithilfe der Laserbeugung. Dabei wird die Intensität des gestreuten Lichts eines Laserstrahls gemessen, während dieser eine dispergierte Partikelprobe durchdringt. Anhand dieser Daten wird dann die Größe der Partikel aus dem erzeugten Beugungsmuster berechnet.

---

<sup>31</sup> Agglomerate. In: URL: <http://www.ebbecke-verfahrenstechnik.de/unternehmen/lexikon/-agglomerate.html>

Stangl, Albert: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2011. S.9

Ein typisches System besteht aus drei wichtigen Elementen:

- Optische Bank: Eine dispergierte Probe durchläuft den Messbereich der optischen Bank, wo die Partikel mit einem Laser bestrahlt werden. Eine Reihe von Detektoren misst genau die Intensität des Lichts, welches durch die Partikel in der Probe gestreut wird, sowohl für das Licht der roten und blauen Wellenlängen, als auch für einen weiten Winkelbereich.
- Probendispergiereinheiten (Zubehör): Die Probendispergierung wird mit verschiedenen Einheiten zur Nass- und Trockendispergierung durchgeführt. Mit ihnen wird sichergestellt, dass die Partikel in der richtigen Konzentration und einem geeigneten, stabilen Dispergierungszustand in den Messbereich der optischen Bank gelangen.
- Geräte-Software: Die Software des Mastersizer 3000 steuert das System während des Messvorgangs und analysiert die Beugungsdaten zur Berechnung der Partikelgrößenverteilung. Außerdem bietet sie sowohl sofortiges Feedback während der Entwicklung von Methoden, als auch eine fachmännische Einschätzung der Qualität der Ergebnisse.<sup>32</sup>



Abb. 12: Mastersizer 3000

---

<sup>32</sup> Mastersizer 3000. In: URL: <https://www.malvernpanalytical.com/de/products/product-range/-mastersizer-range/mastersizer-3000> (letzter Zugriff 03.04.2018)

Mithilfe einer bekannten Partikelgrößenverteilung können Rückschlüsse auf die Packungsdichte eines Gemisches gezogen werden, und es kann beurteilt werden, ob es sich um eine gute oder weniger gute Partikelgrößenverteilung handelt. Die Packungsdichte beschreibt das Verhältnis von Feststoffvolumen zu Gesamtvolumen einer Partikelschüttung.

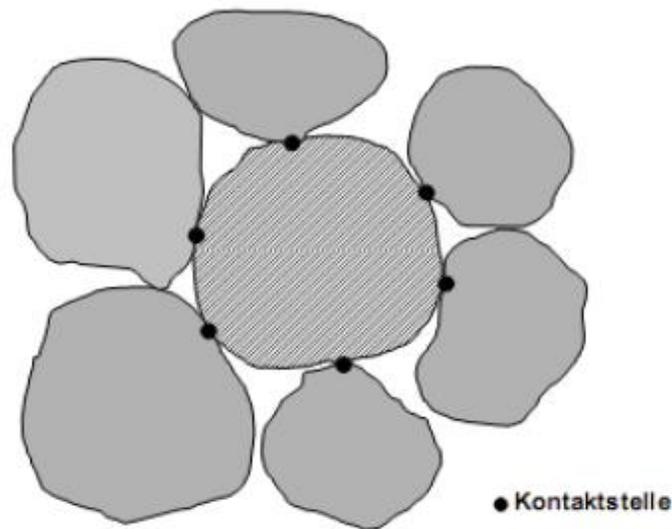
$$D = 1 - \frac{\varepsilon}{100}$$

D	Packungsdichte
$\varepsilon$	Hohlraumgehalt [Volums-%]

Im Feststoffvolumen werden das Volumen des Zuschlags sowie das Volumen der Zusatzstoffe berücksichtigt. Das Gesamtvolumen besteht aus dem Feststoffvolumen zuzüglich der im Beton befindlichen Hohlräume. Daraus kann abgeleitet werden, ob es sich um Beton mit hoher Festigkeit und Dauerhaftigkeit handelt. Eine hohe Packungsdichte bedeutet, dass der Hohlraumgehalt der Partikelschüttung gering ist, wodurch die Festigkeit sowie Dauerhaftigkeit erhöht wird. Weiteres bedeutet eine hohe Anzahl von Partikeln in einer Partikelschüttung eine hohe Anzahl von Kontaktflächen/Reibungsflächen zwischen den Partikeln, weshalb die Festigkeit noch mehr erhöht wird (Abb. 13). Die Packungsdichte ist also ein entscheidender Indikator zur Beurteilung der Eigenschaften von Beton.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> Stangl, Albert: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2011. S.27ff

Abb. 13: Kontaktflächen<sup>34</sup>

Um eine hohe Packungsdichte zu erreichen, ist eine optimale Partikelgrößenverteilung Voraussetzung. Es werden also, wie bei Normalbeton, ausreichend Feinanteile benötigt, welche die Hohlräume zwischen dem Zuschlag so vollständig als möglich ausfüllen sollen. Die Sieblinie muss deshalb auch hier stetig verlaufen.

Um herauszufinden, ob sowohl die Mischdauer, als auch das Alter eines Prämixes die Packungsdichte beeinflusst, wurde im Zuge dieser Arbeit, ausgehend von den Partikelgrößenverteilungen, die Packungsdichten jedes Mischvorgangs berechnet,

### 2.2.3 Hydratation

Der Hydratationsgrad von Zement ist abhängig vom W/B-Wert des Betons. Da bei Hochleistungsbeton ein geringer W/B-Wert (in der Regel  $<0,4$ ) anzustreben ist, kann der Zement nicht vollständig hydratisieren (Abb. 14). Folglich wirkt der nicht hydratisierte Zement wie eine feine hochfeste Gesteinskörnung mit einem sehr guten Verbund zum umgebenen Zementstein, wodurch die Druckfestigkeit des

---

<sup>34</sup> Stangl, Albert: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2011. S.36

Betons erhöht wird. Um die dadurch verursachte schlechtere Konsistenz des Frischbetons zu verbessern, wird dem Beton Fließmittel beigegeben.<sup>35</sup>

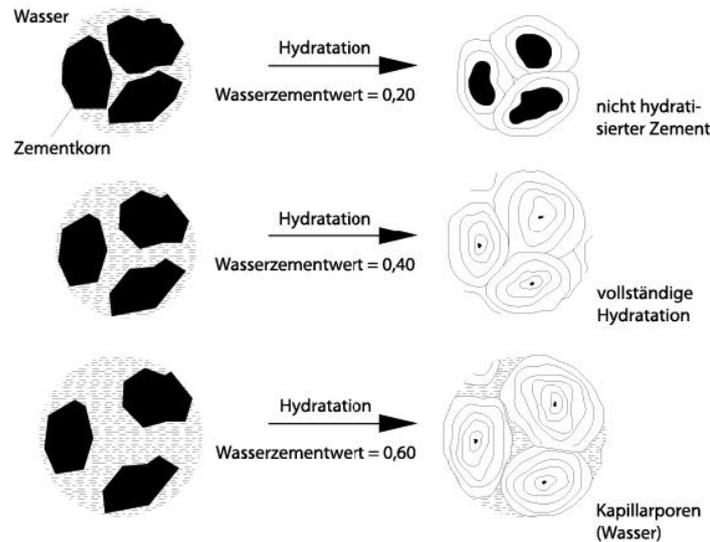


Abb. 14: Hydratationsgrad in Abhängigkeit des W/B-Wertes<sup>36</sup>

### Hydratationswärme<sup>37</sup>

Während des Hydratationsvorgangs entsteht durch das hydraulische Bindemittel Zement Hydratationswärme. Beton erhärtet also unter Wärmeabgabe. Die Menge an frei werdender Wärme während des Hydratationsvorgangs ist von mehreren Faktoren abhängig.

Im Wesentlichen hängt die Menge an frei werdender Wärme von der Zusammensetzung des Zementklinkers ab. Die im Zement vorhandenen Klinkerphasen  $C_3A$  und  $C_3S$  verursachen den Hauptanteil an entstehender Hydratationswärme. Die Hydratationswärme sinkt somit, wenn die Menge an im Bindemittel vorhandenen Klinkerphasen abnimmt.

<sup>35</sup> Thienel: Sonderbetone.- München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Wintertrimester 2011. S.19.

<sup>36</sup> Hydratation. In: URL: <https://www.beton.wiki/index.php?title=Hydratation> (letzter Zugriff 07.04.2018)

<sup>37</sup> Thienel: Sonderbetone.- München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Wintertrimester 2011. S.28f.

Weiteres beeinflusst die Mahlfineinheit des Zements die Hydratationswärmeentwicklung von Beton. Je feiner der Zement gemahlen wird, desto höher ist die Wärmeentwicklung und desto schneller findet der Hydratationsvorgang statt. Dies macht sich vor allem in den ersten 24 Stunden der Hydratation bemerkbar.

Ebenso wird die Menge an freigesetzter Hydratationswärme vom W/B-Wert beeinflusst. Aufgrund eines niedrigen W/B-Wertes ist es dem Zement nicht mehr möglich vollständig zu hydratisieren, da nicht genügend Wasser für einen vollständigen Hydratationsprozess vorhanden ist. Ein hoher Zementgehalt, also ein geringer W/B-Wert, verursacht eine höhere Wärmeentwicklung während der Hydratation. Weil aber nicht genügend Wasser für einen vollständigen Hydratationsprozess vorhanden ist, bricht die Wärmeentwicklung bei hochfestem Beton schneller ab als bei Normalbeton. Um dies zu verdeutlichen wird in Abb. 15 die Wärmeentwicklung unterschiedlicher Betonklassen dargestellt.

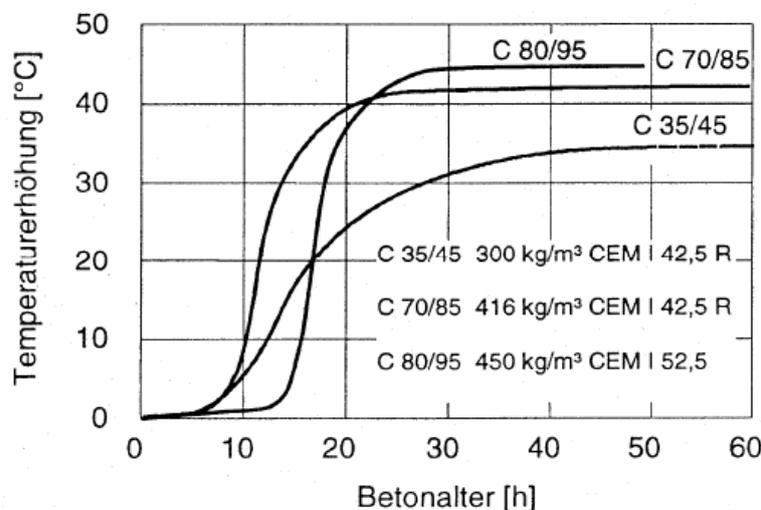


Abb. 15: Wärmeentwicklung unterschiedlicher Betonklassen<sup>38</sup>

Für diese Arbeit wurde untersucht, ob die Hydratationswärmeentwicklung vom Alter des Prämixes beeinflusst wird.

<sup>38</sup> Thienel: Sonderbetone.- München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Wintertrimester 2011. S.29.

## 2.2.4 Frischbetoneigenschaften

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Ermittlung der Frischbetoneigenschaften das Ausbreitmaß, die Trichterauslaufzeit, der Luftgehalt und die Frischbetonrohddichte bestimmt. Da der Schwerpunkt in dieser Arbeit bei den Festbetoneigenschaften, der Partikelgrößenverteilung und der Hydratationswärme liegt, werden hier nur die Grundlagen der genannten Frischbetoneigenschaften beschrieben. Die genaue Analyse und Bewertung der Ergebnisse können in der Diplomarbeit „Untersuchung der rheologischen Eigenschaften von UHPC-Prämix“ von *Maximilian Mayerhofer* nachgelesen werden.

### Ausbreitmaß

Die Prüfung des Ausbreitmaßes dient zur Bestimmung der Konsistenz und der dazugehörigen Konsistenzklasse des Frischbetons. Dabei wird die Ausbreitung des Frischbetons auf einem Ausbreittisch gemessen. Das Ausbreitmaß ist der mittlere Durchmesser des ausgebreiteten Betons. Es ist darauf zu achten, dass diese Prüfung spätestens 20 Minuten nach Beginn der Probennahme beendet sein muss. Ebenso muss festgehalten werden, wie viele Minuten nach Wasserzugabe diese Prüfung erfolgt.<sup>39</sup>

### Luftgehalt

Bei der Prüfung des Luftporengehalts wird der volumetrische Anteil an Luft in einem vollständig verdichteten Beton gemessen. Dabei wird ein Luftporentopf mit Frischbeton befüllt und mit einem Deckel dicht verschlossen. Das Luftvolumen im Deckel und der aufgebrauchte Druck auf dem mit Beton befüllten Topf sind bekannt und werden mit einem unbekanntem Luftvolumen in der Betonprobe ausgeglichen. Für die Ermittlung des Luftporengehalts gibt es zwei unterschiedliche Verfahren. Im Zuge dieser Arbeit wurde das Druckausgleichsverfahren verwendet.<sup>40</sup>

---

<sup>39</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 459-2. Teil2: Prüfverfahren. 15.12.2010

<sup>40</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12350-7. Prüfung von Frischbeton: Luftgehalt - Druckverfahren. 15.07.2009

### **Trichterauslaufzeit**

Die Trichterauslaufzeit dient zur Ermittlung der Viskosität von selbstverdichtendem Beton. Dabei wird Beton in einem genormten Trichter gegeben und jene Zeit gemessen, die der Beton benötigt, um aus dem Trichter auszulaufen.<sup>41</sup>

### **Frischbetonrohichte**

Die Frischbetonrohichte ist die Masse von einem m<sup>3</sup> verdichtetem Frischbeton, bestehend aus Gesteinskörnung, Bindemittel- und Wassergehalt. Sie wird sowohl zur Bestimmung der Anteile an Gesteinskörnung, Zement und Wasser pro m<sup>3</sup> Beton, als auch zur Beurteilung über eine ausreichende Verdichtung des Betons herangezogen.<sup>42</sup>

## **2.2.5 Festbetoneigenschaften**

Zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften wurden im Rahmen dieser Arbeit die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit geprüft.

### **Biegezugfestigkeit**

Die Biegezugfestigkeit von Beton ist im Vergleich zur Druckfestigkeit gering. Wobei die Biegezugfestigkeit dabei im Wesentlichen vom Haftvermögen zwischen Zuschlag und Zementstein abhängig ist. Insbesondere ist die Aufnahme von Zugkräften auch wegen auftretender Mikrorisse in Beton eine bautechnisch nur bedingt nutzbare Größe. Deswegen werden in der Baupraxis bei Konstruktionsbeton für tragende Bauteile die inneren Zugkräfte mit Bewehrungsstahl aufgenommen.

Für die Prüfung der Biegezugfestigkeit wird ein 3-Punkt-Biegeversuch an 40x40x160 mm großen Prismen untersucht. Der Abstand der beiden Auflager

---

<sup>41</sup> Selbstverdichtender Beton – Eigenschaften und Prüfung. In: URL: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkl%C3%A4tter/B29.pdf> (letzter Zugriff 07.04.2018)

<sup>42</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12350-6. Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohichte. 15.07.2009

beträgt dabei 100 mm. Das Prüfgerät selbst besteht aus einer Biegevorrichtung mit zwei Auflagern aus Stahlrollen (Abstand 100 mm) und einer dritten Stahlrolle, über welche die Prismen belastet werden. Um Unebenheiten der betonierten Prismen auszugleichen, ist eines der beiden Auflagern beweglich ausgeführt. Somit wird sichergestellt, dass die Prismen satt auf beiden Auflagern aufliegen und Torsionskräfte verhindert werden. Die Biegezugfestigkeit wird in  $\text{N/mm}^2$  angegeben.<sup>43</sup>

Die Vorgehensweise der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Biegezugprüfungen erfolgt in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 (Abb. 16).

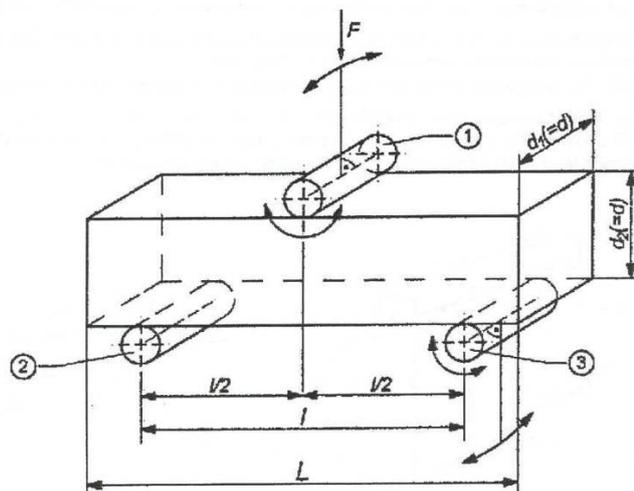


Abb. 16: Biegezugversuch<sup>44</sup>

## Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist jene Eigenschaft, welche Beton so vielseitig einsetzbar macht. Mit Beton können im Vergleich zu anderen Baustoffen sehr hohe Druckfestigkeiten erreicht werden. Die Druckfestigkeit ist dabei von mehreren Faktoren abhängig. Diese wurden bei der Beschreibung der Bestandteile bereits

<sup>43</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 196-1. Prüfverfahren für Zement – Teil1: Bestimmung der Festigkeit. 01.04.2005

<sup>44</sup> Bruckner, Heinrich: Festbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013. S..

erwähnt (W/B-Wert, verwendeter Zuschlag, Zementart, ...). Die Einteilung des Betons nach der Druckfestigkeit wurde bereits in Tabelle 1 gezeigt.

Durch den Biegezugversuch werden die Prismen in zwei Hälften geteilt. Eine der beiden Hälften wird dann für den Druckversuch verwendet. Die Prismenhälfte wird dabei samt Vorrichtung in das Prüfgerät gegeben (Abb. 17). Die Vorrichtung ist mit zwei 40x40 mm großen Kontaktflächen ausgestattet, wobei die obere Kontaktfläche mit einem Kugelgelenk ausgestattet ist. Das Prüfgerät selbst besteht aus zwei Druckplatten. Die obere Druckplatte ist starr mit der Prüfmaschine verbunden, und die untere Druckplatte, welche für die Kraffteinleitung zuständig ist, ist ebenfalls mit einem Kugelgelenk ausgestattet. Die Druckfestigkeit wird in N/mm<sup>2</sup> angegeben.<sup>45</sup>

Die Vorgehensweise der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen erfolgt ebenfalls in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1.



Abb. 17: Druckfestigkeitsversuch

---

<sup>45</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 196-1. Prüfverfahren für Zement – Teil1: Bestimmung der Festigkeit. 01.04.2005

## 2.3 Mischprozess

Aus den beschriebenen Bestandteilen des Hochleistungsbetons wurden im Zuge der Versuche Prämixe hergestellt. Prämixe sind Vormischungen/Rezepturen bei welchen die Bestandteile bereits im richtigen Mengenverhältnis vermischt werden.

Dafür wurde ein Trockenprämix, bestehend aus Zement, Quarzsand, Quarzmehl und Mikrosilika, und ein Flüssigkeitsprämix, bestehend aus Wasser, Fließmittel, Konsistenzhalter und Entlüfter, hergestellt. In weiterer Folge müssen der Trockenprämix und der Flüssigkeitsprämix nur noch im richtigen Mengenverhältnis vermischt werden.

In folgendem Kapitel werden nun die Mischertypen beschrieben. Außerdem wird genauer auf jenen Mischertyp, welcher im Zuge dieser Arbeit verwendet wurde, eingegangen.

### Mischertypen

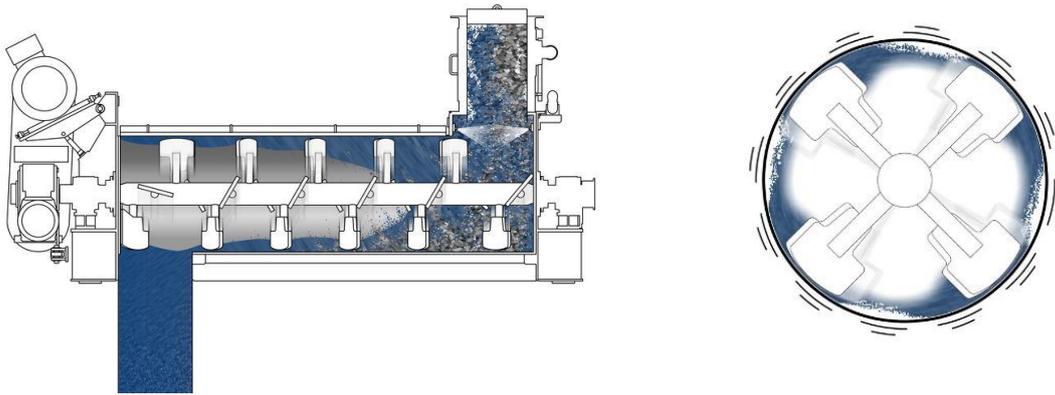
Ziel des Mischprozesses ist es, die zu mischenden Bestandteile derart zu vermengen, dass eine möglichst homogene Konzentration entsteht. Bezüglich der Mischertypen unterscheidet man zwischen Chargenmischern und kontinuierlichen Mixern.

Bei den kontinuierlichen Mixern werden die Komponenten am Eingang des Mixers zugegeben und zum Beispiel mithilfe von Wellen, mit gleichzeitigem Mischen der Komponenten, bis zum Ausgang befördert. Man hat dadurch zwischen Befüllen und Entleeren keine Pause. Somit kann in kurzer Zeit eine große Menge an Beton hergestellt werden. Diese Art von Mischer eignet sich besonders für Projekte, bei welchen große Mengen an Beton benötigt werden.<sup>46</sup>

Abb. 18 zeigt ein Beispiel eines kontinuierlichen Mixers, in Form eines Einwellen-Durchlaufmischers.

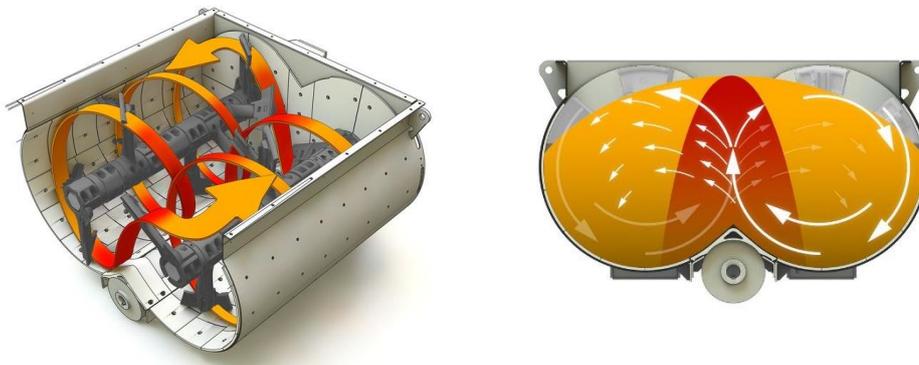
---

<sup>46</sup> Schneider, Ulrich: Schriftreihe des Instituts für Hochbau und Technologie Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz Heft 13. 1. Auflage. Wien: TU – Institut für Hochbau und Technologie 2008. S.19

Abb. 18: Einwellen-Durchlaufmischer<sup>47</sup>

Bei Chargenmischern wird der Mischer mit den Komponenten befüllt und anschließend das Mischgut für die gewünschte Zeit vermischt. Nach Ablauf dieser Zeit wird der Chargenmischer gestoppt, entleert und kann daraufhin wieder befüllt werden. Es fällt somit, anders wie bei den kontinuierlichen Mixern, eine Pause zwischen Entleeren und Befüllen des Mixers an. Um ein Entmischen der Komponenten zu verhindern, ist eine zu lange Mischdauer zu vermeiden.<sup>48</sup>

Abb. 19 zeigt ein Beispiel eines Chargenmischers in Form eines Doppelwellen-Chargenmischers.

Abb. 19: Doppelwellen-Chargenmischer (DKX)<sup>49</sup>

<sup>47</sup> Einwellen-Durchlaufmischer (MFKG). In: URL: <http://www.bhs-sonthofen.de/de/produkte/mischtechnik/einwellen-durchlaufmischer.html> (letzter Zugriff 02.04.2018)

<sup>48</sup> Schneider, Ulrich: Schriftreihe des Instituts für Hochbau und Technologie Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz Heft 13. 1. Auflage. Wien: TU – Institut für Hochbau und Technologie 2008. S.18

<sup>49</sup> Doppelwellen-Chargenmischer (DKX). In: URL: <http://www.bhs-sonthofen.de/de/produkte/mischtechnik/doppelwellen-chargenmischer.html> (letzter Zugriff 02.04.2018)

## Chargenmischer der Firma *Eirich*

In dieser Arbeit wurden für die Herstellung des Trockenprämixes, als auch für die Herstellung des Frischbetons Chargenmischgeräte der Firma *Eirich* verwendet.

### Mischprinzip (Fa. *Eirich*)

„Das spezielle EIRICH-Mischsystem besteht aus nur 3 Komponenten, die besonders flexibel an die Anforderungen der Mischprozesse angepasst werden können.

1. Der drehende Mischbehälter, der das Mischgut in den Bereich der Mischwerkzeuge fördert.
2. Ein oder mehrere exzentrisch angeordnete Mischwerkzeuge, deren Drehrichtung und Geschwindigkeit der jeweiligen Anwendung optimal angepasst werden kann.
3. Der Boden-Wand-Abstreifer, der für eine zusätzliche Umschichtung des Mischgutstromes sorgt, Anbackungen an Behälterwand und -boden verhindert und das Entleeren am Ende der Mischzeit unterstützt.“<sup>50</sup>

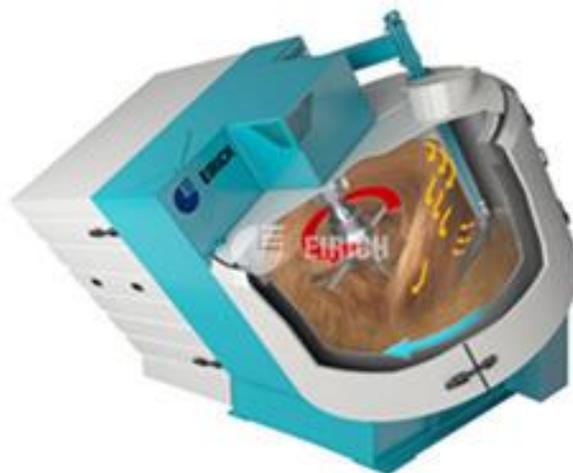


Abb. 20: Mischprinzip<sup>51</sup>

---

<sup>50</sup> Mischprinzip. In: URL: <http://www.eirich.de/de/mischprinzip> (letzter Zugriff 02.04.2018)

<sup>51</sup> Mischprinzip. In: URL: <http://www.eirich.de/de/mischprinzip> (letzter Zugriff 02.04.2018)

### **Mischer chargenweise (Fa. *Eirich*)**

„Bei chargenweise arbeitenden EIRICH-Intensivmischern können im Gegensatz zu allen anderen Mischsystemen Durchsatzleistung und Mischintensität unabhängig voneinander eingestellt werden.

- Das Mischwerkzeug kann variabel, schnell bis langsam laufen
- Der Leistungseintrag in die Mischung kann so gezielt dem Mischgut angepasst werden
- Es werden „hybride“ Mischprozesse möglich, z.B. langsam – schnell – langsam
- Bei hohen Werkzeuggeschwindigkeiten werden z.B.
  - Fasern optimal aufgeschlossen
  - Pigmente vollständig zerrieben, Feinanteile optimal gemischt
  - Suspensionen mit einem hohem Feststoffgehalt hergestellt.

Bei mittleren Werkzeuggeschwindigkeiten werden Mischungen mit hoher Mischgüte erreicht.

Bei niedrigen Werkzeuggeschwindigkeiten werden schonend Leichtzuschläge oder Schäume untergemischt.

Der Mischer mischt ohne Entmischen durch 100 %-ige Materialumwälzung während einer Umdrehung des Mischbehälters. Chargenweise arbeitende EIRICH-Intensivmischer stehen in zwei Baureihen mit Nutzvolumen von 1 bis 12000 l zur Verfügung.<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> Mischer chargenweise. In: URL: <http://www.eirich.de/de/mischer-chargenweise> (letzter Zugriff 02.04.2018)

### **3 Versuchseinrichtung, Versuchsdurchführung und Auswertung**

In diesem Kapitel wird der Versuchsablauf beschrieben. Die Gliederung dieses Kapitels ist dabei auf den Ablauf der Versuche angepasst. Ebenso werden die Versuchseinrichtungen gezeigt. Um einen Überblick zu bekommen wird der Versuchsablauf nun grob beschrieben:

#### Schritt 1: Herstellung der Prämixe

Es wurden insgesamt neun Serien des Trockenprämixes hergestellt, wobei jede Serie eine unterschiedlich lange Mischdauer aufwies. Die Mischdauer reichte dabei von 1,5 Minuten bis 480 Minuten. Ebenso wurde eine beliebige Menge an Flüssigprämix hergestellt, welcher nach Verbrauch wieder neu hergestellt wurde.

