

# TU Technische Universität Wien

## Diplomarbeit Master`s Thesis

### **Einfluss des Vakuummischprozesses auf die Herstellung von ultrahochfesten Betonen mit verschiedenen Faserarten**

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

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

Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit  
der Technischen Universität Wien  
eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieure

von  
Gerald Kurka

0325110

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von Dezember 2010 bis März 2012 als Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien und wurde von der dortigen Fakultät für Bauingenieurwesen angenommen.

Ich danke *Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Elemer Bölcskey* für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an diesem Institut durchzuführen und weiters für die Bereitstellung der Laboreinrichtungen und der Baustoffe zur Durchführung der Versuche.

Weiters danke ich meinem Betreuer *Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Kirnbauer* für seine fachliche Unterstützung sowie seine zahlreichen Anregungen, die wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt ebenso *Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner* für seine fachliche Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern *Inge* und *Heinz*, die mir das Studium ermöglichten, mich in allen meinen Plänen und Vorhaben unterstützen und immer für mich da sind.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Einleitung .....                                                       | 1  |
| 1.1 Allgemeines .....                                                     | 1  |
| 1.2 Aufgabe und Ziel dieser Arbeit .....                                  | 2  |
| 1.4 Vorgangsweise .....                                                   | 2  |
| 2. Grundlagen von Ultrahochfesten Betonen .....                           | 4  |
| 2.1 Allgemeines .....                                                     | 4  |
| 2.1.1 Verbesserung der Homogenität .....                                  | 5  |
| 2.1.2 Reduzierung des W/Z-Wertes .....                                    | 6  |
| 2.1.3 Erhöhung der Packungsdichte .....                                   | 7  |
| 2.1.4 Einsatz von Silikastaub .....                                       | 8  |
| 2.2 Ausgangsstoffe .....                                                  | 9  |
| 2.2.1 Zement .....                                                        | 9  |
| 2.2.2 Wasser .....                                                        | 11 |
| 2.2.3 Zuschläge .....                                                     | 12 |
| 2.2.4 Zusatzstoffe .....                                                  | 14 |
| 2.2.5 Zusatzmittel .....                                                  | 16 |
| 2.3 Fasern .....                                                          | 18 |
| 2.3.1 Allgemeines .....                                                   | 18 |
| 2.3.2 Faserarten .....                                                    | 19 |
| 2.3.2.1 Stahlfasern .....                                                 | 22 |
| 2.3.2.2 Glasfasern .....                                                  | 23 |
| 2.3.2.3 Kunststofffasern - Polypropylenfasern .....                       | 24 |
| 2.3.2.4 Kohlenstofffasern .....                                           | 25 |
| 2.3.2.5 Basaltfasern .....                                                | 25 |
| 2.3.2.6 Carbon-Nanotubes .....                                            | 27 |
| 2.3.3 Wirkungsweise von Stahlfasern .....                                 | 29 |
| 2.3.3.1 Verbundwirkungen .....                                            | 29 |
| 2.3.3.2 Bruchmechanische Überlegungen .....                               | 31 |
| 2.3.3.3 Versagensmechanismus bei faserverstärkten Betonen .....           | 33 |
| 2.3.3.4 Auswirkungen der Stahlfasern auf die Festbetoneigenschaften ..... | 34 |
| 2.4 Eigenschaften von UHPC .....                                          | 36 |
| 2.4.1 Allgemeine Eigenschaften .....                                      | 36 |

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 2.4.1.1 Homogenität .....                          | 36 |
| 2.4.1.2 Dichte und Porosität.....                  | 36 |
| 2.4.1.3 Schwinden und Kriechen .....               | 38 |
| 2.4.2 Mechanische Eigenschaften.....               | 40 |
| 2.4.2.1 Druckfestigkeit .....                      | 40 |
| 2.4.2.2 Biegezugfestigkeit.....                    | 41 |
| 2.4.2.3 Elastizitätsmodul .....                    | 41 |
| 2.4.2.4 Bruchenergie und Duktilität .....          | 42 |
| 2.4.2.5 Luft- und Wasserdurchlässigkeit .....      | 43 |
| 2.4.2.6 Brandverhalten .....                       | 44 |
| 2.5 Verwendung und Einsatzgebiete von UHPC .....   | 45 |
| 3. Herstellung und Mischen von UHPC .....          | 53 |
| 3.1 Chemische Vorgänge beim Erhärten .....         | 53 |
| 3.1.1 Hydratationsreaktionen .....                 | 55 |
| 3.1.2 Hydratationsgrad .....                       | 56 |
| 3.2 Das Eirich-Mischprinzip .....                  | 57 |
| 3.3 Vakuummischen .....                            | 59 |
| 3.4 Dosieren und Mischen .....                     | 62 |
| 3.5 Verarbeiten und Verdichten .....               | 63 |
| 3.6 Nachbehandlung.....                            | 64 |
| 4. Versuchsaufbau .....                            | 65 |
| 4.1 Herstellen der Probekörper .....               | 65 |
| 4.1.1 Ausgangsstoffe .....                         | 65 |
| 4.1.2 Mischen des Betons im Labor .....            | 65 |
| 4.1.3 Bestimmung der Frischbetoneigenschaften..... | 67 |
| 4.1.3.1 Mischtemperatur .....                      | 67 |
| 4.1.3.2 Frischbetonrohddichte .....                | 67 |
| 4.1.3.3 Luftporengehalt .....                      | 68 |
| 4.1.3.4 Ausbreitmaß bzw. Setzfließmaß .....        | 69 |
| 4.1.4 Schalung der Probekörper und Lagerung.....   | 71 |
| 4.2 Festbetonprüfungen.....                        | 72 |
| 4.2.1 Festbetonrohddichte.....                     | 72 |
| 4.2.2 Biegezugfestigkeit .....                     | 73 |
| 4.2.3 Druckfestigkeit.....                         | 74 |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.4 Spaltzugfestigkeit .....                                                | 75  |
| 4.2.5 Bestimmung des Elastizitätsmoduls .....                                 | 77  |
| 4.2.6 Schwindversuche .....                                                   | 80  |
| 5. Voruntersuchungen .....                                                    | 82  |
| 5.1 Allgemeines .....                                                         | 82  |
| 5.2 Vorversuch 1: Optimierung des Mischprozesses .....                        | 82  |
| 5.2.1 Allgemeines.....                                                        | 82  |
| 5.2.1.1 Mischprozess 1.....                                                   | 82  |
| 5.2.1.2 Mischprozess 2.....                                                   | 83  |
| 5.2.1.3 Mischprozess 3.....                                                   | 84  |
| 5.2.2 Frischbeton- und Festigkeitsvergleich der 3 Mischprozesse.....          | 85  |
| 5.2.4 Hybrider Mischablauf (Mischprozess 3).....                              | 90  |
| 5.3 Vorversuch 2: Änderung des W/Z-Wertes.....                                | 92  |
| 5.4 Vorversuch 3: Mischung mit Stahlfasern 6mm .....                          | 95  |
| 5.5 Vorversuch 4: Stahlfasercocktail 6mm und 12mm .....                       | 97  |
| 5.6 Vorversuch 5: Änderung des Sandes und Microsilikas.....                   | 99  |
| 5.7 Vorversuch 6: Änderung des W/Z-Werts und des Sand- und Zementgehalts..... | 102 |
| 5.8 Vorversuch 7: Vergleich Zement CEM 42,5 N und CEM 42,5 R.....             | 104 |
| 5.9 Testversuche .....                                                        | 108 |
| 6. Hauptversuche .....                                                        | 114 |
| 6.1 Allgemeines .....                                                         | 114 |
| 6.2 Mischung M 0: Nullmischung .....                                          | 118 |
| 6.3 Mischung M 1: Glasfaser 0,5 Vol% .....                                    | 122 |
| 6.4 Mischung M 2: Glasfaser 1,0 Vol% .....                                    | 127 |
| 6.5 Mischung M 3: Basaltfaser 6mm 1,0 Vol%.....                               | 130 |
| 6.6 Mischung M 4: Basaltfaser 12 mm 1,0 Vol%.....                             | 134 |
| 6.7 Mischung M 5: Polyvinylalkoholfaser .....                                 | 137 |
| 6.8 Mischung M 6: Stahlfaser 6 mm 2,5 Vol%.....                               | 142 |
| 6.9 Mischung M 7: Stahlfaser 12 mm 2,5 Vol%.....                              | 146 |
| 6.10 Mischung M 8: Stahlfaser 6/12 mm 3,5 Vol%.....                           | 150 |
| 6.11 Mischung M 9: Carbon-Nanotubes 0,5 g.....                                | 153 |
| 6.12 Mischung M 10: Carbon-Nanotubes 1,0 g.....                               | 158 |
| 6.13 Mischung M 11: Stahlfaser 6 mm und Carbon-Nanotubes 1,0 g .....          | 162 |
| 6.14 Mischung M 12: Stahlfaser 12 mm und Carbon-Nanotubes 1,0 g .....         | 165 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.15 Mischung M 13: Stahlfaser 6 mm und Polypropylenfaser.....    | 168 |
| 6.16 Mischung M 14: Stahlfaser 12 mm und Polypropylenfaser.....   | 172 |
| 6.17 Mischung M 15: Stahlfaser 6/12 mm und Polypropylenfaser..... | 175 |
| 6.18 Mischung M 16: Stahlfaser 6 mm.....                          | 179 |
| 6.19 Mischung M 17: Stahlfaser 6/12 mm 3,5 Vol%.....              | 182 |
| 6.20 Mischung M 18: Stahlfaser 6/12 mm und Polypropylenfaser..... | 185 |
| 7. Interpretation und Zusammenhänge.....                          | 189 |
| 7.1 Frischbetonergebnisse.....                                    | 189 |
| 7.1.1 Ausbreitmaß.....                                            | 189 |
| 7.1.2 Luftporengehalt .....                                       | 191 |
| 7.1.3 Frischbetonrohddichte.....                                  | 193 |
| 7.2 Festbetonergebnisse .....                                     | 195 |
| 7.2.1 Festbetonrohddichte.....                                    | 195 |
| 7.2.2 Biegezugfestigkeit .....                                    | 198 |
| 7.2.3 Druckfestigkeit.....                                        | 204 |
| 7.2.4 Spaltzugfestigkeit .....                                    | 212 |
| 7.2.5 Elastizitätsmodul .....                                     | 217 |
| 7.2.6 Schwindmaß .....                                            | 220 |
| 8. Zusammenfassung.....                                           | 224 |
| 9. Summary.....                                                   | 226 |
| 10. Anhang.....                                                   | 228 |
| Anhang A: Mischungsberechnung Ausgangsmischung .....              | 228 |
| Anhang B: Schwind- und Gewichtstabellen.....                      | 229 |
| 11. Abbildungsverzeichnis.....                                    | 237 |
| 12. Tabellenverzeichnis.....                                      | 240 |
| 13. Gleichungsverzeichnis.....                                    | 241 |
| 14. Literaturverzeichnis .....                                    | 243 |

# 1. Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Beton ist ein künstlicher Stein. Kies und Sand werden mit einem kalkhaltigen Bindemittel und Wasser zu einem druckfesten Werkstoff zusammengefügt.

Bereits in der Römerzeit wurde der Baustoff Beton verwendet und kam beim Bau des Pantheons von 115 bis 126 n. Chr. in Rom zum Einsatz [1].

Der Baustoff Beton prägt heute wie kein anderer unser Stadt- und Landschaftsbild durch seine großen Bauten, wie Hochhäuser, Parkgaragen, Hallen, Brücken, Türme, Dämme und Tunnels. Zahlreiche betontechnologische Entwicklungen haben in den letzten Jahrzehnten dazu geführt, dass Beton ein noch attraktiverer und leistungsfähigerer Baustoff geworden ist. Im Laufe der Jahre wurde die Druckfestigkeit von Beton immer weiter erhöht, was schließlich zu einem völlig neu entwickeltem Baustoff, dem so genannten ultrahochfesten Beton (UHPC) führte.

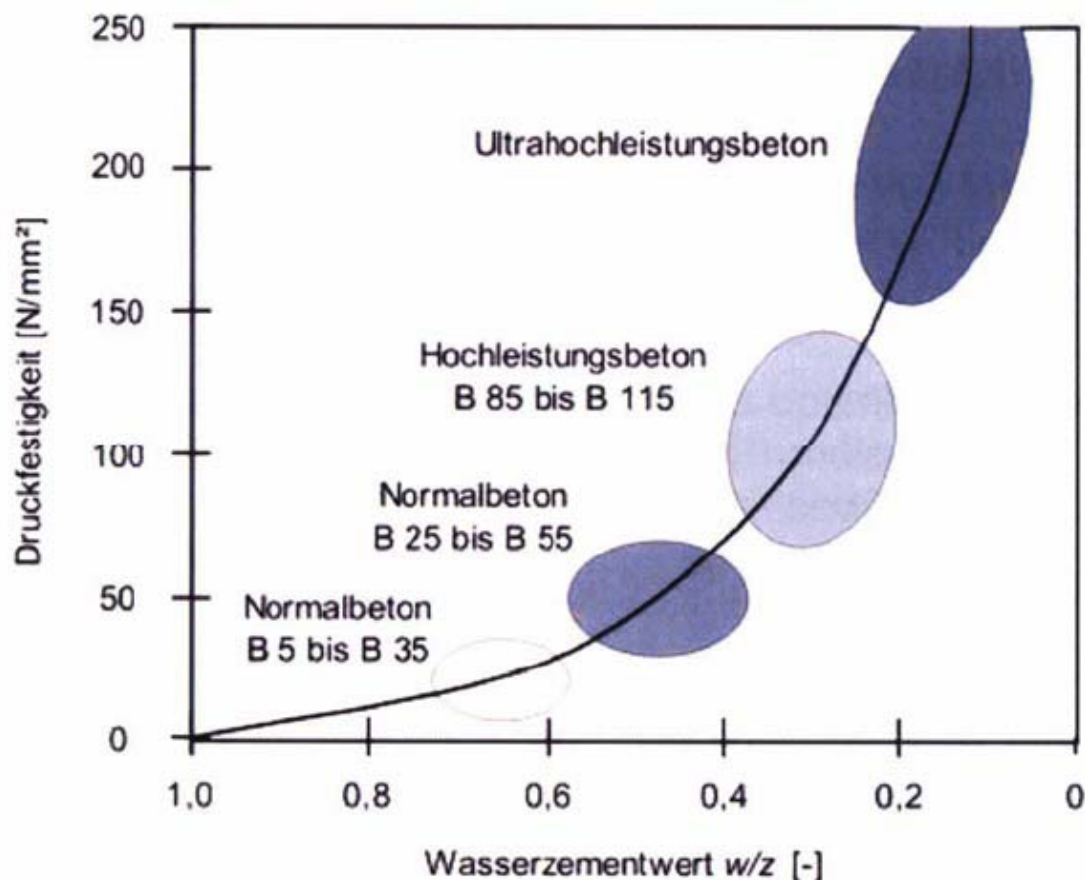


Abbildung 1: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes [10]

Die Abkürzung UHPC steht für **Ultra High Performance Concrete**, also Ultra-Hochleistungsbeton. Im deutschen Sprachgebrauch wird häufig der Ausdruck UHFB – **Ultra Hochfester Beton** verwendet. Die ÖNORM B 4710-1 unterteilt die Betone gemäß ihrer Würfeldruckfestigkeit in die Betonklassen C8/10 bis C100/115. Bis zu einer Druckfestigkeit von rund 60 N/mm<sup>2</sup> spricht man von Normalbeton. Hochleistungsbetone bezeichnet man Betone, die höhere Festigkeiten von 70 bis 150 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Ultrahochfeste Betone weisen Druckfestigkeiten von 150 bis 250 N/mm<sup>2</sup> oder höher auf. In der Abbildung 1 sind die Festigkeitsbereiche einiger Betone in Abhängigkeit des Wasser/Zement-Wertes dargestellt.

## **1. 2 Aufgabe und Ziel dieser Arbeit**

Die Aufgabe dieser Arbeit ist es, den Einfluss des Vakuummischprozesses bei der Herstellung von ultrahochfestem Beton mit verschiedenen Faserarten zu untersuchen. Dabei stehen die Auswirkungen von unterschiedlichen Faserarten und Nachbehandlungsmethoden auf die Festigkeit von ultrahochfestem Beton im Vordergrund.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist ein Vergleich der Frisch- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfesten Betonen mit gleicher Rezeptur, aber

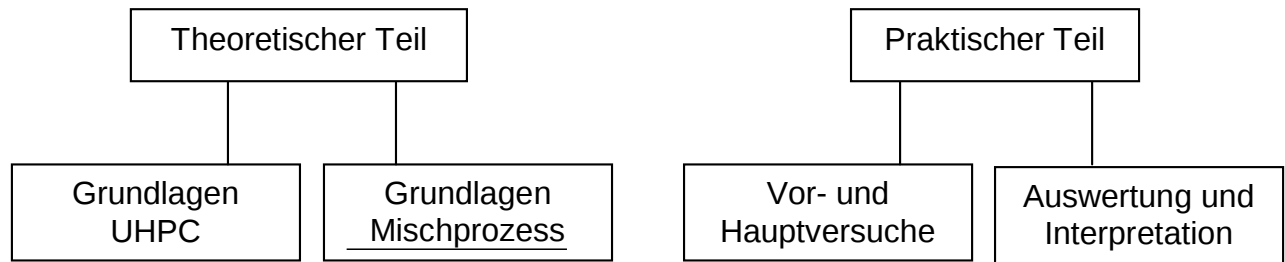
- mit verschiedenen Faserarten und –Mengen sowie
- unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden.

Des Weiteren soll der Einfluss des Vakuummischprozesses auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht und dargestellt werden.

## **1.4 Vorgangsweise**

Die Arbeit gliedert sich in zwei wesentliche Teile, einen theoretischen und einen praktischen Teil. Im theoretischen Teil werden zunächst die Grundlagen des Werkstoffs UHPC vorgestellt und der Mischprozess erklärt.

Der praktische Teil umfasst die Arbeit im Labor (Vor- und Hauptversuche), die Auswertung der Ergebnisse und deren Interpretation. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der im Laufe der durchgeführten Arbeit gewonnenen Erkenntnisse (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2: Aufbau der Diplomarbeit**

### **Grundlagen UHPC**

In diesem Teil der Arbeit werden die Grundlagen des UHPC erläutert. Folgende Kapitel werden in diesem Abschnitt behandelt:

- Allgemeines
- Ausgangsstoffe
- Fasern
- Eigenschaften von UHPC
- Verwendung von UHPC

### **Grundlagen Mischprozess**

In diesem Teil der Arbeit werden die Grundlagen und die Mischung des UHPC erklärt. Folgende Kapitel werden behandelt:

- Herstellung und Mischung
- Vakuummischverfahren

### **Vor- und Hauptversuche**

In diesem Teil der Arbeit werden die Frisch- und Festbetonprüfungen vorgestellt und über die Vorversuche berichtet. Die Vorversuche dienten vor allem zur Findung einer Ausgangsmischung. Dazu wurden aus der Literatur Rezepte für UHPC herangezogen und miteinander verglichen. Danach erfolgten die eigentlichen Hauptversuche. Dabei wurde immer etwas näher auf die einzelnen Mischserien eingegangen und die Ergebnisse angegeben.

Folgend Kapitel werden in diesem Teil behandelt:

- Versuchsaufbau
  - o Frischbetonprüfung
  - o Festbetonprüfung
- Vorversuche
- Hauptversuche

### **Auswertung und Interpretation**

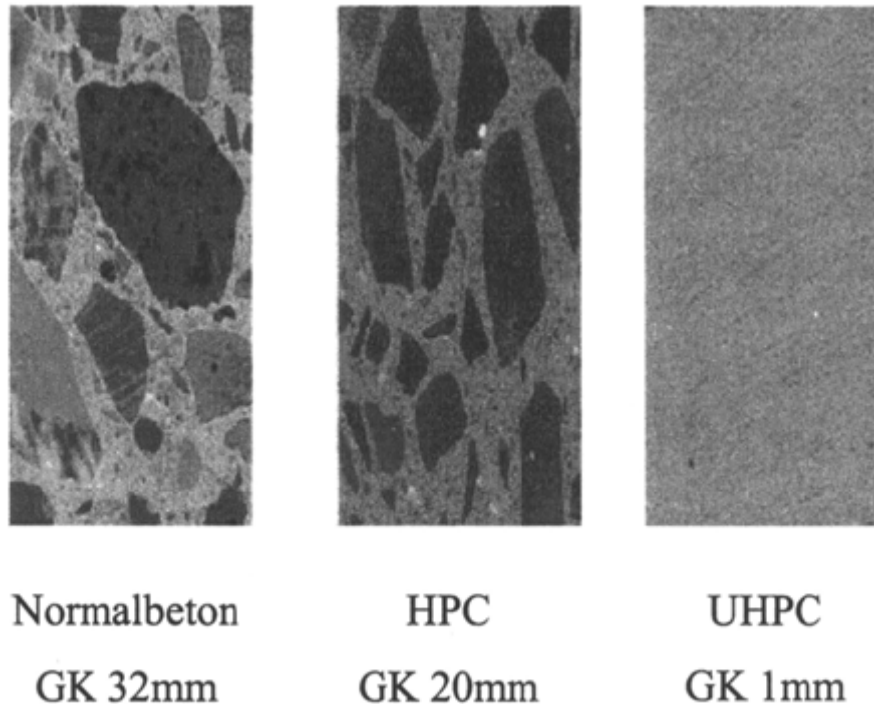
Die Ergebnisse der Hauptversuche wurden ausgewertet und mit den einzelnen Mischserien verglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend zusammengefasst. Dieser Teil gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Auswertung und Interpretation der Ergebnisse
- Zusammenfassung

## **2. Grundlagen von Ultrahochfesten Betonen**

### **2.1 Allgemeines**

Ultrahochfester Beton, englisch Ultra High Performance Concrete oder kurz UHPC, ist ein gefügedichter Beton der ein Größtkorn von  $< 1$  mm aufweist. Durch die Verwendung von feinen Zuschlägen, als auch der Zugabe von Microsilika als Füllstoff können ultrahochfeste Betone eine Druckfestigkeit von über  $150 \text{ N/mm}^2$  erzielen. Durch die Zugabe von Fasern kann die Festigkeit noch weiter gesteigert werden. Ein niedriger W/B-Wert ist ein weiteres besonderes Merkmal von Ultrahochfesten Betonen. Um W/B-Werte von  $< 0,2$  zu erzielen, und gleichzeitig eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, müssen hochleistungsfähige Fließmittel beigemischt werden. UHPC ist aufgrund seiner feinen Bestandteile ein nahezu homogener Baustoff, der sich durch seine hervorragenden Eigenschaften bezüglich seiner Festigkeit und Dauerhaftigkeit auszeichnet [4].



**Abbildung 3: Mikrostruktur von Normalbeton, HPC und UHPC [4]**

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der Mikrostruktur von Normalbeton, Hochfestem Beton und Ultrahochfestem Beton. Der Durchmesser des Grobkorns ist ebenfalls angegeben. Während bei Normalbeton und Hochfesten Betonen Größtkörner mit 32 bzw. 20 mm Durchmesser verwendet werden, liegt die Grenze des maximalen Korndurchmessers bei 1 mm, d.h. UHPC wird meist als Feinkornbeton ausgeführt. Es ist aber trotzdem möglich, auch mit Größtkorn bis 16mm UHPC herzustellen. Solche Grobkorn-UHPC erreichen aber üblicherweise nicht solche extreme Festigkeiten. Die höheren Festigkeiten des UHPC beruhen im Allgemeinen auf folgenden Prinzipien:

### **2.1.1 Verbesserung der Homogenität**

Für die Verbesserung der bruchmechanischen Eigenschaften bei UHPC ist die Minimierung von Gefügestörungen eines der wichtigsten Aspekte. Die im Beton enthaltenen Poren und Mikrorisse können durch die Wahl der Ausgangsstoffe, einer entsprechenden Verarbeitung und Nachbehandlung wesentlich reduziert werden. Bei UHPC wird durch die Verwendung von kleinen Korngrößen und des Gesteinskörnungsgehaltes der E-Modul der Bindematrix erhöht. Dadurch wird die

Homogenität zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix im Vergleich zu Normalbeton wesentlich verbessert und lokale Spannungsspitzen verringert [3]. Ein weiterer Effekt, der durch die Verringerung des Volumenverhältnisses von Gesteinskörnung zu Bindemittelmatrix auftritt, ist, dass die Gesteinskörnung kein steifes Skelett ausbilden kann, welches einer globalen Volumenreduktion durch Temperaturänderungen, Schwinden oder äußeren Belastungen der Zementsteinmatrix entgegenwirkt. Somit können beim UHPC Mikrorisse infolge von Zug- und Scherspannungen im Verbundbereich Zementsteinmatrix/Gesteinskörnung vermieden werden [46].

### 2.1.2 Reduzierung des W/Z-Wertes

Ein weiteres Merkmal von UHPC gegenüber von Normalbeton ist die Reduzierung des W/Z-Wertes. Dadurch kann die Porosität und der Anteil der Kapillarporen in der Zementsteinmatrix verringert werden. Bei einer vollständigen Hydratation des Zementsteins ( $w/z = 0,38$ ) weist der Zementstein eine Porosität von ca. 28 Vol.-% auf. Bei UHPC wird der Wassergehalt meist auf W/Z-Werte  $< 0,25$  reduziert. Dadurch hydratisieren die großen Zementpartikel nur oberflächlich. Die nicht hydratisierten Kerne liegen als feste und dichte Bestandteile im Gefüge des Calciumsilikathydrat (CSH) Gel eingebettet vor. Durch die geringe Porosität des Zementsteins werden hohe Festigkeiten des Betons erzielt [45] [47].

#### W/Z-Wert

Der Wasserzementwert ( $\omega$ ) gibt das Verhältnis von Wassergewicht W zu Zementgewicht Z an:

$$\omega = W / Z$$

#### Formel 1: Wasser-Zement-Wert

Bei der Zementerhärtung werden die Zementkörner von Wasserhüllen umgeben, die ein Anlösen der Oberfläche bewirken und zur Bildung der Hydratphasen des Zementsteins führen. Da bei der Erhärtung des Zements nur etwa 25% seines Gewichtes chemisch an Wasser und 15% in den Gelporen gebunden werden, ist die Festigkeit und Dichtigkeit des Zementsteins umso hochwertiger, je weniger er von

überschüssigem Wasser durchsetzt wird. Der optimale W/Z-Wert liegt theoretisch bei 0,25 und praktisch bei ca. 0,4 [5]. Deshalb sollten ab einem W/Z-Wert von < 0,4 immer Verflüssiger bzw. Fließmittel zum Einsatz kommen, damit der Zement nicht verklumpt und ein plastischer Zementleim entsteht [13] [15].

### W/B-Wert

Nachdem immer mehr latent hydraulische und puzzolanische Zusatzstoffe bei der Herstellung von Hochfesten Betonen zum Einsatz kamen, war es notwendig den W/B-Wert einzuführen, der diese Zusatzstoffe bei der Berechnung des Anmachwassers berücksichtigt.

Unter dem W/B-Wert versteht man das Verhältnis von Anmachwasser zu allen in der Betonrezeptur verwendeten hydraulisch wirkenden Bindemitteln und Zusatzstoffen (z. b. Zement, Microsilika, Flugasche, usw.).

$$W / B - Wert = \frac{W}{B} = \frac{W}{z + k_f \cdot f + k_s \cdot s}$$

**Formel 2: Wasser-Bindemittel-Wert**

|                       |                                               |
|-----------------------|-----------------------------------------------|
| W...Wasser            | f...Flugasche                                 |
| B...Bindemittelgehalt | k <sub>f</sub> ...Korrekturfaktor Flugasche   |
| z...Zement            | s...Silicastaub                               |
|                       | k <sub>s</sub> ...Korrekturfaktor Silicastaub |

Wie beim W/Z-Wert gilt es, je geringer der W/B-Wert ist, desto höher sind die Festigkeiten. Bei Normal Beton liegt der W/B-Wert bei ca. 0,45, für UHPC kommen W/B-Werte von bis zu 0,14 zur Anwendung [11].

### 2.1.3 Erhöhung der Packungsdichte

Eine weitere Anforderung zum Erreichen hoher Festigkeiten ist die Erhöhung der Packungsdichte des trockenen Korngemisches durch die Optimierung der Sieblinie. Als Nebeneffekt tritt auch eine Verbesserung der Konsistenz trotz niedrigen W/B-Werts auf. Die Idealsieblinie bezieht sich dabei auf die trockenen Ausgangsstoffe

einschließlich Zement und Zusatzstoffe. Werden kleine Größtkorndurchmesser verwendet, erfolgt der Aufbau der Sieblinie nach dem Prinzip nach Fuller. Durch die beiden Parameter, den Größtkorndurchmesser  $d$  und der Exponent  $n$ , kann der Verlauf der Fullerparabel verändert und ein Optimum gefunden werden. Bei der Herstellung von ultrahochfesten Betonen haben sich Ausfallkörnungen aus wenigen Kornklassen mit enger Korngrößenverteilung bewährt. Solche günstigen Ausfallkörnungen weisen eine geringere spezifische Oberfläche und einen besseren Aufschluss des Fließmittels durch verstärkte Kornreibung beim Mischen mit niedrigerem Wassergehalt auf und sind deshalb leichter zu verarbeiten. Ein weiterer Grund ist, dass diese Ausfallkörnungen verdichtungswilliger sind und sie bei gleicher Verdichtungsarbeit eine wesentlich dichtere Kornpackung ergeben und daher höhere Festigkeiten aufweisen. Bei der Verwendung von größeren Korndurchmessern wie z. B. 5,0 bis 8,0 mm ist die Betrachtung der Gesamtsieblinie nicht mehr möglich. Der volumetrische Bindemittelbedarf nach Fuller beträgt 18 Vol.-%, der jedoch bei der Herstellung von UHPC wesentlich überschritten wird, da die groben Gesteinskörner in einer sehr großen Bindemittelmatrix eingebettet sind [45].

#### 2.1.4 Einsatz von Silikastaub

Durch die Zugabe von Silikastaub kommt es zu einer Verbesserung des Verbundbereiches zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung, da die Silikastäube mit Korndurchmessern von  $< 1 \mu\text{m}$  als Zwickelfüller zwischen Zement und Zuschlag wirken (Abbildung 4).

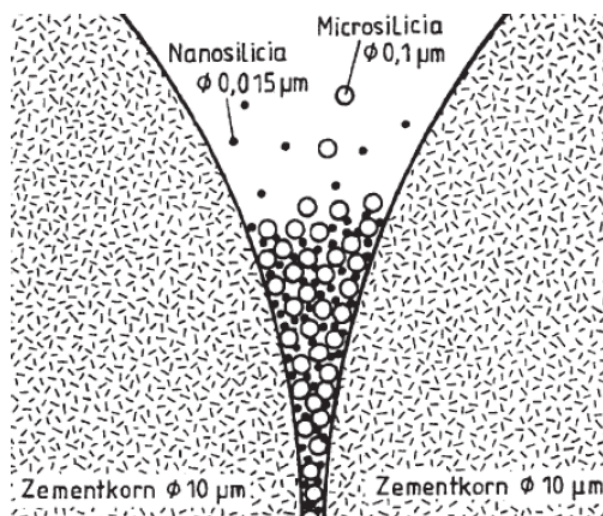
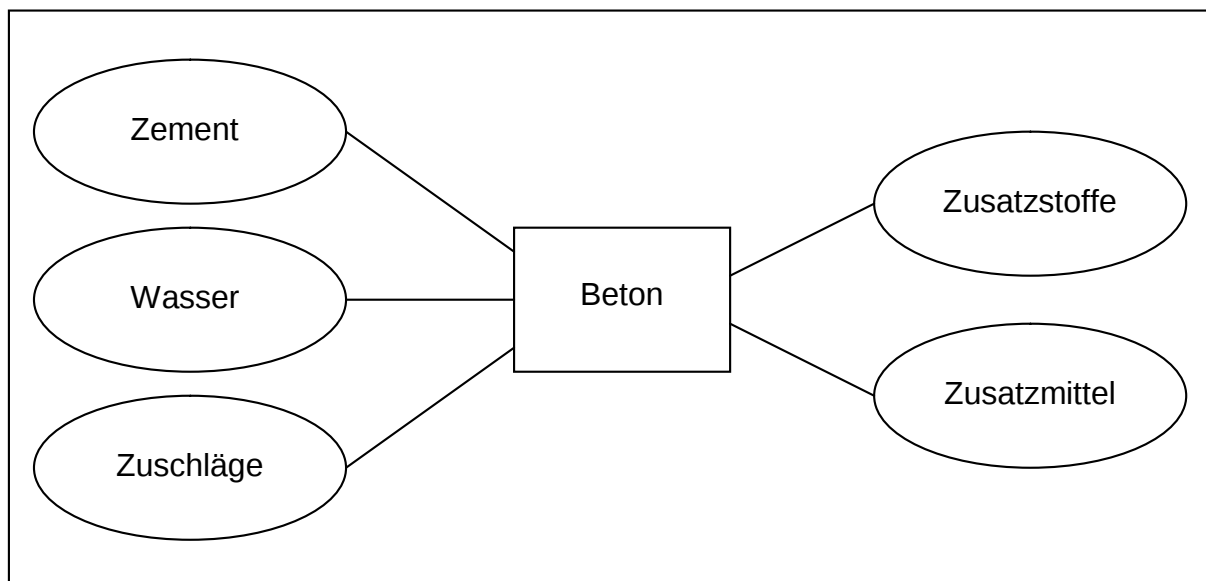


Abbildung 4: Größenunterschied Zement und Microsilika [4]

Ein weiterer positiver Effekt durch die Zugabe von Silikastaub ist, dass sie durch puzzolanische Reaktionen mit dem bei der Zementhydratation entstandenen Calciumhydroxid festigkeitssteigernde Calciumsilikathydratphasen bilden. Durch die Bildung weiterer Hydratationsprodukte werden Fehlstellen verschlossen und dadurch die Porosität der Matrix verringert [45] [48].

## 2.2 Ausgangsstoffe

Normale Betone bestehen aus drei Hauptkomponenten: Zement, Wasser und Zuschlägen. UHPC ist ein 5-Stoffsystem, d. h. dass neben den ursprünglichen Hauptausgangsstoffen noch Zusatzstoffe und Zusatzmittel für die Herstellung von Hochleistungsbeton herangezogen werden. In der Abbildung 5 sind die fünf Ausgangsstoffe für ultrahochfeste Betone zusammengefasst.



**Abbildung 5: Ausgangsstoffe für Beton**

### 2.2.1 Zement

Zement ist ein fein gemahlenes hydraulisches (mit Wasser reagierend) Bindemittel, das mit Wasser angemacht, sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärtet und raumbeständig bleibt. Der Zementleim, ein Gemisch aus Zement und Wasser, erhärtet zu Zementstein mit dem Ziel, die Zuschläge von Mörtel und Beton untereinander zu verkitten.

Die hydraulische Erhärtung von Zement beruht vorwiegend auf der Hydratation von Calziumsilikat. Das Gemisch wird auf 800°C vorerhitzt und danach in einem Drehofen durch das Brennen und Sintern bei ca. 1450°C zu Zementklinker umgewandelt. Dabei entstehen vier grundsätzliche Klinkerphasen, die jeweils unterschiedliche Beiträge zur Zementhärtung liefern.

**Tabelle 1: Klinkerphasen [5]**

| Klinkerphasen         | Bezeichnung    | Chem. Formel                                                         | Kurzform | Gehalt in M.-[%] |
|-----------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------|----------|------------------|
| Tricalciumsilicat     | Alit           | 3 CaO.SiO <sub>2</sub>                                               | C3S      | 40-80            |
| Dicalciumsilicat      | Belit          | 2 CaO.SiO <sub>2</sub>                                               | C2S      | 2-30             |
| Tricalciumaluminat    | Aluminat       | 3 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                                 | C3A      | 3-15             |
| Calciumaluminatferrit | Aluminatferrit | 4 CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C2(A,F)  | 4-15             |

Tricalciumsilicat C<sub>3</sub>S ist jene Verbindung, welche dem Zement seine wesentlichen Eigenschaften verdankt. Feingemahlen und mit Wasser zu einer Paste angemacht, erhärtet es schnell, entwickelt dabei eine große Reaktionswärme und erreicht sehr hohe Festigkeiten. Vom C<sub>3</sub>S wird die Frühfestigkeit des Zements bestimmt.

Das kalkärmere Dicalciumsilicat C<sub>2</sub>S erhärtet ebenso wie das Tricalciumsilicat hydraulisch, jedoch wesentlich langsamer, erreicht aber nach längerer Zeit die gleichen Festigkeiten. Wegen der geringeren Erhärtungsgeschwindigkeit ist die pro Zeiteinheit abgegebene Hydratationswärme ebenfalls geringer als bei C<sub>3</sub>S. Im Calciumaluminatferrit C<sub>4</sub>(A, F) ist praktisch das gesamte im Klinker enthaltene Eisenoxid und ein Teil des Aluminiumoxids gebunden. Zur hydraulischen Erhärtung trägt sie wenig bei.

Der im Calciumaluminatferrit nicht gebundene Teil des Aluminiumoxids bildet das Tricalciumaluminat C<sub>3</sub>A. Es reagiert mit Wasser sehr schnell und unter Volumenvergrößerung entsteht das nadelförmige Trisulfat, auch Ettringit genannt. Bei der Herstellung von Beton würde diese sofortige Abbindung sehr stören, da es die Verarbeitbarkeit erheblich beeinträchtigt. Durch Gipszusätze zum Zement wird dieser Effekt aufgehoben. Die hydraulischen Eigenschaften des C<sub>3</sub>A sind nicht sehr ausgeprägt, es trägt jedoch in Verbindung mit Silikaten zur Erhöhung der Anfangsfestigkeit des Zementsteins bei.

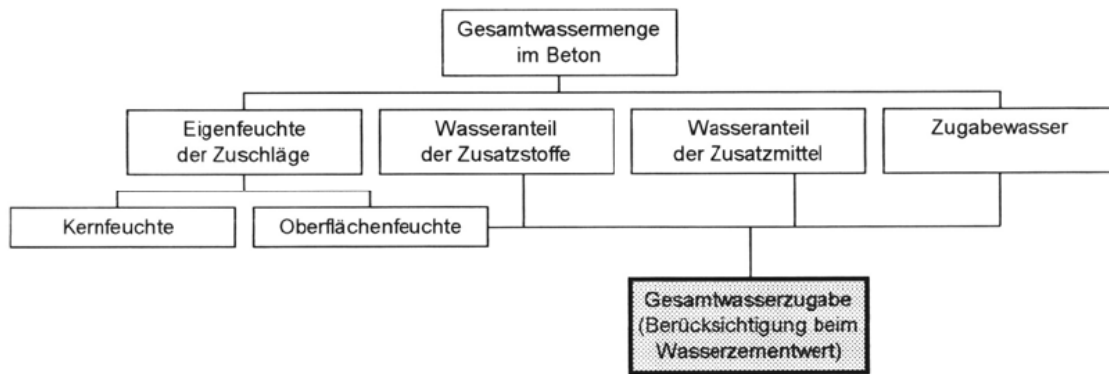
Praktisch sind in jedem Portlandzementklinker alle vier Klinkerphasen enthalten, aber aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzungen der Ausgangsstoffe sind die

Mengenanteile gegebenenfalls verschieden.  $C_3S$  und  $C_2S$  sind die Hauptträger der Zementerhärtung und Festigkeitsbildung. Dies bezieht sich sowohl auf die Menge, da die Summe von  $C_3S$  und  $C_2S$  in jedem Klinker etwa 75% erreicht, als auch die ausgeprägten hydraulischen Eigenschaften des Betons [5].

Zur Herstellung von UHPC kommen ausschließlich Zemente zur Verwendung die einen geringen Wasseranspruch, eine gute Verträglichkeit mit Fließmittel und ein geringes Erstarrungsverhalten besitzen. Es werden hauptsächlich Portlandzemente zur Erstellung von ultrahochfestem Betonen verwendet. Sie weisen einen geringen  $C_3A$ -Gehalt auf, was sich positiv auf die Verarbeitbarkeit des Betons auswirkt. Das  $C_3A$  reagiert dabei schnell mit dem Wasser und führt somit eine schlechtere Verarbeitbarkeit mit sich. Weiters besitzt die  $C_3A$ -Phase ein größeres Fließmittel-Adsorptionsvermögen, welches sich ebenfalls schlecht auf die Verarbeitbarkeit auswirkt [6] [7].

### 2.2.2 Wasser

Als Zugabewasser ist das in der Natur vorkommende Wasser geeignet, soweit es nicht Bestandteile enthält, die das Erhärten des Betons ungünstig beeinflussen oder den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen [8]. Restwasser, also jenes Wasser, das beim Auswaschen von Restbeton und – Mörtel oder Gesteinskörnung, dem Reinigen von Mischertrommeln, Fahrmischern und Betonpumpen oder als Niederschlagswasser anfällt, darf für (ultra) hochfeste Beton nicht als Zugabewasser verwendet werden [4]. Die erforderliche Menge der Gesamtwasserzugabe bestimmt sich vorrangig aus dem Wasseranspruch der Gesteinskörnungen, während die Konsistenz des Frischbetons im Wesentlichen durch die Zugabe von verflüssigend wirkenden Betonzusatzmittel eingestellt wird. Die Abbildung 6 zeigt, dass sich das Gesamtwasser aus der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnungen, dem Zugabewasser, sowie den Wasseranteilen der Zusatzmittel und Zusatzstoffe, wenn diese in wässriger Form verwendet werden, zusammen setzt [9]. Für die Herstellung der Probekörper wurde Trinkwasser aus dem öffentlichen Netz ohne weitere Untersuchung verwendet.



**Abbildung 6: Gesamtwasserzugabe [9]**

### 2.2.3 Zuschläge

Die Gesteinskörnungen nehmen mit ca. 70% (bei UHPC meist aber wesentlich weniger) des Betonvolumens den größten Anteil im Beton ein. Die Gesamtoberfläche einer Gesteinskörnung hängt von der Form und der Größe der einzelnen Körner ab [12]. Für die Herstellung von UHPC kommen ausschließlich feine Sande mit einer Korngröße zwischen 150 µm und 1000 µm zusammen mit Gesteinsmehl zur Anwendung. Die sehr poröse und heterogene Kontaktzone zwischen Zuschlagskorn und Zementleim wird durch die geforderte Feinheit des Zuschlages eliminiert. Da diese Zwischenzone bei einem UHPC kaum mehr ausgebildet wird, kommt es auch nicht bzw. nur bis zu einem geringen Maße zur Bildung der weichen Hydratationsprodukte wie Ettringit und Calciumhydroxid (CH), wobei der fehlende C<sub>3</sub>A-Gehalt (Tricalciumaluminat) und der niedrige Wasserzementwert die Elimination des Ettringits bewirken [11].

Bei der Wahl der Zuschläge sind folgende Punkte wichtig:

- Mineralische Zusammensetzung des Zuschlages und der daraus folgenden chemischen Wechselbeziehungen hinsichtlich des Verbundes mit dem Zementstein
- Korngrößenverteilung (Sieblinie)
- Mechanische Eigenschaften
- Kornform
- Wasseranspruch
- Oberflächenrauigkeit

Bei hochfesten Betonen mit hohen Zementsteinfestigkeiten ist eine ausreichend hohe Gesteinsfestigkeit sehr wichtig. Zuschläge aus Quarz (Quarzsand und Quarzmehl) weisen eine Druckfestigkeit von bis zu 300 N/mm<sup>2</sup> auf und sind deshalb für die Herstellung eines ultrahochfesten Betons besonders gut geeignet [4].

### Quarzsand

Bei der Herstellung von UHPC werden Zuschläge mit einem Größtkorn von 1 mm begrenzt, wodurch sich eine sehr homogene und dichte Kontaktzone zwischen dem Zuschlagskorn und dem Zementleim ergibt. Zudem sollte die Kornverteilung der Zuschläge der modifizierten Fullerkurve entsprechen.

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,5}{D}\right)^n} \left[ \left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0,5}{D}\right)^n \right]$$

**Formel 3: Fullerkurve [11]**

D...Größtkorndurchmesser

d...Siebweite

n...Fullerexponent

A...prozentueller Siebdurchgang aller Feststoffe des Siebes mit Siebweite d

Bei dieser Gleichung können Korndurchmesser unter 0,5 mm sowie das Weglassen einzelner Korngruppen bei sogenannten Fehlkörnungen nicht berücksichtigt werden. Um diesen Anforderungen jedoch gerecht zu werden, werden im Falle von Fehlkörnungen trotzdem alle Korngruppen ermittelt und der Massenanteil der weggelassenen Korngruppen je nach Erfordernissen auf die beiden Nachbarskörnungen oder auch auf mehrere Korngruppen aufgeteilt. Im Falle eines feineren Zuschlags mit einem Korndurchmesser < 0,5 mm wird die Formel folgendermaßen abgeändert:

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,25}{D}\right)^n} \left[ \left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0,25}{D}\right)^n \right]$$

**Formel 4: modifizierte Fullerkurve [11]**

## Quarzmehl

Neben den Sanden wird für die kleineren Fraktionen ( $< 125 \mu\text{m}$ ) auch Quarzmehl verwendet. Durch die Verwendung von Quarzzusätzen wurde eine festigkeitssteigernde Wirkung beobachtet. Hauptgrund für die verbesserte Wirkung ist die große Oberfläche von Quarzmehl und der daraus folgenden Verringerung der Zementleimschichtdicken und die Erhöhung der Druckfestigkeit [11]. Grundvoraussetzung für eine deutliche Druckfestigkeitssteigerung ist dabei, dass durch die Quarzmehlzugabe der W/B-Wert nicht wesentlich verändert wird. Dieser Effekt könnte aus dem geringen Wasseraugvermögen des Feinstquarzes resultieren [13].

### 2.2.4 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe sind flüssige oder pulverförmige Stoffe, welche dem Beton zugegeben werden, um bestimmte Eigenschaften zu beeinflussen [14]. Diese Stoffe wirken sich vor allem auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften, wie die Verarbeitbarkeit, die Wärmeentwicklung oder die Wasserundurchlässigkeit, aus. Die Zusatzstoffe sind als Volumenbestandteile bei der Mischungsberechnung zu berücksichtigen [15].

Hauptkriterium bei Zusatzstoffen ist, dass sie das Erhärten des Zements, sowie die Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons nicht beeinträchtigen und den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht gefährden. Es dürfen nur Betonzusatzstoffe verwendet werden, die einer Norm entsprechen oder eine europäische technische Zulassung besitzen [16]. Die Einteilung und Anwendung der Zusatzstoffe sind in der ÖNORM EN 206 geregelt.

Zusatzstoffe können eingeteilt werden in:

- Nahezu inaktive Zusatzstoffe (Typ I)
  - o Gesteinsmehle nach ÖNORM EN 12620
  - o Pigmente nach ÖNORM EN 12878
- puzzolanische oder latenthydraulische Zusatzstoffe (Typ II)
  - o Flugasche nach ÖNORM EN 450
  - o Silikastaub nach EN 13263: 1998
  - o aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) nach ÖNORM B 3309

## Silikastaub

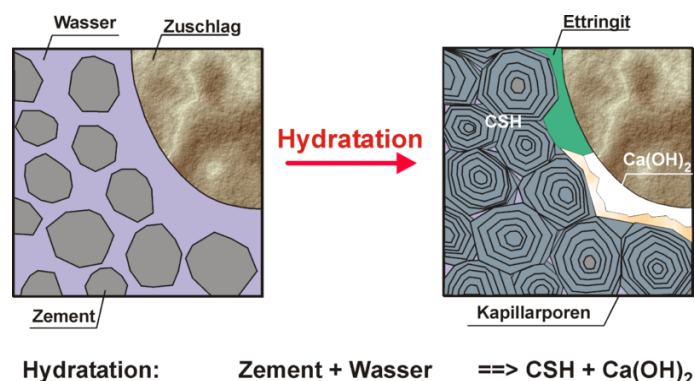
Als Zusatzstoff bei der Herstellung von hochfesten Betonen wird bevorzugt Silikastaub (Microsilika oder Nanosilika) verwendet. Silikastaub fällt als Nebenprodukt bei der Siliciummetall- und Ferrosiliciumproduktion als kondensierter Filterstaub an und wird mit Hilfe von Elektrofiltern aus dem Rauchgasen gewonnen. Die durchschnittliche Teilchengröße von Silikastaub beträgt ca.  $1\text{ }\mu\text{m}$ , das bedeutet das Microsilika 30- bis 100-mal kleiner als die Zementpartikel ist [17]. Microsilika besitzt eine Dichte von etwa 2200 bis 2300  $\text{kg/m}^3$ . Dabei ist die gute festigkeitssteigende Wirkung des Silikastaubes im Beton auf folgendes zurückzuführen [4] [18]:

- Füllerwirkung

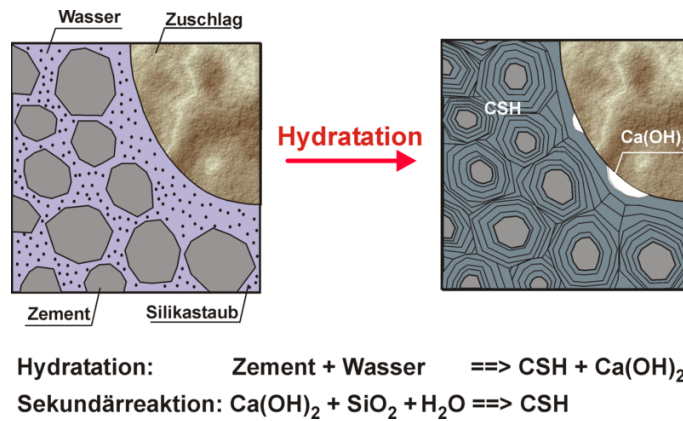
Durch die geringe Größe und Form können die Silikastaubpartikel die Porenräume zwischen den Zementkörper bzw. Gesteinskörnungen hervorragend ausfüllen. Dadurch wird die Packungsdichte und die Homogenisierung des Gefüges verbessert [2].

- Puzzolanische Reaktion

Zusätzlich zur Zementhydratation läuft eine puzzolanische Reaktion zwischen dem bei der Zementhydratation entstehendem Calciumhydroxid  $\text{Ca(OH)}_2$  und dem Silikastaub  $\text{SiO}_2$  ab. Dabei entsteht CSH, welches gegenüber den Ausgangsstoffen eine höhere Festigkeit aufweist (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).



**Abbildung 7: Hydratation von Normabeton [13]**



**Abbildung 8: Hydratation von UHPC [13]**

- Verbesserung des Verbundes zwischen Zementstein und Gesteinskörnung  
 Ein weiterer Effekt entsteht durch die Reduktion des Calcium- und Ettringitgehalts in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung. Dies führt zu einer Verbesserung der Mikrostruktur in der Verbundzone.

### 2.2.5 Zusatzmittel

Zusatzmittel sind pulverförmige oder flüssige Stoffe, welche dem Beton in geringen Mengen zugegeben werden, um die Eigenschaften des Frisch- oder Festbetons durch chemische und/oder physikalische Wirkung zu verändern. Die gewünschte Veränderung der Eigenschaften des Frisch- bzw. Festbetons beziehen sich vor allem auf die Verarbeitbarkeit, das Erstarren, das Erhärten oder den Frostwiderstand [14]. Die Voraussetzung für die Verwendung von Zusatzmitteln bei der Betonherstellung ist die Berücksichtigung der anerkannten Grundsätze über die Mischungszusammensetzung bzw. die Verarbeitung und Nachbehandlung des Betons. Betonzusatzmittel werden, im Gegensatz zu den Zusatzstoffen, nur in so geringen Mengen beigemischt, dass sie als Raumanteil des Betons üblicherweise ohne Bedeutung sind. Sie werden im Allgemeinen zu 0,2 – 2 % des Zementgewichtes zugegeben. Bei einer Dosierung von mehr als 0,3 Vol% des Betons, also mehr als 3 l/m<sup>3</sup>, muss der Wasseranteil im W/B-Wert berücksichtigt werden. Bei der Herstellung von UHPC können diese Mengen aber auch wesentlich höher sein. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Zusatzmittel aufgelistet.

**Tabelle 2: Zusatzmittel für Beton [16]**

| <b>Zusatzmittel</b>      | <b>Kurzbezeichnung</b> | <b>Farbkennzeichnung</b> |
|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| Betonverflüssiger        | BV                     | Gelb                     |
| Fließmittel              | FM                     | Grau                     |
| Luftporenbildner         | LP                     | Blau                     |
| Dichtungsmittel          | DM                     | Braun                    |
| Verzögerer               | VZ                     | Rot                      |
| Erhärtungsbeschleuniger  | BE                     | Grün                     |
| Erstarrungsbeschleuniger | BE                     | Grün                     |
| Stabilisierer            | ST                     | Violett                  |
| Chromatreduzierer        | CR                     | Rosa                     |
| Recyclinghilfen          | RH                     | Schwarz                  |
| Schaumbildner            | SB                     | Orange                   |

**Betonverflüssiger:** Sie führen bei gleichem W/B-Wert zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Betons und/oder verbessern die Festbetoneigenschaften durch Verminderung der Wasserzugabe. Dadurch kommt es zu einer besseren Plastifizierung und einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit. Mögliche Nebenwirkungen, wie z. B. die Einführung von Luftporen, Festigkeitsminderung und Erstarrungsverzögerung, können jedoch auch auftreten.

**Fließmittel:** Neben den Betonverflüssigern sind Fließmittel die am häufigsten gebräuchlichen Betonzusatzmittel. Sie wirken stark verflüssigend und können auch nachträglich eingemischt werden. Fließmittel bewirken eine erhebliche Verminderung des Wasseranspruches und/oder eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Fließmittel werden besonders für die Herstellung von selbstverdichtenden Betonen und für Pumpbeton eingesetzt. Die zwei Hauptwirkungen, die Fließmittel erzielen, sind einerseits die Heruntersetzung der Oberflächenspannung des Abbindewassers und die Entstehung eines Gleitfilms auf dem Zementkorn. Andererseits kann es zu einer Zerstörung von Zementagglomeraten kommen, was zu einer besseren Verteilung der Feinstteile im Beton führt [50].

**Luftporenbildner:** Sie bringen gleichmäßig verteilte Mikroluftporen, die einen Durchmesser von 0,01 bis 0,3 mm aufweisen, in den Frischbeton ein. Durch diese Luftporen kann sich Druck abbauen bzw. können sich eingeschlossene Wassertropfen bei Frost ausdehnen, was ein Abplatzen an der Betonoberfläche verhindert. Diese Betonzusatzmittel werden vor allem dort eingesetzt, wo der Beton Frost und Frosttaumitteln ausgesetzt wird. Beim Einsatz von Luftporenbildnern sollte

beachtet werden, dass die Druckfestigkeit aufgrund der entstehenden Luftporen herabgesetzt wird. Aus diesem Grund werden Luftporenbildner bei der Herstellung von UHPC nur selten eingesetzt.

**Verzögerer:** Sie wirken gezielt auf den Hydratationsprozess des Zementes ein und bewirken eine Verzögerung beim Abbinden des Zementleims. Der Beton bleibt dadurch länger verarbeitbar. Die Verzögerung wird durch die Behinderung der Wärmeentwicklung und der Bildung von schwerlöslichen Calciumsalzen hinausgezögert. Diese Zusatzmittel werden beim Betonieren bei heißem Wetter, beim Betonieren großer Kubaturen und bei Transport von Frischbeton über lange Distanzen eingesetzt.

**Erhärtungsbeschleuniger oder Erstarrungsbeschleuniger:** Sie bewirken ein deutlich früheres Erstarren des Betons. Durch diese Beschleuniger kann der Beton früher ausgeschalt, belastet und Frost ausgesetzt werden. Diese Zusatzmittel kommen bei Spritzbeton, Betonieren in fließendem Gewässer und Betonieren bei tiefen Temperaturen zu Anwendung.

**Stabilisierer:** Sie verhindern das Absondern von Zugabewasser und erhöhen das Zusammenhaltevermögen des Betons. Zu den Eigenschaften und Wirkungen die diese Zusatzmittel erzielen, zählen die Verbesserung des Wasserbindevermögens, die Verbesserung der Verarbeitbarkeit und die Verbesserung des Zusammenhaltevermögens des Betons [16] [19] [20].

## 2.3 Fasern

### 2.3.1 Allgemeines

Durch die gezielte technische Variation der vorgenannten Ausgangsstoffe werden die Materialeigenschaften des UHPC verbessert. Veränderungen bei den Ausgangsstoffen haben jedoch große Auswirkungen auf das Bruchverhalten von UHPC zur Folge. Durch das homogene und dichte Gefüge ist der UHPC spröde, entspricht einem linear-elastischen Materialverhalten und weist daher ein plötzliches Bruchverhalten auf. Durch den Einsatz von Fasern im UHPC kann die Duktilität verbessert, die Zugfestigkeit und der dynamische Widerstand erhöht und auch der

Brandwiderstand gesteigert werden [11] [21]. Der Volumengehalt an Fasern im Beton kann zwischen 0,5 und 5 % betragen [22].

### 2.3.2 Faserarten

Generell kann der Großteil jener Fasern, die für die Herstellung von Faserbeton herangezogen werden, auch für die Herstellung von UHPC verwendet werden. Grundsätzlich können die in der Tabelle 3 aufgelisteten Faserarten mit folgenden Eigenschaften verwendet werden:

**Tabelle 3: Faserarten und Kennwerte [23]**

| Faserart              | Faserdurchmesser<br>[µm] | Faserlänge<br>[µm] | E-Modul<br>[kN/mm <sup>2</sup> ] | Zugfestigkeit<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Bruchdehnung<br>[%] | Preis<br>[€/kg] |
|-----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------|
| Stahlfasern           |                          |                    |                                  |                                       |                     |                 |
| - Stahldrahtfasern    | 500 – 1300               | 30 – 60            | 160 – 210                        | > 1000                                | 3 - 4               | 1 – 5           |
| - Spanfasern          | 400                      | 26 – 32            | 210                              | 980                                   |                     |                 |
| - Blechfasern         | 400 – 650                | 15 – 35            | 210                              | 270 – 800                             | 10                  |                 |
| AR-Glasfasern         | 3 - 30                   | 3 - 25             | 72 – 75                          | 1500 - 1700                           | 1,5 – 2,4           | 7 -15           |
| Polypropylenfasern    |                          |                    |                                  |                                       |                     |                 |
| - monofil             | 18 – 22                  | 6 – 18             | 4 – 18                           | 320 – 560                             | 8 – 20              | 5 – 15          |
| - fibrilliert         | 50 -100                  | 6 – 19             | 3,5 – 10                         | 320 – 400                             | 5 – 15              |                 |
| Polyacrylnitrilfasern | 18 - 104                 | 4 - 24             | 15 – 20                          | 330 – 530                             | 6 – 20              | 4 – 12          |
| Kohlenstofffasern     | 5 - 10                   | 6                  | 150 – 450                        | 2600 – 6300                           | 0,4 – 1,6           | > 20            |
| Aramid                | 10                       | 6 - 65             | 70 - 130                         | 2700 - 3600                           | 2,1 – 4,0           | > 30            |

Auch Naturfasern aus Jute, Sisal, Hanf, Flachs, Kokosnuss, Zellulose, Zuckerrohr oder Baumwolle können als Fasern bei der Betonherstellung verwendet werden. Jedoch werden die Naturfasern aufgrund der hohen Wasseraufnahme und der geringen Alkalibeständigkeit, welche zur Verbesserung eine Spezialbehandlung benötigt, nur selten eingesetzt. Die in der Tabelle 3 aufgezählten Fasern gehören zu den Kurzfasern, diese tragen im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Erstrisslast und einem feineren Rissbild bei. Fasermischungen aus verschiedenen langen Fasern und Materialien, auch Fasercocktails genannt, kommen in der Praxis oft zur Anwendung um höhere Festigkeitswerte zu erzielen. Entsprechend ihrer Eigenschaften und je nach Anwendung können die einzelnen Fasern unterschiedliche Aufgaben haben. Dabei unterscheidet man in drei Hauptmechanismen:

- Verhinderung der Erstrissbildung
- Erreichen eines duktilen Bruchverhaltens auch nach Überschreitung der Maximallast
- Verhinderung von Betonabplatzungen bei Brand oder Wärmeeintrag



**Abbildung 9: Rissbildung im Beton mit und ohne Faser [11]**

Die Abbildung 9 zeigt die Rissbildung eines Betons mit und ohne Fasern. Oft kommen mehrere Faserarten (Fasercocktails) in einem Beton zum Einsatz, um diese unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden. Um eine Verstärkung des Betons im ungerissenen Zustand zu erzielen, benötigen die Faser einen höheren E-Modul als Beton. Aus diesem Grund können nur Stahlfasern zur Erhöhung der Erstrisslast beitragen, Polymerfaser dagegen nicht. Ein duktiler Nachbruchverhalten erfordert eine Kraftübertragung über die Rissufer hinaus, deshalb sollten nicht zu kurze Fasern mit guten Endverankerungswerten zum Einsatz kommen. Um den Brandschutz zu gewährleisten werden meist Kunststofffasern eingesetzt [23]. In der Praxis haben sich vorwiegend Stahlfasern und Kunststofffasern für die Herstellung von ultrahochfesten Betonen durchgesetzt. Einige der am häufigsten verwendeten Stahlfasern und Kunststofffasern sind in Tabelle 4 aufgelistet und in Abbildung 10 dargestellt.

**Tabelle 4: Gängigsten Stahl- und Kunststofffasern [23]**

| Bild | Faserart                        | Hersteller | Bezeichnung   | Länge / Breite / Ø |
|------|---------------------------------|------------|---------------|--------------------|
| a    | Stahldrahtfaser mit Endhaken    | Fatek      | FX 30 – 0,60  | 30 / - / 0,6       |
| b    | Stahldrahtfaser profiliert      | IFT        | Duoloc 47/1,0 | 47 / - / 1         |
| c    | Stahlblechfaser gewellt         | Fatek      | FW 35         | 35 / 2 / 0,6       |
| d    | Stahlblechfaser mit Enthaken    | Harex      | ESF 20        | 20 / 1,2 / 0,5     |
| e    | Stahldrahtfaser gewellt         | Bekaert    | Wiremix W50   | 50 / 3 / 0,8       |
| f    | Stahlblechfaser profiliert      | Fatek      | FT 35         | 35 / 1,95 / 0,4    |
| g    | Stahlspanfaser                  | Harex      | SF 01-32      | 32 / 3,8 / 0,4     |
| h    | Stahldrahtfaser                 | Bekaert    | OL 6/16       | 6 / - / 0,16       |
| i    | Stahldrahtfaser                 | Bekaert    | OL 13/16      | 13 / - / 0,16      |
| j    | Polypropylenfaser               | Fatek      | Fibrin 23     | 12 / - / 0,018     |
| k    | Polyvinylalkoholfaser           | Ostrakon   | PVA           | 12 / - / 0,013     |
| l    | AR-Glasfaser Filamente          | Ostrakon   | AR-Glas 703   | 12 / - / 0,02      |
| m    | Polyvinylalkoholfaser           | DuraPact   | DuraALK 3K-12 | 12 / - / 0,2       |
| n    | Polypropylenfaser (Spleißfolie) | Ostrakon   | PP 320        | 20 / 0,2 / 0,038   |
| o    | Polypropylenfaser               | Fatek      | Fibrin 1950   | 18 / 0,144 / 0,02  |

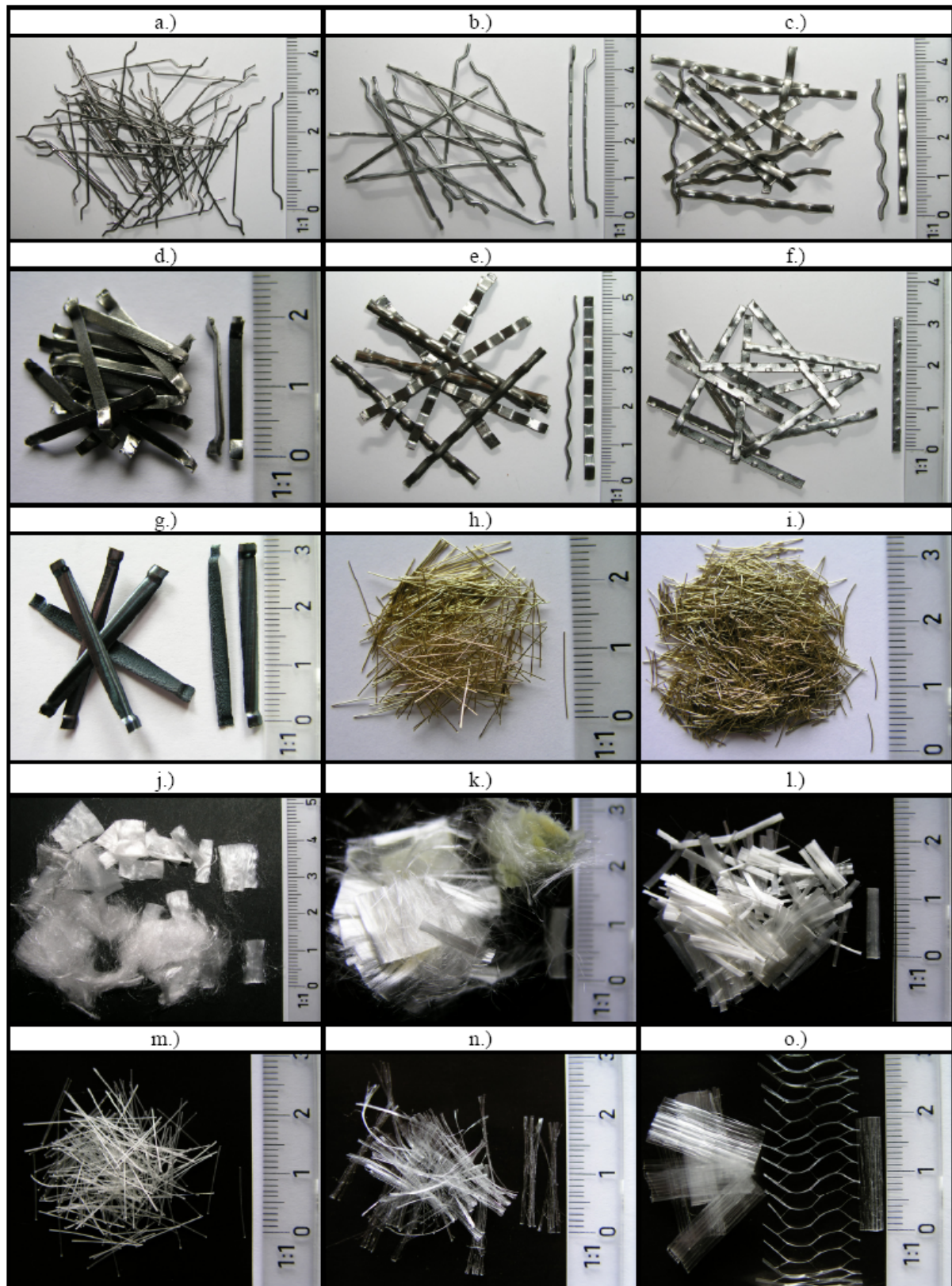


Abbildung 10: Unterschiedliche Fasertypen [23]

### 2.3.2.1 Stahlfasern

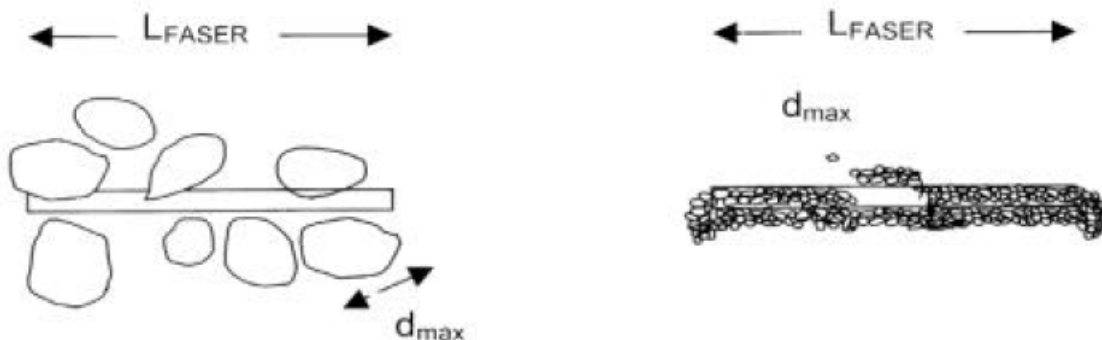
Stahlfasern kommen als Draht, Späne oder in Form von profilierten Blechfasern zum Einsatz. Stahldrahtfasern oder auch verzinkte oder Edelstahldrahtfasern werden durch Walzen und gleichzeitigem Profilieren eines kaltgezogenen Stahldrahtes hergestellt. Die Herstellung von Spanfasern erfolgt durch das Abfräsen von Stahlblöcken. Durch das Abfräsen erhalten die Spanfasern eine Verdrehung um die Längsachse und weisen eine glatte und eine raue Seite auf. Blechfasern werden durch Ausstanzen oder Zerschneiden von dünnen Blechen hergestellt. Die Festigkeit und Sprödigkeit der einzelnen Faserarten sind je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsverfahren sehr unterschiedlich. Gewalzte Stahlfasern weisen eine hohe Duktilität und gute Zugfestigkeitseigenschaften auf, während Spanfasern dagegen relativ spröde sind [23]. Das durch die Herstellungsart mitbedingte Verformungsverhalten der Fasern kann einen deutlichen Einfluss auf das Verhalten des Betons im Nachbruchbereich haben. Deshalb sollte das Verformungsverhalten (duktile oder spröde) bei der Auswahl der Fasern für einen bestimmten Verwendungszweck beachtet werden [11].

Da weder einheitliche Normen oder Regelwerke für Stahlfasern existieren, bezieht man sich häufig auf die Angaben der Hersteller. Aufgrund der guten Beständigkeit in alkalischen Medien und der mechanischen Eigenschaften ist Stahl ein gut geeignetes Material, das gut im Verbund mit Beton eingesetzt werden kann.

Das Verhalten von ultrahochfestem Beton ohne Stahlfasern ist linear elastisch und führt zu einer geringen Bruchenergie. Durch die Zugabe von Stahlfasern, erreicht man ein wesentlich besseres duktileres Verhalten und eine hohe Bruchenergie.

Bei herkömmlichen Betonmischungen führt die Zugabe von Stahlfasern zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit. Bei UHPC-Mischungen ist dies nicht der Fall. Dieses Verhalten erklärt sich durch die unterschiedliche Relativgröße der Faser im Vergleich zum Größtkorn des Zuschlags. Da bei Normal Beton mit Stahlfasern Faserlängen in der Größenordnung wie das Größtkorn des Zuschlages verwendet wird, kommt es zu einer Störung des Mischgutes und zu einer schlechteren Verarbeitbarkeit. Beim UHPC werden sehr kleine Zuschlagskörner verwendet und aus diesem Grund wächst das Verhältnis zwischen Faserlänge und Korndurchmesser. Dadurch kann sich die Faser wesentlich besser in die Matrix einbetten und sie wird von den kleineren Zuschlägen umgeben. Die Abbildung 11

zeigt die Einbindung einer Faser in einem Normalbeton und einem ultrahochfesten Beton.



**Abbildung 11: Einbindung einer Faser gleicher Länge im normalen Beton (links) und im UHPC (rechts) [11]**

Im Prinzip bestimmt die Fasergeometrie die Wirkung der Fasern (Energieaufnahme beim Herausziehen). Ein aussagekräftiger Wert ist dabei das Verhältnis Länge der Faser zu Durchmesser ( $l/d$ ). Bei nicht runden Fasern wird der Durchmesser durch einen äquivalenten Durchmesser  $D'$  ersetzt, welcher dem Durchmesser einer runden Faser mit gleicher Querschnittfläche entspricht. Ganz allgemein gilt, dass die Effektivität der Faser mit steigendem  $l/d$ -Verhältnis zunimmt, wobei gleichzeitig die Verarbeitbarkeit des Frischbetons erschwert wird. Alle auf den Markt befindlichen Fasern weisen ein  $l/d$ -Verhältnis zwischen 50 – 100 auf, weshalb diese Toleranzgrenze in den meisten Fällen herangezogen wird [11].

### 2.3.2.2 Glasfasern

Bei Glasfasern sind nur alkaliresistente AR-Glasfasern mit  $> 15$  M-% Zirkoniumoxidgehalt ( $\text{ZrO}_2$ ) für die Verwendung in Beton geeignet. Nicht alkaliresistente Glasfasern, wie etwa E-Glasfasern (Borosilikatglas) oder A-Glasfasern (Natron-Kalk-Glas) mit  $< 5$  M-%  $\text{ZrO}_2$ , sind für die Verwendung in Beton nicht geeignet, da sie bei der Lagerung in Zementlösung rund 7 – 11 % ihres Gewichtes verlieren. Auch AR-Glasfasern sind nicht zu 100 % alkaliresistent, da sie ca. 1 bis 2 % ihres Gewichtes verlieren.

Bei der Glasfaserherstellung werden einzelne Fäden (Filamente) aus einer ca.  $1300^\circ\text{C}$  heißen Glasschmelze durch das Düsenziehverfahren gewonnen und später nach dem Auftrag einer umhüllenden Schicht zu Spinnfäden zusammengeführt. Ein

Spinnfaden besteht aus ca. 100 bis 200 Filamenten. Wird eine bestimmte Bewehrungsrichtung vorgegeben, so können auch Gelege bzw. verwobene Faserpakete verwendet werden. Bei ultrahochfesten Betonen wird generell ein geringerer pH-Wert (schwächeres alkalisches Milieu) durch die puzzolanischen Zusatzstoffe erreicht, was einen Einsatz von Glasfasern begünstigt. Wird nicht die Steigerung der Festigkeit, sondern die Erhöhung der Duktilität als Ziel für die Faserbeimischung gefordert, so sind auch kleinere Glasfasergehalte sinnvoll. Glasfasermodifizierte Betone, mit wesentlich geringerem Fasergehalt, werden zum Beispiel zur Verbesserung der Gefügeeigenschaften eingesetzt.