#### Schritt 2: Lagerung der Prämixe

Die Trockenprämixe wurden nach dem Mischvorgang in luftdicht verschlossenen Behältern gelagert. Um den Einfluss des Alters eines Prämixes auf die Eigenschaften von Beton zu prüfen, wurden als unterschiedliche Lagerungsdauer 48 Stunden, vier Wochen und neun Wochen gewählt. Man erhielt somit insgesamt drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Lagerungsdauer und jeweils neun verschiedenen Trockenmischdauern.

#### Schritt 3: Frischbetonherstellung und Prüfung

Nach Ablauf der jeweiligen Lagerungsdauer einer Versuchsreihe erfolgte die Herstellung des Frischbetons, an welchem folgend die Frischbetoneigenschaften geprüft wurden. Nach Prüfung der Frischbetoneigenschaften jeder Versuchsreihe war es somit möglich zu beurteilen, ob das Alter des Prämixes die Frischbetoneigenschaften beeinflusst.

#### Schritt 4: Prüfung der Festbetoneigenschaften

Anschließend wurde der Frischbeton für 24 Stunden in Schalungen gegeben und die Festbetoneigenschaften nach 24 Stunden, sieben Tagen und 28 Tagen geprüft. Auch hier galt es herauszufinden, ob sich das Alter eines Prämixes auf die Festigkeitseigenschaften auswirkt.

### 3.1 Herstellung der Prämixe

#### 3.1.1 Vorversuche

Für die Herstellung des Trockenprämixes wurden die Trockenbestandteile des Betons, bestehend aus Quarzsand, Quarzmehl, Mikrosilika und Zement, im entsprechenden Mengenverhältnis vermischt. Ebenfalls wurde aus den flüssigen Bestandteilen Wasser, Fließmittel, Konsistenzhalter und Entlüfter ein Flüssigprämix hergestellt. Somit mussten zur Herstellung des Frischbetons die beiden Prämixe nur noch vermischt werden. Dies führt dazu, dass mögliche Messfehler minimiert werden. Im Zuge der ersten Versuche wurde festgestellt, dass der zu Beginn angenommene Fließmittelgehalt noch etwas zu gering war, da der Frischbeton nicht die gewünschte Konsistenz aufwies. Somit wurde der Anteil des Fließmittels von 4,5% auf 5%, bezogen auf den Zementgehalt, erhöht. Der zuerst verwendete Mischentwurf ist in Tabelle 3 dargestellt (bezogen auf einen Kubikmeter Beton).

Tabelle 3: Bestandteile

<b>Mischung</b>			
	Volumen der Mischung	1	m <sup>3</sup>
<b>Bestandteile</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>
<b>Wasser</b>	Wasser	160,27	kg
<b>Fließmittel (4,5%)</b>	ACE 430	31,01	kg
<b>Konsistenzhalter</b>	Sky 911	13,78	Kg
<b>Entlüfter</b>	DCC-Entlüfter	1	kg
<b>Zement</b>	CEM I 52,5 N C3A-frei	689,11	kg
<b>Zusatzstoff Mikrosilika (reaktiv)</b>	Elkem 940 U	172,28	kg
<b>Zusatzstoff Quarzmehl (inert)</b>	QM 10000	344,56	kg
<b>Quarzsand</b>	QS 0,1-0,5	927,0	kg

### 3.1.2 Herstellung Trockenprämix

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob das Alter des Prämixes und auch die Trockenmischdauer des Prämixes einen Einfluss auf die Eigenschaften des Betons haben. Um dies untersuchen zu können, wurden Prämixe hergestellt, welche unterschiedlich lange gemischt und anschließend unterschiedlich lange gelagert wurden. Exemplarisch sind in Abb. 21 die Bestandteile einer Mischung (Serie) mit einem Volumen von 40 dm<sup>3</sup> dargestellt. Diese (ausgenommen der Flüssigprämix) wurden genau abgewogen und daraufhin in einen Intensivmischer R08W der Fa. *Eirich* gegeben.



Abb. 21: Bestandteile Trockenprämix und Behälter mit Flüssigprämix

#### 3.1.2.1 Intensivmischer R08W der Fa. *Eirich*

Für die Herstellung der Trockenprämixe wurde der Intensivmischer R08W der Fa. *Eirich* verwendet (Abb. 22), dessen Mischprinzip bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wurde. Es handelt sich dabei um einen Chargenmischer mit einem Mischbehälterfassungsvermögen von 75 Litern. Der Intensivmischer kann über ein am Steuerschrank angebrachtes Touch-Screen bedient werden. Die Drehrichtung von Mischbehälter und Wirbler zueinander kann auf zwei Arten erfolgen. Bei der

„Gleichstrommischung“ erfolgt die Drehbewegung des Mischbehälters und des Wirblers in die gleiche Richtung, während bei der „Querstrommischung“ die Drehbewegung von Mischbehälter und Wirbler gegengleich erfolgt. Es sind Drehzahlen im Bereich von 38 bis 752 U/min möglich.

Für die Versuchsdurchführung in dieser Arbeit wurde im Gleichstrom gemischt, wobei die Drehzahl des Wirblers 428 U/min betrug und die Drehzahl des Mischbehälters 27 U/min.



Abb. 22: Intensivmischer R08W der Fa. *Eirich*

### 3.1.2.2 Mischvorgang

Wie bereits erwähnt, wurden zur Herstellung des Trockenprämixes die jeweiligen Bestandteile in den Intensivmischer gegeben und unterschiedlich lange vermischt. Insgesamt wurden neun Serien hergestellt, wobei die kürzeste Mischdauer 1,5 min betrug und die längste Mischdauer 480 min. Da bei immer länger werdender Mischdauer auch die Temperatur im Mischbehälter konstant höher wird, wurden die zwei längsten Mischungen in zwei Abschnitten gemischt. Damit sich der im Mischbehälter befindliche Prämix ausreichend abkühlt, wurde der Mischvorgang für 120 min gestoppt. Pro Serie wurden jeweils 40 Liter Trockenprämix hergestellt. Von diesen 40 Litern wurde dann, nach Ablauf der jeweiligen Lagerungsdauer, ein Teil zur Herstellung des Frischbetons verwendet. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Trockenmischdauer und der Anzahl der Mischabschnitte je Serie.

Tabelle 4: Überblick Mischvorgänge

Trockenprämixe			
Serie	Bezeichnung	Trockenmischdauer [min]	Mischabschnitte
1	M1,5M EI	1,5	1
2	M3M EI	3	1
3	M7M EI	7	1
4	M15M EI	15	1
5	M30M EI	30	1
6	M60M EI	60	1
7	M120M EI	120	1
8	M240M EI	240	2 (je 120min)
9	M480M EI	480	2 (je 240min)

### 3.2 Lagerung der Prämixe

Die nun hergestellten Prämixe wurden nach Ablauf des Mischvorgangs in luftdicht verschlossene Behälter gegeben und beschriftet. Als jeweilige Lagerungsdauer wurden 48 Stunden, vier Wochen und neun Wochen (Abb. 23) bei konstanter Raumtemperatur gewählt (Tabelle 5).

Nach **48 Stunden (erste Versuchsreihe)** wurde die gewünschte Menge jeder Serie aus dem Behälter genommen und zur Herstellung des Frischbetons herangezogen.

Nach **vier Wochen (zweite Versuchsreihe)** wurde wieder die gewünschte Menge jeder Serie aus dem Behälter entnommen und zur Frischbetonherstellung herangezogen.

Nach Ablauf der **neun Wochen (dritte Versuchsreihe)** wurde der Vorgang schließlich zum letzten Mal wiederholt.

Bei allen drei Versuchsreihen wurden nach Herstellung des Frischbetons dieselben Frischbetonprüfungen durchgeführt.

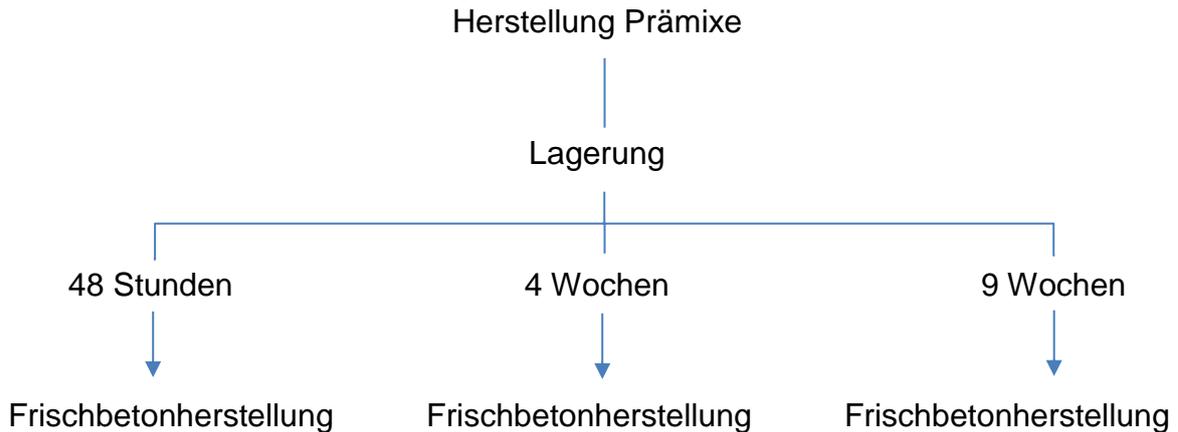


Abb. 23: Lagerungsdauer der Prämixe bis zur Frischbetonherstellung

Tabelle 5: Lagerungsdauer der Prämixe

Lagerungsdauer der Prämixe			
Serie	Bezeichnung	Trockenmischdauer [min]	Frischbetonherstellung und Prüfung nach:
1	M1,5M EI	1,5	48h, 4 und 9 Wochen
2	M3M EI	3	48h, 4 und 9 Wochen
3	M7M EI	7	48h, 4 und 9 Wochen
4	M15M EI	15	48h, 4 und 9 Wochen
5	M30M EI	30	48h, 4 und 9 Wochen
6	M60M EI	60	48h, 4 und 9 Wochen
7	M120M EI	120	48h, 4 und 9 Wochen
8	M240M EI	240	48h, 4 und 9 Wochen
9	M480M EI	480	48h, 4 und 9 Wochen

### 3.3 Herstellung des Frischbetons

Nach Ablauf der jeweiligen Lagerungsdauer (48h, 4 Wochen und 9 Wochen) wurde der Frischbeton hergestellt. Hierfür wurde wieder ein Mischgerät der Firma *Erich* verwendet, welches folgend kurz erklärt wird. Anschließend wird der Mischablauf beschrieben und zum Schluss werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen dargestellt.

### 3.3.1 Intensivmischer R02 Vac

Für die Herstellung des Frischbetons wurde für alle Serien der Intensivmischer R02 Vac der Firma *Erich* verwendet (Abb. 24). Das Mischprinzip dieses Mixers ist dasselbe, wie jenes des bereits beschriebenen Intensivmischers R08W und wurde in Kapitel 2.3 beschrieben. Der Intensivmischer R02 wird rein für Forschungszwecke eingesetzt. Dieser Mixer ist mit einer Vakuumpumpe ausgestattet, welche bei Bedarf angeschlossen werden kann. Diese wurde im Zuge der Versuche nicht verwendet und wird deshalb nicht genauer beschrieben. Der abnehmbare Mischbehälter hat eine glatte Oberfläche und besitzt ein Fassungsvermögen von fünf Litern.



Abb. 24: Intensivmischer R02 Vac (links) und Stiftenwirbler<sup>53</sup> (rechts)

Anders als beim Intensivmischer R08W müssen alle gewünschten Einstellungen manuell getätigt werden. Auch hier ist wieder ein Mischen im „Gleichstrom“ oder im „Querstrom“ möglich. Bei dem Mischwerkzeug kann eine Drehzahl zwischen 70 und 4535 U/min eingestellt werden. Die Drehzahl des Mischbehälters kann auf zwei Stufen erfolgen, wobei die Drehzahl auf Stufe 1 42 U/min und die Drehzahl auf Stufe 2 83 U/min beträgt.

<sup>53</sup> Kirnbauer, Johannes: Der Vakuummischprozess zu Herstellung von Ultra High Performance Concrete. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2013. S.72.

Im Zuge dieser Arbeit wurde als Mischwerkzeug ein Stiftenwirbler (Abb. 24) mit einem Grundplattendurchmesser von 12,5 cm verwendet. Auf dieser Grundplatte sind sechs kegelförmige Stifte angebracht. Als Drehzahl des Stiftenwirblers wurden 1200 U/min gewählt und als Drehzahl des Mischbehälters 42 U/min (Stufe 1). Stiftenwirbler und Mischbehälter bewegen sich dabei im Gleichstrom.

### 3.3.2 Mischablauf

Für die Herstellung des Frischbetons wurde die in Tabelle 6 dargestellte Mischung verwendet.

Tabelle 6: Mischung

Mischung			
	Volumen der Mischung	3,2	dm <sup>3</sup>
Bestandteile	Bezeichnung	Menge	Einheit
Wasser	Wasser	512,9	g
Fließmittel (4,5%)	ACE 430	110,2	g
Konsistenzhalter	Sky 911	44,1	g
Entlüfter	DCC-Entlüfter	3,2	g
Zement	CEM I 52,5 N C3A-frei	2205,2	g
Zusatzstoff Mikrosilika (reaktiv)	Elkem 940 U	551,3	g
Zusatzstoff Quarzmehl (inert)	QM 10000	1102,6	g
Quarzsand	QS 0,1-0,5	2968,0	g



Flüssigprämix



Trockenprämix

Zählt man die Trockenbestandteile dieser Mischung zusammen, so erhält man 6827 g (gerundet 6830 g). Zählt man die Flüssigkeitsbestandteile zusammen, erhält man 670,4 g (gerundet 671 g). Es wurde aufgerundet, da davon ausgegangen wurde, dass beim Befüllen des Mischbehälters immer einige Rückstände in den Behältern, welche zum Einwiegen verwendet wurden, zurückblieben. Zur Herstellung des Frischbetons wurden also 6830 g der jeweiligen Serie des Trockenprämixes mit 671 g des Flüssigprämixes vermischt. Dabei wurde zuerst der Trockenprämix in den Mischbehälter gefüllt, welcher anschließend in die

Mischmaschine gegeben wurde. Der Trockenprämix wurde für 30 Sekunden aufgemischt. Nach Ablauf dieser 30 Sekunden erfolgte die Zugabe des Flüssigprämixes. Der Flüssigprämix wurde dabei mit konstanter Einflussgeschwindigkeit mit einer Dauer von 30 Sekunden beigegeben. Die nun fertige Mischung wurde folgend noch für weitere 120 Sekunden vermischt. Man erhielt somit eine gesamte Mischdauer von 180 Sekunden. Diese Vorgehensweise war bei allen drei Versuchsreihen dieselbe. In folgender Tabelle 7 wird der Mischablauf dargestellt.

Tabelle 7: Ablauf Herstellung Frischbeton je Versuchsreihe

<b>Herstellung Frischbeton</b>					
<b>Serie</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Trockenmischdauer des Prämixes [sek]</b>	<b>Zugabe Flüssigkeitsprämix [sek]</b>	<b>Nassmischen [sek]</b>	<b>Mischdauer Gesamt [sek]</b>
<b>1</b>	M1,5M EI	30	30	120	180
<b>2</b>	M3M EI	30	30	120	180
<b>3</b>	M7M EI	30	30	120	180
<b>4</b>	M15M EI	30	30	120	180
<b>5</b>	M30M EI	30	30	120	180
<b>6</b>	M60M EI	30	30	120	180
<b>7</b>	M120M EI	30	30	120	180
<b>8</b>	M240M EI	30	30	120	180
<b>9</b>	M480M EI	30	30	120	180

### **3.4 Prüfung der Frischbetoneigenschaften**

In diesem Kapitel wird nun näher auf die Durchführung der Frischbetonprüfungen und dessen Ergebnisse eingegangen (Abb. 25). Geprüft wurden:

- Ausbreitmaß mithilfe Setztrichter
- Trichterauslaufzeit mithilfe V-Trichter
- Luftgehalt mithilfe Luftporentopf
- Frischbetonrohddichte
- Partikelgrößenverteilung mithilfe Laserbeugungs-Partikelgrößenmessgerät

- Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie mithilfe Rheometer
- Hydratationswärmeverlauf.

In dieser Arbeit wird genauer auf die Partikelgrößenverteilung und den Hydratationswärmeverlauf eingegangen. Die Ergebnisse der restlichen Frischbetonprüfungen können in der Diplomarbeit „Untersuchung der rheologischen Eigenschaften von UHPC-Prämix“ von *Maximilian Mayerhofer* nachgelesen werden.

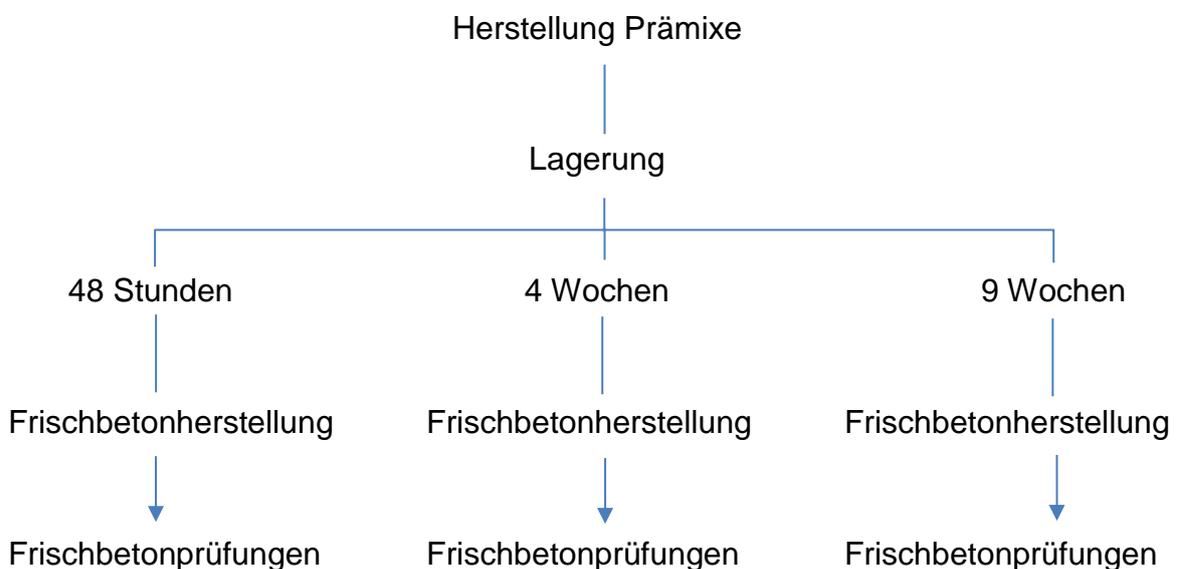


Abb. 25: Versuchsablauf bis zur Frischbetonprüfung

### 3.4.1 Versuchsablauf

Um zu vermeiden, dass der Hydratationsprozess die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen verfälscht, war es wichtig, die Prüfungen möglichst rasch durchzuführen. Nach Ablauf der jeweiligen Mischdauer wurde der Frischbeton zur Prüfung der Frischbetoneigenschaften herangezogen. Dafür wurden an einem Versuchstisch sämtliche Einrichtungen, welche zur Prüfung notwendig waren, vorbereitet. Ein Teil des jungen Betons wurde zur Ermittlung des Ausbreitmaßes zuerst in den Setztrichter gefüllt, einen weiteren Teil wurde in den V-Trichter zur Ermittlung der Trichterauslaufzeit gefüllt und wieder ein weiterer Teil wurde verwendet, um den Luftporentopf zu befüllen und Luftgehalt sowie Frischbetonrohichte zu bestimmen. Während dieser Messungen erfolgten

gleichzeitig die Prüfungen am Rheometer und am Laserbeugungs-Partikelgrößemessgerät.

### 3.4.2 Partikelgrößenverteilung

Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung wurde der Mastersizer 3000 der Firma *Malvern Panalytical* verwendet. Es handelt sich dabei um ein Laserbeugungs-Partikelmessgerät mit welchen Messungen von 0,01 bis 3500  $\mu\text{m}$  möglich sind. Die Funktionsweise dieses Geräts wurde bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

Der Mastersizer 3000 (Abb. 26) besteht aus einer optischen Bank, in welcher die Laserquellen sowie Detektoren untergebracht sind. Durch den Austausch von am Gerät angebrachten Modulen können Prüfungen an Trocken- sowie Nassproben durchgeführt werden. Die Einstellungen für die Messung der Probe erfolgen in einer eigens entwickelten Software. Bei der Messung mithilfe eines Nassmoduls wird die Probe in das Modul gegeben. Darauffolgend wird diese über einen Zulauf in die Messzelle befördert und über einen Ablauf wieder zurück in das Modul.

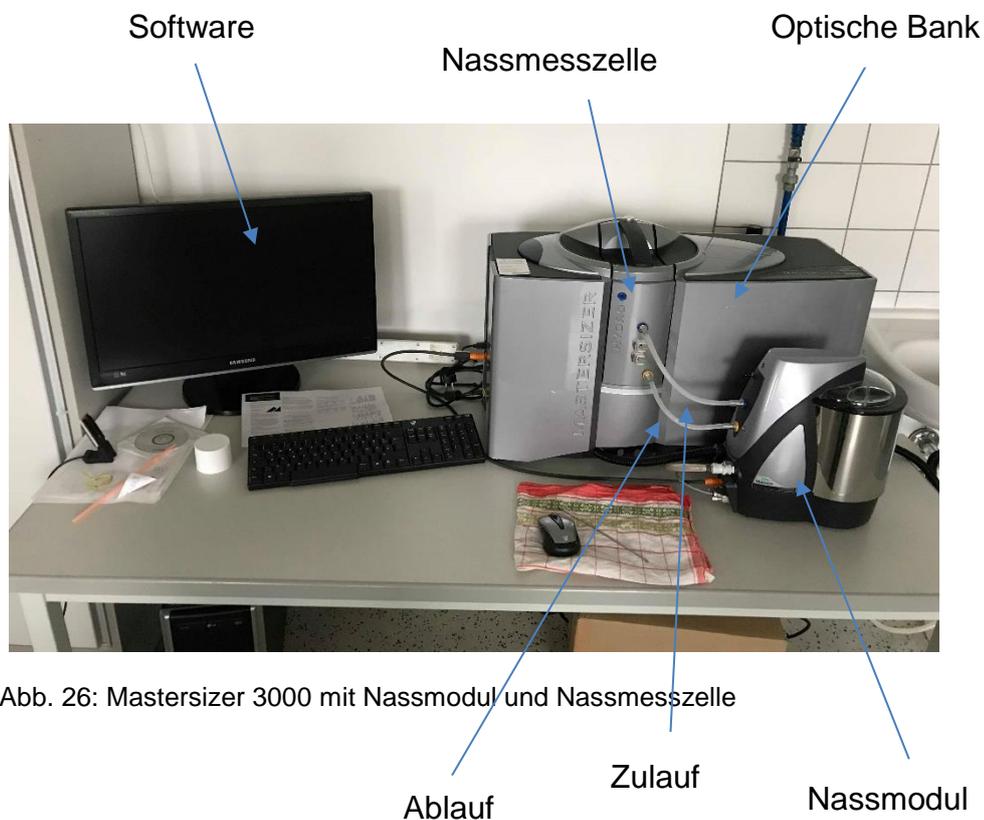


Abb. 26: Mastersizer 3000 mit Nassmodul und Nassmesszelle

Die Ergebnisse können bereits während der Durchführung der Messungen am Computer abgelesen werden. Die Anzahl der Messungen an einer Probe kann zu Beginn eingestellt werden. Im Zuge dieser Arbeit wurden an jeder Probe fünf Messungen durchgeführt. Nach Beendigung der Messungen wird das Gerät automatisch gereinigt.

### **Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung**

Es wird nun anhand der Mischung „M15M“ der ersten Versuchsreihe beispielhaft die Vorgehensweise im Zuge der Auswertung beschrieben. Wie schon erwähnt, wurden an jeder Probe fünf Messungen durchgeführt. Nach Ablauf dieser Messungen wurden die Ergebnisse aller Mischungen der Versuchsreihen von der Software des Mastersizers 3000 in eine Excel-Tabelle exportiert. Aus diesen fünf Messungen wurde der Mittelwert gebildet und der entsprechende Verlauf dargestellt. Folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt der exportierten Daten in die Excel-Tabelle. Die linke Spalte in Abb. 27 zeigt die gemessenen Partikelgrößen in Mikrometer. Dabei wurden Partikelgrößen im Bereich von 0,01  $\mu\text{m}$  bis 3500  $\mu\text{m}$  gemessen. Die ersten fünf Spalten rechts davon (M15M 01 bis M15M 05) zeigen die fünf Messungen, welche je Probe durchgeführt wurden, und geben den Volumenanteil der Partikelgrößen in Prozent an. In der Spalte ganz rechts wurde aus diesen fünf Messungen der Mittelwert gebildet.

Die Verläufe der Partikelgrößenverteilung wurden in Form von Liniendiagrammen dargestellt. Auf der logarithmisch skalierten x-Achse ist dabei die Partikelgröße in Mikrometer dargestellt und auf der y-Achse der Volumenanteil in Prozent.

Partikelgröße (x-Achse)

Fünf Messungen (y-Achse)



<b>M15M 1. Versuchsreihe</b>		Mittelwert der fünf Messungen (y-Achse)					
Partikelgröße/Probenname	M15M 01	M15M 02	M15M 03	M15M 04	M15M 05	Mittelwert M15M	
	0,01	0,086412211	0,069354821	0,063120779	4,50E-05	4,24E-05	0,043795044
	0,011361631	0,169434921	0,135903984	0,123623635	0,11545078	0,108726608	0,130627985
	0,012908666	0,246238331	0,19731641	0,179311504	0,167417104	0,15755783	0,189568236
	0,01466635	0,314429946	0,251637246	0,228405453	0,213088719	0,20035177	0,241582627
	0,016663366	0,372166206	0,297377186	0,269498904	0,251178127	0,235882811	0,285220647
	0,018932301	0,418077636	0,333452161	0,301619019	0,280777272	0,263294037	0,319444025
	0,021510182	0,451299834	0,359207784	0,324178227	0,301346855	0,28208714	0,343623968
	0,024439075	0,471455189	0,374404152	0,336990305	0,312733219	0,292138062	0,357544185
	0,027766775	0,478650676	0,379213318	0,340257125	0,315154979	0,293684129	0,361392045
	0,031547585	0,473466806	0,374209388	0,334562556	0,309197186	0,28731814	0,355750815
	0,035843202	0,456944904	0,360356876	0,320859973	0,295799064	0,273976263	0,341587416
	0,040723724	0,430568621	0,338993872	0,300456202	0,276238313	0,254922476	0,320235897
	0,046268792	0,396238545	0,31180892	0,274988868	0,252108944	0,231726615	0,293374378
	0,052568895	0,356237022	0,280808987	0,2463952	0,22529076	0,206234155	0,262993225
	0,059726838	0,313179751	0,248275418	0,216869085	0,197907348	0,180524608	0,231351242
	0,06785943	0,269949687	0,216703796	0,188802456	0,172268748	0,156854767	0,200915891
	0,07709938	0,229607799	0,188722807	0,164706214	0,15079411	0,137582134	0,174282613
	0,087597471	0,195274669	0,166986642	0,147105366	0,135909154	0,125063429	0,154067852
	0,099525014	0,169977285	0,154035898	0,138403497	0,129913654	0,121523453	0,142770757
	0,113076649	0,156458185	0,152124466	0,140714124	0,134816578	0,128891997	0,14260107
	0,128473516	0,156950947	0,163016258	0,15566275	0,152142668	0,148612584	0,155277041
	0,145966868	0,172939352	0,187767805	0,184175292	0,182725821	0,181438339	0,181809322
	0,165842169	0,204937247	0,226530829	0,226286284	0,226522052	0,227247556	0,222304793
	0,188423753	0,252344887	0,278426196	0,281017137	0,282491366	0,284927976	0,275841512
	0,214080116	0,313431563	0,341535501	0,346369847	0,348593122	0,352374188	0,340460844
	0,243229928	0,385425099	0,41299417	0,419420699	0,421880139	0,426583882	0,413260798
	0,276348869	0,464556917	0,489050587	0,496382145	0,498563024	0,503726201	0,490455775

Abb. 27: Ausschnitt aus Excel-Tabelle

In Abb. 28 sind die fünf Messergebnisse der Mischung „M15M“ dargestellt. Der Mittelwert dieser Ergebnisse ist in Abb. 29 dargestellt. Der Verlauf der Partikelgrößenverteilung ist dabei bei allen Mischungen nahezu ident. Dies muss auch so sein, da diese Verläufe den Anteil der Trockenkomponenten (Mikrosilika, Quarzmehl, Zement und Quarzsand) im Frischbeton zeigen. Diese Komponenten haben eine unterschiedliche Partikelgröße und besitzen deshalb in Abhängigkeit des Mischverhältnisses einen entsprechenden Anteil am Gesamtvolumen.