### **2.3.2.3 Kunststofffasern - Polypropylenfasern**

Die Zugabe von Kunststofffasern (Polypropylenfasern) zeigt positive Effekte auf das Bruch- und Nachbruchverhalten sowie das Brandverhalten und das Frühschwindverhalten von hochfesten Betonen. Diese Fasern lösen ein frühzeitiges Mikrorisswachstum bei hohen Beanspruchungen aus, was sich dadurch zeigt, dass sie den Beton mit fein verteilten Risslinien durchsetzen. Die Kunststofffasern lassen sich in fibrillierte Polypropylenfasern, monofilamente Polypropylenfasern und Spleißfasern einteilen, wobei heutzutage fast ausschließlich monofilamente Fasern in der Betontechnologie verwendet werden [11]. Beim Ausgangsstoff Propylen handelt es sich um einen ungesättigten Kohlenwasserstoff, der durch Polymerisation aus der Erdölspaltung gewonnen wird. Polypropylen kennzeichnet sich dadurch aus, dass es gegen die gebräuchlichsten Laugen und Säuren beständig ist.

Der Vorteil der Polypropylenfasern (PP-Fasern) ist die Alkalibeständigkeit. PP-Fasern schmelzen bei ca. 160 – 170°C und führen so zu Kapillarröhren im Beton, welche sich im Falle eines Brandes mit Wasserdampf füllen und so einen Druckaufbau durch verdampfendes freies und physikalische gebundenes Wasser verhindern. Wasserdampfströmungen sind ein Hauptgrund für die Betonabplatzungen. Wasserdampf entsteht in den wärmeren Bauteilquerschnitten und kondensiert in den kälteren Bereichen. Der kondensierte Wasserdampf füllt die Kapillarporen des Betons mit Wasser und bei gefüllten Poren wird der weitere Dampftransport verhindert. Es baut sich immer weiter Druck auf und nach Überschreitung der Betonzugfestigkeit kommt es zu einer explosionsartigen Abplatzung im Beton. Durch eine geringe Menge an PP-Fasern kann dieses Abplatzen von Beton verhindern.

Die Herstellung von Polypropylenfasern erfolgt durch Extrudieren von Folien oder durch ein Düsenverfahren, ähnlich wie bei den Glasfasern. Durch Ausstanzen aus Folie werden fibrillierte Fasern hergestellt, dabei besteht ein Kilogramm Fasern aus 6 bis 7 Millionen Einzelfasern. Monofilamente PP-Fasern werden durch Spinnen hergestellt und anschließend auf die gewünschte Länge geschnitten. Aufgrund der Feinheit von ca. 170 – 300 Millionen Fasern/kg eignen sich diese Fasern für Betone mit hoher Konsistenz.

### **2.3.2.4 Kohlenstofffasern**

Trotz des relativ hohen Preises weisen Kohlestofffasern mehrere bautechnische Vorteile auf, wie etwa die Temperaturunempfindlichkeit, die gute Alkaliresistenz und ihr geringes Gewicht. In der Regel werden alle Fasern, die einen Kohlenstoffgehalt über 80% aufweisen, als Kohlenstofffasern bezeichnet, egal ob es sich um verkokte Fasern (70-80% C), graphitierte Fasern (99% C) oder um übliche Kohlenstofffasern (80-95% C) handelt. Die Kohlenstofffasern sind durch ihre glatte, strukturlose Oberfläche gekennzeichnet und weisen eine maximale Bruchdehnung von ca. 2% auf. Für die Herstellung von Kohlenstofffasern werden günstige Pecher oder vorgesponnene Materialien (z. B. Polyacrylnitril) als Rohstoff verwendet, die dann entweder in gemahlener Form, als zerhackte Kurzfaserbündel, als zerhackte Plättchen und Stäbe oder in übliche Lamellenform weiterverarbeitet werden. Da die Kohlenstofffasern eine sehr glatte Oberfläche aufweisen, sind spezielle Verarbeitungsmaßnahmen, wie z. B. eine Besandung, für eine Kraftübertragung zwischen Beton und Faser notwendig. Aufgrund der hohen Herstellungskosten werden Kohlenstofffasern derzeit nur wenig eingesetzt [23].

### **2.3.2.5 Basaltfasern**

Die Basaltfaser weist sehr gute physikalische und mechanische Eigenschaften auf. Die zulässigen Verarbeitungstemperaturen liegen zwischen -260 °C und +700 °C. Weiters beträgt der Elastizitätskoeffizient von Basaltfasern insgesamt 89 GPa und die Bruchdehnung erreicht den Wert von 3,15 %. In der Bauindustrie findet die Faser als Teil von Verbundstoffen mit hohem Brandwiderstand und als Oberflächenbewehrung Einsatz. Materialien und Baustoffe aus Basaltfasern weisen deutlich bessere mechanische und physikalische Eigenschaften auf als z. B. aus

Glasvlies hergestellte Materialien. Die Verwendung von Basaltfasern in Beton oder Mörtel als Bewehrungsfaser ist jedoch noch nicht sehr verbreitet. Der Hauptgrund dafür liegt einerseits am Mangel an klaren Empfehlungen bezüglich der zu verwendenden Fasermenge, andererseits aber auch durch ungenügendes Wissen zum Einfluss des Fasergehalts auf die physischen und mechanischen Eigenschaften von Beton und Mörtel.

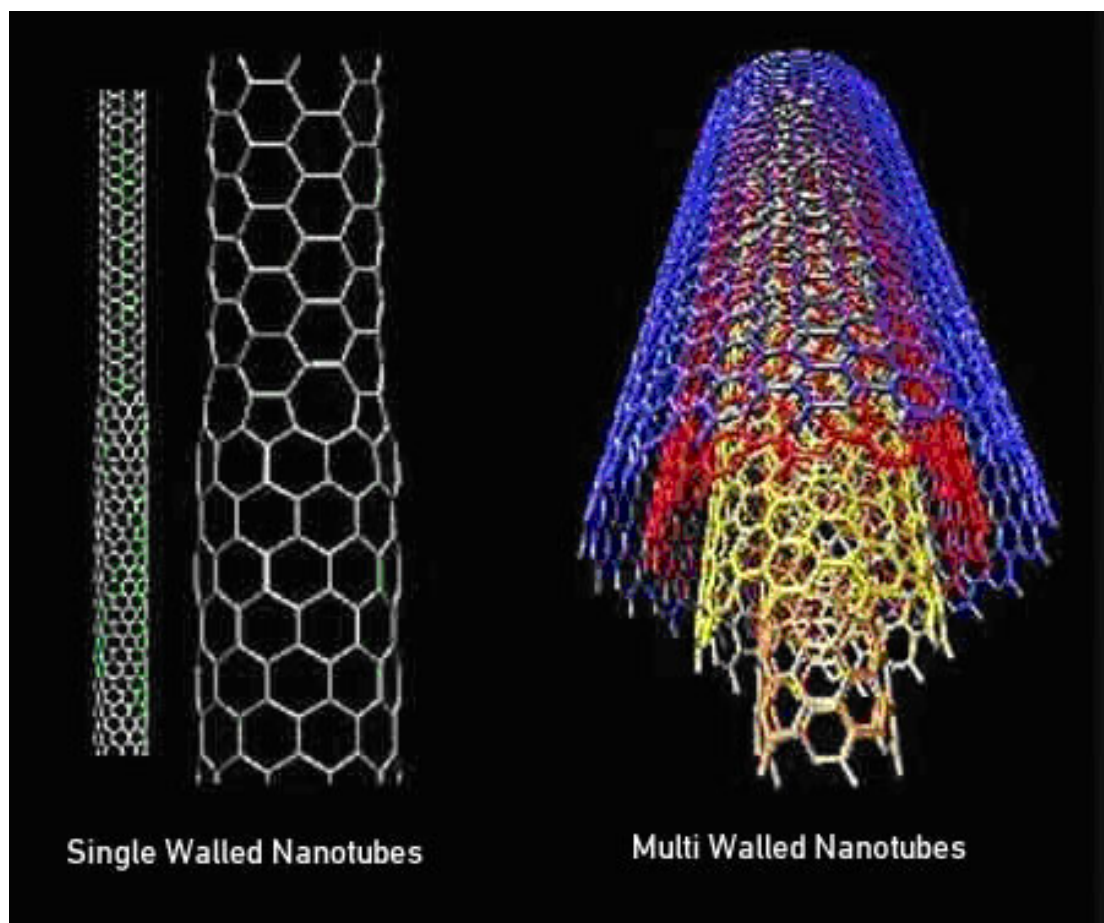
Einige Untersuchungen, die den Einfluss von Basaltfasern in Zementmörtel erforschten, wurden an der Technischen Universität Poznan [44] durchgeführt. In diesen Untersuchungen wurde ein Mörtel mit Zement CEM I 32,5R und handelsüblichen Quarzsand hergestellt. Es wurden die Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit nach 3, 7 und 28 Tagen bei Raumlagerung an Prüfkörpern (Maße: 4 x 4 x 16 cm) festgestellt und weiters in den ersten 28 Tagen Schwindmessungen durchgeführt.

Es zeigte sich, dass die effektiven Auswirkungen der Basaltfaser auf die Veränderungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Mörtels abnahmen, wenn der Faseranteil 2 % des Mörtelgewichts übersteigt oder wenn er unter 0,2 % fällt. Die Zugabe von Basaltfasern im Mörtel bewirkte eine deutliche Steigerung der Biegefestigkeit nach 3 und 7 Tagen. Im Durchschnitt konnte die Biegezugfestigkeit um 13 % gesteigert werden, im Vergleich zu demselben Mörtel ohne Fasern. Nach 28 Tagen nahm die Biegefestigkeit ab. Dabei wurde die höchste Biegezugfestigkeit bei den Proben mit einem Fasergehalt von 0,8 % und 7 Tagen Abbindezeit erreicht. Die höchste Enddruckfestigkeit wurde bei Proben mit einem Fasergehalt von 0,3 bis 0,8 % nach 28 Tagen Lagerung erzielt. Die Versuche zeigten auch, dass ein Überschreiten der Faserbeigabe um 1 % zu einer deutlich schlechteren Verarbeitbarkeit des Mörtels und zur Gefahr der Verdickung führte. Die Prüfungen für das Schwinden ergaben, dass die Zugabe von Basaltfasern zum Mörtel eine Verringerung des Schwindens proportional zum Fasergehalt bewirkte. Die Versuche an der TU Poznan zeigten, dass die optimale Menge Basaltfasern im Mörtel im Bereich von 0,5 bis 0,8 % des Zementgewichts liegt, um die besten mechanischen Eigenschaften zu erzielen. Diese Fasergehalte im Mörtel bewirken auch eine Abnahme des Schwindens des Zementmörtels um ca. 15 bis 20 % [44].

### 2.3.2.6 Carbon-Nanotubes

Eine ganz neue Entwicklung stellen Carbon-Nanotubes dar. Carbon-Nanotubes (CNT) bzw. Kohlenstoffnanoröhren sind mikroskopisch kleine röhrenförmige Gebilde. Ihre Wände bestehen dabei nur aus Kohlenstoff und die Kohlenstoffatome weisen eine wabenartige Struktur mit Sechsecken und jeweils drei Bindungspartnern auf. Der Durchmesser dieser Nanoröhren liegt in der Größenordnung von 1 bis 50 nm. Es können aber auch Durchmesser von bis zu 0,4 nm hergestellt werden. Die Nanoröhren weisen eine Länge von 1 nm bis einige Millimeter auf und können als Röhrenbündel auch in den Zentimeterbereich gehen.

Die Kohlenstoffnanoröhren werden hauptsächlich in ein- und mehrwandige Röhren unterschieden (Abbildung 12). Sie können aber auch in offene oder geschlossene Röhren, bzw. in leere oder gefüllte Röhren (mit Silber, Blei oder Edelgasen) unterschieden werden.



**Abbildung 12: Einwandige Kohlenstoffnanoröhre und mehrwandige Kohlenstoffnanoröhre [54]**

**Tabelle 5: Einige Eigenschaften von Carbon-Nanotubes [52] [53]**

|                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Kohlenstoff-Reinheit                | >95%                            |
| Dichte (einwandige CNTs)            | 0,13 – 0,14 g/cm <sup>3</sup>   |
| Dichte (mehrwandige CNTs)           | 0,14 – 0,18 g/cm <sup>3</sup>   |
| Länge                               | 1 - >10 µm                      |
| Mittlerer Außendurchmesser          | 13 – 16 nm                      |
| Mittlerer Innendurchmesser          | 4 nm                            |
| Anzahl der Wände (mehrwandige CNTs) | 3 -15                           |
| Lose Agglomeratgröße                | 0,1 – 1 mm                      |
| Zugfestigkeit (einwandige CNTs)     | 30.000 N/mm <sup>2</sup>        |
| Zugfestigkeit (mehrwandige CNTs)    | 63.000 N/mm <sup>2</sup>        |
| E-Modul                             | bis 1.000.000 N/mm <sup>2</sup> |
| Wärmeleitfähigkeit                  | 600 W/mK                        |

Die Anwendungen von Kohlenstoffnanoröhren in der industriellen Produktion sind bis auf einige Nischen noch sehr beschränkt. CNTs werden vor allem als Additive in Kunststoffen, Dispersionen, Metallen oder anderen Werkstoffen eingesetzt, um deren Eigenschaften zu verbessern. Leitfähige Kunststoffe, Halbzeuge aus Kunststoff oder robuste Sportgeräte sind nur einige Einsatzmöglichkeiten für Kohlenstoffnanoröhren. Durch die Zugabe von CNTs können Sportgeräte auf Basis von Kompositwerkstoffen wesentlich verbessert werden. Gewichtsreduzierung, erhöhte Steifigkeit und Festigkeit sind nur einige der erzielbaren positiven Effekte. Beispiele für solche Sportgeräte sind: Eishockeyschläger, Baseballschläger, Surfbretter, Skistöcke und Skier oder Jagdpfeile. Weiter Einsatzgebiete in der universitären und industriellen Forschung sind: Transistoren, Nanoröhrenspeicher, Nanoröhren für Displays und zur Verbesserung von Kunststoffen [52], [53].

Da Carbon-Nanotubes bzw. Kohlenstoffnanoröhren ein neuartiges Produkt darstellt, findet man nur wenige Anwendungsbeispiele in Kombination mit Beton. CNTs werden im Beton als Fasern verwendet, um dessen Eigenschaften zu verbessern. Vor allem steigern sie dabei die Festigkeit und reduzieren die Wärmeleitfähigkeit. Eine Untersuchung mit CNTs mit Beton wurde in [55] durchgeführt. Hier wurden Nanoröhren aus Karbon als hochfeste nanodispersive Bewehrung in Schaumbeton eingesetzt, um die physikalisch-mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Der verwendete Zusatzstoff wies eine Dichte von 0,086 g/cm<sup>3</sup> auf und enthielt Nanoröhren mit einem Durchmesser von 40-60nm. Die Bewehrungsmenge in der Mischung betrug 0,05% der Ausgangsmasse. Mit dieser Mischung wurden

Probewürfeln (100 x 100 x 100 mm) hergestellt und die Druckfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Es zeigte sich, dass durch Zugabe von Nanoröhren aus Karbon die durchschnittliche Dichte des Schaumbetons von 330 auf 309 kg/m<sup>3</sup> reduziert wurde und die Druckfestigkeit von 0,18 auf 0,306 MPa gesteigert werden konnte, was eine Verbesserung um 70% bedeutet. Weiters wurde auch die Wärmeleitfähigkeit um 20% (von 0,07 auf 0,056 W/mK) reduziert. In dieser Untersuchung hat man weiters festgestellt, dass die Nanoröhren im Schaumbeton als Kristallisationskeime wirken. Aus diesem Grund spielt die Verteilung der Nanoröhren eine entscheidende Rolle für die Ausrichtung der Kristallisation. Sie bewirkt einerseits die Entwicklung einer Fibrillenstruktur an den Porenwänden, welche wiederum die Stetigkeit und Gleichförmigkeit sicherstellt, was wiederum zu einer einheitlichen Porengröße führt. Andererseits wird durch die Kristallisationsausrichtung eine molekulare Ummantelung der Nanoröhren garantiert. Durch diesen Mechanismus konnte die Festigkeit gesteigert und die Wärmeleitfähigkeit reduziert werden [55].

Eine weitere Anwendung, wo Carbon-Nanotubes zum Einsatz kamen, war die Entwicklung eines Kanus aus Beton an der Universität von Siegen. Das Kanu weist eine Länge von 4,83 m, eine Breite in der Mitte von 0,81 m ist bei einer mittleren Wandstärke von 6mm rund 80 kg schwer. Bei der Bewehrung der Betonkonstruktion wurden Kohlenstoffnanoröhren eingesetzt. Zur Erhöhung der Biegezugfestigkeit wurde neben den CNTs eine leichte, widerstandsfähige Bewehrung verwendet. Da die CNTs so klein sind, lassen sie sich besser und gleichmäßiger im Beton verteilen als gewöhnliche Stahl- oder Kunststoffbewehrungen. Durch die Verwendung der Kohlenstoffnanoröhren und eventuell einer Kombination mit anderen Bewehrungsmitteln (Stahl- oder Kunststofffasern) können neue Baustoffe gewonnen werden, die wesentlich bessere physikalische und mechanische Eigenschaften aufweisen [56].

### **2.3.3 Wirkungsweise von Stahlfasern**

#### **2.3.3.1 Verbundwirkungen**

Eine wichtige Komponente bei der Erfassung der Tragfähigkeit stellt das Verbundverhalten zwischen Beton und den Zuelementen dar. Ultrahochfeste Betone können nur geringe Zugkräfte aufnehmen. Die Aufnahme der Zugkräfte wird

beim UHPC durch die Fasern wahrgenommen [23]. Eines der wichtigsten Kriterien zum Verständnis für das Verhalten von faserverstärkten Baustoffen ist die Beschreibung der Haftung zwischen Faser und Matrix. Die Haftung dient zur Übertragung der Kraft zwischen Faser und Matrix an der Grenzfläche und stellt eine schwache Bindung da, welche die meisten mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes, wie seine Zug-, Bruch- und Dehnungseigenschaften, regelt. Die wichtigsten Komponenten der Haftung in faserverstärkten Verbundwerkstoffen sind [11] [25]:

- Physikalische und chemische Bindung

Die Kraftschlusskomponente ist bei Stahlfasern und auch bei den meisten Kunststofffasern schwach bzw. existiert gar nicht. Deshalb wird oft durch Zugabe von adhäsiven Wirkstoffen der Kraftschluss verbessert. Generell sind chemische und physikalische Bindungen sehr effektiv und erlauben nur relativ kleinen Schlupf vor dem Versagen.

- Reibung

Beeinflusst wird die Reibungskomponente von der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix, der Feinheit der Grenzschicht um die Faser und den Randbedingungen. Der Reibungswiderstand ist hierbei wichtig. Er bleibt bis zum vollständigen Herausziehen der Faser wirksam und fällt generell mit wachsendem Schlupf ab.

- Mechanische Verzahnung

Bei verdrehten, gekerbten oder Hakenfasern tritt durch die Fasergeometrie eine mechanische Verzahnung auf. Diese Komponente wird nach dem Versagen der adhäsiven Haftung wirksam und tritt bis zu einer bestimmten Schlupfgröße auf.

- Faser-in-Faser - Verfalzung

Wenn Fasern mit umgebenden Fasern in Kontakt stehen, kommt es zu einer Faser-in-Faser - Verfalzung. Dies tritt aber nur bei Betonen mit sehr hohem Fasergehalt auf.

### 2.3.3.2 Bruchmechanische Überlegungen

Zur Beschreibung der risshemmenden Wirkung der Stahlfaserbewehrung bzw. zur Modellierung der Duktilität des faserverstärkten Materials werden in der Fachliteratur bruchmechanische Kenngrößen, wie z. B. die Bruchenergie  $G_f$  und die charakteristische Länge  $l_k$ , verwendet und angegeben. Die theoretischen Ansätze dieser bruchmechanischen Betrachtungsweisen, welche meist als „Riß-Stop-Mechanismus“ bzw. „Mechanics of Crack Arrest in Concrete“ bezeichnet werden, gehen auf die Arbeiten von Griffith (Spezifische Oberflächenenergie) und deren Weiterentwicklungen durch Irwin (Betrachtung der plastischen Verformungsarbeit an den Risspitzen) zurück. Zur Bestimmung der Bruchenergie  $G_f$  (fracture energy) von Beton und Stahlfaserbeton definiert das RILEM Technical Committee TC-50 FMC im Rahmen der Auswertung eines Einzellast-Biegeversuches mit konstanter Durchbiegungsgeschwindigkeit  $G_f$  als die Fläche unter dem Last-Durchbiegungsdiagramm (Abbildung 13), bezogen auf die Betonfläche im gekerbten Querschnitt. Die Bruchenergie  $G_f$  ist jene Energie, die zur Erzeugung eines Risses einer Einheitslänge erforderlich ist und hat die Einheit N/m [64].

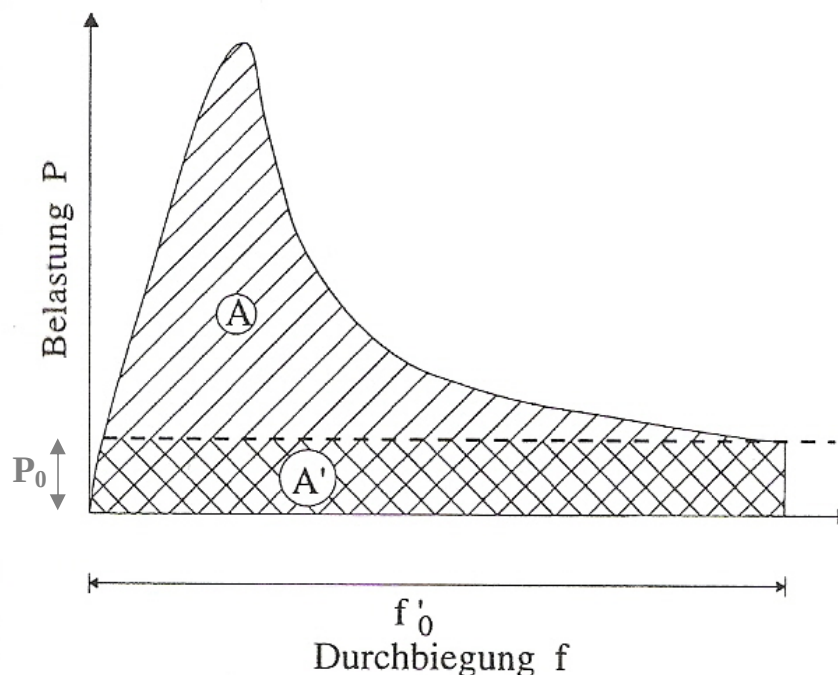


Abbildung 13: Last-Durchbiegungsdiagramm [64]

$$G_f = \frac{A - A'}{b \cdot (d - a_0)}$$

**Formel 5: Bruchenergie [64]**

A...Fläche unter dem Last-Durchbiegungsdiagramm

A`...Fläche unter dem Last-Durchbiegungsdiagramm infolge Eigengewichts

b...Breite des Probekörpers

d...Höhe des Probekörpers

a<sub>0</sub>...Kerbtiefe

P<sub>0</sub> = G<sub>0</sub> \* g/2

G<sub>0</sub> = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Die Stahlfaserbewehrung wirkt hemmend auf den Rissfortschritt in der Matrix und erhöht die Bruchdehnung, da die steifen Fasern die Spannungskonzentrationen an der Risswurzel reduzieren und die Energie, die zum Risswachstum erforderlich ist, durch die Fasern erhöht wird. Ein wichtiges Kriterium für die Wirksamkeit einer Faserbewehrung ist der Abstand der Fasern zueinander. Der Mittlere Faserabstand ist abhängig von:

- Faserdurchmesser
- Volumenanteil der Fasern
- Richtungsbeiwert
- Verteilungsbeiwert

Weiters hängt die Wirkungsweise der Bewehrung von der Fasergeometrie, dem Fasergehalt, den Verbundeigenschaften der Faser, der Herstellungs- und Verdichtungsart und von der Zusammensetzung des Betons, vor allem dem Größtkorn des Zuschlags, ab [11] [24]. Ein weiterer Punkt den es zu beachten gibt ist, dass die risshemmende Wirkung der Faser nur dann möglich ist, wenn das Größtkorn des Zuschlages kleiner als der wirksame Faserabstand ist. Da bei Ultrahochfesten Betonen mit sehr kleinen Zuschlägen gearbeitet wird, ist dieser Effekt selbst bei geringem Fasergehalt kein Problem.

### 2.3.3.3 Versagensmechanismus bei faserverstärkten Betonen

Die Faser in der Matrix kann im Prinzip auf zwei unterschiedliche Arten versagen:

- Versagen durch Faserauszug
- Versagen durch Faserreißen

Welche von den beiden Versagensarten auftritt, hängt von folgenden Faktoren ab:

- $l/d$  Verhältnis
- Querschnittsform, Aufbiegungen
- Zugfestigkeit der Faser
- Verbundfestigkeit

Das  $l/d$  Verhältnis, die Querschnittsform und die Zugfestigkeit der Faser ergeben sich aus den Eigenschaften der Faser selbst. Die Verbundfestigkeit hängt von der Oberflächenbeschaffenheit der Faser und von der Festigkeit der umgebenden Betonmatrix ab. Um das Versagensverhalten bei faserbewehrten Betonen besser veranschaulichen zu können, wurde der Begriff der kritischen Faserlänge ( $l_{krit}$ ) eingeführt. Die kritische Faserlänge ist so definiert, dass die eingeleiteten maximalen Verbundspannungen über die halbe Länge gerade der maximal aufnehmbaren Faserzugkraft entsprechen. Von einer unterkritischen Faserlänge spricht man, wenn die Faser nicht ausgelastet ist. Bei überkritischen Faserlängen kommt es zum Fließen des Stahls und bei zu großen Zugdehnungen kommt es zum Reißen der Faser. Die kritische Länge lässt sich durch die Ausbildung von Oberflächenprofilierungen oder Endverankerungen reduzieren. Die auf den Markt erhältlichen Stahlfasern mit einem  $l/d$  Verhältnis von 50 – 100 weisen im Allgemeinen eine unterkritische Länge auf. In der Regel reißen sie nicht, sondern versagen durch Auszug aus der Matrix. Sie werden nicht optimal ausgenutzt, sind aber bei großen Verformungen und Rissweiten noch in der Lage Kräfte zu übertragen, wo durch kein plötzliches Versagen des faserbewehrten Betons auftritt. Ein solches duktiles Verhalten ist in vielen Anwendungen erwünscht, da es eventuell die Möglichkeit zur Einleitung von Sicherheitsmaßnahmen offen hält.

#### **2.3.3.4 Auswirkungen der Stahlfasern auf die Festbetoneigenschaften**

Durch die Zugabe von Stahlfasern im Beton können die Festbetoneigenschaften aufgewertet werden. Dabei sind Fasern am effektivsten, wenn sie in Richtung der Hauptspannungen gerichtet sind und der Abstand untereinander möglichst klein ist. Während der Herstellung sollte bereits darauf geachtet werden, dass die Stahlfasern gleichmäßig verteilt und entsprechend den Hauptzugspannungen orientiert sind. Durch die Rüttelenergie und die Konsistenz kann die Lage der Fasern im Beton verändert werden. Bei dem Hydratationsvorgang muss der faserbewehrte Beton vor schädigenden Einflüssen geschützt werden, dazu zählt der Schutz vor Auswaschungen, Austrocknung, chemische Angriffe und Erschütterungen. Eine Vernachlässigung oder gar ein Verzicht der Nachbehandlung kann die Festbetoneigenschaften ebenfalls verschlechtern.

#### **Elastische Verformung**

Im wesentlichen ist die Wirkung der Fasern auf das Verformungsverhalten im ungerissenen Zustand nur gering. Da sehr häufig eher niedrigere Fasergehalte im Beton verwendet werden, ist der Stahlgehalt im Querschnitt auch zu klein, um eine verbesserte Wirkung auf die elastische Verformung aufgrund des höheren Elastizitätsmoduls von Stahl zu erzielen. Erst ab höheren Fasergehalten (ab 8 – 10%) zeigt sich eine Steigerung des E-Moduls um ca. 5%.

#### **Rissverhalten**

Stahlfasern haben eine positive Wirkung bezüglich des Rissverhaltens. Sie hemmen die Rissentwicklung als „Rissbremse“ und sorgen auch nach der Rissöffnung für eine weitere Kraftübertragung bzw. zu einer signifikanten Verbesserung der Arbeitsfähigkeit in den gerissenen Bereichen. Die Folge ist, dass Stahlfasern das Verformungsverhalten eines Betonbauteils im gerissenen Zustand entscheidend verändern können. Durch die Faserzugabe im Beton wird nicht so sehr die Erstrisslast, sondern eher die Festigkeit nach dem Eintreten der ersten Risse erhöht.

### **Verhalten bei Zugbeanspruchung**

Bei zentrischem Zug verhält sich Stahlfaserbeton zunächst linear elastisch. Bei Mikrorissen werden die Kräfte auf die Faser in die Betonmatrix konzentriert, dadurch kommt es zu einem Verformungszuwachs bis zum Erreichen der Maximallast. Bei größter Beanspruchung kommt es dann zu einer Verstärkung der Rissbildung und zu einer Abnahme der Zugfestigkeit. Bei Biegezugbeanspruchung tritt eine lineare Dehnungsverteilung auf, die dem Faserbeton die Möglichkeit gibt, Spannungen im Querschnitt umzulagern. Wenn z. B. die Zugfestigkeit bei biegebeanspruchten Querschnitten im Bereich der größten Dehnungen abnimmt, kann die neutrale Achse in den Bereich der größten Druckspannungen wandern. Das bewirkt eine Vergrößerung der Zugzone und eine Verkleinerung der Druckzone. Da die Druckfestigkeit von Beton wesentlich größer als die Zugfestigkeit ist und die Zugfestigkeit bei Faserbewehrten Betonen nicht gleich auf null abfällt beim Auftreten von Erstrissen, kann es zu einer Einstellung eines neuen Gleichgewichtszustandes kommen.

### **Verhalten bei Druckbeanspruchung**

Im Allgemeinen sind die aufnehmbaren Druckspannungen von Stahlfaserbewehrtem Beton im ausgehärteten Zustand größer als bei Beton ohne Fasern, dabei lassen sich die Festigkeitswerte um bis zu 30% steigern. Durch die Faser kommt es zu einer Behinderung der Quersugrisse bei Druckbeanspruchung. Die Faserbewehrung hemmt das Wachstum der Mikrorisse parallel zur Belastungsrichtung und dadurch verbessert sich das Nachbruchverhalten.

### **Verhalten bei Schubbeanspruchung**

Versuche haben gezeigt, dass die übertragbaren Schubkräfte durch die Faserwirkung deutlich ansteigen. Diese Erhöhung der Schubfestigkeit kann auf mehrere Punkte zurückgeführt werden. Einerseits sind die Stahlfasern in der Betonmatrix gleichmäßig verteilt und liegen sehr dicht beisammen. Daher bremsen sie die auftretenden Risse. Andererseits kommt es beim Einsatz von Stahlfasern zu einer Erhöhung der Erstrissfestigkeit und auch der Endzugfestigkeiten. Weiters kommt es zu einer besseren Schubübertragung zwischen den Rissufern durch die Verminderung der Rissbreite [11].

## **2.4 Eigenschaften von UHPC**

### **2.4.1 Allgemeine Eigenschaften**

#### **2.4.1.1 Homogenität**

Grundsätzlich spricht man bei Beton von einem heterogenen Baustoff. Ultrahochfester Beton kann aufgrund der verwendeten Ausgangsstoffe, der Art der Herstellung und der Nachbehandlung als ein nahezu homogener Baustoff bezeichnet werden. Bei einem UHPC fehlen große und grobe Zuschläge, die durch feine Sande ersetzt werden, deren Größtkorn nur wenige Mikrometer beträgt. Des Weiteren wird das Verhältnis der E-Module von Zuschlag und hydratisierten Zementleim verringert und liegt bei einem UHPC zwischen 1,0 bis 1,4 [11] [36]. Weiters wird die Bildung einer Schwächezone zwischen Zuschlagskorn und Zementstein aufgrund der Zugabe von Mikrosilika vermieden und durch die Verringerung der Zuschlagsmenge kommt es zu einer Erhöhung der Zement- und Mikrosilikamenge [29]. Durch das Aufbringen eines Druckes auf den Frischbeton ist es weiters möglich das chemische Schrumpfen auszugleichen und zu kompensieren. Durch diese Homogenität weist der UHPC Eigenschaften auf, die ihn in vielen Einsatzanwendungen mit dem Baustoff Stahl konkurrieren lassen [11] [36].

#### **2.4.1.2 Dichte und Porosität**

Da die Dichte und Porosität von ultrahochfesten Betonen eng miteinander verbunden sind, werden sie an dieser Stelle gemeinsam behandelt. Eine hohe Dichte bewirkt in einem Baustoff eine geringe Porosität und umgekehrt bedeutet eine hohe Porosität eine niedrige Dichte. Durch die verwendeten Ausgangsstoffe, den optimierten Mischprozess und einer entsprechenden Nachbehandlung beim UHPC, wird ein sehr dichtes Material hergestellt.

Für die Charakterisierung eines UHPC wird gerne die Relativedichte verwendet. Die Relativedichte ist das Verhältnis von Rohdichte zum Ausschalungszeitpunkt zu Reindichte des granulierten Pulvergemisches. Die Relativedichte ist also höher, je höher die Rohdichte zum Ausschalungszeitpunkt ist.

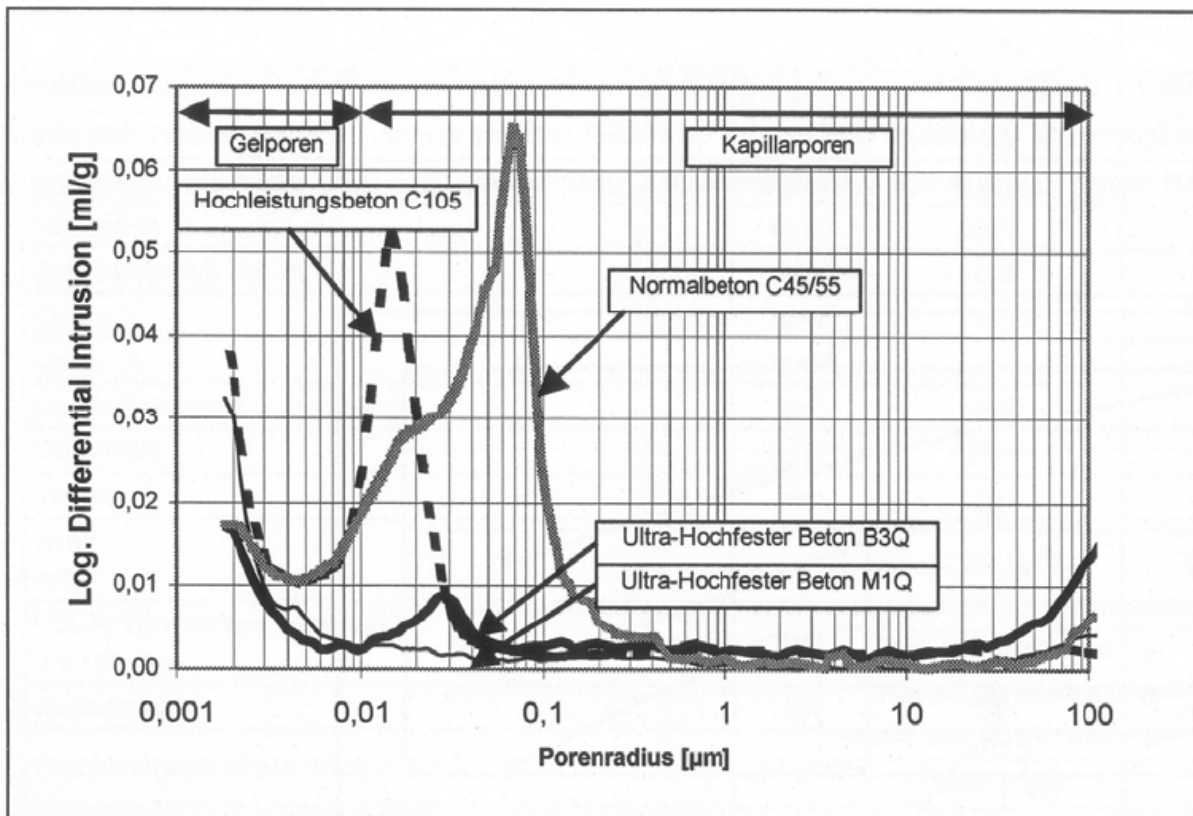
Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Porosität. Die Porosität steht im engen Zusammenhang mit der Dichte eines Betons und beeinflusst die Festbetoneigenschaften. Generell kann man sagen, dass durch bautechnische Prozesse hergestellte Baustoffe in der Regel ein größeres Porenvolumen aufweisen, da durch das am Abbindevorgang beteiligte Wasser ein Porenraum entsteht [11] [37].

Ultrahochfeste Betone weisen eine Rohdichte von ca. 2400 bis 2600 kg/m<sup>3</sup> auf und liegen damit um ca. 10 % über der Rohdichte eines Normalbetons. Durch die sehr hohe Packungsdichte der Ausgangsstoffe eines UHPC kommt es zu weniger Freiraum zwischen den Bestandteilen und somit zu einer geringeren Porosität. Ultrahochfeste Betone besitzen deshalb üblicherweise eine Gesamtporosität zwischen 4 – 6 Vol. %. Der für den Transport von Flüssigkeiten und Gasen entscheidende Kapillarporenanteil liegt bei ca. 1,5 – 2,0 Vol. % [23] [28].

Die Gesamtporosität setzt sich aus Luftporen, Kapillarporen und Gelporen zusammen. Luftporen oder auch Verdichtungsporen genannt, weisen eine Größe von > 1 mm auf, entstehen durch unvollständiges Verdichten des Frischbetons und sind meist unregelmäßig geformt.

Kapillarporen sind Poren in der Größenordnung von 0,01 bis 0,1 µm. Sie entstehen durch das überschüssige Wasser, welches nicht an der Hydratation teilgenommen hat und auch nicht in den Gelporen physikalisch gebunden ist. Im Zementstein bleibt nach dem Verdunsten des überschüssigen Wassers eine zusammenhängende Porenstruktur zurück. Dies gilt jedoch nur für Untersuchungen an noch nicht vollständig hydratisierten UHPC. Ein vollständig hydratisierter UHPC ist durch den niedrigen W/B-Wert nahezu frei von Kapillarporen.

Gelporen sind Poren in einem Größenbereich von 0,001 bis 0,01 µm. Sie entstehen mit der Bildung des Zementgels und sind unter normalen Bedingungen stets mit Porenlösung gefüllt und praktisch undurchlässig für Gase.



**Abbildung 14: Vergleich der Porenradienverteilung verschiedener Betone [38]**

Die Abbildung 14 zeigt eine im Quecksilberdruckporosimeter gemessene Porenradienverteilung eines hochwertigen Betons der Festigkeitsklasse C105 im Vergleich zu einem Normalbeton und zwei ultrahochfeste Betone. Dabei lag die Gesamtporosität des Normalbetons bei 15 Vol.-%. Die des C105 Betons bei ca. 11 Vol.-% und die der ultrahochfesten Betone bei jeweils ca. 6 Vol.-%. Die Kapillarporen, die für die Stofftransporte verantwortlich sind, fehlen beim UHPC praktisch zur Gänze. Das Fehlen der Kapillarporen bei einem UHPC ist der Hauptgrund dafür, dass ordentlich hergestellter UHPC einen sehr guten Widerstand gegen Carbonatisierung, gegen das Eindringen von Chloridionen und gegen Frost- und Frostaussalz Angriff besitzt [29] [38].

#### 2.4.1.3 Schwinden und Kriechen

Ein gegen seine Umgebung abgedichteter Beton schrumpft während der Hydratation. Die daraus resultierende auftretende Verkürzung an den äußeren Abmessungen eines Betonkörpers bezeichnet man als chemisches Schwinden [11]. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird mit Schwinden die Volumenverringering des erhärteten Betons

bezeichnet. Schwinden ist eine zeitabhängige Verformung und unabhängig von der Belastung. Verursacht wird das Schwinden des Betons durch das Schwinden des Zementsteins. Deshalb wird das Ausmaß des Schwindens hauptsächlich durch den Wasserzementwert, den Zementgehalt, die Zementart, die Lagerungsbedingungen und die Nachbehandlung beeinflusst [1]. Durch Untersuchungen und Versuche an UHPC ist man zu der Erkenntnis gekommen, dass das Anfangsschwinden bei einer Nachbehandlung mit beaufschlagtem Druck ausgeglichen werden kann [11].

Beim Schwinden werden folgende drei Schwindmechanismen unterschieden:

- Chemisches Schwinden
- Austrocknungsschwinden
  - o Autogenes Schwinden
  - o Trocknungsschwinden

### **Chemisches Schwinden**

Das chemische Schwinden kann nach [60] mit einem durchschnittlichen Wert von 6 ml pro 100 g hydratisierten Zementen angenommen werden. Auch die puzzolanische Reaktion des Silikastaubes liefert, neben der Zementhydratation, mit ca. 20 ml pro 100 g reagiertem Silikastaub einen großen Beitrag zum chemischen Schwinden.

### **Autogenes Schwinden**

Aufgrund des niedrigen W/Z-Wertes steht nicht genügend Anmachwasser für eine vollständige Hydratation zur Verfügung und so wird auch das physikalisch absorbierte Kapillarwasser verbraucht. Dadurch entsteht eine kapillare Randspannung in den ganz oder teilweise ausgetrockneten Poren, die eine äußere Volumenänderung des Probekörpers bewirkt. Diese Volumenänderung wird durch Selbst austrocknung erzielt und wird als autogenes Schwinden bezeichnet. Mehrere Untersuchungen beim UHPC haben gezeigt, dass die autogenen Schwindverformungen zeitgleich mit der Senkung der relativen Feuchte in den Poren infolge Selbst austrocknung und der Entwicklung der mechanischen Eigenschaften beginnen. Autogenes Schwinden erfolgt konstant über den gesamten Querschnitt. Deshalb kommt es zu einem Verformungsverhalten ohne Zwangsspannungen.

### **Trocknungsschwinden**

Trocknungsschwinden entsteht, wenn ein frisch betonierter Bauteil oder Probekörper nach dem Ausschalen nicht nachbehandelt und nicht vor Verdunstung geschützt wird. Der Betonkörper wird dabei solange Feuchtigkeit abgeben, bis er die Ausgleichsfeuchte mit seiner Umgebung erreicht hat. Dieser Vorgang verläuft sehr rasch in den ersten Stunden nach dem Ausschalen und wird immer langsamer mit abnehmender Feuchte. Ein Grund dafür ist, dass das Wasser aus den größeren Kapillarporen im Beton zuerst verdunstet. Je geringer die Feuchte des Betonkörpers ist, desto mehr muss das Wasser aus den kleineren Kapillarporen für die Verdunstung an die Oberfläche transportiert werden. Die kapillare Spannung nimmt jedoch mit dem kleiner werden des Porendurchmessers zu und führt dazu, dass der Transport des Wassers an die Oberfläche langsamer wird und die Verdunstungsrate abnimmt [61].

### **Kriechen**

Als Kriechen bezeichnet man die Verformungszunahme des belasteten Betons mit der Zeit. Dabei können die Kriechverformungen ein Mehrfaches der elastischen Verformungen erreichen. Sie sind für die Durchbiegung von Stahlbetonbalken und -platten von großer Bedeutung. Der Kriechmechanismus und seine Ursachen sind auch für Normalbeton noch nicht vollständig geklärt. Es wird angenommen, dass das Kriechen vor allem auf die Bewegung und Umlagerung von Wasser im Zementstein und auf die Mikrorissbildung zurückzuführen ist [1]. Für UHPC liegen noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen und Versuche über Kriechverformungen vor, da noch keine Objekte mit diesem Material errichtet wurden, an denen man die erforderlichen Langzeituntersuchungen hätte durchführen können [11].

## **2.4.2 Mechanische Eigenschaften**

### **2.4.2.1 Druckfestigkeit**

Einer der wichtigsten Kenngrößen zur Klassifizierung von Beton ist die Druckfestigkeit. In den meisten nationalen und internationalen Normen kommt es zu einer Einteilung der Betone nach der Druckfestigkeit [1]. Betone die als „ultrahochfest“ bezeichnet werden, weisen Druckfestigkeiten oberhalb der in ÖNORM

EN 206-1 definierten Festigkeitsklasse C 100/115 auf [12]. Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde, hängt die Druckfestigkeit von UHPC von vielen Faktoren ab. Durch eine optimale Packungsdichte, eine optimale Mischung, sorgfältige Verarbeitung, den fachgerechten Einbau und einer Nachbehandlung lässt sich die Festigkeit steigern und es sind Druckfestigkeiten von über 200 N/mm<sup>2</sup> möglich. Bei optimaler Nachbehandlung bei Temperaturen um die 400 °C und Aufbringen eines Druckes von 50 N/mm<sup>2</sup> auf den frischen Beton lassen sich sogar Druckfestigkeiten bis zu 500 N/mm<sup>2</sup> erzielen [11].

### **2.4.2.2 Biegezugfestigkeit**

Die Biegezugfestigkeit ist vor allem von den Eigenschaften des Zementsteins, den Eigenschaften des Zuschlags und der Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag abhängig. Weiters kann die Biegezugfestigkeit, falls erwünscht, entscheidend durch eine Faserbeigabe erhöht werden. Die Auswirkung der verschiedenen Fasertypen auf die Eigenschaften des UHPC müssen noch genauer untersucht werden. So bewirken Stahlfasern zwar höhere Festigkeiten, während Kunststofffasern günstigere Eigenschaften im Brandfall aufweisen. Generell ist zu beobachten, dass bei allen UHPC-Mischungen die maximal erreichbare Biegespannung ungefähr doppelt so groß ist wie jene, die beim Auftreten der ersten Risse erreicht wird. Durch die Zugabe von Fasern (meistens Stahlfasern) können Biegezugfestigkeiten über 30 N/mm<sup>2</sup> problemlos erreicht werden [11] [29]. Durch den Einsatz von Fasern kann nicht nur die Biegezugfestigkeit gesteigert werden, sondern auch das Nachbruchverhalten verbessert werden [39].

### **2.4.2.3 Elastizitätsmodul**

Der statische E-Modul ist durch den Tangens der Spannungs-Dehnungslinie definiert. Dabei ist die Form der Kurve (ob anfänglich geradlinig steil oder vom Ursprung aus flacher gekrümmt) abhängig von der Zementsteinqualität und -menge und von der Art der Zuschläge. Der E-Modul wird in den meisten nationalen Normen als Funktion der Druckfestigkeit angegeben, was allerdings nur sinnvoll ist, wenn dabei Betone mit üblichen Zuschlägen und Zementen als Grundlage verwendet werden [36]. Der Zusammenhang zwischen E-Modul und der Betondruckfestigkeit

bezogen auf hochfeste Betone, folglich auch auf UHPC, muss etwas differenzierter betrachtet werden. In der Regel wird die Druckfestigkeit von Normalbeton durch die Zementsteinfestigkeit bzw. den Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein begrenzt. Die Steifigkeit und damit der E-Modul hängen sowohl von der Zementmatrix als auch von der Art der Zuschläge bzw. von den Fasern ab. Solange der Zementstein bzw. der Verbund das schwächste Glied ist, wird sich daher eine Steigerung der Zementsteinfestigkeit bzw. eine Verbesserung des Verbundes eher direkter auf die Druckfestigkeit als auf den E-Modul auswirken. Jedoch ist bekannt, dass mit zunehmender Druckfestigkeit auch günstigere E-Modulwerte erzielt werden können. Mit Hilfe von Wärmenachbehandlung lässt sich die Festigkeit, als auch der E-Modul steigern. Je nach Höhe der Nachbehandlungstemperatur können E-Modulwerte zwischen 50.000 bis 70.000 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Das entspricht in etwa dem doppelten E-Modul von Normalbeton [11].

### **2.4.2.4 Bruchenergie und Duktilität**

Das duktile Verhalten des Betons ist abhängig von der Zusammensetzung der Matrix und dem Faseranteil. Das bedeutet, dass mit steigender Festigkeit das Material spröder wird und die Duktilität abnimmt. Diesen Effekt kann man im Spannungs-Dehnungsdiagramm des hochfesten Betons durch die stark abfallende Linien nach Erreichen der maximalen Spannung beobachten. Diese Aussage trifft auf Faserbewehrten UHPC nicht zu, da die beigemischten Stahlfasern diesen plötzlichen Spannungsabfall bei Erreichen der maximalen Spannung kompensieren. In der folgenden Abbildung 15 sind die Bruchenergie und die Biegezugfestigkeit verschiedener Materialien dargestellt. Man kann sehen dass sich UHPC im Bereich des Aluminiums befindet [11] [40].

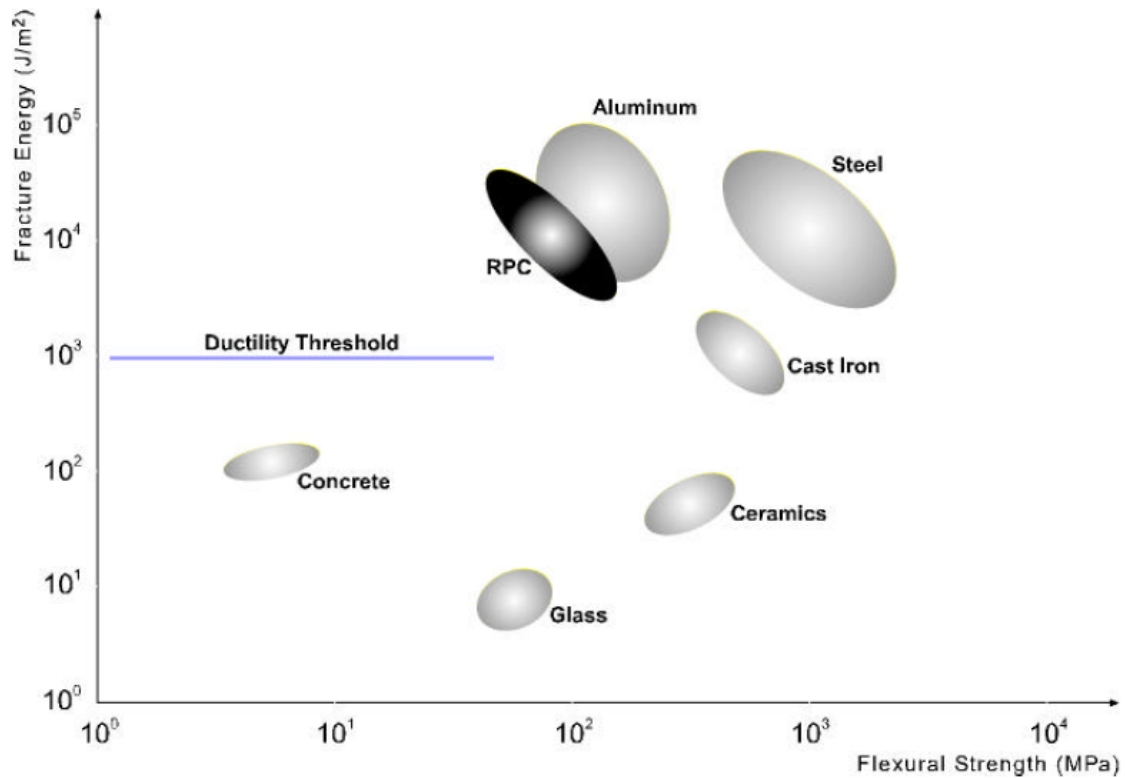


Abbildung 15: Bruchenergie und Biegezugfestigkeit verschiedener Materialien [40]

#### 2.4.2.5 Luft- und Wasserdurchlässigkeit

Im Allgemeinen ist die Durchlässigkeit von Zement basierende Baustoffen abhängig vom Porensystem und von der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung. Da ultrahochfeste Betone eine geringe Porosität aufweisen, wurden die UHPC Proben vorbehandelt und einer Luftdurchlässigkeitsprüfung unterzogen, wobei die Probekörper jeweils 5 Tage bei 50 °C und 30 Tage bei 80 °C getrocknet wurden. Die Luftdurchlässigkeit (Permeabilität) wurde dabei mit der Hagen-Poiseuille Methode ermittelt [41].

Tabelle 6: Luftdurchlässigkeit verschiedener Betone [41]

| Luft-Permeabilität K<br>in $10^{-18}$ [m²] | Vorbehandlung der Proben          |                                  |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
|                                            | 5 Tage bei 50 °C                  | 30 Tage bei 80 °C                |
| C 30 (Normalbeton)                         | 30                                | Wert zu groß für den Messbereich |
| C 80 (HPC)                                 | 0,3                               | 120                              |
| UHPC                                       | Wert zu klein für den Messbereich | 2,5                              |

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Luftdurchlässigkeitsmessung. Man kann sehen wie gering die Durchlässigkeit des UHPC im Vergleich zu den andern Betonen ist. Bei der Vorbehandlung (Trocknung 5 Tage bei 50 °C) konnte überhaupt keine Durchlässigkeit gemessen werden, erst nach einer intensiven Trocknung bei 30 Tagen mit 80 °C wurde ein Wert bei dem Messgerät ausgegeben.

### 2.4.2.6 Brandverhalten

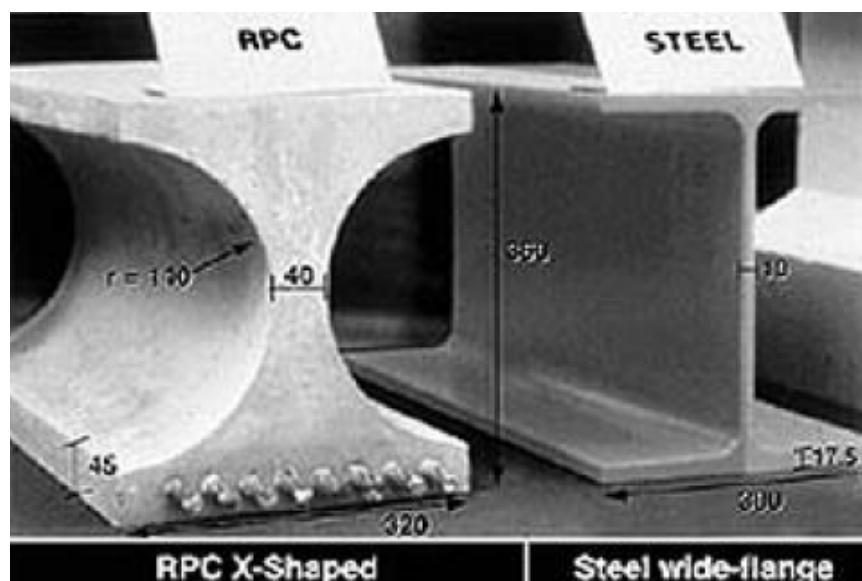
Das sehr dichte Gefüge von UHPC ist im Brandfall eher nachteilig. Bei Steigerung der Temperaturen verdampfen zunächst das in den verbliebenen Poren vorhandene freie Wasser und dann erst das physikalische gebundene Wasser. Bei Normalbeton kann der Wasserdampf zum Teil direkt durch die größere Porosität nach außen gelangen. Der andere Teil diffundiert in den Betonkörper und kondensiert später in den noch nicht erhitzten Bereichen. Sind die Poren in den Kondensationsbereichen mit Wasser gefüllt, so wird die Diffusion des Wasserdampfes behindert und der Dampfdruck steigt an. Dies kann zu Abplatzungen führen, wenn der Dampfdruck die Zugfestigkeit des Betons überschreitet.

Im Unterschied zu Normalbeton kann der Wasserdampf bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen nicht aus der Verdampfungszone entweichen und die Sättigungszone liegt näher an der Betonoberfläche. So kommt es zu einem schnelleren und höheren Anstieg des inneren Dampfdruckes als bei herkömmlichen Betonen. Obwohl ultrahochfeste Betone eine höhere Zugfestigkeit besitzen, kann es zu Abplatzungen kommen, die dann zu einem Bauteilversagen führen. Aus diesem Grund werden dem UHPC häufig feine Polypropylenfasern mit einem Gehalt von 0,3 bis 0,6 Vol.-% beigemischt, welche fest in dem Zementstein eingebunden sind. Diese Fasern verschwelen bei ca. 170 °C und hinterlassen kleine Hohlräume, in denen der entstandene Dampfdruck abgebaut werden kann [42] [45] [49].

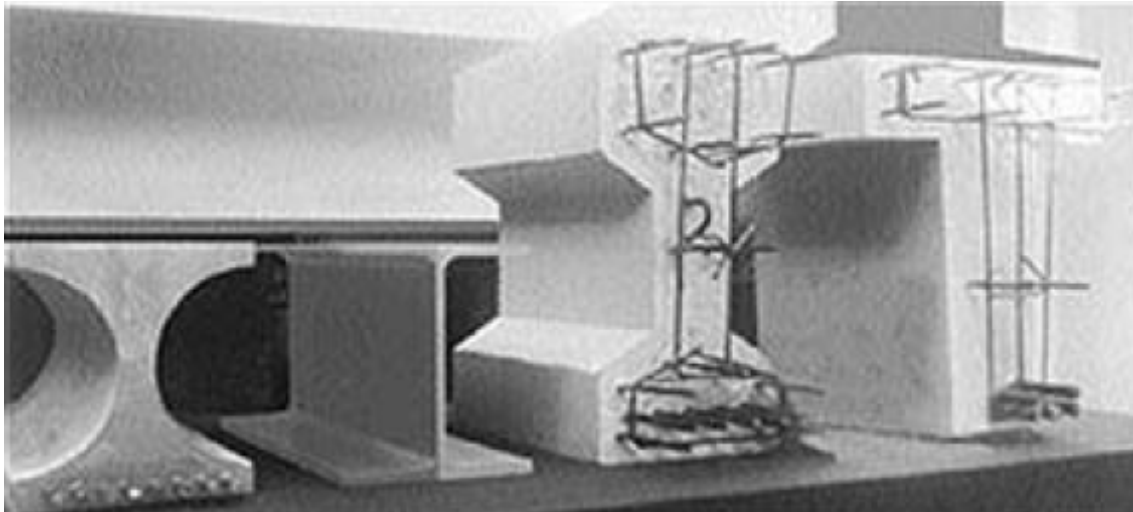
## 2.5 Verwendung und Einsatzgebiete von UHPC

Ultrahochfeste Betone können aufgrund ihrer hohen Festigkeiten und großen Leistungsfähigkeit in Einsatzgebieten verwendet werden, die bisher den Baustoffen Stahl, Aluminium oder hochfesten Stahlbeton vorbehalten waren. Da die einzelnen Maßnahmen zur UHPC - Herstellung, wie z. B. Optimierung der Mineralkomponenten, hohe Zugaben von Superverflüssigern und Stahlfasern, hohe Kosten verursachen, sollte UHPC nicht im Konkurrenzkampf mit den üblichen, bisher verwendeten Betonen stehen, solange diese Betone ihre gestellten Anforderungen erfüllen. Der UHPC sollte eher dort zum Einsatz kommen, wo bisher Stahlbau zur Anwendung kam.

Die heutzutage im Hoch- und Brückenbau üblichen Abmessungen von Fertigteilformen für vorgespannte Bauteile sind für herkömmliche Betone mit seinen eher geringen Festigkeitseigenschaften ausgelegt. Würde man diese Fertigteilformen aus UHPC herstellen, könnten dessen gute Festigkeitseigenschaften nicht ausgenutzt werden. Um einen maximalen Profit aus den Festigkeitseigenschaften des UHPC zu erzielen, wurde eine neue Querschnittsform, den „X-shaed“ - Querschnitt, entwickelt. Dieser besondere Querschnitt wurde so konzipiert, dass er dieselbe Momentenbeanspruchung wie sein Widerpart aus Stahl mit gleicher Höhe und ähnlichem Gewicht aufnehmen kann. Die Form und Abmessungen eines solchen Querschnittes zeigt die Abbildung 16.



**Abbildung 16: UHPC „x-shaped“ – Querschnitt verglichen mit einem I-Profil aus Stahl [11]**



| Parameter      | UHPC x-shaped | Stahlträger | Vorgespannter Beton | Bewehrter Beton |
|----------------|---------------|-------------|---------------------|-----------------|
| Höhe [mm]      | 360           | 360         | 700                 | 700             |
| Gewicht [kg/m] | 130           | 110         | 470                 | 550             |

**Abbildung 17: Vergleich verschiedener Betonquerschnitte aus verschiedenen Materialien [11]**

Die Abbildung 17 zeigt den Vergleich von UHPC, Stahl, vorgespanntem Normalbeton und bewehrtem Normalbeton. Dabei wurden die Betonquerschnitte so gewählt, dass sie das gleiche Bruchmoment aufnehmen können. Die Querschnitte unterscheiden sich nur in ihrer Höhe und ihrem Eigengewicht. Bei entsprechender Formgebung kann UHPC in der Hinsicht auf die Tragfähigkeit problemlos mit Stahl konkurrieren [11].

Seit Anfang der 80er Jahre kommt Hochleistungsbeton weltweit zum Einsatz, wobei in Österreich seit ca. 18 Jahren Hochleistungsbetone hergestellt und verwendet werden. Mögliche Einsatzgebiete von ultrahochfesten Betonen sind:

- Weit gespannte vorgefertigte Bauteile
- Bauteile anstelle von Stahlkonstruktionen
- Bauelemente für hoch beanspruchte Bereiche von Tragwerken
- Bauteile für seismische Probleme und Belastungen, z. B. Dämpfer
- Schutzschilde für militärische Anlagen
- Abwasserrohre, Druckrohrleitungen und Masten
- Verbundstützen (Stahlrohrstützen mit UHPC-Füllung)

1966 erfolgte der erste großtechnische Einsatz eines UHPC in Kanada beim Bau der Fuß- und Radwegbrücke Sherbrooke (Abbildung 18). Der bei der Sherbrooke Bridge verwendete UHPC weist eine Druckfestigkeit von über 200 N/mm<sup>2</sup>, eine zentrische Zugfestigkeit von 7 N/mm<sup>2</sup>, eine Biegezugfestigkeit von 40 N/mm<sup>2</sup> und einen E-Modul von 50.000 N/mm<sup>2</sup> auf. Das Brückentragwerk besteht dabei aus einem offenen Fachwerk, das in sechs vorgefertigte Elemente unterteilt wurde und eine Gesamtlänge von 60 m aufweist. Die Überbauhöhe beträgt 3,5 m, die Überbaubreite 3,3 m und die Dicke der Fußgängerplatte 30 mm. Die Platte dient gleichzeitig als Fußgängerplattform und ist mit zwei 240 mm hohen Trägern verbunden, die in Längsrichtung vorgespannt sind und weiters die Diagonalstäbe des Fachwerks verstärken. In die vorgefertigten Gitterstäbe wurde der UHPC in 3,2 m lange und 2 mm dicke Stahlrohre mit einem Durchmesser von 150 mm gefüllt und während der Abbindephase mit einer Last beaufschlagt [29] [43].



**Abbildung 18: Sherbrooke Bridge, Kanada [29]**

In den darauf folgenden Jahren kam UHPC vorrangig in Frankreich zum Einsatz. Dort wurden ultrahochfeste Betone z. B. für die Unterbauten und Rieseleinbauten des Kühlturms des Kraftwerks Cattenom verwendet. In den USA steht vor allem die Herstellung von Masten, Abwasserrohren und Druckrohrleitungen aus UHPC im Vordergrund der Entwicklung. In Österreich und Deutschland begann das wissenschaftliche Interesse an ultrahochfesten Betonen erst relativ spät. Im Jahre 2000 war die erste bautechnische Anwendung von Hochleistungsbeton der Bau der

Moosbrücke in Kärnten. Es handelt sich dabei um eine Einfeldbrücke mit einer Stützweite von 6,50 m [28] [29].

Ein bekanntes Bauprojekt mit UHPC war der Bau der Seonyu Footbridge in Seoul (Korea) mit einer Brückenlänge von 430 m und eine Spannweite des Hauptbogens von 120 m. Hier wurden sechs vorgefertigte Bogenelemente vor Ort montiert und die Vorspannung mit Litzen aufgebracht. Der verwendete ultrahochfeste Beton wies eine Druckfestigkeit von 180 N/mm<sup>2</sup> auf und wurde mit 2 % Stahlfasern mit 12 mm Länge und 0,2 mm Durchmesser verstärkt. Eine schlaffe Baustahlbewehrung wurde nicht benötigt [23].



**Abbildung 19: Seonyu Footbridge, Seoul, Korea [23]**

Weitere UHPC – Bauprojekte und Anwendungsbeispiele sind:

- die 2005 in Deutschland errichtet Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel
- spezielle Lärmschutzpaneele im Untergrundbahnhof in Monaco
- vorgespannte Spundwandelemente aus UHPC in den Niederlanden
- 2001 gebaute Sermaises Footbridge in Frankreich
- Sakata Mirai Footbridge in Japan; Die 2002 errichtet Brücke weist eine Spannweite von 50 m mit 80 % Gewichtsersparnis gegenüber einer Ausführung mit C 55/67 auf.
- Heißwasser-Wärmespeicher aus UHPC ohne Edelstahlalukleidung in Kronsberg, Deutschland (2000) mit einem Volumen von 2750 m<sup>3</sup> [23]

Ein großes Anwendungsgebiet von ultrahochfesten Betonen stellen Hochhäuser bzw. Wolkenkratzer dar. Durch die großen Gebäudehöhen lasten auf den unteren Geschossen sehr hohe Druckkräfte, für dessen Abtragung der UHPC gut geeignet ist. Einige Beispiele für Hochhäuser, bei denen hochfeste Betone zur Anwendung kamen, sind:

- South Wacker Drive Building, 292m , Chicago
- Two Union Square, 220m, Seattle
- Petronas Twin Towers, 452m, Kuala Lumpur
- Taipei 101, 508m, Taipei
- Commerzbank Hochhaus, 299m, Frankfurt
- Main Tower, 200m, Frankfurt
- Shanghai Financial Center, 508m, Shanghai
- Burj Dubai (Burdsch Chalifa), 800m, Dubai [51]

Die heutzutage verwendeten Baumaterialien erlauben Bauhöhen zwischen 800 und 900m. Betrachtet man ein Stabmodell mit einer beliebigen Höhe und einer Grundfläche von 1x1 m<sup>2</sup>, so kann man die theoretisch maximale Höhe wie folgt herleiten:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A} = \frac{\rho \cdot l \cdot b \cdot h}{l \cdot b} = \rho \cdot h \longrightarrow h_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\rho}$$

**Formel 6: Maximale Höhe, Aus der Spannungsformel [23]**

Die maximale Druckfestigkeit wird dabei als Grenzwert festgelegt, die alleine durch das Eigengewicht entsteht. Baukonstruktionen tragen aber auch andere Lasten (Personen, Einrichtungen, Wind, Schnee, usw.), und daher ist die praktisch erreichbare Höhe wesentlich geringer. Die nachfolgende Tabelle zeigt unterschiedliche Bauhöhen für Beton, Stahl und UHPC. In dieser Tabelle wurde 1/5 der Maximalhöhe aus Eigengewicht als baupraktischer Wert mit angenommen und für das Sicherheitskonzept wurde ein globaler Sicherheitsfaktor von 50% für alle Materialien angesetzt.

**Tabelle 7: Maximale Bauhöhe [23]**

| Material       | Rohdichte<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | Druckfestigkeit<br>( $\gamma=50\%$ )<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $h_{\max}$ aus Eigengewicht<br>(Druckbruchlänge)<br>[m] | $h_{\max}$ praktisch<br>[m] |
|----------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Beton C20/25   | 25                                | 10                                                           | 400                                                     | 80                          |
| Beton C50/60   | 25                                | 15                                                           | 600                                                     | 120                         |
| Beton C100/115 | 25                                | 50                                                           | 2000                                                    | 400                         |
| Stahl S235     | 78,5                              | 120                                                          | 1528                                                    | 305                         |
| Stahl S355     | 78,5                              | 180                                                          | 2293                                                    | 459                         |
| UHPC 200       | 25                                | 100                                                          | 4000                                                    | 800                         |
| UHPC 400       | 25                                | 200                                                          | 8000                                                    | 1600                        |
| UHPC 800       | 25                                | 400                                                          | 16000                                                   | 3200                        |

Die Tabelle 7 zeigt, wie wichtig ultrahochfeste Betone in Zukunft für den Hochhausbau werden. Im Vergleich zum Beton hat Stahl ein sehr hohes Eigengewicht und die Druckfestigkeit lässt sich nicht wesentlich erhöhen. Wird die Bauhöhe bei einer Stahlkonstruktion erhöht, so führt das zu einem niedrigen Verhältnis von Verkehrslast zu Eigengewicht. Der Mensch strebt im Bauwesen immer nach noch größeren Höhen und Weiten. In wie weit solche Mega-Projekte zu realisieren sind, wird entscheidend von der Entwicklung der Baumaterialien abhängig sein. Dabei wird auch ultrahochfester Beton eine wichtige Rolle spielen [23].

UHPC weist aufgrund seiner Eigenschaften ein gutes Materialverhalten bei seismischen Belastungen auf. Daher wird UHPC in letzter Zeit vermehrt auch bei Baukonstruktion für seismische Probleme angewendet. Für seismische und zyklische Probleme sind das post-elastische Spannungsverhalten und die Zähigkeit des verwendeten Materials wichtig. Betone und andere auf Zement basierende Materialien weisen unter Druck eine gewisse Plastizität auf, sind jedoch unter Zugbelastung spröde. Die hohen Druckfestigkeiten und Scherfestigkeiten führen bei UHPC zu einer Abnahme des Eigengewichtes für einzelne Bauteile. Dadurch können größere Spannweiten erzielt werden, ohne dabei Einschränkungen im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit einzubüßen. Somit können die Spannweiten erhöht werden, ohne dass das Material den elastischen Bereich verlässt und keine nachteiligen Effekte aus Bauteilverformungen zufolge Temperaturdifferenzen oder aus Kriechen des Materials auftreten. Die hohe Duktilität des UHPC und das damit verbundene hohe Energieabsorptionsvermögen sind dabei weitere günstige Eigenschaften.

Durch die Tatsache, dass Stahlfasern und eine Ummantelung des UHPC mit Stahlrohr die Festigkeitseigenschaften wesentlich verbessern, wurde eine spezielle Dämpferart entwickelt. In solch einer Dämpferkonstruktion wird der UHPC in rostfreien Rohren mit verschiedenen Dicken und verschiedenen Durchmessern eingebaut. Diese Dämpfer weisen eine hohe Steifigkeit bei hohen Belastungen auf, was beim Eintreten kleiner seismischer Kräfte als auch bei Anprallkräften aus Kollisionen notwendig und erwünscht wird. Solche Dämpfer weisen auch nach mehreren Belastungszyklen immer noch ein elastisch-plastisches Verhalten selbst bei maximaler Belastung auf– und kommen oft bei Brücken zur Anwendung. Sie weisen dabei mehrere Vorteile auf: So können je nach Belastung die Abmessungen des Dämpfers gewählt werden, oder die Dämpferelemente bei Beschädigung leicht entfernt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Dämpfer als Energiedissipator dient, der unterschiedlich hohe dynamische Kräfte aufnehmen kann, unabhängig von den Einwirkungsrichtungen der Kräfte. Weiters ist das Dämpfersystem einfach und billig herzustellen, zuverlässig und dauerhaft.

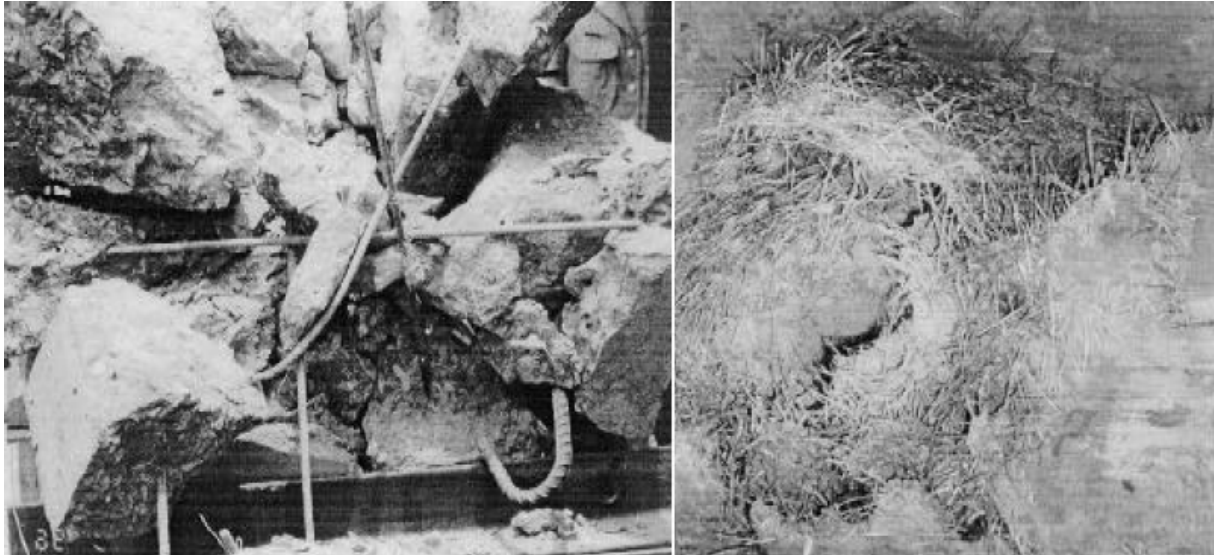
UHPC eignet sich auch hervorragend zur Herstellung von Rohren aus Beton. Diese Rohre, wie z. B. Abwasser- oder Druckrohrleitungen, besitzen eine hohe Festigkeit und ein geringes Eigengewicht. Dadurch werden die Transport- und Handlingkosten minimiert. Die Herstellung der Rohre ist einfach und es werden Produktionsschritte, aufgrund der fehlenden Bewehrung, eingespart. UHPC - Rohre führen zu einer Verbesserung der Beständigkeit gegenüber aggressiven Sulfaten oder Chemikalien und weisen eine höhere Wasserundurchlässigkeit auf. Weiters können Anschlussteile und Rohrverbindungsdetails leichter hergestellt werden, Handhabungs- und Transportschäden können vermindert werden und die Einbauzeiten wesentlich verringert werden.