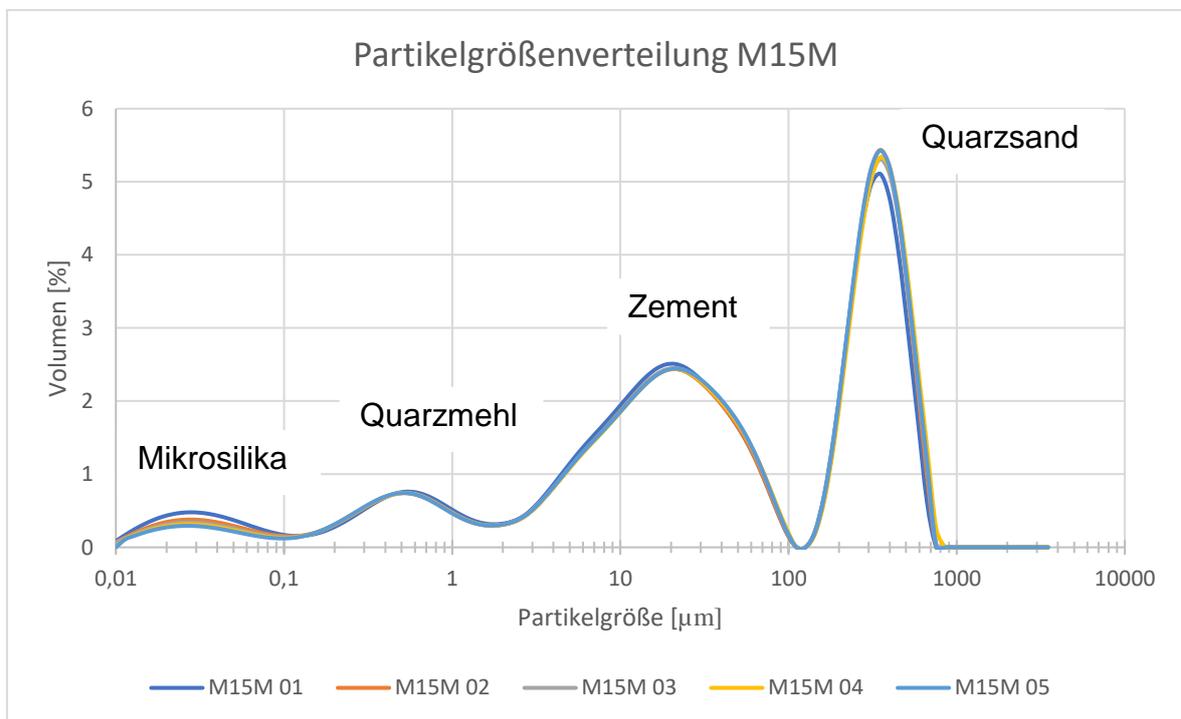


Abb. 28: Partikelgrößenverteilung M15M

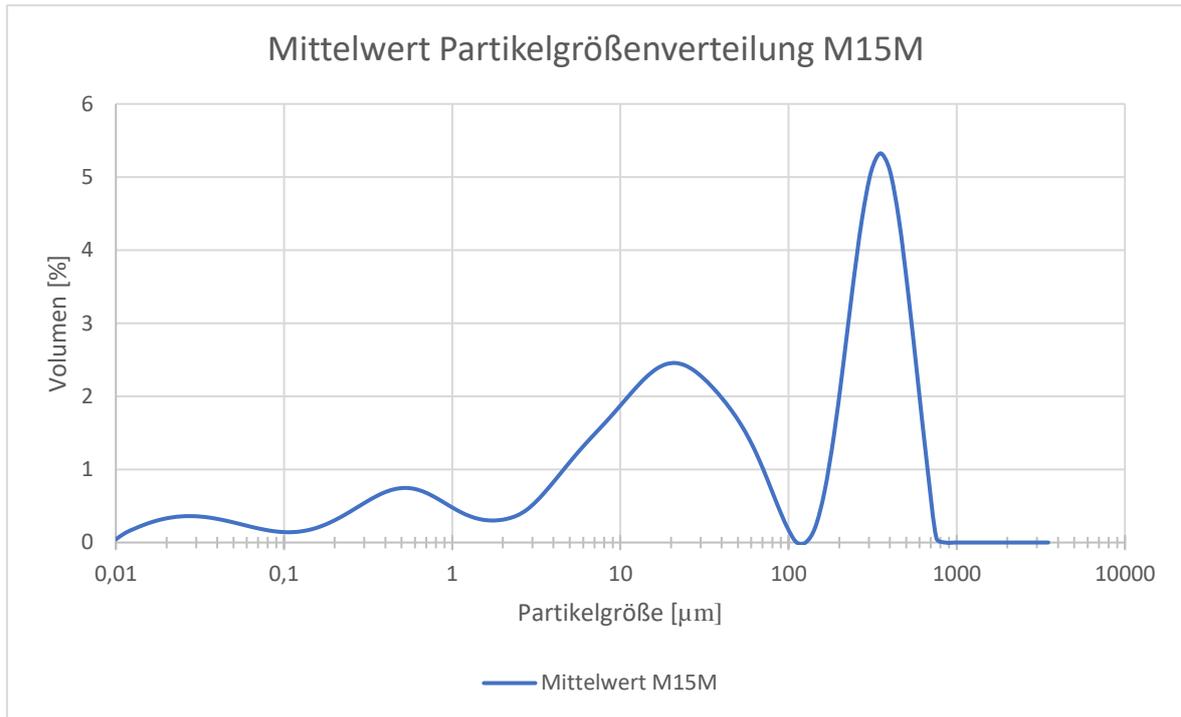


Abb. 29: Mittelwert Partikelgrößenverteilung M15M

Die eben beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung des mittleren Partikelgrößenverlaufs wurde bei jeder Mischung der drei Versuchsreihen gleich durchgeführt. Um herauszufinden, ob die Mischdauer des Prämixes einen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung hat, wurden die mittleren Partikelgrößenverläufe der Versuchsreihen in den folgenden Diagrammen (Abb. 30 - Abb. 32) miteinander verglichen. Die drei Versuchsreihen wurden dabei getrennt betrachtet. Der Vergleich erfolgte wieder mithilfe von Liniendiagrammen. Jedes Diagramm enthält dabei die Verläufe der neun Mischdauern je Versuchsreihe. Man möchte damit herausfinden, ob mit zunehmender Mischdauer die Agglomerat-Bildung zunimmt. Ist dies der Fall, so müsste bei den längeren Mischdauern der Anteil an größeren Partikeln in den Diagrammen steigen und jener der kleineren Partikeln sinken.

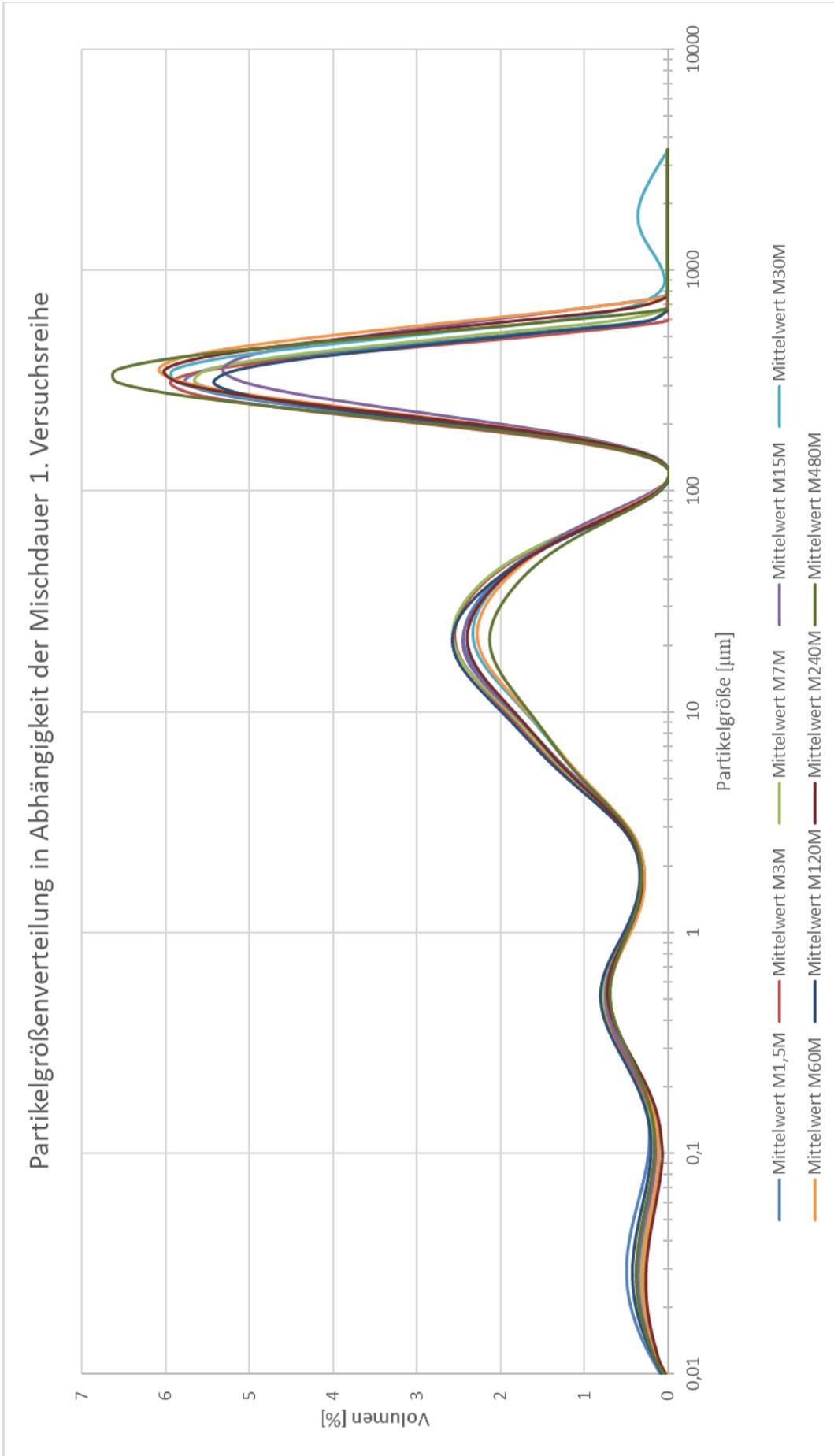


Abb. 30: Partikelgrößenverteilungen der ersten Versuchsreihe

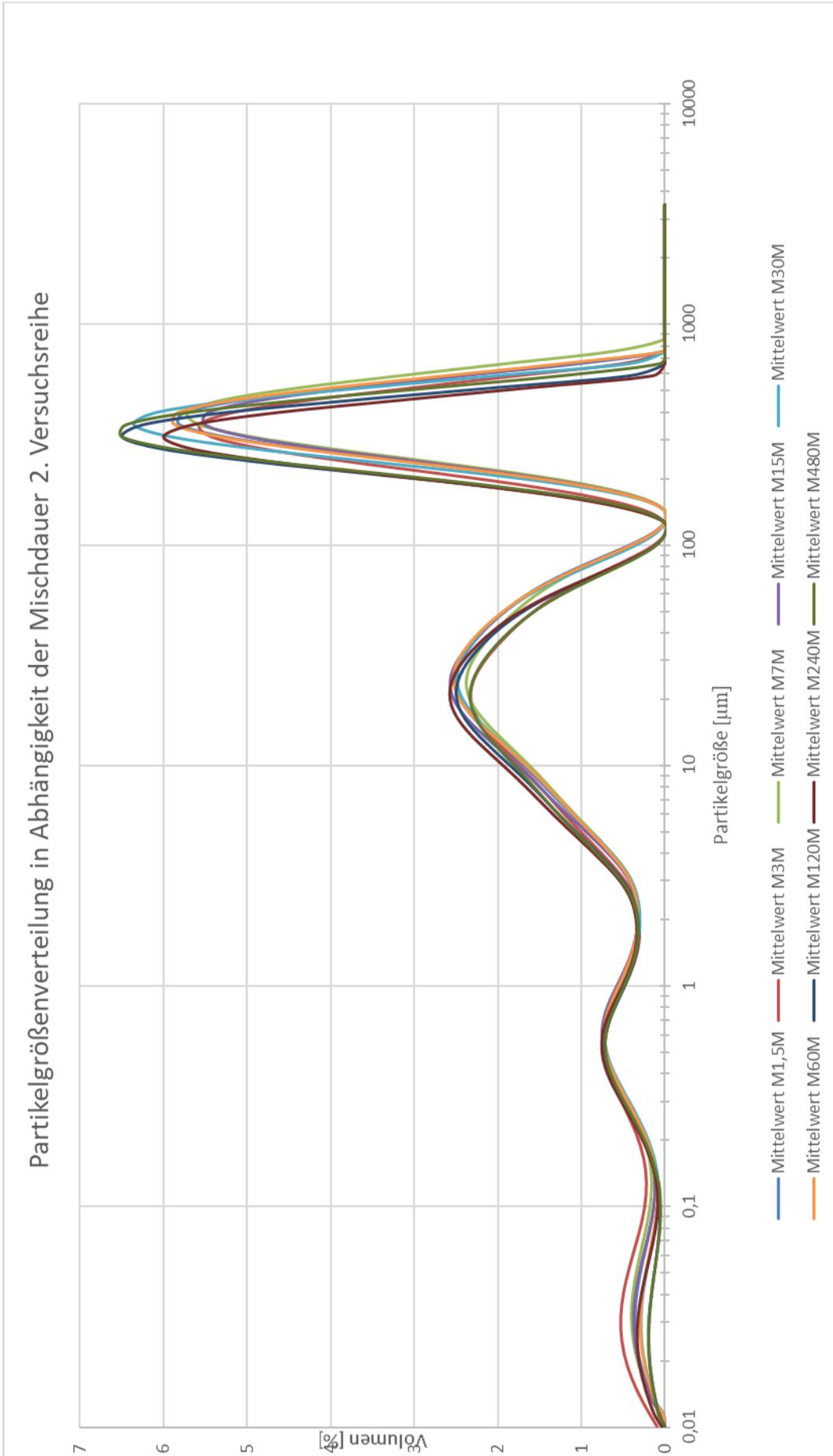


Abb. 31: Partikelgrößenverteilungen der zweiten Versuchsreihe

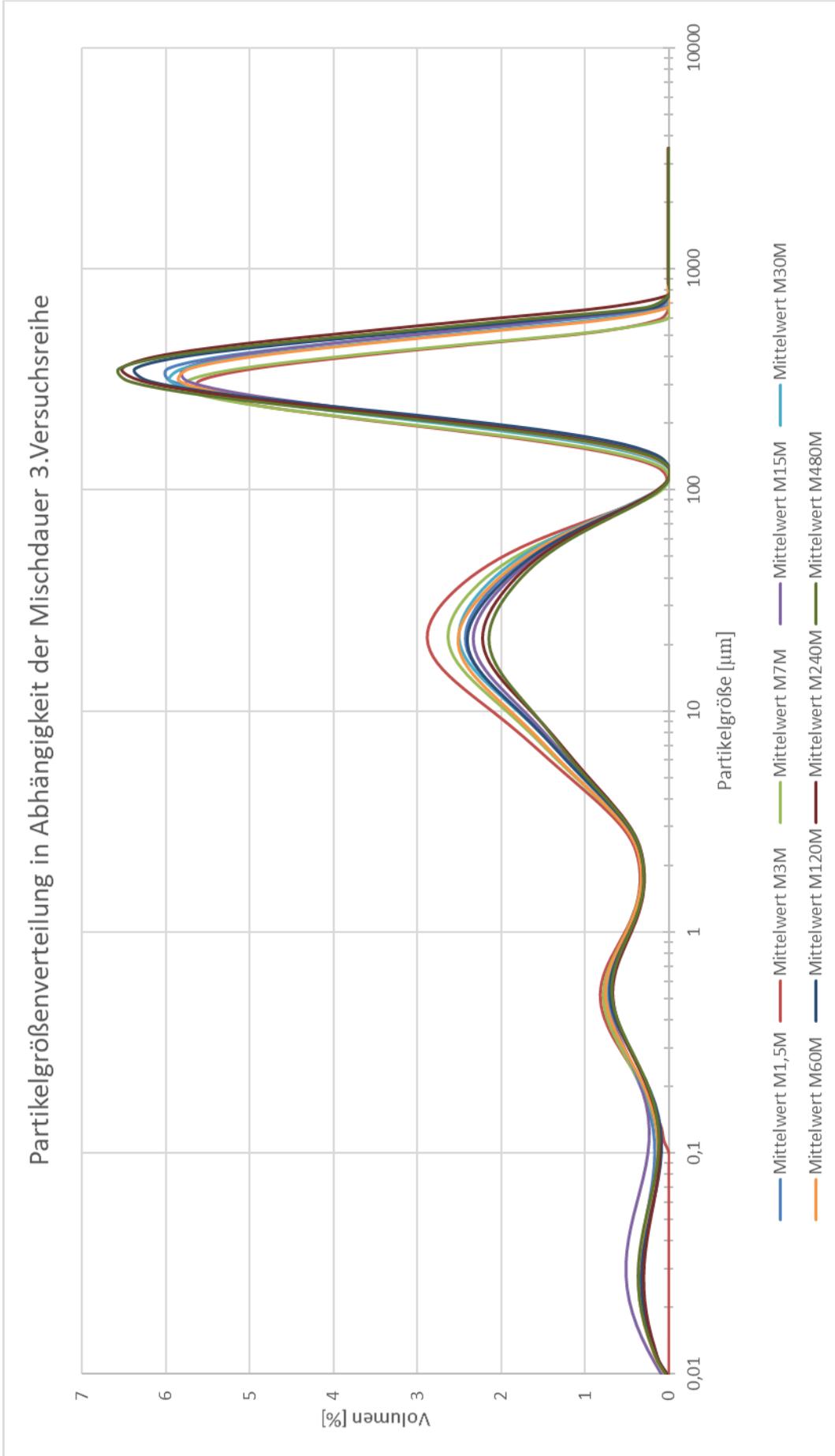


Abb. 32: Partikelgrößenverteilungen der dritten Versuchsreihe

Betrachtet man die Diagramme in Abb. 30 - Abb. 32, ist ersichtlich, dass der Anteil an größeren Partikeln (ca. 300  $\mu\text{m}$ ) mit zunehmender Mischdauer ansteigt und der Anteil an kleineren Partikeln abnimmt. Bei der ersten Versuchsreihe ist die Mischung „M480M“ jene mit dem größten Anteil an größeren Partikeln. Die Mischungen „M120M“, „M240M“ und „M480M“ weisen bei der zweiten und dritten Versuchsreihe den höchsten Anteil an größeren Partikeln auf. Eine Ausnahme bildet die Mischung „M30M“ der zweiten Versuchsreihe. Betrachtet man nun die kleineren Partikelgrößen, so kann beobachtet werden, dass jene Mischungen, welche den größten Anteil an größeren Partikeln aufweisen, einen geringen Anteil an kleineren Partikeln haben. Am besten ersichtlich ist dies bei der Mischung „M480M“ der ersten Versuchsreihe. Diese weist, wie schon erwähnt, den größten Anteil an Partikeln mit einer Größe von in etwa 300 Mikrometer auf, hat jedoch den geringsten Anteil an Partikeln mit einer Größe von ca. 25 Mikrometern. Gleiches ist auch bei der zweiten und dritten Versuchsreihe ersichtlich. Somit kann gesagt werden, dass mit längerer Mischdauer die Agglomerat-Bildung zunimmt.

### **Packungsdichte**

Wie in den Grundlagen bereits erwähnt, kann ausgehend von der Partikelgrößenverteilung die Packungsdichte berechnet werden. Hierfür wurde eine Microsoft Office Excel-Datei verwendet, welche im Rahmen der Diplomarbeit „Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra – Hochleistungsbeton“ von *Albert Stangl* erstellt wurde, verwendet.

Es gibt unterschiedliche Modelle zur Berechnung der Packungsdichte von Beton. Für Normalbeton mit Korngrößen  $> 0,125$  mm kann auf die Untersuchungen von *Fuller, Andreasen* und *Thompson* zurückgegriffen werden. Hier wurde vereinfacht angenommen, dass die Körner aus zweidimensionalen Kreisscheiben bestehen.

Dies vereinfacht den Rechenaufwand und es kann ausgehend von der Sieblinie der Hohlraumgehalt der Schüttung berechnet werden.<sup>54</sup>

Da bei Hochleistungsbeton jedoch Partikel mit einer Korngröße  $< 0,125$  mm zur Anwendung kommen, ist diese Methode nicht geeignet. Für Hochleistungsbeton ist das Berechnungsmodell von *Schwanda*, auf welchem die erstellte Microsoft Office Excel-Datei von *Stangl* basiert, besser geeignet. Hier werden die Kornform, die Granulometrie der Feinstoffe sowie die Agglomerationsbildung der feinen Stoffe berücksichtigt. Mit diesem Modell kann die Packungsdichte von beliebigen Kornverteilungen berechnet werden.<sup>55</sup>

Zur Berechnung werden neben der Partikelgrößenverteilung die beiden Parameter  $k$  und  $w$  benötigt. Der Parameter  $k$  berücksichtigt dabei die Kornform und Oberflächenrauigkeit der Partikel und mit dem Parameter  $w$  wird die Reichweite der Teilchenbehinderung beschrieben. Unter Anlehnung der Erkenntnisse von *Reschke* wurde im Zuge der Berechnungen in dieser Arbeit für  $w = 2$  und für  $k = 0,70$  verwendet. *Reschke* verwendete das Verfahren von *Schwanda*, um den Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton zu untersuchen.<sup>56</sup>

Die zuvor berechneten mittleren Partikelgrößenverteilungen wurden in die Excel-Datei eingefügt, welche die Packungsdichte der einzelnen Mischungen berechnete. Folgend wurden die Verläufe der Packungsdichten mithilfe eines Liniendiagramms (Abb. 33) dargestellt. Das Diagramm beinhaltet die Verläufe aller drei Versuchsreihen. Somit können Erkenntnisse über den Verlauf der Packungsdichte, in Abhängigkeit der Mischdauer, gewonnen werden. Ebenso ist es möglich, eventuelle Unterschiede der Packungsdichte in Bezug auf das Alter des Prämixes

---

<sup>54</sup> Stangl, Albert: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2011. S.39

<sup>55</sup> Stangl, Albert: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2011. S.48f

<sup>56</sup> Stangl, Albert: Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2011. S.86f

zu erkennen. Auf der x-Achse wird dabei die Mischdauer in Minuten aufgetragen und auf der y-Achse die Packungsdichte in Prozent. Die angegebenen Prozentwerte geben den Feststoffanteil der Mischungen an.

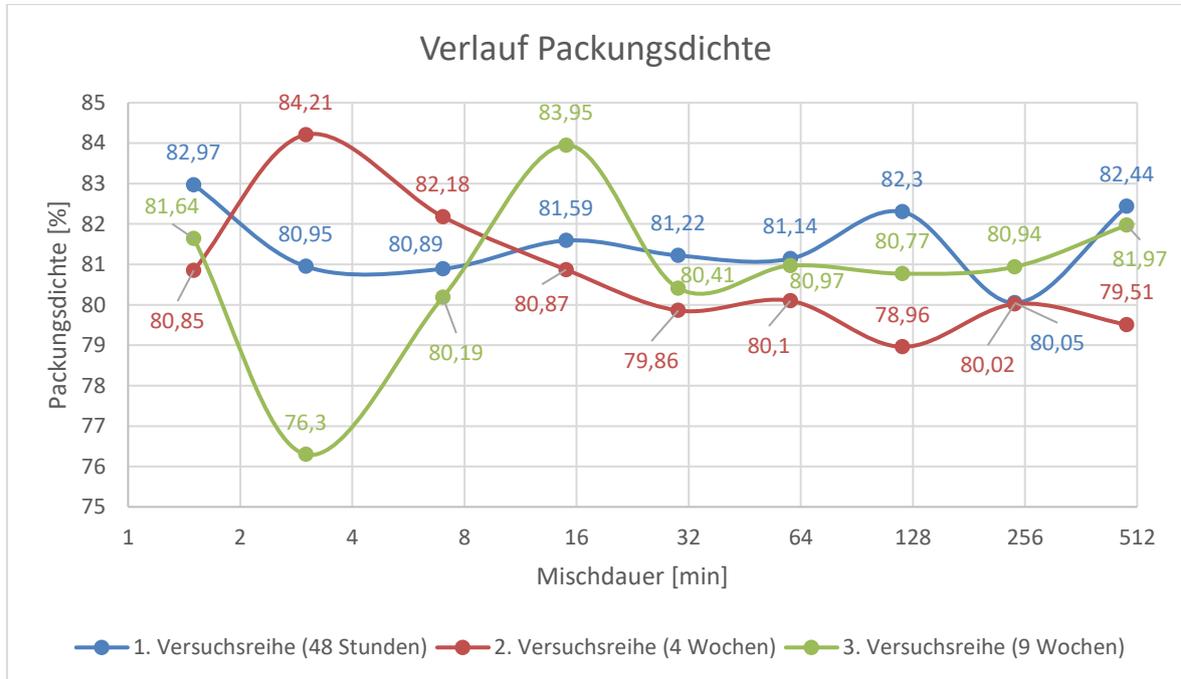


Abb. 33: Verlauf Packungsdichte

Betrachtet man das Diagramm in Abb. 33, so kann, unter Ausnahme der Mischung „M3M“ der dritten Versuchsreihe, behauptet werden, dass die Differenzen in den Verläufen auf den ersten Blick nicht allzu groß sind. Zwischen der Mischung „M15M“ und „M30M“ der zweiten Versuchsreihe ist es ca. ein Prozent. Bezogen auf einen Kubikmeter Beton entspricht ein Prozent jedoch zehn Liter Hohlraum. Zum Beispiel hat man bei der Mischung „M15M“ der zweiten Versuchsreihe einen Hohlraumgehalt von 19,13%, also 191,3 Liter (bezogen auf einen Kubikmeter) und bei der Mischung „M30M“ einen Hohlraumgehalt von 201,4 Litern (bezogen auf einen Kubikmeter). Bereits eine so kleine Differenz hat große Auswirkungen auf die Frischbeton- sowie Festbetoneigenschaften.

Betrachtet man die Verläufe in Abhängigkeit der Mischdauer, so ist kein einheitlicher Verlauf der jeweiligen Versuchsreihen ersichtlich. Im Verlauf der ersten Versuchsreihe befinden sich die Werte im Bereich von 80,05 % und 82,97 %. Bei der zweiten Versuchsreihe nehmen die Werte ab der Mischung „M3M“ ab und bewegen sich im Bereich zwischen 80,02 % und 84,21 %. Bei der dritten

Versuchsreihe war bereits bei der Partikelgrößenverteilung im Verlauf ersichtlich, dass bei der Mischung „M3M“ die kleineren Partikel fehlten. Dies wirkt sich nun auch auf die Packungsdichte aus und somit erreicht diese Mischung nur 76,3 %.

### **Zusammenfassung der Partikelgrößenverteilung und der Packungsdichte**

Nach Prüfung der Partikelgrößenverteilung und in weiterer Folge der Packungsdichte können abschließend folgende Aussagen getroffen werden:

- Bezüglich der Partikelgrößenverteilung kann gesagt werden, dass mit zunehmender Mischdauer der Anteil an gröberen Partikeln zunimmt und der Anteil feinerer Partikel abnimmt. Dies ist meist ab einer Mischdauer von 120 Minuten zu beobachten. Somit kann gesagt werden, dass mit zunehmender Mischdauer die Agglomerationsbildung zunimmt. Weiteres ist zu beobachten, dass die Anteile an gröberen Partikeln bei der zweiten und dritten Versuchsreihe zum Großteil größer sind als jene bei der ersten Versuchsreihe. Um aber genau zu sagen, ob das Alter dabei eine Rolle spielt, müssten noch Prüfungen an älteren Prämixen durchgeführt werden.
- Bei der Packungsdichte können sowohl hinsichtlich der Mischdauer, als auch bezüglich des Alters des Prämixes keine eindeutigen Aussagen über deren Einfluss getroffen werden. Die Verläufe sind für eine eindeutige Aussage zu unstetig.