Die sehr guten Eigenschaften des UHPC gegenüber den Einwirkungen aggressiver Substanzen bzw. dessen Dichtheit, erlauben den Einsatz dieses Produktes für die Herstellung von Nuklearabfallcontainern. Solche Container zur Langzeitlagerung von nuklearem Abfall aus UHPC sind noch in der Entwicklung, aber die einzigen Produkte aus betonähnlichem Material, die für diese Zwecke verwendbar sind.

Weitere UHPC – Einsatzmöglichkeiten bieten sich vor allem als Schutzschilder für militärische Anlagen. Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen an Betonkörpern, die mit Hochgeschwindigkeitsprojektilen beschossen wurden, durchgeführt. Betonwürfel aus unterschiedlichem Beton dienten dabei als Beschussziele (Abbildung 20). In einem Versuch wurde ein Würfel aus bewehrtem Normalbeton mit einem Würfel aus High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete (HPSFRC) verglichen. Die Festigkeitseigenschaften eines HPSFRC liegen dabei deutlich unter den Eigenschaften eines UHPC. So kann man annehmen, dass die erzielten Ergebnisse für einen UHPC Probewürfel um einiges besser sein müssen. Die beiden Betone unterscheiden sich ansonsten nur geringfügig, sodass die Ergebnisse auf einen UHPC übertragbar sind. Der Körper aus Normalbeton wurde während der Versuche so beschädigt, dass nach dem Beschuss keine Informationen, wie Eindringtiefe oder Eindringwinkel des Projektils, gewonnen werden konnten. Selbst bei Herabsetzung der Projektilgeschwindigkeit ergab sich das gleiche Schadensbild. Die Stahlfaserbewehrten HPSRFC Würfeln hingegen zeigten selbst bei sehr hohen Geschwindigkeiten keine großen Schäden. Die Beschussziele blieben intakt und es zeigten sich lediglich radial Risse an der Vorderseite, wenige Risse an den Seiten und keine Risse an der Hinterseite. Je nach Faserlänge prallten die Projektilen an der Stirnseite ab oder sie blieben bei einer geringen Eindringtiefe in den Probewürfeln stecken. Abbildung 21 zeigt das Schadensbild der beiden Probewürfel [11] [23].



**Abbildung 20: Betonprobewürfel für das Beschießen mit Hochgeschwindigkeitsprojektilen [11]**



**Abbildung 21: Zerstörungsgrad der Probewürfel nach dem Beschuss [11]; linkes Bild: Normalbeton, rechtes Bild: HPSRFC**

Durch die Verwendung von ultrahochfesten Betonen können für Betonbauweisen in bestimmten Teilbereichen neue Anwendungen und Einsatzgebiete, die momentan noch anderen Werkstoffen vorbehalten sind, erschlossen werden. Insbesondere im Hinblick auf die zunehmenden Anforderungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit, die an die zukünftigen Werkstoffe gestellt werden, wird ultrahochfester Beton für die Baupraxis interessant [29].

## 3. Herstellung und Mischen von UHPC

### 3.1 Chemische Vorgänge beim Erhärten

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den chemischen Reaktionen und die Zusammenhänge des Betonalters mit den Eigenschaften des Betons. Im Allgemeinen bezeichnet man den Vorgang des Erhärtens des Zements unter Wasserzugabe als Hydratation. Unter Hydratation in der Bauchemie versteht man die Bildung eines Hydrates aufgrund der Anlagerung von Wasser an eine chemische Bindung. Den Vorgang der Zementhydratation kann man in 5 Phasen einteilen.

**Tabelle 8: Einteilung der Hydratation in Phasen [26]**

| Phase                                           | Reaktionskinetik                              | Chemische Prozesse                                                                | Einfluss auf die Betoneigenschaften                             |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1 - Anfangshydrolyse (pre-induction period)     | Lösungskontrollierte, schnelle Reaktion       | Beginn der Hydrolyse, Bildung von Ettringit und Syngenit, Inlösunggehen von Ionen | Anstieg des pH-Wertes auf über 12,3                             |
| 2 - Ruhephase (dormant period)                  | keimbildungskontrolliert, langsame Reaktion   | Kontinuierliche Lösung von Ionen                                                  | Bestimmt die Dauer der Verarbeitbarkeit und das erste Ansteifen |
| 3 - Beschleunigungsphase (acceleration period)  | Lösungskontrollierte, schnelle Reaktion       | Beginn der Bildung von CSH-Phasen                                                 | Bestimmt das Ansteifen und die Frühfestigkeitsentwicklung       |
| 4 - Entschleunigungsphase (deceleration period) | Lösungs- und diffusionskontrollierte Reaktion | Kontinuierliche Bildung von CSH-Phasen und Portlandit                             | Bestimmt die Frühfestigkeit                                     |
| 5 - Stetige Phase (steady period)               | Diffusionskontrollierte Reaktion              | Langsame Bildung von Hydratationsprodukten                                        | Bestimmt die Endfestigkeit                                      |

Tabelle 8 zeigt die 5 Phasen der Hydratation von Portlandzement. In der ersten Phase entstehen hauptsächlich Ettringit  $\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3] \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$  und andere Sulfat-Phasen. Diese Stoffe verhindern das plötzliche Ansteifen der Mischung und ermöglichen somit eine ausreichende lange Verarbeitbarkeit des Betons. Die Anfangshydrolyse dauert ab dem Zeitpunkt des Mischens des Betons bis ungefähr 3 Stunden danach. Die zweite Phase ist eine Beruhigungsphase, in der es zu einer langsamen Reaktion und zur Lösung von Ionen kommt. In der dritten Phase, der Beschleunigungsphase, setzt die Bildung der Calciumsilikathydrat-Phasen (CSH-Phasen) ein. Diese Phase ist für die Festigkeitsentwicklung und die Gefügeausbildung besonders wichtig. An der Oberfläche der Zementkörner beginnen sich stäbchenförmige Fasern auszubilden und sich langsam untereinander zu verzahnen. Dabei entstehen Calciumsilikathydrate, die als „Typ I CSH“ bezeichnet werden. In der weiteren Hydratation entstehen kleine leistenförmige CSH-Phasen, die „Typ II CSH“ genannt werden. In der vierten Phase, der Entschleunigungsphase, bilden sich noch weitere CSH-Phasen, die eine körnige Struktur aufweisen und diese werden als „Typ III CSH“ bezeichnet. Weiters bilden sich in dieser Phase Calciumsilikathydrate, „Typ IV CSH“ genannt, die keine spezielle Struktur aufweisen. Die 4 CSH-Typen unterscheiden sich neben dem Erscheinungsbild vor allem auch in ihrer Mikrostruktur und in ihrem Calcium/Silizium – Verhältnis.

Neben den 4 genannten CSH-Phasen entstehen auch andere Hydratationsprodukte, wie Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), Calciumaluminiumhydrate usw., die ebenfalls in das CSH-Gefüge integriert werden. In der fünften Phase, der stetigen Phase, kommt es zu einer langsamen Bildung von weiteren Hydratationsprodukten. Diese Phase bestimmt vor allem die Endfestigkeit des Betons.

Um sich den Hydratationsvorgang besser vorstellen zu können, vergleicht man am besten ein Zementkorn mit einer Kugel. Am Anfang der Hydratation werden an der Kornoberfläche Ionen gelöst und dort bilden sich nach und nach die CSH-Phasen. So entsteht eine Hülle von Hydratationsprodukten um das Zementkorn. Aus dem eingehüllten Zementkorn lösen sich weiter Ionen, die durch die Hülle durchdiffundieren und so für eine weitere Hydratation sorgen. Des Weiteren beginnen sich auch Innerhalb der Reaktionshülle innere Hydratationsprodukte zu bilden. Durch die ständige Bildung von Hydratationsprodukten an der Innen- und Außenseite der Hülle wird die Schale immer dicker, sodass immer weniger Ionen durch die Hülle durchdringen können. Die Anzahl der Reaktionspartner wird dadurch verringert und die Hydratationsgeschwindigkeit nimmt immer mehr ab. Die Grundvoraussetzung für jede Hydratation ist das ausreichende Vorhandensein von Wasser. Das Wasser ist beim Herauslösen und Transportieren von Ionen aus den Zementkörnern unbedingt erforderlich und dient in weiterer Folge als Reaktionspartner für die Hydratation. Deshalb ist es überaus notwendig, dass während der Erhärtung des Betons, genügend Wasser in den Poren vorhanden ist. Vorzeitiges Austrocknen des Betons kann die weitere Bildung von Hydratationsprodukten verhindern und so einen negativen Einfluss auf die Verdichtung des Gefüges und in weiterer Folge auf die Festigkeit haben [27].

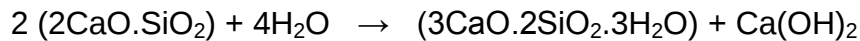
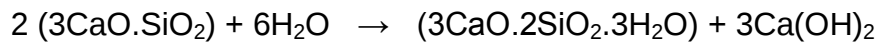
### 3.1.1 Hydratationsreaktionen

Portlandzement setzt sich zum größten Teil aus den 4 Hauptklinkermineralien zusammen:

|                       |                                 |                                                                         |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Tricalciumsilikat     | $\text{C}_3\text{S}$            | $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      |
| Dicalciumsilicat      | $\text{C}_2\text{S}$            | $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      |
| Tricalciumaluminat    | $\text{C}_3\text{A}$            | $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$                             |
| Calciumaluminatferrit | $\text{C}_4(\text{A},\text{F})$ | $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ |

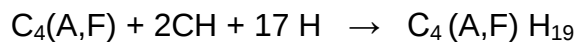
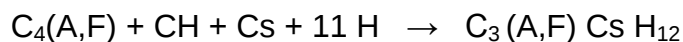
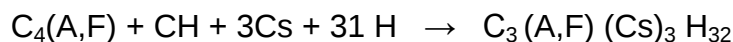
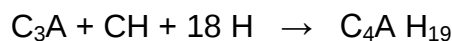
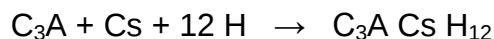
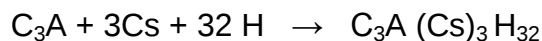
Dabei weist den größten Anteil des Zements das  $C_3S$  mit ca. 40-80% auf, gefolgt von  $C_2S$  mit rund 2-30%. Daher sind auch diese Klinkerphasen die Hauptträger der Festigkeitsentwicklung. Bei der Reaktion der Calciumsilikate mit Wasser werden unterschiedliche Calciumsilikathydrate, die CSH-Phasen, gebildet.

Folgende Reaktionen kommen hauptsächlich für  $C_3S$  und  $C_2S$  zustande:



#### Formel 7: Chemische Reaktion von $C_3S$ und $C_2S$

Für die Klinkerminerale  $C_3A$  und  $C_4(A,F)$  können mehrere Reaktionen angegeben werden. Folgende Varianten sind abhängig vom Angebot an Calciumsulfat möglich:



#### Formel 8: Chemische Reaktion von $C_3A$ und $C_4(A,F)$

### 3.1.2 Hydratationsgrad

Den Stand der Hydratation zu einem bestimmten Zeitpunkt bezeichnet man als Hydratationsgrad ( $\alpha$ ). Der Hydratationsgrad ist ein Maß dafür, wie viel von dem vorhandenen Zement bereits mit Wasser eine Hydratationsreaktion eingegangen ist. Da es meist aufwendig ist, die bestimmten Mengen an ungebundenen Zement oder der Reaktionsprodukte an den Proben zu erfassen, wird der Hydratationsgrad über Ersatzgrößen ermittelt. Einige Varianten zur Berechnung des Hydratationsgrads sind [27]:

$$\alpha = \frac{f_t}{f_{\infty}}$$

**Formel 9: Hydratationsgrad, Berechnung über die Festigkeit**

$f_t$ ...Festigkeit zum Zeitpunkt t

$f_{\infty}$ ...Endfestigkeit, z. B. nach 365 Tagen

$$\alpha = \frac{Q_t}{Q_{\infty}}$$

**Formel 10: Hydratationsgrad, Berechnung über die Wärmefreisetzung**

$Q_t$ ...Wärmefreisetzung zum Zeitpunkt t

$Q_{\infty}$ ...Endwärmefreisetzung, z. B. nach 365 Tagen

$$\alpha = \frac{w_{chem,t}}{w_{max,chem}}$$

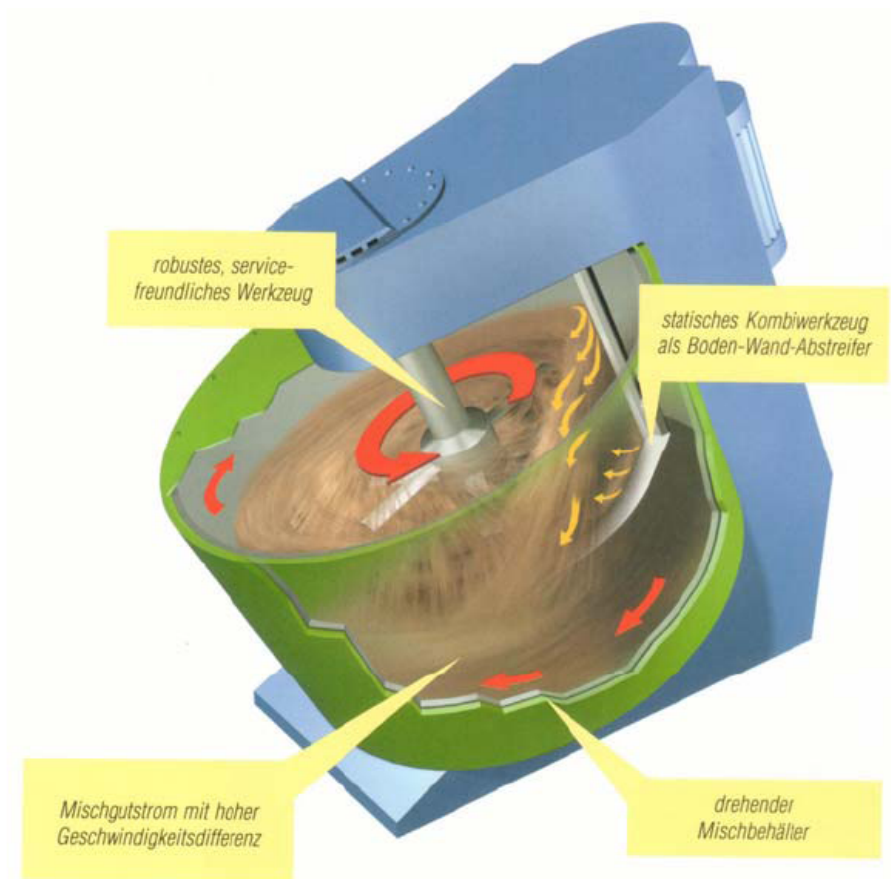
**Formel 11: Hydratationsgrad, Berechnung über die Menge an chemisch gebundenem Wasser**

$w_{chem,t}$ ...chemische Wasserbindung zum Zeitpunkt t

$w_{max,chem}$ ...maximale chemische Wasserbindung

### 3.2 Das Eirich-Mischprinzip

Bei herkömmlichen Mischgeräten, z. B. Teller-, Ringtrog- oder Planetenmischer, werden generell nur die Mischwerkzeuge bewegt und diese führen und bewegen das Mischgut über die Boden- und Wandflächen des Mischbehälters. So wird ein Teil der Bewegungsenergie in Reibung und Verschleiß umgewandelt. Dieser umgewandelte Teil steht für den restlichen Mischvorgang nicht mehr zur Verfügung. Die wesentlichen Unterschiede zwischen einem Teller-, Ringtrog- oder Planetenmischer und einem Mischer der Fa. Eirich sind die Schrägstellung und Rotation des Mischbehälters.



**Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Eirich-Intensivmischers**

Das Eirich-Mischsystem besteht aus drei Komponenten, die besonders flexibel an die Anforderungen der Mischprozesse angepasst werden können. Der sich drehende Mischbehälter befördert das Mischgut in den Bereich der Mischwerkzeuge. Die exzentrisch angeordneten Mischwerkzeuge können einen Gegenstrom bzw. einen Querstrom mit optimaler Geschwindigkeitsdifferenz erzeugen. Der Abstreifer, der sich im Inneren des Mischbehälters befindet, sorgt für eine kontinuierliche Vertikalkomponente des Mischgutstromes, verhindert Anbackungen und Ansammlungen an der Behälterwand und Behälterboden und beschleunigt das Entleeren am Ende der Mischzeit.

Bei einem Eirich-Mischer bewegen sich die Mischwerkzeuge schnell durch das bewegte Mischgut und der sich drehende Mischbehälter transportiert das Mischgut zu den Mischwerkzeugen. Die Materialbewegungen im Mischbehälter kommen durch Wurfkräfte, Fliehkräfte und freien Fall zustande. Dabei kommt es zu keinen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Mischgut und Mischbehälterwand bzw. – Boden. Am eingebauten Boden-Wandabstreifer können Wand- und Bodenreibungen auftreten.

Die Wirblergeschwindigkeit kann bis zu 40 m/s betragen. Bei einem Eirich-Mischer ist der Transport des Mischgutes vom eigentlichen Mischvorgang entkoppelt. Mit Hilfe dieser Trennung zwischen Transport des Mischgutes und dem Mischvorgang kann die Mischwerkzeuggeschwindigkeit und auch der Leistungseintrag in die Mischung verändert werden. Ein weiterer Vorteil des Eirich-Mischers ist, dass zwischen einem Gegenstrom- und Gleichstrom-Mischer unterschieden werden kann.

Diese Mischtechnologie wird hauptsächlich für die Herstellung von hochfesten und ultrahochfesten Betonen verwendet, da sich bei Betonen mit höheren Feinkornanteilen und Betonen mit feinen bzw. reaktiven Zusatzstoffen (wie Microsilika oder Farbpigmenten), die 50 bis 100 mal feiner sind als die Zementteilchen wesentliche Vorteile ergeben. Diese sind: intensivere Mischung, Ausschluss von Agglomeraten, homogenere und gleichmäßigere Verteilung der Additive in der Mischung.

Die Versuchsmischungen in dieser Arbeit wurden alle mit einem Eirich-Mischer nach dem Gleichstromprinzip (=Mischwerkzeuge und Mischbehälter drehen sich in dieselbe Richtung) hergestellt [29] [34] [35].

### **3.3 Vakuummischen**

Bei ultrahochfesten Betonen ist ein wesentliches Ziel den Luftgehalt im Beton auf ein Minimum zu reduzieren, um damit die Festigkeit zu steigern. Mit einem Vakuummischer kann die während eines Mischvorganges eingeführte Luft noch innerhalb des Mixers wieder entfernt werden. Dieses Verfahren ist notwendig, da die zähe Konsistenz des Frischbetons ein Entlüften durch Rütteln nicht zulässt. Bei einem Mischverfahren mit Vakuumtechnik wird am Ende des Mischprozesses der Druck für 30 Sekunden auf bis zu 50 HPa abgesenkt [29].

#### **Vakuum**

Unter Vakuum (von lat. vacuus „leer“ bzw. „frei“) versteht man einen vollkommen leeren oder weitestgehend leeren Raum. Vakuum bezeichnet den Zustand eines Fluids in einem Volumen bei einem Druck, der deutlich niedriger ist als der Atmosphärendruck bei Normalbedingungen.

Im Allgemeinen ist ein vollständiger materiefreier Raum nicht herstellbar. Jedoch können technische (künstlich hergestellte) Vakua in verschiedenen Qualitäten

hergestellt werden. Die Tabelle 9 zeigt einen Überblick. Dabei unterscheiden sich die Qualitäten der erzielten Vakua nach der Menge der verbleibenden Materie. Vakua werden in Pascal (Pa) oder Millibar (mbar) gemessen [30].

**Tabelle 9: Kenngrößen verschiedener Vakua [30]**

| Druckbereich              | Druck in HPa (mbar)      | Moleküle pro $\text{cm}^3$ | Mittlere freie Weglänge | Vorkommen                                                      |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Umgebungsdruck            | 1013,25                  | $2,7 \cdot 10^{19}$        | 68 nm                   | -                                                              |
| Großvakuum                | 300...1                  | $10^{19} \dots 10^{16}$    | 0,1...100 $\mu\text{m}$ | Staubsauger, Vakuumverpackung                                  |
| Feinvakuum                | $1 \dots 10^{-3}$        | $10^{16} \dots 10^{13}$    | 0,1...100 mm            | Niederdruck-Gasentladungslampen                                |
| Hochvakuum (HV)           | $10^{-3} \dots 10^{-7}$  | $10^{13} \dots 10^9$       | 100 mm....1 km          | Elektronenröhren, Teilchenbeschleuniger                        |
| Ultrahochvakuum (UHV)     | $10^{-7} \dots 10^{-12}$ | $10^9 \dots 10^4$          | $1 \dots 10^5$ km       | Teilchenbeschleuniger, erdnahe Weltraum, Halbleiterherstellung |
| Extrem hohes Vakuum (XHV) | $<10^{-12}$              | $<10^4$                    | $>10^5$ km              | (selten) Anlagen der Halbleiterherstellung                     |

### Herstellen von Vakuum

Ein Vakuum lässt sich in einem abgeschlossenen und dichten Hohlraum, Rezipienten genannt, durch Abpumpen des darin enthaltenen Gases herstellen. In der Vakuumtechnologie wird als Rezipient ein Versuchsbehälter bezeichnet und das Abpumpen erfolgt mit Hilfe einer Vakuumpumpe. Dabei besteht der Versuchsbehälter meist aus Edelstahl bzw. aus Glas.

Damit das erzeugte Vakuum bestehen bleibt, wird der Rezipient so abgedichtet, dass kein Flüssigkeits- oder Gasaustausch mit der Umgebung stattfinden kann. Dabei werden lösbare Verbindungen oder Anschlüsse, wie z. B. Flansche, mit speziellen Elastomer- oder Metalledichtungen abgedichtet [30].

### Vakuumpumpe

Für die Versuche in dieser Arbeit wurde eine Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe der Fa Sterling verwendet (Abbildung 23). Mit dieser Pumpenart können fast alle Gase und Dämpfe gefördert werden.



**Abbildung 23: Vakuum-Kompaktanlage (Fa Sterling, Typ: PL 26 M.A.M 15 0.0A) und Eirich-Intensivmischer (Typ: R 02/VC, Baujahr 2008)**

Diese Vakuumpumpe findet hauptsächlich Verwendung zum Fördern und Absaugen von trockenen oder feuchten Gasen, es können aber auch Flüssigkeiten gefördert werden. Mit Hilfe dieser Pumpe können Drücke zwischen 33 mbar und 900 mbar erzeugt werden. In dem zylinderförmigen Gehäuse der Flüssigkeitsringpumpe befindet sich ein Flügelrad. Das Flügelrad ist dabei exzentrisch der Zylinderachse eingebaut. Durch die entstehende Zentrifugalkraft bei der Rotation des Flügelrades, bildet die Flüssigkeit, die sich im Gehäuse befindet, einen gleichmäßigen Flüssigkeitsring. Dieser Flüssigkeitsring dichtet die Laufradkammern ab. Durch das exzentrisch angeordnete Flügelrad tauchen die Flügel bei Rotation unterschiedlich tief in die Flüssigkeit ab und bilden somit auch unterschiedlich große Kammern, die das zu fördernde Medium enthalten. Das hat zur Folge, dass beim Eintauchen der Flügelräder ein Überdruck (das Gas wird komprimiert) entsteht und beim Auftauchen ein Unterdruck (das Gas wird ausgedehnt) entsteht.

Die Pumpe muss während des Betriebes ständig mit Betriebsflüssigkeit versorgt werden, um die Wärme die bei der Verdichtung des Gases entsteht abzuführen und den Flüssigkeitsring im Gehäuse auffüllen zu können, da während des Vorganges auch ein Teil der Flüssigkeit mit dem Gas aus der Pumpe entweicht. Getrennt wird die Flüssigkeit von dem Gas in einem Standrohrabscheider [28] [31].

Als Betriebsflüssigkeit wurde bei den Versuchen in dieser Arbeit normales Wasser in Trinkwasserqualität verwendet. Auf die Temperatur des Mischgutes ist beim Betonmischen unter Vakuum besonders zu achten, da das Wasser verschiedene Siedetemperaturen bei unterschiedlichem Umgebungsdrücken aufweist. Der Dampfdruck des Wassers steigt mit zunehmender Temperatur. Übersteigt der Dampfdruck den umgebenden Luftdruck, so beginnt das Wasser zu sieden und geht in den gasförmigen Zustand über. Herrscht ein niedriger Luftdruck, so geschieht dies auch bei niedrigen Temperaturen. Die Abbildung 24 zeigt das zur Vorbeugung eines Wasserentzugs kritische Verhältnis zwischen Frischbetontemperatur und aufgebrauchtem Unterdruck [32].

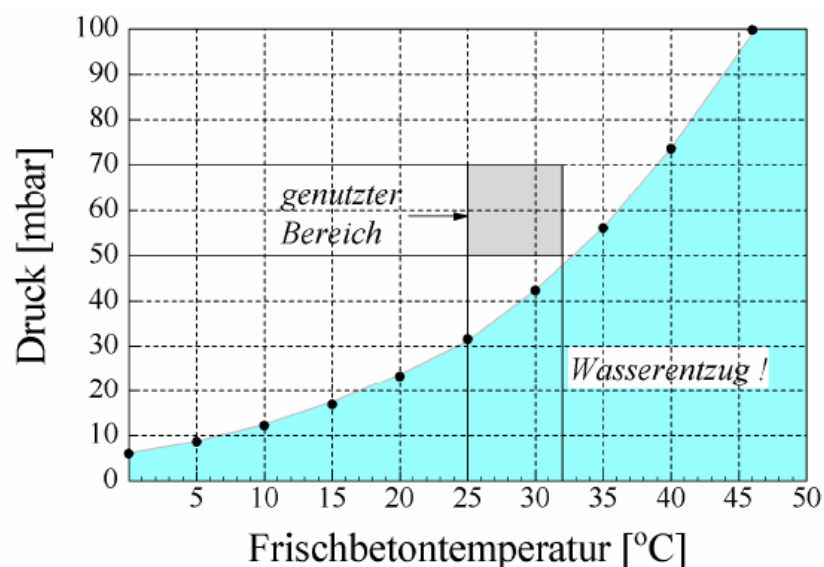


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Unterdruck und Temperatur [32]

### 3.4 Dosieren und Mischen

Bei der Herstellung und beim Mischen von ultrahochfesten Betonen werden verschiedenen Mischtechnologien verwendet. An diese Technologien sind hohe Anforderungen aufgrund der geringen W/B-Werte, der möglicherweise hohen Fasergehalte und der geforderten Homogenität der Mischung gestellt. Je nach Verwendung und Dosierung der Ausgangskomponenten kann ein übermäßiges Mischen des UHPC zu einer starken Verflüssigung oder zu einem schnellen Ansteifen des Frischbetons führen. Zu beachten ist dabei auch, dass hochfeste Betone im Vergleich zu Normalbeton bei gleichen Mischungsbedingungen infolge

des intensiven Mischens höhere Frischbetontemperaturen aufweisen. Die Mischreihenfolge und die dazugehörigen Mischdauern sind entscheidend für die Frischbetoneigenschaften. Speziell die Viskosität und die Klebrigkeit des Frischbetons sind durch die Zusammensetzung der ultrahochfesten Betone sehr stark ausgeprägt [29].

Um die gewollten und angestrebten Eigenschaften des UHPC nach dem Betonieren zu erzielen, gilt es beim Dosieren und Mischen der einzelnen Ausgangsstoffe besonders genau vorzugehen. Vor allem bei Laborarbeiten zur Herstellung von kleineren Mengen. Jede Abweichung von der gewünschten Betonrezeptur wirkt sich auf die Betonmikrostruktur und auf die Festbetoneigenschaften aus.

Nach dem Mischprozess weist der UHPC aufgrund der niedrigen W/Z und W/B-Werte eine plastische, klebrige Konsistenz auf.

Üblicherweise werden am Beginn des Mischvorganges alle trockenen Ausgangsstoffe und Bestandteile des UHPC in die Mischtrommel gegeben und nach einer entsprechenden Trockenmischzeit kommen alle flüssigen Bestandteile hinzu. Vor der Zugabe des Verflüssigers bzw. vor dem Einsetzen der Wirkung des Verflüssigers liegt ein trockenes Pulvergemisch vor. Um den Mischvorgang und die Leistung des Verflüssigers bei so niedrigen W/B-Werten zu optimieren, empfiehlt es sich in Vorversuchen den bestmöglichen Mischvorgang für eine geeignete Rezeptur zu finden. Zu beachten ist weiters noch, dass es wegen der klebrigen Konsistenz des UHPC nach dem Mischen zu einem erhöhten Reinigungsaufwand der Misch- und Fördergeräte kommt als bei Normalbeton [11] [29].

## 3.5 Verarbeiten und Verdichten

Aufgrund der niedrigen W/Z- bzw. W/B-Werte weisen hochfeste und hochwertige Betone eine geringe Konsistenz und ein geringes Ausbreitmaß auf. Das kann bei geometrisch komplizierten Schalungen beim Einbringen des Betons zu einer Nester- und Hohlraumbildung führen. Mit den heutzutage verwendeten und leistungsstarken Verflüssigern können ultrahochfeste Betone mit sehr geringen W/B-Werten in fließfähiger Konsistenz hergestellt werden. In der Regel kommen je nach Bauteilgröße Außen- oder Oberflächenrüttler zur Verdichtung zum Einsatz. Innenrüttler sollten hingegen nicht verwendet werden, da diese die Stahlfasern freilegen und so eine Schwachstelle im Betongefüge bilden, in der sich Wasser

sammeln kann. Eine weitere Art der Verdichtungsmöglichkeit wäre das Aufbringen eines Umgebungsdruckes. Der aufgebrachte Druck auf das herzustellende Bauteil führt zu einer Reduktion des eingeschlossenen Wassers im Bauteil [11].

Bei den ultrahochfesten Betonen kommt es durch die niedrigen W/Z- und W/B-Werten zu einer wesentlichen Verringerung der Hydratationswärmeentwicklung; dies bedingt eine Beschleunigung der Reaktionsgeschwindigkeit des Zements, was wieder zu einer Verbesserung der Frühfestigkeit führt [33]. Beim Verdichten spielt der Luftporengehalt eine weitere wichtige Rolle. Durch das Verdichten soll der UHPC ein dichtes Betongefüge aufweisen um die gewünschten hohen Festigkeiten zu erreichen. Da sich bei W/Z-Werten von unter 0,35 keine Kapillarporen bilden und sich das Gesamtporenvolumen durch die feinen Bestandteile des Silikastaubes verkleinert, wird bei UHPC Mischungen eine geringe Porosität erzielt. Es hat sich aber durch Versuche gezeigt, dass für Mischungen mit Silikastaub mit geringem Luftporengehalt eine höhere Verdichtungsenergie benötigt wird. Deshalb sollte die Verdichtung beim Arbeiten mit UHPC sorgfältig durchgeführt und kontrolliert werden [11].

### 3.6 Nachbehandlung

Die Qualität des ultrahochfesten Betons wird wesentlich von der verwendeten Nachbehandlungsmethode bestimmt. Durch die Nachbehandlung können die Festigkeiten des Betons deutlich gesteigert werden [11]. Grundsätzlich kommen eine Nachbehandlung im Wasserbad, eine Nachbehandlung im Klimaschrank (Wärme, Kälte) und eine Nachbehandlung durch das Aufbringen einer Druckkraft während der Abbindephase zur Anwendung. Ebenso muss zur Verhinderung der Rissbildung die freie Oberfläche nach dem Einbringen des Frischbetons sorgfältig nachbehandelt werden. Durch die thermale Nachbehandlung (Nachbehandlung im Klimaschrank) werden vor allem die Kristallisation der Hydratationsprodukte und die Aktivierung der puzzolanischen Reaktion des Mikrosilikas verbessert. Diese Nachbehandlungsmethoden mit solchen hohen Temperaturen bis zu 400 °C eignen sich eigentlich nur für Laborbedingungen. Jedoch können Druckfestigkeiten von bis zu 600 – 800 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden.

Eine weitere hydrothermale Nachbehandlungsmethode, die bei ultrahochfesten Betonen gerne Anwendung findet, ist die Lagerung der Betonkörper in einem 90 °C

Wasserbecken über mehrere Tage. Mit dieser Methode lassen sich ohne großen Aufwand Druckfestigkeiten von ca. 200 N/mm<sup>2</sup> erzielen.

Eine andere Nachbehandlungsmethode ist, die Aufbringung von allseitigem Druck auf den fertig gemischten Beton. Übt man auf den Frischbeton Druck aus, so führt dies zu einer Steigerung der Dichte des Betons. Das Aufbringen eines Druckes auf den Frischbeton während der Abbindephase wirkt sich jedoch kaum auf die Biegezugfestigkeit aus [11].

## 4. Versuchsaufbau

### 4.1 Herstellen der Probekörper

Bei der Herstellung der Betonprobekörper war bei der Einmischung der Ausgangsstoffe, beim eigentlichen Mischprozess und der Befüllung der Schalungen ordnungsgemäßes und genaues arbeiten das oberste Gebot.

#### 4.1.1 Ausgangsstoffe

Für die Vor- und Hauptversuche kamen folgende Ausgangsstoffe zur Anwendung:

**Tabelle 10: Überblick über die Ausgangsstoffe**

|               |                                            |
|---------------|--------------------------------------------|
| Zement        | CEM I 42,5 R / CEM I 42,5 N                |
| Sand          | Quarzsand ME 0,1-0,7 / 0,0-0,5 / 0,0-0,4mm |
| Zusatzstoff 1 | Quarzmehl QM 10.000 / QM 3.600             |
| Zusatzstoff 2 | Microsilika MS Elkem 971 U / 940 U         |
| Zusatzmittel  | Fließmittel Sika FM 209 / Glenium ACE 430  |
| Fasern        | Stahlfasern 6mm / 12mm                     |
|               | Basaltfasern 6mm / 12mm                    |
|               | Kohlenstoffnanoröhren (Carbon-Nanotubes)   |
|               | Glasfasern 12mm                            |
|               | Polyvinylalkoholfasern PVA 6mm             |
|               | Polypropylenfasern PP 6mm                  |

#### 4.1.2 Mischen des Betons im Labor

Wie bereits in den Kapiteln 3.2 und 3.3 erwähnt, wurden die Untersuchungen mit dem Intensivmischer R02 VAC der Fa. Eirich mit angeschlossener Vakuumpumpe

der Fa. Sterling durchgeführt. Dieser Mischer besteht aus einem schnell drehenden Wirbler, einen schräggestellten rotierenden Mischsteller und einen feststehenden Wandabstreifer und besitzt ein Fassungsvermögen von 5 Liter. Durch die Wandreibung des schräg stehenden Mischtopfes wird das Mischgut nach oben befördert und fällt am höchsten Punkt wieder nach unten, wodurch sich eine grobe Vermischung einstellt. Durch den Wandabstreifer kommt es zu einer Umwälzung des Mischgutes und dieses wird in den Wirbler transportiert, wodurch es zu einer guten Feinvermischung kommt. Durch diese beiden Mischeffekte wird beim Mischen von ultrahochfesten Betonen eine homogene Vermischung einerseits von Stoffen mit stark unterschiedlichen Rohdichten und andererseits von wenigen Mengen an Zusatzstoffen und Zusatzmitteln erzielt. Ein weiterer Vorteil dieser Mischtechnik sind kurze Mischzeiten.

Aus Vorversuchen wurde folgende Mischreihenfolge festgelegt (siehe auch Kapitel 7), die Tabelle 11 zeigt den Mischüberblick:

Zuerst wurden alle Feststoffe wie Zement, Microsilika, Quarzsand, Quarzmehl und Fasern in den Eirich - Mischer eingefüllt und für 90 Sekunden trocken gemischt. Danach erfolgte die Wasser- und Fließmittelzugabe. Dabei wurde die gesamte Fließmittelmenge vorher mit dem Wasser verdünnt. Beim Einmischen in den Zwangsmischer wurde auf eine langsame und gleichmäßige Einfüllung geachtet. Danach wurde mit einer weiteren Mindestmischzeit von 90 Sekunden der Betonbrei nass gemischt. Der Mischvorgang wurde dabei visuell überwacht, um eine Ansammlung von Fasern an den Mischblättern zu vermeiden. Ebenso war zu überprüfen, ob alle Fasern vereinzelt und gleichmäßig verteilt sind. War dies nicht der Fall, wurde die Mischzeit verlängert. Wurde Vakuum gemischt, so fand im Anschluss ein Entlüften mit 60 mbar für eine Dauer von ca. 90 Sekunden statt. Dabei wurde die Drehzahl von 1250 auf 250 U/min herabgesetzt.

**Tabelle 11: Überblick über den Mischprozess**

|   | <b>Beschreibung</b>                                                      | <b>[sec]</b> | <b>[U/min]</b> |
|---|--------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|
| 1 | Einbringen der Feststoffe in den Zwangsmischer (CEM, MS, QM, QS, Fasern) | 90           | 1250           |
| 2 | Wasser und Fließmittel einfüllen                                         | 30           | 1250           |
| 3 | Mischen                                                                  | 90           | 1250           |
| 4 | Ev. Entlüften mit 60 bar                                                 | 90           | 250            |

### 4.1.3 Bestimmung der Frischbetoneigenschaften

Nach dem Mischen des Betons wurden folgende Frischbetoneigenschaften bestimmt:

#### 4.1.3.1 Mischtemperatur

Die Mischtemperatur wurde nach dem fertigen Mischprozess an der Temperaturanzeige des Eirichmischers abgelesen. Die Mischtemperaturen lagen üblicherweise in einem Bereich von 36 bis 44 °C.

#### 4.1.3.2 Frischbetonrohddichte

Zur Bestimmung der Rohddichte wurde der Frischbeton in den Luftporentopf gefüllt. Danach wurde das Gewicht des befüllten Luftporentopfes, dessen Volumen genau einem Liter entspricht, bestimmt und die Rohddichte mit folgender Formel berechnet:

$$\rho_r = \frac{m_1 - m_2}{V_{\text{Topf}}}$$

#### Formel 12: Rohddichte des Frischbetons

$\rho_r$  = Rohddichte des Frischbetons [kg/m³]

$m_1$  = Masse des vollen Luftporenbehälters [kg]

$m_2$  = Masse des leeren Luftporenbehälters [kg]

$V_{\text{Topf}}$  = Volumen des Topfes [m³]



**Abbildung 25: Abwägen des gefüllten Luftporenbehälters**

#### **4.1.3.3 Luftporengehalt**

Die Ermittlung des Luftgehalts des Frischbetons erfolgte mit dem Druckausgleichverfahren. Der Frischbeton wurde dabei in einen leicht befeuchteten Luftporentopf gefüllt. Der befüllte Behälter wurde anschließend für ca. 50 Sekunden auf einem Rütteltisch verdichtet und plan abgestrichen. Danach wurde der Luftporentopf mit dem dazugehörigen Verschlussdeckel luftdicht verschlossen. Dabei musste der obere Rand des Luftporenbehälters sauber und leicht feucht sein, damit die Dichtheit gewährleistet war. Anschließend wurde über die Einlaufventile des Verschlussdeckels Wasser eingegossen, bis es am anderen Einlaufventil wieder heraustropfte. Das Wasser hatte die Aufgabe den verbleibenden Hohlraum im Luftporenbehälter zu füllen. Nach dem Schließen der Einlaufventile wurde mittels der Pumpstange solange Luft eingepumpt bis der Zeiger des Manometers bis unter der 0-Markierung lag. Mittels des Feinregulierungsventils (Schwarzer Druckknopf) wurde Luft abgelassen bis der Zeiger die rote Referenzmarkierung erreicht hat. Mit der grünen Starttaste wurde der prozentuelle Luftgehalt im Frischbeton gemessen.



**Abbildung 26: Luftporentopf und Verschlussdeckel zur Bestimmung des Luftgehalts im Frischbeton**

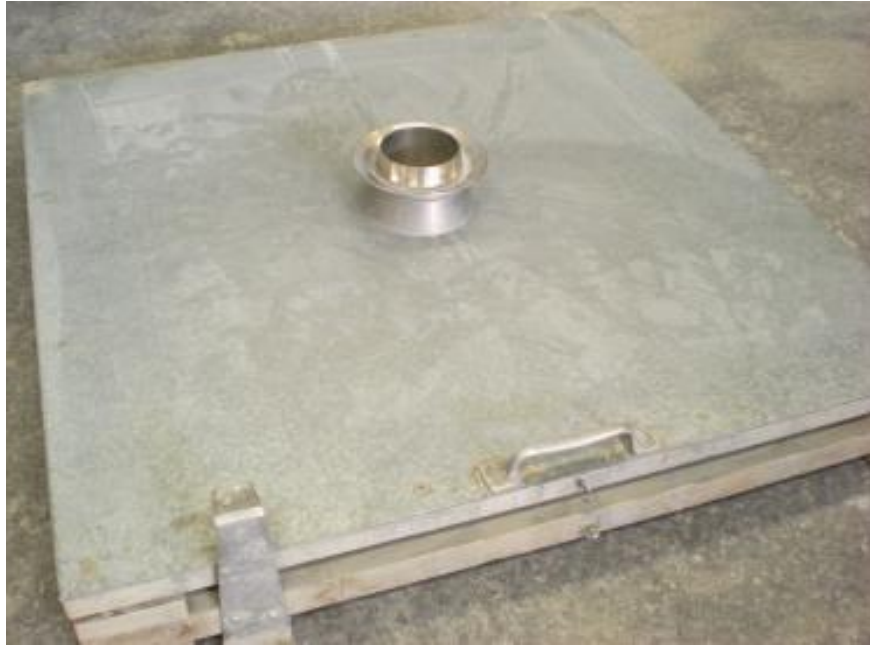
#### **4.1.3.4 Ausbreitmaß bzw. Setzfließmaß**

Bei den ersten Vorversuchen wurde die Bestimmung des Ausbreitmaßes am Ausbreittisch in Anlehnung an die Norm EN 459-2 durchgeführt. Mit Hilfe des Ausbreitmaßes wurde auf die Konsistenz des Frischbetons geschlossen. Die Platte des Ausbreittisches wurde mit einem feuchten Tuch oder Schwamm abgewischt und leicht befeuchtet, danach wurde der Setztrichter in der Mitte der Platte aufgestellt. Nun wurde der Trichter mit dem Frischbeton bis zum oberen Rand gefüllt und der überstehende Beton auf plan abgezogen. Dabei musste der Setztrichter mit der Hand leicht auf die Platte gedrückt werden, um ein Aufsteigen des Trichters zu verhindern. Der Ausbreittisch wurde gesäubert und falls Wasser nahe dem Setztrichter vorhanden war, wurde dieses entfernt. Nach ca. 10 bis 15 Sekunden wurde der Trichter langsam und gleichmäßig senkrecht nach oben gehoben und man begann mit 15 Stößen den Frischbeton auszubreiten. Nach den Stößen wurde der Durchmesser des ausgebreiteten Frischbetons in zwei zueinander normalen Richtungen mittels eines Messschiebers ermittelt. Das Ausbreitmaß ist der Mittelwert der beiden Messungen.



**Abbildung 27: Ausbreittisch mit Setztrichter zur Ermittlung des Ausbreitmaßes**

Da sich in den ersten Vorversuchen bereits große Ausbreitmaße abzeichnen haben und der vorhandene Ausbreittisch nur einen Durchmesser von 30 cm aufwies (Abbildung 27), wurde für die weiteren Versuche für die Ermittlung der Konsistenz des Frischbetons das Setzfließmaß auf einer großen Ausbreitplatte mit den Maßen 70 cm x 70 cm durchgeführt (Bild 28). Das Setzfließmaß ist jener mittlere Durchmesser, der sich nach Abhebung des Setztrichters einstellt, bis sich der Frischbetonkuchen nicht mehr selbstständig bewegt. Wie beim Ausbreittisch wurde vorher die Oberfläche der Ausbreitplatte gereinigt und leicht befeuchtet und anschließend der Setztrichter in der Mitte der Platte platziert. Der Trichter wurde mit dem Frischbeton bis zum oberen Rand gefüllt und dann auf plan abgezogen. Der Setztrichter musste dabei mit der Hand leicht auf die Platte gedrückt werden, um ein Abheben des Trichters zu verhindern. Danach wurde die Ausbreitplatte von möglichen Frischbetonresten und Wasser gereinigt und der Setztrichter langsam nach oben gehoben. Der Frischbeton begann sich auszubreiten. Bewegte sich der Betonkuchen nicht mehr weiter, wurde mittels eines Messschiebers der Durchmesser des Frischbetons an zwei aufeinander normale Richtungen gemessen.



**Abbildung 28: Ausbreitplatte mit Setztrichter zur Ermittlung des Setzfließmaßes**

#### **4.1.4 Schalung der Probekörper und Lagerung**

In Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 wurde nach der Bestimmung der Frischbetoneigenschaften der Frischbeton in Schalungen aus Stahl, mit den Abmessungen 40x40x160 mm, gegossen. Um das Ausschalen zu erleichtern, wurden vor dem Einbringen des Betons die Schalungen mit Schalöl dünn bestrichen. Die befüllten Schalungen wurden ca. 60 Sekunden mit einem üblichen Rütteltisch verdichtet und mit normaler Frischhaltefolie überdeckt, um ein Austrocknen der Probekörper an der Oberfläche zu verhindern. Die Probekörper wurden nach ca. 24 Stunden ausgeschalt und entweder an der Raumluft gelagert, in einem ca. 20 °C kalten Wasserbecken oder in ein Warmwasserbecken bei 90°C für 72 Stunden und anschließender 20 °C Wasserbadlagerung aufbewahrt.



**Abbildung 29: 3 Schalungen für 3 Probekörper mit den Abmessungen 40x40x160 mm**

## **4.2 Festbetonprüfungen**

An den Probekörpern wurden am 7. und 28. Tag mechanische Bruchversuche durchgeführt. Die Probekörper wurden in zwei Serien unterteilt, wobei eine Serie nach dem Ausschalen in einem Wasserbecken mit 20 °C gelagert wurde, die andere Serie wurde nach dem Ausschalen drei Tage in einem Wasserbecken mit 20 °C aufbewahrt und anschließend in einem Warmwasserbecken bei 90°C für 72 Stunden und erneuter 20 °C Wasserbeckenlagerung nachbehandelt. Innerhalb der Serien wurde ein ohne Vakuum gemischter Beton mit einem Vakuum gemischten Beton verglichen. Für jeden Prüftag wurden jeweils 3 Probekörper hergestellt und einem Biegezugversuch, einem Druckversuch und einem Spaltzugversuch unterzogen. Weiters wurde mit weiteren Probekörpern Schwindmessungen bis zum 28. Tag durchgeführt und mit den gleichen Probekörpern der Elastizitätsmodul nach 28 Tagen festgestellt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden zusammengefasst, verglichen und im Hinblick auf den Einfluss des Vakuummischprozesses ausgewertet.

### **4.2.1 Festbetonrohrichte**

Bevor die Betonprobekörper zur Bestimmung der Festbetoneigenschaften den mechanischen Bruchversuchen unterzogen wurden, wurden die Abmessungen mit einer Schiebelehre auf Hundertstel mm bestimmt und mit einer Waage mit einer

Genauigkeit von 0,05 g abgewogen. Mit der Formel für die Dichte konnte man die Festbetonrohddichte der einzelnen Probekörper berechnen.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

#### Formel 13: Rohddichte

$\rho$  = Rohddichte

M = Masse

V = Volumen

### 4.2.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugprüfung wurde in Anlehnung an ÖNORM EN 196-1 auf der institutseigenen Prüfmaschine der Fa. Zwick, Typ 250Z durchgeführt. Die Biegezugfestigkeit wurde mit einem Drei-Punkt-Lastverfahren ermittelt. Die Prüfkörper wurden auf zwei Stahlzylinder, die als Auflagerrollen dienten, gelegt. Bei der Ausrichtung der Probekörper war darauf zu achten, dass die Längsachse der Prismen normal auf die Achse der Zylinder stehen. Der Abstand der Zylinderrollen betrug bei den großen Prismen (40x40x160 mm) 100 mm und bei den Prismen mit Kohlenstoffnanoröhren als Fasern 50 mm. Ein dritter Stahlzylinder brachte mittig auf den Prüfkörper solange eine Kraft mit einer Laststeigerung von  $50 \pm 10$  N/s auf, bis es zum Bruch des Prüfkörpers kam. Mit der ermittelten Bruchlast wurde mit folgender Formel die Biegezugfestigkeit berechnet.

$$\beta_{BZ} = \frac{1,5 \cdot F_{BZ} \cdot l}{b^3}$$

#### Formel 14: Biegezugfestigkeit

$\beta_{BZ}$  = Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{BZ}$  = Bruchlast [N]

l = Auflagerbreite [mm]

b = Seitenlänge Prisma [mm]



**Abbildung 30: Prüfmaschine Zwick 250Z**



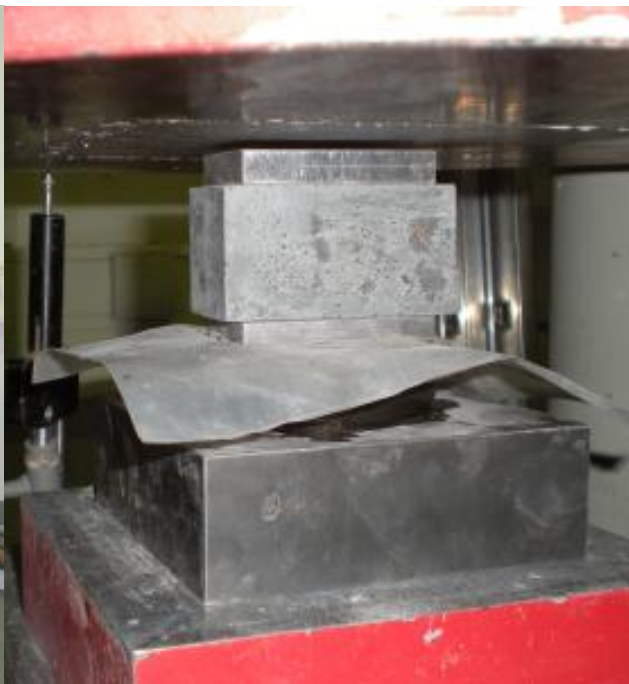
**Abbildung 31: Drei-Punkt-Lastverfahren nach ÖNORM EN 196-1**

#### **4.2.3 Druckfestigkeit**

Nach der Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde mit einer Hälfte des Probekörpers die Ermittlung der Druckfestigkeit durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten auf der institutseigenen Prüfmaschine der Fa. TONI Technik Modell 2040 mit einer maximalen Prüflast von 3000 kN.



**Abbildung 32: Prüfmaschine TONI Technik Modell 2040**



**Abbildung 33: Druckversuch nach ÖNORM EN 196-1**

Die computergesteuerte Prüfmaschine verwendet eine Software der Fa. TONI Technik, wobei die Messdaten (wie Belastungszunahme und Dehnungsweg) direkt mittels Kraftmessdose und Wegabnehmer an den angeschlossenen PC übertragen werden.

Die Prüfungen wurden in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 durchgeführt. Um immer genau die gleiche Belastungsfläche bei jedem Versuch zu gewährleisten, wurden zwischen den Prüfplatten der Maschine und dem Probekörper 5 mm dicke Druckplatten aus Stahl (Abmessungen 40 x 62,5 mm) gelegt. Die Prismenhälften mit den Druckplatten wurden dabei mittig auf der Prüfplatte der Maschine ausgerichtet. Zur Ausrichtung des Prüfkörpers wurde ein Halbkugellager aus Stahl unter dem Prüfkörper und der unteren Hilfsplatte verwendet. Da das Kugellager mit Fett geschmiert war, wurde zum Schutz vor Verschmutzung eine dünne Folie angeordnet. Abbildung 33 zeigt die Anordnung des Druckversuches, im Bildhintergrund ist auch der Wegaufnehmer zur Messung der Dehnung erkennbar. Die Probekörper wurden danach mit einer Laststeigerungsrate von  $2400 \pm 200$  N/s solange belastet, bis keine weitere Last mehr aufgenommen werden konnte. Danach konnte mit der Bruchlast die Druckfestigkeit mit folgender Formel berechnet werden:

$$\beta_D = \frac{F_D}{A_0}$$

#### Formel 15: Druckfestigkeit

mit:

$\beta_D$  = Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$F_D$  = Bruchlast [N]

$A_0$  = Belastungsfläche 40 x 62,5 [mm]

#### 4.2.4 Spaltzugfestigkeit

Für die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit wurde ebenfalls die Prüfmaschine TONI Technik 2040 verwendet. Für den Spaltzugfestigkeitsversuch wurde die zweite Hälfte der beiden Bruchstücke aus dem Biegezugversuch als Probekörper herangezogen. Die Spaltzugfestigkeitsversuche wurden in Anlehnung an die ÖNORM EN 12390-6 durchgeführt, mit dem Unterschied dass statt zylinderförmige Proben prismenförmige Probekörper verwendet wurden. Dabei wurden die Probekörper so in die

Prüfmaschine eingespannt, dass die Probekörper jeweils auf den gegenüberliegenden Seiten mit einer linienförmigen Druckkraft mit einer Laststeigerungsrate von 50 +/- 10 N/s belastet wurden. Zwischen dem Probekörper und den Prüfplatten der Maschine wurde ein Hartfaserstreifen von 1 cm Breite gelegt, um eine linienförmige Belastungsfläche zu erzielen. Die dadurch resultierende orthogonale Zugkraft verursacht den Bruch des Probekörpers unter Zugspannung. Beim Versuch wurde der Probekörper bis zum Bruch belastet und aus der ablesbaren Höchstlast konnte die Spaltzugfestigkeit ermittelt werden.

$$\beta_{SZ} = \frac{3 \cdot F_{SZ}}{\pi \cdot l \cdot h}$$

#### Formel 16: Spaltzugfestigkeit

mit:

$\beta_{SZ}$  = Spaltzugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{SZ}$  = Bruchlast [N]

$l$  = Länge der Kontaktlinie des Probekörpers [mm]

$h$  = Höhe des Prismas [mm]



Abbildung 34: Spaltzugversuch nach ÖNORM EN 12390-6

#### 4.2.5 Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Die Ermittlung des E-Moduls der UHPC Proben wurde in Anlehnung an die ÖNORM B 3303 „Statischer Elastizitätsmodul  $E_b$  von Probekörpern“ durchgeführt. Für diese E-Modul-Bestimmung wurden für jede Mischung ein eigenes Schalungsset mit 3 Probekörpern mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm hergestellt, die auch für die Schwindversuche verwendet wurden. Durch die Unterteilung der Herstellungsart in „ohne Vakuum“ und „mit Vakuum“ gemischt und die beiden Nachbehandlungsmethoden „Wasserlagerung mit 20°C“ und „Heißwasserlagerung bei 90°C“, ergaben sich für jede Mischung vier E-Modul-Versuche. Die E-Modul Bestimmung fand bei allen Proben am 28. Tag statt.

Als Prüfeinrichtung für die Ermittlung des E-Moduls kam die institutseigen Prüfmaschine TONI Technik zur Anwendung. Diese erfüllt die Anforderung der ÖNORM und ist in der Lage, Prüflasten bei den geforderten Laststufen konstant zu halten und die Genauigkeit der verwendeten Vorlast im Messbereich auf  $\pm 3 \%$  zu halten. Für die Dehnmessung an den Probekörpern kamen Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen zum Einsatz.

Vor Beginn der E-Modul-Messung musste die Betondruckfestigkeit ermittelt werden. Dazu wurde eine Parallelprobe mit gleichen Abmessungen wie der E-Modul Prüfkörper verwendet, die gleich hergestellt und nachbehandelt wurde. Da ein eigenes Schalungsset mit 3 Probekörpern für die E-Modul Bestimmung verwendet wurde, wurde mit einem dieser Prismen die Druckfestigkeit ermittelt und mit den beiden anderen Prismen der E-Modul bestimmt. Aus der Druckfestigkeit  $f_c$  wurde die bei der E-Modul Bestimmung zu verwendende Oberlast errechnet.

Der statische Elastizitätsmodul ist als Quotient der Spannungsdifferenz und der Dehnungsdifferenz zwischen einer Vorlast  $\sigma_b = 0,1 \times \sigma_a$  und einer Oberlast von  $\sigma_a$  entsprechend einem Drittel der voraussichtlichen Probendruckfestigkeit zu bestimmen.

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

**Formel 17: E-Modul Bestimmung [63]**

$E_b$  = statischer Elastizitätsmodul in KN/mm<sup>2</sup>

$\Delta \epsilon$  = Dehnungsdifferenz zwischen Vorlast und Oberlast

$\Delta \sigma$  = Spannungsdifferenz zwischen Vorlast und Oberlast

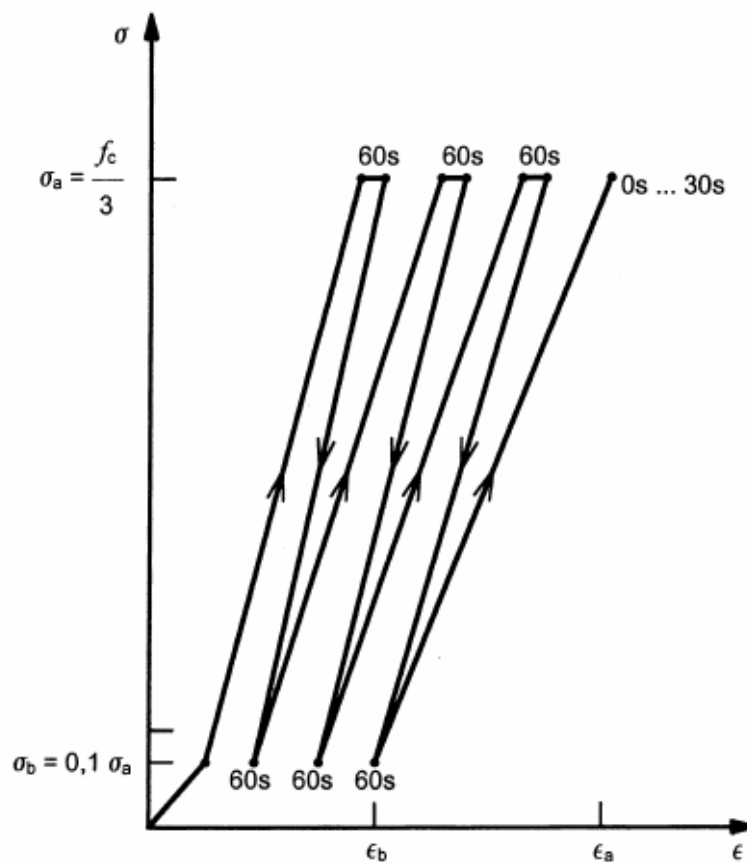
$\sigma_a = f_c/3$

$\sigma_b = 0,1 \times \sigma_a = f_c/30$

$\epsilon_a$  = mittlere Dehnung unter

$\epsilon_b$  = mittlere Dehnung unter

Nach Anbringen der Dehnmessgeräte ist die Probe zentrisch in die Druckpresse einzubauen und mit der Vorlast von  $\sigma_b = 0,1 \times \sigma_a$  zu belasten. Die Spannung wird dann gleichmäßig mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $(0,6 \pm 0,4)$  N/mm<sup>2</sup> pro Sekunde erhöht, bis die Oberspannung von  $\sigma_a = f_c/3$  erreicht wird. Unter der gleich bleibenden Oberlast sind nach 60 Sekunden Wartezeit erneut die Dehnmessgeräte abzulesen. Weichen die an den einzelnen Messstrecken (mindestens zwei) ermittelten Dehnungen um mehr als  $\pm 20\%$  vom gemessenen Mittel ab, so ist die Probe neu einzurichten und die Prüfung zu wiederholen.

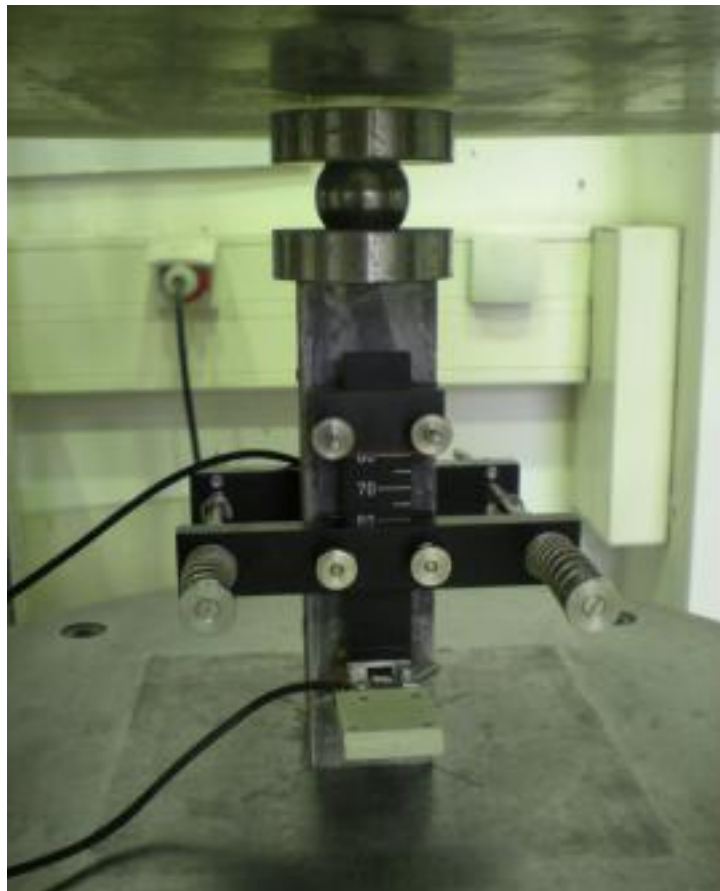


**Abbildung 35: Schema für Belastungszyklus für den statischen Elastizitätsmodul gemäß ÖNORM B 3303 [63]**

Bei ausreichend genauer Zentrierung ist mit der oben angeführten Geschwindigkeit bis zur Vorlast  $\sigma_b$  zu entlasten und anschließend sind mit der gleichen Belastungssteigerung mindestens 2 weitere Belastungszyklen durchzuführen, wobei die Vorlast und die Oberlast jeweils 30 Sekunden konstant zu halten sind.

Nach Abschluss des letzten Belastungszyklus und der 60 Sekunden Wartezeit sind während der darauf folgenden 30 Sekunden die Dehnungsmessungen  $\epsilon_{b1}$  und  $\epsilon_{b2}$  unter weiterhin konstanten Vorlasten von  $\sigma_b = 0,1 \times \sigma_a$  durchzuführen. Anschließend ist die Probe mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $(0,6 \pm 0,4) \text{ N/mm}^2$  pro Sekunde bis zur Oberspannung  $\sigma_a$  zu belasten. Bei gleich bleibender Oberlast sind innerhalb 30 Sekunden erneut die Dehnungsmessungen vorzunehmen.

Wenn keine weiteren E-Modul-Messungen im höheren Alter an denselben Proben vorgesehen sind, sollten die Probekörper abschließend bis zum Bruch belastet werden. Weicht die tatsächliche Druckfestigkeit der Probe um mehr als 20 % von dem Wert  $f_c (= 3 \times \sigma_a)$  ab, welcher bei der E-Modul Messung zugrunde gelegt wurde, so ist dies im Prüfprotokoll hervorzuheben [63].



**Abbildung 36: E-Modulprüfung auf Prüfmaschine TONI Technik**

#### 4.2.6 Schwindversuche

Die Schwindversuche wurden in Anlehnung an die ÖNORM B 3303 durchgeführt. Jedoch wurden Proben mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm verwendet. Die Probekörper wurden in einem Wasserbecken bzw. in einem Heißwasserbecken gelagert und vor der Messung zur Anklimateisierung für ca. 2 Stunden in einem Klimaraum bei 20 °C und ca. 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Die Messzeit für die Schwindversuche betrug 28 Tage und es wurde ein Kalibrierstab als Referenz verwendet. Nach dem Ausschalen der Probekörper nach 24 Stunden wurden mittels eines 2-Komponentenklebers Messzapfen mittig auf die Prismenstirnflächen geklebt. Die Abbildung 37 zeigt die Probekörper mit den Messzapfen und den Referenzstab.



**Abbildung 37:** linkes Bild: Prüfkörper mit Messzapfen, rechtes Bild: Referenzstab



**Abbildung 38:** linkes Bild: Messvorrichtung mit Referenzstab, rechtes Bild: Messvorrichtung mit Prüfkörper

Nach dem Erhärten des Klebers erfolgte die Nullmessung der Probekörper, wobei auch der Kalibrierstab gemessen wurde (Abbildung 38). Die Ergebnisse wurden an der Schwindvorrichtung mit einer analogen Messuhr auf 0,001 mm genau

abgemessen. Die Messung erfolgte an bestimmten Tagen und wurde am Ende der Messreihe mit folgender Formel ausgewertet:

$$\varepsilon_t = \frac{\text{mess}_{\text{Prob},t} - \text{mess}_{\text{Kalib},t} - \text{mess}_{\text{Prob},0} + \text{mess}_{\text{Kalib},0}}{L_{0\text{Prob}}}$$

**Formel 18: Längenänderung  
bezogen auf die Zeit [62]**

$\varepsilon_t$  = Längenänderung bezogen auf die Zeit

$L_{0\text{Prob}}$  = Nullmessung Bezugslänge

$\text{mess}_{\text{Prob},t}$  = Messung Probe, Zeitpunkt t

$\text{mess}_{\text{Prob},0}$  = Nullmessung der Probe

$\text{mess}_{\text{Kalib},t}$  = Messung Kalibrierstab, Zeitpunkt t

$\text{mess}_{\text{Kalib},0}$  = Nullmessung des Kalibrierstabes

Die Schwindverformungen werden auf mm/m bezogen dargestellt. Alle Probekörper für den Schwindversuch wurden nach ca. 24 Stunden nach dem Mischen ausgeschalt und den beiden Nachbehandlungsmethoden unterzogen. Während die eine Prüfserie die ersten 7 Tage im Wasserbecken bei 20 °C aufbewahrt wurde, wurde mit der andere Prüfserie einer Heißwasserlagerung durchgeführt. Bei der Heißwasserbehandlung werden die Probekörper in einem Wasserbecken gelagert, das sich am 3. Tag nach dem Mischtag von 20°C auf 90°C erwärmt, die Temperatur dann konstant auf 90°C hält und am 6. Tag wieder auf 20°C abkühlt. Die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten betrugen bei den Versuchen dieser Arbeit jeweils 70 °C pro 6 Stunden. Ab den 8. Tag wurden alle Probekörper für die Schwindversuche in einem Klimaraum bei 20 °C und ca. 65 % relativer Luftfeuchte an der Luft gelagert. Wurden Schwindmessungen in den ersten 7 Tagen durchgeführt, so wurden die Proben aus dem Wasserbecken entnommen, für ca. 2 Stunden vor der Schwindmessung zur Anklimateisierung im Klimaraum aufbewahrt und nach erfolgreicher Schwindmessung wurden die Proben wieder in das jeweilige Wasserbecken gegeben. An den Proben aus dem Heißwasserbecken wurden in den 72 Stunden der Heißwasserlagerung keine Schwindmessungen durchgeführt, nur unmittelbar vor und nach der Heißwassernachbehandlung.

| Darstellung der Lagerungsbedingungen für die Schwindversuche |                      |   |            |   |   |   |   |           |   |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------------------------------------|----------------------|---|------------|---|---|---|---|-----------|---|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|----|
| Tage                                                         | 1                    | 2 | 3          | 4 | 5 | 6 | 7 | 8         | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15        | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22        | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| Nachbehandlung                                               |                      |   |            |   |   |   |   |           |   |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |
| Wasserlagerung<br>20°C                                       | Wasserbecken<br>20°C |   |            |   |   |   |   | Luft 20°C |   |    |    |    |    |    | Luft 20°C |    |    |    |    |    |    | Luft 20°C |    |    |    |    |    |    |
| Heißwasser-<br>lagerung 90°C                                 |                      |   | HW<br>90°C |   |   |   |   |           |   |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |

**Abbildung 39: Lagerungsbedingungen der Schwindversuche**

## **5. Voruntersuchungen**

### **5.1 Allgemeines**

Bevor die eigentliche Versuchsreihe für diese Arbeit gestartet wurde, wurden einige Vorversuche durchgeführt. Diese Vorversuche dienten einerseits zum Kennenlernen des Baustoffes Beton, dessen Eigenschaften, Verarbeitung und Herstellung, bzw. zur Erlangung einer gewissen Routine mit dem Mischer und Umgang mit den Prüfmaschinen und Laborgeräten. Andererseits dienten diese Versuche zur Findung der bestmöglichen Ausgangsmischung für die Hauptversuche. Das wesentliche Ziel dabei war eine Mischrezeptur zu finden, die eine gute Verarbeitbarkeit und hohe Festigkeitswerte erreicht. Diese Versuche wurden im Zeitraum von Dezember 2010 bis November 2011 im Labor des Instituts für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit, in der Adolf-Blamauergasse 1-3 durchgeführt.

### **5.2 Vorversuch 1: Optimierung des Mischprozesses**

#### **5.2.1 Allgemeines**

Da es keine bindenden Vorgaben bzw. Normen für den Mischvorgang gibt, findet man in der UHPC Literatur verschiedene Mischprozesse mit unterschiedlichen Mischreihenfolgen. Der Mischprozess bestimmt die Qualität des Betons wesentlich mit. In diesem Abschnitt werden 3 üblich verwendete Mischprozesse verglichen. Zuerst werden die drei Mischprozesse kurz vorgestellt und dann die durchgeführten Mischungen verglichen.

##### **5.2.1.1 Mischprozess 1**

Der erste Mischprozess ist dadurch gekennzeichnet, dass eine aufgeteilte Zugabe des Fließmittels erfolgt. Durch die getrennte Zugabe soll eine Agglomeration des Silikastaubes vermieden werden. Solch eine Mischreihenfolge wurde von De Larrard und Sedran in [57] durchgeführt und von Bonneau [58] adaptiert. Tabelle 12 zeigt die passenden Mischreihenfolgen welche dem Mischprozess 1 entsprechen.

**Tabelle 12: Verschiedene Mischreihenfolgen des Mischprozesses 1 [32]**

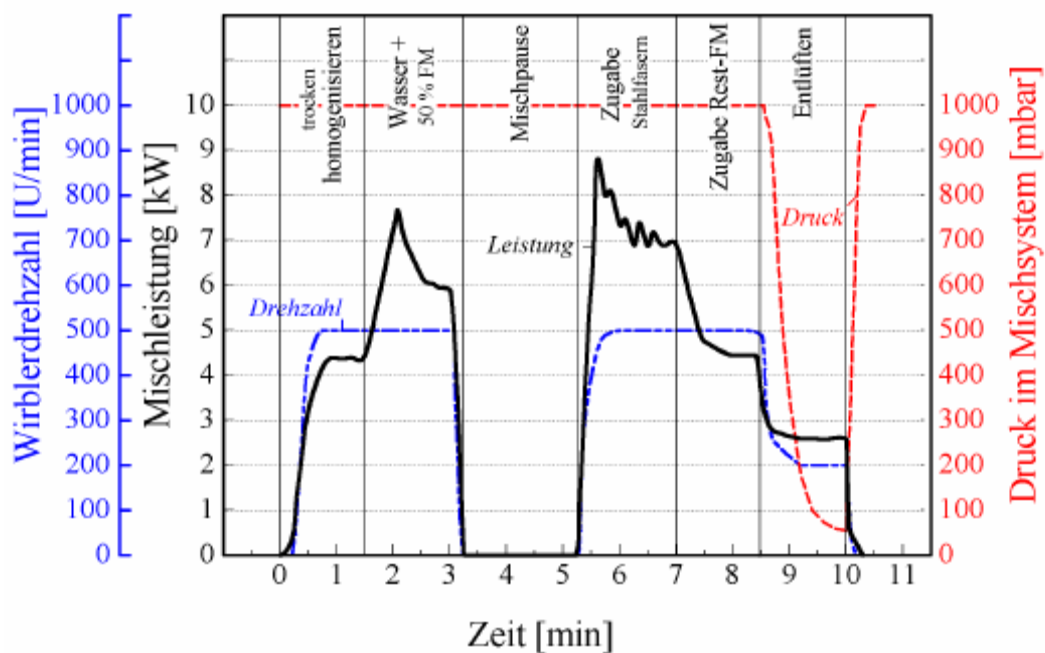
| Literaturstelle | De Larrard u. Sedran [57]<br>1994                                                       | Bonneau [58]<br>1997                                      | Bonneau [58]<br>1997                           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Mischer         | Üblicher Mischer mit 3 Geschwindigkeitsstufen                                           | Transportbetonmischfahrzeug 2,6 m³                        | Ringtrommischer im Fertigteilwerk 1,35 m³      |
| Mischphase 1    | Mischen des Wassers, des Silikastaubes und 33% des FM bis die Mischung homogen aussieht | Trockenes Homogenisieren aller Pulver bis einheitl. Farbe | Trockenes Homogenisieren aller Pulver in 3 min |
| Mischphase 2    | Stetiges Einmischen des Zements und 50% des FM                                          | Zugabe Wasser und der Hälfte des FM                       | Zugabe Wasser – 20l und der Hälfte des FM      |
| Mischphase 3    | Einmischen des Sandes                                                                   | Mischen                                                   | 2 min Mischen                                  |
| Mischphase 4    | Mischen für 1 min bei höchster Geschwindigkeit                                          | Zugabe Rest-FM gelöst in gleichem Wasservol.              | Zugabe Rest-FM gelöst in den 20l Restwasser    |
| Mischphase 5    | Zugabe des Rest-FM (17%)                                                                | Zugabe der Stahlfasern                                    | Mischen 4 min                                  |
| Mischphase 6    | Mischen für 1 min bei höchster Geschwindigkeit                                          | Mischen                                                   | Zugabe der Stahlfasern und Einmischen 9 min    |

### 5.2.1.2 Mischprozess 2

Im zweiten Mischprozess erfolgt die Zugabe aller Feststoffteile in der ersten Mischphase. Auch hier erfolgt eine geteilte Fließmittelzugabe, jedoch wird eine Mischpause nach 3 min eingeführt. Die Mischpause dient dazu, um einerseits eine hohe Wirksamkeit des Fließmittels zu gewährleisten und andererseits nicht unnötige Mischenergie einzubringen, welche zu einer Erhöhung der Frischbetontemperatur führen würde. Die Tabelle 13 zeigt den Mischungsablauf mit einem Intensivmischer mit Vakuumpumpe bei einer Entlüftung mit 60 mbar aus [32]. Die nachfolgende Abbildung 40 zeigt die Wirblerdrehzahl und die Mischleistung dieses Mischprozesses mit einem Fasercocktail aus 2,5 Vol.-% Stahlfasern und 0,3 Vol.-% PP-Fasern.

**Tabelle 13: Mischreihenfolge für Intensivmischer mit Vakuum-Peripherie [32]**

| Zeit [min]<br>Beginn - Ende | Handlung                                                            |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 0 - 1,5                     | Trockenes Homogenisieren aller Ausgangsstoffe außer den Stahlfasern |
| 1,5 - 3,0                   | Einmischen des Anmachwassers und der Hälfte des FM                  |
| 3,0 - 5,0                   | Mischpause                                                          |
| 5,0 - 7,0                   | Stetiges Zugeben der Stahlfasern                                    |
| 7,0 - 8,5                   | Zugabe des restlichen FM und Homogenisieren                         |
| 8,5 - 10                    | Entlüften durch Anlegen eines Unterdruckes von 60 mbar              |



**Abbildung 40: Mischreihenfolge und eingebrachte Mischleistung im Intensivmischer R08 Vac, UHPC mit Fasercocktail 2,5 Vol.-% Stahlfasern und 0,3 Vol.-% PP-Fasern [32]**

### 5.2.1.3 Mischprozess 3

Im dritten Mischprozess erfolgt die Zugabe aller Feststofffeinteile ebenfalls in der ersten Mischphase, jedoch wird die Zugabe des Fließmittels nicht aufgeteilt sondern das ganze Fließmittel wird mit dem Anmachwasser vermengt und in der zweiten Mischphase eingebracht. Danach erfolgt nur mehr ein 50 Sekunden langes Nachmischen. Ein solch ein kurzer Mischprozess wird als hybrider Mischablauf bezeichnet. Unter hybriden Mischabläufen versteht man das Mischen in mehreren Teilabläufen bei variierender Mischintensität. Dabei beschleunigen hohe Werkzeuggeschwindigkeiten den Aufschluss von Wasser und Fließmittel. Hinzu kommt, dass nach dem Übergang von Kornhaufwerk zur Suspension ein hoher Energieeintrag nicht mehr erforderlich ist. So werden bei hybriden Mischabläufen die Werkzeuggeschwindigkeiten entsprechend den jeweiligen Anforderungen angepasst (Abbildung 41). In der Anfangsphase sollen vor allem der Wasser- und der Fließmittelaufschluss durch die hohen Werkzeuggeschwindigkeiten intensiviert werden. In der Endphase wird die abschließende Homogenisierung des Mischgutes bei geringeren Werkzeuggeschwindigkeiten durchgeführt, um den Energieeintrag zu minimieren und eine fortschreitende Desagglomeration zu verhindern. Mit derartigen

hybriden Mischabläufen ist es möglich, Selbstverdichtende Betone aber auch ultrahochfeste Beton in einer Mischzeit von 60 Sekunden oder weniger herzustellen [59].

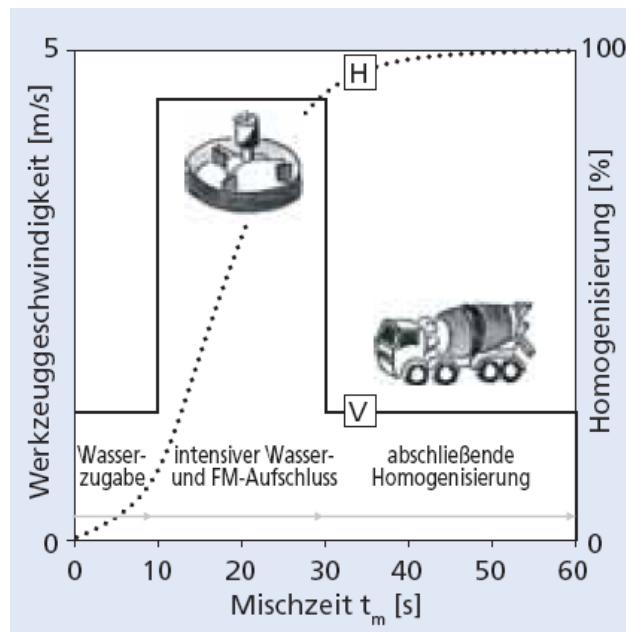


Abbildung 41: Hybrider Mischablauf [59]

### 5.2.2 Frischbeton- und Festigkeitsvergleich der 3 Mischprozesse

Im ersten Teil dieses Vorversuchs wurde der Mischprozess 1 mit dem Mischprozess 2 (mit Mischpause) verglichen. Dabei wurden für jeden Mischablauf 2 Schalungen mit je 3 Probekörpern mit den Maßen 40 x 40 x 160 mm hergestellt, welche anschließend einem Biegezug- und einem Druckversuch jeweils nach 7 und 28 Tagen unterzogen wurden. Die Probekörper wurden bei Raumluft gelagert.

Im zweiten Teil wurde der Mischprozess 1 mit dem Mischprozess 3 (hybrider Mischablauf) verglichen. Für jeden Mischablauf wurde wieder eine Schalung mit je 3 Probekörpern mit den Maßen 40 x 40 x 160 mm hergestellt, welche anschließend einem Biegezugversuch nach 7 Tagen und einem Druckversuch nach 7 und 28 Tagen unterzogen wurden. Die Probekörper wurden dabei in einem Heißwasserbecken für 72 Stunden gelagert, das sich am 3. Tag nach dem Mischtag von 20°C auf 90°C erwärmte, die Temperatur dann konstant auf 90°C gehalten und am 6. Tag wieder auf 20°C abkühlt. Dabei wurde eine Probekörperserie im Heißwasserbecken gelagert, die andere Serie wurde ca. 1 cm über der Wasseroberfläche gelagert. Am 7. Tag wurde die eine Serie geprüft, die Prüfsérie für

die 28 Tagesfestigkeit wurde weiter an der Raumluft gelagert. Es wurden für jeden Mischprozess zwei Schalungen mit je 3 Probekörpern hergestellt.

Tabelle 14 zeigt die durchgeführten Mischreihenfolgen der drei Mischprozesse und die Tabelle 15 verweist auf die verwendeten Materialien.

**Tabelle 14: Mischreihenfolgen der 3 Mischprozesse**

| Nr | Mischprozess 1     |       |         | Mischprozess 2     |       |         | Mischprozess 3     |       |         |
|----|--------------------|-------|---------|--------------------|-------|---------|--------------------|-------|---------|
|    | Reihenfolge        | [min] | [U/min] | Reihenfolge        | [min] | [U/min] | Reihenfolge        | [min] | [U/min] |
| 1. | CEM, MS, QM        | 01:30 | 950     | CEM, MS, QM, QS    | 01:30 | 950     | CEM, MS, QM, QS    | 00:30 | 1250    |
| 2. | QS einfüllen       | 00:30 | 250     | Wasser + ½ FM      | 00:30 | 250     | Wasser + FM        | 00:30 | 1250    |
| 3. | Mischen            | 01:30 | 1250    | Mischen            | 01:30 | 950     | Mischen            | 00:50 | 1250    |
| 4. | Wasser + ½ FM      | 00:30 | 1250    | Mischpause         | 00:30 | 0       | Entlüften [60mbar] | 00:00 | 250     |
| 5. | Mischen            | 02:00 | 1250    | Mischen            | 02:00 | 950     |                    |       |         |
| 6. | FM einfüllen       | 00:30 | 1250    | FM einfüllen       | 00:30 | 950     |                    |       |         |
| 7. | Nachmischen        | 06:00 | 1250    | Nachmischen        | 06:00 | 950     |                    |       |         |
| 8. | Entlüften [60mbar] | 00:00 | 250     | Entlüften [60mbar] | 00:00 | 250     |                    |       |         |
|    | Summe              | 12:30 | -       | Summe              | 12:30 | -       | Summe              | 01:50 | -       |

**Tabelle 15: Verwendete Materialien Vorversuch 1**

| Legende |                 |                        |
|---------|-----------------|------------------------|
| Cem     | Zement          | CEM I 42,5 R           |
| MS      | Microsilika     | Fa. Elkem, Grade 940-U |
| QM      | Quarzmehl 1600  | Fa. Feichtinger        |
| QS      | Quarzsand 01/07 | Fa. Feichtinger        |
| FM      | Fließmittel     | Sika FM 209            |

Anmerkung: Der Mischabschnitt 8) Entlüften wurde bei diesem Vorversuch nicht berücksichtigt, da nicht vakuumgemischt wurde.

Unterschiede des Mischprozesses 2 zu Mischprozess 1:

- Alle Feinteile werden zu Beginn des Mischvorganges in den Mischbehälter beigemengt (Cem, MS, QM, QS)
- Mischpause nach Zugabe von Wasser und 2:00 min Mischen
- Mischen mit höherer Drehzahl (1250 U/min statt 950 U/min)
- Kürzeres Nachmischen

Unterschiede des Mischprozesses 3 zu Mischprozess 1:

- Feinteile (Cem, MS, QM, QS) werde bei MP3 kürzer vermischt
- Das gesamte Fließmittel wird bei MP3 in Mischphase 2 zugegeben
- Bei beiden Mischprozessen: Mischen mit höherer Drehzahl (1250 U/min)
- Kürzeres Nachmischen bei MP3
- Gesamte Mischdauer nur 1:50 Minuten bei MP3, im Vergleich zu 12:30 bei MP1

Bei gleicher Rezeptur und Einwaage wurden folgende Frischbetoneigenschaften erzielt:

**Tabelle 16: Frischbetoneigenschaften Vorversuch 1**

| Mischprozess | Bezeichnung | Ausbreitmaß [cm] | Luftgehalt [%] | Frischbetonrohddichte [kg/m³] | Temperatur [°C] |
|--------------|-------------|------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|
| MP 1         | VV_1.1.1    | 19               | 6,0            | 2247,0                        | 41              |
|              | VV_1.2.1    | -                | 4,7            | 2319,0                        | 48              |
|              | VV_1.2.2    | -                | 4,8            | 2336,0                        | 49              |
| MP 2         | VV_1.1.2    | 25               | 4,7            | 2284,0                        | 36              |
| MP 3         | VV_1.2.3    | 18               | 4,6            | 2344,5                        | 40              |
|              | VV_1.2.4    | 22               | 4,9            | 2313,5                        | 38              |

Zuerst wurde der Mischprozess 1 mit dem Mischprozess 2 verglichen. Trotz gleicher Mischrezeptur konnte mit dem Mischprozess 2 eine bessere Verarbeitbarkeit erzielt werden. Dies zeigt sich im höheren Ausbreitmaß von 25 cm. Der Luftporengehalt konnte ebenfalls von 6,0 % auf 4,7 % verringert werden. Dadurch wies der Frischeton nach dem Mischen eine höhere Rohddichte auf, dieser konnte durch die geänderte Mischreihenfolge von 2247,0 kg/m³ auf 2284,0 kg/m³ erhöht werden. Ein weiterer Punkt, der vor allem aus der Mischpause resultierte, ist jener, dass die Mischtemperatur nach dem ganzen Mischablauf von 41°C auf 36°C gesenkt werden konnte.

Im zweiten Versuch wurden Mischprozess 1 und 3 miteinander verglichen, wobei der Mischprozess 1 leicht verändert wurde gegenüber dem ersten Versuchsteil. Die Änderungen betreffen die erste Mischphase (alle Feststofffeinteile zusammen) und es wurden aktuellere Versionen der Ausgangsstoffe (Microsilika, Quarzmehl und Fließmittel) verwendet. Da man bei den Mischungen VV\_1.2.1 und VV\_1.2.2 kein Ausbreitmaß gewinnen konnte, wurde bei der Mischung VV\_1.2.4 der Fließmittelanteil von 3% auf 4% erhöht. Ziel der Erhöhung des Fließmittelanteils auf

4,0 % war die Verbesserung der Verarbeitbarkeit und ein höherer Wert für das Ausbreitmaß.

Bei gleicher Mischrezeptur mit dem kurzen Mischprozess 3 gegenüber von MP1 konnte somit ein Ausbreitmaß ermittelt werden, allerdings nur 18 cm. Weiters konnte die Mischtemperatur beim MP3 auf 40°C gehalten werden, im Vergleich zu den recht hohen Temperaturen des Mischprozesses 1. Der Luftporengehalt im Beton war bei allen vier Mischungen fast gleich und betrug im Mittel 4,75 %. Vergleicht man die beiden kurzen Mischungen des MP3, so kann man den Fließmitteleinfluss erkennen. Während sich bei der Mischung VV\_1.2.3 der kleinste Luftporengehalt von 4,6 % und die größte Frischbetonrohddichte von 2344,5 kg/m<sup>3</sup> einstellte, ergab die Mischung VV\_1.2.4 mit 1 % mehr Fließmittelgehalt den größten Luftporengehalt und die niedrigste Frischbetonrohddichte von 2313,5 kg/m<sup>3</sup>. Durch die Erhöhung des Fließmittels konnte die Mischtemperatur etwas gesenkt werden und zwar von 40 auf 38 °C und das Ausbreitmaß konnte von 18 cm auf 22 cm erhöht werden.

Die Festbetoneigenschaften wurden anhand von Biegezug- und Druckversuch untersucht. Dabei wurden die Probekörper nach 7 Tagen und nach 28 Tagen abgedrückt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 17 aufgelistet.

**Tabelle 17: Festigkeiten des Vorversuchs 1**

| Bezeichnung | Lagerung               | Biegezug [N/mm <sup>2</sup> ] |       | Druck[N/mm <sup>2</sup> ] |        |
|-------------|------------------------|-------------------------------|-------|---------------------------|--------|
|             |                        | 7t                            | 28t   | 7t                        | 28t    |
| VV_1.1.1    | Raumluft               | 10,81                         | 12,94 | 112,83                    | 130,17 |
| VV_1.1.2    | Raumluft               | 10,16                         | 12,92 | 114,47                    | 134,25 |
| VV_1.2.1    | Im 90°C Wasserbecken   | 24,03                         | -     | 186,65                    | 209,94 |
| VV_1.2.2    | Über 90°C Wasserbecken | 24,22                         | -     | 205,33                    | 204,87 |
| VV_1.2.3    | Im 90°C Wasserbecken   | 23,74                         | -     | 204,03                    | 211,51 |
| VV_1.2.4    | Über 90°C Wasserbecken | 25,11                         | -     | 190,24                    | 208,95 |

Die Tabelle 20 zeigt, dass sich beim ersten Versuch die beiden Mischprozesse MP1 und MP2 sowohl bei Biegezug- als auch beim Druckversuch nur um wenige Anteile unterscheiden. Generell fällt auf, dass für beide Mischarten gute Festigkeitswerte sowohl für Biegezug- als auch für Druckversuch erreicht wurden. Biegezugwerte nach 7 Tagen über 10 N/mm<sup>2</sup> und Druckwerte nach 7 Tagen von über 110 N/mm<sup>2</sup> sind als gut einzustufen. Beim Biegezug nach 7 Tagen lag der Mischprozess 2 mit der Mischpause um ca. 6 % unter dem Wert des Mischprozesses 1 ohne Mischpause. Nach 28 Tagen sind die Biegezugwerte beider Mischprozesse nahezu gleich. Beim Druckversuch kam es zu einer Steigerung von ca. 1,5 % durch die

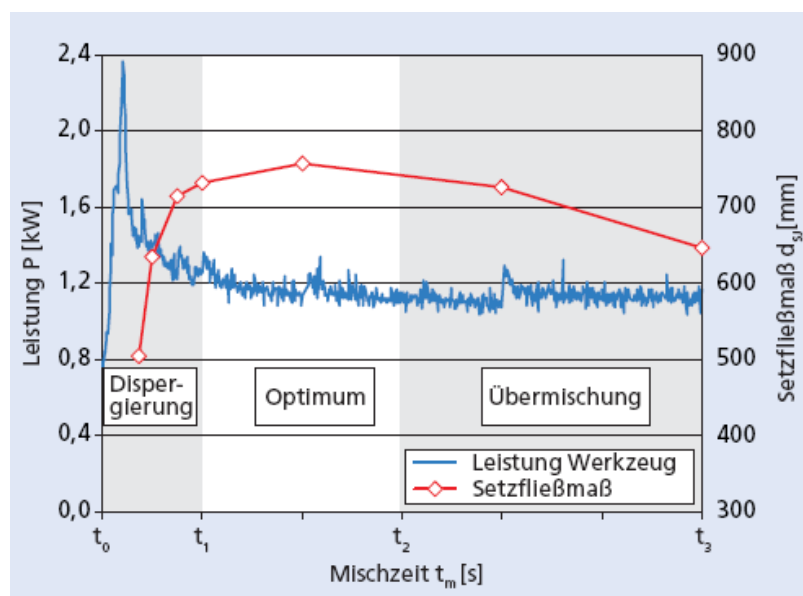
Mischpause nach 7 Tagen und nach 28 Tagen konnte der Mischprozess 2 mit Mischpause eine um ca. 3,1 % höhere Druckfestigkeit aufweisen. Die Ergebnisse liefern zwar nicht allzu große Unterschiede, jedoch können 3 – 5 % an Festigkeitssteigerung schon deutliche Auswirkungen haben.

Die erste Auffälligkeit beim Vergleich des zweiten Versuches sind die hohen Festigkeitswerte im Vergleich zum Vorversuch 1.1. Hier zeigt sich der Einfluss der Wärmebehandlung durch das Heißwasserbecken deutlich. Betrachtet man nur die Biegezug- und die Druckfestigkeiten der Prismenproben, so kann man erkennen, dass Proben die über der Wasseroberfläche gelagert wurden eine höhere Biegezugfestigkeit aufweisen und jene Proben die im Heißwasserbecken lagen eine höhere Druckfestigkeit besitzen. Die Biegezugfestigkeit nach 7 Tage der beiden Mischungen des MP1 sind mit 24,03 und 24,22 N/mm<sup>2</sup> annähernd gleich, während sich die Druckfestigkeit nach 7 Tagen von 186,65 und 205,33 N/mm<sup>2</sup> doch deutlich unterscheiden, nähern sie sich nach 28 Tagen wieder etwas an. Vergleicht man die Mischungen VV\_1.2.1 und VV\_1.2.3 die im Heißwasser gelagert wurden und die gleiche Rezeptur besitzen, so kann man sagen, dass abgesehen von der 7 Tages Druckfestigkeit die Mischungen nur geringe Unterschiede aufweisen. Die Mischung VV\_1.2.4 ist etwas separater zu betrachten, da diese einen Fließmittelanteil von 4 % statt 3 % enthält. Obwohl diese Mischung mehr Fließmittel enthält, weist sie die größte Biegezugfestigkeit auf. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen ist in etwa gleich der anderen Mischungen. Auffällig bei diesem Versuch war auch, dass die Probekörper der Mischungen VV\_1.2.1 und VV\_1.2.4, obwohl sie nach 7 Tagen die geringsten Druckfestigkeitswerte aufwiesen, bis zum 28. Tag noch reichlich an Festigkeit zunahmen, und zwar um ca. 10 bis 12 %.

Da sich die Festbetoneigenschaften der drei Mischprozesse in diesem Vergleich nicht stark unterscheiden, jedoch die Frischbetoneigenschaften des Mischprozesses 3 auf eine gute Verarbeitbarkeit schließen lassen, wurde für die weiteren Versuche in dieser Arbeit der kurze Mischprozess 3 gewählt. Dieser Mischablauf soll nun ein wenig genau betrachtet werden.

### 5.2.4 Hybrider Mischablauf (Mischprozess 3)

Betrachtet man nur den Mischvorgang in einem Mischbehälter, so kann man die Bewegung der Partikel grundsätzlich in einen konvektiven und einen dispersiven Transport einteilen. Der konvektive Transport ist dabei eine erzwungene gerichtete Bewegung größerer Anteile des Mischguts, wie sie bei der Grobvermischung durch das Mischwerkzeug entsteht. Beim dispersiven Transport handelt es sich um eine Zufallsbewegung einzelner Partikel durch die Kollision zwischen einzelnen Teilchen. Dieser Vorgang führt zu einer Feinvermischung und zur Vereinzelung von Agglomeraten.



**Abbildung 42: Einfluss der Mischdauer [59]**

Die Homogenisierung des Mischguts, die bei diesem Mischvorgang erreicht wird, beeinflusst bei der Herstellung des Betons die Frisch- sowie die Festbetoneigenschaften. Die Mischgüte hängt von der Zusammensetzung des Betons, der Mischzeit, der Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs bzw. des Mischbehälters, der Mischwerkzeuggeometrie und dem Mischablauf ab.

Betrachtet man den Einfluss der Mischzeit auf die Frischbetoneigenschaften, so kann man Abbildung 42 zu Hilfe nehmen. Dieses zeigt die Entwicklung des Setzfließmaßes eines Selbstverdichtenden Betons in Abhängigkeit von der Mischzeit. Die Leistung des Mischwerkzeugs ist ebenfalls enthalten. Dabei lassen sich 3 Phasen einteilen.

### **Phase 1 – Dispergierung**

Beim Zeitpunkt  $t_0$  findet die Zugabe des Wassers innerhalb 10 Sekunden statt. Durch die Verteilung des Wassers im Mischbehälter kommt es zur Bildung von Flüssigkeitsbrücken zwischen den einzelnen Partikeln. Durch die Oberflächenspannung des Wassers und des Kapillardrucks im Inneren der Brücke kommt es zur Steigerung der interpartikulären Kräfte, was für die 1. Phase mit einem Leistungsanstieg am Mischwerkzeug bedeutet. Aufgrund der zunehmenden Verteilung des Wassers und Fließmittels tritt ein Übergang von Kornhaufwerk zur Suspension auf. Befinden sich die Partikel in einer flüssigen Umgebung, entfallen die Kapillarkräfte und die Leistung am Mischwerkzeug fällt ab. In der 1. Phase steigt die Fließfähigkeit mit zunehmender Verteilung der Ausgangsstoffe an.

### **Phase 2 – Optimum**

Der weitere Mischverlauf ist dadurch gekennzeichnet, dass die Leistung am Mischwerkzeug asymptotisch sinkt. Wird das Plateau erreicht, so kann von einer weitgehenden Homogenisierung der Ausgangsstoffe und einer vollständigen Verteilung des Fließmittels ausgegangen werden. Die Fließfähigkeit erreicht bei diesem Zeitpunkt das Maximum.

### **Phase 3 – Übermischung**

Eine weitere Zuführung von Mischenergie führt zu einer Verschlechterung der Fließfähigkeit des Betons. Es kommt zwar weiterhin zu Platzwechselvorgängen zwischen den Partikeln, durch die konvektiven und dispersiven Transportbewegungen, eine entsprechende Verbesserung der Mischgüte wird dabei aber nicht erzielt. Die Bildung von Agglomeraten wird weiterhin aufgelöst, da es noch immer zu Kollisionen zwischen den einzelnen Partikeln und zwischen den Partikeln und Mischwerkzeug kommt. Eine weitere Durchmischung führt zu einer fortschreitenden Vergrößerung der Oberfläche und somit zur Erhöhung des Wasser- und Fließmittelanspruchs und würde zu einem Abfall der Fließfähigkeit führen [59].

Der hybride Mischablauf bei der Herstellung von UHPC zeigte sich in diesem Vorversuch sehr vorteilhaft. Mit ihm konnten sehr gute Frischbetoneigenschaften erzielt werden, was für den späteren Fasereinsatz eine wichtige Rolle spielte. Auch die gewonnenen Festigkeitswerte zeigten keine großen Veränderungen gegenüber den

anderen Mischprozessen. Ein weiterer Vorteil dieses Mischablaufes ist die kürzere Arbeitszeit. So konnte die gesamte Mischdauer mit Mischprozess 3 um mehr als die Hälfte verkürzt werden im Vergleich zu Mischprozess 1 und 2. Dies führte zu einem geringeren Arbeitsaufwand und zur Steigerung der Kapazität. In Hinblick auf die werksmäßige Herstellung von Betonen kann mit hybriden Mischabläufen die Produktivität gesteigert werden und letztendlich die Herstellungskosten reduziert werden.

### 5.3 Vorversuch 2: Änderung des W/Z-Wertes

Da die Verarbeitbarkeit des Frischbetons aus dem Vorversuch 1 nicht zufrieden stellend war, wurde in diesem Versuch der W/Z-Wert der Mischung geändert. Der Fließmittelgehalt wurde nicht verändert und blieb bei allen Mischungen bei 4 %. Die Untersuchungen wurden mit dem Mischprozess 3 (hybrider Mischablauf) durchgeführt, mit dem im Vorversuch 1 ein Ausbreitmaß von 22 cm erreicht wurde. Ziel dieses Versuchs war ein Ausbreitmaß von  $26 \pm 1$  cm, das sich aufgrund der Erhöhung des W/Z-Wertes einstellen sollte.

Es wurden drei Mischungen mit W/Z-Werten von 0,26, 0,28 und 0,30 hergestellt und die Frischbetoneigenschaften verglichen. Die Ausgangsstoffe und ihre Massenanteile sind in der Tabelle 18 enthalten. Die gewählte Mischung wurde dann mit einem anderen Fließmittel nachgemischt und verglichen.

**Tabelle 18: Ausgangsstoffe und deren Massenanteile für den Vorversuch 2**

| Ausgangsstoff | Bezeichnung             | Masse [kg] bezogen auf 1 m <sup>3</sup> |         |         |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------------|---------|---------|
|               |                         | VV_2.1                                  | VV_2.2  | VV_2.3  |
|               | Mischung                |                                         |         |         |
|               | W/Z-Wert                | 0,26                                    | 0,28    | 0,30    |
| Wasser        | Wasser                  | 173,28                                  | 185,61  | 199,42  |
| Zement        | CEM I 42,5 R            | 666,47                                  | 662,89  | 664,72  |
| Zuschlag      | Sand ME 0,1 – 0,7       | 940,75                                  | 914,25  | 874,5   |
| Zusatzstoff 1 | Microsilika Elkem 971 U | 164,15                                  | 163,26  | 163,72  |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl 10000         | 320,38                                  | 318,66  | 319,54  |
| Fließmittel   | Sika FM 209             | 26,66                                   | 26,52   | 26,59   |
|               | Summe                   | 2291,70                                 | 2271,18 | 2248,49 |

Mit jeder Mischung wurden zwei Schalungen mit je 3 Probekörpern (40 x 40 x 160 mm) gewonnen. Wobei ein Schalungsset für 28 Tage an der Raumluft gelagert wurde und das andere Set einer Heißwasserlagerung unterzogen wurde. Die Probekörper wurden dabei in einem Heißwasserbecken für 72 Stunden gelagert, das

sich am 3. Tag nach dem Mischtag von 20°C auf 90°C erwärmte, die Temperatur wurde dann konstant auf 90°C gehalten und am 6. Tag wieder auf 20°C abgekühlt. Am 7. Tag wurde die Biegezugfestigkeit mittels 3-Punkt Biegeversuch festgestellt und mit einer Probenhälfte ein Druckversuch durchgeführt. Die andere Probenhälfte wurde am 28. Tag abgedrückt. Die gewonnenen Frischbetoneigenschaften aus dem Vorversuch 2 sind in der nachfolgenden Tabelle 19 abgebildet.

**Tabelle 19: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 2**

| Bezeichnung | FM-Anteil [%]       | W/Z-Wert | Ausbreitmaß [cm] | Frischbetonrohddichte [kg/m³] | Luftgehalt [%] | Mischtemperatur [°C] |
|-------------|---------------------|----------|------------------|-------------------------------|----------------|----------------------|
| VV_2.1      | 4%<br>Sika FM 209   | 0,26     | 23,0             | 2297,0                        | 4,2            | 38                   |
| VV_2.2      | 4%<br>Sika FM 209   | 0,28     | 28,0             | 2281,0                        | 3,2            | 39                   |
| VV_2.3      | 4%<br>Sika FM 209   | 0,30     | 30,5             | 2256,5                        | 3,0            | 34                   |
| VV_2.4      | 4%<br>Advanced High | 0,28     | 15,0             | 2281,0                        | 4,4            | 32                   |

In der Tabelle 19 kann man sehr gut den Zusammenhang zwischen W/Z-Wert und den Frischbetoneigenschaften erkennen. Während bei steigendem W/Z-Wert das Ausbreitmaß zunimmt, nehmen die Frischbetonrohddichte und der Luftgehalt ab. Die Mischtemperatur nimmt ebenfalls bei steigendem W/Z-Wert ab, da der Widerstand des Mischwerkzeugs im Behälter geringer wird, je flüssiger die Mischung wird. Während bei den Mischungen VV\_2.1 und VV\_2.2 die Mischtemperaturen noch annähernd gleich sind, fällt sie bei der flüssigen Mischung VV\_2.3 auf 34°C ab. Die Erhöhung des W/Z-Wertes von 0,26 auf 0,28 brachte eine deutliche Vergrößerung des Ausbreitmaßes von 23 cm auf 28 cm. Die Erhöhung von 0,28 auf 0,30 brachte nur mehr einen Unterschied von 2,5 cm im Ausbreitmaß. Auch der Luftporengehalt sprang bei der Erhöhung des W/Z-Wertes von 0,26 auf 0,28 von 4,2% auf 3,2% deutlich ab, während der Unterschied von Mischung VV\_2.2 auf VV\_2.3 mit 3,2% auf 3,0% Luftporengehalt nicht so stark ausfällt.

Mit dem W/Z-Wert von 0,28 konnte ein ausreichendes Ausbreitmaß von 28 cm erzielt werden. Mit diesem W/Z-Wert wurde eine Vergleichsmischung mit gleicher Rezeptur, jedoch mit einem anderen Fließmittel, durchgeführt. Der Vergleich der Mischungen VV\_2.2 mit dem Fließmittel Sika FM 209 und VV\_2.4 mit dem Fließmittel Duriment Advanced High zeigt, dass sich für VV\_2.4 eine deutlich schlechtere Verarbeitbarkeit einstellt. Die Mischung mit dem Fließmittel Duriment Advanced High konnte nur ein Ausbreitmaß von 15 cm erzielen und der Luftporengehalt betrug 4,4%, was ebenfalls

den schlechtesten Wert darstellt. Durch diese Ergebnisse verblieb man beim Fließmittel Sika FM 209 für die weiteren Vorversuchsmischungen.

**Tabelle 20: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 2**

| Vorversuche 2<br>Bezeichnung | W/Z-<br>Wert | Lagerung        | Biegezug fct [N/mm <sup>2</sup> ] | Druck fc [N/mm <sup>2</sup> ] |        |
|------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------|
|                              |              |                 | 7d                                | 7d                            | 28d    |
| VV_2.1.1                     | 0,26         | Raumluft        | 8,90                              | 123,47                        | 162,59 |
| VV_2.1.2                     |              | Heißwasser 90°C | 22,26                             | 188,92                        | 194,96 |
| VV_2.2.1                     | 0,28         | Raumluft        | 8,20                              | 121,90                        | 172,58 |
| VV_2.2.2                     |              | Heißwasser 90°C | 24,26                             | 198,80                        | 199,85 |
| VV_2.3.1                     | 0,30         | Raumluft        | 8,57                              | 120,89                        | 170,93 |
| VV_2.3.2                     |              | Heißwasser 90°C | 21,86                             | 202,60                        | 203,92 |
| VV_2.4.1                     | 0,28         | Raumluft        | 8,27                              | 120,54                        | -      |
| VV_2.4.2                     |              | Heißwasser 90°C | 22,85                             | 177,86                        | -      |

Die Tabelle 20 zeigt die Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen und die Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen der jeweiligen Mischungen des Vorversuchs 2. Die erste Auffälligkeit zeigt den großen Einfluss der Heißwassernachbehandlung auf die Biegezugfestigkeit. Während die Proben, die eine Woche an der Raumluft gelagert wurden, eine Festigkeit zwischen 8,20 und 8,90 N/mm<sup>2</sup> aufweisen, konnte die Festigkeit bei allen Proben auf mehr als 21 N/mm<sup>2</sup> durch die Nachbehandlung mit dem Heißwasserbecken erhöht werden. Ein direkter Zusammenhang der Biegezugfestigkeit mit dem W/Z-Wert ist nicht zu erkennen. Die Annahme, dass mit steigendem W/Z-Wert die Biegezugfestigkeit sinkt, kann nicht getroffen werden, da der Höchstwert bei der Mischung VV\_2.2.2 mit einem W/Z-Wert von 0,28 mit 24,26 N/mm<sup>2</sup> erreicht wurde.

Betrachtet man die 7-Tages-Druckfestigkeiten der Proben, die an der Raumluft aufbewahrt wurden, so kann man zunächst einen linearen Zusammenhang mit dem W/Z-Wert erkennen. Mit steigendem W/Z-Wert sinkt die Druckfestigkeit, und zwar von 123,47 N/mm<sup>2</sup> auf 121,90 N/mm<sup>2</sup> und auf 120,89 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Druckfestigkeiten nach 28 Tagen verhält es sich jedoch nicht so. Hier steigt die Festigkeit zwar von der Mischung VV\_2.1.1 mit 0,26 W/Z-Wert und 162,59 N/mm<sup>2</sup> auf 172,58 N/mm<sup>2</sup> bei der Mischung VV\_2.2.1 mit 0,28 W/Z-Wert, jedoch sinkt die Druckfestigkeit wieder auf 170,93 N/mm<sup>2</sup> bei der Mischung VV\_2.3.1 mit 0,30 W/Z-Wert. Bei den Probekörpern, die im Heißwasserbecken lagen, ist ein linearer Zusammenhang ersichtlich. Hier steigen die Druckfestigkeiten bei den nach 7 Tagen als auch bei den nach 28 Tagen geprüften Probekörpern mit steigendem W/Z-Wert. Es zeigt sich weiters, dass sich die Druckfestigkeiten der heißwassergelagerten Proben nach 7 Tagen und 28 Tagen nicht mehr viel unterscheiden.

Die Mischungen VV\_2.4.1 und VV\_2.4.2 sind die Vergleichsmischungen mit dem anderen Fließmittel Duriment Advanced High und sind nur der Vollständigkeit halber in der Tabelle angeführt. Mit der Mischung VV\_2.4 wurde nicht mehr weiter gearbeitet, da mit ihr schlechte Frischbetoneigenschaften und geringe Festigkeiten erzielt wurde. Die beiden Mischungen wurden nur am 7. Tag einem Biegezug- und einem Druckversuch unterzogen.

### 5.4 Vorversuch 3: Mischung mit Stahlfasern 6mm

Da in dieser Arbeit hauptsächlich UHPC Mischungen mit verschiedenen Faserarten durchgeführt werden, wurde in diesem Versuch eine Testmischung mit Stahlfasern durchgeführt. Hauptaugenmerk war es eine ausreichend gute Verarbeitbarkeit des Frischbetons mit Stahlfasern zu erzielen.

Einerseits wurde die Mischung aus dem Vorversuch 2 VV\_2.2 mit einem W/Z-Wert von 0,28 mit Vakuum ohne Stahlfasern nachgemischt, andererseits wurde eine Mischung mit 6 mm langen Stahlfasern hergestellt, die einmal ohne Vakuum und einmal mit Vakuum gemischt wurde. Dabei wurden zu jeder Mischung wieder zwei Schalungssets mit je 3 Probekörpern hergestellt, wobei ein Set an der Raumluft gelagert wurde und das andere Set im Heißwasserbecken mit 90 °C aufbewahrt wurde. Am 7. Tag wurden mit den Probekörpern ein Biegezug- und ein Druckversuch durchgeführt. Mit der zweiten Bruchhälfte aus dem Biegezugversuch wurde nach 28 Tagen ein Druckversuch durchgeführt. Die Ausgangsstoffe und ihre Massenanteile, sowie die Frischbetoneigenschaften und Biegezug- und Druckfestigkeiten sind in den nachfolgenden Tabellen 21, 22 und 23 angeführt.

**Tabelle 21: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 3**

| Ausgangsstoff | Bezeichnung             | Masse [kg]<br>bezogen auf 1 m³ |                       |
|---------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|
|               |                         | VV_3.1<br>(=VV_2.2)            | VV_3.2 bzw.<br>VV_3.3 |
|               | Mischung                |                                |                       |
|               | W/Z-Wert                | 0,28                           | 0,28                  |
| Wasser        | Wasser                  | 185,61                         | 181,76                |
| Zement        | CEM I 42,5 R            | 662,89                         | 649,16                |
| Zuschlag      | Sand ME 0,1 – 0,7       | 914,25                         | 914,25                |
| Zusatzstoff 1 | Microsilika Elkem 971 U | 163,26                         | 159,88                |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl 10000         | 318,66                         | 312,06                |
| Fließmittel   | Sika FM 209             | 26,52                          | 25,97                 |
| Faser         | Stahl 6mm               | -                              | 100                   |
|               | Summe                   | 2271,18                        | 2343,07               |

**Tabelle 22: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 3**

| Bezeichnung | Anmerkung                         | Ausbreitmaß [cm] | Frischbeton-rohdichte [kg/m³] | Luftgehalt [%] | Misch-temperatur [°C] |
|-------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------|
| VV_3.1      | Vakuum gemischt                   | 27               | 2377,5                        | 1,3            | 32                    |
| VV_3.2      | Stahlfaser 6mm                    | 27               | 2338,0                        | 5,6            | 30                    |
| VV_3.3      | Stahlfaser 6mm<br>Vakuum gemischt | 26               | 2426,5                        | 1,2            | 32                    |

Betrachtet man die Frischbetoneigenschaften (Tabelle 22), so kann man erkennen, dass, obwohl sich in den Mischungen VV\_3.2 und VV\_3.3 ca. 1,27 Vol.% Stahlfasern befinden, sich die Verarbeitbarkeit aller drei Mischungen in der gleichen Größenordnung befindet. Der gewünschte Wert für das Ausbreitmaß von  $26 \pm 1$  cm wurde dabei immer eingehalten. Auch die Unterschiede im Luftporengehalt und der Mischtemperatur fallen bei den beiden Vakuum gemischten Mischungen VV\_3.1 und VV\_3.3 sehr gering aus. Abgesehen vom Luftporengehalt der Mischung VV\_3.2 und den Frischbetonrohdichten liegen alle Werte eng beisammen.

**Tabelle 23: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 3**

| Vorversuche 3 | Anmerkung                         | Lagerung        | Biegezug fct [N/mm²] | Druck fc [N/mm²] |        |
|---------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------|------------------|--------|
| Bezeichnung   |                                   |                 | 7d                   | 7d               | 28d    |
| VV_3.1.1      | Vakuum gemischt                   | Raumluft        | 9,03                 | 129,87           | 184,49 |
| VV_3.1.2      |                                   | Heißwasser 90°C | 25,21                | 205,44           | 222,16 |
| VV_3.2.1      | Stahlfaser 6mm                    | Raumluft        | 7,97                 | 134,68           | 180,78 |
| VV_3.2.2      |                                   | Heißwasser 90°C | 23,78                | 208,71           | 205,32 |
| VV_3.3.1      | Stahlfaser 6mm<br>Vakuum gemischt | Raumluft        | 8,00                 | 136,47           | 185,38 |
| VV_3.3.2      |                                   | Heißwasser 90°C | 23,68                | 225,95           | 224,67 |

Bei der Betrachtung der Tabelle 23 fällt auf, dass die Biegezugfestigkeitswerte für die Vakuum gemischte Mischung VV\_3.1 die besseren Ergebnisse lieferte als die Mischungen mit 1,27 Vol.% Stahlfasern. Erwartungsgemäß würde man annehmen, dass die Proben mit Stahlfasern eine höhere Biegezugfestigkeit aufweisen, jedoch liegen die erzielten Werte in diesem Versuch sogar niedriger als im Vorversuch 2, der ohne Stahlfasern durchgeführt wurde.

Ein Vergleich der beiden Mischungen VV\_2.2 und VV\_3.1 mit gleicher Rezeptur zeigt, dass die vakuumgemischten Probekörper von VV\_3.1 alle eine höhere Biegezug- und Druckfestigkeit aufweisen als die vom VV\_2.2. Wie in der Tabelle 23 ersichtlich, konnte alleine durch das Entlüften mit 60 mbar am Ende des

Mischprozesses von VV\_3.1 gegenüber VV\_2.2 die Biegezugfestigkeit von 8,20 N/mm<sup>2</sup> auf 9,02 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeiten von 121,90 N/mm<sup>2</sup> auf 129,87 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen und von 172,58 N/mm<sup>2</sup> auf 184,49 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen gesteigert werden. Bei den Probekörpern, die im Heißwasserbecken mit 90 °C nachbehandelt wurden, konnte durch das Vakuummischen die Biegezugfestigkeit von 24,26 N/mm<sup>2</sup> auf 25,21 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeiten von 198,80 N/mm<sup>2</sup> auf 205,44 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen und von 199,85 N/mm<sup>2</sup> auf 222,16 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen gesteigert werden.

Erstaunlich ist auch die Tatsache, dass die Druckfestigkeit der Mischung VV\_3.1 der Prüfkörper, die im Heißwasser lagen, vom 7. Tag auf den 28. Tag noch von 205,44 N/mm<sup>2</sup> auf 222,16 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden konnte. Üblicherweise ändert sich die Druckfestigkeit der im Heißwasser gelagerten Proben nach 28 Tagen nicht mehr von der 7-Tagesfestigkeit bzw. nimmt diese sogar leicht ab, wie das auch bei VV\_3.2.2 und VV\_3.3.2 der Fall ist. Bei den Raumluftgelagerten Proben befinden sich die Druckfestigkeiten alle ungefähr in demselben Festigkeitsbereich, und zwar nach 7 Tagen bei ca.  $133 \pm 3$  N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen bei ca.  $183 \pm 2$  N/mm<sup>2</sup>. Durch das Entlüften mit 60 mbar im letzten Mischabschnitt konnte die Druckfestigkeit von den üblichen 200 N/mm<sup>2</sup> um 10 % gesteigert werden und so wurden Druckfestigkeitswerte von über 220 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

## 5.5 Vorversuch 4: Stahlfasercocktail 6mm und 12mm

Da die gewonnenen Ergebnisse aus dem Vorversuch 3 mit 1,27 Vol.% Stahlfasergehalt nicht zufrieden stellend waren, wurde in diesem Versuch der Stahlfasergehalt auf 300 kg/m<sup>3</sup> (= ca. 3,6 Vol.%) erhöht. Des Weiteren wurden die 300 kg/m<sup>3</sup> auf 200 kg/m<sup>3</sup> mit 12 mm langen Stahlfasern und 100 kg/m<sup>3</sup> mit 6 mm langen Stahlfasern aufgeteilt. Um den Einfluss des Vakuummischens einbeziehen zu können, wurde bei einer Mischung am Ende des Mischablaufes mit 60 mbar entlüftet. Der W/Z-Wert wurde bei diesem Versuch von 0,28 auf 0,27 herabgesetzt. Für jede Mischung wurden wieder zwei Schalungssets mit je drei Probekörpern (40 x 40 x 160 mm) hergestellt, wobei ein Schalungsset an der Raumluft gelagert wurde und das andere Set zwei Tage nach dem Ausschalen über 72 Stunden in ein Heißwasserbecken mit 90 °C aufbewahrt wurde. Am 7. Tag wurden ein Biegezug- und ein Druckversuch mit den Prismenproben durchgeführt. Mit der zweiten

Probefähfte aus dem Biegezugversuch wurde nach 28 Tagen ein weiterer Druckversuch durchgeführt.

**Tabelle 24: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 4**

| Ausgangsstoff | Bezeichnung             | Masse [kg]<br>bezogen auf 1 m <sup>3</sup> |
|---------------|-------------------------|--------------------------------------------|
|               | Mischung                | VV_4                                       |
|               | W/Z-Wert                | 0,27                                       |
| Wasser        | Wasser                  | 177,00                                     |
| Zement        | CEM I 42,5 R            | 655,57                                     |
| Zuschlag      | Sand ME 0,1 – 0,7       | 848,00                                     |
| Zusatzstoff 1 | Microsilika Elkem 971 U | 150,78                                     |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl 10000         | 327,18                                     |
| Fließmittel   | Sika FM 209             | 26,22                                      |
| Faser 1       | Stahl 12 mm             | 200                                        |
| Faser 2       | Stahl 6 mm              | 100                                        |
|               | Summe                   | 2485,35                                    |

**Tabelle 25: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 4**

| Bezeichnung | Anmerkung                         | Ausbreitmaß [cm] | Frischbeton-<br>rohndichte [kg/m <sup>3</sup> ] | Luftgehalt [%] | Misch-<br>temperatur [°C] |
|-------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------------------------------|----------------|---------------------------|
| VV_4.1      | Stahlfaser 6/12 mm<br>Ohne Vakuum | 18,5             | 2543,0                                          | 4,2            | 36                        |
| VV_4.2      | Stahlfaser 6/12 mm<br>Mit Vakuum  | 21               | 2650,5                                          | 0,5            | 36                        |

Die in der Tabelle 25 enthaltenen Frischbetoneigenschaften zeigen auf, dass mit einem Stahlfasergehalt von 3,8 Vol.% eine schlechte Verarbeitbarkeit erzielt wird. Während die Mischung ohne Vakuum ein schlechtes Ausbreitmaß mit 18,5 cm aufweist, wurde mit der vakuumgemischten Mischung noch ein Ausbreitmaß von 21 cm erzielt. Aufgrund des geringen Luftporengehalt von 0,5 %, der durch den Entzug der Luft beim Mischprozess zustande kommt, weist die Mischung VV\_4.2 eine höhere Frischbetonrohndichte von 2650,5 kg/m<sup>3</sup> auf als die Mischung VV\_4.1 mit 2543,0 kg/m<sup>3</sup>. Die Mischtemperatur am Ende des Mischvorgangs war bei beiden Mischungen mit 36 °C gleich.

**Tabelle 26: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 4**

| Vorversuche<br>4 | Anmerkung                | Lagerung        | Biegezug<br>fct [N/mm <sup>2</sup> ] | Druck f <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] |        |
|------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------|
| Bezeichnung      |                          |                 | 7d                                   | 7d                                        | 28d    |
| VV_4.1.1         | SF 6/12mm<br>Ohne Vakuum | Raumluft        | 13,66                                | 156,36                                    | 190,68 |
| VV_4.1.2         |                          | Heißwasser 90°C | 23,11                                | 222,56                                    | 234,73 |
| VV_4.2.1         | SF 6/12mm<br>Mit Vakuum  | Raumluft        | 16,32                                | 175,43                                    | 203,89 |
| VV_4.2.2         |                          | Heißwasser 90°C | 25,05                                | 244,14                                    | 251,39 |

Betrachtet man die Biegezugfestigkeiten dieses Versuchs (Tabelle 26), so kann man nun bei den an der Raumluft gelagerten Proben den Einfluss der Stahlfasern erkennen. Lagen die Biegezugfestigkeitswerte bei den Mischungen aus dem Vorversuch 3 mit 1,27 Vol.% Stahlfasern noch unter 10 N/mm<sup>2</sup>, so weisen die Proben mit 3,8 Vol.% Stahlfasergehalt deutlich bessere Ergebnisse auf. Die Mischung VV\_4.1.1 wies eine Biegezugfestigkeit von 13,66 N/mm<sup>2</sup> auf und die vakuumgemischte Mischung VV\_4.2.1 konnte sogar 16,32 N/mm<sup>2</sup> erzielen. Bei den Proben, die im Heißwasser gelagert wurden, zeigt sich, dass sich nach 7 Tagen immer ein Wert von 23 – 25 N/mm<sup>2</sup> einstellt, egal ob mit oder ohne Fasern.

Durch den hohen Stahlfasergehalt konnte auch die Druckfestigkeit wesentlich verbessert werden, denn die Druckfestigkeiten des Vorversuchs 4 lagen alle höher als die aus dem Vorversuch 3. Durch die Heißwasserlagerung konnte bei der Mischung 4.1 die Druckfestigkeit nach 7 Tagen von 156,36 N/mm<sup>2</sup> auf 222,56 N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen von 190,68 N/mm<sup>2</sup> auf 234,73 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Durch das Vakuummischen erhöhte sich die Druckfestigkeit nach 7 Tagen der Raumluft gelagerten Proben von 156,36 N/mm<sup>2</sup> auf 175,43 N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen von 190,68 N/mm<sup>2</sup> auf 203,89 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Proben im Heißwasser konnte das Vakuummischen eine Erhöhung der Druckfestigkeit nach 7 Tagen von 23,11 auf 25,05 N/mm<sup>2</sup> bewirken. Durch das Vakuummischen und einen Stahlfasergehalt von 3,8 Vol.% konnte ein Druckfestigkeitswert nach 7 Tagen von 244,14 N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen sogar ein Wert von 251,39 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden.

## 5.6 Vorversuch 5: Änderung des Sandes und Microsilikas

In diesem Versuch wurde vier unterschiedliche Mischungen hergestellt, wobei zwei verschiedene Sande und zwei verschiedenen Microsilika verglichen wurden. Diese Untersuchung sollte die Auswirkungen der verwendeten Sande und Microsilika auf die Frischbetoneigenschaften, aber auch die Biegezug- und Druckfestigkeiten aufzeigen. Dabei wurden vier gleiche Mischrezepturen hergestellt. Zwei Mischungen mit Microsilika Elkem 940-U, jedoch einmal mit Feichtinger Quarzsand mit Korngröße 0,1 – 0,4 und einmal mit Feinputzsand mit Korngröße 0,0 – 0,5. Die beiden anderen Mischungen wurden mit Microsilika Elkem 971-U durchgeführt, wobei wieder einmal der Feichtinger Quarzsand und einmal der Feinputzsand verwendet wurde.

Der W/Z-Wert wurde bei diesem Versuch auf 0,26 herabgesetzt. Für jede Mischung wurden wieder zwei Schalungssets mit je drei Probekörpern (40 x 40 x 160 mm) hergestellt, wobei ein Schalungsset im Wasserbecken mit 20 °C gelagert wurde und das andere Set zwei Tage nach dem Ausschalen über 72 Stunden in ein Heißwasserbecken mit 90 °C aufbewahrt wurde. Am 7. Tag wurden ein Biegezug- und ein Druckversuch mit den Prismenproben durchgeführt. Mit der zweiten Probehälfte aus dem Biegezugversuch wurde nach 28 Tagen ein weiterer Druckversuch durchgeführt.

**Tabelle 27: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 5**

| Ausgangsstoff<br>f | Bezeichnung                   | Masse [kg]<br>bezogen auf 1 m³ |         |         |         |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|
|                    |                               | VV 5.1                         | VV 5.2  | VV 5.3  | VV 5.4  |
|                    | Mischung                      |                                |         |         |         |
|                    | W/Z-Wert                      | 0,26                           | 0,26    | 0,26    | 0,26    |
| Wasser             | Wasser                        | 174,77                         | 174,77  | 174,77  | 174,77  |
| Zement             | CEM I 42,5 N                  | 672,20                         | 672,20  | 672,20  | 672,20  |
| Zuschlag           | Feichtinger Sand ME 0,1 – 0,4 | 927,5                          | -       | 927,5   | -       |
| Zuschlag           | Feinputz Sand ME 0,1 – 0,5    | -                              | 927,5   | -       | 927,5   |
| Zusatzstoff 1      | Microsilika Elkem 940 U       | 154,61                         | 154,61  | -       | -       |
| Zusatzstoff 1      | Microsilika Elkem 971 U       | -                              | -       | 154,61  | 154,61  |
| Zusatzstoff 2      | Quarzmehl 10000               | 342,82                         | 342,82  | 342,82  | 342,82  |
| Fließmittel        | Sika FM 209                   | 26,89                          | 26,89   | 26,89   | 26,89   |
|                    | Summe                         | 2298,79                        | 2298,79 | 2298,79 | 2298,79 |

**Tabelle 28: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 5**

| Bezeichnung | Anmerkung                          | Ausbreitmaß<br>[cm] | Frischbeton-<br>rohdichte<br>[kg/m³] | Luftgehalt<br>[%] | Misch-<br>temperatur<br>[°C] |
|-------------|------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------------------|
| VV_5.1      | MS Elkem 940-U<br>Feichtinger Sand | 24                  | 2273,0                               | 6,0               | 36                           |
| VV_5.2      | MS Elkem 940-U<br>Feinputz Sand    | 28                  | 2268,0                               | 5,0               | 35                           |
| VV_5.3      | MS Elkem 971-U<br>Feichtinger Sand | 24                  | 2280,0                               | 4,9               | 36                           |
| VV_5.4      | MS Elkem 971-U<br>Feinputz Sand    | 26                  | 2300,0                               | 5,0               | 39                           |

Beim Vergleich des Ausbreitmaßes zeigt sich, dass sich bei der Verwendung des Feinputz Sandes mit Korngröße 0,0 – 0,5 ein größeres Ausbreitmaß einstellt, obwohl die gleiche Mischrezeptur vorliegt. Bei Verwendung des Feinputz Sandes und dem Microsilika 940-U konnte das Ausbreitmaß um weitere 2 cm auf 28 cm vergrößert werden. Der Luftgehalt und die Frischbetonrohdichte liegen bei allen vier Mischungen in etwa im gleichen Bereich. Die Mischtemperaturen lagen bei allen Mischungen im Mittel bei 37 °C, wobei die niedrigste Temperatur bei der Mischung

VV\_5.2 mit 35 °C lag und die höchste Temperatur bei der Mischung VV\_5.4 mit 39 °C erreicht wurde.

**Tabelle 29: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 5**

| <b>Vorversuche<br/>5</b> | <b>Anmerkung</b>                   | <b>Lagerung</b> | <b>Biegezug<br/>fct [N/mm<sup>2</sup>]</b> | <b>Druck fc [N/mm<sup>2</sup>]</b> |        |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|------------------------------------|--------|
| <b>Bezeichnung</b>       |                                    |                 | 7d                                         | 7d                                 | 28d    |
| VV_5.1.1                 | MS Elkem 940-U<br>Feichtinger Sand | Wasser 20°C     | 13,69                                      | 112,12                             | 170,72 |
| VV_5.1.2                 |                                    | Heißwasser 90°C | 27,36                                      | 189,73                             | 196,83 |
| VV_5.2.1                 | MS Elkem 940-U<br>Feinputz Sand    | Wasser 20°C     | 10,10                                      | 107,36                             | 166,42 |
| VV_5.2.2                 |                                    | Heißwasser 90°C | 25,50                                      | 178,44                             | 200,47 |
| VV_5.3.1                 | MS Elkem 971-U<br>Feichtinger Sand | Wasser 20°C     | 11,02                                      | 110,93                             | 164,89 |
| VV_5.3.2                 |                                    | Heißwasser 90°C | 26,38                                      | 202,42                             | 203,19 |
| VV_5.4.1                 | MS Elkem 971-U<br>Feinputz Sand    | Wasser 20°C     | 9,84                                       | 113,80                             | 168,43 |
| VV_5.4.2                 |                                    | Heißwasser 90°C | 24,75                                      | 203,52                             | 209,69 |

Bei der Betrachtung der Biegezugfestigkeiten des Vorversuches 5 (Tabelle 29) fällt auf, dass sich die Werte für die im Wasserbecken mit 20 °C gelagerten Proben deutlich unterscheiden. Während die Mischungen mit dem Feinputzsand in etwa bei 10 N/mm<sup>2</sup> liegen, befinden sich die Biegezugfestigkeiten der Mischung VV\_5.3 bei 11,03 N/mm<sup>2</sup> und für VV\_5.1 bei 13,69 N/mm<sup>2</sup>. Die Biegezugfestigkeiten der im Heißwasser mit 90 °C gelagerten Proben liegen erwartungsgemäß bei ca. 25 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen. Auch hier liefern die Mischungen mit dem Feinputzsand die niedrigeren Ergebnisse, während die Mischungen mit dem Feichtinger Sand Höchstwerte von 26,38 und 27,36 N/mm<sup>2</sup> erreichen. Bei beiden Lagerungsarten liefern die Mischungen mit Microsilika 971-U die schlechteren Biegezugfestigkeiten und die Mischungen mit Microsilika 940-U die besten Biegezugfestigkeiten. Während die Mischungen VV\_5.1 und VV\_5.3 ein geringes Ausbreitmaß von 24 cm aufweisen und die besseren Biegezugfestigkeiten besitzen, haben die Mischungen VV\_5.2 und VV\_5.4 ein größeres Ausbreitmaß und niedrigere Biegezugfestigkeitswerte.

Ein Vergleich der Druckfestigkeiten nach 7 Tagen zeigt, dass die Werte aller Proben, die im Wasserbecken mit 20 °C gelagert wurden, auf einem Festigkeitsniveau von ca. 111 N/mm<sup>2</sup> liegen. Lediglich die Mischung VV\_5.2 lag mit 107,36 N/mm<sup>2</sup> darunter. Bei den Heißwasser gelagerten Proben zeigt sich, dass die Mischungen mit Microsilika 971-U höhere Druckfestigkeiten erzielen als die Mischungen mit dem anderen Microsilika. Sowohl mit dem Feichtinger Sand als auch mit dem Feinputzsand wurden Festigkeiten von mehr als 202 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

Bei den Druckfestigkeiten nach 28 Tagen zeigt sich ein ähnliches Verhalten bei allen Mischungen. Die Proben mit Lagerung im 20 °C Becken erreichen im Mittel 167,6 N/mm<sup>2</sup> und die Proben im Heißwasserbecken erzielen im Mittel 202,5 N/mm<sup>2</sup>. Betrachtet man nur die beiden Sande, so kann man erkennen, dass bei den Proben mit Lagerung im 20 °C Wasser keine Unterschiede erkennbar sind und bei den Proben mit Heißwasser Lagerung die Mischungen mit dem Feinputzsand die etwas besseren Druckfestigkeiten nach 28 Tagen liefern. Betrachtet man nur die beiden Microsilika, so kann man bei den normal gelagerten Proben kaum Unterschiede erkennen. Die Mischungen mit Microsilika 940-U erreichen im Mittel 168 N/mm<sup>2</sup> und die Mischungen mit Microsilika 971-U erzielten im Mittel 166 N/mm<sup>2</sup>. Bei den im Heißwasser gelagerten Proben erzielen die Mischungen mit Microsilika 971-U die etwas besseren Druckfestigkeiten als die Mischungen mit Microsilika 940-U. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Biegezug- und Druckfestigkeiten mit den unterschiedlichen Sanden und Microsilika nur leicht verändern. Die größeren Ausbreitmaße wurden jedoch mit dem Feinputzsand mit Körnung 0,0 – 0,5 erzielt.

## **5.7 Vorversuch 6: Änderung des W/Z-Werts und des Sand- und Zementgehalts**

Da sich eine bessere Verarbeitbarkeit bei den Mischungen VV\_5.2 und VV\_5.4 aus dem Vorversuch 5 einstellte, wurde mit dem Feinputzsand mit Körnung 0,0 – 0,5 und dem Microsilika Elkem 940-U weitergearbeitet. In diesem Versuch wurde der W/Z-Wert nochmals auf 0,24 gesenkt und mit dem Sandgehalt und dadurch auch mit dem Zementgehalt variiert. Ziel dieses Vorversuches war es, mit der Mischung VV\_5.2 ein Ausbreitmaß von ca. 26 cm zu erreichen und die Biege- und Druckfestigkeitswerte durch die Änderung des Sand- und Zementgehaltes zu erhöhen. Es wurden drei Mischungen mit W/Z-Wert von 0,24 gefertigt, wobei eine Mischung den gleichen Sandgehalt wie bei Vorversuch 5 aufwies, bei einer Mischung wurde der Sandgehalt um 53 kg/m<sup>3</sup> reduziert (Zementgehalt dadurch erhöht) und bei einer Mischung wurde der Sandgehalt um 53 kg/m<sup>3</sup> erhöht (Zementgehalt dadurch reduziert). Für jede Mischung wurden wieder zwei Schalungssets mit je drei Probekörpern (40 x 40 x 160 mm) hergestellt, wobei ein Schalungsset im Wasserbecken mit 20 °C gelagert wurde und das andere Set zwei Tage nach dem Ausschalen über 72 Stunden in ein

Heißwasserbecken mit 90 °C aufbewahrt wurde. Am 7. Tag wurden ein Biegezug- und ein Druckversuch mit den Prismenproben durchgeführt. Mit der zweiten Probehälfte aus dem Biegezugversuch wurde nach 28 Tagen ein weiterer Druckversuch durchgeführt.

**Tabelle 30: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 6**

| Ausgangsstoff | Bezeichnung                | Masse [kg]<br>bezogen auf 1 m³ |         |         |
|---------------|----------------------------|--------------------------------|---------|---------|
|               |                            | VV_6.1                         | VV_6.2  | VV_6.3  |
|               | Mischung                   |                                |         |         |
|               | W/Z-Wert                   | 0,24                           | 0,24    | 0,24    |
| Wasser        | Wasser                     | 164,96                         | 170,37  | 159,55  |
| Zement        | CEM I 42,5 N               | 687,35                         | 709,88  | 664,81  |
| Zuschlag      | Feinputz Sand ME 0,1 – 0,5 | 927,5                          | 774,5   | 980,5   |
| Zusatzstoff 1 | Microsilika Elkem 940 U    | 158,09                         | 163,27  | 152,91  |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl 10000            | 350,55                         | 362,04  | 339,05  |
| Fließmittel   | Sika FM 209                | 27,49                          | 28,40   | 26,59   |
|               | Summe                      | 2315,94                        | 2308,46 | 2323,42 |

**Tabelle 31: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 6**

| Bezeichnung | Anmerkung                      | Ausbreitmaß [cm] | Frischbetonrohddichte [kg/m³] | Luftgehalt [%] | Mischtemperatur [°C] |
|-------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------|----------------------|
| VV_6.1      | CEM 687,35 kg<br>Sand 927,5 kg | 27               | 2331,5                        | 5,5            | 39                   |
| VV_6.2      | CEM 709,88 kg<br>Sand 774,5 kg | 29               | 2326,5                        | 4,9            | 40                   |
| VV_6.3      | CEM 664,81 kg<br>Sand 980,5 kg | 26               | 2311,0                        | 5,5            | 40                   |

Die Frischbetoneigenschaften der Mischungen im Vorversuch 6 verhalten sich bis auf das Ausbreitmaß in etwa gleich. Während die Mischungen VV\_6.1 und VV\_6.3 ein Ausbreitmaß von 27 bzw. 26 cm aufweisen, wurde bei der Mischung VV\_6.2 ein Ausbreitmaß von 29 cm erzielt. Die Frischbetonrohddichte, der Luftporengehalt und die Mischtemperatur lagen bei allen drei Mischungen ca. im selben Bereich. Der Luftporengehalt konnte bei der Mischung VV\_6.2 im Vergleich zu den anderen beiden Mischungen auf 4,9 gesenkt werden.

**Tabelle 32: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 6**

| Vorversuche<br>6 | Anmerkung                      | Lagerung        | Biegezug<br>fct [N/mm²] | Druck f <sub>c</sub> [N/mm²] |        |
|------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|--------|
|                  |                                |                 | 7d                      | 7d                           | 28d    |
| VV_6.1.1         | CEM 687,35 kg<br>Sand 927,5 kg | Wasser 20°C     | 13,82                   | 119,09                       | 178,51 |
| VV_6.1.2         |                                | Heißwasser 90°C | 26,62                   | 201,50                       | 207,94 |
| VV_6.2.1         | CEM 709,88 kg<br>Sand 774,5 kg | Wasser 20°C     | 12,96                   | 114,19                       | 177,41 |
| VV_6.2.2         |                                | Heißwasser 90°C | 28,92                   | 213,32                       | 222,07 |
| VV_6.3.1         | CEM 664,81 kg<br>Sand 980,5 kg | Wasser 20°C     | 13,32                   | 111,72                       | 174,52 |
| VV_6.3.2         |                                | Heißwasser 90°C | 27,37                   | 214,18                       | 211,18 |

Auch die Biegezugfestigkeiten nach 7 Tagen liegen bei allen Mischungen ca. im selben Bereich und schwanken nicht stark. Die Festigkeitswerte liegen bei den Proben aus den 20 °C Wasserbecken im Mittel bei 13 N/mm<sup>2</sup> und bei den Heißwasser gelagerten Proben liegt der Wert ca. bei 27 N/mm<sup>2</sup>. Der höchste Wert der Biegezugfestigkeit lag bei den normal gelagerten Proben bei der Mischung VV\_6.1 bei 13,82 N/mm<sup>2</sup> und bei den Heißwasser gelagerten Proben lag der höchste Biegezugfestigkeitswert fast bei 29 N/mm<sup>2</sup> bei der Mischung VV\_6.2.

Die Druckfestigkeitswerte nach 7 Tagen nahmen bei den normal gelagerten Proben von Mischung VV\_6.1 zu VV\_6.3 ab, obwohl bei VV\_6.2 der meiste Zementgehalt enthalten war. Der höchste Wert wurde bei der Mischung VV\_6.1 mit ca. 119 N/mm<sup>2</sup> erzielt. Die Proben aus dem Heißwasserbecken konnten alle eine Druckfestigkeit von über 200 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen erreichen. Bei den Mischungen VV\_6.2 und VV\_6.3 betrug der Wert sogar über 213 N/mm<sup>2</sup>, wobei bei der Mischung VV\_6.3 sogar der niedrigste Zementgehalt enthalten war. Bei den normal gelagerten Proben im Wasserbecken mit 20 °C lagen die Druckfestigkeitswerte nach 28 Tagen in etwa im gleichen Bereich und zwar im Mittel bei ca. 177 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Heißwasser gelagerten Proben wurde der Wert von 207 N/mm<sup>2</sup> immer überschritten. Der maximale Wert wurde bei der Mischung VV\_6.2 mit 222,07 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Die Mischung VV\_6.3 mit dem niedrigsten Zementgehalt erreichte sogar noch einen Wert von 211,18 N/mm<sup>2</sup>. Betrachtet man den Festigkeitsverlauf, so sieht man, dass bei den Mischungen VV\_6.1 und VV\_6.2 die Festigkeit nach 28 Tagen gegenüber der 7 Tagesfestigkeit noch zunimmt, während sie bei der Mischung VV\_6.3 abfällt.

## 5.8 Vorversuch 7: Vergleich Zement CEM 42,5 N und CEM 42,5 R

Neben den Vorversuchen 1 bis 6 fand ein Vergleich der Zemente CEM 42,5 N und CEM 42,5 R statt. Es wurden sowohl die Frischbetoneigenschaften als auch die Biegezug- und Druckfestigkeiten miteinander verglichen. Laut Angaben des Herstellers soll der CEM I 42,5 N eine langsamere Früherhärtung als der CEM I 42,5 R aufweisen, jedoch sollen beide Zemente die gleiche Festigkeit nach 28 Tagen besitzen. Für diesen Vergleich wurden vier Mischungen, jeweils zwei Mischungen (Zement N und R) mit zwei unterschiedlichen W/Z-Werten (0,24 und 0,26), hergestellt. Als Mischrezeptur kam die Mischung aus VV\_6.2 zum Einsatz. Aus jeder Mischung wurden drei Schalungssets mit drei Probekörpern gewonnen, die in einem

Wasserbecken mit 20 °C nachbehandelt wurden. Die Biegezugfestigkeit wurde am 3., 7. und 28. Tag und die Druckfestigkeit wurde am 3., 7., 21., 28., 35. und 56. Tag festgestellt.

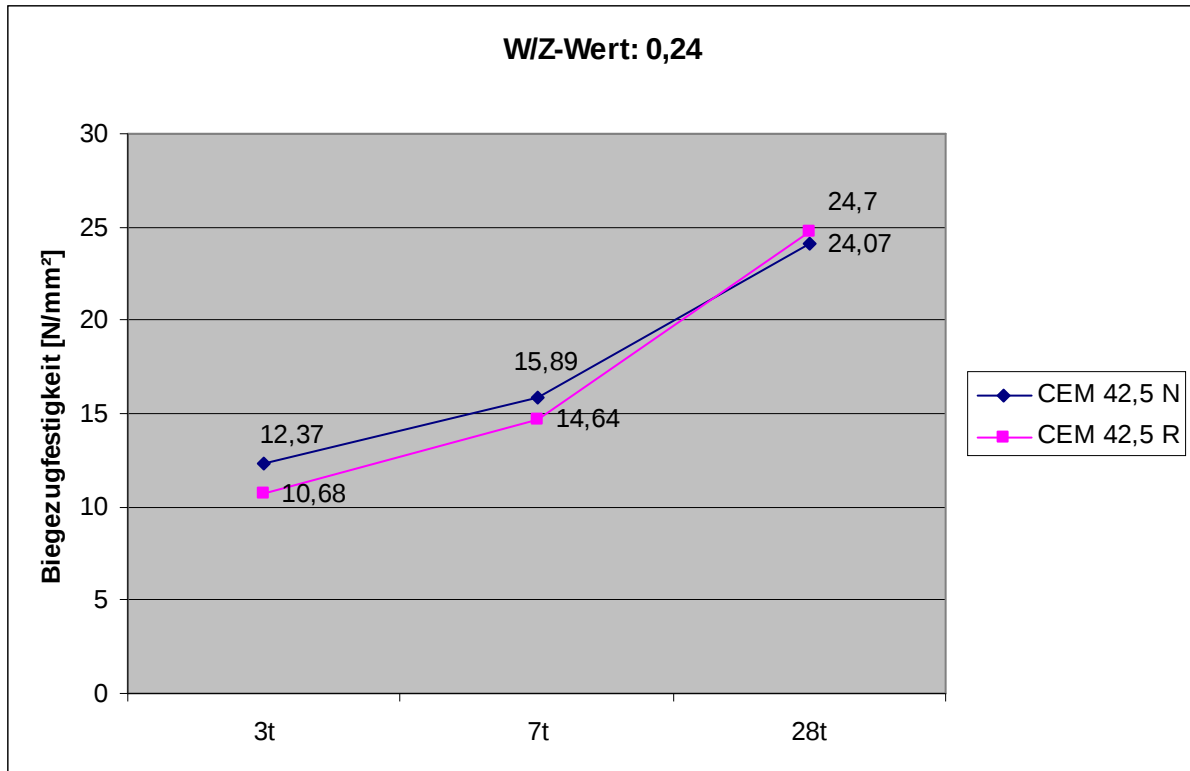
**Tabelle 33: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten des Vorversuchs 7**

| <b>Mischung</b>                            |      | <b>VV_7.1</b> | <b>VV_7.2</b> | <b>VV_7.3</b> | <b>VV_7.4</b> |
|--------------------------------------------|------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Zement                                     |      | CEM 42,5 N    | CEM 42,5 R    | CEM 42,5 N    | CEM 42,5 R    |
| W/Z-Wert                                   |      | 0,24          | 0,24          | 0,26          | 0,26          |
| Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ] |      | 2323,5        | 2313,0        | 2308,5        | 2316,0        |
| Luftgehalt [%]                             |      | 4,5           | 4,7           | 4,4           | 4,3           |
| Ausbreitmaß [cm]                           |      | 21,5          | 16            | 22,5          | 19            |
| Mischtemperatur [°C]                       |      | 42            | 41            | 41            | 42            |
| Biegezugfestigkeit<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 3 t  | 12,37         | 10,68         | 9,16          | 10,62         |
|                                            | 7 t  | 15,89         | 14,64         | 12,91         | 14,72         |
|                                            | 28 t | 24,07         | 24,70         | 21,76         | 23,37         |
| Druckfestigkeit<br>[N/mm <sup>2</sup> ]    | 3 t  | 99,31         | 101,98        | 64,54         | 92,42         |
|                                            | 7 t  | 106,60        | 114,44        | 109,87        | 110,24        |
|                                            | 21 t | 150,84        | 150,85        | 137,53        | 143,35        |
|                                            | 28 t | 153,79        | 152,45        | 151,43        | 150,10        |
|                                            | 35 t | 168,65        | 155,92        | 156,80        | 156,11        |
|                                            | 56 t | 174,29        | 177,13        | 160,57        | 163,95        |

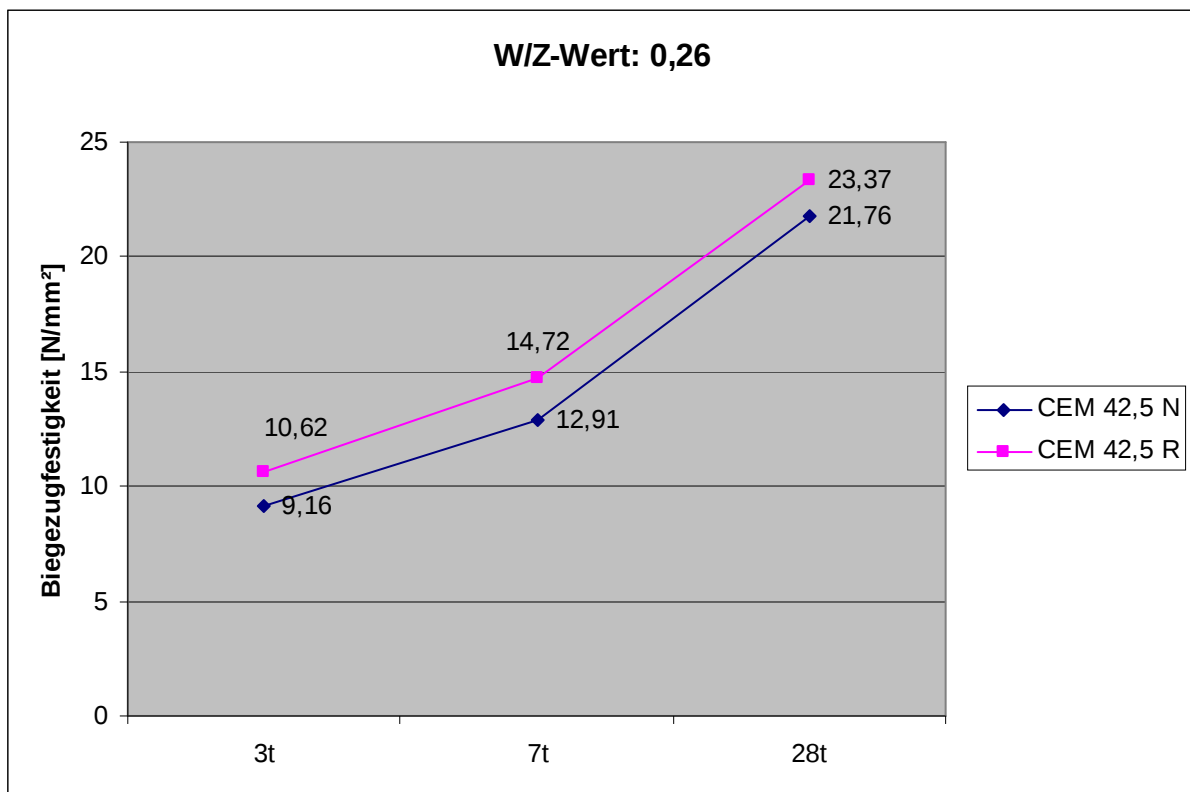
Die Tabelle 33 zeigt die gewonnenen Frischbetonergebnisse und die Biegezug- und Druckfestigkeiten. Bei den Frischbetoneigenschaften kann man erkennen, dass sich die Frischbetonrohddichte, der Luftgehalt und die Mischtemperatur kaum unterscheiden. Beim Ausbreitmaß fällt einerseits auf, dass die guten Ergebnisse aus dem Vorversuch 6 nicht wieder erzielt werden konnten. Im Vorversuch 6 wurden noch Ausbreitmaße in der Größenordnung von 26 – 29 cm erzielt, hier wurden Ausbreitmaße von 16 – 22,5 cm erzielt. Andererseits kann man der Tabelle 36 entnehmen, dass mit dem CEM 42,5 N größere Ausbreitmaße gewonnen werden konnten als mit dem CEM 42,5 R.