### 3.4.3 Lagerung des Frischbetons

Nach Abschluss der Frischbetonprüfungen wurde der junge Beton in genormte Prismenschalungen mit den Abmessungen 40x40x160mm gegeben. Die Menge des hergestellten Frischbetons je Mischung (M1,5M, M3M, M7M, ...) wurde so gewählt, dass sich genau drei Prismenschalungen mit jeweils drei Prismen befüllen ließen. Dadurch war es möglich an jeder Mischung die 24-Stunden-, Sieben-Tages- und 28-Tagesfestigkeit zu prüfen. Pro Versuchsreihe wurden also insgesamt 27 Prismenschalungen befüllt. Dies wird nun beispielhaft anhand der Mischung „M15M“ der ersten Versuchsreihe dargestellt (Abb. 34).

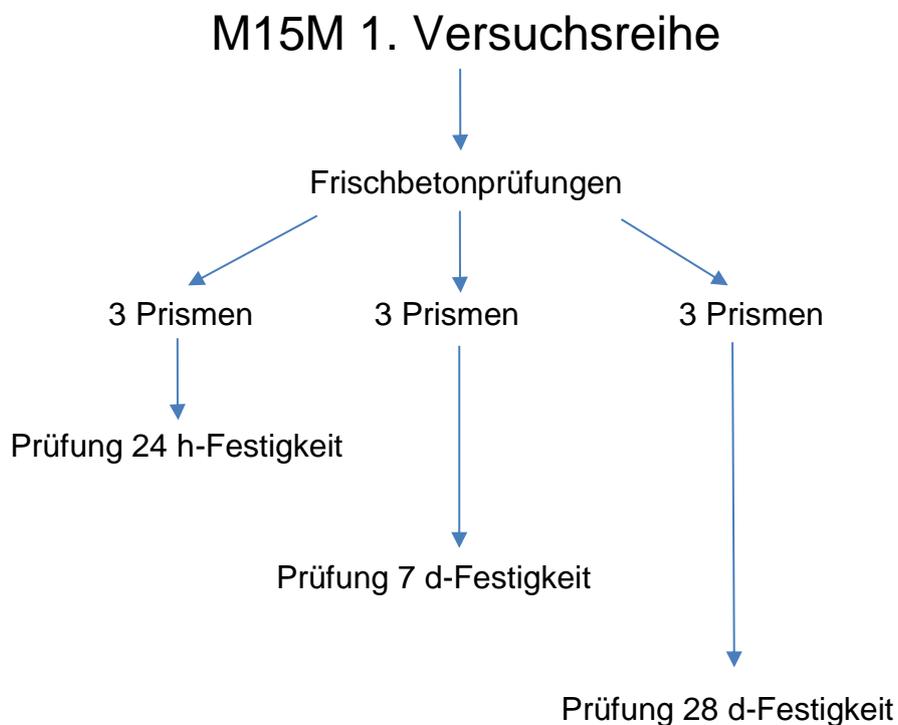


Abb. 34: Versuchsablauf der Mischung „M15M“

Die oben dargestellte Vorgehensweise wurde bei jeder Mischung gleich durchgeführt. Der nun in den Prismen befindliche Frischbeton wurde für 24 Stunden in den Schalungen gelagert und mit einer Kunststoffolie bedeckt, um ihn vor Austrocknung zu schützen.

### 3.4.4 Hydratationswärme

Wie bereits erwähnt, wurde im Zuge dieser Arbeit auch der Hydratationswärmeverlauf des Hochleistungsbetons geprüft. Die Grundlagen der Hydratation wurden in Kapitel 2.2.3 bereits erklärt.

Zur Prüfung des Hydratationswärmeverlaufs wurde jeweils das in der Mitte der Prismenschalung befindliche Prisma herangezogen (Abb. 35).



Prisma zur Untersuchung des Hydratationswärmeverlaufs

Abb. 35: Genormte Prismenschalung

Man geht davon aus, dass die Temperatur des mittleren Prismas im Querschnitt am konstantesten sein wird, da das Prisma von den angrenzenden Prismen vor rascher Abkühlung geschützt ist. Die beiden äußeren Prismen hingegen grenzten jeweils an einer Seite an die Außenluft, wodurch anzunehmen ist, dass sie in diesem Bereich rascher abkühlen könnten. Um also vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde das mittlere Prisma für die Messungen verwendet. Dabei wurde der Sensor des Prüfgerätes in den Frischbeton getaucht. Dieser Sensor übertrug dann den gemessenen Temperaturverlauf an den angeschlossenen Computer. Der Temperaturverlauf konnte anschließend in einer Excel-Tabelle abgelesen werden.

## Ergebnisse des Hydratationswärmeverlaufs

Folgend werden die Ergebnisse des Hydratationswärmeverlaufs innerhalb der ersten 24 Stunden in Form von Liniendiagrammen (Abb. 36 - Abb. 44) gezeigt. Es werden dabei jene Mischvorgänge der jeweiligen Versuchsreihen miteinander verglichen, welche die gleiche Mischdauer aufweisen. Gleichzeitig mit der Messung des Hydratationswärmeverlaufs, wurde auch die Umgebungstemperatur gemessen. Es wurde stets darauf geachtet, dass die Durchführung der Versuche bei möglichst gleichen Umgebungsbedingungen erfolgte. Kleinere Abweichungen der Umgebungstemperatur waren jedoch kaum zu vermeiden. Der Mittelwert der Umgebungstemperatur während der 24 Stunden, in welchen sich der Frischbeton in der Schalung befand, ist in folgender Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Mittelwert der Umgebungstemperatur während der Hydratation

Versuchsreihe	Mittelwert der Umgebungstemperatur [°C]
<b>Erste Versuchsreihe (48 Stunden)</b>	24
<b>Zweite Versuchsreihe (4 Wochen)</b>	22
<b>Dritte Versuchsreihe (9 Wochen)</b>	24

Der Verlauf der ersten Versuchsreihe ist in den Diagrammen rot dargestellt, der Verlauf der zweiten Versuchsreihe grün und jener der dritten Versuchsreihe violett.

### M1,5M

Bei der Mischung mit einer Trockenmischdauer des Prämixes von 1,5 Minuten ist der Hydratationswärmeverlauf der drei Versuchsreihen ähnlich (Abb. 36). Lediglich in den ersten acht Stunden sind kleinere Unterschiede zu erkennen. Diese Unterschiede können auf die Umgebungstemperatur zurückgeführt werden.

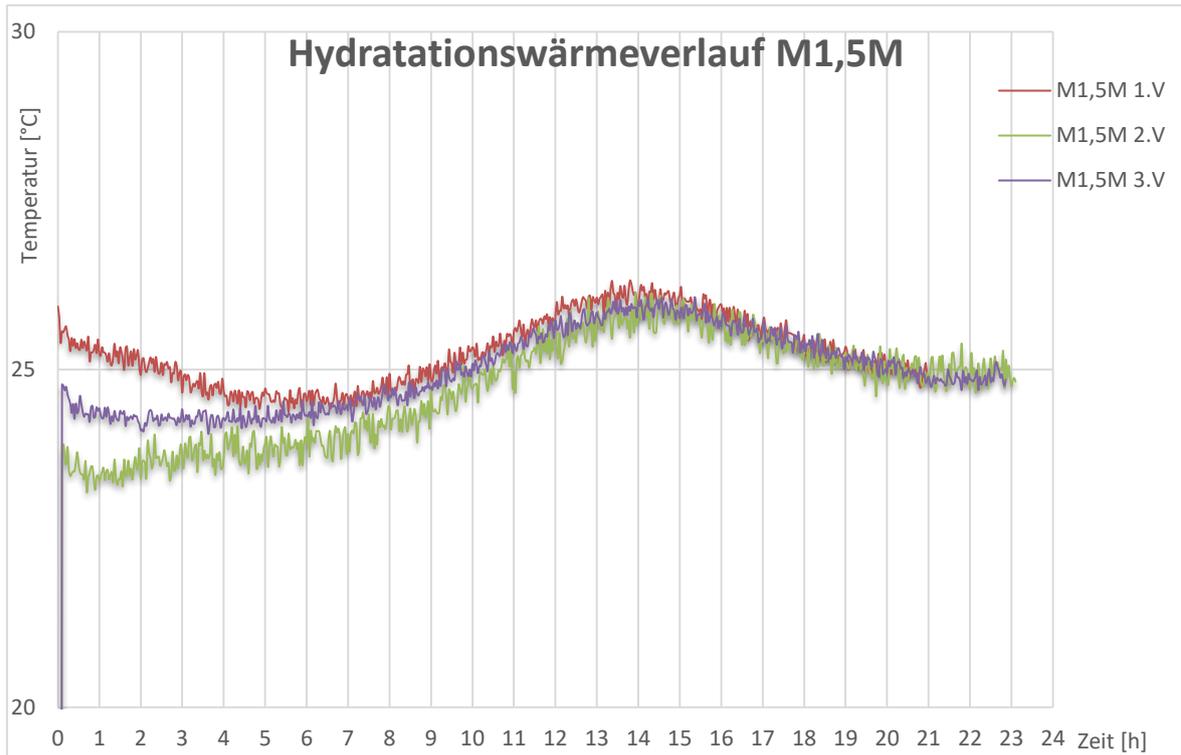


Abb. 36: Hydratationswärmeverlauf M1,5M

### M3M

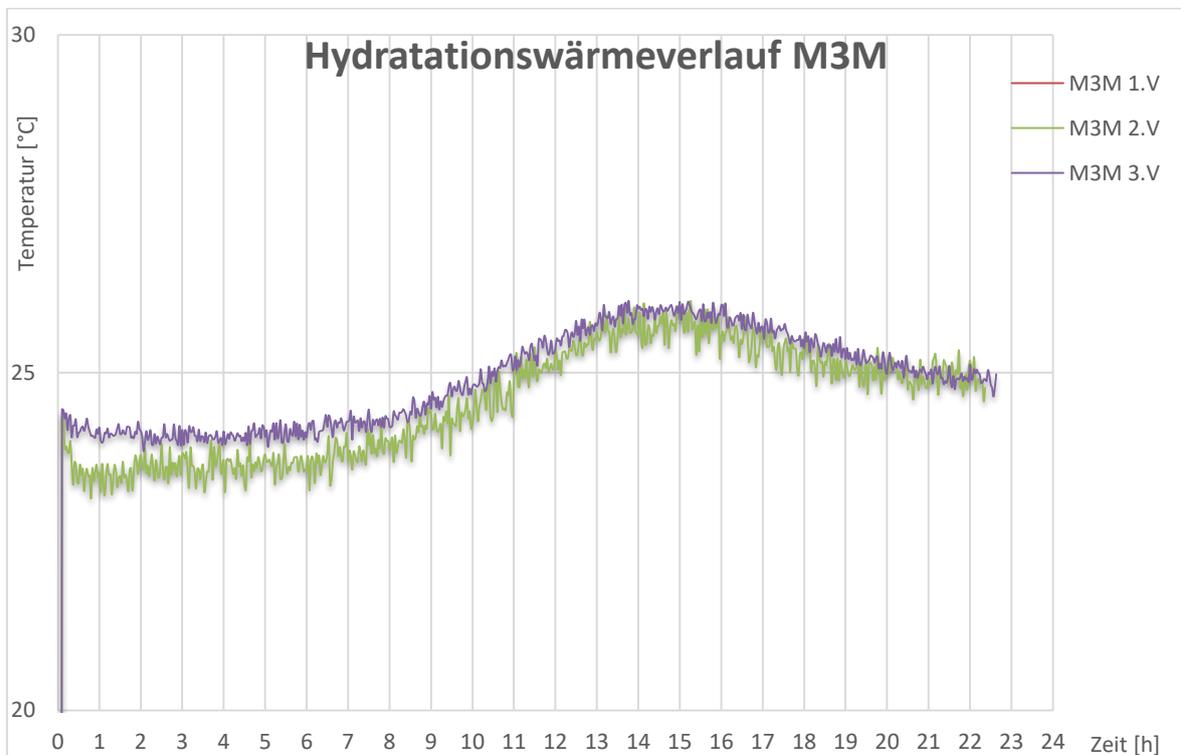


Abb. 37: Hydratationswärmeverlauf M3M

Bei der Mischung „M3M“ (Abb. 37) ist bei der Messung der ersten Versuchsreihe ein Fehler im Messsystem aufgetreten. Somit kann diese nicht gezeigt werden. Abgesehen von der Mischung der ersten Versuchsreihe, sind auch hier die Verläufe nahezu ident. In den ersten acht bis neun Stunden gibt es wieder kleinere Unterschiede, ehe sich die Verläufe annähern.

## M7M

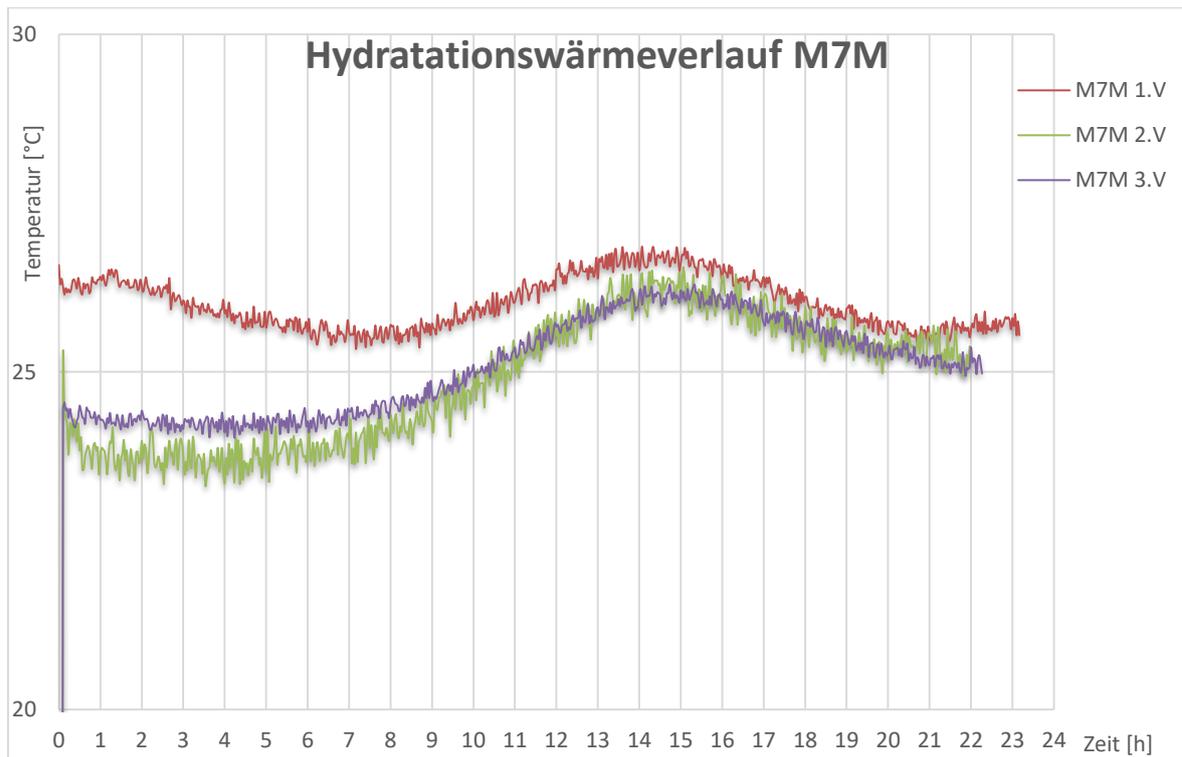


Abb. 38: Hydratationswärmeverlauf M7M

Ab einer Trockenmischdauer von sieben Minuten (Abb. 38) sind nun größere Unterschiede der Verläufe zu erkennen. Der Temperaturverlauf der ersten Versuchsreihe ist vor allem in der ersten Hälfte der 24 Stunden deutlich höher als bei den beiden anderen Versuchsreihen, bis er sich schließlich den anderen beiden Verläufen wieder annähert. Die Verläufe der zweiten und dritten Versuchsreihe sind nahezu ident. Der größere Temperaturunterschied dieser Mischdauer im Vergleich zu den oben gezeigten Mischdauern kann auf die längere Trockenmischdauer zurückzuführen sein. Bei immer länger werdender Mischdauer wird auch die Temperatur des Prämixes höher. Da bei der ersten Versuchsreihe der Frischbeton

bereits nach 48 Stunden hergestellt wurde, wird der Prämix noch nicht zur Gänze ausgekühlt gewesen sein, wodurch der größere Temperaturunterschied zu Beginn erklärt werden kann.

## M15M

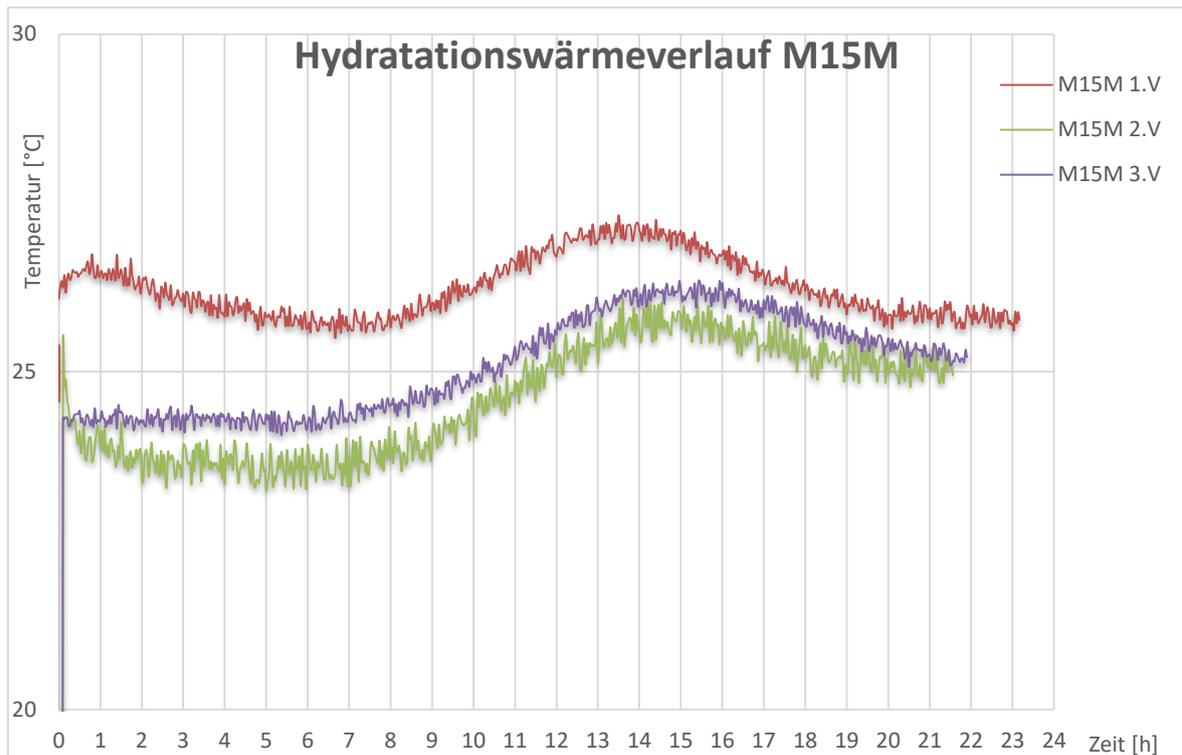


Abb. 39: Hydratationswärmeverlauf M15M

Auch bei jener Mischung mit einer Trockenmischdauer von 15 Minuten (Abb. 39) ist der Temperaturverlauf der ersten Versuchsreihe wieder am höchsten. Anders aber als bei der Mischung „M7M“, wo sich jene Mischung der ersten Versuchsreihe zum Schluss wieder dem Temperaturverlauf der anderen beiden Versuchsreihen angepasst hat, ist bei der Mischung „M15M“ der Temperaturunterschied auch am Ende des Verlaufs etwas größer im Vergleich zur zweiten und dritten Versuchsreihe. Hier wird nun auch der Temperaturunterschied der zweiten und dritten Versuchsreihe etwas größer als bei den bisherigen Mischdauern.

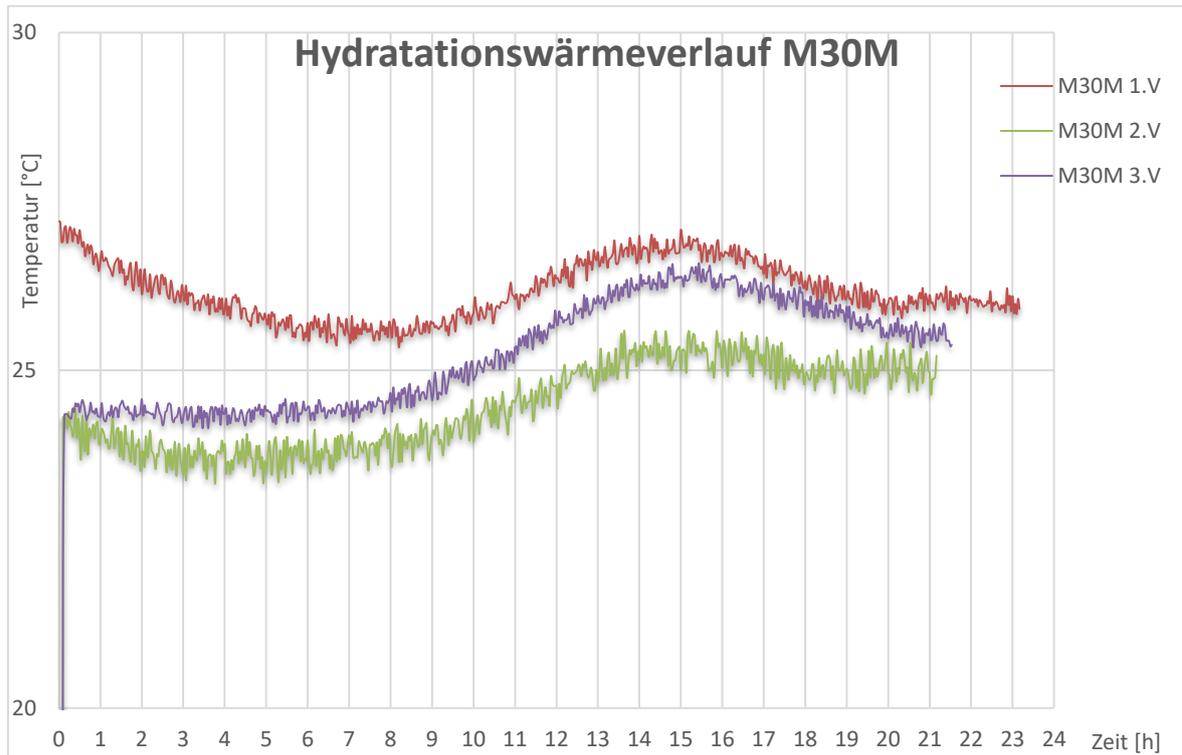
**M30M**

Abb. 40: Hydratationswärmeverlauf M30M

Bei dieser Mischung (Abb. 40) ist wieder ein ähnliches Bild des Hydratationswärmeverlaufs zu erkennen. Der Temperaturverlauf der ersten Versuchsreihe ist wieder am höchsten. Der Temperaturunterschied der zweiten und dritten Versuchsreihe ist hier jedoch etwas größer als bei den Mischungen zuvor.

**M60M**

Bei der Mischung „M60M“ (Abb. 41) nähert sich der Verlauf der dritten Versuchsreihe nach etwa zehn Stunden jenem Verlauf der ersten Versuchsreihe. Der Verlauf der zweiten Versuchsreihe weist wiederum die niedrigsten Temperaturen auf. Diese ist, neben der Mischung „M480M“, die einzige Mischung, bei der sich der Verlauf der dritten Versuchsreihe an den Verlauf der ersten Versuchsreihe annähert.

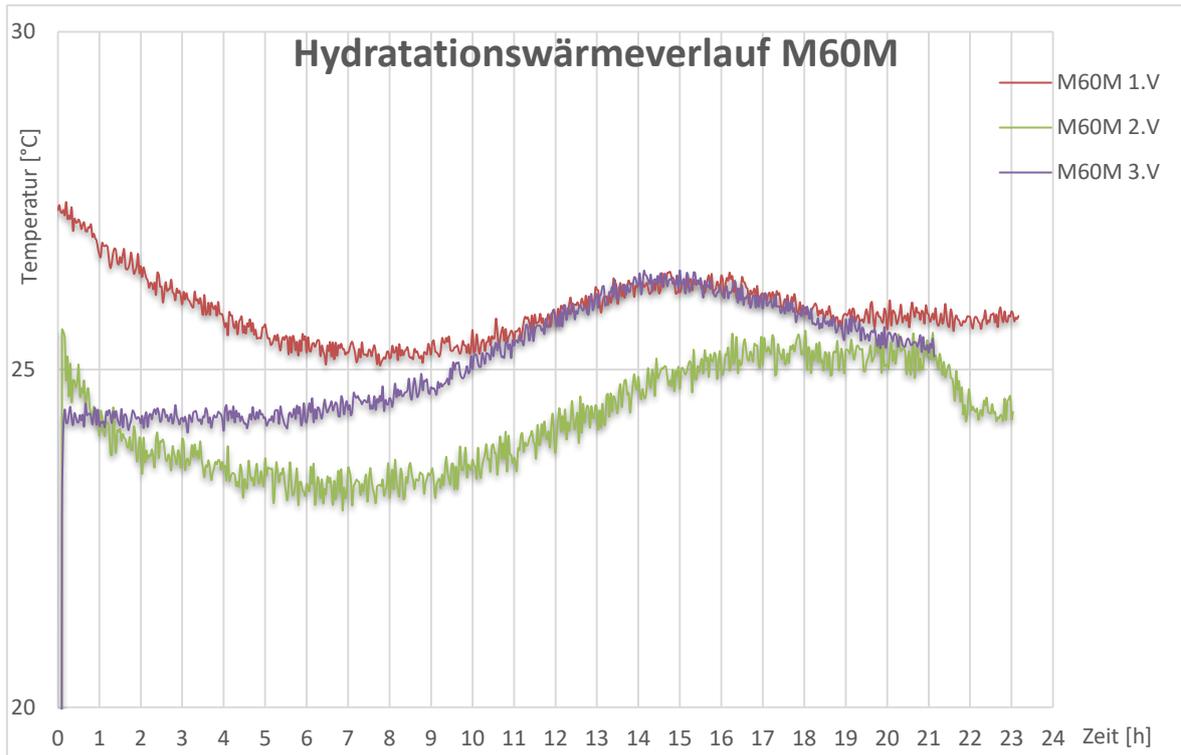


Abb. 41: Hydratationswärmeverlauf M60M

### M120M

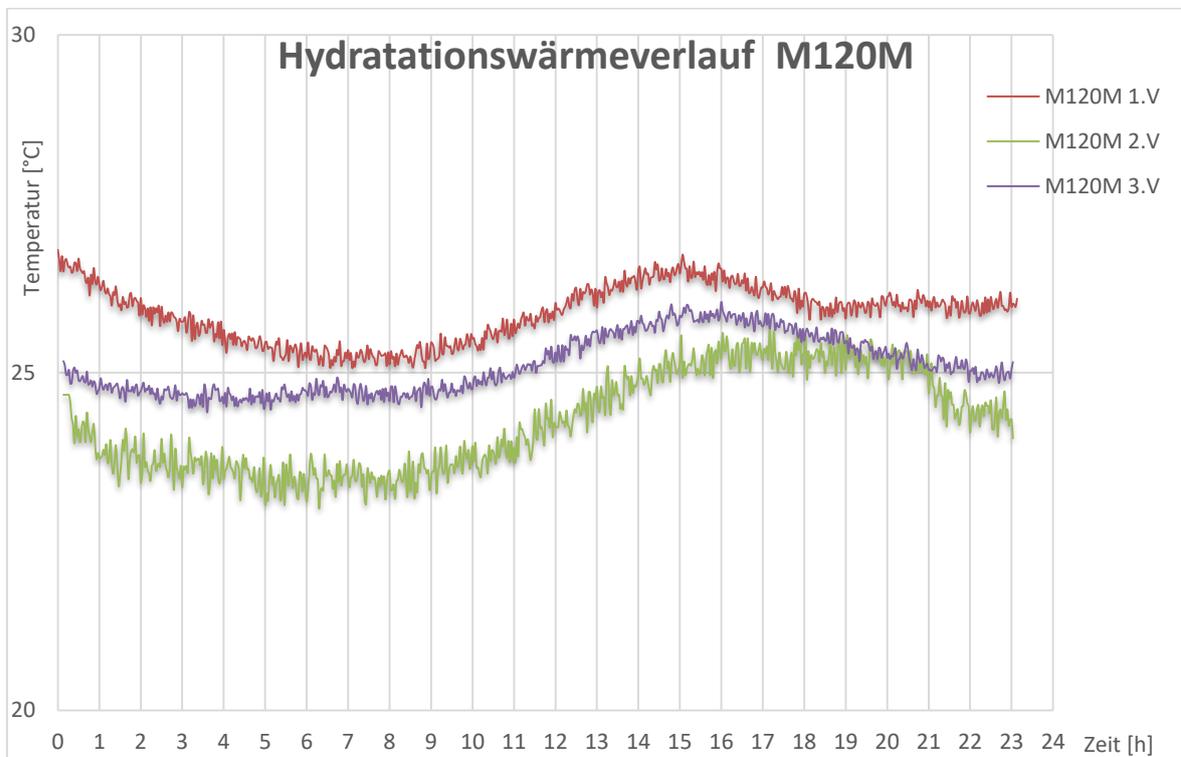


Abb. 42: Hydratationswärmeverlauf M120M

Bei Betrachtung dieser Mischung (Abb. 42) ist ein regelmäßigerer Temperaturverlauf ersichtlich. Der Verlauf der ersten Versuchsreihe ist erneut jener mit den höchsten Temperaturen, gefolgt von der dritten Versuchsreihe. Der Verlauf der zweiten Versuchsreihe ist wieder der Verlauf mit den niedrigsten Temperaturen.