Betrachtet man die Biegezugfestigkeitsverläufe (Abbildung 43 und 44), so kann man erkennen, dass fast alle vier Mischungen eine Biegezugfestigkeit von 10 N/mm<sup>2</sup> nach 3 Tagen und über 13 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen aufweisen. Vergleicht man die beiden Mischungen mit W/Z-Wert 0,24 VV\_7.1 und VV\_7.2, so zeigt sich hier, dass der CEM N in den ersten Tagen höhere Werte liefert als der CEM R. Erst am 28. Tag liegt die Festigkeit beim CEM R höher als die des CEM N. Nach 28 Tagen liegen die Biegezugfestigkeiten von VV\_7.1 und VV\_7.2 annähernd gleich bei ca. 24 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Mischungen VV\_7.3 und VV\_7.4 mit W/Z-Wert 0,26 liegen die Werte vom CEM R immer über dem CEM N. AM 28. Tag besitzt der CEM R eine

Biegezugfestigkeit von ca. 23 N/mm<sup>2</sup>, während der CEM N nur 21,7 N/mm<sup>2</sup> aufweisen kann.

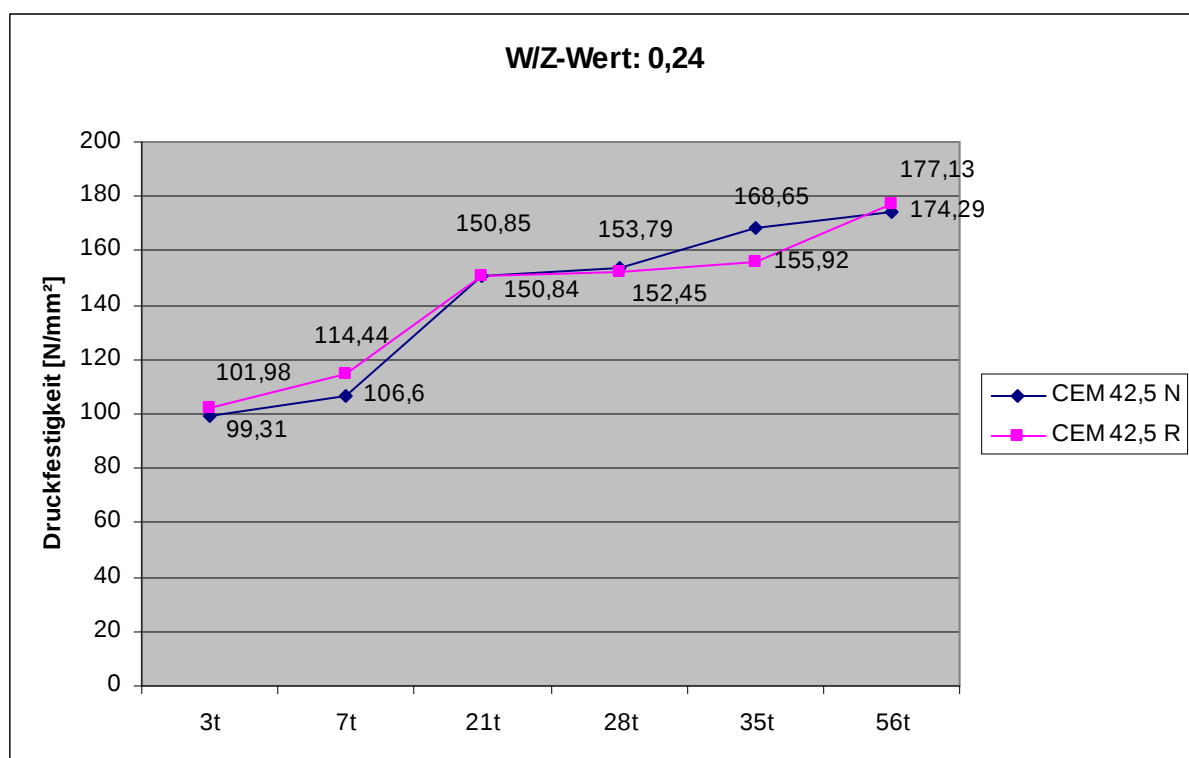


**Abbildung 43: Biegezugfestigkeitsverlauf für VV\_7.1 und VV\_7.2**

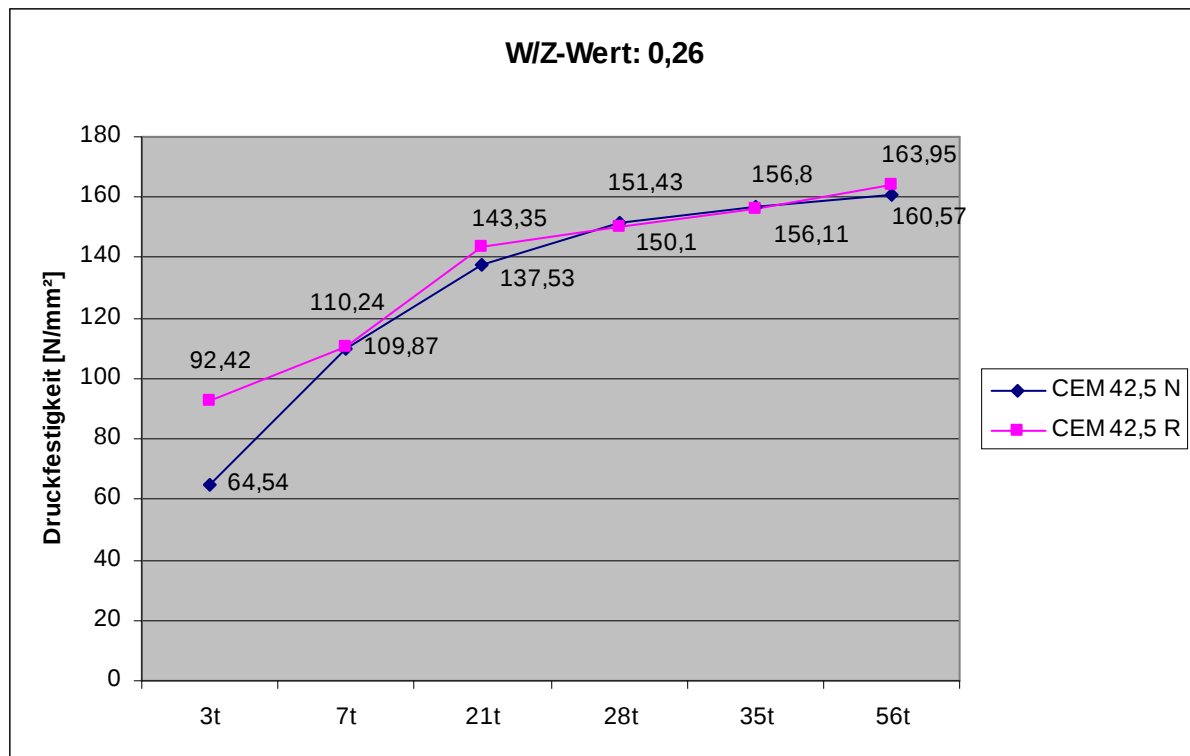


**Abbildung 44: Biegezugfestigkeitsverlauf für VV\_7.3 und VV\_7.4**

Die Druckfestigkeitsverläufe (Abbildung 45 und 46) zeigen dass in den ersten Tagen der CEM R immer höher liegt als der CEM N. Bei den Mischungen VV\_7.1 und VV\_7.2 mit W/Z-Wert von 0,24 werden bereits nach 3 Tagen Druckfestigkeiten von ca. 100 N/mm<sup>2</sup> erreicht, bei den Mischungen VV\_7.3 und VV\_7.4 mit W/Z-Wert 0,26 fällt der Unterschied mit 64 und 92 N/mm<sup>2</sup> recht deutlich aus. Nach 28 Tagen liegen die Festigkeiten ungefähr im selben Bereich. Es fällt aber auf, dass nach 28 Tagen die Druckfestigkeiten der beiden Mischungen mit CEM N leicht höher liegen als die Mischungen mit CEM R. Dies ändert sich aber nach 56 Tagen wieder, sodass der CEM R leicht höhere Druckfestigkeiten als der CEM N erzielt.



**Abbildung 45: Druckfestigkeitsverlauf für VV\_7.1 und VV\_7.2**



**Abbildung 46: Druckfestigkeitsverlauf für VV\_7.3 und VV\_7.4**

## 5.9 Testversuche

Leider konnten die guten Frischbetoneigenschaften als auch die Festigkeitswerte aus dem Vorversuch 6 nach Verwendung eines neuen Zementsackes nicht wieder erzielt werden. Obwohl die gleiche Mischrezeptur verwendet wurde, stellten sich bei den Versuchen Ausbreitmaße nur im Bereich von 12 bis 15 cm ein. Dadurch konnte der Frischbeton am Rütteltisch auch nicht entlüftet werden. Dies hatte Festigkeitswerte nach 28 Tagen von nur durchschnittlich 140 N/mm² bei Lagerung im 20° Wasserbecken zur Folge. Auch nach Kontrolle der einzelnen Ausgangsstoffe und mehreren Testmischungen wurden deutlich schlechtere Ergebnisse als bei Vorversuch 6 erzielt. Die Vermutung liegt nahe, dass die nachfolgenden Zementsäcke nach dem Vorversuch 6 nicht mehr die Qualitätsansprüche aufweisen, wie der Zement, der bei den Vorversuchen verwendet wurde. Eine Verschlechterung der Zementqualität durch die Lagerungsbedingungen im Labor kann ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurden weitere Testmischungen durchgeführt, bei denen die Ausgangsmischung aus dem Vorversuch 6 bezüglich des W/Z-Wertes, Fließmittelanteil aber auch Masseanteile der Ausgangsstoffe

verändert wurde. Ziel dieser Testversuche war es, ein Ausbreitmaß von ca. 26 cm und eine ausreichende Druckfestigkeit von ca. 180 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen zu erreichen. In den folgenden Tabellen 34 und 35 sind einige Mischungen mit den Ausgangsstoffen und Massenanteilen dargestellt.

**Tabelle 34: Ausgangsstoffe für die Versuche T 1 bis T 4**

| Ausgangsstoff | Bezeichnung                | Masse [kg]<br>bezogen auf 1 m <sup>3</sup> |        |        |        |
|---------------|----------------------------|--------------------------------------------|--------|--------|--------|
|               |                            | T 1                                        | T 2.2  | T 3    | T 4.3  |
|               | Mischung                   |                                            |        |        |        |
|               | W/Z-Wert                   | 0,28                                       | 0,24   | 0,26   | 0,26   |
| Wasser        | Wasser                     | 195,19                                     | 180,61 | 185,12 | 186,21 |
| Zement        | CEM I 42,5                 | 697,11                                     | 752,55 | 712,01 | 716,19 |
| Zuschlag      | Feinputz Sand ME 0,1 – 0,5 | 874,50                                     | 821,50 | 874,50 | 874,50 |
| Zusatzstoff 1 | Microsilika Elkem 940 U    | 160,34                                     | 173,09 | 163,76 | 100,27 |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl 10000            | 355,53                                     | 383,80 | 363,13 | 429,72 |
| Fließmittel   | Sika FM 209                | 27,88                                      | 30,10  | 32,04  | 32,23  |

**Tabelle 35: Ausgangsstoffe für die Versuche T 5 bis T 7**

| Ausgangsstoff | Bezeichnung                | Masse [kg]<br>bezogen auf 1 m <sup>3</sup> |        |        |        |
|---------------|----------------------------|--------------------------------------------|--------|--------|--------|
|               |                            | T 5.3                                      | T 6.3  | T 7.3  | T 7.6  |
|               | Mischung                   |                                            |        |        |        |
|               | W/Z-Wert                   | 0,26                                       | 0,26   | 0,25   | 0,26   |
| Wasser        | Wasser                     | 185,74                                     | 190,32 | 185,63 | 190,81 |
| Zement        | CEM I 42,5                 | 714,38                                     | 732,01 | 742,52 | 733,87 |
| Zuschlag      | Feinputz Sand ME 0,1 – 0,5 | 874,50                                     | 874,50 | 874,50 | 874,50 |
| Zusatzstoff 1 | Microsilika Elkem 940 U    | 114,30                                     | 183,00 | 185,63 | 183,47 |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl 10000            | 414,34                                     | 307,45 | 311,86 | 308,22 |
| Fließmittel   | Sika FM 209                | 35,72                                      | 36,60  | 29,70  | 29,35  |

In der Tabelle 36 sind für die Testmischungen T1 bis T7 die Festigkeitswerte für den Biegezug- und Druckversuch, die erzielten Ausbreitmaße, Luftgehalt und die jeweilige Lagerungsbedingung aufgelistet. Im folgenden Absatz wird jede Mischung etwas genauer betrachtet.

**Tabelle 36: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten der Versuchsreihe T 1 bis T 7**

| Bezeichnung | Ausbreit-<br>maß<br>[cm] | Luft-<br>gehalt<br>[%] | Lagerung | Biegezug fct<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |       |       | Druck fc<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |        |        |
|-------------|--------------------------|------------------------|----------|--------------------------------------|-------|-------|----------------------------------|--------|--------|
|             |                          |                        |          | 7t                                   | 14t   | 28t   | 7t                               | 14t    | 28t    |
| T 1.1       | 24                       | 4,3                    | Raumluf  | -                                    | 10,87 | 12,65 | -                                | 132,48 | 148,11 |
| T 1.2       | 22,5                     | 5,1                    | Raumluf  | -                                    | 10,57 | 12,07 | -                                | 142,19 | 152,30 |
| T 1.3       | 20                       | 5,0                    | Raumluf  | -                                    | 9,2   | 10,12 | -                                | 129,21 | 163,51 |
| T 1.4       | 19                       | 5,4                    | Raumluf  | -                                    | 9,60  | 10,85 | -                                | 136,48 | 156,76 |
| T 2.1       | 13                       | 5,8                    | Raumluf  | -                                    | 9,00  | 10,11 | -                                | 134,79 | 174,95 |
| T 2.2       | 13,5                     | 5,5                    | Raumluf  | -                                    | 9,80  | 11,10 | -                                | 134,37 | 165,14 |
| T 2.3       | 18                       | 5,8                    | Raumluf  | -                                    | 9,83  | 11,07 | -                                | 148,05 | 173,43 |
| T 3.1       | 18,5                     | 5,2                    | Raumluf  | 8,38                                 | -     | 10,39 | 128,24                           | -      | 174,97 |
| T 3.2       | 20,5                     | 5,0                    | Raumluf  | 10,00                                | -     | 11,01 | 102,54                           | -      | 143,64 |

|       |      |     |            |       |   |       |        |   |        |
|-------|------|-----|------------|-------|---|-------|--------|---|--------|
| T 3.3 | 21,5 | 5,5 | Raumluft   | 10,29 | - | 10,56 | 110,05 | - | 163,35 |
| T 4.1 | 14,5 | 5,5 | Raumluft   | 11,59 | - | 14,49 | 119,75 | - | 149,18 |
| T 4.2 | 22   | 4,3 | Raumluft   | 11,39 | - | 11,67 | 113,92 | - | 133,31 |
| T 4.3 | 18   | 5,7 | Raumluft   | 10,87 | - | 12,28 | 107,98 | - | 133,03 |
| T 4.4 | 24   | 4,7 | Raumluft   | 11,74 | - | 13,54 | 102,32 | - | 142,08 |
| T 5.1 | 23   | 4,8 | Raumluft   | 8,11  | - | 10,81 | 118,30 | - | 160,70 |
| T 5.2 | 22   | 4,7 | Raumluft   | 10,49 | - | 11,51 | 100,91 | - | 136,62 |
| T 5.3 | 20   | 5,2 | Raumluft   | 11,12 | - | 12,82 | 107,36 | - | 163,37 |
| T 6.1 | 18   | 5,3 | Wasser 20° | 13,05 | - | -     | 116,83 | - | 153,28 |
| T 6.2 | 21   | 4,7 | Wasser 20° | 15,30 | - | -     | 113,93 | - | 153,12 |
| T 6.3 | 24,5 | 4,9 | Wasser 20° | 15,21 | - | -     | 105,41 | - | 155,40 |
| T 7.1 | -    | 4,9 | Wasser 20° | 17,65 | - | -     | 110,11 | - | 158,28 |
| T 7.2 | 26   | 3,6 | Wasser 20° | 13,63 | - | -     | 117,37 | - | 152,49 |
| T 7.3 | 18,5 | 4,9 | Wasser 20° | 14,53 | - | -     | 111,21 | - | 145,43 |
| T 7.4 | 22   | 4,0 | Wasser 20° | 15,00 | - | -     | 133,14 | - | 165,10 |
| T 7.5 | 19,5 | 5,6 | Wasser 20° | 15,81 | - | -     | 119,57 | - | 156,33 |
| T 7.6 | 22,5 | 4,2 | Wasser 20° | 16,25 | - | -     | 129,97 | - | 165,81 |

Im Testversuch T1 wurden zwei Sande und zwei Microsilika miteinander verglichen. Es wurden 4 Mischungen mit einem W/Z-Wert von 0,28 hergestellt, wobei bei der Mischung T 1.1 der Feinputzsand ME 0,1-0,5 und Microsilika 940 U, bei der Mischung T 1.2 der Feichtinger Sand ME 0,1-0,4 und Microsilika 940 U, bei der Mischung T 1.3 wieder der Feinputzsand und Microsilika 971 U und bei Mischung T 1.4 der Feichtinger Sand und Mikrosilika 971 U zum Einsatz kamen. Wie auch schon im Vorversuch 5 zeigte sich für die Frischbetoneigenschaften, dass einerseits das Mikrosilika 940 U und andererseits der Feinputzsand ME 0,1-0,5 zu einer besseren Verarbeitbarkeit führten. Die Mischungen mit einem Feinputzsand führten außerdem zu einem besseren Entlüften, was sich in einem niedrigeren Luftgehalt widerspiegelt. Bei den Festigkeiten zeigte sich, dass die Biegezugwerte von den Mischungen mit Mikrosilika 940 U deutlich über den anderen Mischungen mit Mikrosilika 971 U lagen. Bei den Druckfestigkeiten ist es genau umgekehrt. Hier liegen die Werte von der Mischung T 1.3 und T 1.4 mit Mikrosilika 971 U höher, allerdings fällt der Unterschied nicht so deutlich aus.

Im Testversuch T 2 wollte man die Auswirkungen auf das Ausbreitmaß einerseits durch die Veränderung der Massenanteile für Quarzmehl und Mikrosilika (T 2.1) und andererseits die Änderung des Sandgehaltes von 330 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> auf 310 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> bei einem W/Z-Wert von 0,24 (T 2.2) und einem W/Z-Wert von 0,26 (T 2.3) beobachten. Bei der Mischung T 2.1 wurde der Anteil für Quarzmehl von 383,8 kg/m<sup>3</sup> auf 304,93 kg/m<sup>3</sup> gesenkt und der Anteil für Mikrosilika von 173,09 kg/m<sup>3</sup> auf 228,70 kg/m<sup>3</sup>

erhöht. Diese Mischung mit einem W/Z-Wert von 0,24 brachte nur ein Ausbreitmaß von 13 cm. Die Mischung T 2.2 wieder mit einem Quarzmehlanteil von 383,8 kg/m<sup>3</sup> und Microsilikaanteil von 173,09 kg/m<sup>3</sup> jedoch mit weniger Sand brachte mit einem W/Z-Wert von 0,24 auch nur 13,5 cm Ausbreitmaß. Die Mischung T 2.3 wurde im Unterschied zu T 2.2 mit 0,26 W/Z-Wert durchgeführt und diese brachte immerhin 18 cm Ausbreitmaß. Die Festigkeitswerte für den Biegezugversuch lagen bei den 3 Mischungen alle ca. im selben Bereich. Die Druckfestigkeiten bei den Mischungen T 2.1 und T 2.3 erreichten ca. 174 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen.

Im Testversuch T3 wurden drei vorhandene Zemente bei einem W/Z-Wert mit 0,26 und einem Fließmittelanteil von 4,5 % verglichen. Bei der Mischung T 3.1 kam ein CEM 42,5 R, bei der Mischung T 3.2 ein CEM 42,5 N und bei der Mischung T 3.3 ein CEM 42,5 N aus einem anderen Zementsack zum Einsatz. Wie in der Tabelle 36 ersichtlich ist, wurden Ausbreitmaße von 18,5, 20,5 und 21,5 cm erzielt. Die Biegezugfestigkeiten liegen bei allen 3 Mischungen in etwa im selben Bereich von 10 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen. Bei den Druckfestigkeiten nach 7 Tagen zeigt sich, dass die Mischung T 3.1 mit dem CEM 42,5 R deutlich höher liegt als die beiden anderen Mischungen T 3.2 und T 3.3 mit CEM 42,5 N.

Die Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen liegen bei allen 3 Mischungen ungefähr bei einem Wert von 10,50 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Druckfestigkeiten nach 28 Tagen zeigt sich deutlich, dass die Mischung mit dem CEM 42,5 R eine deutlich höhere Festigkeit besitzt als die beiden anderen Mischungen. Während die Mischung T 3.1 einen Wert von 174,97 N/mm<sup>2</sup> erreichte, wurde mit der Mischung T 3.2 ein Wert von 143,64 N/mm<sup>2</sup> und mit der Mischung T 3.3 ein Wert von 163,35 N/mm<sup>2</sup> erzielt.

Bei der Mischreihe T 4 wurde der Quarzmehlanteil auf 439,71 kg/m<sup>3</sup> erhöht und der Microsilikaanteil auf 102,60 kg/m<sup>3</sup> gesenkt, um das Ausbreitmaß zu vergrößern. Es wurden 4 Mischungen hergestellt, jeweils 2 mit einem CEM 42,5 R und 0,24 bzw. 0,26 W/Z-Wert und jeweils 2 Mischungen mit einem CEM 42,5 N und 0,24 bzw. 0,26 W/Z-Wert. Hier zeigte sich, wie auch schon im Testversuch T 3, dass die Mischungen mit CEM 42,5 N ein größeres Ausbreitmaß lieferten als die Mischungen mit CEM 42,5 R. Jedoch wurden mit den Mischungen T 4.1 und T 4.2 mit CEM 42,5 R deutlich höhere Druckfestigkeiten nach 7 Tagen erzielt. So stellten sich bei den Mischungen T 4.1 und T 4.2 Werte von ca. 120 N/mm<sup>2</sup> und 114 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen ein, bei den Mischungen T 4.3 und T 4.4 nur ca. 108 N/mm<sup>2</sup> und 102 N/mm<sup>2</sup>. Die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen lagen bei T 4.1 bei 150 N/mm<sup>2</sup>, bei T 4.2 und T 4.3

bei 133 N/mm<sup>2</sup> und bei T 4.4 bei 142 N/mm<sup>2</sup>. Die Biegezugfestigkeiten erreichten bei allen 4 Mischungen nach 7 Tagen ca. 11 N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen ca. 13 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Versuchen T 5 wurde einerseits eine Mischung aus [32] nach gemischt (T 5.1) und andererseits der Microsilikagehalt leicht variiert und der Fließmittelanteil auf 5 % erhöht (T 5.2 und T 5.3). Bei den 3 Mischungen kam wieder der CEM 42,5 R bei einem W/Z-Wert von 0,26 zur Anwendung. Die Mischungen erreichten zwar alle ein Ausbreitmaß von ca. 21 cm, jedoch dauerte der Mischprozess bis zu einer flüssigen Mischung 8 Minuten und die Mischtemperatur betrug im Mittel 47 °C. Die Festigkeitswerte für den Biegezugversuch nach 7 Tagen betrugen bei den Mischungen T 5.2 und T 5.3 ca. 11 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen erreichten bei T 5.2 ca. 101 N/mm<sup>2</sup> und bei T 5.3 ca. 107 N/mm<sup>2</sup>. Nach 28 Tagen wurden Biegezugfestigkeiten von ca. 11 bis 13 N/mm<sup>2</sup> erreicht und die Druckfestigkeiten von den Mischungen T 5.1 und T 5.2 betrugen ca. 162 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Versuchen T 6 wurden die Mischungen aus T 5 etwas abgeändert, um auch etwas größere Ausbreitmaße zu erzielen. Bei den Mischungen T 6.1 und T 6.2 konnte dies nicht erreicht werden. Die Mischung T 6.3 wurde mit 307,45 kg/m<sup>3</sup> Quarzmehl und 183,0 kg/m<sup>3</sup> Microsilika, einem W/Z-Wert von 0,26 und einem Fließmittelanteil von 5 % durchgeführt. Hier stellten sich ein brauchbares Ausbreitmaß von 24,5 cm und ein Luftgehalt von unter 5 % ein. Die Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen lag bei ca. 13 N/mm<sup>2</sup> und die Druckfestigkeit nach 7 Tagen erreichte ca. 105 N/mm<sup>2</sup>. Die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen betrugen bei den Mischungen T 6.1 und T 6.2 ca. 153 N/mm<sup>2</sup> und die Mischung T 6.3 erreichte ca. 155 N/mm<sup>2</sup>.

In der Testreihe T 7 wurde für die Mischungen T 7.1 und T 7.2 ein neues Fließmittel (Glenium ACE 430) eingesetzt. Die Mischung T 7.1 entsprach derselben Mischung wie im Vorversuch 6 mit einem W/Z-Wert von 0,24. Hier konnte kein Ausbreitmaß festgestellt werden, da sich der Frischbeton nach Anheben des Ausbreitmaßtrichters nicht mehr bewegte. Die Mischung T 7.2 entsprach der Mischung T 6.3 mit einem W/Z-Wert von 0,26 und Fließmittel Glenium ACE 430. Hier konnte ein Ausbreitmaß von 26 cm erreicht werden. Mit der Mischung T 7.1 wurde eine Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen von 17,65 N/mm<sup>2</sup> erreicht und mit der Mischung T 7.2 stellte sich ein Wert von 13,63 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen ein. Die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen erreichten bei T 7.1 110 N/mm<sup>2</sup> und bei T 7.2 117 N/mm<sup>2</sup>. Nach 28 Tagen betrug die Druckfestigkeit von T 7.1 ca. 158 N/mm<sup>2</sup> und die von T 7.2 ca. 152 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Mischungen T 7.3 bis T 7.6 wurde die Mischung T 6.3 jeweils mit beiden Fließmittel bei einem W/Z-Wert von 0,25 bzw. 0,26 und einem neuen Zementsack verglichen. Es zeigte sich, dass im Hinblick auf das Ausbreitmaß, das neue Fließmittel Glenium ACE 430 ein um ca. 3 cm größeres Ausbreitmaß lieferte. Auch die Festigkeit konnte mit dem neuen Fließmittel gegenüber dem alten Sika FM 209 gesteigert werden. Während die Biegezugfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen bei den Mischungen T 7.3 und T 7.5 mit Sika FM 209 14,53 und 15,81 N/mm<sup>2</sup> betrug, konnte bei den Mischungen T 7.4 und T 7.6 mit Glenium ACE 430 die Werte auf 15 und 16,25 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Es konnten ebenfalls die Druckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen erhöht werden. So erreichten die Mischungen T 7.3 und T 7.5 mit Sika FM 209 ca. 111 und 119 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen bzw. 145 und 156 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen, die Mischungen T 7.4 und T 7.6 mit Glenium ACE 430 konnten Druckfestigkeitswerte von 133 und 129 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen bzw. 165 und 165,8 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen erzielen.

## 6. Hauptversuche

### 6.1 Allgemeines

Aus den Ergebnissen und Kenntnissen der Voruntersuchungen wurden die Hauptversuche folgendermaßen durchgeführt:

#### Ausgangsstoffe

Für die Hauptversuche kamen folgende Ausgangsstoffe und Materialien zum Einsatz:

**Tabelle 37: Ausgangsstoffe für die Hauptversuche**

| <b>Ausgangsstoffe</b> | <b>Bezeichnung</b>      |
|-----------------------|-------------------------|
| Zement                | CEM I 42,5 R            |
| Zuschlag              | Quarzsand 0,0 – 0,4     |
| Zusatzstoff 1         | Microsilika Elkem 940 U |
| Zusatzstoff 2         | Quarzmehl 10.000        |
| Fließmittel           | Glenium ACE 430         |
| Wasser                | Wasser                  |

Als Zement kam der CEM I 42,5 R zum Einsatz, da dieser eine höhere Frühfestigkeit als der CEM I 42,5 N aufwies. Aus den Voruntersuchungen zeigte sich, dass zu diesem Zement das Microsilika Elkem 940 U und das Quarzmehl 10.000 am besten geeignet waren. Als Sand wurde der Quarzsand ME 0,0 – 0,4 verwendet, da dieser höhere Feinkornanteil im Bereich 0,0 -0,1 mm aufwies als der Feinputzsand 0,0 – 0,5. Als Fließmittel kam Glenium ACE 430 zum Einsatz, da mit diesem am Ende der Voruntersuchungen eine gute Frischbetonverarbeitbarkeit mit guten Festigkeitswerten erzielt wurde.

**Tabelle 38: Verwendete Fasern für die Hauptversuche**

| <b>Faserart</b>       | <b>Bezeichnung</b> | <b>Länge/Breite/Durchmesser in [mm]</b> |
|-----------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| Glasfaser             | AR-Glas, GF        | 12/-/0,02                               |
| Basaltfaser           | BF                 | 6/ -/0,2 12/-/0,2                       |
| Polyvinylalkoholfaser | PVA                | 6/-/0,013                               |
| Stahlfaser            | SF                 | 6/ -/0,16 12/-/0,16                     |
| Polypropylenfaser     | PP                 | 6/-/0,018                               |
| Carbon-Nanotubes      | CNT                | -                                       |

Für die Hauptversuche kamen die in Tabelle 38 aufgelisteten Fasern zum Einsatz. Dabei wurden Mischungen mit jeweils nur einer Faserart als auch Mischungen mit verschiedenen Fasercocktails durchgeführt.

## Mischprozess

Alle Mischungen der Hauptversuchsreihe wurden mit dem hybriden Mischprozess durchgeführt, der in Kapitel 5.2.4 näher beschrieben wurde. Mit diesem Mischprozess wies der Frischbeton eine sehr gute Verarbeitbarkeit auf und es wurden gute Festigkeitswerte erreicht. Ein weiterer Vorteil dieses Mischprozesses war eine kurze Mischdauer, dadurch konnte der Arbeitsaufwand gering gehalten und die Kapazität gesteigert werden.

**Tabelle 39: Mischreihenfolge der Hauptversuche**

| Mischreihenfolge        | [min] | [U/min] |
|-------------------------|-------|---------|
| 1.) CEM, MS, QM, QS     | 1:30  | 1260    |
| 2.) Wasser + FM         | 0:30  | 1250    |
| 3.) Mischen             | 1:30  | 1250    |
| 4.) Entlüften [60 mbar] | 1:30  | 250     |
| Summe                   | 5:00  |         |

Die Tabelle 39 zeigt die Mischreihenfolge mit den jeweiligen Mischzeiten. Zuerst wurden die Feststoffteile Zement, Quarzmehl, Microsilika und eventuell Fasern in den Mischbehälter gefüllt und anschließend der Quarzsand. Danach wurden alle Feststoffanteile für 90 Sekunden durchgemischt und verteilt. Nach dem ersten Mischabschnitt erfolgten die Wasser- und Fließmittelzugabe. Dabei wurde das gesamte Fließmittel vorher in den Wasserbehälter gegossen. Der Wasserbehälter, in dem das Fließmittel enthalten war, wurde gleichmäßig innerhalb von 30 Sekunden in den Mischbehälter geleert. Danach wurden Wasser, Fließmittel und Feststoffteile für 90 Sekunden gemischt. Im vierten Mischabschnitt wurde entweder mit 60 mbar für 90 Sekunden entlüftet (mit Vakuum mischen), oder für 90 Sekunden nachgemischt (ohne Vakuum mischen). Der gesamte Mischprozess war nach 5 Minuten abgeschlossen.

## Mischrezeptur

Die Mischrezeptur der Ausgangsmischung kann im Anhang eingesehen werden. Alle Mischungen wurden mit einem W/Z-Wert von 0,26 und einem Fließmittelanteil von 5 % durchgeführt bzw. wurde bei einzelnen Mischungen ein W/Z-Wert von 0,27 verwendet. Beinhalten die Mischungen Fasern, so wurde der Stoffraum der Fasern vom Sandgehalt abgezogen.

### **Frischbetonprüfung**

Nach dem gesamten Mischablauf erfolgte die Frischbetonprüfung. Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, wurde die Mischtemperatur abgelesen, die Frischbetonrohddichte, der Luftporengehalt und das Ausbreitmaß bzw. das Setzfließmaß bestimmt. Nach der Frischbetonprüfung wurde der Beton in die Schalungen gefüllt, mit Folie abgedeckt und für 24 Stunden aufbewahrt und danach ausgeschalt, beschriftet und der jeweiligen Nachbehandlungsmethode unterzogen.

### **Festbetonprüfung**

Am 7., 28. und 56. Tag wurden die Festbetonprüfungen durchgeführt, wie sie in Kapitel 4.2 beschrieben wurden. Es wurden die Festbetonrohddichte, die Biegezug-, die Druck- und Spaltzugfestigkeit, der E-Modul und das Schwindmaß bestimmt.

### **Nachbehandlung**

Als Nachbehandlungsmethoden für die Hauptversuche kamen eine Wasserbeckenlagerung bei 20 °C und eine Heißwasserbeckenlagerung bei 90 °C mit anschließender Wasserlagerung bei 20 °C zur Anwendung. Bei der 20 °C Wasserlagerung wurden die Probekörper bis zur Festbetonprüfung im Wasserbecken gelagert. Bei der 90 °C Heißwasserlagerung wurden die Proben nach dem Ausschalen in einem 20 °C Wasserbecken gelagert und am 3. Tag in das Heißwasserbecken für 72 Stunden aufbewahrt. Dabei erhitzt sich das Becken in den ersten 6 Stunden von 20 °C auf 90 °C, hält für 60 Stunden die Wassertemperatur konstant auf 90 °C und kühlt dann wieder auf 20 °C herab. Nach der 72 Stunden Heißwasserlagerung wurden die Probekörper im Wasserbecken mit 20 °C bis zur Festbetonprüfung gelagert.

### **Bezeichnung**

Jede Mischung wurde nummeriert und enthielt eine Kurzbezeichnung. In den folgenden Ergebnistabellen und Diagrammen sind die Kurzbezeichnungen wie folgt zu verstehen: *M 1.1 oV* bedeutet zum Beispiel, dass es sich um die erste Mischung der ersten Mischserie handelt und der Beton ohne Vakuum gemischt wurde. Steht nach der Zahl ein *mV*, also z. B. *M 1.2 mV*, so handelt es sich um die zweite Mischung der ersten Mischserie, die jedoch mit dem Vakuummischprozess hergestellt wurde. Die nachstehende Bezeichnung *W20* oder *W90* weist auf die

Nachbehandlungsmethode nach dem Ausschalen hin. W20 steht dabei für 20 °C Wasserlagerung und W90 steht für die 90 °C Heißwasserlagerung ab den 3. Tag für 72 Stunden und danach Lagerung in einem Wasserbecken mit 20 °C. Befindet sich nach dem Hinweis für die Nachbehandlung noch eine weitere Kurzbezeichnung, so weist diese auf die enthaltene Faser im Beton hin.

Beispiel: M 6.2 oV W20, SF 6mm 2,5 Vol%

Es handelt sich um die zweite Mischung der 6. Mischserie, die ohne Vakuum gemischt wurde, nach dem Ausschalen einer 20 °C Wasserlagerung unterzogen wurde und es befinden sich Stahlfasern mit 6 mm Länge und einem Fasergehalt von 2,5 Vol% im Beton.

### Durchgeführte Mischungen

**Tabelle 40: Überblick über die Hauptversuche**

| Nr. | Mischung | Bezeichnung                                                |
|-----|----------|------------------------------------------------------------|
| 1   | M 0      | Nullmischung                                               |
| 2   | M 1      | Glasfaser 12 mm, 0,5 Vol%                                  |
| 3   | M 2      | Glasfaser 12 mm, 1,0 Vol%                                  |
| 4   | M 3      | Basaltfaser 6 mm, 1,0 Vol%                                 |
| 5   | M 4      | Basaltfaser 12 mm, 1,0 Vol%                                |
| 6   | M 5      | Polyvinylalkoholfaser 6 mm, 0,44 Vol%                      |
| 7   | M 6      | Stahlfaser 6 mm, 2,5 Vol%                                  |
| 8   | M 7      | Stahlfaser 12 mm, 2,5 Vol%                                 |
| 9   | M 8      | Stahlfaser 6/12 mm, 3,5 Vol%                               |
| 10  | M 9      | Carbon-Nanotubes 0,5 g                                     |
| 11  | M 10     | Carbon-Nanotubes 1,0 g                                     |
| 12  | M 11     | Stahlfaser 6 mm, 2,5 Vol% + CNT 1,0 g                      |
| 13  | M 12     | Stahlfaser 12 mm, 2,5 Vol% + CNT 1,0 g                     |
| 14  | M 13     | Stahlfaser 6 mm, 2,5 Vol% + Polypropylenfaser 0,33 Vol%    |
| 15  | M 14     | Stahlfaser 12 mm, 2,5 Vol% + Polypropylenfaser 0,33 Vol%   |
| 16  | M 15     | Stahlfaser 6/12 mm, 3,5 Vol% + Polypropylenfaser 0,33 Vol% |
| 17  | M 16     | Stahlfaser 6 mm, 2,5 Vol%                                  |
| 18  | M 17     | Stahlfaser 6/12 mm, 3,5 Vol%                               |
| 19  | M 18     | Stahlfaser 6/12 mm, 3,5 Vol% + Polypropylenfaser 0,33 Vol% |

Die Tabelle 40 zeigt einen Überblick über die durchgeführten Hauptmischungen. Jede dieser Mischungen wurde im Hinblick auf nicht Vakuum- bzw. mit vakuumgemischt und Nachbehandlung im 20 °C Wasserbecken bzw. im 90 °C Heißwasserbecken verglichen und untersucht.

In den folgenden Abschnitten wird nun näher auf die einzelnen Mischungen eingegangen und ihre Ergebnisse dargestellt und miteinander verglichen.

## 6.2 Mischung M 0: Nullmischung

Die Nullmischung M 0 dient als Ausgangsbasis für alle anderen Mischungen mit Fasern und wurde mit einem W/Z-Wert von 0,26 und 5 % Fließmittelanteil hergestellt. Sie entspricht der Testmischung T 7.6 aus den Vorversuchen. In der Tabelle 41 sind die Frischbetoneigenschaften und Festigkeitswerte der Nullmischung enthalten.

**Tabelle 41: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M0**

| Bezeichnung                   |     | M 0.1 oV W20 | M 0.2 mV W20 | M 0.3 oV W90 | M 0.4 mV W90 |
|-------------------------------|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Temperatur [°C]               |     | 41,0         | 40,0         | 41,0         | 39,0         |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 24,0         | 24,0         | 25,0         | 25,0         |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,1          | 0,8          | 4,0          | 0,8          |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2335,5       | 2407,0       | 2330,0       | 2405,0       |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2340,4       | 2399,3       | 2341,4       | 2398,3       |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 15,86        | 15,18        | 18,01        | 19,09        |
|                               | 28t | 22,14        | 21,94        | 29,44        | 29,67        |
|                               | 56t | 21,49        | 21,12        | 29,07        | 28,01        |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 115,66       | 120,10       | 159,00       | 183,32       |
|                               | 28t | 146,11       | 160,75       | 184,02       | 188,99       |
|                               | 56t | 169,45       | 180,12       | 192,40       | 202,13       |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 21,56        | 24,52        | 22,35        | 28,39        |
|                               | 28t | 27,65        | 29,93        | 31,38        | 38,35        |
|                               | 56t | 30,07        | 30,68        | 36,33        | 40,76        |

In Abbildung 47 sind einige Frischbetoneigenschaften der Ausgangsmischung dargestellt. Man kann erkennen, dass alle vier Mischungen kaum Unterschiede aufweisen. So beträgt die Mischtemperatur nach dem Mischprozess immer ca. 40 °C und das Ausbreitmaß im Durchschnitt 24,5 cm. Die vakuumgemischten Frischbetone wiesen einen Luftporengehalt von 0,8 % auf, während sich bei den nicht vakuumgemischten Frischbetone ein Luftgehalt von 4,0 bzw. 4,1 % einstellte.

Vergleicht man die Frischbetonrohddichte mit der Festbetonrohddichte nach 28 Tagen, so kann man erkennen dass bei der Nullmischung die Werte nur gering abweichen. Die Abbildung 48 zeigt den Vergleich der Frisch- und Festbetondichte der vier Mischungen. Dabei betragen die Unterschiede immer weniger als 12 kg/m³.

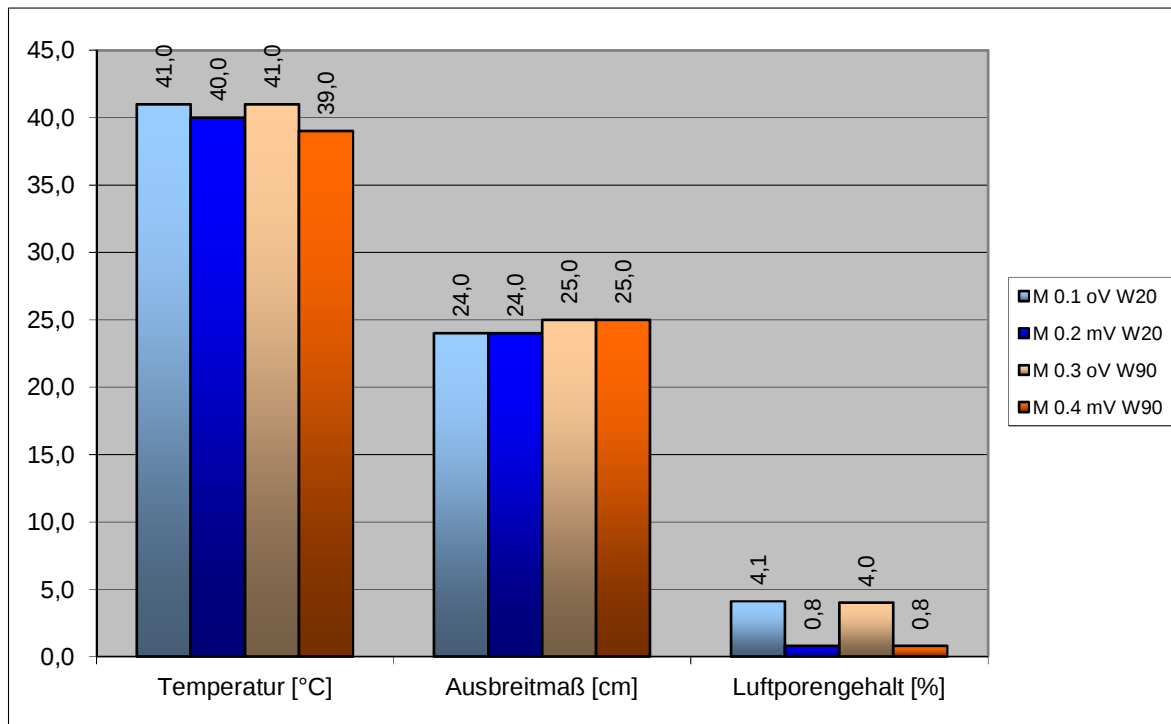


Abbildung 47: Frischbetoneigenschaften Mischung M 0

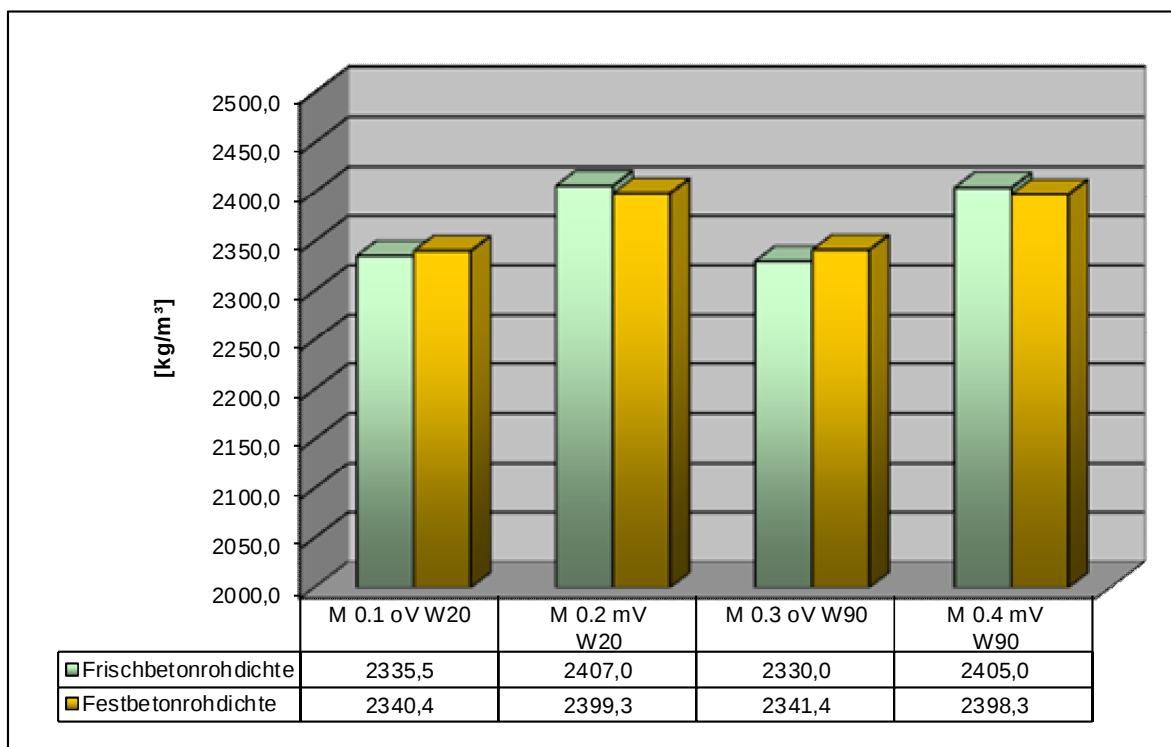
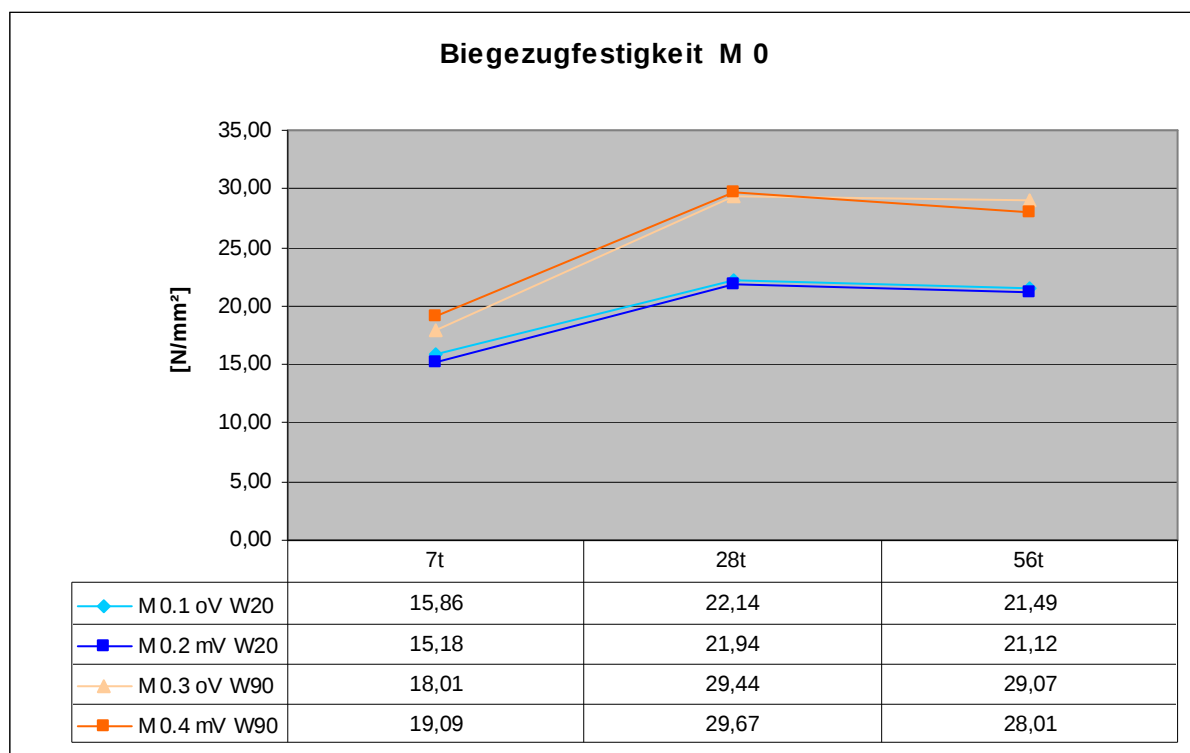


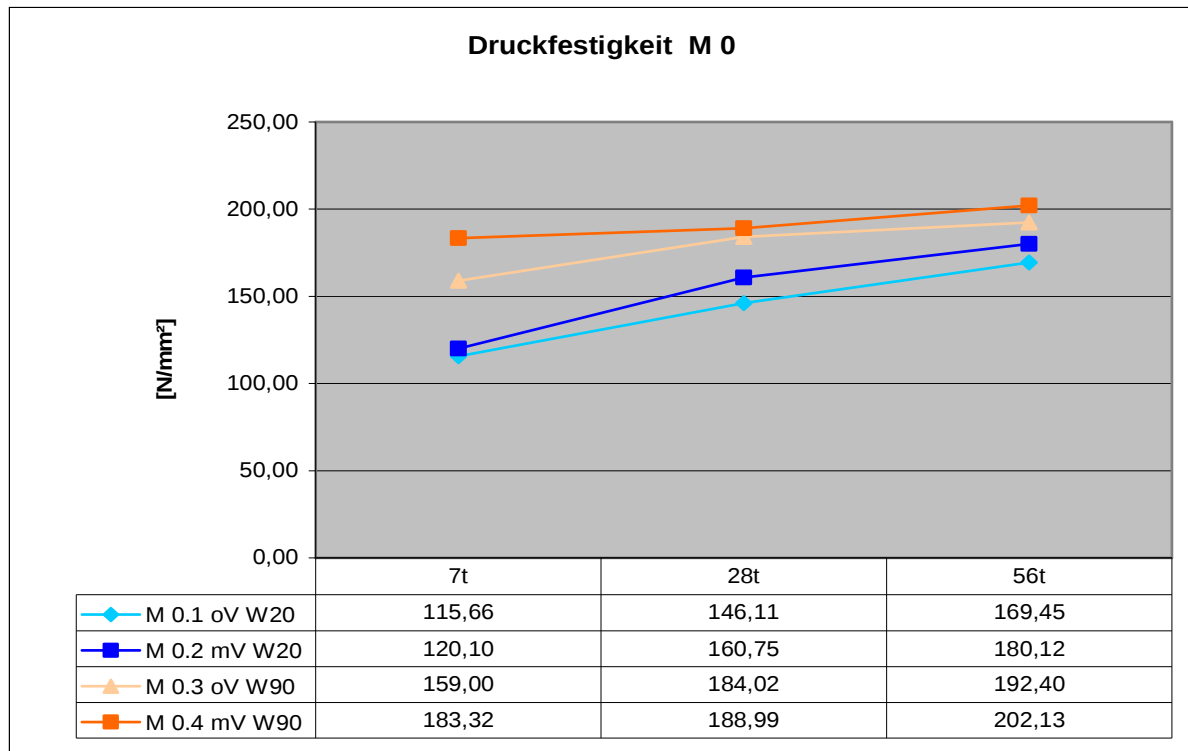
Abbildung 48: Vergleich Frisch- und Festbetonrohddichte Mischung M0

Die Festigkeiten wurden am 7., 28. und 56. Tag bestimmt. Betrachtet man die Biegezugfestigkeitsverlauf der Mischung M 0, so kann man einerseits erkennen, dass

die Biegezugfestigkeit nach 56 Tagen gegenüber der 28 Tagesfestigkeit leicht abnimmt. Andererseits fällt auf, dass bei den beiden Mischungen M 0.1 und M 0.2 die Werte der vakuumgemischten Proben unter den Werten der nicht vakuumgemischten Proben liegen. Im Normalfall ist dies auch nicht der Fall, da durch den Vakuummischprozess die Luft im Frischbeton entzogen wird und dadurch weniger Luftporen im Betongefüge vorhanden sind. Die merkwürdigen Ergebnisse kamen wohl deshalb zustande, da dies die erste Vakuummischung seit langer Zeit war, wurde vergessen die Drehzahl während der Betätigung der Vakuumpumpe von 1250 auf 250 U/min herabzusetzen. Erstaunlicherweise stellte sich doch noch ein Luftporengehalt von 0,8 % ein. Aus früheren Versuchen ist bekannt, dass sich bei UHPC Mischungen ohne Fasern generell ein Luftporengehalt von ca. 0,5 % einstellt. Der Einfluss der Heißwasserlagerung ist bei den Mischungen M 0.3 oV W90 und M 0.4 mV W90 erkennbar. Durch die 90 °C Heißwasserlagerung konnte die Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen um ca. 15 % und nach 28 bzw. 56 Tagen um ca. 30 % gesteigert werden.



**Abbildung 49: Biegezugfestigkeiten Mischung M0**



**Abbildung 50: Druckfestigkeiten Mischung M0**

Die Druckfestigkeiten der Nullmischung sind in Abbildung 50 dargestellt. Durch den Vakuummischprozess konnte die Druckfestigkeit bei den Proben mit 20 °C Wasserlagerung nach 7 Tagen um ca. 4 %, nach 28 Tagen um ca. 10 % und nach 56 Tagen um ca. 6 % gesteigert werden. Bei den Proben mit Heißwasserlagerung konnte die Druckfestigkeit durch das Vakuummischen nach 7 Tagen um ca. 15 %, nach 28 Tagen um ca. 2 % und nach 56 Tagen um ca. 5 % gesteigert werden. Mit Hilfe der Heißwasserlagerung konnte die Druckfestigkeit im Durchschnitt um ca. 17 % gesteigert werden.

Die Spaltzugfestigkeiten verhalten sich ähnlich wie die Druckfestigkeiten und weisen einen steigenden Verlauf auf. Der Einfluss des Vakuummischens auf die Spaltzugfestigkeit zeigt sich hier bei den Mischungen M 0.1 oV W20 und M 0.2 mV W20 nicht so deutlich, denn es konnte die Spaltzugfestigkeit nur um durchschnittlich 4 % erhöht werden. Bei den Proben mit Heißwasserlagerung führte der Vakuummischprozess zu einer Steigerung der Spaltzugfestigkeit von durchschnittlich 16 %.

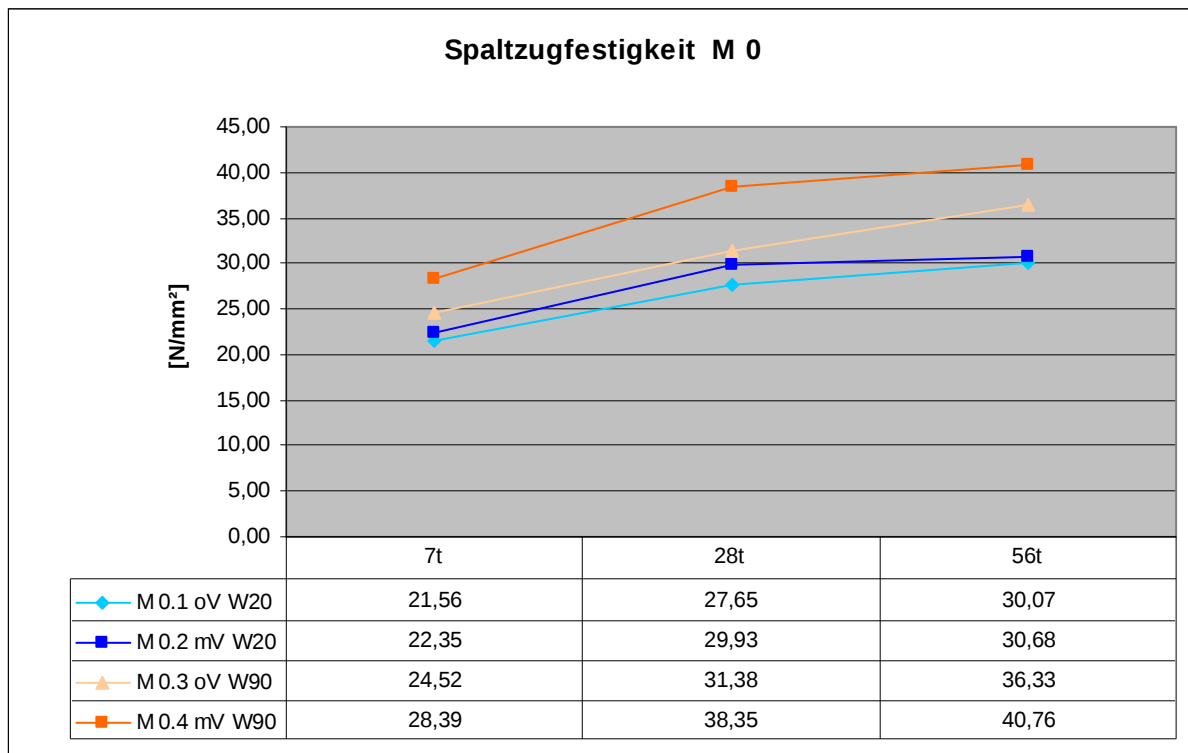


Abbildung 51: Spaltzugfestigkeiten Mischung M0

### 6.3 Mischung M 1: Glasfaser 0,5 Vol%

Aus den Kenntnissen eines früheren Vorversuchs, der nicht im Kapitel 5 beschrieben wurde, entschied man sich für die Verwendung von 12mm Glasfasern mit 0,5 Vol% als erste Fasermischung. In diesem Vorversuch wurden drei Glasfasermischungen mit den Fasergehalten 0,5, 1,0 und 2,0 Vol% hergestellt und nach 7 Tagen die Biegezug- und Druckfestigkeiten festgestellt. Die Mischrezeptur war ähnlich zu der Nullmischung und unterschied sich hauptsächlich in den Masseanteilen der Ausgangsstoffe. Es zeigte sich, dass das Ausbreitmaß mit steigendem Glasfasergehalt von 29, auf 25,5 und 16 cm abnahm. Der Luftporengehalt änderte sich mit steigendem Fasergehalt von 4,9, auf 5,5 und 8,1 %. Die Biegezugfestigkeiten stiegen ebenfalls mit zunehmendem Fasergehalt von 9,20, auf 10,30 und auf 12 N/mm<sup>2</sup>, während die Druckfestigkeit mit zunehmendem Fasergehalt von 120 auf 117 N/mm<sup>2</sup> leicht absank. Da die Mischungen mit 0,5 und 1,0 Vol% die besseren Frischbetoneigenschaften aufwies, entschied man sich für diese beiden Fasergehalte für die Glasfasermischungen. In Abbildung 52 ist die verwendete Glasfaser dargestellt.



Abbildung 52: Glasfaser mit 12mm Länge

Tabelle 42: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M1

| Bezeichnung                   |     | M 1.1 oV W20,<br>GF 0,5 Vol% | M 1.2 mV W20,<br>GF 0,5 Vol% | M 1.3 oV W90,<br>GF 0,5 Vol% | M 1.4 mV W90,<br>GF 0,5 Vol% |
|-------------------------------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 40,0                         | 40,0                         | 42,0                         | 39,0                         |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 24,8                         | 17,0                         | 25,0                         | 23,0                         |
| Luftporengehalt [%]           |     | 3,9                          | 0,8                          | 4,0                          | 0,5                          |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2313,0                       | 2414,0                       | 2325,0                       | 2424,0                       |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2338,2                       | 2376,0                       | 2356,5                       | 2374,4                       |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 13,93                        | 16,21                        | 22,82                        | 23,00                        |
|                               | 28t | 18,63                        | 21,49                        | 27,27                        | 27,19                        |
|                               | 56t | 21,33                        | 23,65                        | 26,94                        | 27,53                        |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 111,85                       | 133,41                       | 192,04                       | 225,76                       |
|                               | 28t | 151,94                       | 179,20                       | 191,98                       | 220,61                       |
|                               | 56t | 156,68                       | 175,54                       | 196,68                       | 217,18                       |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 22,74                        | 27,20                        | 30,34                        | 33,80                        |
|                               | 28t | 28,32                        | 29,56                        | 30,14                        | 35,25                        |
|                               | 56t | 29,34                        | 31,03                        | 34,26                        | 38,07                        |

In der Tabelle 42 sind die Frischbetoneigenschaften sowie die Festigkeiten der Glasfasermischung mit 0,5 Vol% aufgelistet. Ein Ausbreitmaß von 29 cm wie im Vorversuch konnte zwar nicht erreicht werden, allerdings verbesserte sich der Luftporengehalt von 4,9 auf 3,9 bzw. 4,0 %. Die Luftporengehalte der nicht Vakuum

gemischten und Vakuum gemischten Glasfasermischung liegen beide im selben Bereich von 4,0 bzw. 0,7 %. Die Ausbreitmaße der nicht Vakuum gemischten Betonmischungen liegen bei ca. 25 cm, während die Mischung M 1.2 nur 17 cm schaffte, wurde bei der Mischung M 1.4 ein Wert von 23 cm erreicht. Der Unterschied von 6 cm kann einerseits nur durch unsorgfältiges Mischen oder andererseits zu späte Ausbreitmaßbestimmung und leichte Erhärtung des Frischbetons erklärt werden, da normalerweise die Werte für das Ausbreitmaß innerhalb des gleichen Mischablaufes nicht so stark schwanken. Auch die Luftporengehalte und die Frisch- und Festbetonrohddichten der Mischungen M 1.2 und M 1.4 liefern nahezu gleiche Ergebnisse.

Die Tabelle 42 zeigt ebenfalls den Vergleich der Frisch- und Festbetonrohddichten der Glasfasermischung mit 0,5 Vol%. Man kann gut erkennen, dass sowohl die nicht Vakuum gemischten als auch die Vakuum gemischten Proben die nahezu gleichen Werte liefern. Der Unterschied der nicht Vakuum gemischten zu den Vakuum gemischten Proben beträgt fast genau  $100 \text{ kg/m}^3$ . Die Fest- und Frischbetonrohddichten nähern sich bei dieser Mischung mit Glasfasern nicht so genau an, wie dies bei der Nullmischung der Fall war.

Mit dieser Glasfasermischung konnte der Biegezugfestigkeitswert aus dem Vorversuch mit  $9,20 \text{ N/mm}^2$  auf fast  $14 \text{ N/mm}^2$  erhöht werden. Die Biegezugfestigkeiten der Mischung M1 sind in der Abbildung 53 erkennbar. Während die Probekörper M 1.1 oV und M 1.2 mV mit  $20 \text{ °C}$  Wasserlagerung immer um ca. 2-3  $\text{N/mm}^2$  unterschieden werden können, fallen die Werte von M 1.3 oV und M 1.4 mV mit  $90 \text{ °C}$  Heißwasserlagerung fast identisch zusammen.

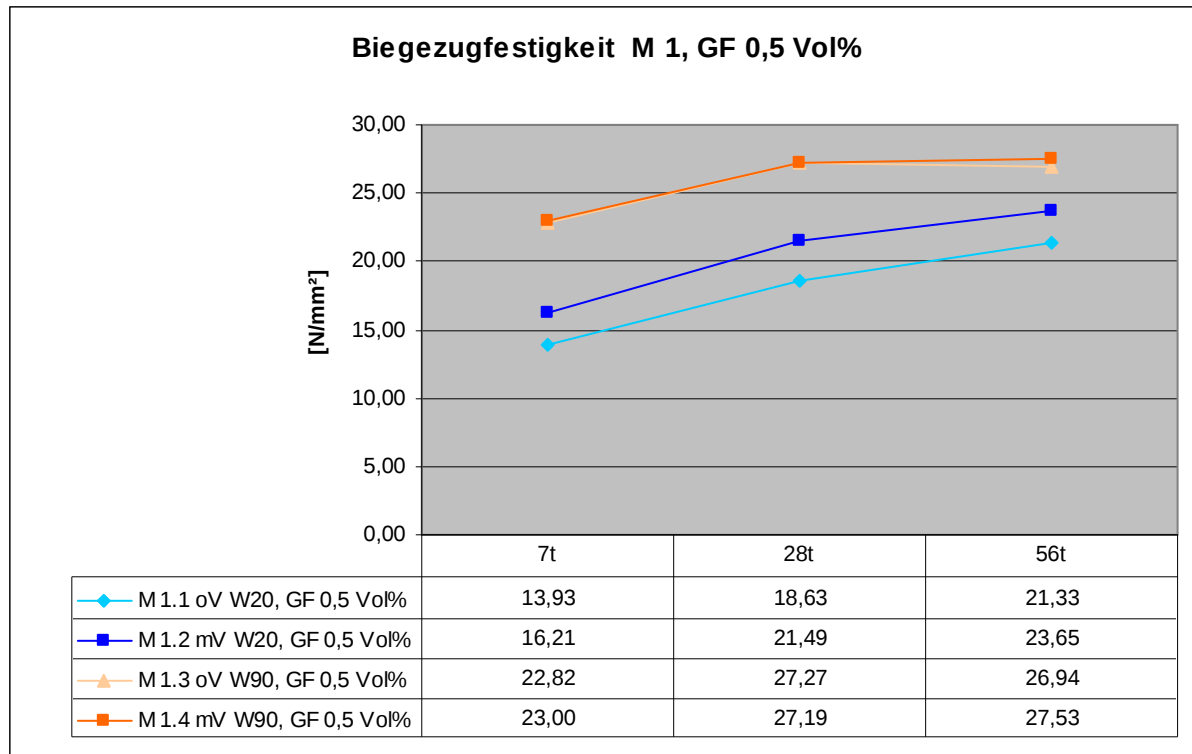


Abbildung 53: Biegezugfestigkeiten Mischung M 1

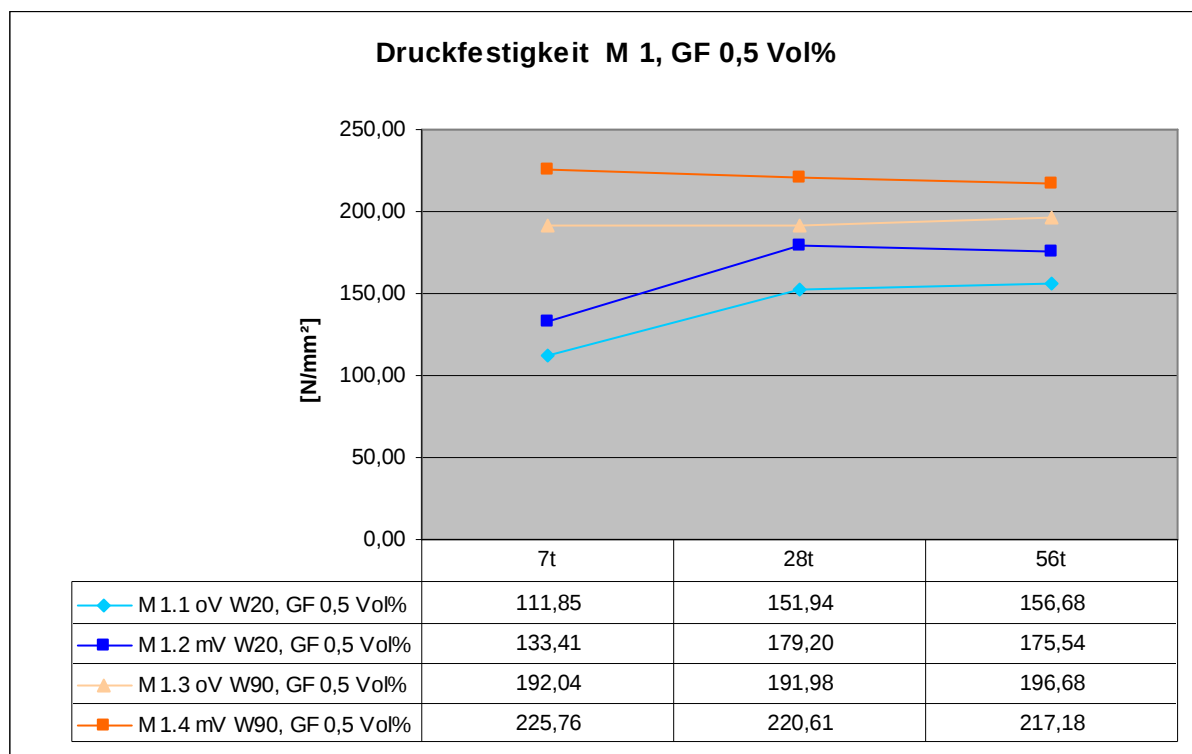
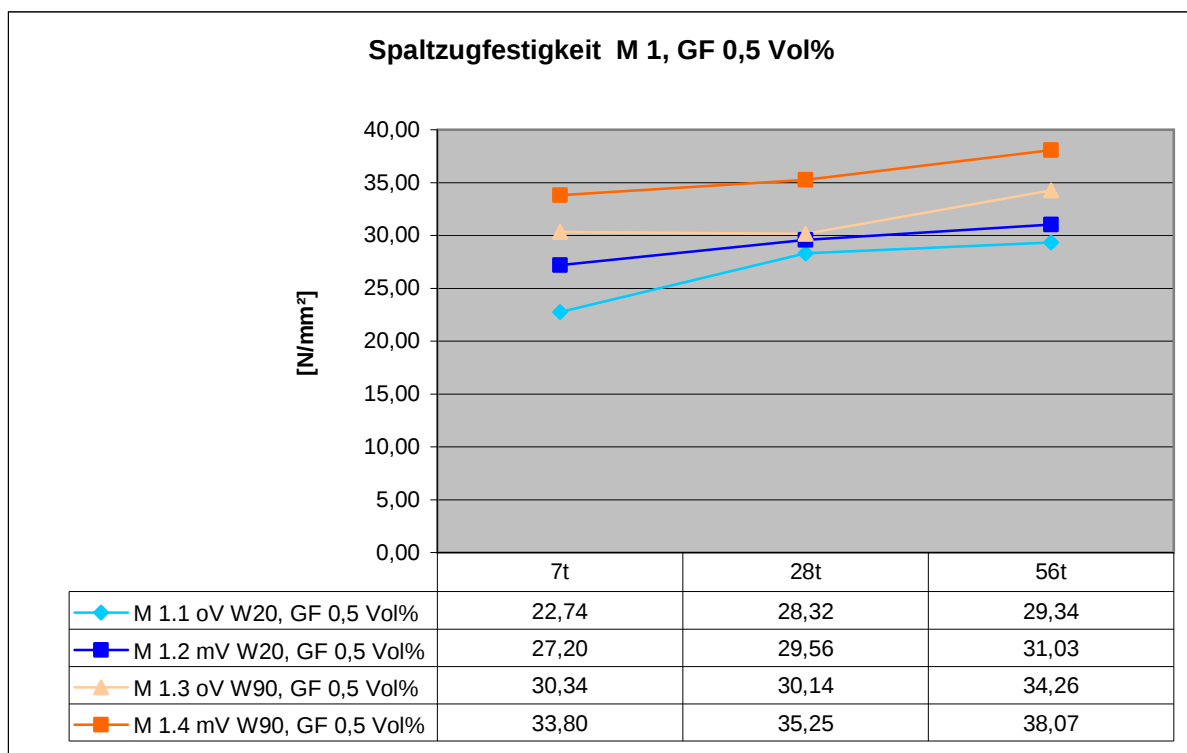


Abbildung 54: Druckfestigkeiten Mischung M 1

Die Mischung M 1 mit 0,5 Vol% Glasfasern konnte zwar nicht den 7-Tagesdruckfestigkeitswert des Vorversuchs mit 120 N/mm<sup>2</sup> überschreiten, jedoch konnte durch die Heißwasserlagerung ein Wert von 225 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Betrachtet man den Druckfestigkeitsverlauf der Mischung M1, wie er in Abbildung 54 dargestellt ist, so kann man erkennen, dass die Proben mit 90 °C Heißwasserlagerung einen fast konstanten Verlauf aufweisen. Weiters ist erkennbar, dass der Unterschied von nicht Vakuum gemischt zu Vakuum gemischt an allen Tagen zwischen 20 und 30 N/mm<sup>2</sup> liegt. Durch den Vakuummischprozess konnte die Druckfestigkeit nach 7 Tagen bei den Proben mit 20 °C Wasserlagerung von ca. 112 auf 133 N/mm<sup>2</sup> und bei den Prüfkörpern mit 90 °C Wasserbeckenlagerung von 192 auf 225 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden.

Die Spaltzugfestigkeiten sind in Abbildung 55 dargestellt und weisen, abgesehen vom Knick der Probe M 1.3 oV am 28. Tag, keine Besonderheiten auf. Durch den Luftentzug am Ende des Mischprozesses konnte die Spaltzugfestigkeit immer zwischen 2 und 5 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Die Heißwasserlagerung brachte eine Steigerung der Festigkeit um ca. 5 bis 10 N/mm<sup>2</sup>.



**Abbildung 55: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 1**

## 6.4 Mischung M 2: Glasfaser 1,0 Vol%

Die zweite Glasfasermischung wurde mit 1,0 Vol% durchgeführt. Während der Vorversuch mit 1,0 Vol% Glasfasergehalt eine Ausbreitmaß von 25,5 cm und einen Luftporengehalt von 5,5 % brachte, lieferte die Mischung M 2, wie bereits die Mischung M 1, schlechtere Ausbreitmaßwerte und bessere Luftporengehalte. Der Luftgehalt konnte bei der Mischung M 2 mit 1,0 Vol% Glasfasern auf 4,3 und 4,8 % bzw. 1,0 und 0,8 % herabgesetzt werden. Das Ausbreitmaß überschritt bei den Mischungen M 2.1 oV und M 2.2 mV nicht den Wert von 20 cm. Während der Unterschied bei den Mischungen M 2.1 oV und M 2.2 mV zwischen nicht und mit Vakuum gemischt 3 cm beträgt, wies der Unterschied bei den Mischungen M 2.3 oV und M 2.4 mV nur 0,5 cm auf. Abgesehen von der ersten Mischung M 2.1 oV stellte sich immer eine Mischtemperatur von 38 °C ein.

**Tabelle 43: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 2**

| Bezeichnung                   |     | M 2.1 oV W20,<br>GF 1,0 Vol% | M 2.2 mV W20,<br>GF 1,0 Vol% | M 2.3 oV W90,<br>GF 1,0 Vol% | M 2.4 mV W90,<br>GF 1,0 Vol% |
|-------------------------------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 42,0                         | 38,0                         | 38,0                         | 38,0                         |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 19,5                         | 16,5                         | 23,0                         | 22,5                         |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,3                          | 1,0                          | 4,8                          | 0,8                          |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2317,0                       | 2427,0                       | 2259,5                       | 2354,0                       |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2300,5                       | 2398,5                       | 2254,3                       | 2342,6                       |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 15,62                        | 17,39                        | 18,76                        | 21,99                        |
|                               | 28t | 22,68                        | 23,48                        | 25,08                        | 25,36                        |
|                               | 56t | 22,16                        | 23,23                        | 24,82                        | 26,05                        |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 120,71                       | 133,46                       | 154,41                       | 181,70                       |
|                               | 28t | 152,14                       | 159,58                       | 166,23                       | 175,70                       |
|                               | 56t | 162,87                       | 162,92                       | 163,95                       | 183,17                       |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 21,94                        | 25,77                        | 27,48                        | 30,09                        |
|                               | 28t | 25,37                        | 28,18                        | 30,69                        | 32,06                        |
|                               | 56t | 25,45                        | 29,81                        | 31,52                        | 32,38                        |

In der Tabelle 43 sieht man einerseits, dass der Unterschied der Rohdichten zwischen mit und ohne Vakuum gemischt wieder ca. 100 kg/m³ beträgt und andererseits, dass, obwohl es sich bei den Mischungen M 2.1 oV und M 2.3 oV bzw. M 2.2 mV und M 2.4 mV um die gleichen Mischprozesse handelt, die Frisch- und die Festbetonrohddichten stark abweichen. Ebenfalls nähern sich die Frisch- und Festbetonrohddichten nach 28 Tagen nicht exakt an, sondern weisen Unterschiede von 5 bis 30 kg/m³ auf.

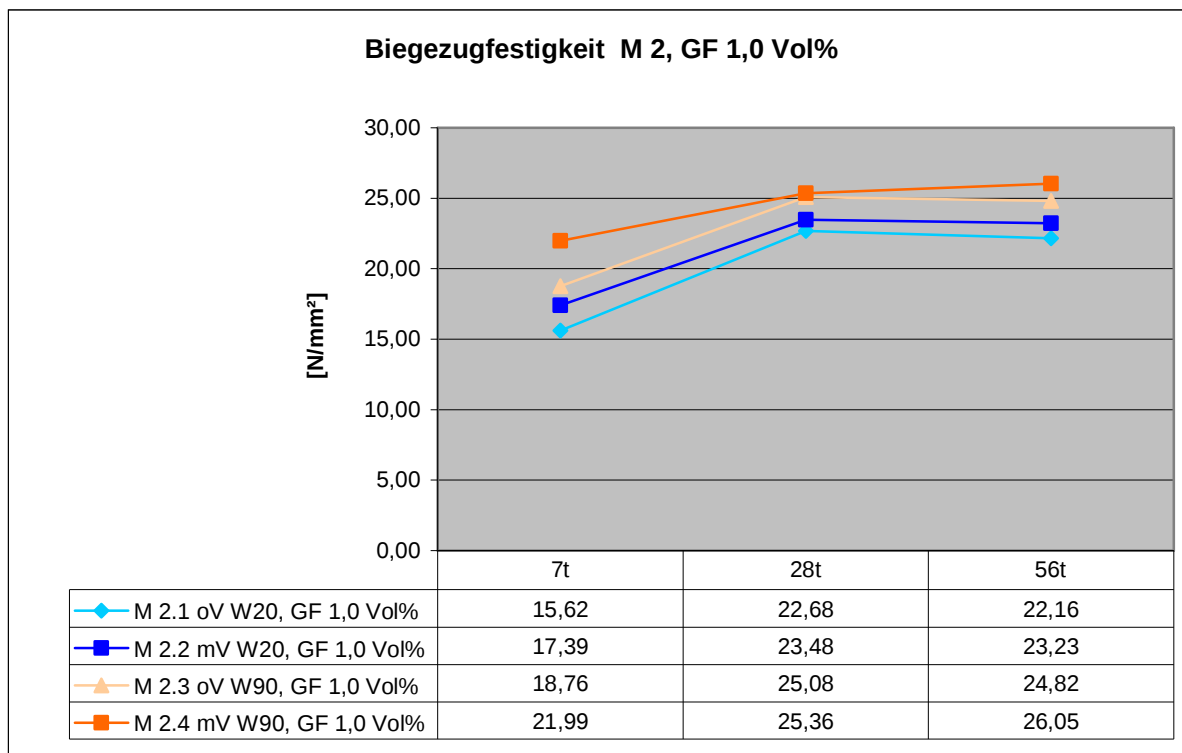


Abbildung 56: Biegezugfestigkeiten Mischung M 2

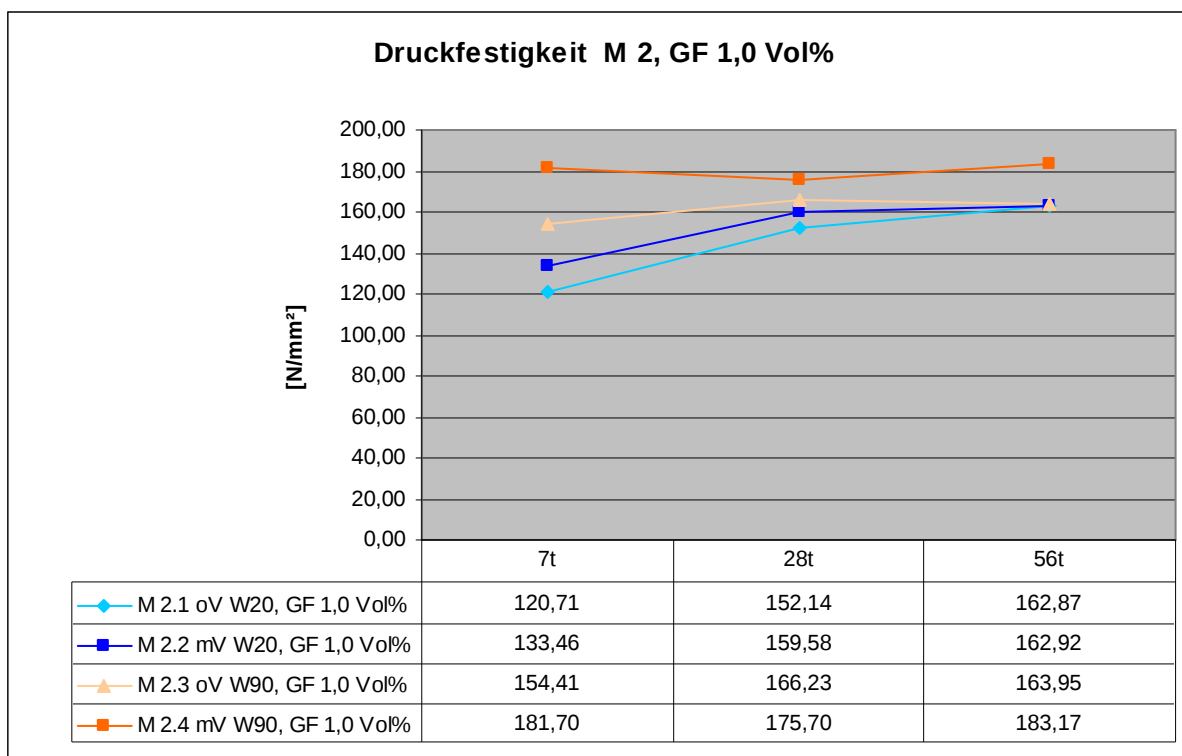
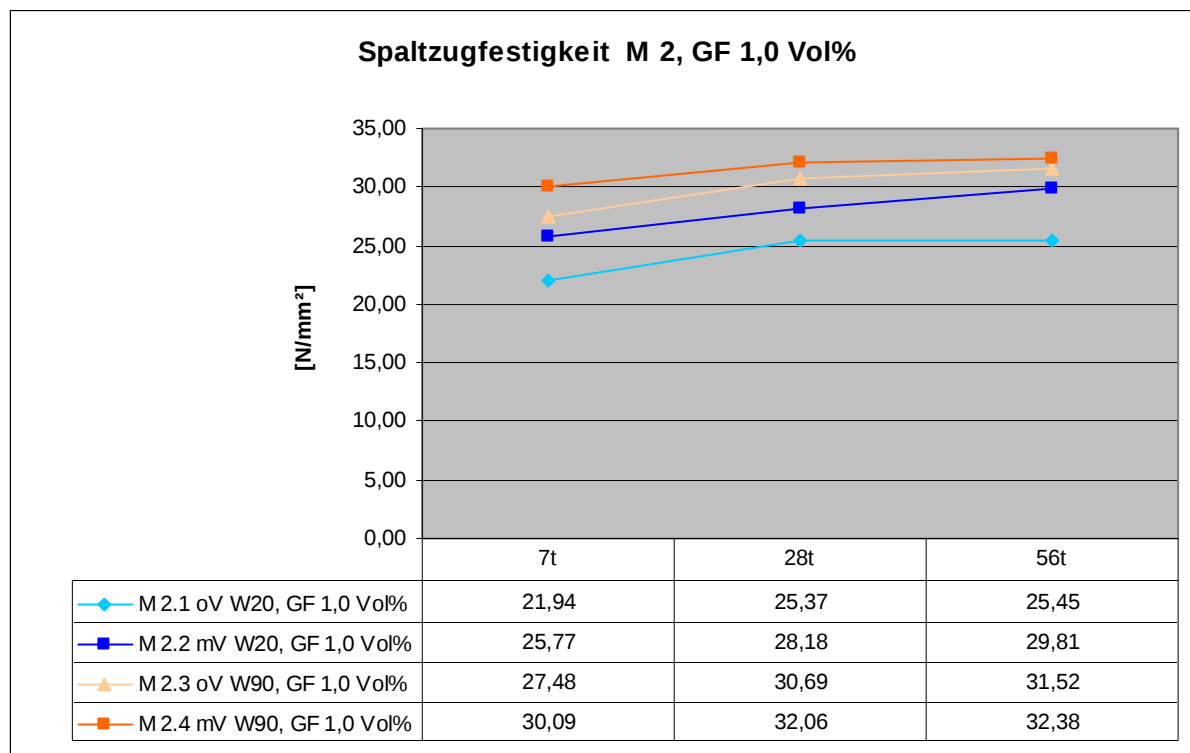


Abbildung 57: Druckfestigkeiten Mischung M 2

Da im Vorversuch mit einer ähnlichen Mischung mit 1,0 Vol% Glasfasern ein Biegezugfestigkeitswert von 10,30 N/mm<sup>2</sup> erreicht wurde, konnte die Mischung M 2 mit gleichem Fasergehalt die Festigkeit auf 15,62 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. In der Abbildung 56 ist zu erkennen, die Biegezugfestigkeiten bei allen vier Mischungen viel enger beisammen liegen als noch bei der Mischung M 1. So beträgt der der größte Unterschied maximal ca. 6 N/mm<sup>2</sup>. Der Einfluss des Vakuummischprozesses fällt bei dieser Mischung nicht mehr so deutlich aus. Lediglich nach 7 Tagen sind Festigkeitsunterschiede größer als 1,7 N/mm<sup>2</sup> zu erkennen. Durch die Nachbehandlung im 90 °C Heißwasserbecken konnte die Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen um ca. 23 % und nach 56 Tagen um ca. 11 % gesteigert werden.

Im Vergleich zum Vorversuch konnte die Druckfestigkeit nach 7 Tagen von 120 N/mm<sup>2</sup> mit der Mischung M 2 wieder erreicht werden. In Abbildung 57 ist der Druckfestigkeitsverlauf der vier Glasfasermischungen mit 1,0 Vol% dargestellt. Der Vakuummischprozess brachte bei den Proben im 20 °C Wasserbecken eine Steigerung der Druckfestigkeit nach 7 Tagen von 120 auf 133 N/mm<sup>2</sup>, während sich die Druckfestigkeit nach 56 Tagen bei beiden Mischungen anschließend bei 163 N/mm<sup>2</sup> einpendelte. Durch die Heißwasserlagerung konnte die Druckfestigkeit nach 56 Tagen um 12 % gesteigert werden.



**Abbildung 58: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 2**

Bei den Proben im Heißwasserbecken konnte der Vakuumeffekt die Druckfestigkeit nach 7 Tagen von 154 auf 181 N/mm<sup>2</sup> und nach 56 Tagen von 164 auf 183 N/mm<sup>2</sup> steigern.

Durch das Entlüften mit 60 mbar am Ende des Mischprozesses konnte die Spaltzugfestigkeit der Proben im 20 °C Wasserbecken im Durchschnitt um 14 % und die Proben mit Heißwasserlagerung um 6 % gesteigert werden. Die Nachbehandlung im Heißwasser brachte gegenüber der 20 °C Wasserlagerung eine Steigerung der Spaltzugfestigkeit nach 7 Tagen von 22 auf 27 N/mm<sup>2</sup> bzw. 25 auf 30 N/mm<sup>2</sup> und nach 56 Tagen eine Erhöhung von 25 auf 31 bzw. von 29 auf 32 N/mm<sup>2</sup>. Der Spaltzugfestigkeitsverlauf der vier Mischungen ist in Abbildung 58 dargestellt.

### 6.5 Mischung M 3: Basaltfaser 6mm 1,0 Vol%

Aus [44] ist bekannt, dass ein höherer Basaltfasergehalt als 1,0 Vol% zu einer schlechteren Verarbeitung des Frischbetons führt. Größere Fasergehalte führen zu niedrigen Ausbreitmaßen und schlechten Luftporengehalte und können sogar den Mischerwirbler verstopfen. Deshalb wurde für die Basaltemischungen ein fixer Fasergehalt von 1,0 Vol% gewählt. Die Abbildung 59 zeigt die 6 mm Basaltfasern der Mischung M 3.



**Abbildung 59: Basaltfaser 6mm**

**Tabelle 44: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 3**

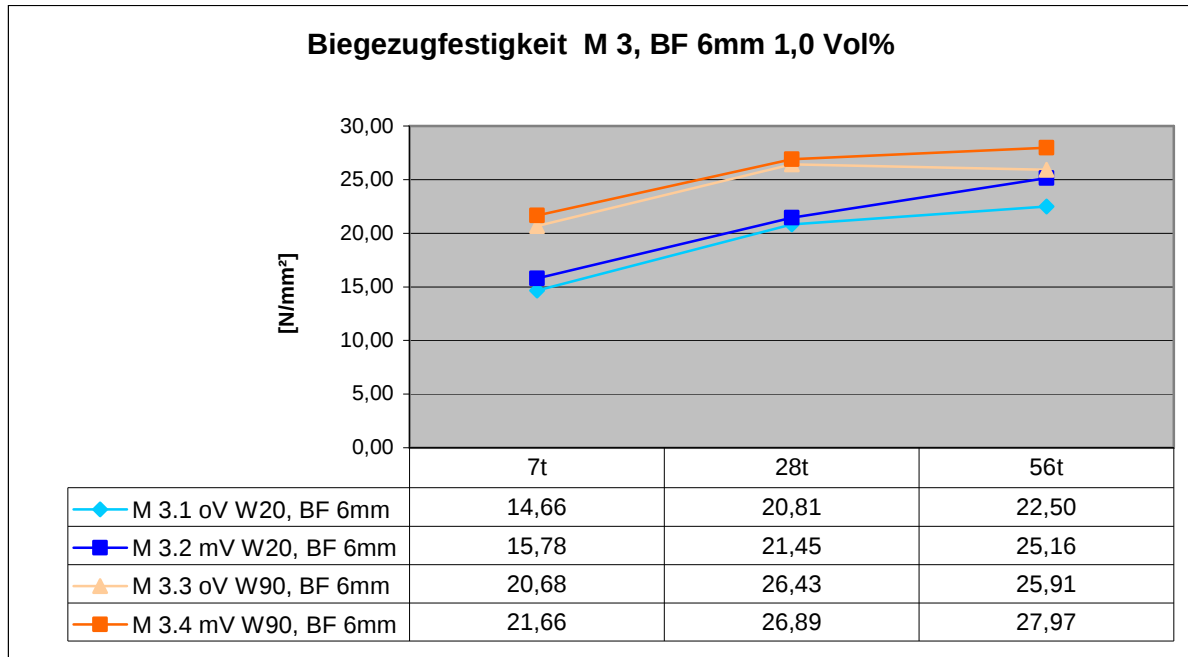
| Bezeichnung                   |     | M 3.1 oV W20,<br>BF 6mm | M 3.2 mV W20,<br>BF 6mm | M 3.3 oV W90,<br>BF 6mm | M 3.4 mV W90,<br>BF 6mm |
|-------------------------------|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 42,0                    | 38,0                    | 40,0                    | 39,0                    |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 23,0                    | 24,0                    | 24,0                    | 24,0                    |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,4                     | 1,2                     | 5,2                     | 1,5                     |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2307,0                  | 2382,0                  | 2284,5                  | 2376,5                  |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2312,8                  | 2345,4                  | 2295,6                  | 2360,1                  |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 14,66                   | 15,78                   | 20,68                   | 21,66                   |
|                               | 28t | 20,81                   | 21,45                   | 26,43                   | 26,89                   |
|                               | 56t | 22,50                   | 25,16                   | 25,91                   | 27,97                   |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 117,44                  | 124,19                  | 181,23                  | 185,49                  |
|                               | 28t | 149,75                  | 153,64                  | 159,78                  | 172,39                  |
|                               | 56t | 153,49                  | 169,98                  | 182,07                  | 201,93                  |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 21,99                   | 23,60                   | 24,38                   | 32,08                   |
|                               | 28t | 23,32                   | 30,49                   | 32,74                   | 37,02                   |
|                               | 56t | 23,43                   | 28,68                   | 30,38                   | 36,24                   |

Die Mischtemperaturen nach dem Mischprozess erreichten im Durchschnitt 40 °C. Abgesehen von den Mischungen M 3.1 oV und M 3.2 mV weichen diese auch nicht stark voneinander ab. Es stellten sich auch keine Unterschiede bei den Ausbreitmaßen ein. Es konnten immer 24 cm erzielt werden, nur die Mischung M 3.1 oV erreichte ein Ausbreitmaß von 23 cm. Die Luftporengehalte weichen stark voneinander ab. Während die Mischung M 3.1 oV 4,4 % erzielt, stellte sich bei der gleichen Mischung M 3.3 oV ein Luftgehalt von 5,2 % ein. Der Vakuum gemischte Frischbeton M 3.2 mV wies einen Luftgehalt von 1,2 % auf, während die identisch hergestellte Mischung M 3.4 mV um 0,3 % abwich und einen Luftporengehalt von 1,5 % erreichte.

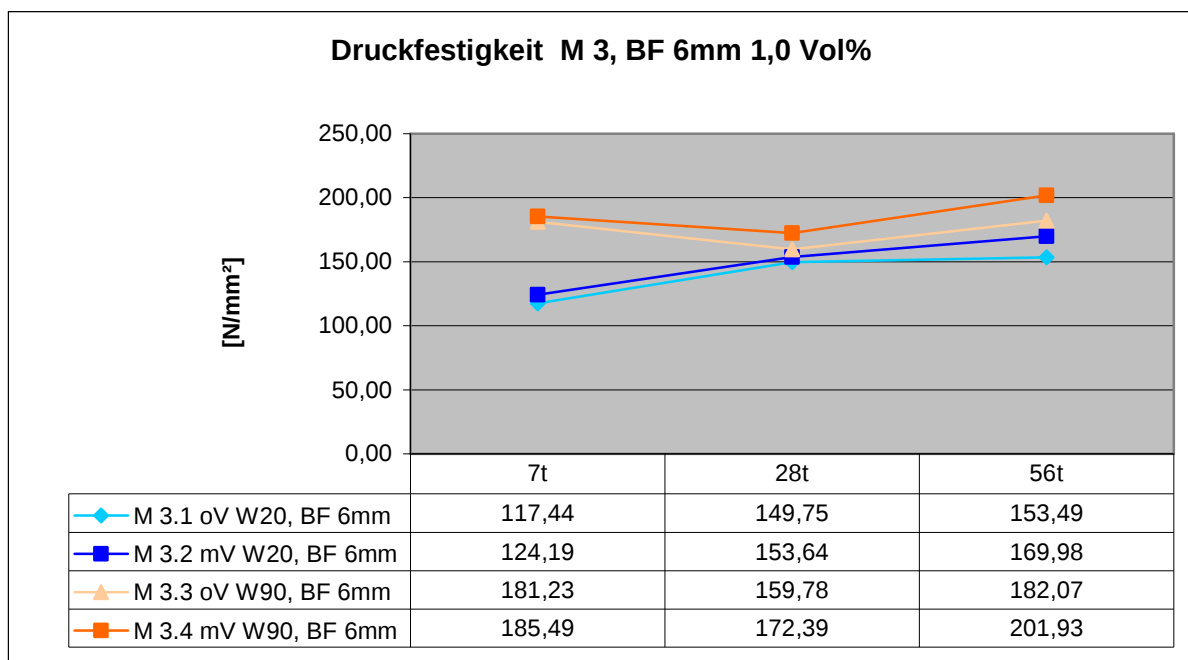
Die in Tabelle 44 dargestellten Betonrohddichten schwanken sehr stark voneinander ab. Während bei den Mischungen M 3.1 oV und M 3.3 oV die Festbetonrohddichte nach 28 Tagen über dem Wert der Frischbetonrohddichte liegt, erreichen die Festbetonrohddichten der Vakuum gemischten Mischungen M 3.2 mV und M 3.4 mV niedrigere Werte als die Frischbetonrohddichten. Weiters schwanken die nicht Vakuum gemischten Proben M 3.1 oV und M 3.3 oV nur um 6 bzw. 9 kg/m³, während die Vakuum gemischten Proben mit 37 bzw. 16 kg/m³ deutlicher abweichen.

Wie in Abbildung 60 dargestellt, konnte durch den Vakuumeffekt die Biegezugfestigkeiten nach 7 Tagen bei dieser Basaltfasermischung kaum gesteigert werden. Bei den Proben im 20 °C Wasserbecken konnte die Biegezugfestigkeit durch das Entlüften mit 60 mbar am Ende des Mischprozesses um ca. 7 % und bei

den Proben mit 90 °C Heißwasserlagerung um ca. 4 % gesteigert werden. Auch nach 28 Tagen stellen sich kaum Festigkeitssteigerungen ein. Erst nach 56 Tagen konnten Festigkeitssprünge um 11 bzw. 8 % wahrgenommen werden. Durch die Heißwasserlagerung lagen die Biegezugfestigkeiten in den ersten 4 Wochen im Durchschnitt immer um 6 N/mm<sup>2</sup> höher als die Proben mit 20 °C Wasserlagerung.



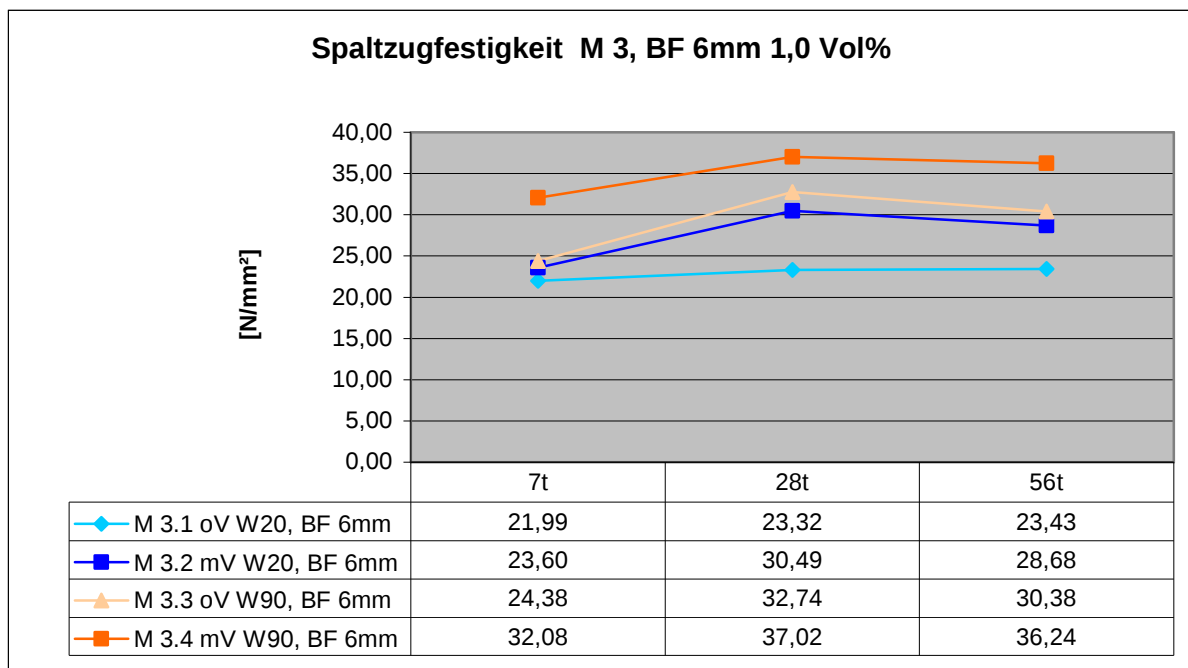
**Abbildung 60: Biegezugfestigkeiten Mischung M 3**



**Abbildung 61: Druckfestigkeiten Mischung M 3**

Auch bei der Druckfestigkeit führte der Vakuumeinfluss in den ersten 7 Tagen zu keiner großen Festigkeitssteigerung. Auffällig in der Darstellung 60 ist ebenfalls, dass bei den Heißwasserbehandelten Proben die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen abfallen und nach 56 Tagen wieder zunehmen. So fällt bei der Mischung M 3.3 oV die Druckfestigkeit von 181 N/mm<sup>2</sup> auf 160 N/mm<sup>2</sup> ab und steigt dann nach vier Wochen wieder auf 182 N/mm<sup>2</sup> an. Bei der Mischung M 3.4 mV beträgt die Druckfestigkeit nach 7 Tagen 185 N/mm<sup>2</sup>, fällt dann auf 172 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen und steigt nach 56 Tagen sogar leicht über 200 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Spaltzugfestigkeiten der Basaltfasermischungen fällt auf, dass die Festigkeitswerte nach 7 Tagen von M 3.1, M 3.2 und M 3.3 dicht bei einander liegen, während nur der Wert für M 3.4 stark von den anderen Spaltzugfestigkeiten abweicht. Erst nach 28 Tagen zeigen sich deutlichere Unterschiede zu den Mischungen untereinander. So konnte z. B. die Mischung M 3.2 mV durch das Vakuummischen eine um 30 % höhere Spaltzugfestigkeit als die Mischung M 3.1 oV aufweisen. Der Unterschied von M 3.3 oV und M 3.4 mV lag bei den Heißwasserbehandelten Proben bei 13 %. Während die Spaltzugfestigkeiten bei der Probe M 3.1 oV immer leicht zunahm, stiegen die Wert bei den drei anderen Proben bis zum 28. Tag und fielen dann am 56. Tag wieder leicht ab.



**Abbildung 62: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 3**

## 6.6 Mischung M 4: Basaltfaser 12 mm 1,0 Vol%

Diese Mischung entspricht der gleichen Mischrezeptur wie bei M 3, nur mit 12 mm langen Basaltfasern. Bild 63 zeigt die Basaltfasern mit 12 mm Länge, bei denen die Gefahr der Wirblerverstopfung noch größer ist, als bei den 6 mm langen Basaltfasern.



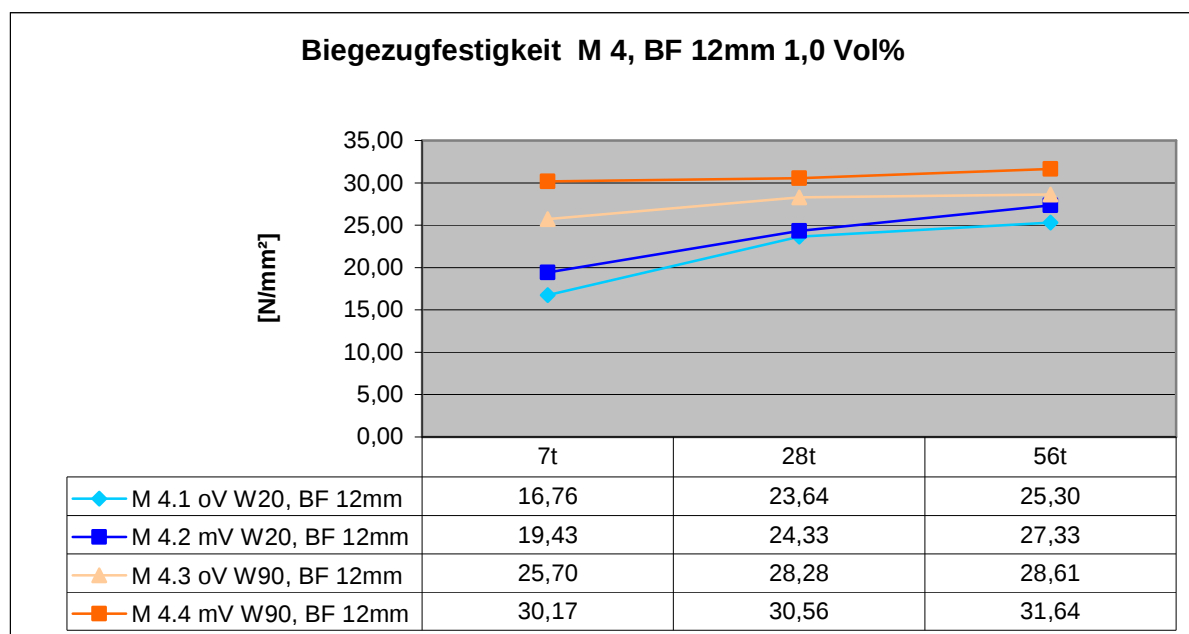
Abbildung 63: Basaltfaser 12 mm

Tabelle 45: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 4

| Bezeichnung                   |     | M 4.1 oV W20,<br>BF 12mm | M 4.2 mV W20,<br>BF 12mm | M 4.3 oV W90,<br>BF 12mm | M 4.4 mV W90,<br>BF 12mm |
|-------------------------------|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 42,0                     | 38,0                     | 42,0                     | 38,0                     |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 22,5                     | 22,5                     | 23,0                     | 22,0                     |
| Luftporengehalt [%]           |     | 5,1                      | 1,3                      | 5,3                      | 1,1                      |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2311,0                   | 2402,0                   | 2299,0                   | 2396,0                   |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2302,8                   | 2371,4                   | 2288,3                   | 2384,5                   |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 16,76                    | 19,43                    | 25,70                    | 30,17                    |
|                               | 28t | 23,64                    | 24,33                    | 28,28                    | 30,56                    |
|                               | 56t | 25,30                    | 27,33                    | 28,61                    | 31,64                    |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 120,01                   | 125,39                   | 185,81                   | 194,54                   |
|                               | 28t | 149,22                   | 160,69                   | 166,98                   | 198,72                   |
|                               | 56t | 153,28                   | 169,51                   | 185,39                   | 194,97                   |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 23,36                    | 27,31                    | 31,42                    | 32,02                    |
|                               | 28t | 25,40                    | 29,68                    | 32,20                    | 38,79                    |
|                               | 56t | 27,08                    | 30,36                    | 32,76                    | 39,81                    |

Betrachtet man die Frischbetoneigenschaften aus der Tabelle 45, so sieht man, dass die beiden identischen Mischungen M 4.1 oV und M 4.3 oV bzw. M 3.2 mV und M 3.4 mV die gleichen Mischtemperaturen liefern. Weiters kann man erkennen, dass auch die Ausbreitmaße kaum voneinander abweichen und im Durchschnitt 22,5 cm aufweisen. Die Abweichungen zu den einzelnen Mischungen betragen lediglich 0,5 cm. Obwohl bei dieser Mischung M 4 die längeren Basaltfasern zur Anwendung kamen, stellten sich im Gegensatz zur Mischung M 3 um ca. 1,5 cm kleinere Ausbreitmaße ein. Die Luftporengehalte der Mischung M 4 schwanken ebenfalls nicht so stark voneinander, wie bei der Mischung M 3. Die ohne Vakuum gemischten Frischbetone erreichten 5,1 und 5,3 %, die mit Vakuum gemischten Frischbeton erzielten 1,3 und 1,1 % Luftgehalt. Die Abweichung beträgt also bei allen vier Mischungen nur 0,2 %.

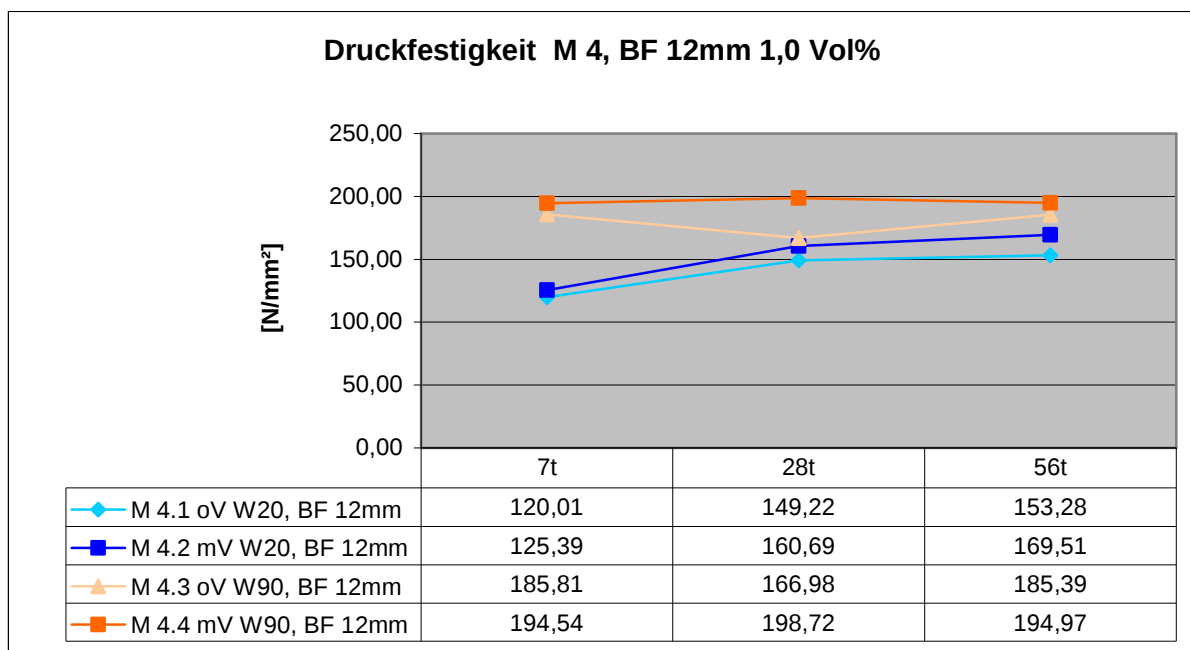
Die Frisch- und Festbetonrohddichten weisen wieder einen Unterschied von nicht Vakuum- zu vakuumgemischt von ca. 100 kg/m<sup>3</sup> auf. Nur bei den Mischungen M 4.1 oV und M 4.2 mV weist die Festbetonrohddichte eine Differenz von 69 kg/m<sup>3</sup> auf. Die Festbetonrohddichten liegen bei allen vier Mischungen unterhalb der Frischbetonrohddichten. Bei den nicht Vakuum gemischten Proben beträgt der Unterschied ca. 10 kg/m<sup>3</sup>, bei der Mischung M 4.2 mV liegt der Wert der Festbetonrohddichte um ca. 30 kg/m<sup>3</sup> und bei der Mischung M 4.4 mV um ca. 10 kg/m<sup>3</sup> unterhalb des Wertes der Frischbetonrohddichte.



**Abbildung 64: Biegezugfestigkeiten Mischung M 4**

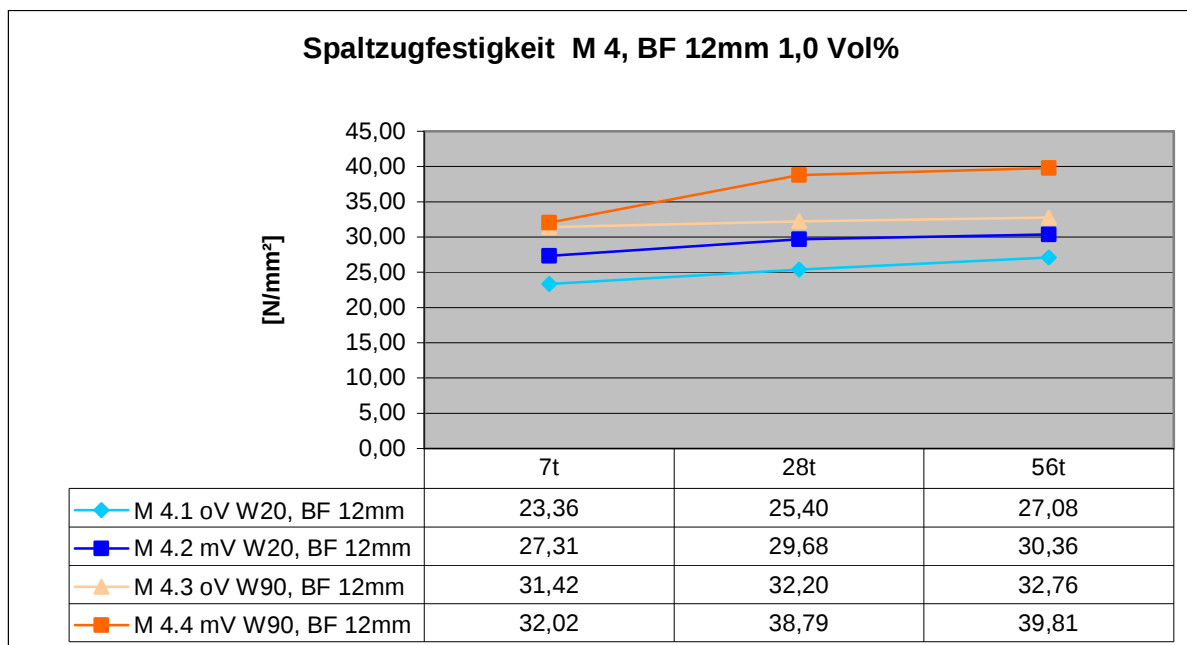
Im Biegezugfestigkeitsverlauf, der in Abbildung 64 dargestellt ist, erkennt man, dass bei allen vier Proben die Festigkeiten im Laufe der Zeit leicht zunehmen. Durch den Vakuummischprozess konnte die Biegezugfestigkeit bei den Proben mit 20 °C Wasserlagerung im Durchschnitt um 11,5 % gesteigert werden, während bei den Proben mit Heißwasserlagerung eine Steigerung der Festigkeit um 13,5 % erreicht wurde. Mit der Heißwassernachbehandlung konnte die Biegezugfestigkeit am 7. Tag um 54 %, am 28. Tag um 22 % und am 56. Tag um 14 % erhöht werden.

Die Druckfestigkeiten der Basaltfasermischungen mit Faserlängen zu 12 mm und 1,0 Vol% Fasergehalt sind in der Abbildung 65 enthalten. Die Proben aus dem 20 °C Wasserbecken steigen dabei vom 7. bis auf den 56. Tag immer leicht an. Während die Festigkeitswerte der Probe M 4.4 mV vom 28. Tag auf den 56. Tag leicht abfällt, verringert sich die Festigkeit der Probe M 4.3 oV vom 7. Tag auf den 28. Tag von 185 N/mm<sup>2</sup> auf 166,98 N/mm<sup>2</sup> und steigt dann wieder am 56. Tag auf 185 N/mm<sup>2</sup>. Es fällt auf, dass bei der Mischung M 4 die Proben aus der 20 °C Wasserlagerung einen Festigkeitsunterschied auf Grund des Vakuummischens von 5 N/mm<sup>2</sup> am 7. Tag, von 10 N/mm<sup>2</sup> am 28. Tag und 15 N/mm<sup>2</sup> am 56. Tag aufweisen. Die Proben aus der Heißwasserlagerung ergaben Festigkeitsdifferenz von 10 N/mm<sup>2</sup> am 7. Tag, 20 N/mm<sup>2</sup> am 28. Tag und 10 N/mm<sup>2</sup> am 56. Tag. Durch die Heißwasserlagerung konnte die Druckfestigkeit bei den Vakuum gemischten Proben um 55 % am 7. Tag, um 23 % am 28. Tag und um 15 % am 56. Tag gesteigert werden.



**Abbildung 65: Druckfestigkeiten Mischung M 4**

Die Spaltzugfestigkeiten der Mischung 4 weisen wie die Biegezugfestigkeiten einen leicht steigenden Verlauf auf. So erhöht sich die Spaltzugfestigkeit vom 7. auf den 56. Tag bei der Mischung M 4.1 oV um 16 %, bei der Mischung M 4.2 mV um 11 %, bei der Mischung M 4.3 oV um 4 % und bei der Mischung M 4.4 mV um 24 %. Der Vakuumeinfluss beim Spaltzugversuch brachte bei der normalen Wasserlagerung eine Erhöhung der Festigkeit durchschnittliche 17 % und bei den heißwassergelagerten Proben konnte die Spaltzugfestigkeit, abgesehen am 7. Tag, um ca. 20 % gesteigert werden. Die Nachbehandlung im Heißwasserbecken brachte bei den nicht Vakuum gemischten Proben eine durchschnittliche Steigerung der Festigkeit um 26 % und bei den Vakuum gemischten Proben einen Festigkeitszuwachs von 27 %.



**Abbildung 66: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 4**

## 6.7 Mischung M 5: Polyvinylalkoholfaser

Für die Mischungen der Mischreihe M 5 wurden die in Abbildung 67 dargestellten PVA-Fasern mit einer Faserlänge von 6 mm und einem Fasergehalt von 0,44 Vol % verwendet. Obwohl nur ein Fasergehalt von 0,44 Vol % zum Einsatz kam, stellten sich schlechte Frischbetoneigenschaften bei dieser Mischreihe ein. Einerseits verstopfte der Wirbler im Mischbehälter nach der Wasser- und Fließmittelzugabe, andererseits neigen die PVA-Fasern zu einer Klumpenbildung nach dem

Mischprozess. Diese Klumpen führten dazu, dass der Frischbeton nach dem Abziehen des Ausbreitmaßtrichters in sich zusammenfiel und sich nicht ausbreitete. Dieser Effekt konnte bei allen PVA-Mischungen beobachtet werden.



Abbildung 67: Polyvinylalkoholfaser 6 mm

Tabelle 46: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 5

| Bezeichnung                   |     | M 5.1 oV W20,<br>PVA | M 5.2 mV W20,<br>PVA | M 5.3 oV W90,<br>PVA | M 5.4 mV W90,<br>PVA |
|-------------------------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 41,0                 | 37,0                 | 40,0                 | 38,0                 |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 20,0                 | 20,0                 | 20,0                 | 20,0                 |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,5                  | 0,8                  | 4,5                  | 0,6                  |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2329,0               | 2390,0               | 2297,0               | 2395,5               |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2308,3               | 2330,3               | 2289,2               | 2370,8               |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 13,53                | 14,69                | 22,66                | 24,98                |
|                               | 28t | 18,28                | 20,18                | 26,15                | 27,54                |
|                               | 56t | 21,09                | 21,69                | 25,91                | 27,43                |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 95,66                | 107,79               | 170,63               | 193,14               |
|                               | 28t | 143,32               | 155,87               | 168,02               | 186,46               |
|                               | 56t | 149,58               | 161,85               | 177,38               | 187,92               |
| $\sigma_{sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 14,53                | 22,22                | 26,51                | 32,33                |
|                               | 28t | 18,95                | 24,74                | 30,12                | 39,65                |
|                               | 56t | 21,09                | 24,54                | 28,38                | 40,01                |

Alle Mischungen wiesen deshalb auch ein Ausbreitmaß von 20 cm auf. Die Mischtemperaturen schwanken zwischen nicht Vakuum gemischt und mit Vakuum gemischt um 2 bis 3 °C. Der maximale Temperaturwert betrug 41 °C bei der

Mischung M 5.1 oV und der minimale Temperaturwert von 37 °C stellte sich bei der Mischung M 5.2 mV ein. Der Luftporengehalt der vier Mischungen weist auch keine großen Unterschiede auf. So sind die Luftporengehalte von der Mischung M 5.1 oV und M 5.3 oV mit 4,5 % identisch und die Mischungen M 5.2 mV und M 5.4 mV weisen einen Luftgehalt von 0,8 bzw. 0,6 % auf.

Beim Vergleich der Frisch- und Festbetonrohddichten sieht man, dass alle Werte für die Festbetonrohddichte unter den Werten der Frischbetonrohddichten liegen. Die Dichtendifferenzen schwanken dabei relativ stark. So weist die Mischung M 5.1 oV eine Differenz von 20 kg/m<sup>3</sup> auf, die Mischung M 5.2 mV 60 kg/m<sup>3</sup>, die Mischung M 5.3 oV 8 kg/m<sup>3</sup> und die Mischung M 5.4 mV weicht um 25 kg/m<sup>3</sup> ab. Betrachtet man nur die Rohddichten nicht Vakuum gemischten Proben, so sieht man dass die Frischbetonrohddichten von M 5.1 oV um ca. 30 kg/m<sup>3</sup> höher liegt als die Frischbetonrohddichte von M 5.3 oV. Die Festbetonrohddichten nach 28. Tagen weichen dann nur mehr um ca. 20 kg/m<sup>3</sup> ab. Bei den Vakuum gemischten Proben wurden fast die gleichen Werte für die Frischbetonrohddichten erzielt. Sie weichen nur um 5 kg/m<sup>3</sup> ab. Die Festbetonrohddichten von M 5.2 mV und M 5.4 mV schwanken um 40 kg/m<sup>3</sup>.

Die Befüllung der Schalungen nach der Frischbetonprüfung wurde ebenfalls durch die Klumpenbildung erschwert. Die Befürchtung, dass mit den PVA-Fasern schlechte Frisch- und Festbetoneigenschaften erzielt werden könnten, spiegelte sich auch in den Festigkeitswerten.

Der Biegezugfestigkeitsverlauf in Abbildung 68 zeigt, dass die Mischung M 5.1 oV nur einen Festigkeitswert von 13 N/mm<sup>2</sup> lieferte. Auch das Vakuummischen konnte die Biegezugfestigkeit nur um durchschnittlich 9 % bei den normalen Wassergelagerten Proben und um ca. 7 % bei den heißwassergelagerten Proben erhöhen. Nur die Heißwasserlagerung lieferte annehmbare Biegezugfestigkeiten. So konnten die nicht Vakuum gemischten Proben durch die 90 °C Heißwasserlagerung die Festigkeit nach 7 Tagen um 67 %, nach 28 Tagen um 43 % und nach 56 Tagen um 22 % erhöhen. Die vakuumgemischten Proben steigerten die Biegezugfestigkeit durch die Heißwassernachbehandlung am 7. Tag um 70 %, am 28. Tag um 36 % und am 56. Tag um 26 %. Man kann auch erkennen, dass bei der normalen Wassernachbehandlung die Biegezugfestigkeiten mit der Zeit leicht zunehmen, während die Werte bei der Heißwassernachbehandlung bis zum 28. Tag zunehmen und am 56. Tag wieder leicht abnehmen.

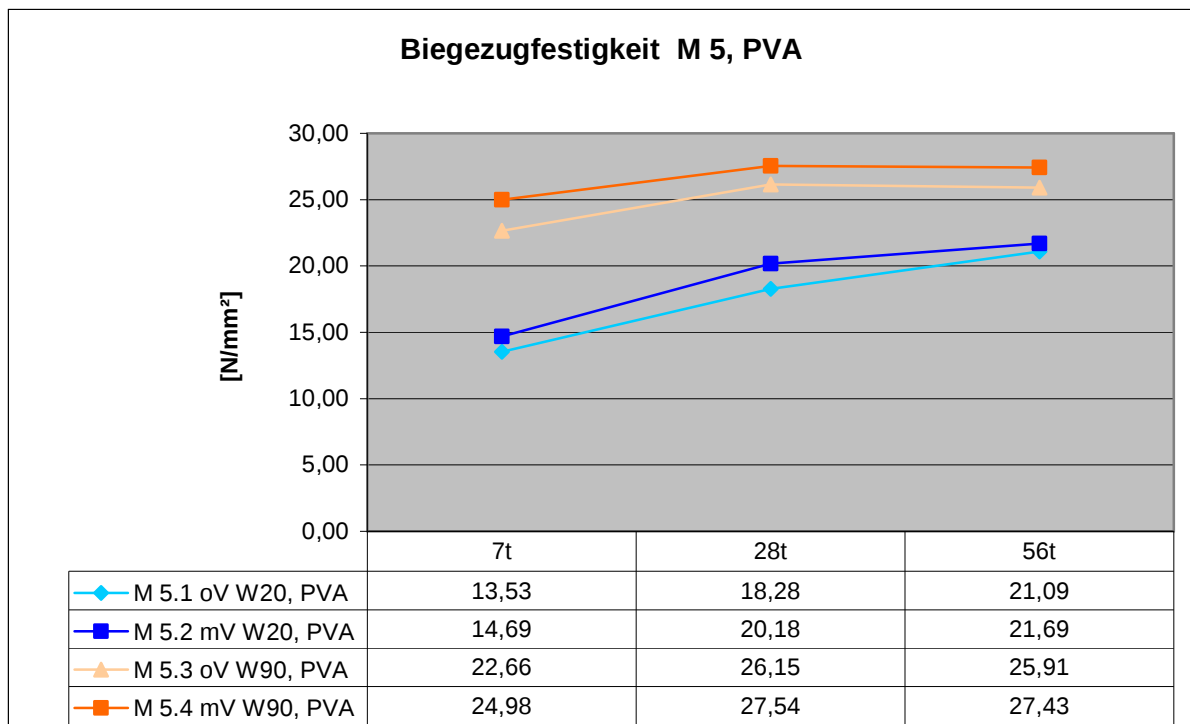


Abbildung 68: Biegezugfestigkeiten Mischung M 5

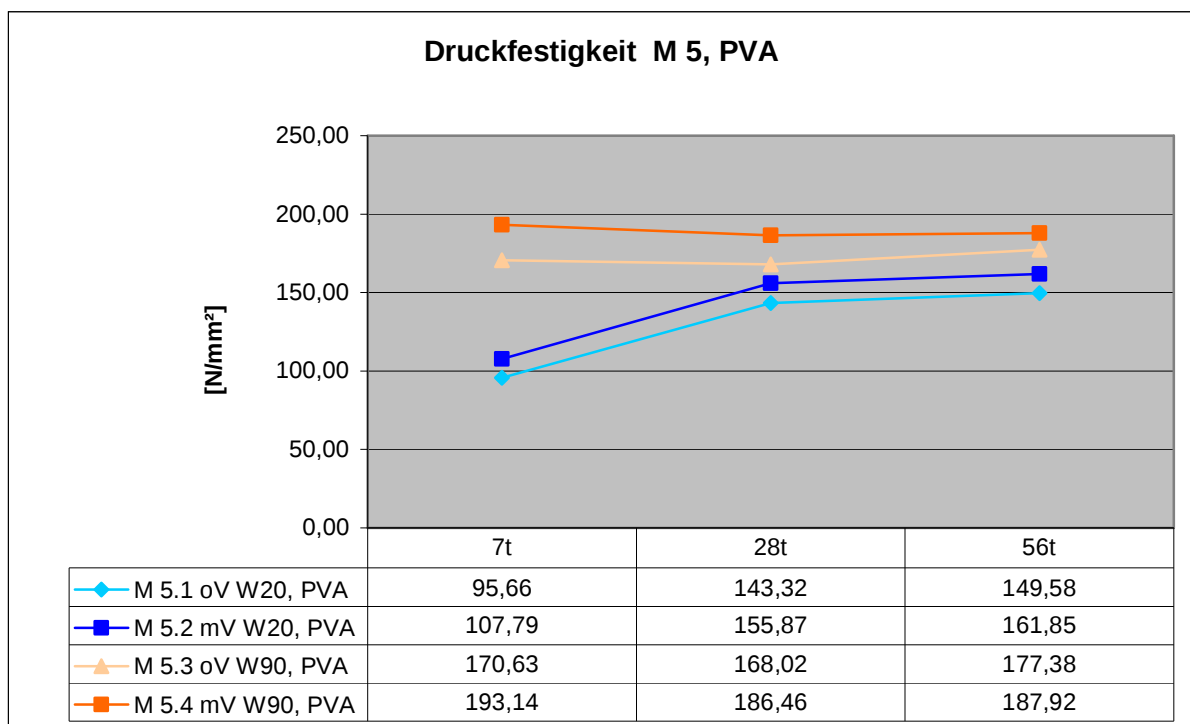
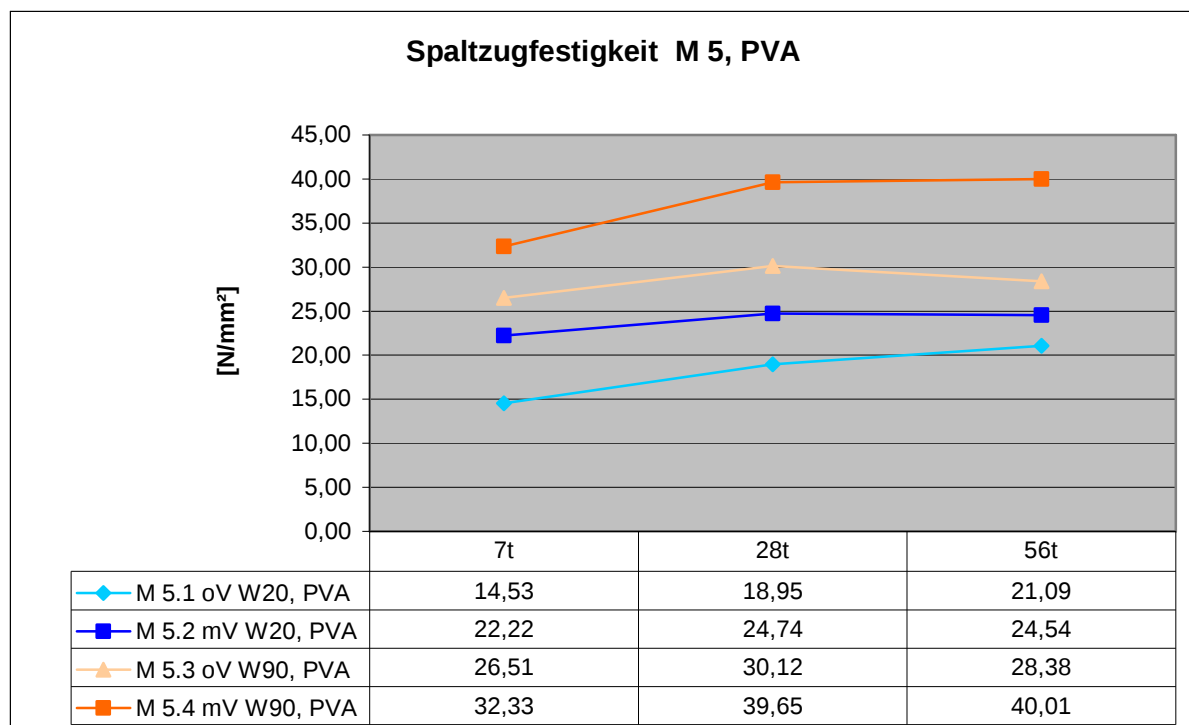


Abbildung 69: Druckfestigkeiten Mischung M 5

Der Druckfestigkeitsverlauf bis zum 56. Tag der Mischung M 5 ist in Abbildung 69 dargestellt. Während die Druckfestigkeiten der Proben mit normaler Wasserbehandlung vom 7. auf den 28. Tag steigen, fällt die Druckfestigkeit bei den Heißwasserbehandelten Proben vom 7. auf den 28. Tag. Dabei steigen die Druckfestigkeiten der Proben mit 20 °C Wasserbehandlung M 5.1 oV und M 5.2 mV innerhalb von 49 Tagen nur um 54 N/mm<sup>2</sup> an und diese unterscheiden sich durch das Vakuummischen immer um 12 N/mm<sup>2</sup>. Durch die Heißwasserlagerung konnten immerhin Festigkeiten von 170 und 193 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden.

Bei der Bestimmung der Spaltzugfestigkeiten konnten nach 7 Tagen Festigkeiten von 14, 22, 26 und 32 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Diese Festigkeitswerte steigen bis zum 28. Tag an und pendeln sich dort ein. Am 56. Tag sind keine großen Festigkeitssteigerungen mehr zu erwarten. Durch den Vakuumeinfluss konnte die Spaltzugfestigkeit am 28. Tag von 19 auf 24 N/mm<sup>2</sup> bzw. von 30 auf 39 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Durch die Heißwasserlagerung konnte ein Festigkeitssprung nach 56 Tagen von 21 auf 28 N/mm<sup>2</sup> bzw. von 24 auf 40 N/mm<sup>2</sup> gewonnen werden.



**Abbildung 70: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 5**

## 6.8 Mischung M 6: Stahlfaser 6 mm 2,5 Vol%

Für die Mischreihe M 6 kamen Stahlfasern mit einer Länge von 6 mm und einem Fasergehalt von 2,5 Vol% zur Anwendung. Wie auch bei den anderen Mischungen wurde der Stoffraum der Fasern vom Sand abgezogen. Im Bild 71 sind die verwendeten Stahlfasern abgebildet und die Tabelle 47 zeigt die Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten der Mischreihe M 6.



Abbildung 71: Stahlfaser 6 mm

Tabelle 47: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 6

| Bezeichnung                   |     | M 6.1 oV W20,<br>SF 6mm | M 6.2 mV W20,<br>SF 6mm | M 6.3 oV W90,<br>SF 6mm | M 6.4 mV W90,<br>SF 6mm |
|-------------------------------|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 36,0                    | 38,0                    | 38,0                    | 36,0                    |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 29,0                    | 24,5                    | 21,0                    | 23,5                    |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,5                     | 0,8                     | 4,8                     | 0,8                     |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2435,0                  | 2538,0                  | 2432,0                  | 2540,0                  |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2458,1                  | 2488,4                  | 2431,6                  | 2489,4                  |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 12,06                   | 13,70                   | 24,16                   | 27,00                   |
|                               | 28t | 19,60                   | 22,65                   | 27,46                   | 29,10                   |
|                               | 56t | 19,85                   | 22,02                   | 25,15                   | 29,26                   |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 115,51                  | 135,48                  | 181,43                  | 188,46                  |
|                               | 28t | 162,65                  | 170,79                  | 196,28                  | 215,76                  |
|                               | 56t | 163,04                  | 168,47                  | 197,12                  | 215,92                  |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 34,20                   | 38,26                   | 40,71                   | 43,99                   |
|                               | 28t | 41,35                   | 42,29                   | 44,10                   | 45,43                   |
|                               | 56t | 41,74                   | 42,80                   | 44,96                   | 46,81                   |

Die Mischtemperaturen erzielten Werte unter 40 °C. So lagen die Temperaturen bei 36 bzw. 38 °C. Bei der Betrachtung der Ausbreitmaße fällt auf, dass die beiden identischen Mischungen M 6.1 oV und M 6.3 oV stark voneinander abweichen. So erreichte M 6.1 oV ein großes Ausbreitmaß von 29 cm und M 6.3 oV nur 21 cm. Die beiden anderen Mischungen M 6.2 mV und M 6.4 mV liegen nur um 1 cm auseinander. Die Luftporengehalte der Mischungen M 6 liegen wieder enger beisammen. So stellten sich für die nicht Vakuum gemischten Serien Werte von 4,5 und 4,8 % ein, andererseits konnten bei den Vakuum gemischten Frischbetonen jeweils der Wert 0,8 % gemessen werden.

Die Frischbetonrohddichten der Mischreihe M 6 liegen ebenfalls eng bei einander. So konnten bei dem ohne Vakuum hergestellten Frischbetonen Werte von 2435 kg/m<sup>3</sup> und 2432 kg/m<sup>3</sup> festgestellt werden und bei den Vakuum hergestellten Betonen 2538 kg/m<sup>3</sup> und 2540 kg/m<sup>3</sup> gemessen werden. Die Abweichungen betragen also nur 3 bzw. 2 kg/m<sup>3</sup>. Bei den Festbetonrohddichten weisen nur die Mischungen M 6.2 mV und M 6.4 mV fast gleiche Werte auf, die beiden Mischungen M 6.1 oV und M 6.3 oV liegen um 30 kg/m<sup>3</sup> auseinander. Vergleicht man die Frisch- und Festbetonrohddichten innerhalb der jeweiligen Mischung, so sind die Rohddichten von M 6.3 oV nahezu gleich und die von M 6.1 oV unterscheiden sich um 23 kg/m<sup>3</sup>. Die Rohddichten von M 6.2 mV und M 6.4 mV liegen jeweils mit ca. 50 kg/m<sup>3</sup> Differenz auseinander. Weiters fällt auf, dass nur Festbetonrohddichte von M 6.1 oV über der Frischbetonrohddichte liegt, alle anderen Festbetondichten liegen unterhalb der Rohddichten des jeweiligen Frischbetons.

Die Biegezugfestigkeitsverläufe der Stahlfasermischungen M 6 sind in Abbildung 72 dargestellt. Vom 7. auf den 28. Tag steigen die Biegezugfestigkeiten an, während sie sich vom 28. auf den 56. Tag nur mehr leicht ändern. Durchschnittlich gesehen konnten die Festigkeiten bei allen Proben aus der Serie M 6 durch den Vakuumeinfluss um ca. 14 % gesteigert werden. Während die Biegezugfestigkeiten der normalen Wassergelagerten Proben M 6.1 oV und M 6.2 mV vom 7. auf den 56. Tag noch deutlich zunimmt, fallen die Steigerungen der Festigkeiten der heißwassergelagerten Proben deutlich geringer aus. Jedoch führte die Heißwasserlagerung am 7. Tag zu einer Verdoppelung der Biegezugfestigkeit und am 56. Tag zu einer Steigerung der Festigkeit um ca. 29 %.

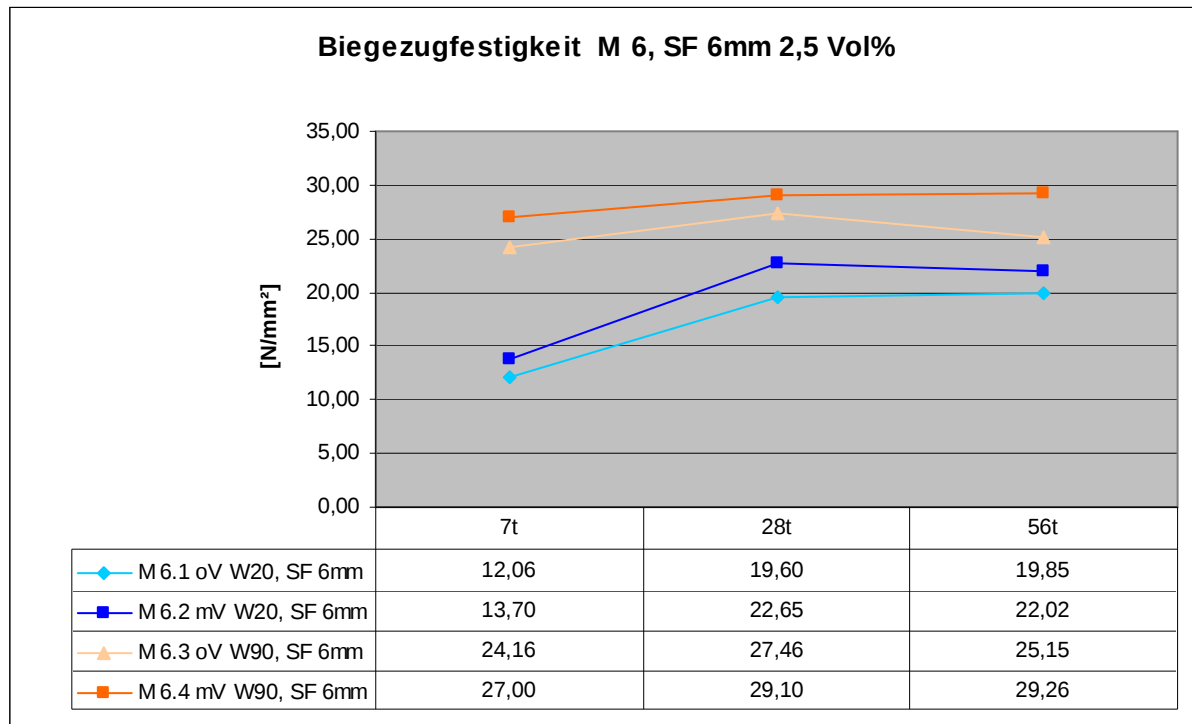


Abbildung 72: Biegezugfestigkeiten Mischung M 6

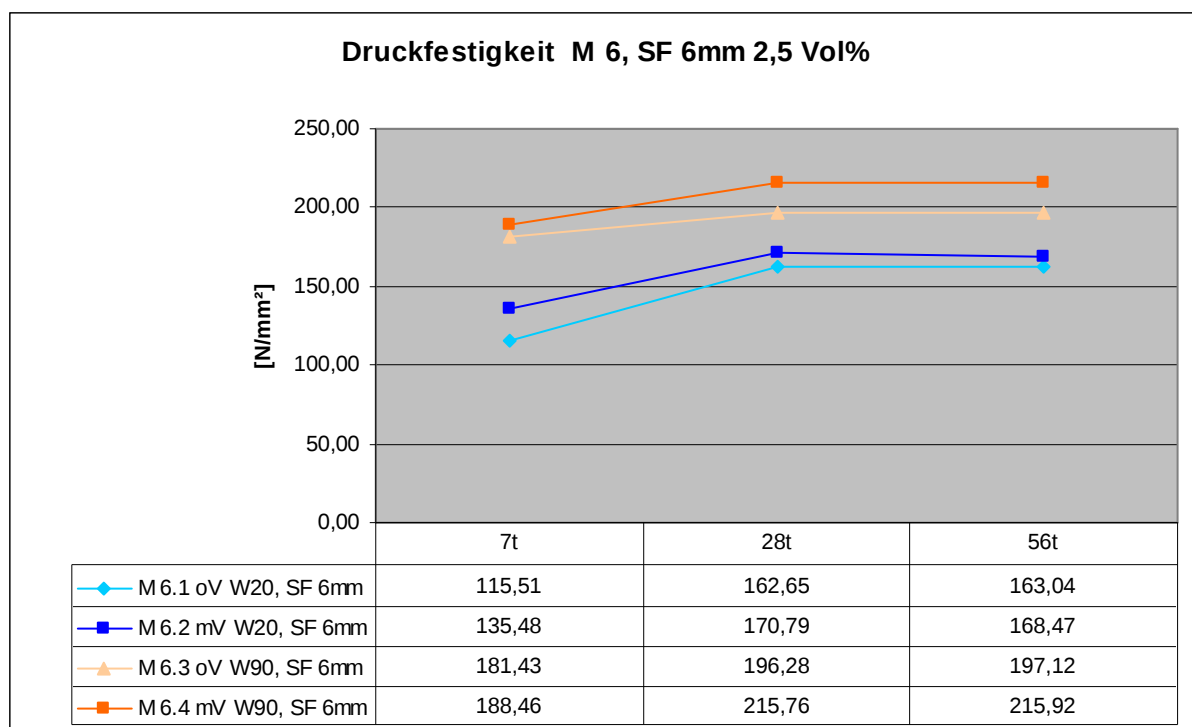
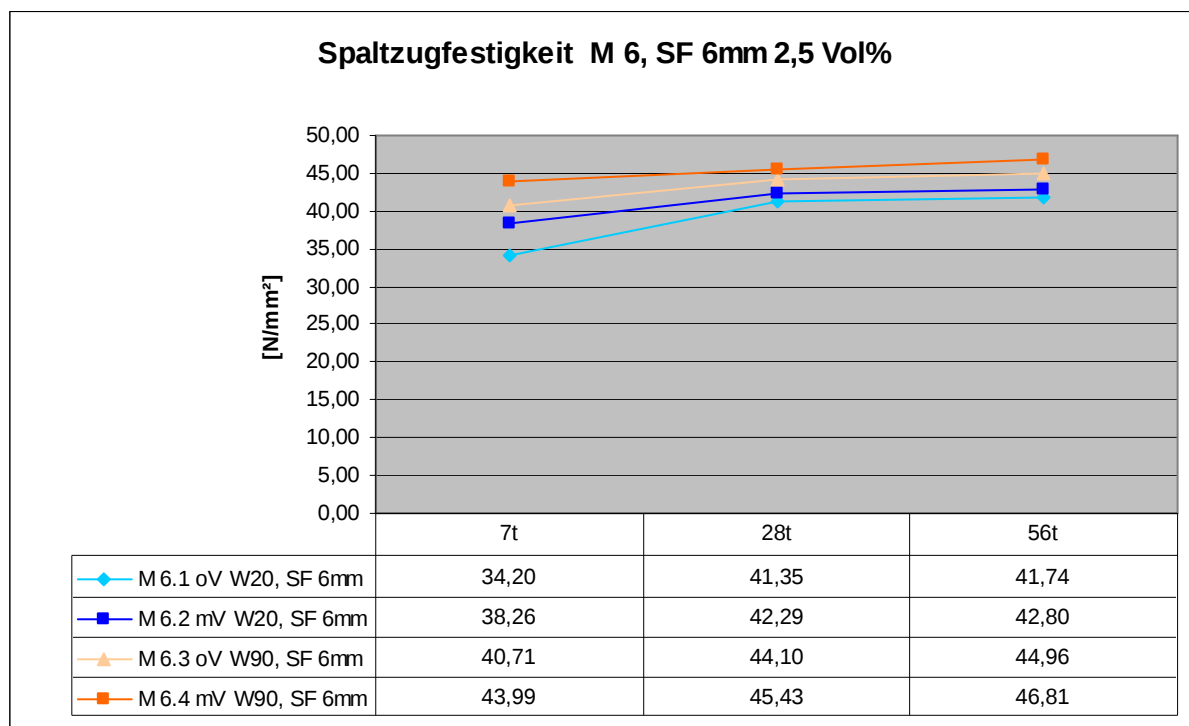


Abbildung 73: Druckfestigkeiten Mischung M 6

Die Abbildung 73 zeigt den Druckfestigkeitsverlauf der Mischserie M 6. Es fällt auf, dass sich die Festigkeiten vom 28. auf den 56. Tag bei allen Proben kaum ändern.

Weiters kann man erkennen, dass der Vakuumeinfluss bei den Proben mit Wassernachbehandlung am 7. Tag zwar eine Steigerung um 20 N/mm<sup>2</sup> erlaubt, jedoch beträgt der Unterschied am 56. Tag nur mehr 5 N/mm<sup>2</sup>. Bei den heißwassergelagerten Proben verhält es sich genau umgekehrt. Am 7. Tag wird durch das Vakuummischen die Druckfestigkeit nur um 7 N/mm<sup>2</sup> gesteigert, am 56. Tag konnte die Festigkeit von 197 auf 216 N/mm<sup>2</sup> erhöht werden. Durch die Nachbehandlung im Heißwasserbecken konnten die nicht Vakuum hergestellten Proben die Druckfestigkeit am 56. Tag um 21 % erhöhen und die Vakuum gemischten Proben steigerten sich um 29 %.