### M240M

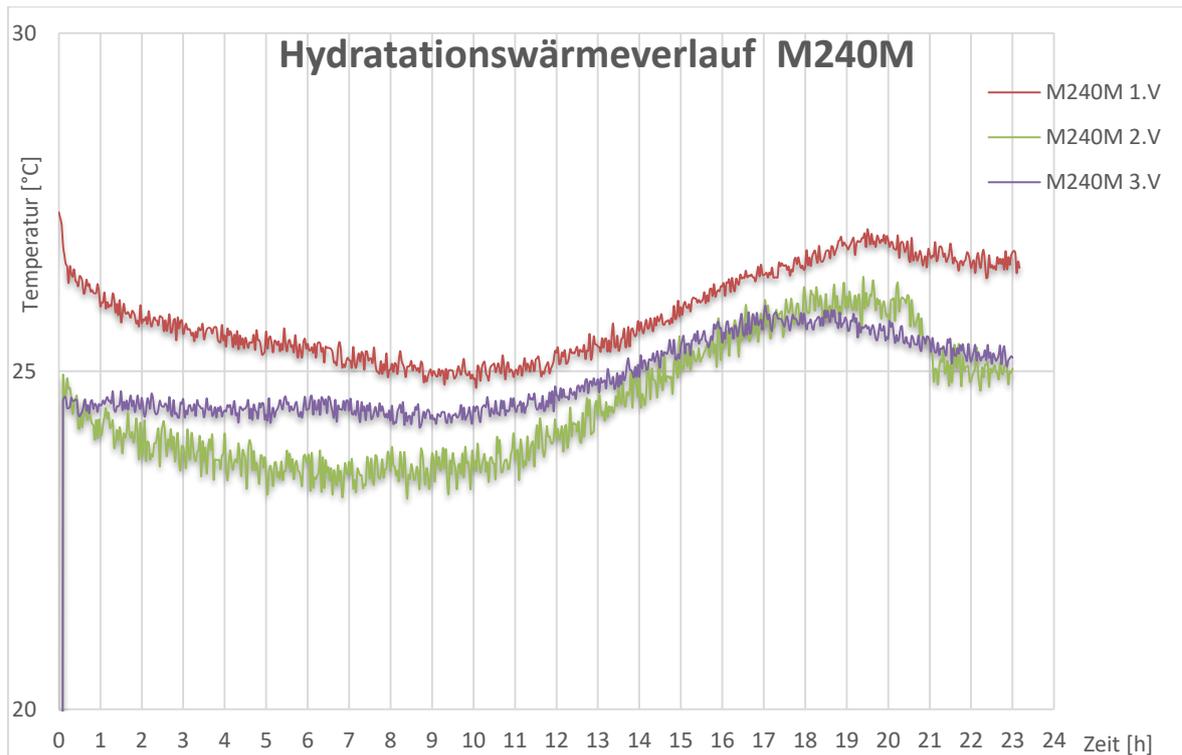


Abb. 43: Hydratationswärmeverlauf M240M

Auch hier (Abb. 43) ist die Reihenfolge der Verläufe gleich der von Mischung „M120M“.

### M480M

Die Mischung „M480M“ (Abb. 44) ist die erste und einzige Mischung bei der der Verlauf der ersten Versuchsreihe nicht mehr jener, zumindest ab der zweiten Hälfte, mit den höchsten Temperaturen ist.

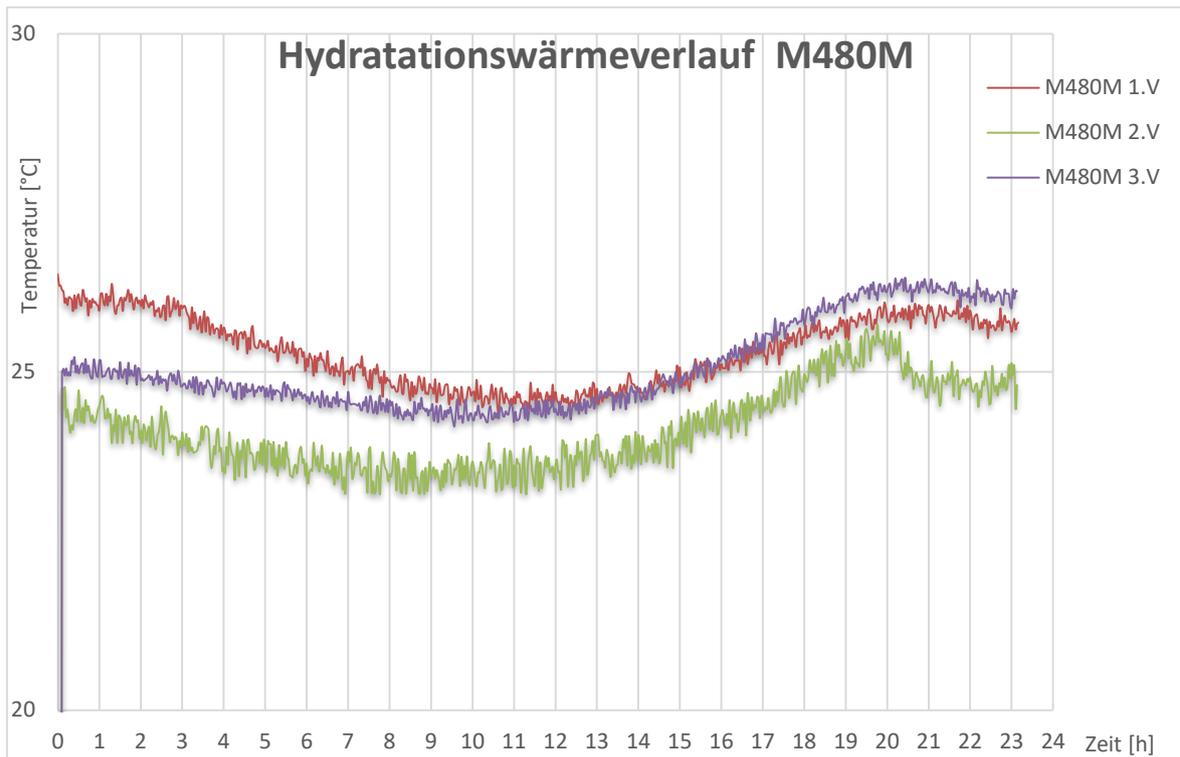


Abb. 44: Hydratationswärmeverlauf M480M

### Zusammenfassung Hydratationswärmeverlauf

Betrachtet man die Abb. 36 bis Abb. 44, so kann gesagt werden, dass stets die Mischdauern der ersten Versuchsreihe die höchsten Temperaturen während der Erhärtung aufweisen. Ebenso ist bei der ersten Versuchsreihe die Anfangstemperatur des Frischbetons nahe oder auch höher als die Maximaltemperatur des Verlaufs. Dies liegt an der zeitnahen (48 Stunden) Herstellung des Frischbetons nach Herstellung des Trockenprämixes. Innerhalb dieser 48 Stunden ist es für die längeren Mischdauern nicht möglich ausreichend abzukühlen, wodurch sich die höheren Anfangstemperaturen ergeben.

Zwischen der Herstellung des Prämixes und des Frischbetons der zweiten und dritten Versuchsreihe ist hingegen mehr Zeit vergangen (4 Wochen und 9 Wochen). In dieser Zeit ist der Prämix weiter abgekühlt, als bei der ersten Versuchsreihe, wodurch sich die niedrigeren Anfangstemperaturen ergeben. Bei den meisten Verläufen der zweiten und dritten Versuchsreihe ist die Anfangstemperatur nie höher als die Maximaltemperatur. Da die durchschnittliche Umgebungstemperatur bei der zweiten Versuchsreihe um zwei Grad Celsius (22°C) niedriger war als bei

der ersten und dritten Versuchsreihe (24°C), ist dieser Verlauf auch stets jener mit den niedrigsten Temperaturen während des Erhärtungsvorgangs.

Nach Ablauf der 24 Stunden wurden die Prismen ausgeschalt und die Messung der Hydratationswärme beendet. Die Prismen wurden beschriftet und bei Raumtemperatur gelagert. Die Lagerungsdauer des nun erstarrten Betons reichte bis zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften (24 Stunden, sieben Tage und 28 Tage).

### 3.5 Prüfung der mechanischen Eigenschaften

In diesem Kapitel wird genauer auf den Versuchsablauf sowie auf die Ergebnisse der Biegezugfestigkeits- und der Druckfestigkeitsprüfungen eingegangen. Um wieder zu veranschaulichen ob das Alter des Prämixes einen Einfluss auf diese Eigenschaften hat, wurden die Ergebnisse der jeweiligen Versuchsreihen in Form von Liniendiagrammen miteinander verglichen. Weiteres wurden auch die Festigkeiten in Abhängigkeit der Mischdauer dargestellt.

#### 3.5.1 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit jeder Mischung (M1,5M, M3M, M7M, ...) wurde bereits in Kapitel 2.2.5 beschrieben. Die Prüfungen wurden an einer Prüfmaschine der Firma *Zwick* durchgeführt, deren Steuerung über einen mit der Maschine verbundenen Computer erfolgt. Es handelt sich dabei um eine elektromechanische Prüfmaschine (Abb. 45), mit welcher mechanische Prüfungen wie Zug-, Druck und Biegeversuche (3- und 4-Punkt) an Prüfkörpern durchgeführt werden können. Die Krafteinleitung erfolgt über eine Traverse, welche mit zwei seitlich angeordneten Antriebsspindeln auf und ab bewegt werden kann.

Technische Daten *Zwick Z250*:<sup>57</sup>

- Maximale Prüfkraft: 250 kN
- Kraftaufnehmer: 250 kN und 10 kN
- Längenänderungsaufnehmer: Anfangs-Gerätemesslänge 10 bis 100 mm, Messweg bis 80 mm
- Traversengeschwindigkeit: 0,0005 bis 600 mm/min
- Aufspannplatte für Bauteile: 600 mm x 600 mm

---

<sup>57</sup> Zwick Z250. In: URL: [https://www.tuwien.ac.at/ausstattung/mechanische\\_charakterisierung-pruefmaschine\\_zwick\\_z250/](https://www.tuwien.ac.at/ausstattung/mechanische_charakterisierung-pruefmaschine_zwick_z250/) (letzter Zugriff 05.07.2018)



Abb. 45: Elektromechanische Prüfmaschine Zwick Z250

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Drei-Punkt-Biegeversuch angewandt. Jedes Prisma wurde vor der Durchführung der Festigkeitsprüfungen mithilfe einer Schiebelehre genau abgemessen und anschließend gewogen. Die Prismen wurden dann abwechselnd auf die beiden Auflager (Stahlrollen) der Prüfmaschine gelegt und zentrisch eingerichtet. Nach Eingabe der Abmessungen des in der Prüfmaschine befindlichen Prismas in die Software, wurde dieses bis zum Bruch belastet. Pro Mischvorgang wurden neun Prismen hergestellt. An jeweils drei Prismen wurde die 24-Stunden-, Sieben-Tages- und 28-Tagesfestigkeit geprüft. Es wurden also je Lagerungsdauer (24 h, 7.d, 28 d) drei Biegezugprüfungen durchgeführt, aus welchen dann der Mittelwert bestimmt wurde. Dieser Mittelwert der Biegezugfestigkeit wird in den anschließenden Diagrammen dargestellt.

### **Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen**

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen wurden in Form von Liniendiagrammen (Abb. 46 - Abb. 54) dargestellt. Es wurden dabei wieder jene Mischungen der drei Versuchsreihen miteinander verglichen, welche dieselbe Mischdauer aufwiesen. Auf der x-Achse ist die Lagerungsdauer bis zur Festigkeitsprüfung in Tagen angegeben und auf der y-Achse die Festigkeitswerte

in N/mm<sup>2</sup>. Die drei Punkte in den jeweiligen Verläufen zeigen die Festigkeitswerte, welche nach 24 Stunden, sieben Tagen und 28 Tagen erreicht wurden. Weiteres kann der Erhärtungsverlauf beginnend von der 24-Stundenfestigkeit, bis zur 28-Tagesfestigkeit herausgelesen werden. Die Festigkeiten der ersten Versuchsreihe (48 Stunden) sind durch blaue Linien dargestellt, die Festigkeiten der zweiten Versuchsreihen (4 Wochen) mithilfe von roten und jene der dritten Versuchsreihe (9 Wochen) mit grünen Linien.

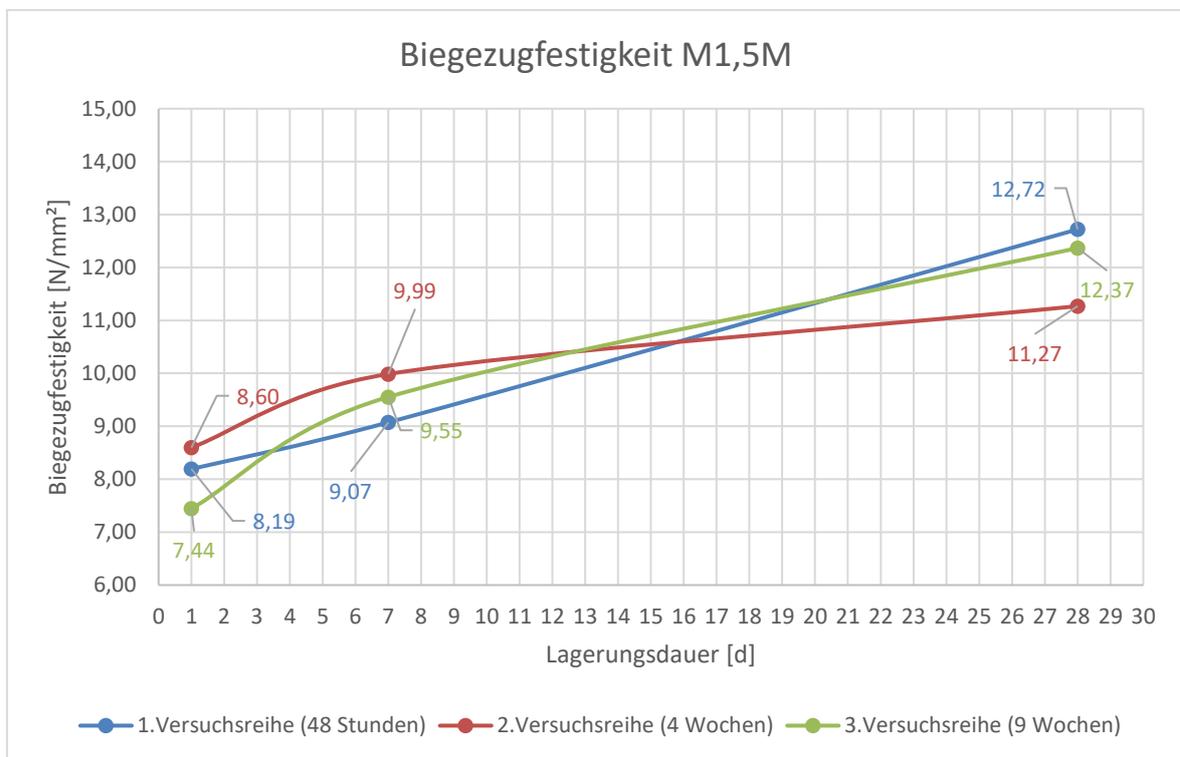


Abb. 46: Biegezugfestigkeit der Mischung „M1,5M“

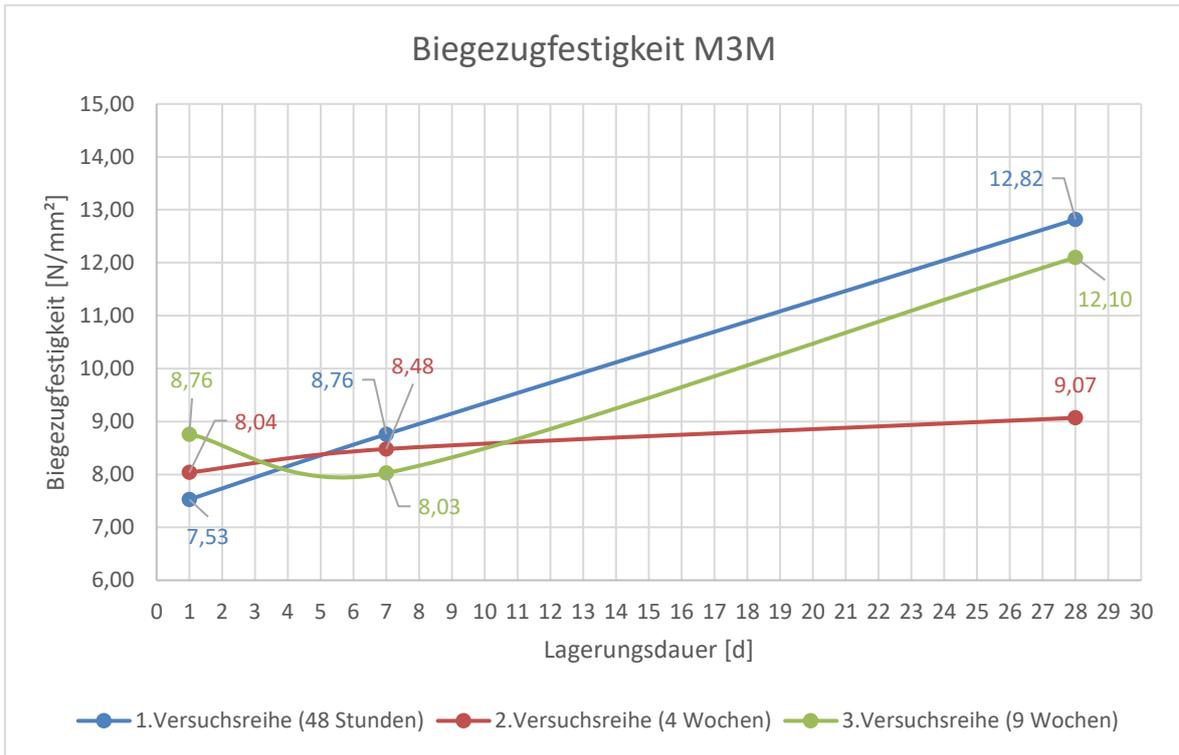


Abb. 47: Biegezugfestigkeit der Mischung „M3M“

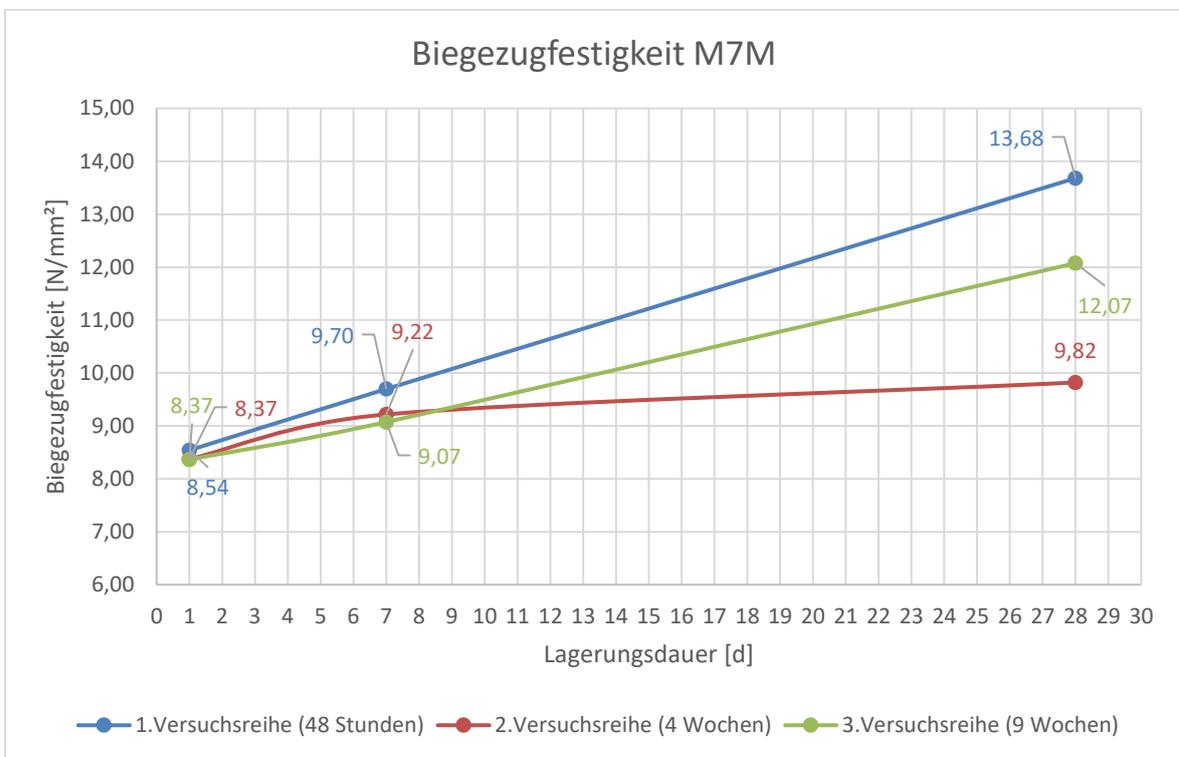


Abb. 48: Biegezugfestigkeit der Mischung „M7M“

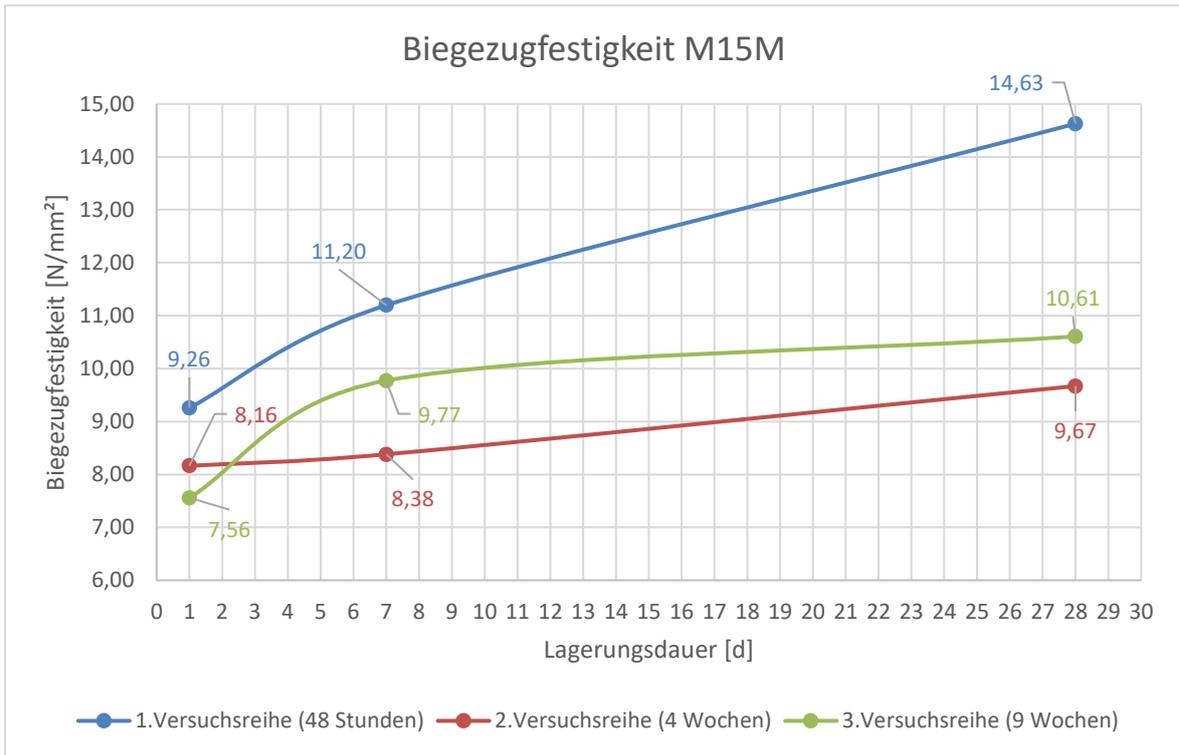


Abb. 49: Biegezugfestigkeit der Mischung „M15M“

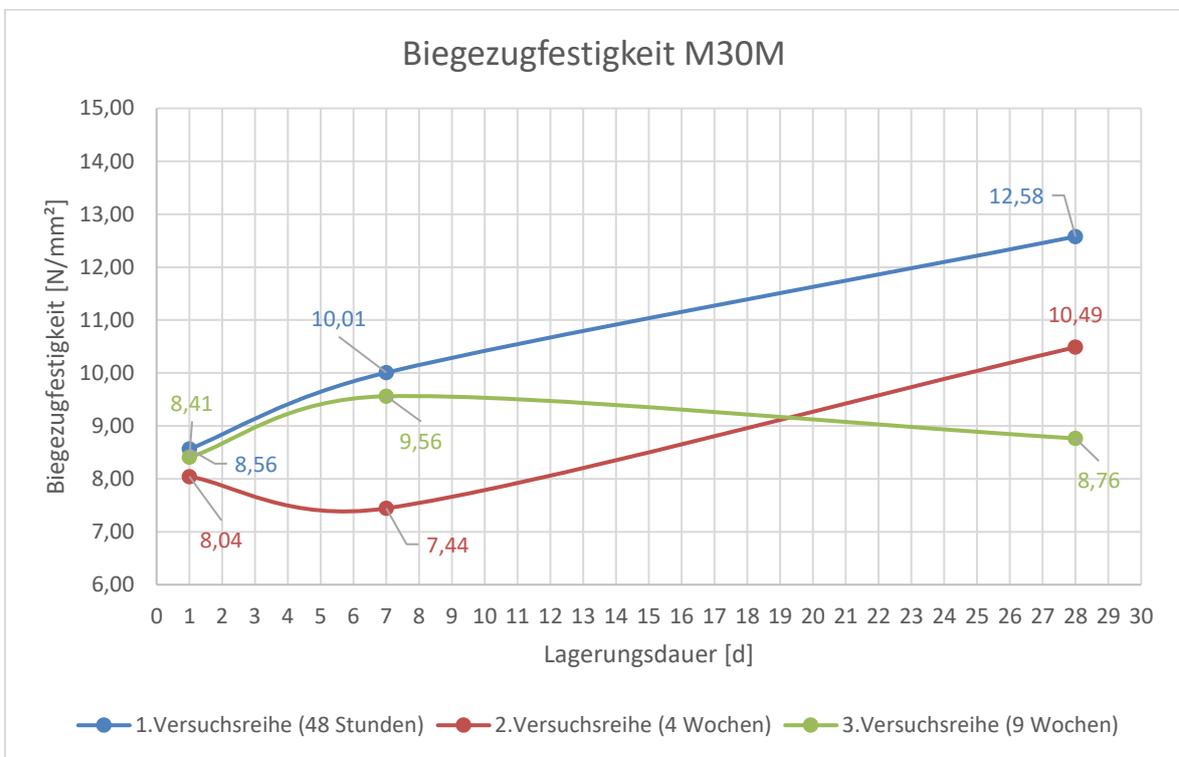


Abb. 50: Biegezugfestigkeit der Mischung „M30M“

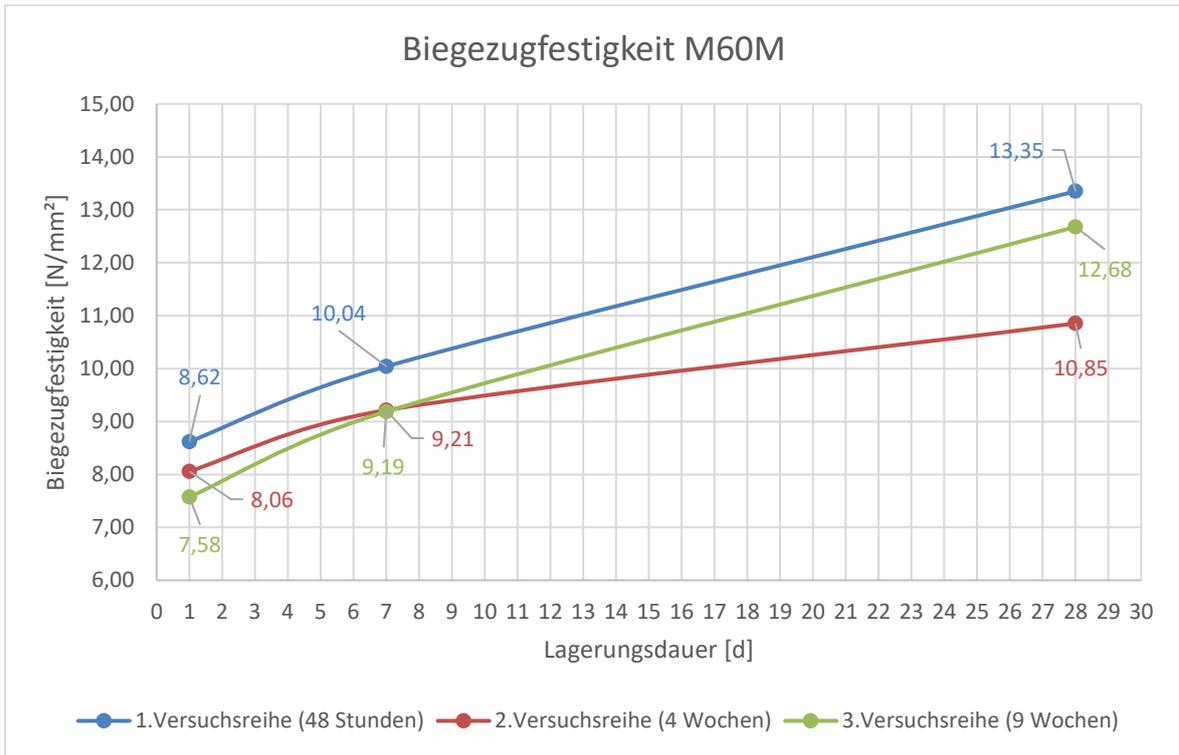


Abb. 51: Biegezugfestigkeit der Mischung „M60M“

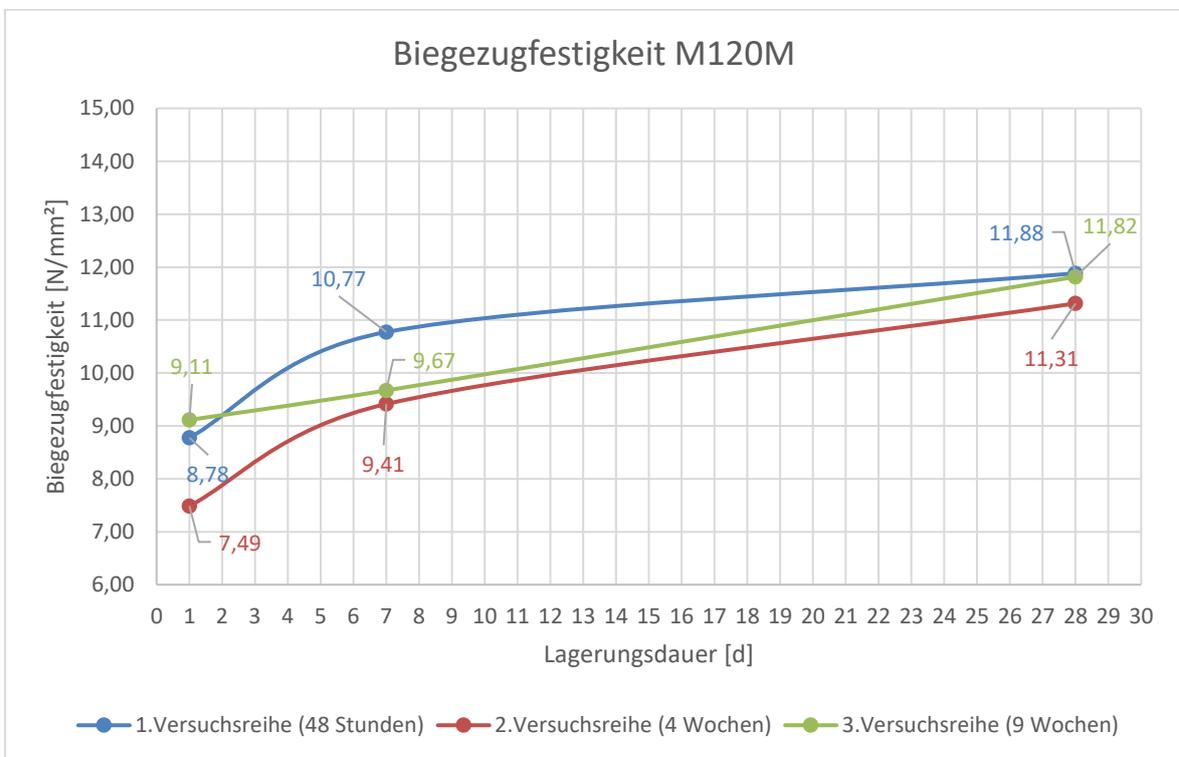


Abb. 52: Biegezugfestigkeit der Mischung „M120M“

Betrachtet man die bisher gezeigten Diagramme (Abb. 46 - Abb. 52), sind, unter Ausnahme der Mischung „M30M“ der zweiten Versuchsreihe, kleinere Tendenzen der Verläufe zu erkennen. Es ist ersichtlich, dass die Festigkeitswerte bei den Mischungen der ersten Versuchsreihe zum Großteil am höchsten sind. Lediglich in den ersten Stunden der Erhärtung des Betons sind die Festigkeitswerte der ersten Versuchsreihe nicht immer jene mit den höchsten Werten. Ebenso ist die Reihenfolge der drei Versuchsreihen, bezogen auf die Festigkeitswerte, nahezu ident. Wie schon erwähnt, sind die Mischungen der ersten Versuchsreihe jene mit den höchsten Werten, gefolgt von den Mischungen der dritten Versuchsreihe. Die geringsten Werte werden mit den Mischungen der zweiten Versuchsreihe erreicht. Ein weiteres Merkmal, womit man die drei Versuchsreihen vergleichen kann, sind die jeweiligen Steigungen der Erhärtungsverläufe von der 24. Stunde bis zum 28. Tag. Ausgenommen von den Mischungen „M15M“ und „M30M“ der dritten Versuchsreihe, haben die Verläufe der ersten und dritten Versuchsreihe ab der Sieben-Tagesfestigkeit einen nahezu gleichen Anstieg. Die Steigung des Erhärtungsverlaufs der Mischungen der zweiten Versuchsreihe sind hingegen jene mit dem geringsten Anstieg.

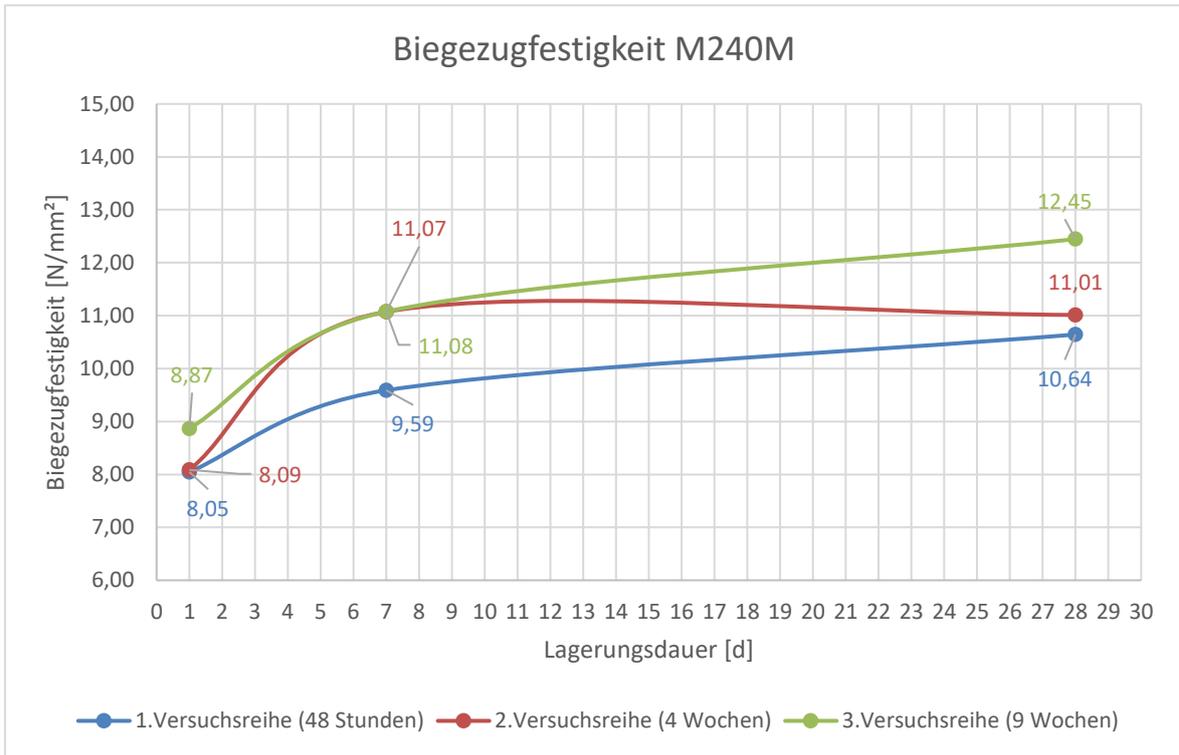


Abb. 53: Biegezugfestigkeit der Mischung „M240M“

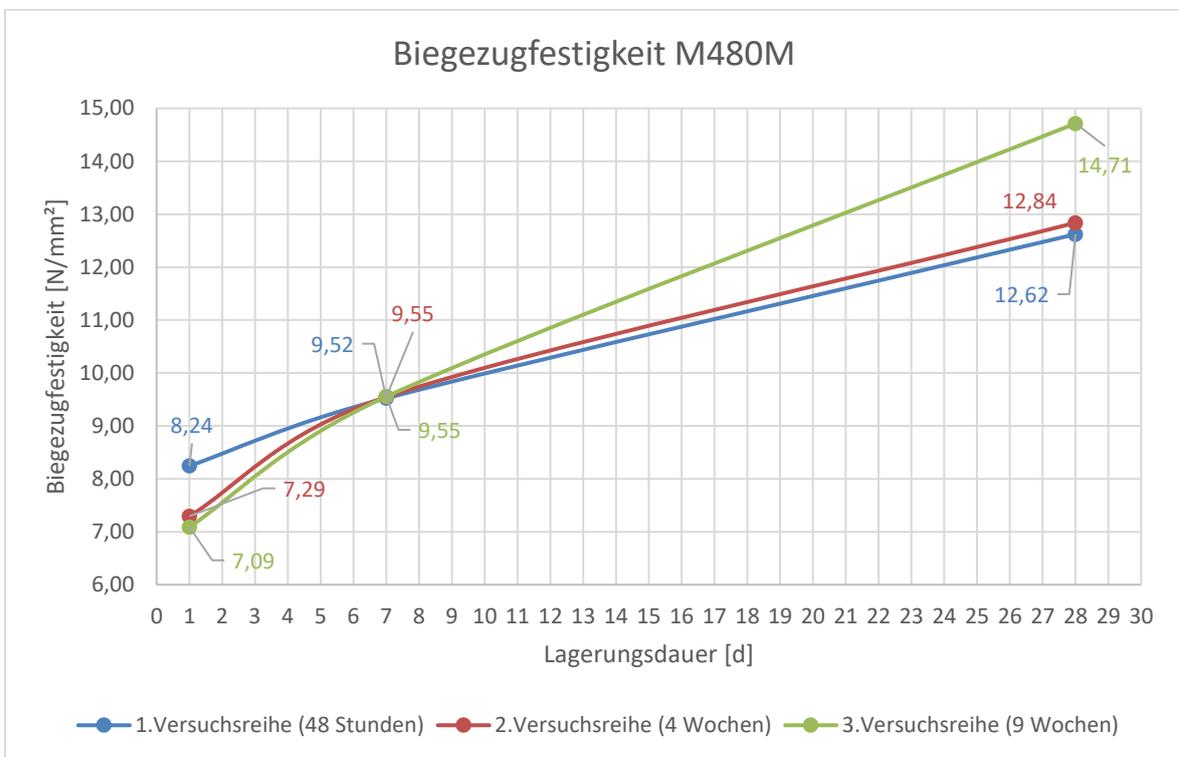


Abb. 54: Biegezugfestigkeit der Mischung „M480M“

Bei den Mischungen „M240M“ und „M480M“ (Abb. 53, Abb. 54) zeigt sich ein deutlich anderes Bild als bei den Mischungen „M1,5M“ bis „M120M“. Anders als bei den oben beschriebenen Mischungen, werden die höchsten Werte der Biegezugfestigkeit zum Großteil von den Mischungen der dritten Versuchsreihe erreicht. Dadurch ergibt sich auch eine andere Reihenfolge bezüglich der Biegezugfestigkeiten. Hier sind, wie bereits erwähnt, die Mischungen der dritten Versuchsreihe jene mit den höchsten Werten, gefolgt von den Mischungen der zweiten und ersten Versuchsreihe. Anders als bei den oben gezeigten Mischungen ist hier die erste Versuchsreihe, welche die besten Werte erreichte, nun jene Versuchsreihe mit den niedrigsten Werten.

### **Zusammenfassung Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit des Alters des Prämixes:**

Nach Analyse der Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsverläufe in Abhängigkeit der Lagerungsdauer sowie des Alters des Prämixes, lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Betrachtet man Abb. 46 bis Abb. 52, so kann gesagt werden, dass der jüngste Prämix die besten Werte liefert. Die beiden älteren Prämixe weisen geringere Biegezugfestigkeiten auf. Nachdem jedoch die Festigkeitswerte der dritten Versuchsreihe höher sind als jene der zweiten Versuchsreihe, kann nicht daraus abgeleitet werden, dass die Festigkeitswerte mit zunehmendem Alter des Prämixes immer schlechter werden.
- Bezüglich der Erhärtungsgeschwindigkeit (Steigung der Verläufe in den Diagrammen) ist zu erkennen, dass die Verläufe der ersten und dritten Versuchsreihe einen annähernd gleichen Anstieg haben. Auch hier kann also nicht gesagt werden, dass die Erhärtungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Alter des Prämixes immer geringer wird, da die Steigungen der dritten Versuchsreihe meist höher sind, als jene der zweiten Versuchsreihe.
- Bei den beiden längsten Mischdauern zeigt sich ein etwas anderes Bild bezüglich der Festigkeitswerte. Um sagen zu können, ob diese Tendenz mit zunehmender Mischdauer anhält, müssten weitere Versuche mit noch längeren Mischdauern durchgeführt werden.

### Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Mischdauer

In den folgenden Diagrammen (Abb. 55 - Abb. 57) ist die Biegezugfestigkeit der drei Versuchsreihen in Abhängigkeit der Mischdauer des Prämixes dargestellt. Im Unterschied zur Bachelorarbeit „Einfluss der Mischdauer auf das Festigkeitsverhalten von Hochleistungsbeton“ von *Simon Sacherl* wurden hier mehr Mischdauern miteinander verglichen, um differenziertere Aussagen zu erhalten. Die drei Versuchsreihen wurden dabei getrennt betrachtet. In jedem Diagramm ist jeweils ein Verlauf der 24-Stundenfestigkeit, ein Verlauf der Sieben-Tagesfestigkeit und ein Verlauf der 28-Tagesfestigkeit dargestellt, wobei die x-Achse eine logarithmische Skalierung aufweist, um die Unterschiede bei den kürzeren Mischdauern besser erkennen zu können.

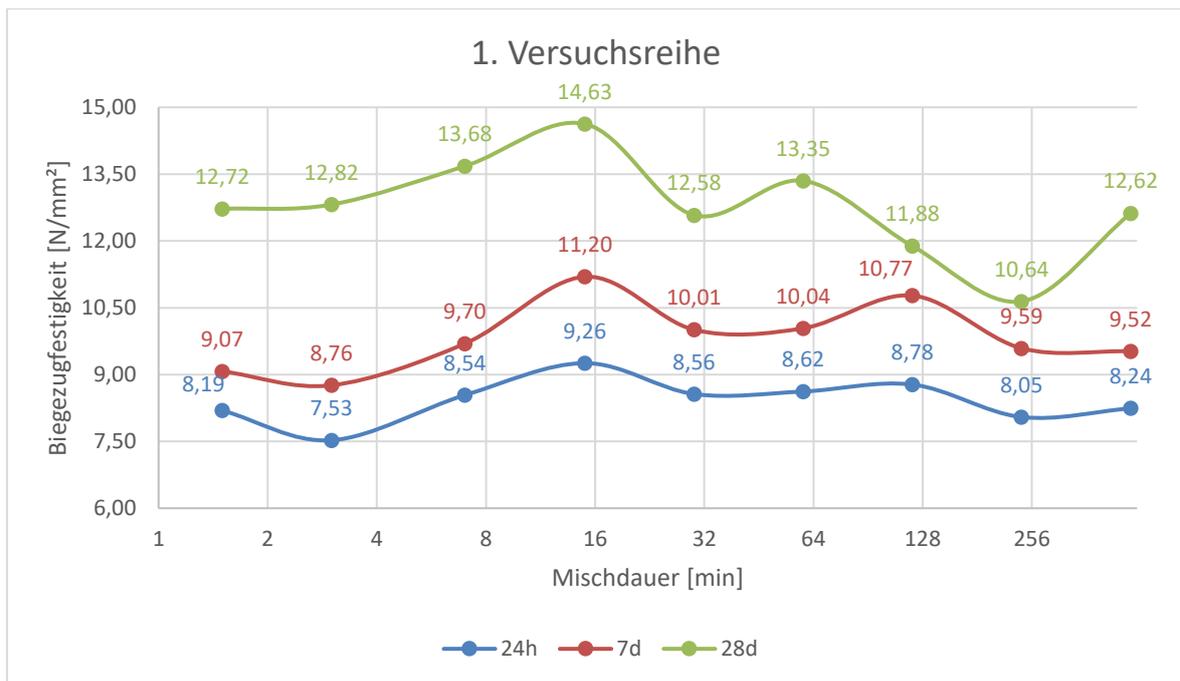


Abb. 55: Verlauf Biegezugfestigkeit 1. Versuchsreihe

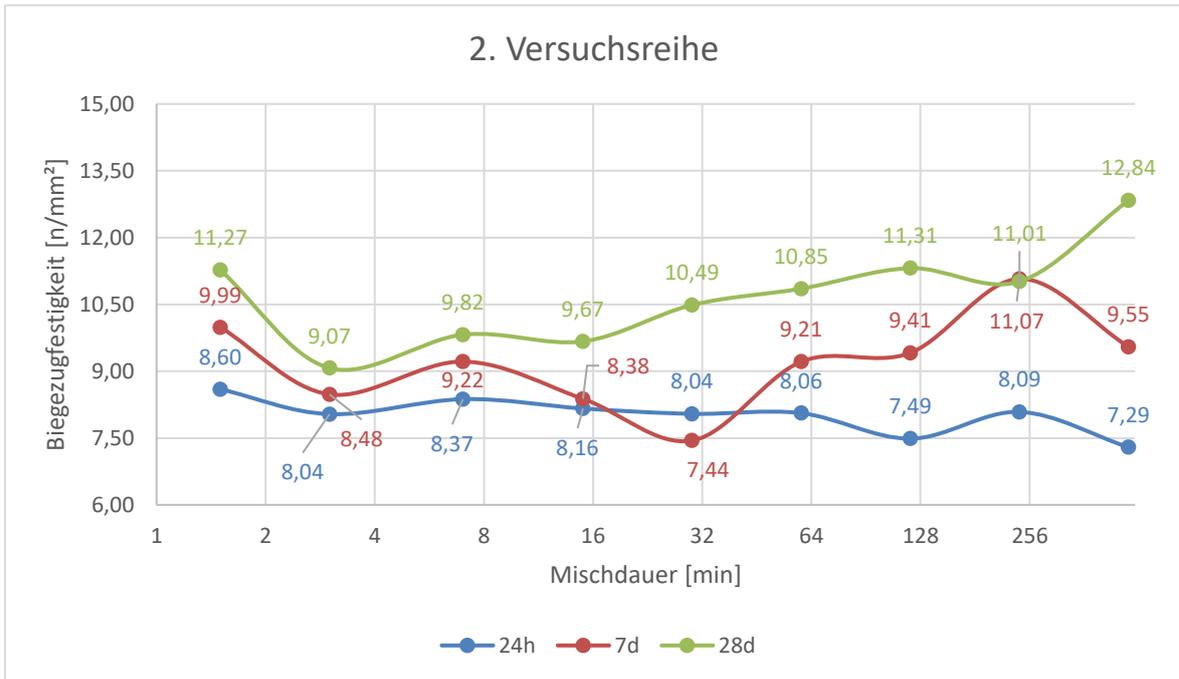


Abb. 56: Verlauf Biegezugfestigkeit 2. Versuchsreihe

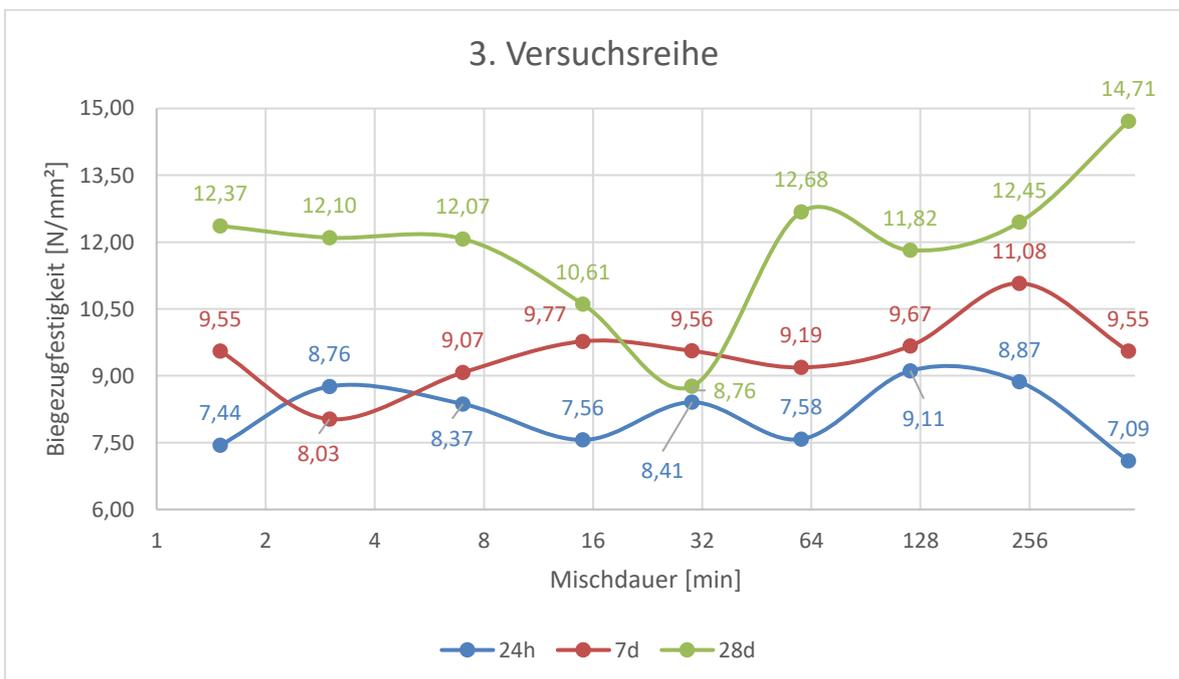


Abb. 57: Verlauf Biegezugfestigkeit 3. Versuchsreihe

Bei den Mischungen der ersten Versuchsreihe (Abb. 55) sind die drei Verläufe der Festigkeiten über die Mischdauer einigermaßen ident. Bei jedem Verlauf werden die

Höchstwerte bei einer Mischdauer von 15 Minuten erreicht, bei länger werdender Mischdauer wurden nur geringere Festigkeitswerte erreicht.

Bei der zweiten und dritten Versuchsreihe (Abb. 56, Abb. 57) ist keine eindeutige Tendenz der Verläufe ersichtlich. Während die Verläufe bei der ersten Versuchsreihe nahezu gleich sind, sind die Verläufe der zweiten und dritten Versuchsreihe ungleich. Die Maximalwerte der Biegezugfestigkeit werden bei beiden Versuchsreihen, ausgenommen der 24-Stundenfestigkeit der zweiten Versuchsreihe, mit zunehmender Mischdauer erreicht.

### **Zusammenfassung der Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit der Mischdauer**

Aus den drei Diagrammen in Abb. 55, Abb. 56 und Abb. 57 können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Nur bei den Mischungen der ersten Versuchsreihe sind ähnliche Verläufe ersichtlich. Die Maximalwerte der Biegezugfestigkeit werden bei dieser Versuchsreihe bei einer Mischdauer von 15 Minuten erreicht.
- Wie aus den beiden weiteren Versuchsreihen ersichtlich, streuen mit zunehmendem Alter die Verläufe der Biegezugfestigkeit. Hier ist kein einheitlicher Verlauf ersichtlich, ebenso werden die Maximalwerte nicht bei gleicher Mischdauer erreicht.

Jedoch ist bei der Prüfung der Biegezugfestigkeit von Beton immer zu berücksichtigen, dass aufgrund größerer Poren im Bereich der Bruchfläche die Biegezugfestigkeit stark reduziert werden kann. Diese Poren wirken sich auf die Biegezugfestigkeit stärker aus als auf die Druckfestigkeit, wodurch bei den Biegezugfestigkeiten oft größere Streuungen vorhanden sind.

### 3.5.2 Druckfestigkeit

In Kapitel 2.2.5 wurde die Vorgangsweise bei einer Druckfestigkeitsprüfung bereits beschrieben. Die Prüfungen wurden an einer Prüfmaschine der Firma *Toni Technik* (Abb. 58) durchgeführt. Es handelt sich dabei um eine vollautomatische Prüfmaschine, mit welcher Druckfestigkeitsprüfungen aber auch E-Modulmessungen durchgeführt werden können. Die Einstellungen erfolgen über einen Computer, welcher mit der Maschine verbunden ist, mittels der Software „testXpert“.



Abb. 58: Vollautomatische Prüfmaschine der Fa: *Toni Technik*

Technische Daten:<sup>58</sup>

- Maximale Prüfkraft: 3000 kN
- Prüfraumbreite: 355 mm
- Druckplatten  $\varnothing$  300 mm
- Druckplattenabstand 340 mm
- Kolbenhub 65 mm

---

<sup>58</sup> Beton. In: URL: [https://tonitechnik.de/fileadmin/DATEN/Downloads/Global\\_Testing\\_Solutions/-GTS4\\_Teil-2.pdf](https://tonitechnik.de/fileadmin/DATEN/Downloads/Global_Testing_Solutions/-GTS4_Teil-2.pdf) (letzter Zugriff 08.07.2018)

Eine der beiden Hälften aus den Biegezugversuchen wurde dabei in eine in der Prüfmaschine befindliche Vorrichtung (Abb. 58 rechts) hineingelegt und anschließend bis zum Bruch belastet. Man erhielt somit wieder drei Messergebnisse pro Lagerungsdauer (24 h, 7 d und 28 d). Aus diesen drei Druckfestigkeiten wurde der Mittelwert ermittelt.

### **Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen**

In folgendem Abschnitt sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen mithilfe von Liniendiagrammen (Abb. 59 - Abb. 67) gezeigt. Gleich wie bei der Biegezugfestigkeit wurden auch hier wieder jene Mischungen der drei Versuchsreihen miteinander verglichen, welche dieselbe Mischdauer aufwiesen. Dadurch wurden die Festigkeiten in Abhängigkeit des Alters des Prämixes miteinander verglichen, ebenso konnten Rückschlüsse auf die Erhärtungsgeschwindigkeit gezogen werden. Die in den Verläufen befindlichen Punkte zeigen wieder die Festigkeiten nach 24 Stunden, sieben Tagen und 28 Tagen. Auf der x-Achse ist die Lagerungsdauer bis zur Festigkeitsprüfung (24 Stunden, sieben Tage und 28 Tage) aufgetragen und auf der y-Achse die Druckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>.