**Abbildung 74: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 6**

Bei den Spaltzugfestigkeiten der Mischreihe M 6 kann man erkennen, dass die Festigkeiten bei alle Proben vom 7. auf den 56. Tag leicht ansteigen. So steigert sich die Festigkeit von M 6.1 oV von 34,20 auf 41,74 N/mm<sup>2</sup> und von 6.2 mV von 38,26 auf 42,80 N/mm<sup>2</sup>. Während sich die Spaltzugfestigkeit vom 7. auf den 56. Tag von M 6.3 oV um 4 N/mm<sup>2</sup> erhöht, steigt der Wert von M 6.4 mV um 3 N/mm<sup>2</sup>. Das Vakuummischen führte bei den Wassergelagerten Proben zu einer Festigkeitssteigerung um 12 % nach 7 Tagen und 2,5 % nach 56 Tagen, bei den heißwassergelagerten Proben sprang die Festigkeit um 8 5 nach 7 Tagen und um 4

% nach 56 Tagen. Die Nachbehandlung im Heißwasser konnte die Spaltzugfestigkeit der Proben ohne Vakuum um 6 N/mm<sup>2</sup> am 7. Tag, um 3 N/mm<sup>2</sup> am 28. Tag und 56. Tag erhöhen, bei den Proben mit Vakuum sprangen die Werte um 6 N/mm<sup>2</sup> am 7. Tag, um 3 N/mm<sup>2</sup> am 28. Tag und um 4 N/mm<sup>2</sup> am 56. Tag.

### 6.9 Mischung M 7: Stahlfaser 12 mm 2,5 Vol%

Die zweite Stahlfasermischung wurde mit den 12 mm langen Fasern durchgeführt. Der Fasergehalt mit 2, 5 Vol% wurde nicht geändert. Die Stahlfasern wurden in der ersten Mischphase mit den Feststoffteilen in den Mischbehälter geleert und vermischt. Die Abbildung 75 zeigt die Stahlfasern der Mischreihe M 7 und die Tabelle 48 listet die Frischbetoneigenschaften und die Biegezug-, Druck- und Spaltzugfestigkeiten auf.



**Abbildung 75: Stahlfaser 12 mm**

Die in der Tabelle 48 dargestellten Frischbetoneigenschaften der Mischreihe M 7 zeigen einerseits, dass sich die Mischtemperatur nach dem Mischprozess bei allen vier Mischungen kaum veränderte und die Temperatur nie über 38 °C fiel. Andererseits erkennt man bei einem Vergleich der Ausbreitmaße, dass die gleichen Mischungen M 7.1 oV und M 7.3 oV um 3 cm und die Mischungen M 7.2 MV und M 7.4 mV um 4,5 cm abweichen.

**Tabelle 48: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 7**

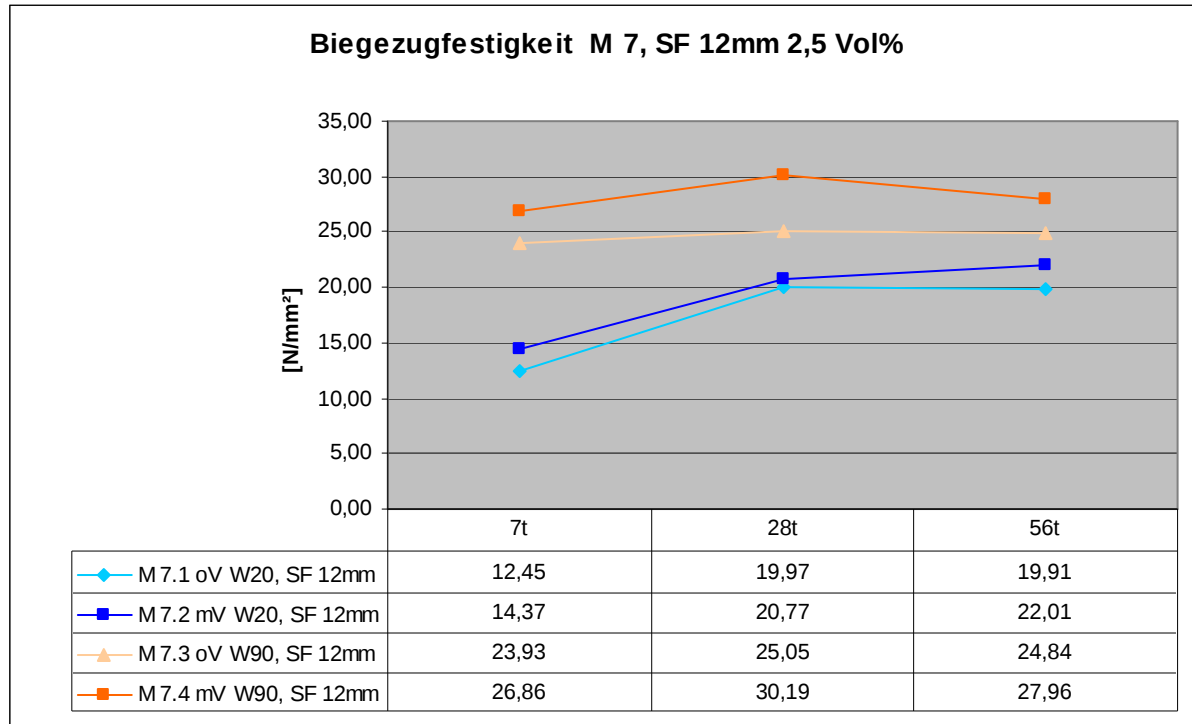
| Bezeichnung                   |     | M 7.1 oV W20,<br>SF 12mm | M 7.2 mV W20,<br>SF 12mm | M 7.3 oV W90,<br>SF 12mm | M 7.4 mV W90,<br>SF 12mm |
|-------------------------------|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 38,0                     | 38,0                     | 38,0                     | 36,0                     |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 26,0                     | 26,5                     | 23,0                     | 22,0                     |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,0                      | 0,9                      | 4,4                      | 0,8                      |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2450,0                   | 2539,0                   | 2458,0                   | 2545,5                   |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2440,5                   | 2531,1                   | 2409,9                   | 2536,8                   |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 12,45                    | 14,37                    | 23,93                    | 26,86                    |
|                               | 28t | 19,97                    | 20,77                    | 25,05                    | 30,19                    |
|                               | 56t | 19,91                    | 22,01                    | 24,84                    | 27,96                    |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 121,53                   | 131,67                   | 195,47                   | 219,91                   |
|                               | 28t | 170,60                   | 176,05                   | 204,05                   | 224,96                   |
|                               | 56t | 172,71                   | 177,50                   | 196,17                   | 208,91                   |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 38,90                    | 41,70                    | 47,48                    | 50,13                    |
|                               | 28t | 41,05                    | 46,22                    | 49,30                    | 52,77                    |
|                               | 56t | 42,64                    | 46,23                    | 48,53                    | 52,14                    |

Die Werte für den Luftporengehalt liegen für die beiden gleichen Mischungen zwar nicht alle beisammen, schwanken aber auch nicht zu stark. Nur der Luftgehalt der Mischung M 7.3 oV weicht mit 4,4 % stärker von der Mischung M 7.1 oV ab, die einen Luftgehalt von 4,0 % aufweisen konnte. Die beiden vakuumgemischten Frischbetonen erzielten Luftporengehalte von 0,8 und 0,9 %.

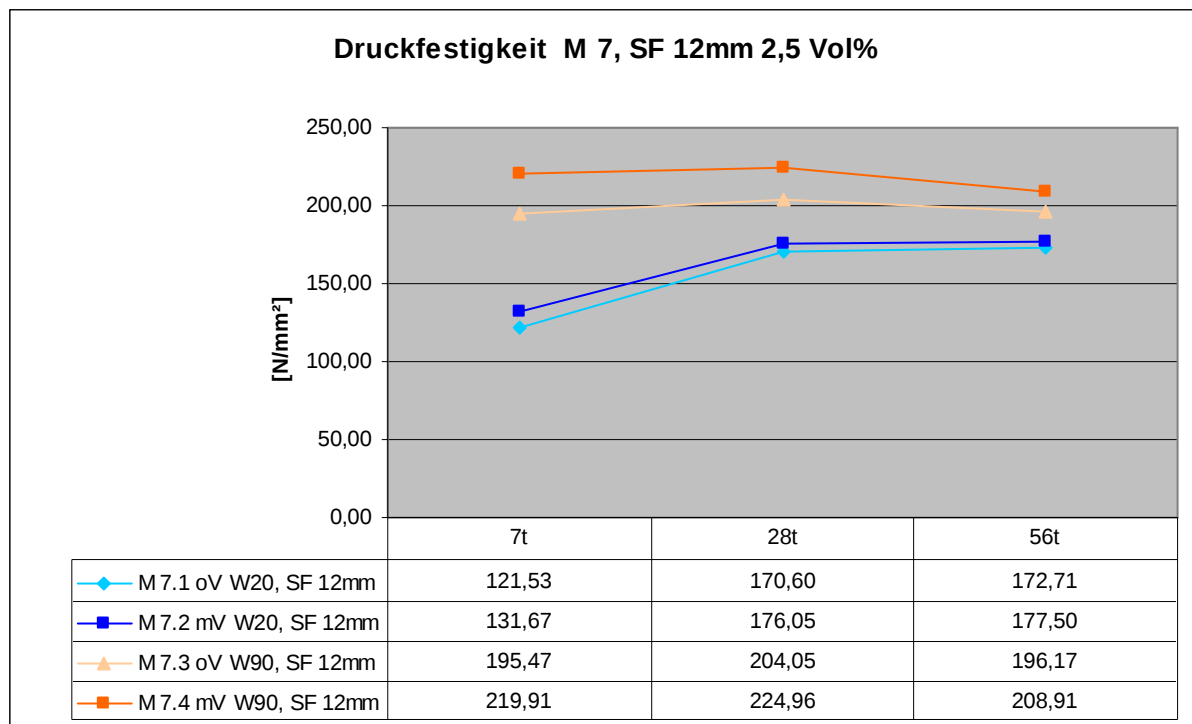
Der Vergleich der Frisch- und Festbetonrohddichten zeigt, dass nur die Mischung M 7.3 oV eine größere Rohdichtendifferenz von 50 kg/m³ aufweisen kann. Bei allen anderen Mischungen betragen die Abweichungen weniger als 10 kg/m³. Auffallend ist auch, dass alle Festbetonrohddichten der einzelnen Mischungen unter den Werten der Frischbetonrohddichten liegen. Die gleichen Mischungen M 7.1 oV und M 7.3 oV bzw. M 7.2 mV und M 7.4 mV konnten ähnlich große Frisch- als auch Festbetonrohddichten erzielen. Lediglich die bereits erwähnte M 7.3 oV weicht etwas stärker von den anderen ab.

In Abbildung 76 ist der Verlauf der Biegezugfestigkeiten dargestellt. Während die Probe M 7.1 oV nach 7 Tagen eine Biegezugfestigkeit von ca. 12 N/mm² aufweisen konnte und am 28. Tag auf 20 N/mm² anstieg und diese Festigkeit auch nach 56. Tagen aufweisen konnte, erreichte die Probe M 7.2 mV nach 7 Tagen 14 N/mm², stieg nach 28. Tagen auf mehr als 20 N/mm² an und erhöhte sich nach 56. Tagen auf 22 N/mm². Die heißwassergelagerten Proben konnten die Festigkeit vom 7. auf den 28. Tag um 5 bis 12 % steigern, fallen jedoch am 56. Tag wieder leicht ab. Durch das Vakuummischen konnte die Biegezugfestigkeit nach 56. Tagen bei den Proben

M7.1 oV und M 7.2 mV um 10 % und bei den Proben M 7.3 oV und M 7.4 mV um 12 % gesteigert werden. Mit Hilfe der Heißwasserlagerung konnten die Biegezugfestigkeiten der Proben ohne Vakuum um 25 % und der Proben mit Vakuum um 27 % gesteigert werden.



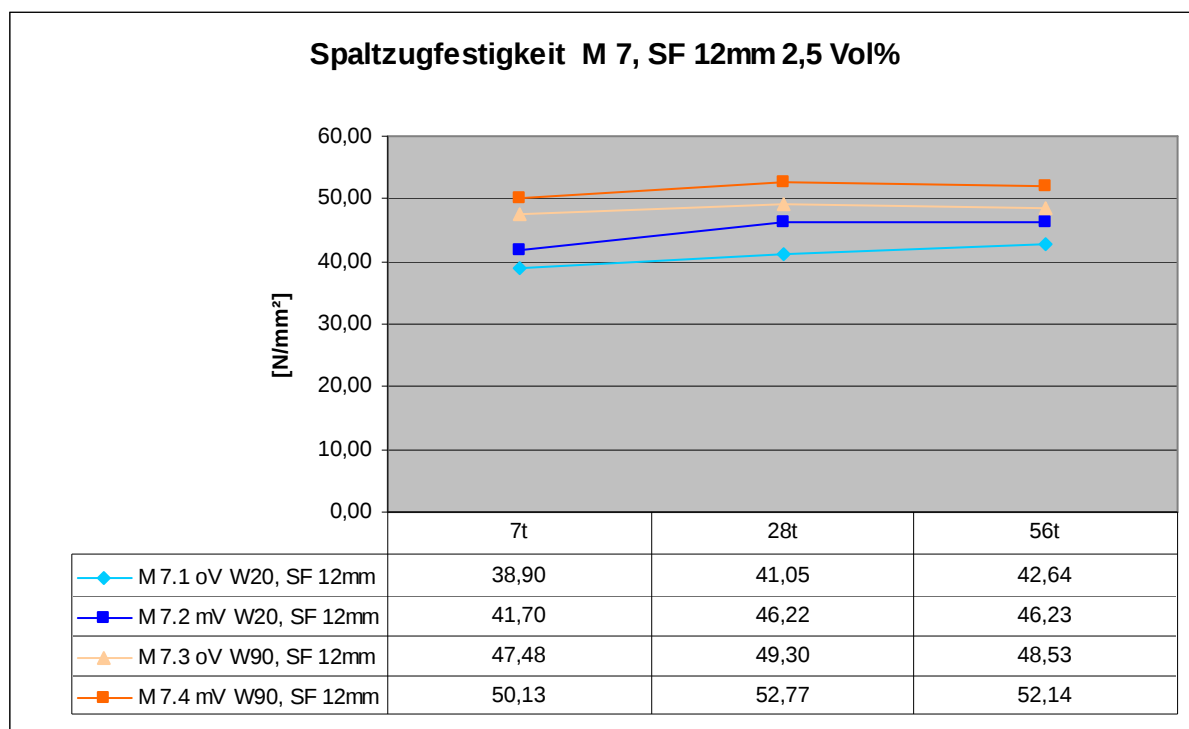
**Abbildung 76: Biegezugfestigkeiten Mischung M 7**



**Abbildung 77: Druckfestigkeiten Mischung M 7**

Die Verläufe der Druckfestigkeiten der Mischreihe M 7 zeigen einerseits, dass die Proben aus dem 20 °C Wasserbecken im Laufe der Zeit an Festigkeit zunehmen, und andererseits dass die Proben aus dem 90 °C Heißwasser vom 7. auf den 28. Tag an Festigkeit zunehmen, vom 28. auf den 56. Tag aber wieder etwas an der Festigkeit verlieren. Durch den Luftentzug während des Mischens konnte die Druckfestigkeit bei den Proben M 7.1 mV um 8 % nach 7 Tagen, um 3 % nach 28 Tagen und um 2,7 % nach 56 Tagen erhöht werden. Die Probe M 7.3 oV konnte eine Festigkeitssteigerung durch das Vakuummischen von 12 % nach 7 Tagen, von 10 % nach 28 Tagen und 6 % nach 56 Tagen erzielen. In der Abbildung 77 erkennt man auch, dass die Heißwasserlagerung die Druckfestigkeit im Durchschnitt um 64 % nach 7 Tagen und um 15 % nach 56 Tagen ansteigen lässt.

Bei der Betrachtung der Spaltzugfestigkeitsverläufe aus der Abbildung 78 sieht man ganz gut, dass bei allen Mischungen die Festigkeiten bis zum 28. Tag zunehmen und diese Festigkeit im Laufe der Zeit gehalten wird. 3 bis 5 N/mm<sup>2</sup> konnte bei allen Mischungen durch den Vakuumeinfluss gewonnen werden. Mit Hilfe der Heißwasserlagerung konnten die Spaltzugfestigkeiten der verschiedenen Mischungen um 6 bis 8 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden.



**Abbildung 78: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 7**

## 6.10 Mischung M 8: Stahlfaser 6/12 mm 3,5 Vol%

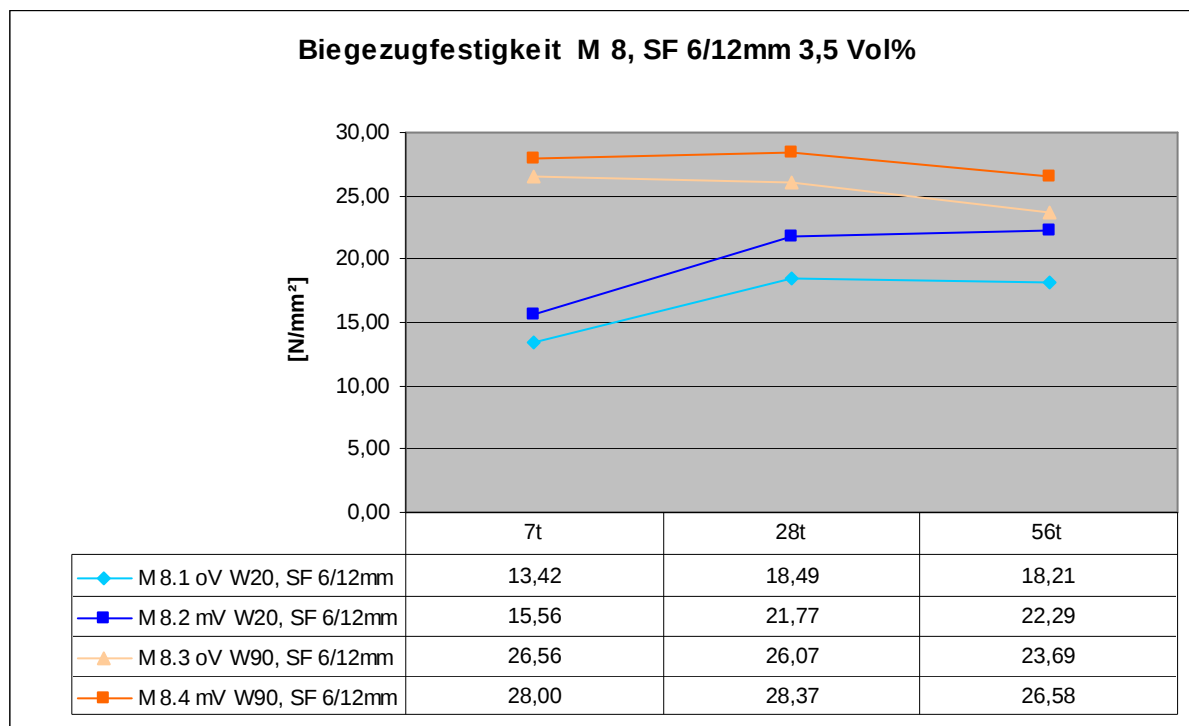
Für die Mischreihe M 8 wurde ein Fasermix aus 6 mm und 12 mm langen Stahlfasern verwendet. Der Fasergehalt wurde auf 3,5 Vol% erhöht, wobei 1,5 Vol% Stahlfasern mit 6 mm und 2,5 Vol% Stahlfasern mit 12 mm verarbeitet wurden. Der Faseranteil wurde wieder vom Stoffraum des Sandes abgezogen. Dadurch änderte sich der Sandanteil für die vier Mischungen auf 781,75 kg/m<sup>3</sup>, im Gegensatz zur Vormischung M 7, wo der Sandanteil 808,25 kg/m<sup>3</sup> aufwies. Die Tabelle 49 zeigt die Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten der Mischreihe 8 mit 6/12 mm Faserlänge.

**Tabelle 49: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 8**

| Bezeichnung                                |     | M 8.1 oV W20,<br>SF 6/12mm | M 8.2 mV W20,<br>SF 6/12mm | M 8.3 oV W90,<br>SF 6/12mm | M 8.4 mV W90,<br>SF 6/12mm |
|--------------------------------------------|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Temperatur [°C]                            |     | 38,0                       | 36,0                       | 38,0                       | 35,0                       |
| Ausbreitmaß [cm]                           |     | 23,5                       | 24,5                       | 22,5                       | 22,0                       |
| Luftporengehalt [%]                        |     | 4,0                        | 0,8                        | 4,1                        | 0,8                        |
| Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ] |     | 2509,0                     | 2587,0                     | 2516,5                     | 2590,5                     |
| Festbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]   |     | 2468,6                     | 2552,3                     | 2509,2                     | 2576,6                     |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 13,42                      | 15,56                      | 26,56                      | 28,00                      |
|                                            | 28t | 18,49                      | 21,77                      | 26,07                      | 28,37                      |
|                                            | 56t | 18,21                      | 22,29                      | 23,69                      | 26,58                      |
| $\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]            | 7t  | 130,91                     | 133,30                     | 203,14                     | 204,20                     |
|                                            | 28t | 168,43                     | 181,30                     | 202,06                     | 221,83                     |
|                                            | 56t | 167,88                     | 178,21                     | 194,99                     | 207,90                     |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 36,87                      | 42,61                      | 49,53                      | 52,26                      |
|                                            | 28t | 41,15                      | 45,87                      | 50,91                      | 57,99                      |
|                                            | 56t | 44,75                      | 47,61                      | 50,46                      | 57,91                      |

Die Mischtemperaturen der Mischungen ohne Vakuum weisen dabei keinen Unterschied auf, da beide eine Temperatur von 38 °C nach dem Mischablauf aufwiesen. Auch die beiden Mischungen mit Vakuum unterscheiden sich kaum, da sie nur 1 °C voneinander abweichen. Die Konsistenz der Frischbetone lag nicht so deutlich bei einander. Die Mischung M 8.1 oV erzielte ein Ausbreitmaß von 23,5 cm und dieselbe Mischung M 8.3 oV erreichte ein Ausbreitmaß von 22,5 cm. Bei den Mischungen M 8.2 mV und M 8.4 mV konnten Ausbreitmaße in der Höhe von 24,5 cm und 22 cm gemessen werden. Weichen die Ausbreitmaße der nicht Vakuum und Vakuum Mischungen stark ab, so liegen die Luftporengehalte wieder eng beieinander. Die nicht Vakuum gemischte Frischbetone erreichten Luftgehalte von 4,0 und 4,1 %, bei den Vakuum gemischten Frischbetonen konnten Luftporenwerte

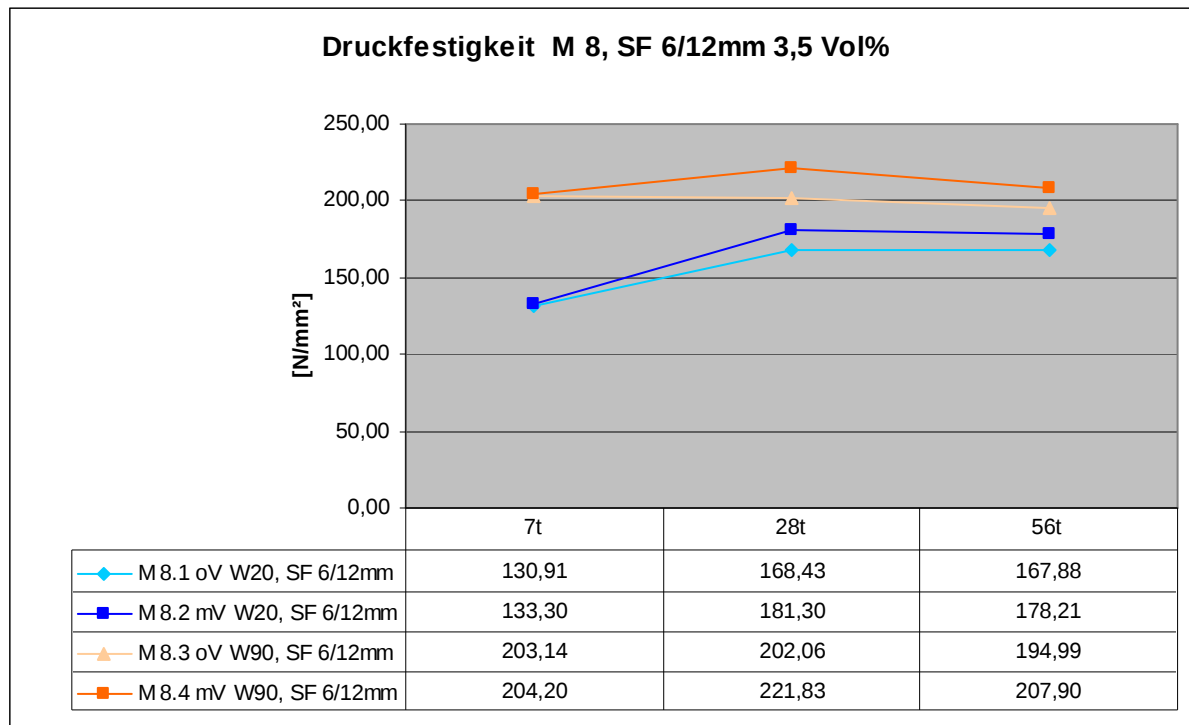
von 0,8 % gemessen werden. Auch die Frischbetonrohddichten der nicht Vakuum gemischten bzw. der Vakuum gemischten Betone liegen enger zusammen. Die Abweichung der Rohddichte beträgt bei den Mischungen M 8.1 oV und M 8.3 oV 7,5 kg/m<sup>3</sup> und bei den Mischungen M 8.2 mV und M 8.4 mV nur 3,5 kg/m<sup>3</sup>. Die Abweichungen der Festbetonrohddichten fallen etwas größer aus. So weichen die Proben M 8.1 oV und M 8.3 oV um ca. 50 kg/m<sup>3</sup> und die Proben M 8.2 mV und m 8.4 mV um 24 kg/m<sup>3</sup> ab. Für alle vier Proben gilt aber, dass die Festbetonrohddichten immer unter den Frischbetonrohddichten liegen.



**Abbildung 79: Biegezugfestigkeiten Mischung M 8**

Die Biegezugfestigkeiten nach 7 Tagen der heißwassergelagerten Proben liegen fast um das Doppelte höher als die Werte der Proben mit normaler Wasserlagerung. Am 28. und 56. Tag liegen die Festigkeiten der Proben aus dem 90 °C Becken im Durchschnitt um 6 N/mm<sup>2</sup> höher als die Festigkeiten der Proben aus dem 20 °C Becken. Während sich der maximale Biegezugwert bei den Proben mit 20 °C Wasserlagerung eher am 56. Tag bildet, liegen die Höchstwerte bei den Proben mit Heißwassernachbehandlung am 7. und 28. Tag. Am 56. Tag fallen diese Werte ab. Der Vakuumeinfluss brachte bei allen Mischungen eine Festigkeitserhöhung um 2 bis 4 N/mm<sup>2</sup>.

Bei einem Blick auf den Druckfestigkeitsverlauf der Mischreihe M 8 sieht man, dass der Vakuummischprozess am 7. Tag kaum einen Einfluss hatte und erst am 28. bzw. 56. Tag deutlicher wird. Bei allen vier Proben fiel die Druckfestigkeit vom 28. auf den 56. Tag leicht ab. Nach 56 Tagen konnte die Festigkeit von M 8.1 oV und M 8.3 oV durch den Vakuumeffekt um ca. 6 % gesteigert werden. Durch die 90 °C Heißwassernachbehandlung konnten die Druckfestigkeiten der Mischreihe M 8 um 16 % erhöht werden.



**Abbildung 80: Druckfestigkeiten Mischung M 8**

Die Verläufe der Spaltzugfestigkeiten der Mischung M 8 sind im Bild 81 aufgezeichnet. Man erkennt, dass die Proben aus dem normalen Wasserbecken im der Zeit an Festigkeit gewinnen, während die Proben aus dem Warmwasserbecken die Spaltzugfestigkeiten vom 28. Tag auf den 56. Tag kaum verändern. Der Einfluss des Vakuummischens bracht eine Erhöhung der Spaltzugfestigkeit bei den Proben M 8.1 oV von 6 N/mm² nach 7 Tagen, von 4 N/mm² nach 28 Tagen und 3 N/mm² nach 56 Tagen bzw. bei den Proben M 8.3 oV von 3 N/mm² nach 7 Tagen und 7 N/mm² nach 28 und 56 Tagen. Mit Hilfe der Heißwassernachbehandlung konnte die Spaltzugfestigkeit im Durchschnitt um 10 N/mm² gesteigert werden.

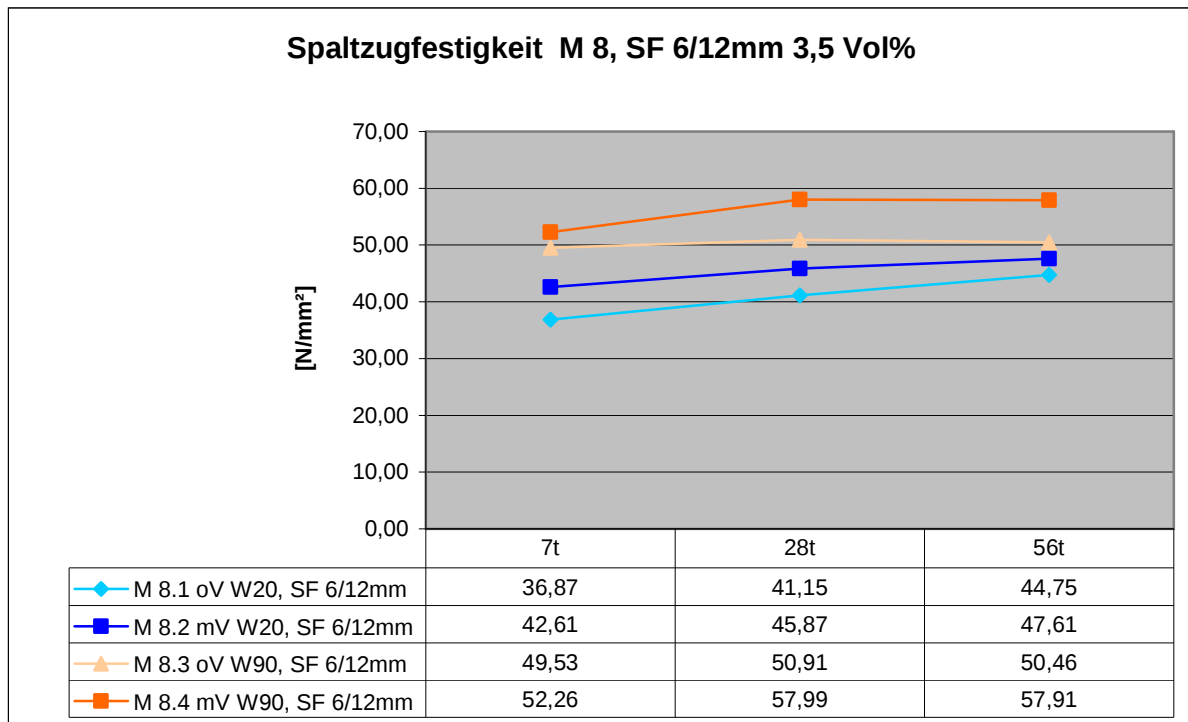


Abbildung 81: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 8

### 6.11 Mischung M 9: Carbon-Nanotubes 0,5 g

Da noch keine Vergleichsmischungen für UHPC mit Carbon-Nanotubes vorhanden sind, wählte man für die Mischreihe M 9 die Zugabe von 0,5 g Carbon-Nanotubes zu der Nullmischung M 0. Da sich die CNTs im Aufbewahrungsbehälter zu größeren Agglomeraten zusammenschlossen, mussten die Partikel zur Aufbereitung mittels eines Ultraschallgerätes wieder gelöst werden. Da die CNTs im menschlichen Körper eine krebserregende Wirkung haben und allergische Reaktionen hervorrufen können, wurden bei der Vorbereitung eine Schutzkleidung und eine Atemmaske verwendet. Zuerst wurden die Carbon-Nanotubes mit einem kleinen Löffel vorsichtig vom Aufbewahrungsbehälter auf die Waage gelegt, bis die gewünschte Menge von 0,5 g erreicht wurde. In der Abbildung 82 sind der CNT-Behälter und die Carbon-Nanotubes erkennbar. Im nächsten Schritt wurden 300 ml Wasser in einem Behälter vorbereitet und die CNTs dazu geleert. Danach wurde das Ultraschallgerät gestartet und die CNTs begannen sich im Wasserbehälter aufzulösen. Nach wenigen Sekunden verfärbt sich das Wasser komplett schwarz. Der Vorgang mit dem Ultraschallgerät ist in Abbildung 83 dargestellt.



Abbildung 82: linkes Bild: CNT-Behälter; rechtes Bild: CNT mit 0,5 g

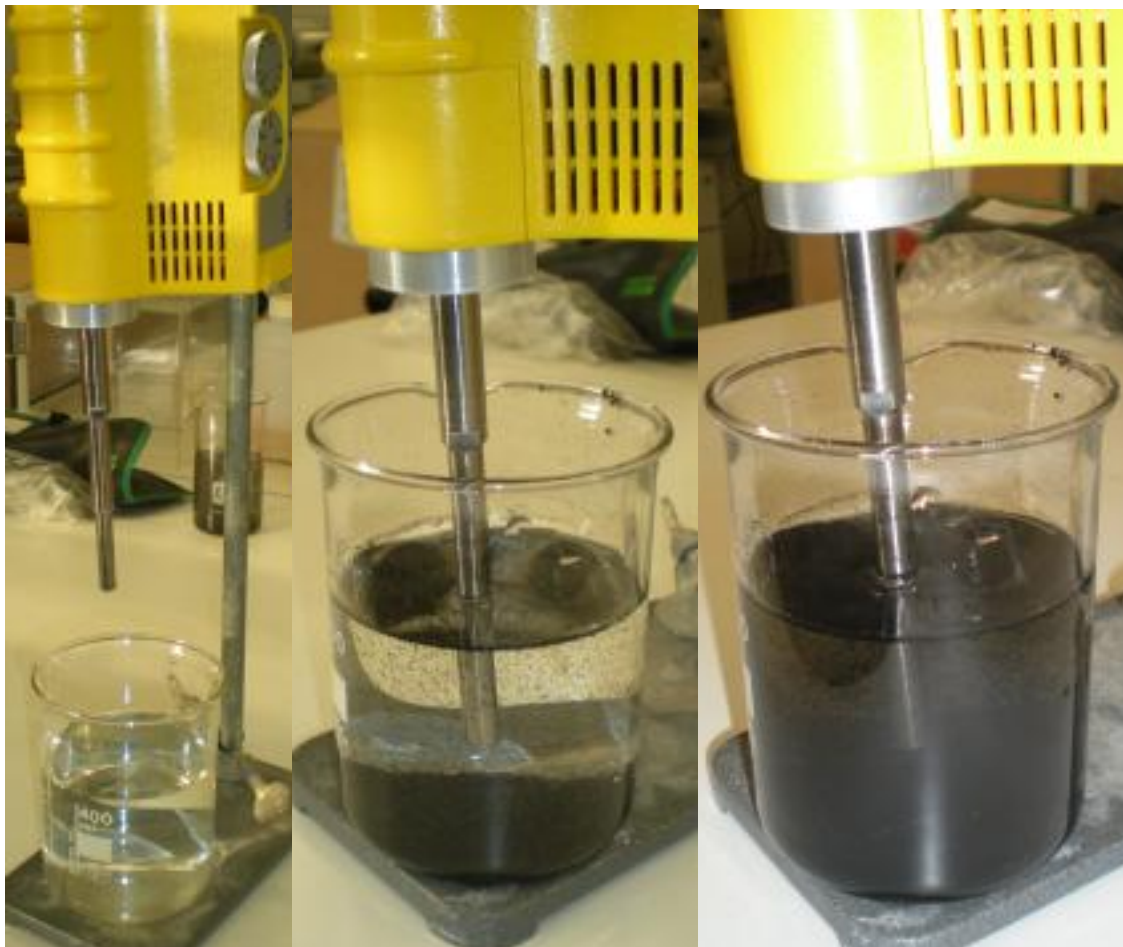


Abbildung 83: Aufbereitung der CNTs mittels Ultraschalgerät

Das Ultraschallgerät wurde nach ca. 10 Minuten abgeschaltet und der gesamte Vorgang wurde für die drei anderen Mischungen dieser Serie wiederholt. Danach wurden das restliche Wasser, welches für die genaue Mischrezeptur benötigt wurde, und das Fließmittel dazugegeben. Der gesamte Behälter mit Wasser, Fließmittel und CNTs wurde im 2. Abschnitt des Mischprozesses langsam und sorgfältig in den Mischer geleert.

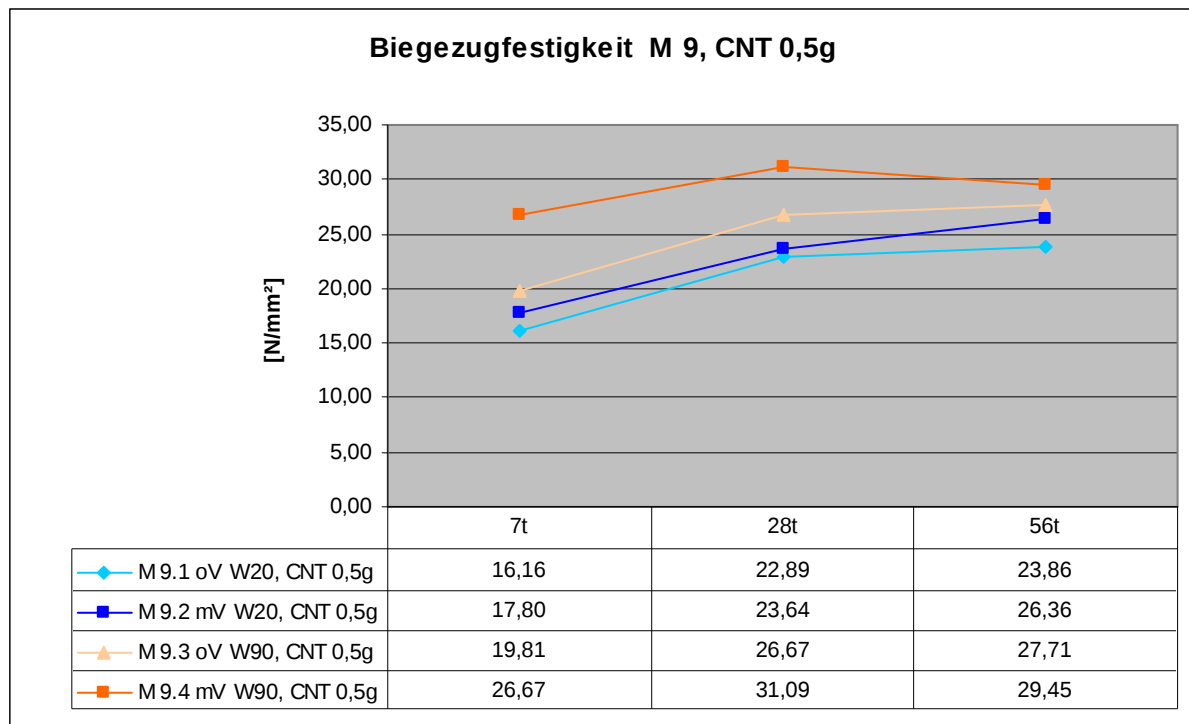
**Tabelle 50: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 9**

| Bezeichnung                   |     | M 9.1 oV W20,<br>CNT 0,5g | M 9.2 mV W20,<br>CNT 0,5g | M 9.3 oV W90,<br>CNT 0,5g | M 9.4 mV W90,<br>CNT 0,5g |
|-------------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Temperatur [°C]               |     | 39,0                      | 39,0                      | 39,0                      | 37,0                      |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 24,0                      | 25,5                      | 24,5                      | 25,0                      |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,9                       | 0,9                       | 5,1                       | 0,8                       |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2298,0                    | 2402,0                    | 2304,0                    | 2405,5                    |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2319,6                    | 2386,0                    | 2261,6                    | 2384,1                    |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 16,16                     | 17,80                     | 19,81                     | 26,67                     |
|                               | 28t | 22,89                     | 23,64                     | 26,67                     | 31,09                     |
|                               | 56t | 23,86                     | 26,36                     | 27,71                     | 29,45                     |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 104,84                    | 116,57                    | 175,55                    | 207,12                    |
|                               | 28t | 144,56                    | 153,89                    | 170,97                    | 203,78                    |
|                               | 56t | 147,57                    | 161,73                    | 177,83                    | 201,90                    |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 20,78                     | 23,53                     | 26,35                     | 31,12                     |
|                               | 28t | 21,24                     | 25,18                     | 27,42                     | 30,65                     |
|                               | 56t | 21,31                     | 25,74                     | 28,14                     | 31,03                     |

In der Tabelle 50 ist ein Vergleich der Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten der vier CNT-Mischungen aufgelistet. Man kann erkennen, dass sich die Mischtemperaturen, die Ausbreitmaße und die Luftporengehalte der gleichen Mischungen M 9.1 oV und M 9.3 oV bzw. M 9.2 mV und M 9.4 mV kaum unterscheiden. So stellten sich, abgesehen von der vierten Mischung M 9.4 mV, immer 39 °C ein und auch die Ausbreitmaße schwanken nur um 0,5 cm und liegen bei allen vier Mischungen immer bei 24 und 25 cm. Die Luftporengehalte der nicht Vakuum gemischten Frischbeton erzielten Werte von 4,9 und 5,1 %. Durch das Vakuummischen konnten die Werte auf 0,9 und 0,8 % gesenkt werden. Die Frischbetonrohddichten der Mischungen M 9.1 oV und M 9.3 oV liegen mit 2298 und 2304 kg/m³ genauso eng beieinander wie die Mischungen M 9.2 mV und M 9.4 mV mit 2402 und 2405,5 kg/m³. Bei den Festbetonrohddichten fällt auf, dass nur die Vakuum behandelten Proben fast identische Werte aufweisen konnten. Bei den nicht Vakuum behandelten Proben weicht die Rohddichte nach 28. Tagen um 58 kg/m³ ab.

Abgesehen von der Probe M 9.1 oV liegen alle Festbetonrohddichten unterhalb der Werte von den Frischbetonrohddichten.

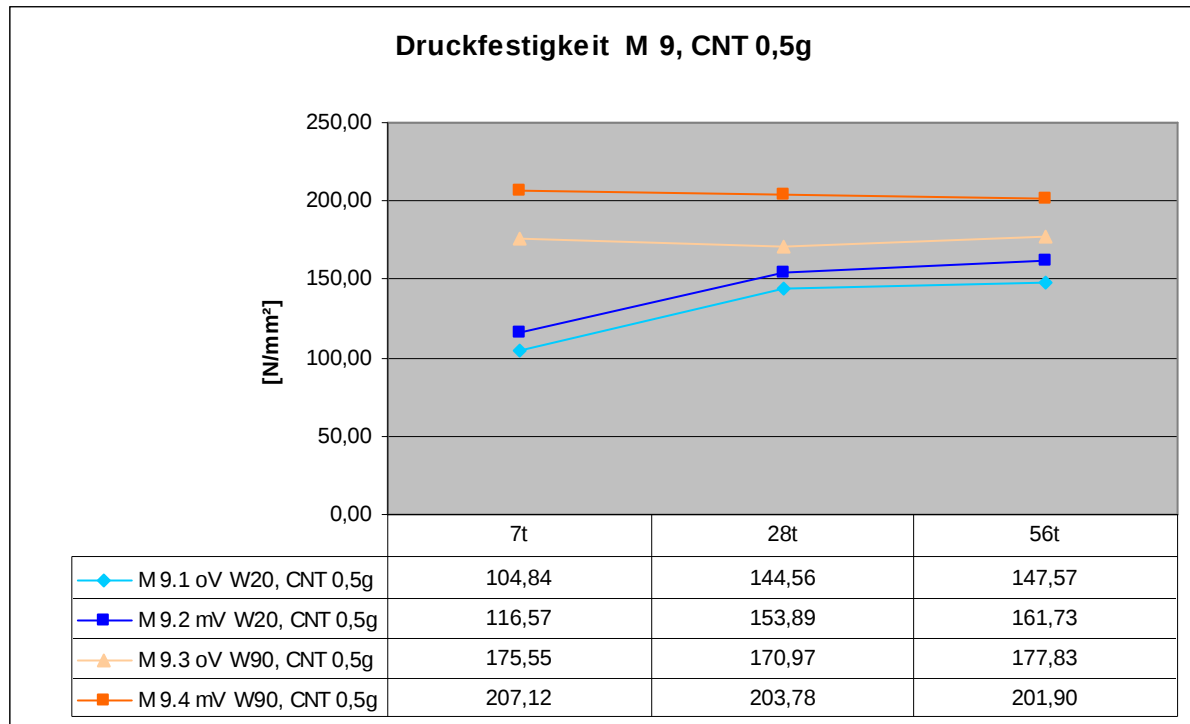
Die Biegezugfestigkeiten der Proben M 9.1 oV und M 9.2 mV unterscheiden sich in den ersten 28 Tagen nur wenig, erst am 56. Tag ist ein größerer Festigkeitssprung zu erkennen. Bei den Heißwasserbehandelten Proben M 9.3 oV und M 9.4 mV konnte genau das Gegenteil beobachtet werden. Während der Festigkeitsunterschied nach 7 Tagen 7 N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen ca. 5 N/mm<sup>2</sup> beträgt, reduziert sich der Festigkeitssprung nach 56. Tagen auf weniger als 2 N/mm<sup>2</sup>. Weiters ist in der Abbildung 84 sichtbar, dass die Heißwasserbehandlung bei den Proben ohne Vakuum die Biegezugfestigkeit nur um 3 bis 4 N/mm<sup>2</sup> erhöht, die Proben mit Vakuum konnten Unterschiede von 9 bis 8 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Nur am 56. Tag beträgt der Festigkeitsunterschied zwischen M 9.2 mV und M 9.4 MV 3 N/mm<sup>2</sup>.



**Abbildung 84: Biegezugfestigkeiten Mischung M 9**

Gleich bei der Betrachtung der Druckfestigkeiten fällt auf, dass die CNT-Mischungen eher konstante Verläufe verursachen und daher die Festigkeiten mit der Zeit nicht stark erhöhen. Nur die Proben aus dem 20 °C Wasserbecken entwickeln die Druckfestigkeit in den ersten 28 Tagen schneller. Bei allen vier Mischungen ändert sich die Druckfestigkeit vom 28. auf den 56. Tag nur mehr zwischen 1 und 5 %. Der Vakuumeinfluss konnte die Festigkeit bei den Proben M 9.1 oV um durchschnittliche

10 % erhöhen und bei den Proben M 9.3 oV konnte eine Festigkeitssteigerung von ca. 15 % erzielt werden. Die Vakuum gemischten Proben aus der Heißwasserlagerung konnten an allen Prüftagen Druckfestigkeitswerte von über 200 N/mm<sup>2</sup> erzielen.



**Abbildung 85: Druckfestigkeiten Mischung M 9**

Auch die Spaltzugfestigkeiten verlaufen eher konstant und zeigen keine rapiden Steigerungen auf. Im Laufe der Zeit erhöht sich die Spaltzugfestigkeit um maximal ca. 2 N/mm<sup>2</sup>. Am 7. Tag brachte die Vakuumbehandlung der Probe M 9.1 oV eine Steigerung um 13 % ein und bei der Probe M 9.3 oV sprang die Spaltzugfestigkeit um 18 % an. Am 56. Tag konnte Probe M 9.2 mV eine um 20 % höhere Spaltzugfestigkeit aufweisen als die gleiche nicht Vakuum gemischte Probe M 9.1 oV. Bei der Probe M 9.4 mV lag die Festigkeit um 10 % höher als die Vergleichsprobe ohne Vakuum. Durch die Heißwasserlagerung konnten die Proben M 9.3 oV und M 9.4 mV immer Spaltzugfestigkeiten von über 26 bzw. 30 N/mm<sup>2</sup> aufweisen.

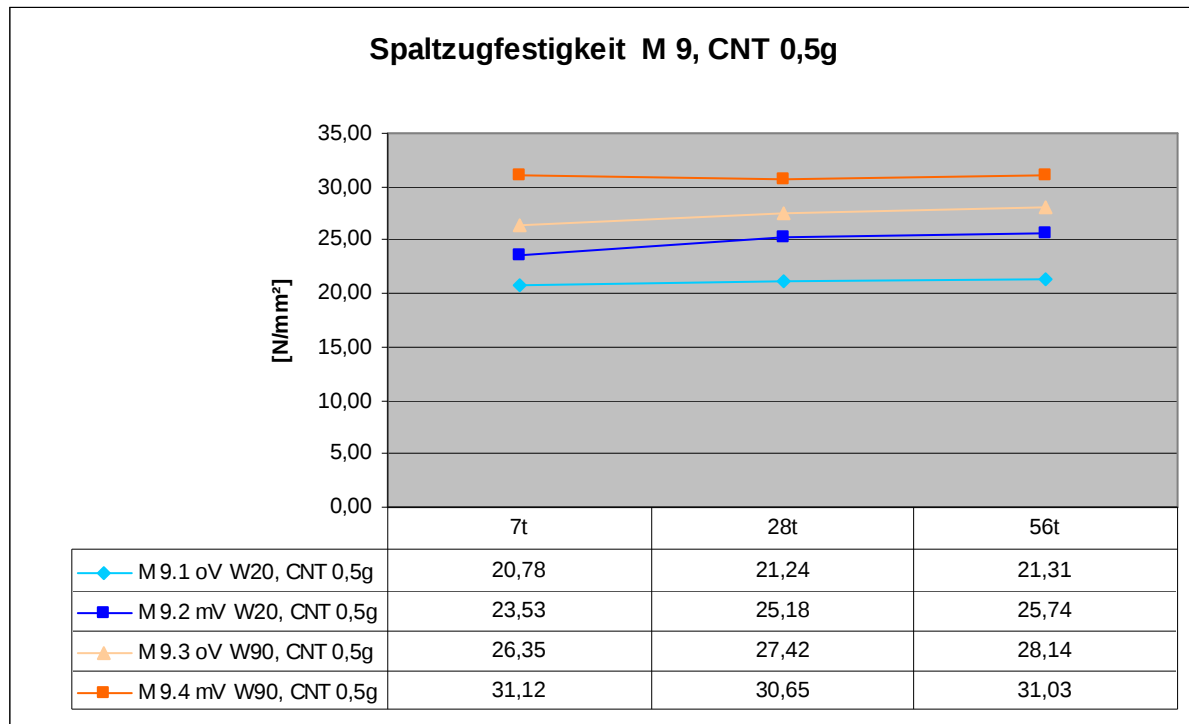


Abbildung 86: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 9

### 6.12 Mischung M 10: Carbon-Nanotubes 1,0 g

Für die vier Mischungen der Reihe M 10 wurde der CNT-Gehalt auf 1,0 g verdoppelt und aus Ausgangsbasis diente wieder die Mischrezeptur der Nullmischung. Wie bereits bei der Mischung M 9 mussten die Carbon-Nanotubes mit einem Ultraschallgerät vorbehandelt werden, damit sich die größeren Partikel auflösen. Abbildung 87 zeigt die Einwaage der Carbon-Nanotubes auf 1,0 g.

In Tabelle 51 ist ein Vergleich der Frischbetoneigenschaften, der Biegezug-, der Druck- und Spaltzugfestigkeiten der vier Mischungen dargestellt. Die Mischtemperaturen der nicht Vakuum bzw. der mit Vakuum behandelten Frischbetone weichen immer um 1 °C ab, bleiben aber immer in einem Temperaturbereich von 36 bis 39 °C. Bei allen vier Mischungen konnten ein durchschnittliches Ausbreitmaß von 24,5 cm gemessen werden. Diese Ähnlichkeit zeigt sich auch beim Luftgehalt der vier Frischbetone. So konnten Luftporengehalte bei den Mischungen M 10.1 oV und M 10.3 oV von 5,1 und 5,0 % gemessen werden, während durch das Vakuummischen der Luftgehalt im Beton bei den Mischungen M 10.2 mV und M 10.4 mV auf 0,8 % gesenkt werden konnte. Bei der Mischreihe M 10

weichen die Frischbetondichten etwas mehr ab, als wie bei der Mischreihe M 9. So stellten sich bei den Betonen ohne Vakuum 2288,5 und 2308,5 kg/m<sup>3</sup> ein und bei den Frischbetonen mit Vakuum wurden Rohdichten von 2409,5 und 2415,5 kg/m<sup>3</sup> gemessen. Die Rohdichten der Festbetone ohne Vakuum unterscheiden sich nur um 5 kg/m<sup>3</sup> und die der Festbetone mit Vakuum weichen fast 60 kg/m<sup>3</sup> von einander ab. Abgesehen von der zweiten Mischung M 10.2 mV liegen alle Festbetonrohndichten unter den Rohdichten des jeweiligen Frischbetons.

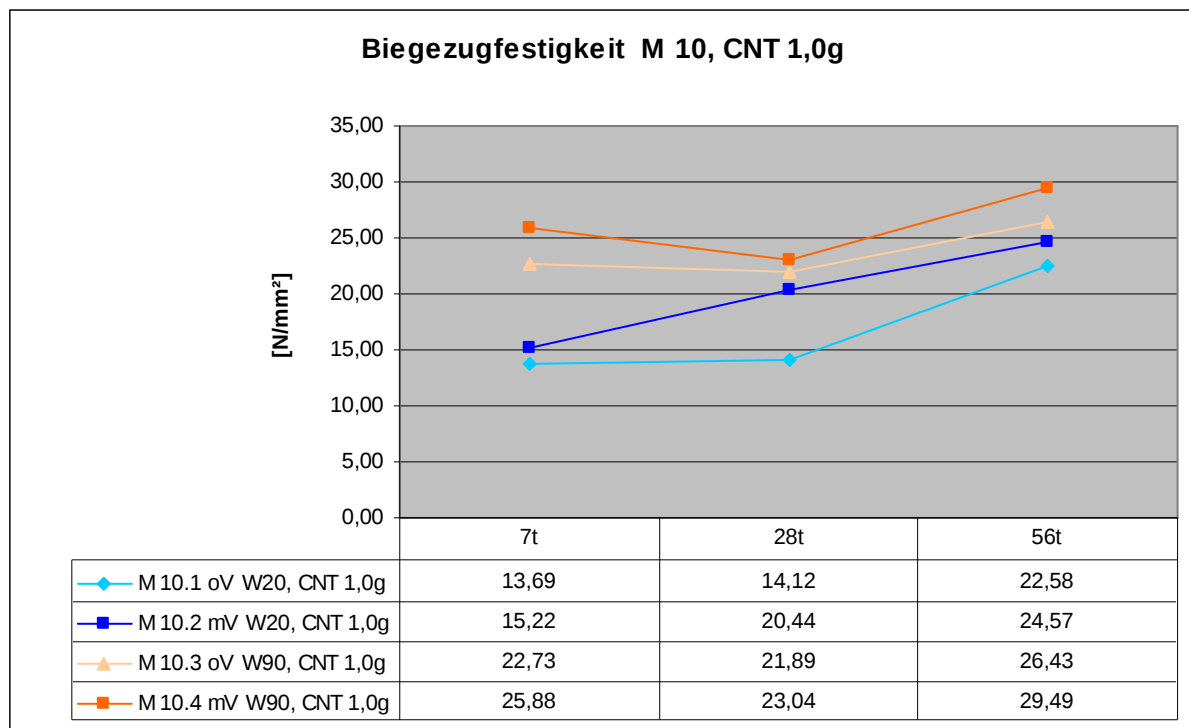


Abbildung 87: Carbon-Nanotubes 1,0 g

Tabelle 51: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 10

| Bezeichnung                                |     | M 10.1 oV W20,<br>CNT 1,0g | M 10.2 mV W20,<br>CNT 1,0g | M 10.3 oV W90,<br>CNT 1,0g | M 10.4 mV W90,<br>CNT 1,0g |
|--------------------------------------------|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Temperatur [°C]                            |     | 38,0                       | 37,0                       | 39,0                       | 36,0                       |
| Ausbreitmaß [cm]                           |     | 24,5                       | 24,5                       | 25,0                       | 24,0                       |
| Luftporengehalt [%]                        |     | 5,1                        | 0,8                        | 5,0                        | 0,8                        |
| Frischbetonrohndichte [kg/m <sup>3</sup> ] |     | 2288,5                     | 2409,5                     | 2308,5                     | 2415,5                     |
| Festbetonrohndichte [kg/m <sup>3</sup> ]   |     | 2264,3                     | 2460,7                     | 2269,7                     | 2402,0                     |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 13,69                      | 15,22                      | 22,73                      | 25,88                      |
|                                            | 28t | 14,12                      | 20,44                      | 21,89                      | 23,04                      |
|                                            | 56t | 22,58                      | 24,57                      | 26,43                      | 29,49                      |
| $\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]            | 7t  | 101,32                     | 106,47                     | 168,74                     | 221,40                     |
|                                            | 28t | 151,88                     | 159,13                     | 184,69                     | 222,99                     |
|                                            | 56t | 156,58                     | 163,55                     | 183,68                     | 204,68                     |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 20,20                      | 30,19                      | 33,72                      | 36,31                      |
|                                            | 28t | 27,69                      | 29,95                      | 33,92                      | 37,28                      |
|                                            | 56t | 28,81                      | 30,83                      | 34,11                      | 36,71                      |

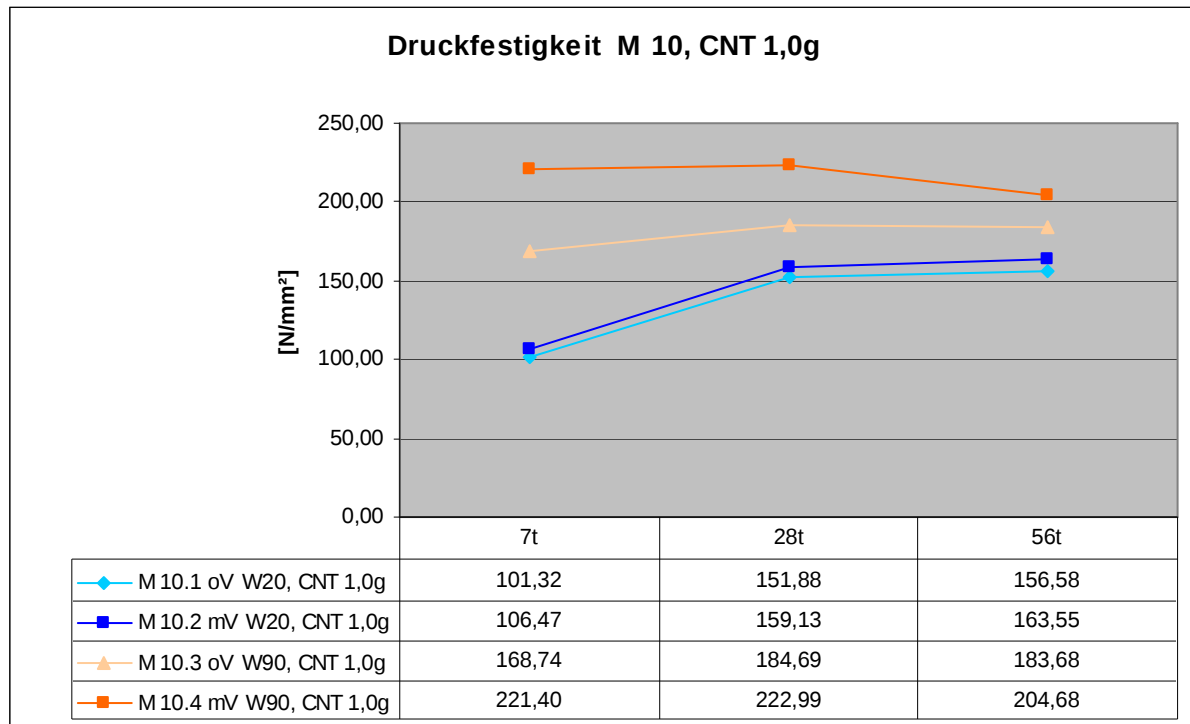
Bei den Biegezugfestigkeitsverläufen aus Abbildung 88 kann man sehen, dass alle vier Proben sich stark voneinander unterscheiden. Die Probe M 10.1 oV erreicht nach 7 Tagen eine Festigkeit von fast 14 N/mm<sup>2</sup>, erhöht diese nach 28 Tagen kaum und steigt dann nach 56 Tagen auf 22 N/mm<sup>2</sup> an. Bei der Vakuum gemischten Probe M 10.2 mV konnte ein Festigkeitsanstieg an den Prüftagen um jeweils 5 N/mm<sup>2</sup> beobachtet werden. Die Probe M 10.3 oV verhält sich wieder ähnlich zur Probe M 10.1 oV. Sie hält die Festigkeit von ca. 22 N/mm<sup>2</sup> in den ersten 28 Tagen und erhöht sich dann auf 26 N/mm<sup>2</sup> nach 56 Tagen. Die letzte Probe M 10.4 mV kann eine Biegezugfestigkeit von mehr als 25 N/mm<sup>2</sup> nach 7 Tagen vorweisen, fällt dann jedoch auf 23 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen und springt am 56. Tag auf 29 N/mm<sup>2</sup>. Am 56. Tag liegen die Proben von M 10.1 oV bis M 10.4 mV immer um 2-3 N/mm<sup>2</sup> auseinander.



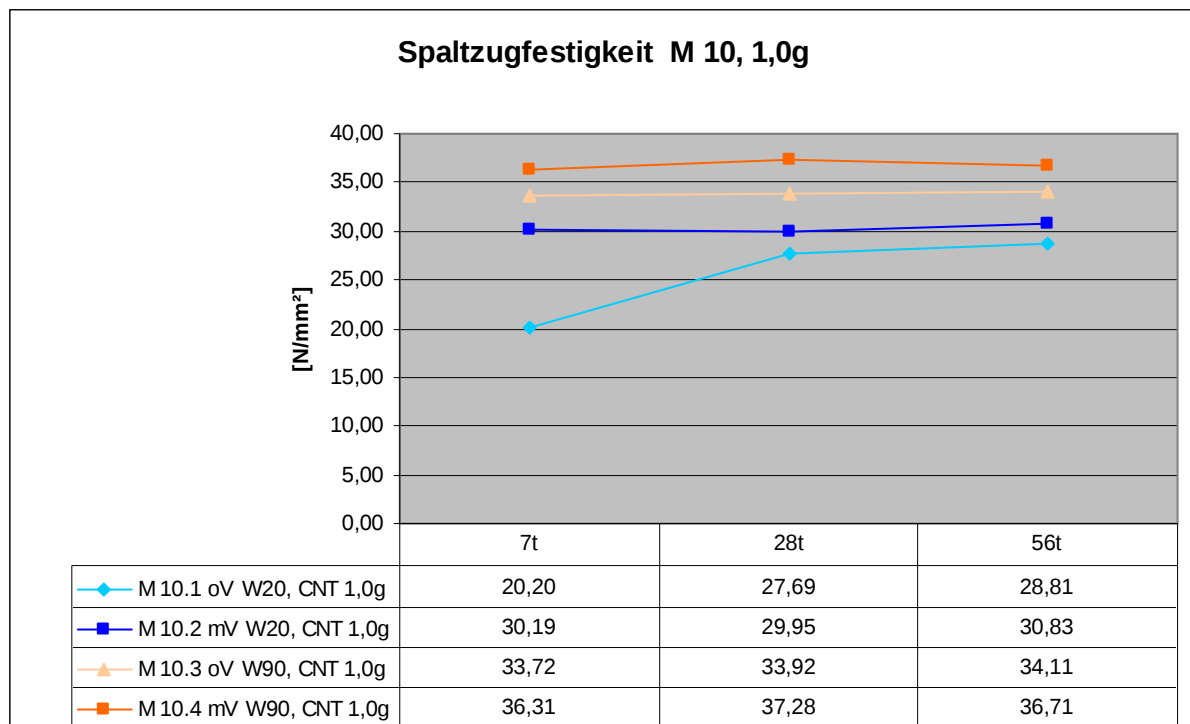
**Abbildung 88: Biegezugfestigkeiten Mischung M 10**

Die Druckfestigkeiten von den Proben M 10.1 oV und M 10.2 mV zeigen einen gleichen Verlauf auf und liegen immer zwischen 5-7 N/mm<sup>2</sup> auseinander. Die Druckfestigkeit von Probe M 10.3 oV steigt vom 7. auf den 28. Tag von 168 auf 184 N/mm<sup>2</sup> an, fällt am 56. Tag aber wieder leicht auf 183 N/mm<sup>2</sup> zurück. Bei der Probe M 10.4 weist die Festigkeit am 7. und 28. Tag einen Wert von ca. 222 N/mm<sup>2</sup> und springt dann auf 204 N/mm<sup>2</sup> nach 56 Tagen herab. Am 56. Tag konnte die

Druckfestigkeit durch den Vakuumeinfluss um 4 bzw. 11 % angehoben und durch die Nachbehandlung im Heißwasser eine Steigerung um 17 bzw. 25% erzielt werden.



**Abbildung 89: Druckfestigkeiten Mischung M 10**



**Abbildung 90: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 10**

Die Spaltzugfestigkeiten der Mischreihe M 10 werden in Abbildung 90 gezeigt. Während die Festigkeit der Probe M 10.1 oV vom 7. auf den 28. Tag um 7 N/mm<sup>2</sup> ansteigt, konnte sie in den nächsten vier Wochen noch um 1 N/mm<sup>2</sup> erhöht werden. Bei allen anderen Proben konnten keine großen Änderungen der Spaltzugfestigkeit wahrgenommen werden. Nach 56 Tagen lag die Festigkeit der vakuumgemischten Proben um 7 % höher als die nicht Vakuum gemischten Proben und die Heißwasserlagerung führte zu einer Erhöhung der Spaltzugfestigkeit von 19 %.

### 6.13 Mischung M 11: Stahlfaser 6 mm und Carbon-Nanotubes 1,0 g

In der Mischreihe M 11 wurden nun Carbon-Nanotubes mit Stahlfasern kombiniert. Als Ausgangsbasis wurde die Mischung M 6 mit 6 mm langen Stahlfasern und 2,5 Vol% Fasergehalt herangezogen. Die Stahlfaserzugabe erfolgt im 1. Mischabschnitt mit den anderen Feststoffen und die CNT-Zugabe wurde zusammen mit dem Wasser und Fließmittel durchgeführt.

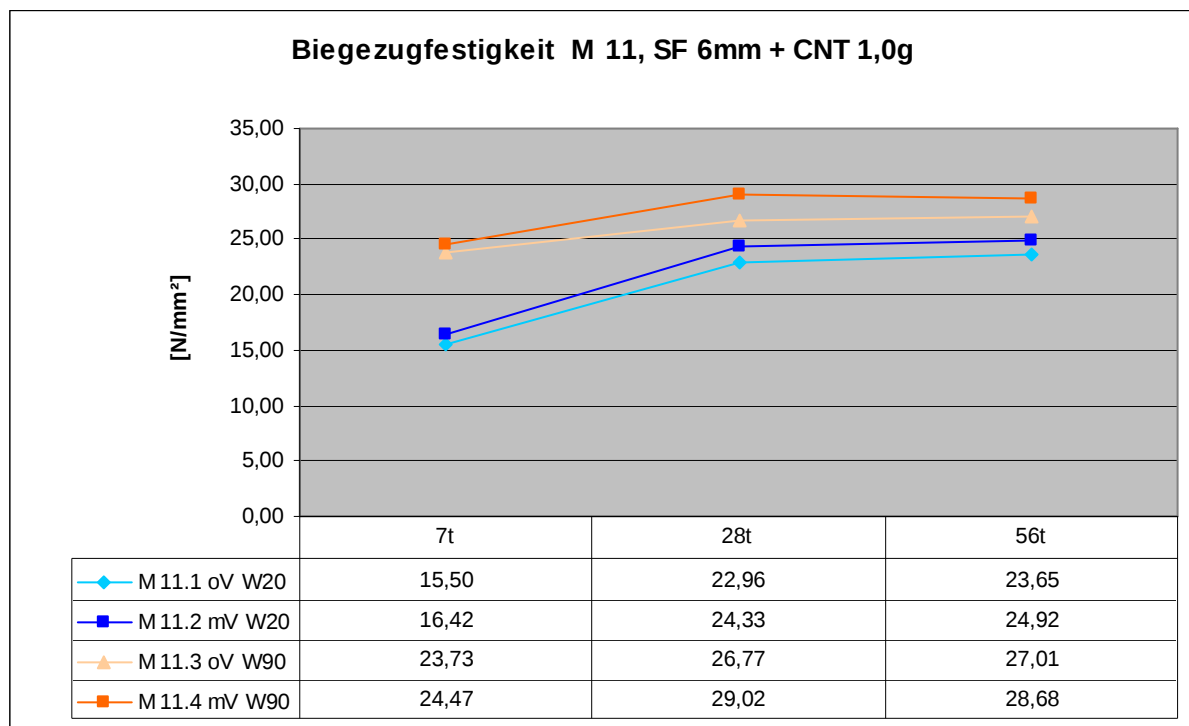
**Tabelle 52: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 11**

| Bezeichnung                                |     | M 11.1 oV W20 | M 11.2 mV W20 | M 11.3 oV W90 | M 11.4 mV W90 |
|--------------------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]                            |     | 41,0          | 38,0          | 40,0          | 38,0          |
| Ausbreitmaß [cm]                           |     | 26,0          | 25,0          | 25,5          | 24,5          |
| Luftporengehalt [%]                        |     | 4,6           | 0,8           | 4,7           | 0,8           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ] |     | 2439,5        | 2541,0        | 2441,0        | 2542,5        |
| Festbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]   |     | 2441,3        | 2572,3        | 2416,8        | 2456,8        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 15,50         | 16,42         | 23,73         | 24,47         |
|                                            | 28t | 22,96         | 24,33         | 26,77         | 29,02         |
|                                            | 56t | 23,65         | 24,92         | 27,01         | 28,68         |
| $\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]            | 7t  | 115,25        | 126,32        | 181,37        | 221,39        |
|                                            | 28t | 155,56        | 171,98        | 182,49        | 214,37        |
|                                            | 56t | 155,96        | 174,41        | 179,00        | 208,23        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 25,30         | 31,06         | 46,57         | 47,29         |
|                                            | 28t | 27,94         | 36,95         | 47,60         | 49,29         |
|                                            | 56t | 27,75         | 38,67         | 46,72         | 49,74         |

In der Tabelle 52 sieht man, dass weder die Mischtemperaturen, die Ausbreitmaße, die Luftgehalte oder die Frischbetonrohddichten der vier Mischungen stark abweichen. Nach dem Mischvorgang stellten sich Mischtemperaturen von 41 und 40 °C bzw. 38 °C ein. Alle vier gemessenen Ausbreitmaße unterschieden sich nur um 1,5 cm und es stellte sich ein durchschnittliches Ausbreitmaß von 25,2 cm ein.

Die Luftgehalte der beiden Frischbetone ohne Vakuum stellten sich auf 4,6 und 4,7 % ein. Ein Luftporengehalt von 0,8 % konnte bei den Frischbetonen mit Vakuum gemessen werden.

Die Frischbetonrohddichten der Mischungen M 11.1 oV und M 11.3 oV, als auch die Mischungen M 11.2 mV und M 11.4 mV, weichen nur um 1,5 kg/m<sup>3</sup> von einander ab. Nicht so deutlich fällt der Rohddichtenvergleich der Festbetone aus. Hier liegen die Proben M 11.1 oV und M 11.3 oV mit rund 25 KG/m<sup>3</sup> auseinander und die Proben M 11.2 mV und M 11.4 mV unterscheiden sich sogar um 116 kg/m<sup>3</sup>.



**Abbildung 91: Biegezugfestigkeiten Mischung M 11**

Die Biegezugfestigkeitsverläufe der vier unterschiedlichen Proben zeigen ähnliche Eigenschaften auf. Während sich die Festigkeiten vom 7. auf den 28. Tag steigern, ändern sie sich vom 28. auf 56. Tag kaum noch. Nach 56 Tagen konnte der Vakuumeinfluss die Festigkeiten um keine 2 N/mm<sup>2</sup> erhöhen und der Einfluss der Heißwasserlagerung konnte eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit um knappe 4 N/mm<sup>2</sup> zulassen.