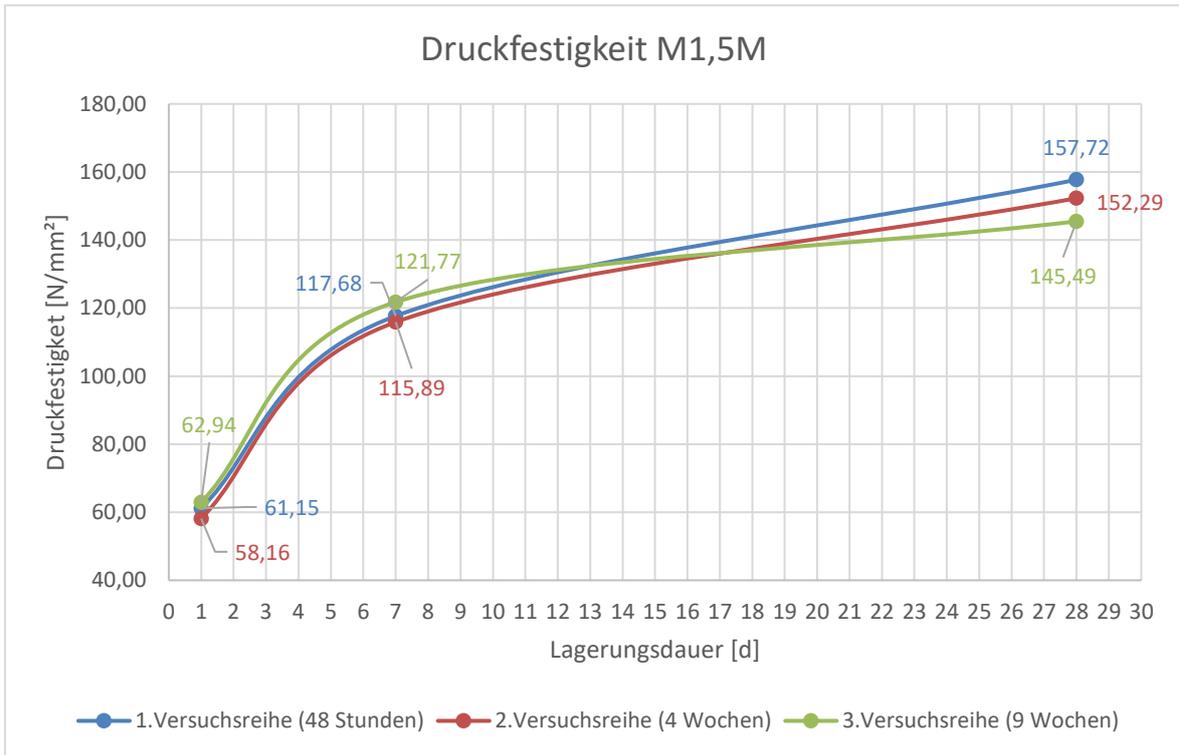


Abb. 59: Druckfestigkeit der Mischung „M1,5M“

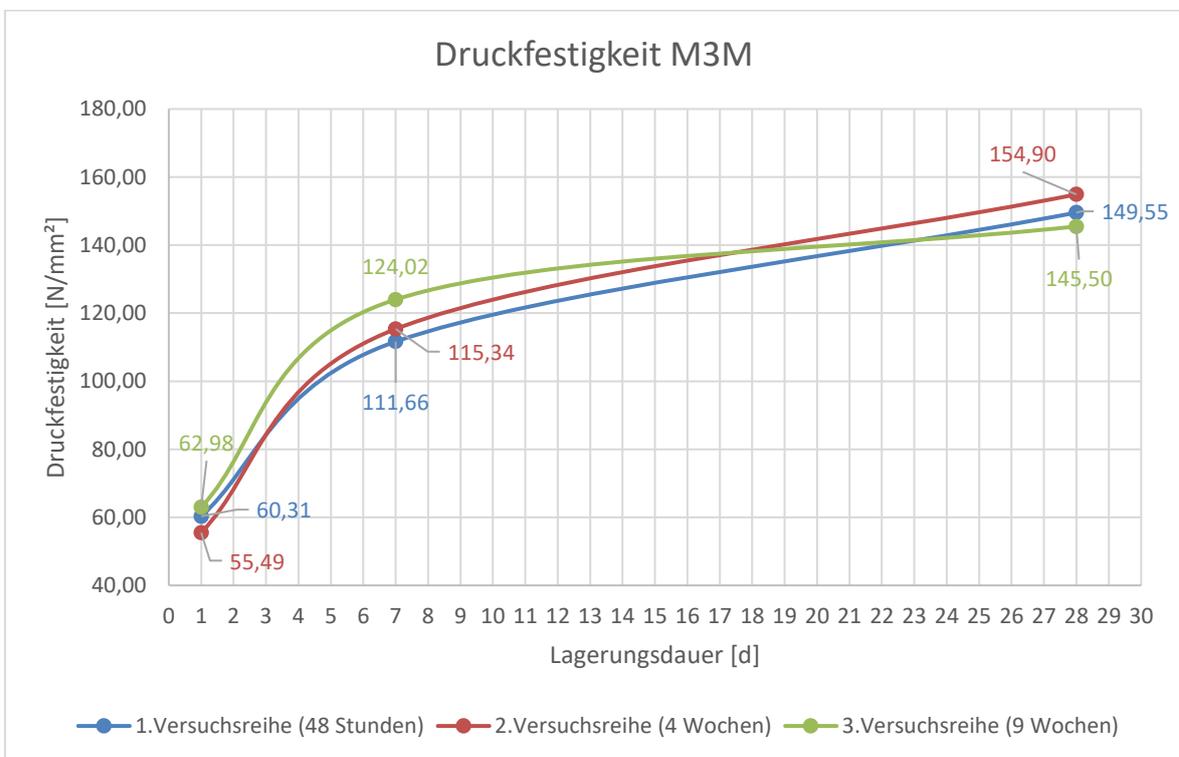


Abb. 60: Druckfestigkeit der Mischung „M3M“

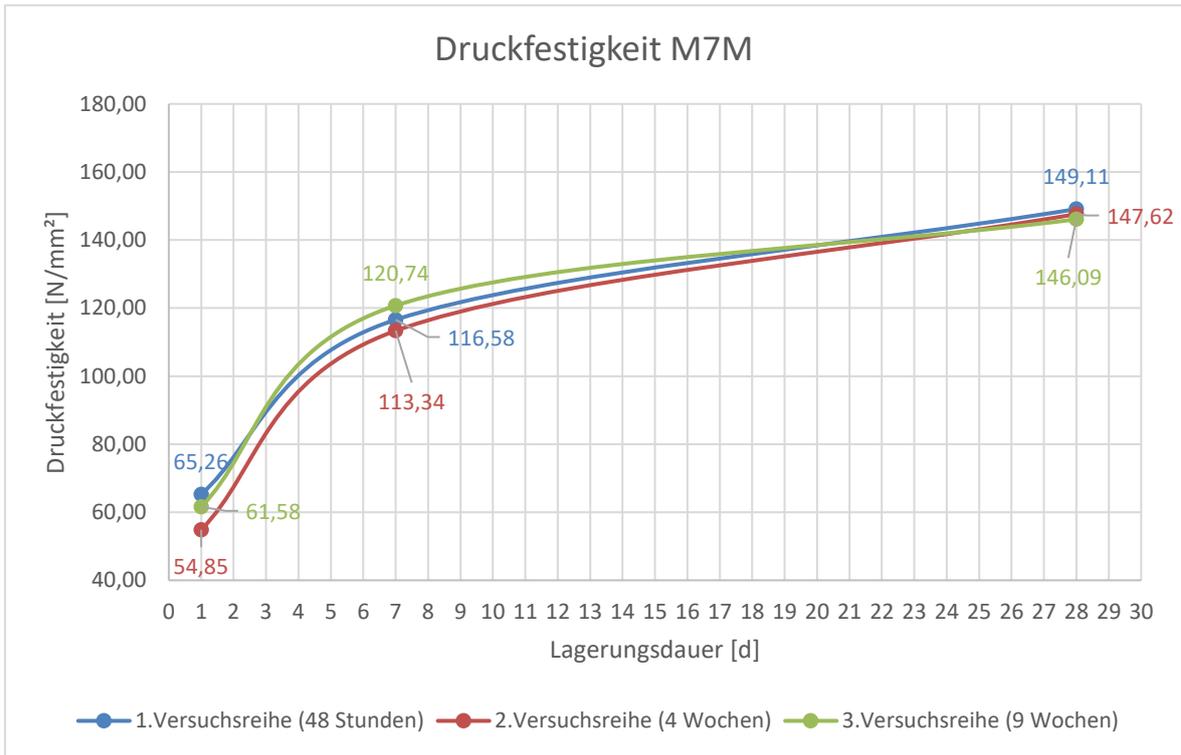


Abb. 61: Druckfestigkeit der Mischung „M7M“

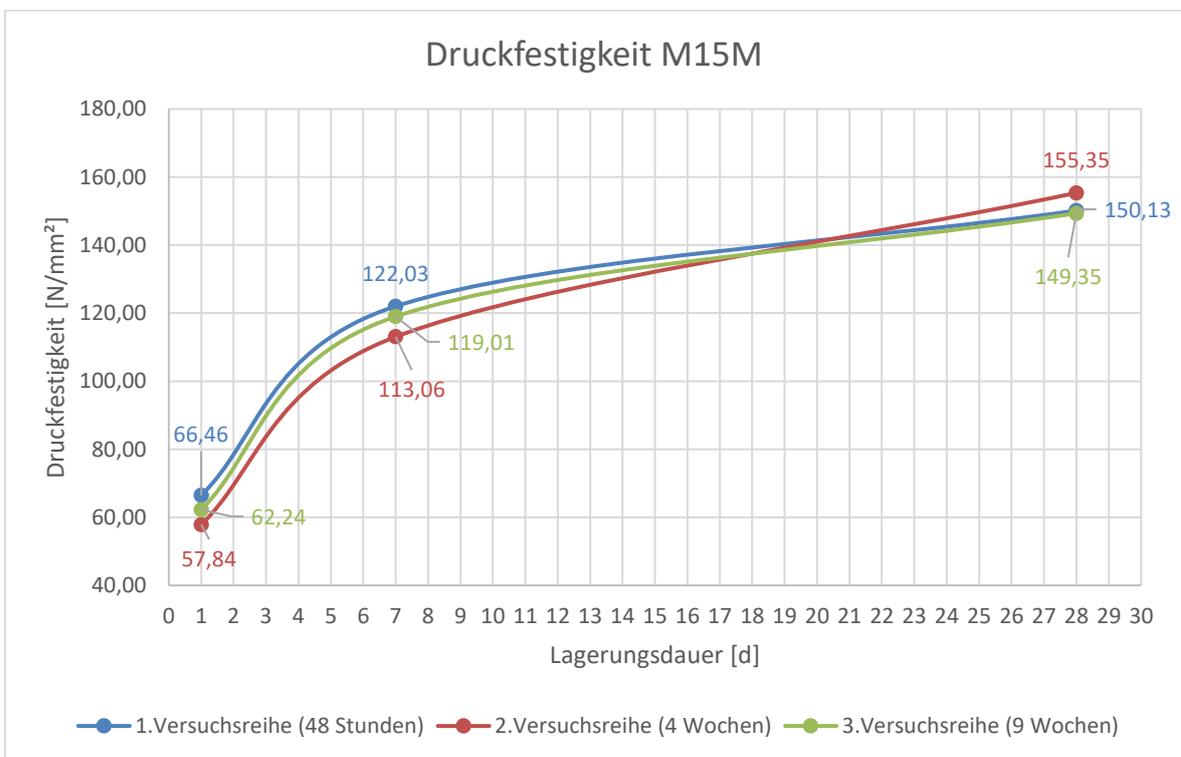


Abb. 62: Druckfestigkeit der Mischung „M15M“

Betrachtet man die Diagramme in Abb. 59 bis Abb. 62, so sind kleinere Tendenzen zu erkennen. Bei genauerer Beobachtung weisen die Verläufe der dritten Versuchsreihe in den ersten Tagen die höchsten Festigkeiten auf, ehe sie bis zur 28-Tagesfestigkeit die schlechtesten Druckfestigkeitswerte erreichen. Ab etwa sieben Tagen nimmt die Erhärtungsgeschwindigkeit der dritten Versuchsreihe im Vergleich zu den beiden anderen Versuchsreihen etwas ab.

Die erste und zweite Versuchsreihe hingegen weisen ähnliche Verläufe auf und wechseln sich im Hinblick auf die maximalen Druckfestigkeiten nach 28 Tagen ab. Markante Unterschiede zwischen den Versuchsreihen sind jedoch nicht zu erkennen.

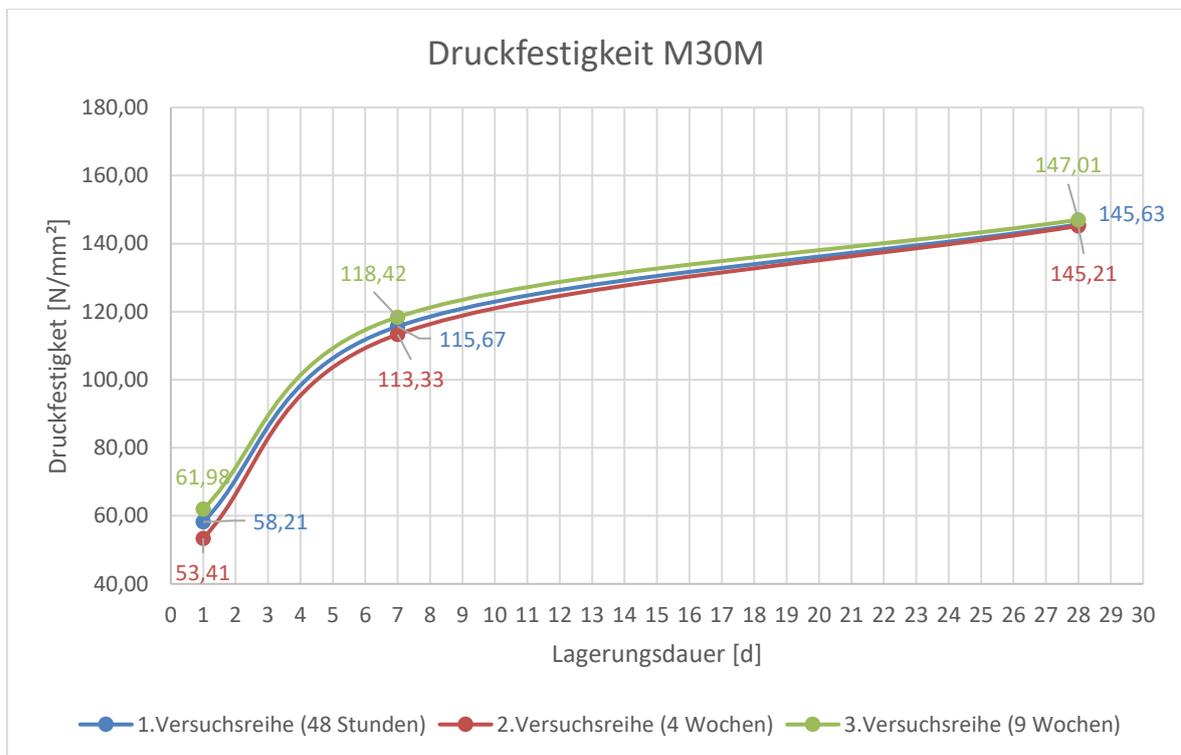


Abb. 63: Druckfestigkeit der Mischung „M30M“

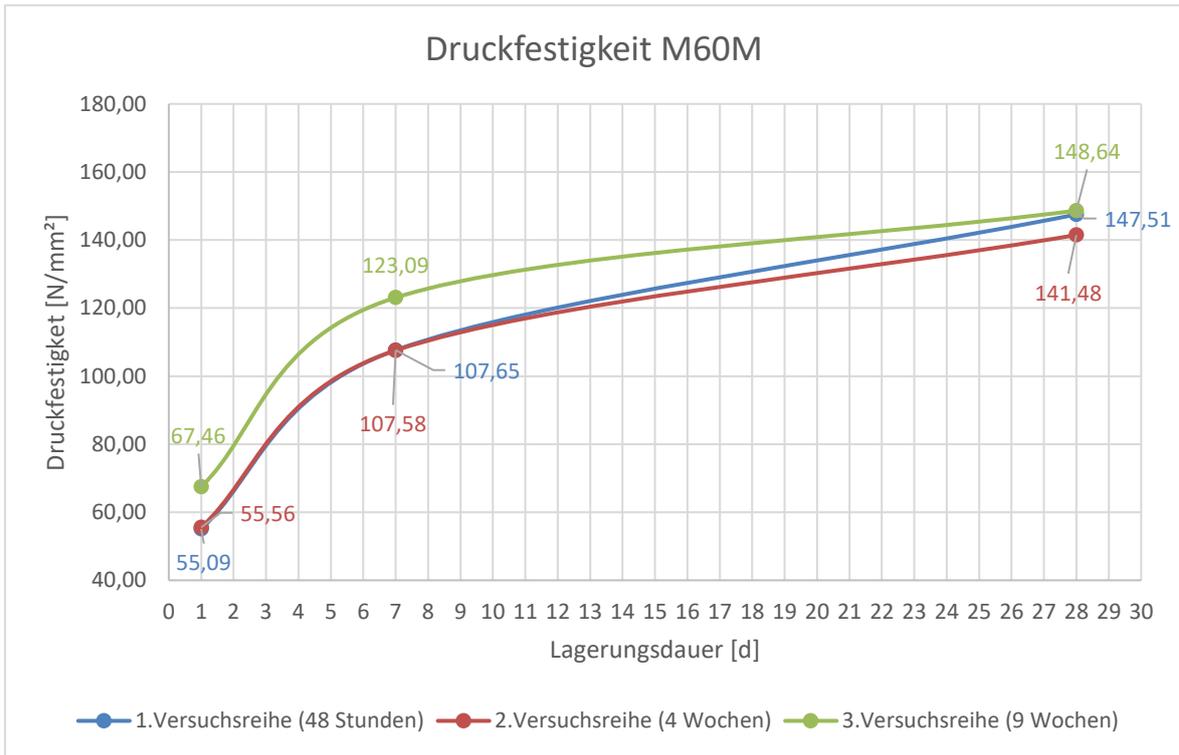


Abb. 64: Druckfestigkeit der Mischung „M60M“

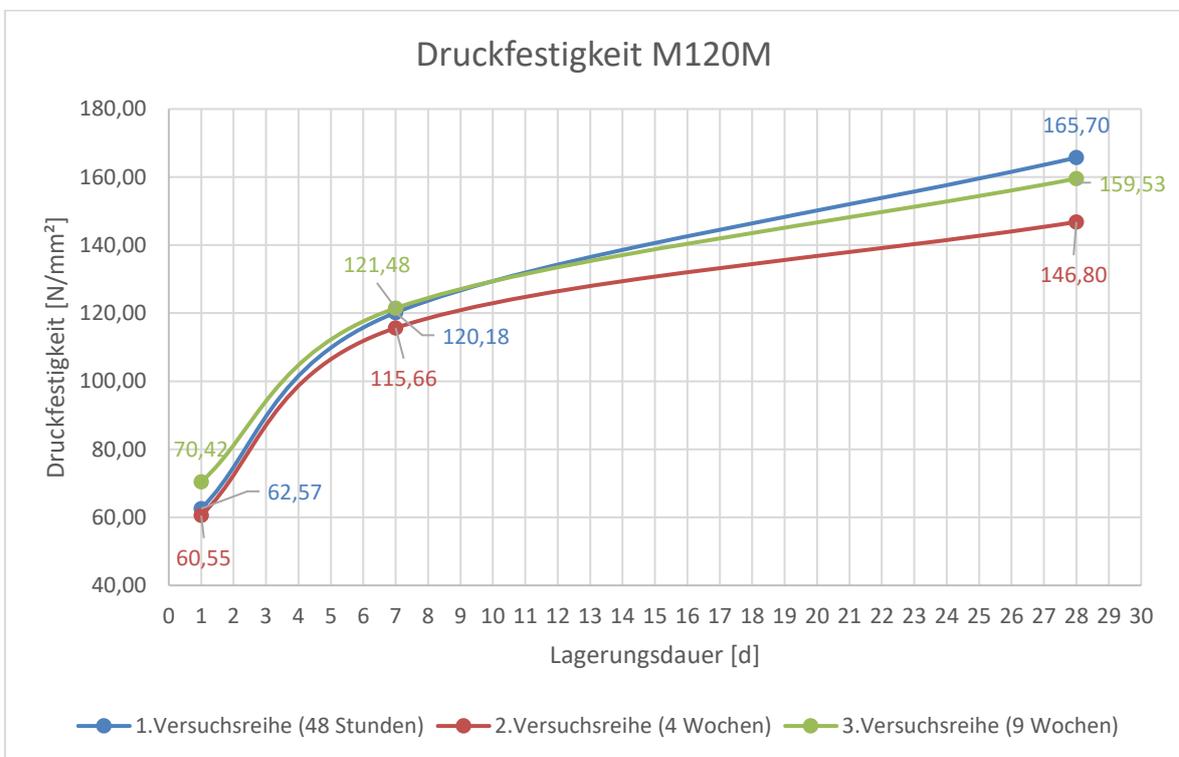


Abb. 65: Druckfestigkeit der Mischung „M120M“

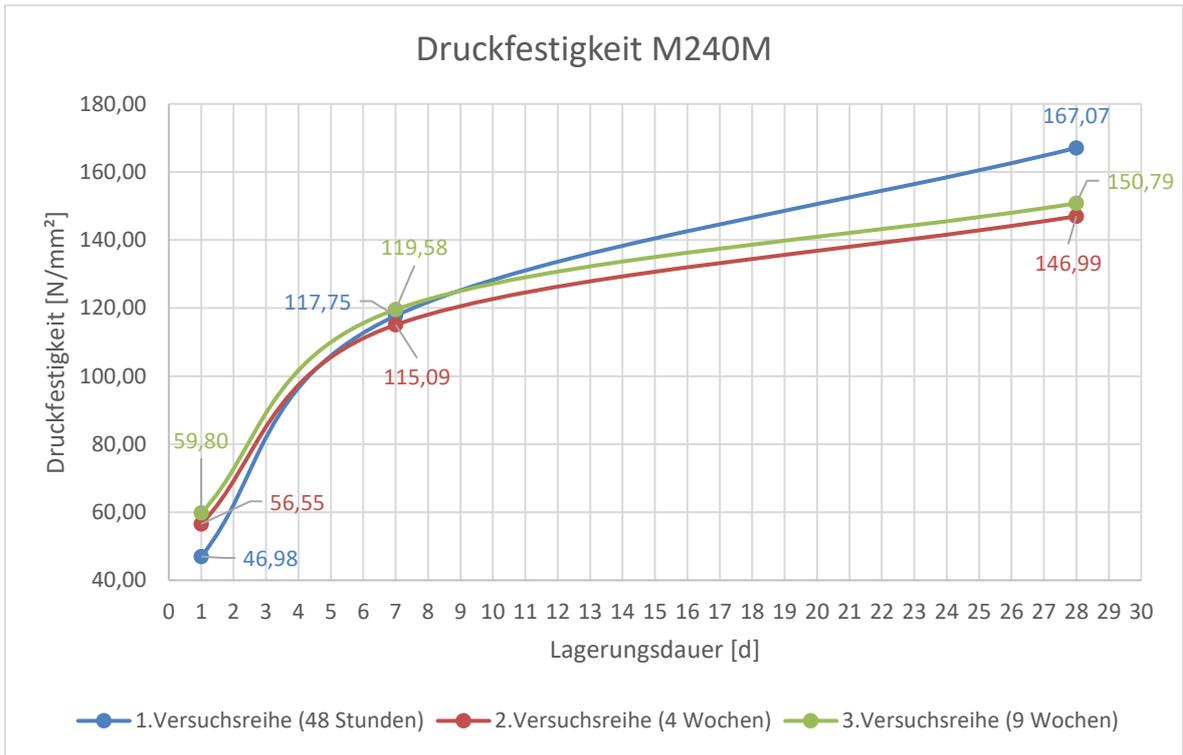


Abb. 66: Druckfestigkeit der Mischung „M240M“

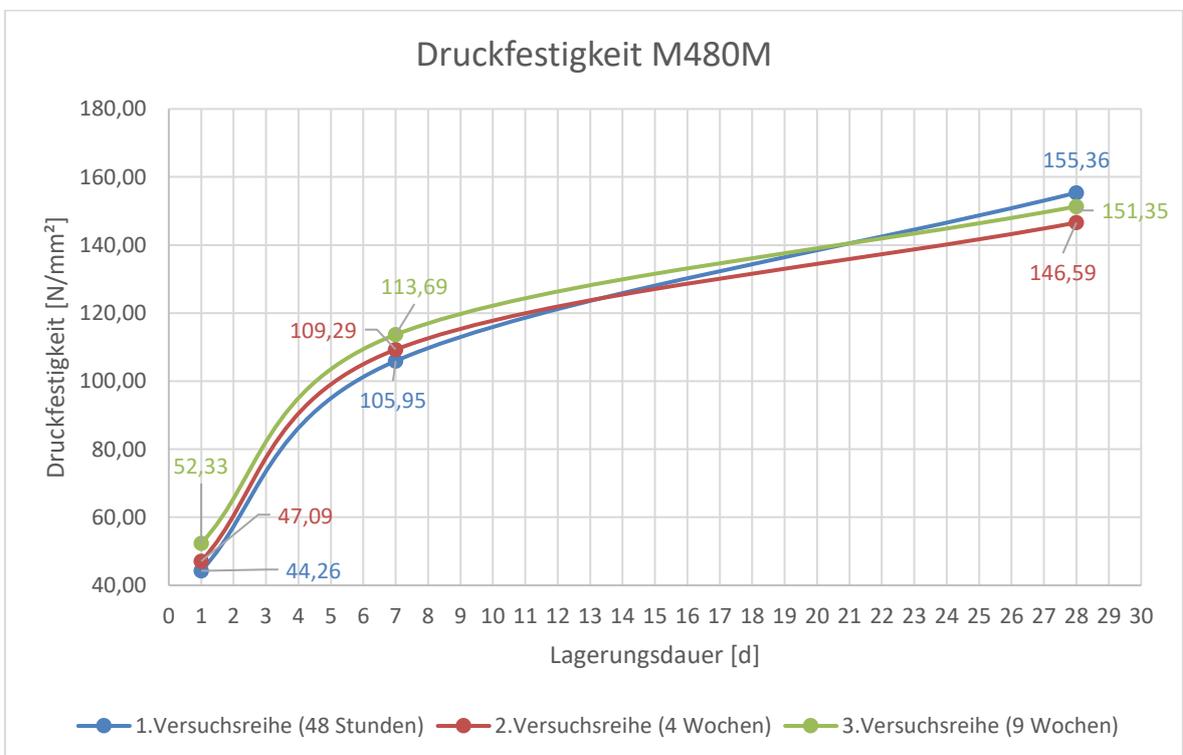


Abb. 67: Druckfestigkeit der Mischung „M480M“

Auch bei den Mischungen „M30M“ bis „M480M“ (Abb. 63 - Abb. 67) erreichen jene der dritten Versuchsreihe zu Beginn die höchsten Druckfestigkeiten. Die Erhärtungsgeschwindigkeiten nehmen jedoch nicht mehr so stark ab wie bei den Mischungen „M1,5M“ bis „M15M“ und weisen nach 28 Tagen Erhärtung nicht mehr die geringsten Druckfestigkeiten, im Vergleich zu den beiden anderen Versuchsreihen, auf. Die Maximalwerte werden hier von den Mischungen der ersten und dritten Versuchsreihe erreicht.

Bereits bei den Biegezugfestigkeiten waren die Mischungen der zweiten Versuchsreihe oft jene, mit den geringsten Festigkeiten. Diese Tendenz ist auch bei den Druckfestigkeiten zu erkennen. Betrachtet man die Verläufe der Druckfestigkeiten, so weisen die Mischungen der zweiten Versuchsreihe meist die geringeren Werte auf.

### **Zusammenfassung Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Alters des Prämixes:**

Aus den Ergebnissen der Druckfestigkeitsversuche können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die besten Anfangsfestigkeiten werden bei nahezu jeder Mischdauer von der dritten Versuchsreihe (neun Wochen alter Prämix) erreicht. Mit Ausnahme der Mischung „M15M“ der ersten Versuchsreihe werden durch die Mischungen der dritten Versuchsreihe die höchsten 24-Stunden- und Sieben-Tagesfestigkeiten erreicht. Jedoch kann nicht gesagt werden, dass mit zunehmendem Alter des Prämixes diese auch immer größer wird, da die Festigkeiten der ersten Versuchsreihe zum Großteil besser sind als jene der zweiten Versuchsreihe.
- Die geringsten 24-Stunden- und Sieben-Tagesfestigkeiten ergeben sich aus den Mischungen der zweiten Versuchsreihe. Betrachtet man die 28-Tagesfestigkeit werden bei den kürzeren Mischdauern die Maximalwerte durch die zweite Versuchsreihe erzielt. Jedoch werden ab einer Mischdauer von 30 Minuten auch bei der 28-Tagesfestigkeit die geringsten Werte durch die zweite Versuchsreihe erreicht. Auch hier kann nicht eindeutig gesagt werden welches Alter des Prämixes am geeignetsten ist, da sich die Maximalwerte der 28-Tagesfestigkeiten abwechseln.

### Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Mischdauer

In den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 68 - Abb. 70) ist die Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Mischdauer des Prämixes dargestellt. Die drei Versuchsreihen wurden auch hier wieder getrennt betrachtet.

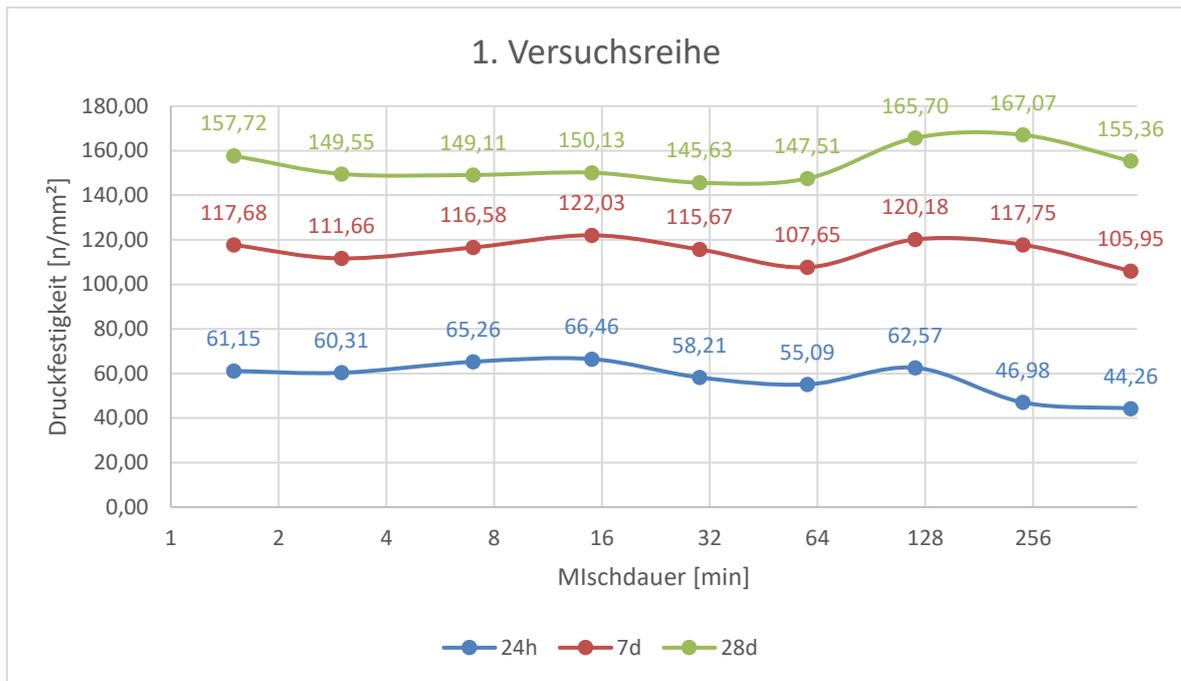


Abb. 68: Verlauf Druckfestigkeit 1. Versuchsreihe

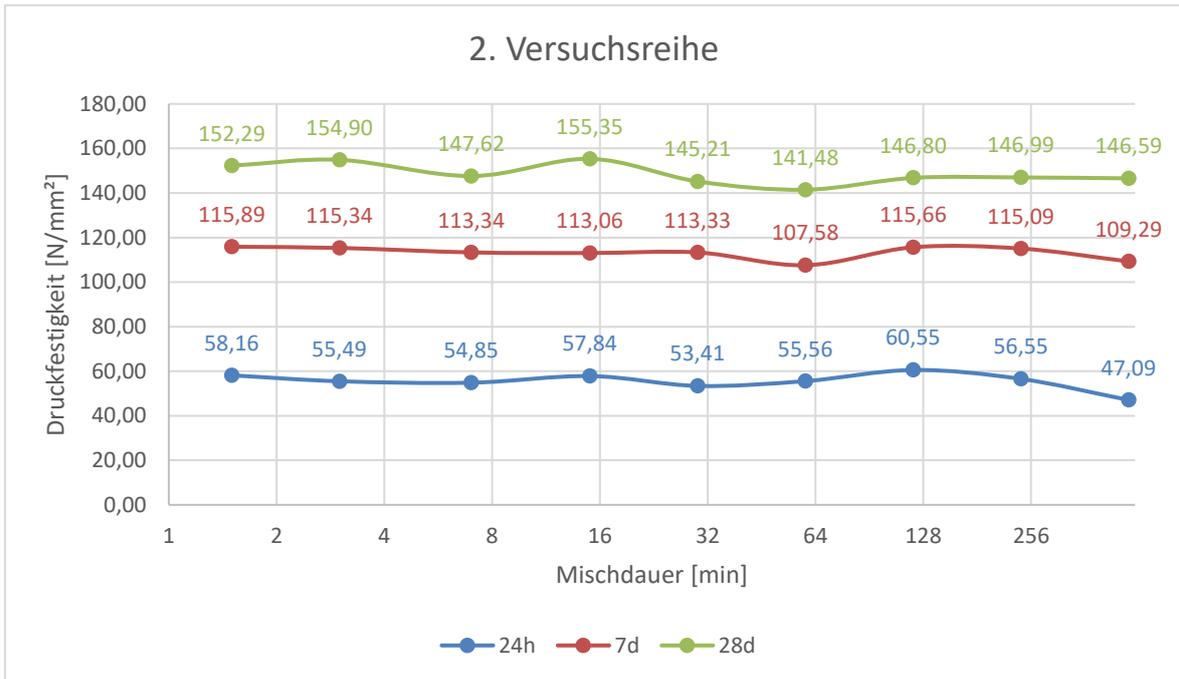


Abb. 69: Verlauf Druckfestigkeit 2. Versuchsreihe

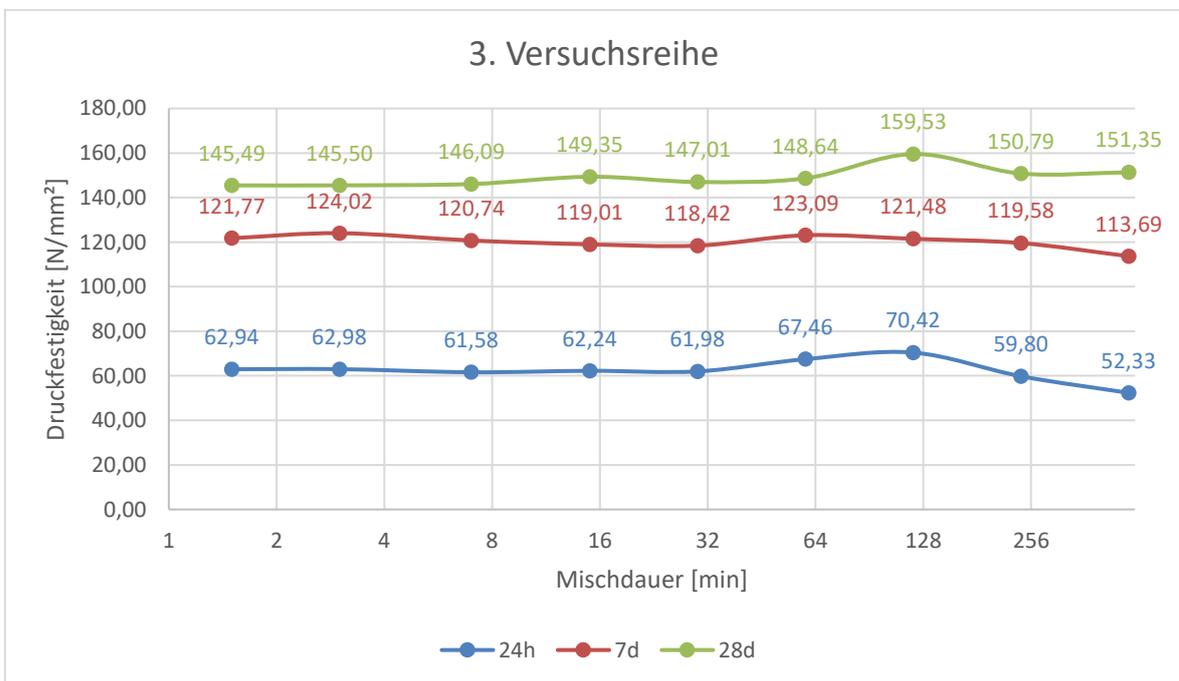


Abb. 70: Verlauf Druckfestigkeit 3. Versuchsreihe

Bis auf einige wenige Abweichungen der Verläufe in den oben dargestellten Diagrammen sind die Verläufe der einzelnen Versuchsreihen sehr ähnlich.

Bei den Festigkeiten der ersten Versuchsreihen werden die Maximalwerte bei einer Mischdauer im Bereich von 120 und 240 Minuten erreicht.

Das Maximum bei der 28-Tagesfestigkeit der zweiten Versuchsreihe wird bei einer Mischdauer von 15 Minuten erreicht. Bei den 24-Stunden- und Sieben-Tagesfestigkeiten werden bei einer Mischdauer von 120 Minuten wieder sehr gute Festigkeiten erreicht.

In der dritten Versuchsreihe werden die Maximalwerte, unter Ausnahme der Sieben-Tagesfestigkeit, erneut bei einer Mischdauer von in etwa 120 Minuten erreicht.

### **Zusammenfassung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Mischdauer**

Aus den oben gezeigten Verläufen lassen sich folgende Rückschlüsse ziehen:

- Anders als bei den Verläufen der Biegezugfestigkeiten sind die Verläufe hier gleichmäßiger. Lediglich bei der 28-Tagesfestigkeit der zweiten Versuchsreihe sind bei einer Mischdauer von 15 Minuten kleinere Abweichungen ersichtlich.
- Bei allen drei Versuchsreihen lässt sich rückschließen, dass bei einer Mischdauer von ca. 120 Minuten sehr gute Festigkeiten erreicht werden. Somit kann gesagt werden, dass sich bei unterschiedlich alten Prämixen die geeignete Mischdauer nicht ändert.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, wie sich das Alter eines Prämixes und dessen Trockenmischdauer auf die Frischbetoneigenschaften sowie auf die Festbetoneigenschaften auswirkt. Aufgrund der Ergebnisse kann behauptet werden, dass das Alter eines Prämixes kaum einen Einfluss auf die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften hat. Um dies jedoch bestätigen zu können, müssten Versuche an Prämixen mit noch längerer Lagerungsdauer durchgeführt werden. Bei der Trockenmischdauer des Prämixes hingegen wurden bei einer Mischdauer von etwa 120 Minuten meist die besten Druckfestigkeiten erreicht. Somit kann behauptet werden, dass die Mischdauer ein wichtiges Kriterium bei der Herstellung von Beton darstellt.

Am Frischbeton wurden das Ausbreitmaß, die Trichterauslaufzeit, der Luftgehalt, die Rohdichte, die Partikelgrößenverteilung, die Hydratation sowie die Thixotropie untersucht. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse des Hydratationswärmeverlaufs sowie die Ergebnisse der Partikelgrößenverteilungen gezeigt. Die restlichen Untersuchungen sind in der Diplomarbeit „Untersuchung der rheologischen Eigenschaften von UHPC-Prämix“ von *Maximilian Mayerhofer* nachzulesen. Nach Durchführung dieser Prüfungen wurde der Frischbeton für 24 Stunden in genormte Prismenschalungen gegeben und darauffolgend die 24-Stunden-, Sieben-Tages-, und 28-Tagesfestigkeit untersucht.

### Frischbetoneigenschaften

Nach Auswertung und Vergleich der jeweiligen Hydratationswärmeverläufe sind größere Unterschiede zwischen den Versuchsreihen zu erkennen. Die Mischungen der ersten Versuchsreihe waren stets jene mit den höchsten Temperaturverläufen, dies ist aufgrund des kurzen Zeitraums zwischen Herstellung des Prämixes und Herstellung des Frischbetons (48 Stunden) zu erklären. Aufgrund der langen Mischdauern stiegen die Temperaturen des Prämixes, welche nach 48 Stunden noch nicht gänzlich abgekühlt sind. Demnach kann gesagt werden, dass das Alter eines Prämixes einen Einfluss auf den Hydratationswärmeverlauf hat, da mit zunehmendem Alter die Temperaturen des Prämixes abnehmen. Leider war bei der

zweiten Versuchsreihe die Umgebungstemperatur um zwei Grad Celsius geringer als jene bei der ersten und dritten Versuchsreihe. Bereits dies wirkte sich stark auf den Hydratationswärmeverlauf der zweiten Versuchsreihe aus, wodurch diese Versuchsreihe nicht wirklich mit den beiden anderen zu vergleichen war.

Die Partikelgrößenverteilungen zeigen bei allen drei Versuchsreihen ein ähnliches Bild. Bei immer länger werdender Mischdauer wurde der Anteil an größeren Partikeln aufgrund der Bildung von Agglomeraten vergrößert, wodurch in weiterer Folge der Anteil an kleineren Partikeln sank.

### **Festbetoneigenschaften**

An allen drei Versuchsreihen wurde die 24-Stunden-, Sieben-Tages- und 28-Tagesfestigkeiten überprüft. Die ersten Versuche wurden also unmittelbar nach dem Ausschalen durchgeführt. Geprüft wurden die Biegezugfestigkeit sowie die Druckfestigkeit.

Bei den Biegezugfestigkeiten ist immer zu beachten, dass diese meist große Streuungen aufweisen. Schon kleinste Hohlräume im Bereich der Bruchfläche können die Biegezugfestigkeit stark reduzieren.

Die besten Biegezugfestigkeiten wurden meist bei der ersten Versuchsreihe erzielt, gefolgt von der dritten Versuchsreihe. Die geringsten Festigkeiten konnten bei der zweiten Versuchsreihe ermittelt werden. Aufgrund dieser Reihenfolge kann leider nicht gesagt werden, ob mit zunehmendem Alter des Prämixes die Biegezugfestigkeit negativ beeinflusst wird. Um zu untersuchen, ob sich dieser Trend bei längerer Mischdauer fortsetzen würde, müssten Versuche an Prämixen mit noch längeren Mischdauern durchgeführt werden.

Eine geeignete Mischdauer kann nur bei der ersten Versuchsreihe herausgelesen werden. Bei 15 Minuten Trockenmischdauer wurden hier die besten Werte erzielt. Bei der zweiten und dritten Versuchsreihe sind keine einheitlichen Verläufe zu erkennen. Die Maximalwerte der Biegezugfestigkeit wurden bei diesen beiden Verläufen nicht bei den gleichen Mischdauern erreicht. Somit ist es nicht möglich eine geeignete Mischdauer zu nennen.

Bei den Druckfestigkeiten wurden die besten 24-Stunden und Sieben-Tagesfestigkeiten zum Großteil durch die dritte Versuchsreihe erreicht, gefolgt von jenen der ersten Versuchsreihe. Durch die zweite Versuchsreihe wurden die schlechtesten Druckfestigkeiten erreicht. Somit kann auch hier nicht gesagt werden, dass die Druckfestigkeiten mit zunehmendem Alter des Prämixes immer besser werden. Hinsichtlich der 28-Tagesfestigkeit wechselten sich die Maximalwerte bei den drei Versuchsreihen ab. Also ist auch hier keine eindeutige Tendenz zu erkennen.

Bei den Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Mischdauer ist ein einheitlicheres Bild als wie bei den Verläufen der Biegezugfestigkeit zu erkennen. Es kann gesagt werden, dass bei einer Mischdauer von in etwa 120 Minuten meist sehr gute Werte erzielt werden.

Betrachtet man die in dieser Arbeit gezeigten Versuchsergebnisse kann gesagt werden, dass das Alter eines Prämixes:

- die Partikelgrößenverteilung kaum beeinflusst.
- den Hydratationswärmeverlauf beeinflusst.
- die Biegezugfestigkeit kaum beeinflusst.
- die Druckfestigkeit kaum beeinflusst.

Um dies jedoch zu bestätigen müssten weitere Versuche an Prämixen durchgeführt werden, welche mehrere Monate alt sind.

Weiters beeinflusst die Mischdauer die Betoneigenschaften wie folgt:

- Bei den Verläufen der Biegezugfestigkeiten kann nur bei der ersten Versuchsreihe eine geeignete Mischdauer herausgelesen werden (15 Minuten). Bei der zweiten und dritten Versuchsreihe hingegen weisen die Verläufe der Biegezugfestigkeit, in Abhängigkeit der Mischdauer, zu große Streuungen auf um eine optimale Mischdauer nennen zu können.

- Bei den Verläufen der Druckfestigkeiten sind regelmäßigeren Verläufe zu erkennen. Es kann gesagt werden, dass bei einer Mischdauer von 120 Minuten stets sehr gute Festigkeitswerte erreicht wurden.

## Quellenverzeichnis

### Dissertationen/Diplomarbeiten/Bachelorarbeiten

**Kirnbauer, Johannes:** Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete. Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. 2013.

**Stangl, Albert:** Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. – Wien: TU – Fakultät für Bauingenieurwesen, Dipl. Arb., 2011.

**Sacherl, Simon:** Einfluss der Mischdauer auf das Festigkeitsverhalten von Hochleistungsbeton. – Wien: FH – Campus Wien, Bac. Arb., 2014.

### Monographien und Sammelwerke

**Bruckner, Heinrich:** Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2012/13.

**Bruckner, Heinrich:** Frischbeton Fachhochschule.- Wien: FH Campus Wien, Skriptum. SS 2013.

**Thienel, Karl-Christian:** Sonderbetone.- München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Wintertrimester 2011.

**König, Horst:** Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung. 2. Auflage. Verlag Vieweg+Teubner Verlag 2008.

**Kraume, Matthias:** Mischen und Rühren: Grundlagen und moderne Verfahren. Weinheim: Verlag GmbH & Co. KGaA 2003.

**Peck, Martin:** Baustoff Beton. Planung Ausführung Beispiele. 1. Auflage. München: 2005.

**Richter, Thomas:** Hochfester Beton – Hochleistungsbeton. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 1999.

**Schneider, Ulrich:** Schriftreihe des Institut für Hochbau und Technologie Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz Heft 13. 1. Auflage. Wien: TU – Institut für Hochbau und Technologie 2008.

**Weber, Robert:** Kies und Sand für Beton. Duisburg: Verlag Bau+Technik 2003.

## Normen

**Österreichisches Normungsinstitut:** ÖNORM B 3303. Betonprüfung. 01.09.2002

**Österreichisches Normungsinstitut:** ÖNORM EN 12350-6. Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte. 15.07.2009

**Österreichisches Normungsinstitut:** ÖNORM EN 12350-7. Prüfung von Frischbeton: Luftgehalt - Druckverfahren. 15.07.2009

**Österreichisches Normungsinstitut:** ÖNORM EN 196-1. Prüfverfahren für Zement – Teil1: Bestimmung der Festigkeit. 01.04.2005

**Österreichisches Normungsinstitut:** ÖNORM EN 459-2. Teil2: Prüfverfahren. 15.12.2010

## Internet

In: URL: <http://faculty.etsu.edu/kortumr/09rome/htmldescriptionpages/14pantheon-2.htm> (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Petronas\\_Towers](http://en.wikipedia.org/wiki/Petronas_Towers) (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pierre-Pflimlin-Br%C3%BCcke> (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: [http://www.this-magazin.de/artikel/tis\\_Strassen-zukunftsf%C3%A4hig\\_machen\\_2714458.html](http://www.this-magazin.de/artikel/tis_Strassen-zukunftsf%C3%A4hig_machen_2714458.html) (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: [http://www.this-magazin.de/artikel/tis\\_Strassen-zukunftsf%C3%A4hig\\_machen\\_2714458.html](http://www.this-magazin.de/artikel/tis_Strassen-zukunftsf%C3%A4hig_machen_2714458.html) (letzter Zugriff 26.03.2018)

In: URL: <http://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (letzter Zugriff 26.03.2018)

- In: URL: <https://structurae.de/bauwerke/gulfaks-b> (letzter Zugriff 27.03.2018)
- In: URL: <http://www.lafarge.at/zement/alles-ueber-zement/herstellungs-prozess/> (letzter Zugriff 27.03.2018)
- In: URL: <http://www.bvfs.at/hm/pub/hlbeton.htm> (letzter Zugriff 28.03.2018)
- In: URL: <https://www.beton.wiki/index.php?title=Sieblinie> (letzter Zugriff 28.03.2018)
- In: URL: [https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/-101444/OENORM\\_EN\\_1008\\_2002\\_10\\_01;jsessionid=C4F7B467CED182150BCE38C4B13A51AB](https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/-101444/OENORM_EN_1008_2002_10_01;jsessionid=C4F7B467CED182150BCE38C4B13A51AB) (letzter Zugriff 30.03.2018)
- In: URL: <http://www.ebbecke-verfahrenstechnik.de/unternehmen/lexikon/-agglomerate.html>
- In: URL: <https://www.malvernpanalytical.com/de/products/product-range/-mastersizer-range/mastersizer-3000> (letzter Zugriff 03.04.2018)
- In: URL: <https://www.beton.wiki/index.php?title=Hydratation> (letzter Zugriff 07.04.2018)
- In: URL: <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/B29.pdf> (letzter Zugriff 07.04.2018)
- In: URL: <http://www.bhs-sonthofen.de/de/produkte/-mischtechnik/einwellen-durchlaufmischer.html> (letzter Zugriff 02.04.2018)
- In: URL: <http://www.bhs-sonthofen.de/de/-produkte/mischtechnik/doppelwellen-chargenmischer.html> (letzter Zugriff 02.04.2018)
- In: URL: <http://www.eirich.de/de/mischprinzip> (letzter Zugriff 02.04.2018)
- In: URL: <http://www.eirich.de/de/mischer-chargenweise> (letzter Zugriff 02.04.2018)
- In: URL: [https://www.tuwien.ac.at/ausstattung/mechanische\\_charakterisierung-/pruefmaschine\\_zwick\\_z250/](https://www.tuwien.ac.at/ausstattung/mechanische_charakterisierung-/pruefmaschine_zwick_z250/) (letzter Zugriff 05.07.2018)

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Pantheon in Rom, Innenansicht    Außenansicht .....	3
Abb. 2: „Petronas Twin Towers“, .....	5
Abb. 3: „Pierre-Pfilimlin-Brücke“, Altenheim/ Eschau im Elsass .....	6
Abb. 4: „Whitetopping: Instandsetzung bzw. Ertüchtigung von geschädigten oder unterdimensionierten Decken aus Asphalt oder Beton“ .....	7
Abb. 5: Bohr-/Förderplattform: Gullfaks B .....	7
Abb. 6: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/B-Wertes .....	12
Abb. 7: Grober Zuschlag ohne (links) und mit (rechts) Füllkörner .....	14
Abb. 8: Beispiel Sieblinienverlauf .....	14
Abb. 9: Hohlraum mit (rechts) und ohne Quarzmehl (links).....	15
Abb. 10: Vergleich Mikrostruktur von Normalbeton, Hochfester Beton und Ultrahochfester Beton.....	20
Abb. 11: Auftrennung der Zementteilchen .....	21
Abb. 12: Mastersizer 3000 .....	23
Abb. 13: Kontaktflächen .....	25
Abb. 14: Hydratationsgrad in Abhängigkeit des W/B-Wertes .....	26
Abb. 15: Wärmeentwicklung unterschiedlicher Betonklassen .....	27
Abb. 16: Biegezugversuch.....	30
Abb. 17: Druckfestigkeitsversuch .....	31
Abb. 18: Einwellen-Durchlaufmischer.....	33
Abb. 19: Doppelwellen-Chargenmischer (DKX) .....	33
Abb. 20: Mischprinzip .....	34
Abb. 21: Bestandteile Trockenprämix und Behälter mit Flüssigprämix.....	38
Abb. 22: Intensivmischer R08W der Fa. <i>Eirich</i> .....	39
Abb. 23: Lagerungsdauer der Prämixe bis zur Frischbetonherstellung .....	41
Abb. 24: Intensivmischer R02 Vac (links) und Stiftenwirbler (rechts) .....	42
Abb. 25: Versuchsablauf bis zur Frischbetonprüfung .....	45
Abb. 26: Mastersizer 3000 mit Nassmodul und Nassmesszelle .....	46
Abb. 27: Ausschnitt aus Excel-Tabelle .....	48
Abb. 28: Partikelgrößenverteilung M15M .....	49
Abb. 29: Mittelwert Partikelgrößenverteilung M15M .....	50
Abb. 30: Partikelgrößenverteilungen der ersten Versuchsreihe .....	51
Abb. 31: Partikelgrößenverteilungen der zweiten Versuchsreihe .....	52
Abb. 32: Partikelgrößenverteilungen der dritten Versuchsreihe .....	53
Abb. 33: Verlauf Packungsdichte .....	56
Abb. 34: Versuchsablauf der Mischung „M15M“ .....	58

Abb. 35: Genormte Prismenschalung.....	59
Abb. 36: Hydratationswärmeverlauf M1,5M .....	61
Abb. 37: Hydratationswärmeverlauf M3M .....	61
Abb. 38: Hydratationswärmeverlauf M7M .....	62
Abb. 39: Hydratationswärmeverlauf M15M .....	63
Abb. 40: Hydratationswärmeverlauf M30M .....	64
Abb. 41: Hydratationswärmeverlauf M60M .....	65
Abb. 42: Hydratationswärmeverlauf M120M .....	65
Abb. 43: Hydratationswärmeverlauf M240M .....	66
Abb. 44: Hydratationswärmeverlauf M480M .....	67
Abb. 45: Elektromechanische Prüfmaschine Zwick Z250.....	70
Abb. 46: Biegezugfestigkeit der Mischung „M1,5M“ .....	71
Abb. 47: Biegezugfestigkeit der Mischung „M3M“ .....	72
Abb. 48: Biegezugfestigkeit der Mischung „M7M“ .....	72
Abb. 49: Biegezugfestigkeit der Mischung „M15M“ .....	73
Abb. 50: Biegezugfestigkeit der Mischung „M30M“ .....	73
Abb. 51: Biegezugfestigkeit der Mischung „M60M“ .....	74
Abb. 52: Biegezugfestigkeit der Mischung „M120M“ .....	74
Abb. 53: Biegezugfestigkeit der Mischung „M240M“ .....	76
Abb. 54: Biegezugfestigkeit der Mischung „M480M“ .....	76
Abb. 55: Verlauf Biegezugfestigkeit 1. Versuchsreihe.....	78
Abb. 56: Verlauf Biegezugfestigkeit 2. Versuchsreihe.....	79
Abb. 57: Verlauf Biegezugfestigkeit 3. Versuchsreihe.....	79
Abb. 58: Vollautomatische Prüfmaschine der Fa: <i>Toni Technik</i> .....	81
Abb. 59: Druckfestigkeit der Mischung „M1,5M“ .....	83
Abb. 60: Druckfestigkeit der Mischung „M3M“ .....	83
Abb. 61: Druckfestigkeit der Mischung „M7M“ .....	84
Abb. 62: Druckfestigkeit der Mischung „M15M“ .....	84
Abb. 63: Druckfestigkeit der Mischung „M30M“ .....	85
Abb. 64: Druckfestigkeit der Mischung „M60M“ .....	86
Abb. 65: Druckfestigkeit der Mischung „M120M“ .....	86
Abb. 66: Druckfestigkeit der Mischung „M240M“ .....	87
Abb. 67: Druckfestigkeit der Mischung „M480M“ .....	87
Abb. 68: Verlauf Druckfestigkeit 1. Versuchsreihe .....	89
Abb. 69: Verlauf Druckfestigkeit 2. Versuchsreihe .....	90
Abb. 70: Verlauf Druckfestigkeit 3. Versuchsreihe .....	90

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung laut ÖNORM B4710-1 .....	8
Tabelle 2: Maximale Zugabemenge von Zusatzstoffen des Typs II.....	18
Tabelle 3: Bestandteile .....	37
Tabelle 4: Überblick Mischvorgänge .....	40
Tabelle 5: Lagerungsdauer der Prämixe .....	41
Tabelle 6: Mischung .....	43
Tabelle 7: Ablauf Herstellung Frischbeton je Versuchsreihe .....	44
Tabelle 8: Mittelwert der Umgebungstemperatur während der Hydratation .....	60