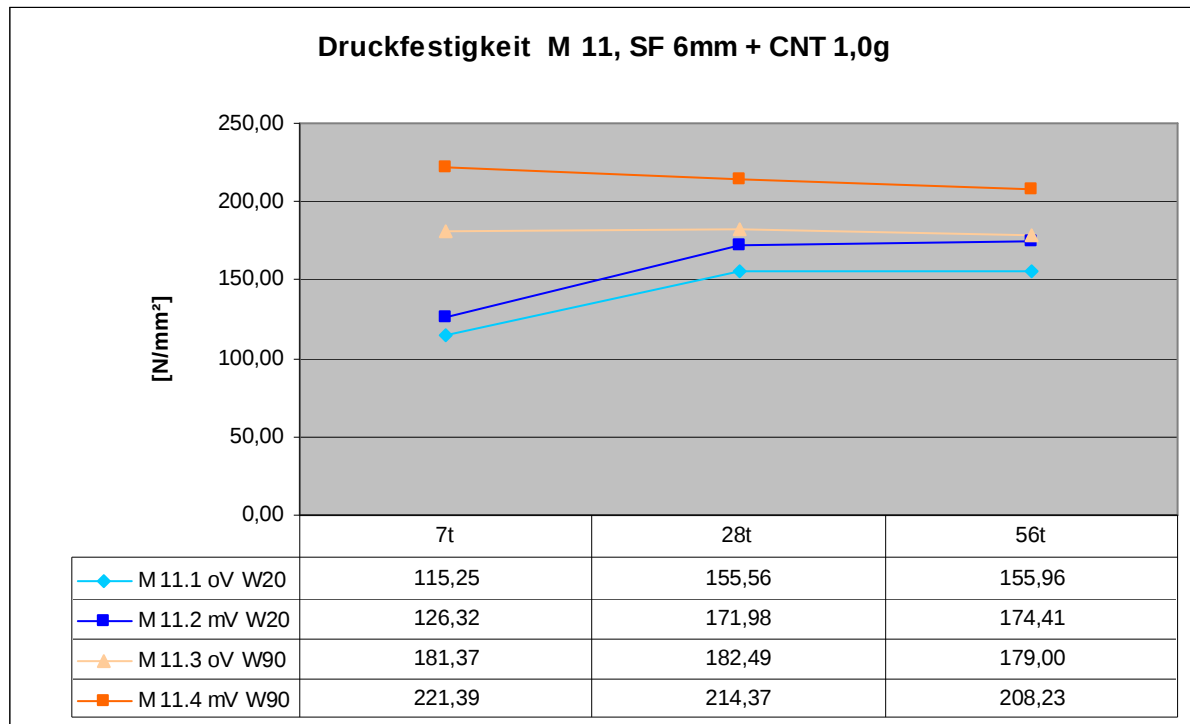


Abbildung 92: Druckfestigkeiten Mischung M 11

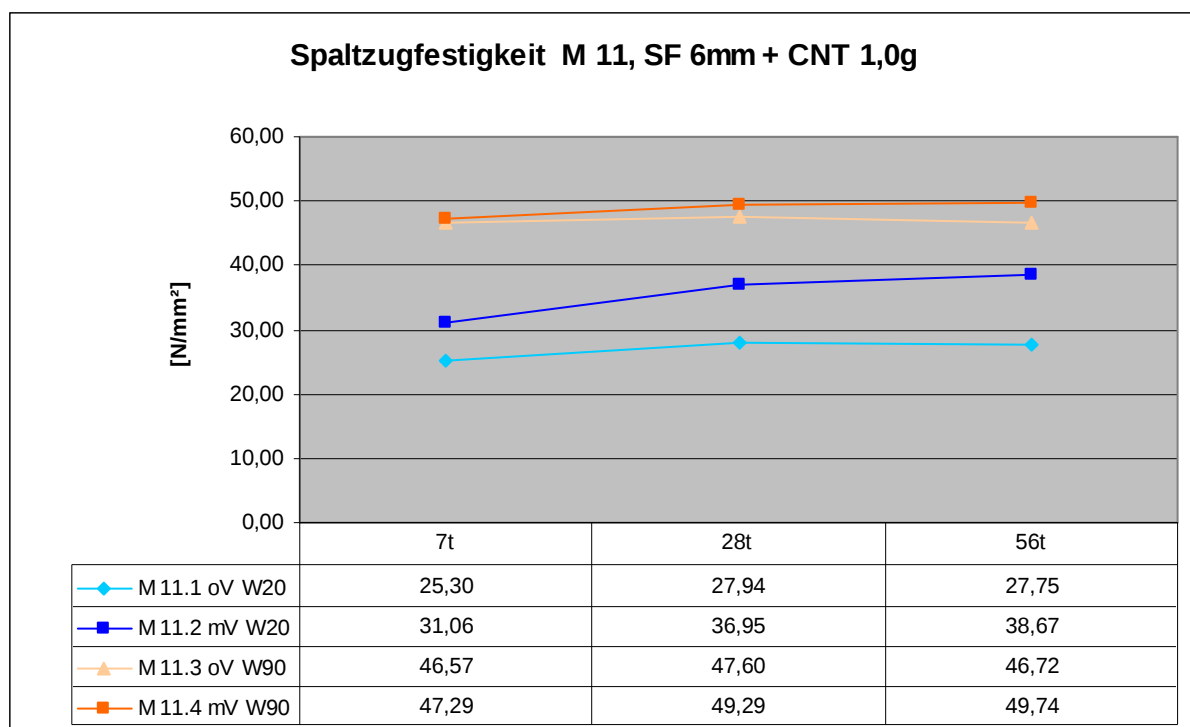


Abbildung 93: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 11

Bei den Druckfestigkeiten konnte wieder beobachtet werden, dass die Proben aus dem normalen Wasserbecken bis zum 56. Tag eine Festigkeitssteigerung

nachweisen können, während die Proben aus dem Heißwasserbecken leichte Einbußen in der Druckfestigkeit hinnehmen müssen. Durch die Vakuumbehandlung konnte die Druckfestigkeit bei den Proben M 11.1 oV um 12 % und bei den Proben M 11.3 oV um 16 % angehoben werden. Mit der Heißwasserlagerung konnten Festigkeitssteigerungen von 24 und 30 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden.

Die Spaltzugfestigkeiten nehmen im Zeitabschnitt vom 7. auf den 28. Tag leicht zu und bleiben im Bereich vom 28. auf den 56. Tag nahezu unverändert. Die größte Steigerung der Spaltzugfestigkeit konnte mit der Heißwasserlagerung der nicht Vakuum behandelten Proben gewonnen werden. Der Festigkeitsunterschied lag bei diesen beiden Proben bei fast 20 N/mm<sup>2</sup>. Die Proben mit Vakuumbehandlung schafften durch die Heißwasserlagerung einen Festigkeitssprung von 11 N/mm<sup>2</sup>. Der Vakuumeinfluss konnte bei den Proben im 20 °C Wasserbecken die Spaltzugfestigkeit um fast 40 % erhöhen. Bei den Proben im Heißwasserbecken konnte die Festigkeit nur um 6 % durch die Vakuumbehandlung angestiegen werden.

#### **6.14 Mischung M 12: Stahlfaser 12 mm und Carbon-Nanotubes 1,0 g**

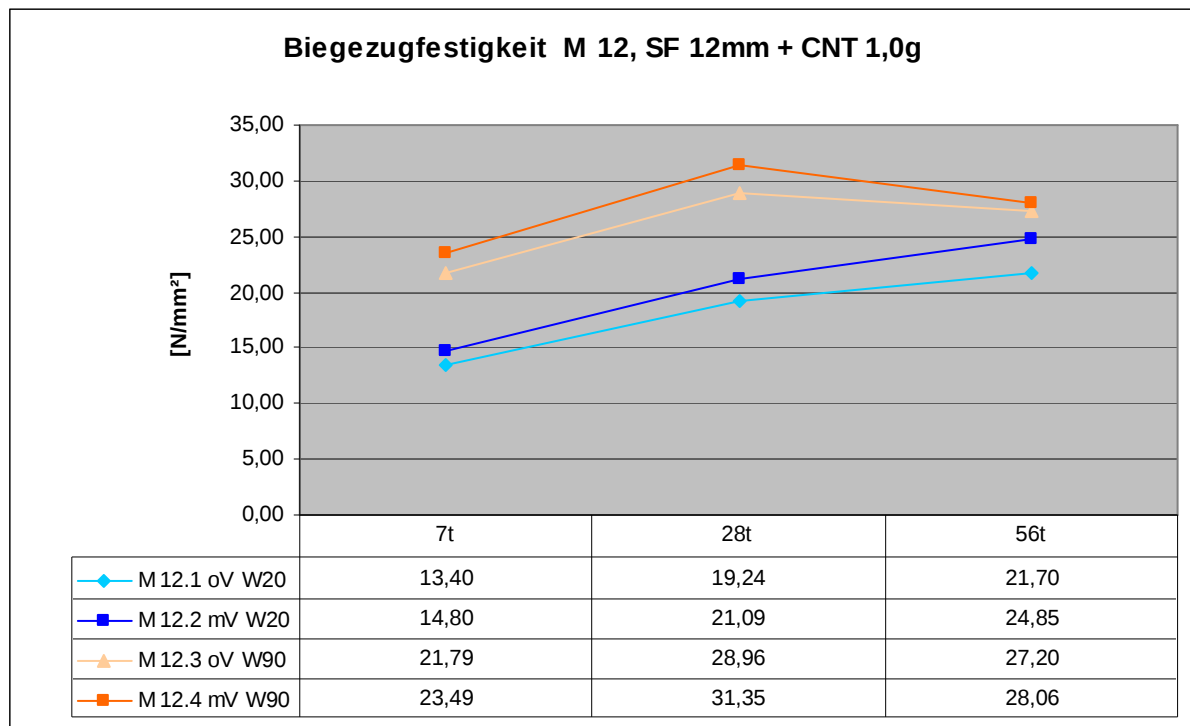
In der Mischreihe M 12 wurden nun die 12 mm langen Stahlfasern mit den Carbon-Nanotubes zusammengemischt. Als Ausgangsmischung wurde die gleiche Mischrezeptur wie bei der Mischserie M 7 herangezogen. In der Tabelle 53 sind die Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten der Mischung M 12 aufgelistet.

Die Anzeige der Mischtemperaturen stellte sich nach dem Mischvorgang bei den Mischungen M 12.1 oV und M 12.3 oV auf 38 °C und bei den Mischungen M 12.2 mV und M 12.4 mV auf 37 und 36 °C ein. Auch bei den Luftporengehalten der beiden gleichen Mischungen kam es, wie bei den Mischtemperaturen, zu nur geringen Abweichungen. Die beiden Frischbetone ohne Vakuum konnten Luftgehalte von 4,7 und 4,6 % erzielen, bei den Frischbetonen mit Vakuum stellten sich Luftgehalte von 0,9 % ein. Nur bei den Ausbreitmaßen konnten keine gleichen Ergebnisse gewonnen werden. Die Mischungen M 12.1 oV und M 12.3,oV wichen zwar nur um 0,5 cm ab, bei den Mischungen M 12.2 mV und M 12.4 MV stellte sich ein Unterschied von 2 cm ein. Die Rohdichten der Frischbetone liegen alle ungefähr bei denselben Werten. Die Vakuum gemischten Betone weisen dabei wieder eine um ca. 100 kg/m<sup>3</sup> höhere Rohdichte auf als die nicht Vakuum gemischten Betone. Abgesehen von der Probe

M 12.1 oV liegen die Festbetonrohddichten alle über den Werten der Frischbetonrohddichten.

**Tabelle 53: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 12**

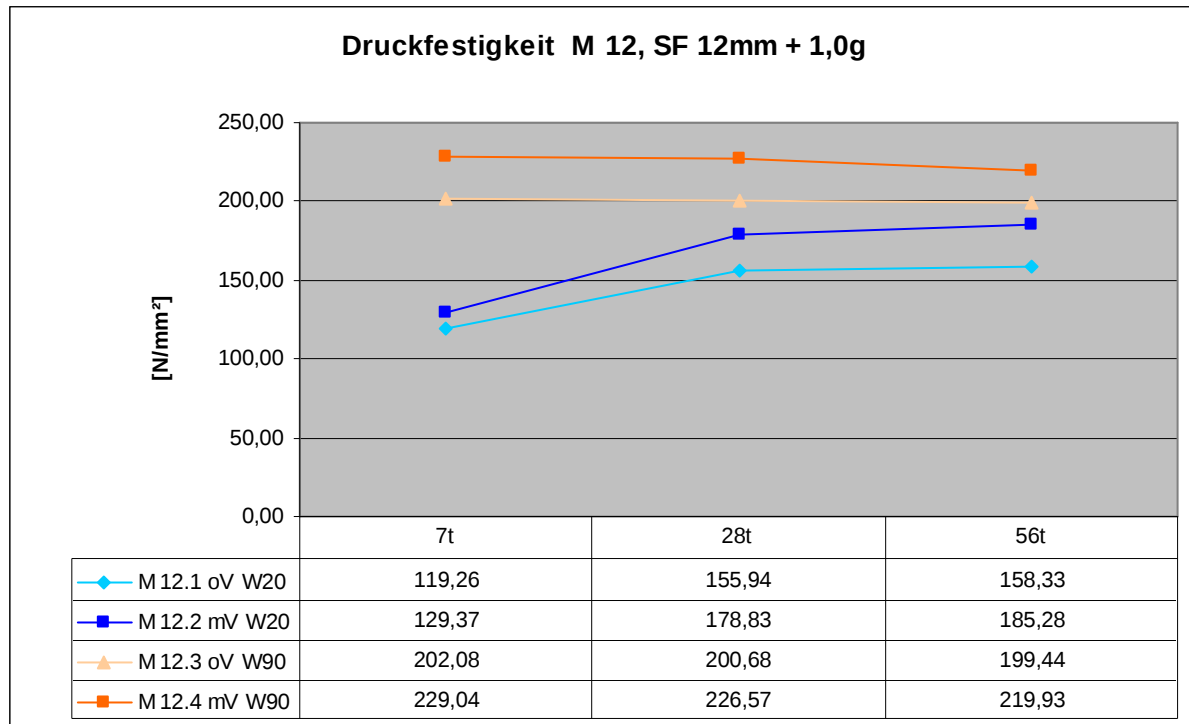
| Bezeichnung                   |     | M 12.1 oV W20 | M 12.2 mV W20 | M 12.3 oV W90 | M 12.4 mV W90 |
|-------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]               |     | 38,0          | 37,0          | 38,0          | 36,0          |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 25,0          | 25,0          | 24,5          | 23,0          |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,7           | 0,9           | 4,6           | 0,9           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2455,5        | 2542,5        | 2452,0        | 2549,0        |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2440,9        | 2549,1        | 2469,6        | 2552,4        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 13,40         | 14,80         | 21,79         | 23,49         |
|                               | 28t | 19,24         | 21,09         | 28,96         | 31,35         |
|                               | 56t | 21,70         | 24,85         | 27,20         | 28,06         |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 119,26        | 129,37        | 202,08        | 229,04        |
|                               | 28t | 155,94        | 178,83        | 200,68        | 226,57        |
|                               | 56t | 158,33        | 185,28        | 199,44        | 219,93        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 32,71         | 35,41         | 46,05         | 49,76         |
|                               | 28t | 35,32         | 37,06         | 49,02         | 51,31         |
|                               | 56t | 34,89         | 41,24         | 48,86         | 49,99         |



**Abbildung 94: Biegezugfestigkeiten Mischung M 12**

Die in Abbildung 94 dargestellten Biegezugfestigkeitsverläufe der Proben der Mischreihe M 12 weisen ähnliche Festigkeitskurven auf. Während die Proben aus dem Wasserbecken mit 20 °C bis zum 56. Tag immer leicht ansteigen und zwischen

2-3 N/mm<sup>2</sup> auseinander liegen, steigen die Festigkeiten der Proben aus dem Heißwasserbecken bis zum 28. Tag an und fallen dann wieder leicht ab. Auch diese Proben liegen immer zwischen 2-3 N/mm<sup>2</sup> auseinander. Nach 56 Tagen konnten Biegezugfestigkeiten von 21, 24, 27 und 28 N/mm<sup>2</sup> mit der Mischreihe M 12 erzielt werden.

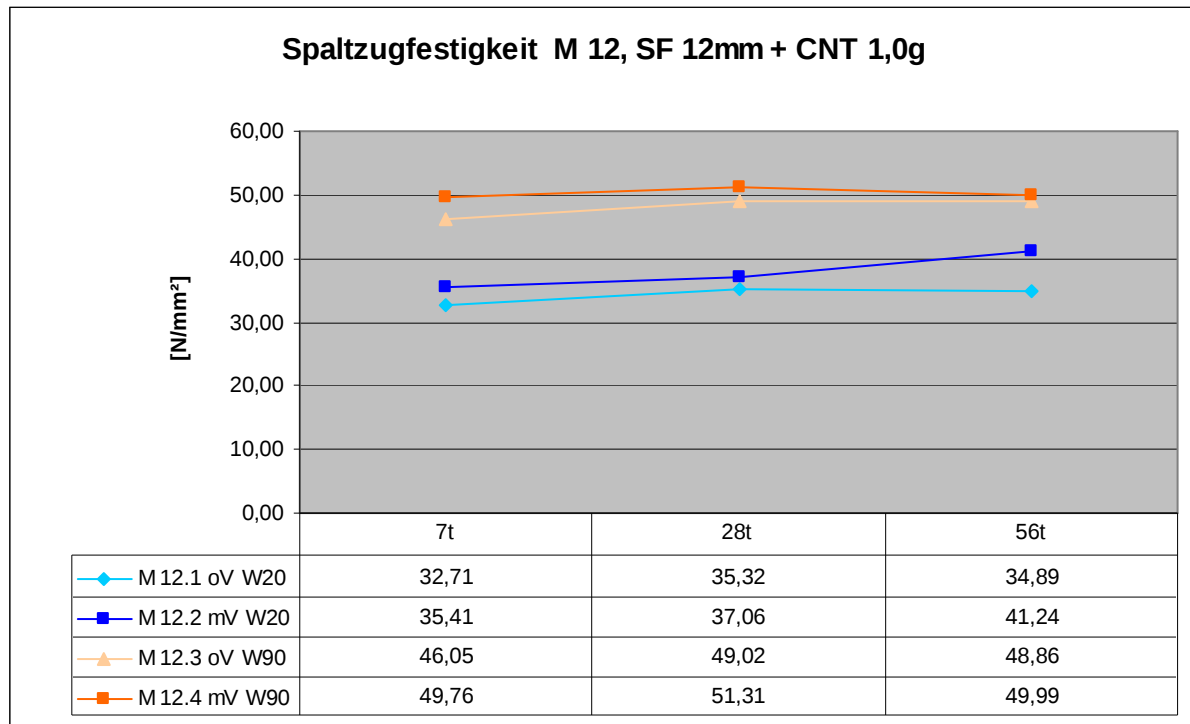


**Abbildung 95: Druckfestigkeiten Mischung M 12**

Die Druckfestigkeiten der Prüfsreihe M 12 verhalten sie ähnlich wie die der Prüfsreihe M 11. Die Proben M 12.1 oV und M 12.2 mV können die Druckfestigkeit bis zum 56. Tag immer leicht steigern, Die Proben M 12.3 oV und M 12.4 mV hingegen fallen bis zum 56. Tag leicht ab. Vom 28. auf den 56. Tag fallen bzw. steigen die Werte bei allen vier Mischungen höchstens um 7 N/mm<sup>2</sup>. In der Abbildung 95 kann man auch erkennen, dass die Heißwasserbehandelten Proben Druckfestigkeiten von 200 und 220 N/mm<sup>2</sup> erzielen können.

Die Spaltzugfestigkeiten ändern sich vom 7. auf den 56. Tag nur um maximal 3 N/mm<sup>2</sup> und weisen daher fast waagrechte Verläufe auf. Nur die Probe M 12.2 mV schafft einen Festigkeitssprung um 6 N/mm<sup>2</sup> in 49 Tagen. Im Durchschnitt erhöhen sich die Spaltzugfestigkeiten durch die Nachbehandlung im Heißwasser um 38 %, während die Vakuumbehandlung einen Festigkeitsanstieg von 8 % nach 7 Tagen,

von 5 % nach 28 Tagen und rund 2 % nach 56 Tagen zulässt. Nur die Probe M 12.2 mV konnte durch den Vakuumprozess die Spaltzugfestigkeit um 18 % erhöhen.



**Abbildung 96: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 12**

### 6.15 Mischung M 13: Stahlfaser 6 mm und Polypropylenfaser

Für die vier Mischungen M 13 wurde ein Fasercocktail mit 6 mm langen Stahlfasern und 6 mm langen Polypropylenfasern hergestellt. Als Fasergehalt für die Stahlfasern wählte man wieder 2,5 Vol% und für die Polypropylenfaser einen Gehalt von 0,33 Vol%. Der gesamte Fasergehalt von 2,83 Vol% wurde bei der Mischungsberechnung dann wieder vom Stoffraum des Sandes abgezogen. Bild 97 zeigt die verwendeten Polypropylenfasern. Während des Mischvorganges entstanden ähnliche Probleme wie bei der Mischung M 5 mit PVA-Fasern. Zwar verstopfte der Wirbler nach der Wasser- und Fließmittelzugabe nicht komplett, jedoch wurde eine leichte Wirblerverstopfung beobachtet. Auch die Fertiggemischten Frischbetone wiesen eine leichte Klumpenbildung auf. Beim Rütteln des Frischbetons im Luftporenbehälter konnte kein aufsteigen von Luftblasen beobachtet werden.



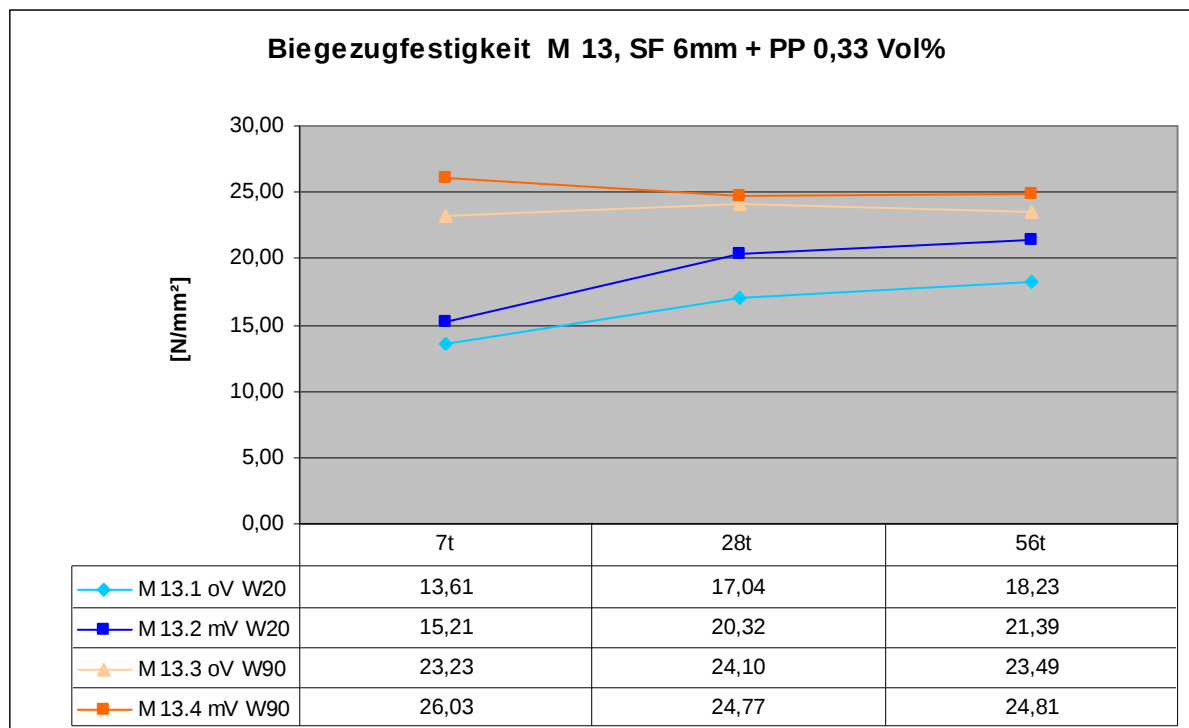
Abbildung 97: Polypropylenfasern 6 mm

Tabelle 54: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 13

| Bezeichnung                   |     | M 13.1 oV W20 | M 13.2 mV W20 | M 13.3 oV W90 | M 13.4 mV W90 |
|-------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]               |     | 38,0          | 38,0          | 38,0          | 37,0          |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 21,5          | 21,0          | 21,0          | 21,0          |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,4           | 0,8           | 4,5           | 0,9           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2440,5        | 2543,5        | 2438,0        | 2549,5        |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2395,2        | 2513,3        | 2416,3        | 2527,6        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 13,61         | 15,21         | 23,23         | 26,03         |
|                               | 28t | 17,04         | 20,32         | 24,10         | 24,77         |
|                               | 56t | 18,23         | 21,39         | 23,49         | 24,81         |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 120,16        | 126,73        | 183,94        | 207,40        |
|                               | 28t | 150,20        | 164,99        | 180,28        | 202,51        |
|                               | 56t | 154,05        | 161,01        | 180,48        | 200,99        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 31,04         | 34,08         | 38,38         | 47,13         |
|                               | 28t | 34,53         | 36,90         | 41,40         | 49,46         |
|                               | 56t | 34,42         | 37,40         | 42,02         | 50,33         |

Die Tabelle 54 enthält die Frisch- und Festbetoneigenschaften der Mischungen M 13 mit Stahl- und Polypropylenfasern. Man kann erkennen, dass sich sowohl die Mischtemperaturen, die Ausbreitmaße, die Luftporengehalte aber auch die Frischbetonrohddichten kaum von den jeweiligen Mischungsarten unterscheiden. Bei allen vier Mischungen stellten sich immer Mischtemperaturen von 38 oder 37 °C ein

und es konnten immer Ausbreitmaße von 21 oder 21,5 cm gemessen werden. Die Luftgehalte im Frischbeton stellten sich bei den nicht Vakuum gemischten Betonen auf 4,4 und 4,5 % ein, und bei den Betonen mit Vakuum konnten Luftgehalte von 0,8 und 0,9 gemessen werden. Die Frischbetonrohddichten von M 13.1 oV und M 13.3 oV stellten sich auf 2440,5 kg/m<sup>3</sup> und 2438 kg/m<sup>3</sup> ein. Die Rohddichten der Frischbetone M 13.2 mV und M 13.4 mV konnten auf 2543,5 kg/m<sup>3</sup> und 2549,5 kg/m<sup>3</sup> gemessen werden. Die Festbetonrohddichten unterschieden sich etwas mehr als die Frischbetonrohddichten. So wichen die Proben ohne Vakuum um 21 kg/m<sup>3</sup> von einander ab, während sich die Proben mit Vakuum um 14 kg/m<sup>3</sup> unterschieden. Bei allen vier Mischungen lag die Festbetonrohddichte nach 28 Tagen unter den Frischbetonrohddichten.

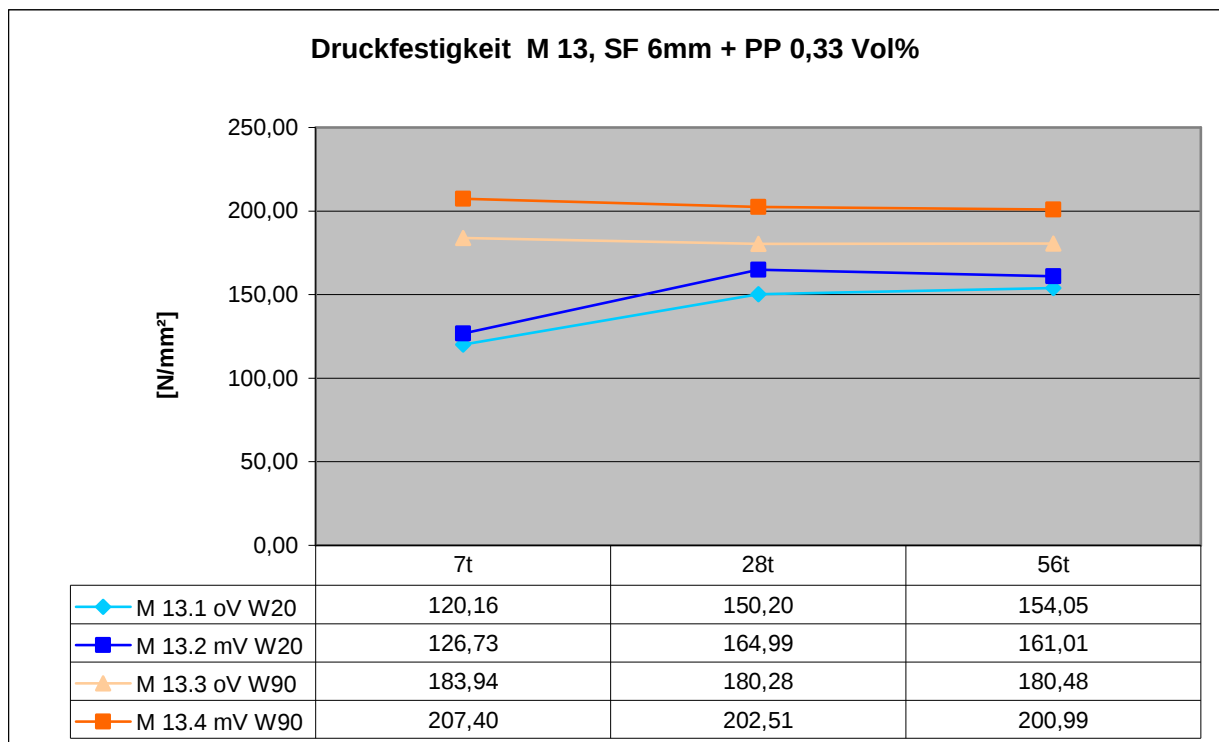


**Abbildung 98: Biegezugfestigkeiten Mischung M 13**

Die Biegezugfestigkeiten nehmen, abgesehen von der Probe M 13.3 oV, vom 28. auf den 56. Tag immer leicht zu. Bei der Probe M 13.3 oV steigt die Festigkeit vom 7. Tag auf den 28. Tag von 23,23 N/mm<sup>2</sup> auf 24,10 N/mm<sup>2</sup> und fällt dann am 56. Tag wieder leicht zurück auf 23,49 N/mm<sup>2</sup>. Bei der Proben M 13.4 mV fällt die Festigkeit innerhalb 21 Tagen von 26,03 N/mm<sup>2</sup> auf 24,77 N/mm<sup>2</sup> zurück und behält diese Festigkeit für die nächsten vier Wochen bei. Die Proben mit Vakuum und normaler Wasserlagerung konnten eine um 17 % höhere Festigkeit aufweisen als die Proben

ohne Vakuum. Bei den Proben mit Vakuum und Heißwasserlager fiel die Festigkeitssteigerung gegenüber den Proben ohne Vakuum mit ca. 5 % wesentlich geringer aus.

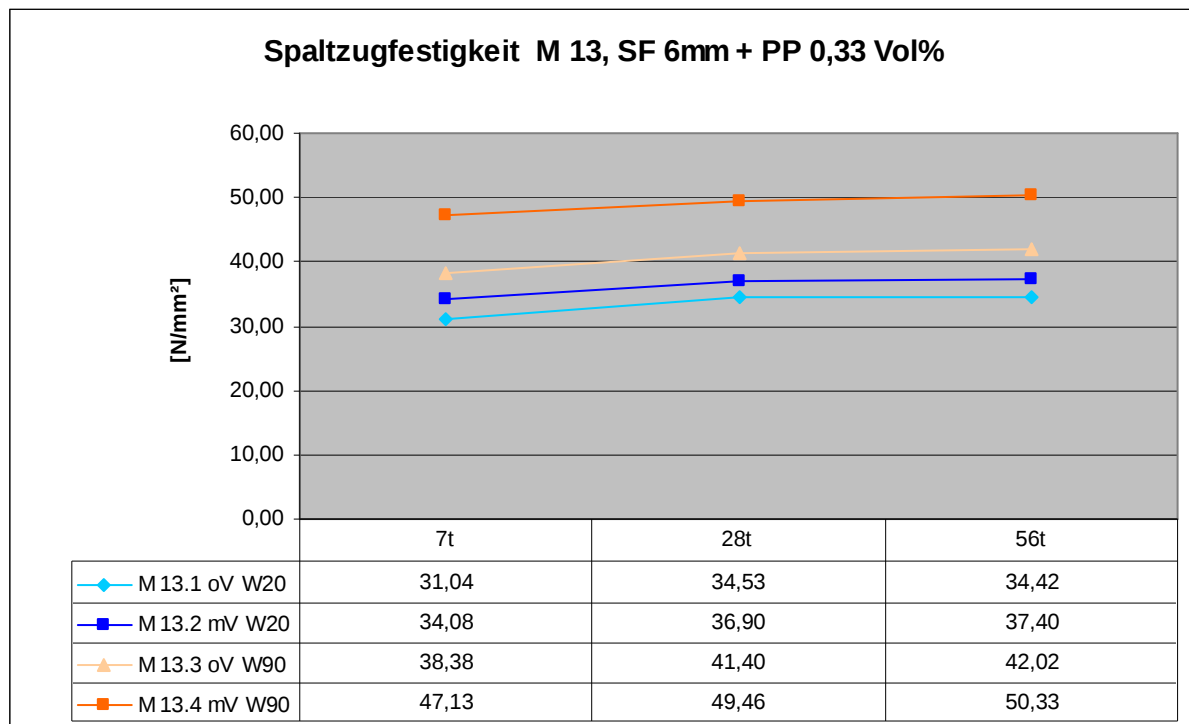
In der Abbildung 99 sieht man einerseits, dass die Druckfestigkeiten der vier Mischungen vom 28. auf den 56. Tag nahezu waagrechte Verläufe aufweisen. Andererseits erkennt man eine Festigkeitssteigerung durch die Heißwasserlagerung von 30 N/mm<sup>2</sup> bei den Proben ohne Vakuum und von 40 N/mm<sup>2</sup> bei den Proben mit Vakuum. Die Druckfestigkeiten der Proben M 13.3 oV und M 13.4 mV liegen immer knapp höher als 180 N/mm<sup>2</sup> bzw. 200 N/mm<sup>2</sup>. Durch den Vakuumeinfluss konnte die Festigkeit bei der Probe M 13.2 mV um 4,6 % und bei der Probe m 13.4 mV um 11 % erhöht werden. Nach 56 Tagen stellten sich Druckfestigkeiten von 154, 161, 180 und 201 N/mm<sup>2</sup> ein.



**Abbildung 99: Druckfestigkeiten Mischung M 13**

Die Spaltzugfestigkeiten der vier Proben nehmen vom 7. auf den 28. Tag um 2-3 N/mm<sup>2</sup> zu und bleiben dann vom 28. auf den 56. Tag annähernd konstant. Das Vakuummischen brachte bei den Proben aus dem 20 °C Wasserbecken nur eine Steigerung von 8 %, während bei den Proben aus dem Heißwasserbecken eine um 19 % höhere Spaltzugfestigkeit beobachtet werden konnte. Mit Hilfe der

Heißwasserlagerung konnte die Spaltzugfestigkeit um durchschnittliche 24 % erhöht werden.



**Abbildung 100: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 13**

## 6.16 Mischung M 14: Stahlfaser 12 mm und Polypropylenfaser

Bei dieser Mischreihe kamen die Stahlfasern mit 12 mm Länge und 2,5 Vol% Fasergehalt in Kombination mit den 6 mm langen Polypropylenfasern mit 0,33 Vol% zum Einsatz. Auch bei dieser Mischserie konnte eine leichte Klumpenbildung nach dem Mischvorgang beobachtet werden. Die Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten der Mischreihe M 14 sind in Tabelle 55 dargestellt.

Die Mischtemperaturen der Frischbetone ohne Vakuum stellten sich jeweils auf 38 °C ein. Für die Mischungen mit Vakuum wurden Temperaturen von 37 und 36 °C erzielt. Für alle vier Mischungen stellten sich Ausbreitmaße von 22 cm ein. Nur die Mischung M 14.2 mV weicht mit 0,5 cm ganz leicht von den anderen Mischungen ab. Auch die Luftporengehalte der Betone ohne Vakuum befinden sich mit 4,5 und 4,7 % fast beim selben Wert. Bei den vakuumgemischten Frischbetonen wurden Luftgehalte von 0,9 % gemessen.

**Tabelle 55: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 14**

| Bezeichnung                   |     | M 14.1 oV W20 | M 14.2 mV W20 | M 14.3 oV W90 | M 14.4 mV W90 |
|-------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]               |     | 38,0          | 37,0          | 38,0          | 36,0          |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 22,0          | 21,5          | 22,0          | 22,0          |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,5           | 0,9           | 4,7           | 0,9           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2460,5        | 2547,0        | 2468,0        | 2554,5        |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2408,5        | 2499,6        | 2457,8        | 2502,7        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 12,59         | 13,31         | 23,05         | 23,46         |
|                               | 28t | 16,29         | 19,18         | 21,91         | 24,63         |
|                               | 56t | 19,35         | 21,76         | 23,74         | 24,92         |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 109,48        | 123,53        | 173,88        | 204,56        |
|                               | 28t | 145,57        | 167,99        | 182,96        | 197,79        |
|                               | 56t | 154,66        | 171,78        | 181,25        | 202,85        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 30,66         | 36,56         | 44,32         | 50,54         |
|                               | 28t | 34,62         | 39,19         | 49,84         | 52,51         |
|                               | 56t | 36,67         | 39,67         | 51,03         | 53,28         |

Die Frischbetonrohddichten der nicht Vakuum gemischten Betone als auch die der Vakuum gemischten Betone wichen jeweils nur um 7,5 kg/m³ von einander ab. So erzielten die Mischungen M 14.1 oV und M 14.3 oV Werte von 2460,5 kg/m³ und 2468 kg/m³ und die Mischungen M 14.2 mV und M 14.4 mV Werte von 2547 kg/m³ und 2554,5 kg/m³. Die Festbetonrohddichten von den Mischungen M 14.1 oV und M 14.3 oV unterschieden sich mit 2408,5 kg/m³ und 2457,8 kg/m³ deutlicher von einander. Die Proben M 14.2 mV und M 14.4 mV lagen mit Festbetonrohddichten von 2499,6 kg/m³ und 2502,7 kg/m³ enger beisammen. Alle Festbetonrohddichten nach 28 Tagen lagen unterhalb der Frischbetonrohddichtenwerte.

Die Biegezugfestigkeiten der Mischreihe M 14 sind in Abbildung 101 enthalten. Betrachtet man den Festigkeitsverlauf mit der Zeit, so kann man erkennen, dass alle Biegezugfestigkeiten vom 7. auf den 56. Tag leicht ansteigen, ausgenommen die Proben von M 14.3 oV. Die Probe M 14.3 oV weist am 7. Tag eine Festigkeit von 23 N/mm² auf, fällt dann am 28. Tag auf ca. 22 N/mm² und steigt dann am 56. Tag fast auf 24 N/mm² an. Nach 56 Tagen konnte durch den Vakuummischprozess die Biegezugfestigkeit der Wassergelagerten Proben um 12 % gesteigert werden. Die heißwassergelagerten Proben stiegen durch das Entlüften mit 60 mbar um 5 % an. Durch die Nachbehandlung im Heißwasser konnte ein Anstieg der Biegezugfestigkeit nach 56 Tagen von 14 bis 22 % gewonnen werden.

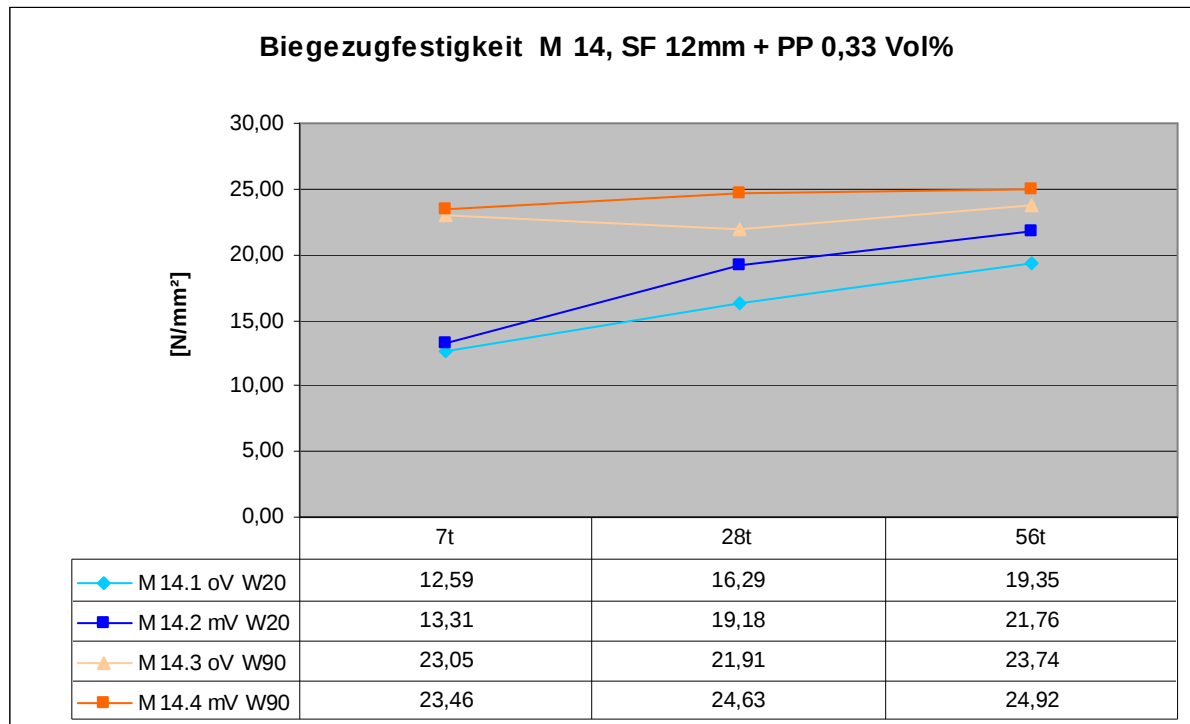


Abbildung 101: Biegezugfestigkeiten Mischung M 14

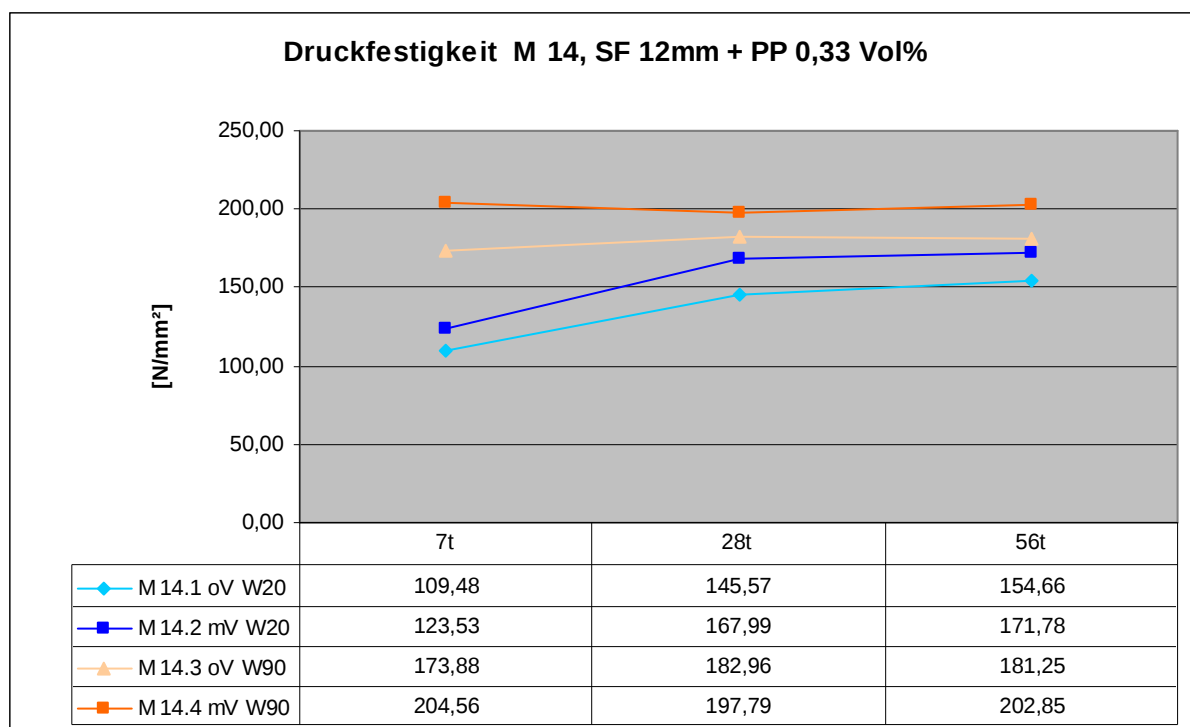
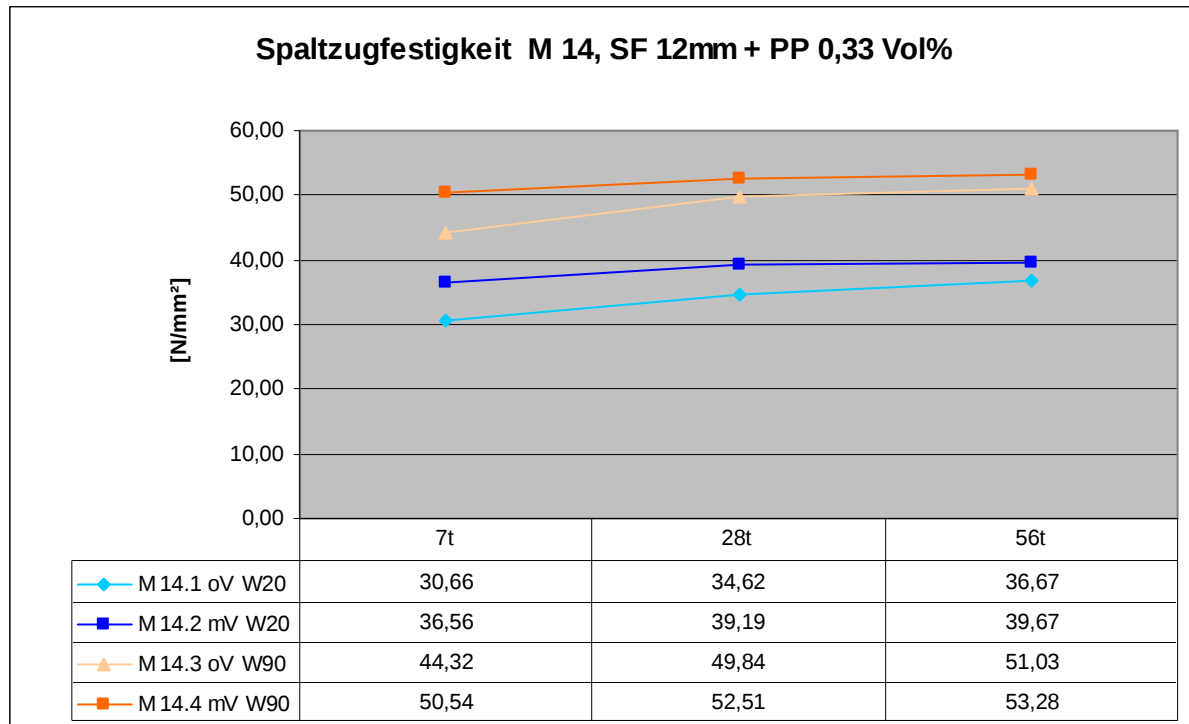


Abbildung 102: Druckfestigkeiten Mischung M 14

Abgesehen von der Probe M 14.4 mV steigen die Druckfestigkeiten vom 7. auf den 28. Tag. Vom 28. auf den 56. Tag ändern sich die Festigkeit nur mehr um wenige

N/mm<sup>2</sup>. Während die Probe M 14.4 mV an fast allen Prüftagen über 200 N/mm<sup>2</sup> aufweisen kann, erreicht die Probe M 14.1 oV nie eine Druckfestigkeit von 155 N/mm<sup>2</sup>. Der Vakuumeinfluss konnte die Druckfestigkeit am 56. Tag bei allen Proben um ca. 20 N/mm<sup>2</sup> erhöhen. Mit der Heißwasserlagerung konnten die Proben einen Anstieg der Druckfestigkeit von fast 30 N/mm<sup>2</sup> vorweisen.



**Abbildung 103: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 14**

Die in Abbildung 103 dargestellten Spaltzugfestigkeiten steigern sich bei allen vier Proben um wenige N/mm<sup>2</sup> mit der Zeit. Dabei können die Proben M 14.1 oV und M 14.3 oV mit 6 bzw. 7 N/mm<sup>2</sup> den größten Anstieg innerhalb 49 Tagen aufweisen. Bei den Proben M 14.2 mV und M 14.4 mV ändert sich die Spaltzugfestigkeit im Durchschnitt nur um 3 N/mm<sup>2</sup>. Die Spaltzugfestigkeit konnte mit der Vakuumbehandlung im Schnitt um 4-8 % und mit der Heißwasserlagerung um 34-39 % gesteigert werden.

### 6.17 Mischung M 15: Stahlfaser 6/12 mm und Polypropylenfaser

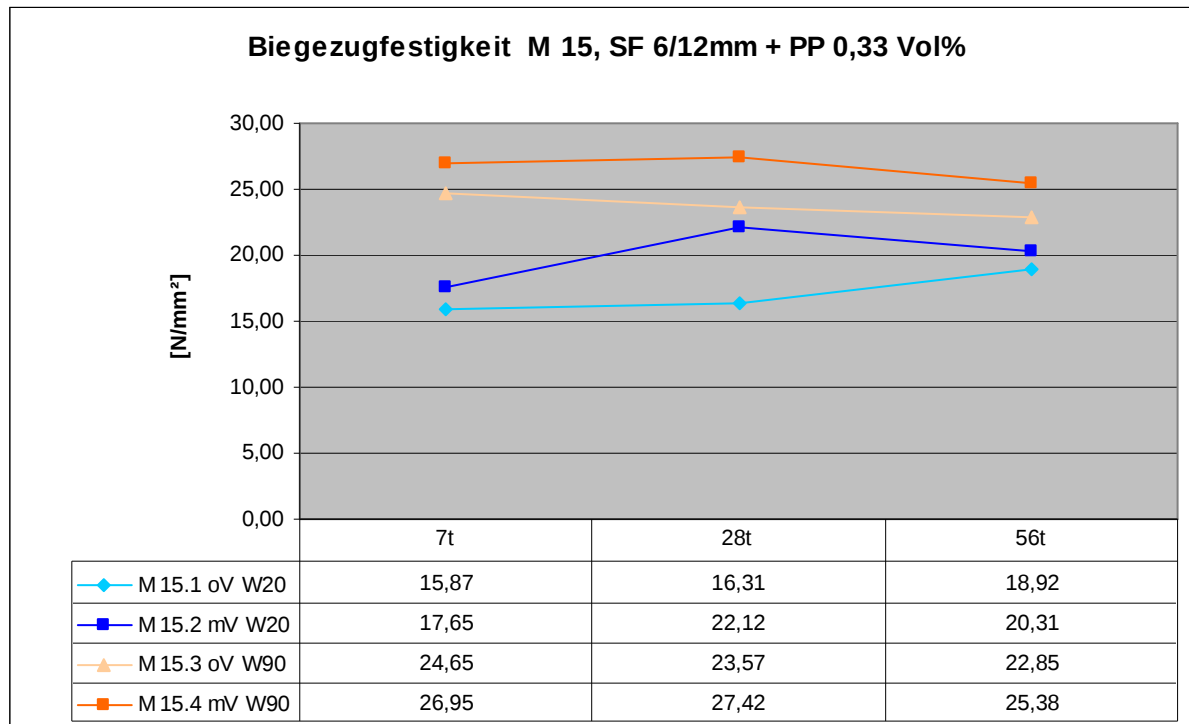
Für die Mischungen M 15 wurde ein Fasercocktail mit 6 mm und 12 mm langen Stahlfasern und 6 mm Polypropylenfasern hergestellt. Der Fasergehalt betrug insgesamt 3,83 Vol% und dieser wurde in der Mischungsberechnung wieder vom

Stoffraum des Sandes abgezogen. In der Tabelle 56 sind die Frischbetoneigenschaften sowie die Biegezug-, Druck- und Spaltzugfestigkeiten aufgelistet.

**Tabelle 56: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 15**

| Bezeichnung                   |     | M 15.1 oV W20 | M 15.2 mV W20 | M 15.3 oV W90 | M 15.4 mV W90 |
|-------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]               |     | 38,0          | 36,0          | 38,0          | 36,0          |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 23,0          | 23,0          | 22,5          | 22,0          |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,2           | 0,9           | 4,3           | 0,8           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2517,5        | 2595,5        | 2524,0        | 2599,5        |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2477,8        | 2579,5        | 2457,0        | 2551,0        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 15,87         | 17,65         | 24,65         | 26,95         |
|                               | 28t | 16,31         | 22,12         | 23,57         | 27,42         |
|                               | 56t | 18,92         | 20,31         | 22,85         | 25,38         |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 117,62        | 127,98        | 197,49        | 224,09        |
|                               | 28t | 162,93        | 171,23        | 196,95        | 218,49        |
|                               | 56t | 164,62        | 169,63        | 193,83        | 218,06        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 31,50         | 36,62         | 41,28         | 54,79         |
|                               | 28t | 34,81         | 41,67         | 47,84         | 57,89         |
|                               | 56t | 34,63         | 42,18         | 47,65         | 57,29         |

Die Mischtemperaturen der gleichen Mischungen ändern sich nicht. So weisen die Mischungen M 15.1 oV und M 15.3 oV Temperaturen von 38 °C und die Mischungen M 15.2 mV und M 15.4 mV 36 °C auf. Bei allen vier Mischungen konnten Ausbreitmaße zwischen 22 und 23 cm gemessen werden. Die Luftporengehalte der Frischbetone wichen jeweils nur um 0,1 % ab. Die Luftgehalte der Mischungen M 15.1 oV und M 15.3 oV konnten die Werte 4,2 und 4,3 aufweisen, während bei den Mischungen M 15.2 mV und M 15.4 mV Luftgehalte von 0,9 und 0,8 % gemessen wurden. Die Rohdichten der Frischbetone ohne Vakuum konnten 2517,5 kg/m³ und 2524 kg/m³ aufweisen und bei den Rohdichten der Frischbetone mit Vakuum betrug die Abweichung nur 4 kg/m³. Die Rohdichten der Festbetone ohne Vakuum bzw. mit Vakuum wichen um 20 kg/m³ bzw. 28 kg/m³ ab. Die Festbetonrohddichten liegen nach 28 Tagen alle unter den Frischbetonrohddichten. Ein Vergleich der Frisch- und Festbetonrohddichten zeigt, dass die Festbetonrohddichten der Probe M 15.1 oV um knappe 40 kg/m³, die Probe M 15.2 mV um 16 kg/m³, die Probe M 15.3 oV um 67 kg/m³ und die Probe M 15.4 mV um 48,5 kg/m³ unterhalb der Frischbetonrohddichten liegen.



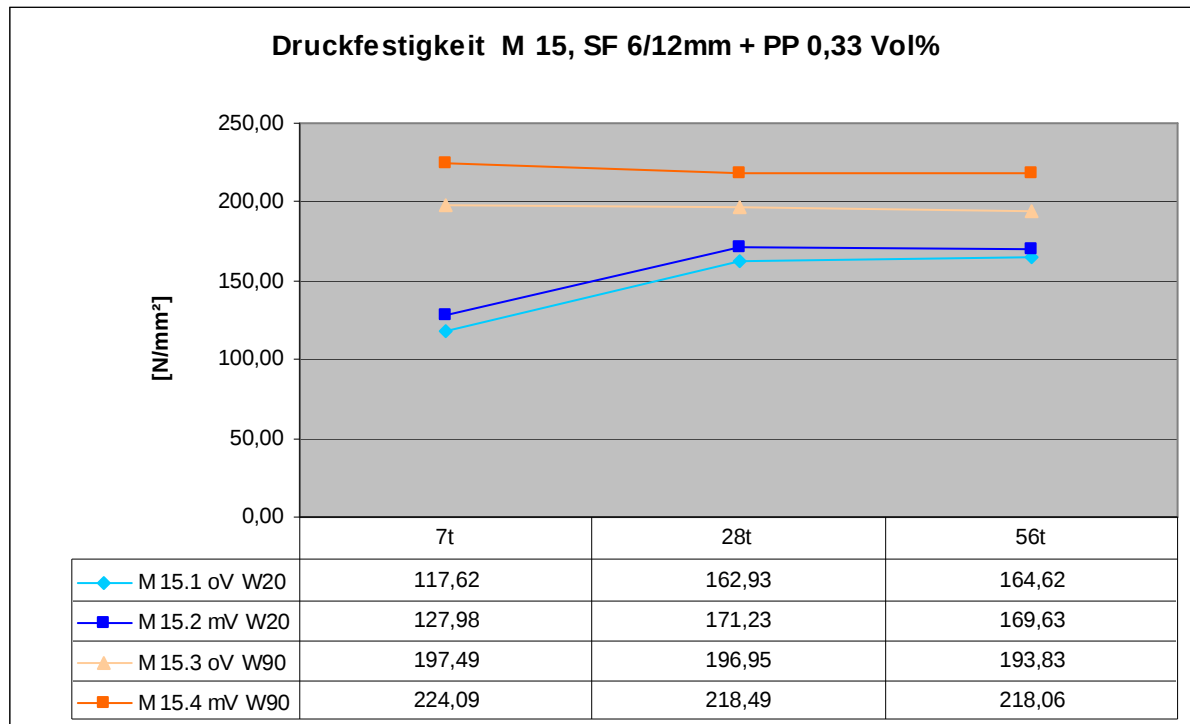
**Abbildung 104: Biegezugfestigkeiten Mischung M 15**

Der Biegezugfestigkeitsverlauf der Mischreihe M 15 ist in Abbildung 104 dargestellt. Die Probe M 15.1 oV konnte Festigkeit vom 7. auf den 28. Tag von 15,87 auf 16,31 N/mm<sup>2</sup> und am 56. Tag weiter auf 18,92 N/mm<sup>2</sup> steigern. Bei der Probe M 15.2 mV sprang die Festigkeit von 17,65 auf 22,12 N/mm<sup>2</sup>, fiel jedoch nach 56 Tagen auf 20,31 N/mm<sup>2</sup> ab. Die Biegezugfestigkeit der Probe M 15.3 oV fiel an den Prüftagen immer um ca. 1 N/mm<sup>2</sup> und erreichte am 56. Tag 22,85 N/mm<sup>2</sup>. Während die Festigkeit der Probe M 15.4 mV am 7. und 28. Tag knapp unter bzw. über 27 N/mm<sup>2</sup> lag, fiel sie am 56. Tag auf 25,38 N/mm<sup>2</sup> ab. Mit Hilfe der Vakuumbehandlung konnte die Biegezugfestigkeit im Durchschnitt um 7-10 % erhöht werden und mit Hilfe der Heißwasserlagerung konnte ein Anstieg der Biegezugfestigkeit von 20-24 % erreicht werden.

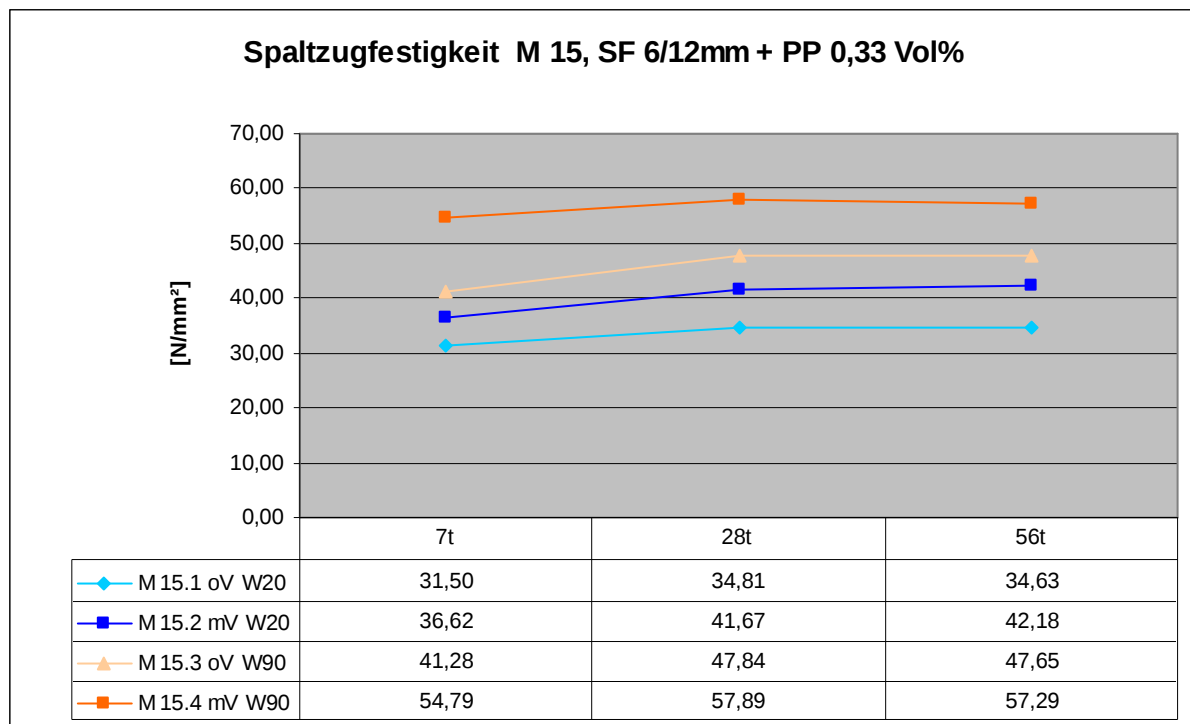
Die Druckfestigkeiten der Proben aus dem 20 °C Wasserbecken und den Proben aus dem 90 °C Heißwasserbecken verlaufen sehr ähnlich. Bis zum 28. Tag können die Wassergelagerten Proben die Festigkeit steigern und ändern ihre Festigkeit bis zum 56. Tag nur um wenige N/mm<sup>2</sup>. Bei den heißwassergelagerten Proben fällt die Druckfestigkeit vom 7. auf den 28. Tag und vom 28. auf den 56. Tag leicht ab.

Während der Vakuumeinfluss bei den Proben aus dem Wasserbecken die Druckfestigkeit nach 56 Tagen nur um 5 N/mm<sup>2</sup> steigern konnte, erhöht sich die

Festigkeit bei den Proben aus dem Heißwasserbecken um ca. 25 N/mm<sup>2</sup> durch das Vakuummischen. Mit der Nachbehandlung im Heißwasser konnte ein Anstieg der Druckfestigkeit um mehr als 30 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden.



**Abbildung 105: Druckfestigkeiten Mischung M 15**



**Abbildung 106: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 15**

Bei den Spaltzugfestigkeiten der Mischreihe M 15 ist ein Festigkeitsanstieg vom 7. auf den 28. Tag zu erkennen, während sich die Festigkeit vom 28. auf den 56. Tag kaum mehr ändert. Durch das Vakuummischen und die Heißwasserbehandlung konnten bei der Probe M 15.4 mV Spaltzugfestigkeiten von über 54 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden. Im Durchschnitt konnte die Festigkeit durch die Vakuumbehandlung um 21 % und durch die Heißwasserlagerung um 36 % gesteigert werden.

### 6.18 Mischung M 16: Stahlfaser 6 mm

Für die Mischreihe M 16 wurden Stahlfasern mit 6 mm und einen Durchmesser 0,175 mm verwendet, die also um mehr als ein Drittel dünner sind als die bisher eingesetzten Stahlfasern. Es wurde die Mischung M 6 noch einmal mit diesen Stahlfasern und einem Fasergehalt von 2,5 Vol% nachgemischt. Die Abbildung 107 zeigt die verwendeten Stahlfasern für die Mischserie M 16.

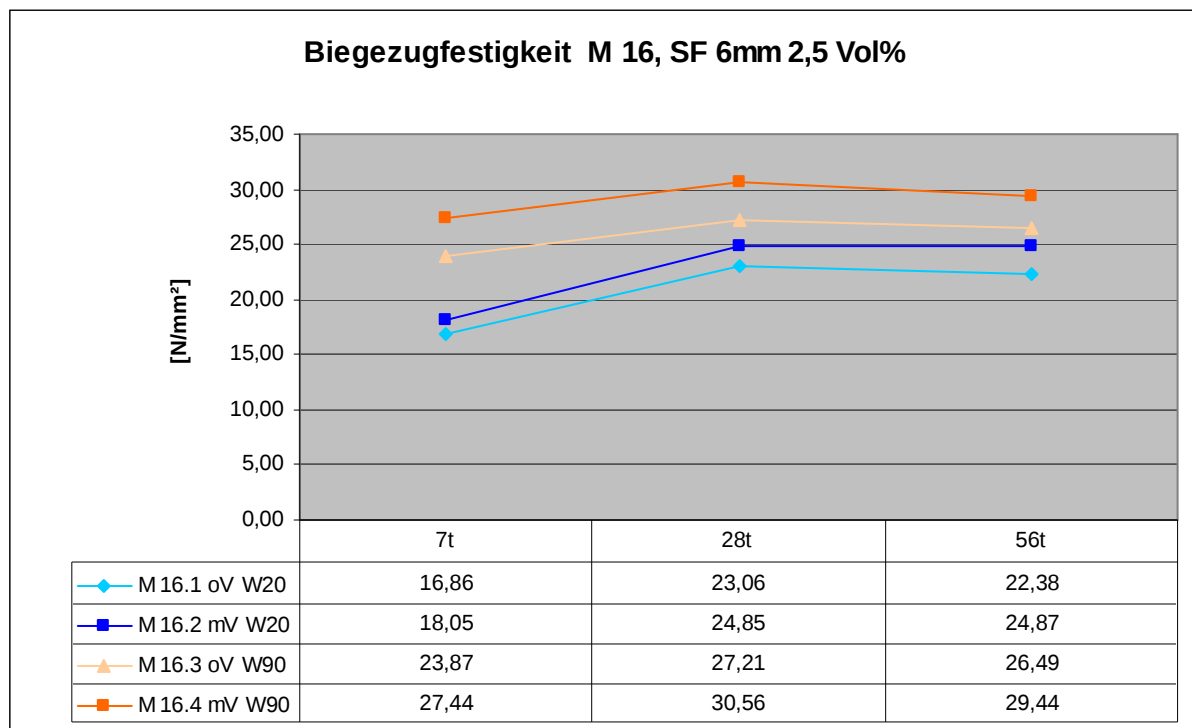


**Abbildung 107: Stahlfaser 6 mm und 0,175 mm Durchmesser**

In der Tabelle 57 sind wieder die Frischbetoneigenschaften sowie die Festigkeiten der Mischreihe M 16 enthalten. Man sieht, dass sich die Mischtemperaturen, die Ausbreitmaße und die Luftporengehalte der gleichen Mischungen M 16.1 oV und M 16.3 oV bzw. M 16.2 mV und M 16.4 mV nur minimal voneinander unterscheiden. Auch bei der Bestimmung der Rohdichten konnten ähnliche Werte erzielt werden.

**Tabelle 57: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 16**

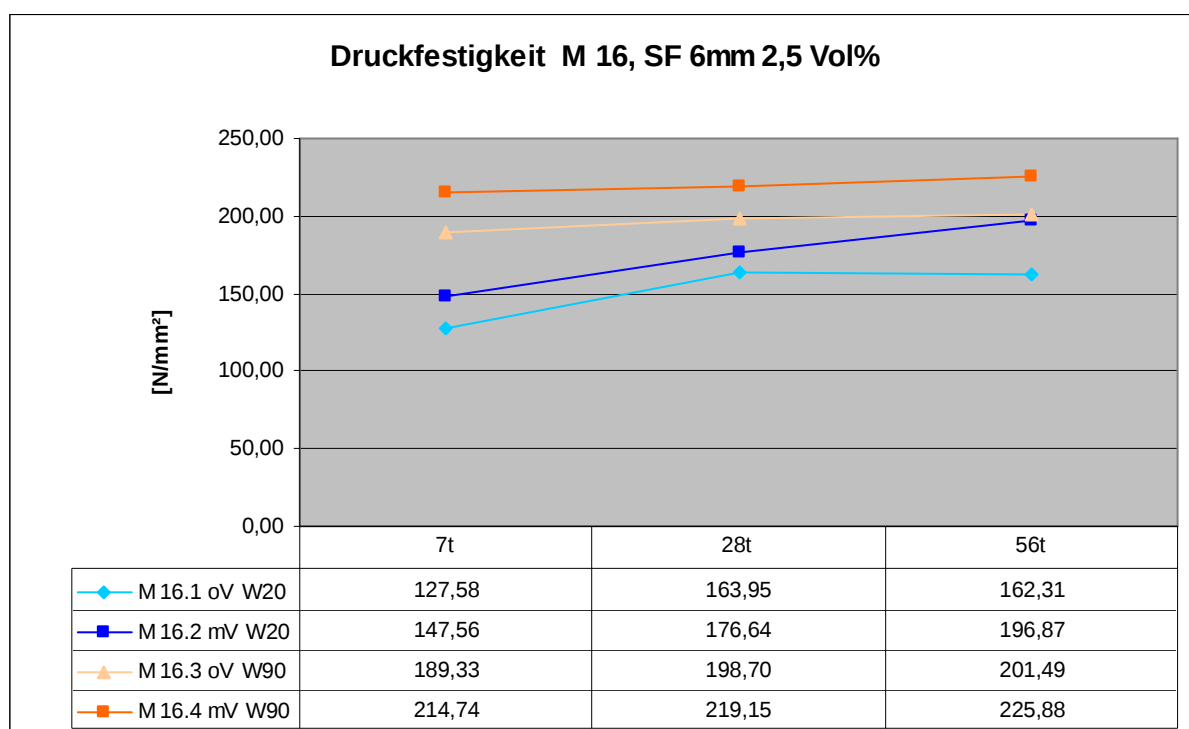
| Bezeichnung                   |     | M 16.1 oV W20 | M 16.2 mV W20 | M 16.3 oV W90 | M 16.4 mV W90 |
|-------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]               |     | 38,0          | 37,0          | 38,0          | 36,0          |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 25,5          | 24,5          | 25,0          | 24,0          |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,3           | 0,8           | 4,2           | 0,8           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2458,0        | 2561,0        | 2459,5        | 2568,0        |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2444,9        | 2525,5        | 2467,3        | 2515,5        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 16,86         | 18,05         | 23,87         | 27,44         |
|                               | 28t | 23,06         | 24,85         | 27,21         | 30,56         |
|                               | 56t | 22,38         | 24,87         | 26,49         | 29,44         |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 127,58        | 147,56        | 189,33        | 214,74        |
|                               | 28t | 163,95        | 176,64        | 198,70        | 219,15        |
|                               | 56t | 162,31        | 196,87        | 201,49        | 225,88        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 34,45         | 37,35         | 45,43         | 50,84         |
|                               | 28t | 41,43         | 43,44         | 47,91         | 51,84         |
|                               | 56t | 41,30         | 43,14         | 47,00         | 52,32         |

**Abbildung 108: Biegezugfestigkeiten Mischung M 16**

Alle vier Proben können ähnliche Biegezugfestigkeitsverläufe vorzeigen. Die Festigkeiten steigen bis zum 28. Tag an und ändern sich dann vom 28. auf den 56. Tag kaum bzw. nehmen leicht ab. Die Biegezugfestigkeiten liegen bei den Vakuumbehandelten Proben aus dem Wasserbecken meist 2 N/mm² und bei den

Proben aus dem Heißwasser um 3-4 N/mm<sup>2</sup> höher als die nichtvakuumbehandelten Proben. Durch die Heißwasserlagerung konnten die Festigkeiten um 4-6 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden.

Die Druckfestigkeiten der Mischreihe M 16 sind in Abbildung 109 dargestellt. Man kann sofort erkennen, dass die Probe M 16.2 mV die Druckfestigkeit mit der Zeit stärker steigern konnte, während sich die Festigkeit der anderen Proben vom 28. auf den 56. Tag nicht mehr so stark ändert. Es fällt auf, dass die Druckfestigkeit nach 56 Tagen der Probe M 16.2 mV fast den Wert der Probe M 16.3 oV erzielen konnte. Nach 56 Tagen stellten sich Druckfestigkeiten von 162, 196, 201 und 225 N/mm<sup>2</sup> ein.



**Abbildung 109: Druckfestigkeiten Mischung M 16**

Bei der Betrachtung der Spaltzugfestigkeitsverläufe im Bild 110 fällt auf, dass die Festigkeiten aller Proben vom 7. auf den 28. Tag leicht ansteigen und sich am 56. Tag bei den 28 Tagesfestigkeiten einpendeln. Abgesehen von der Probe M 16.4 mV nehmen alle Festigkeiten vom 28. auf den 56. Tag leicht ab. Durch die Vakuumbehandlung konnte die Spaltzugfestigkeit bei den Proben aus dem 20 °C Wasserbecken um 2 N/mm<sup>2</sup> und bei den Proben aus dem Heißwasserbecken 4-5 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Die Nachbehandlung im Heißwasserbecken brachte bei der Prüfsreihe M 16 einen Anstieg der Spaltzugfestigkeit von 6-9 N/mm<sup>2</sup>.

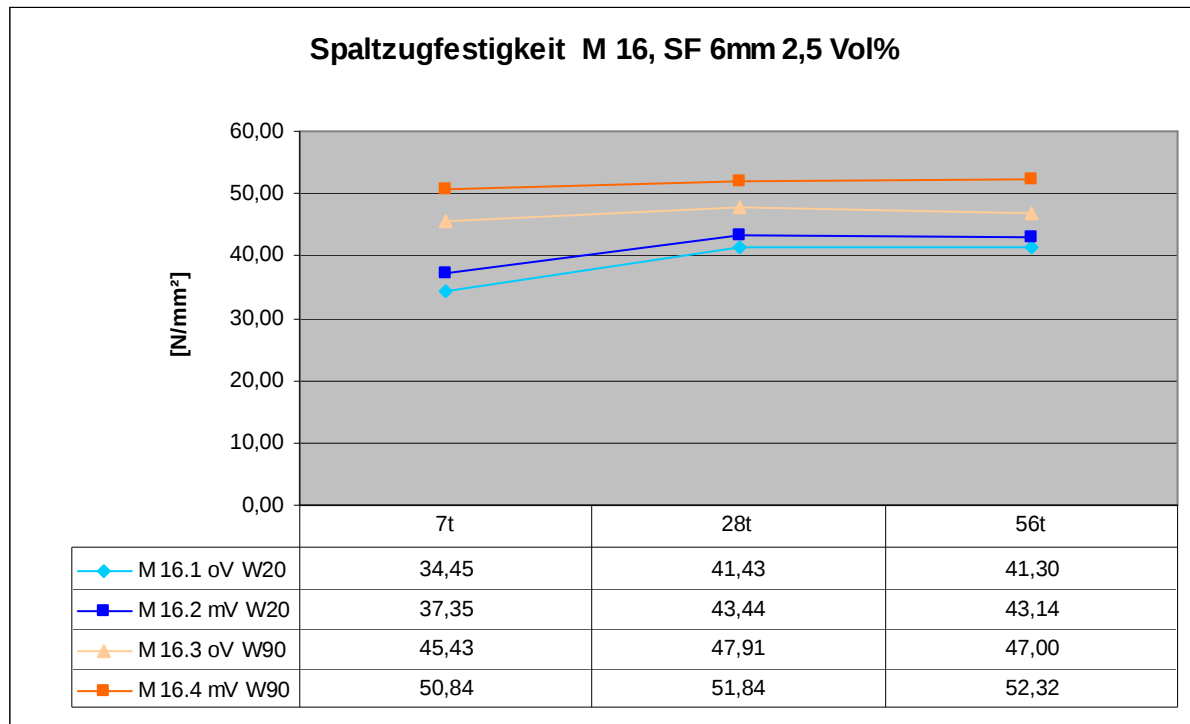


Abbildung 110: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 16

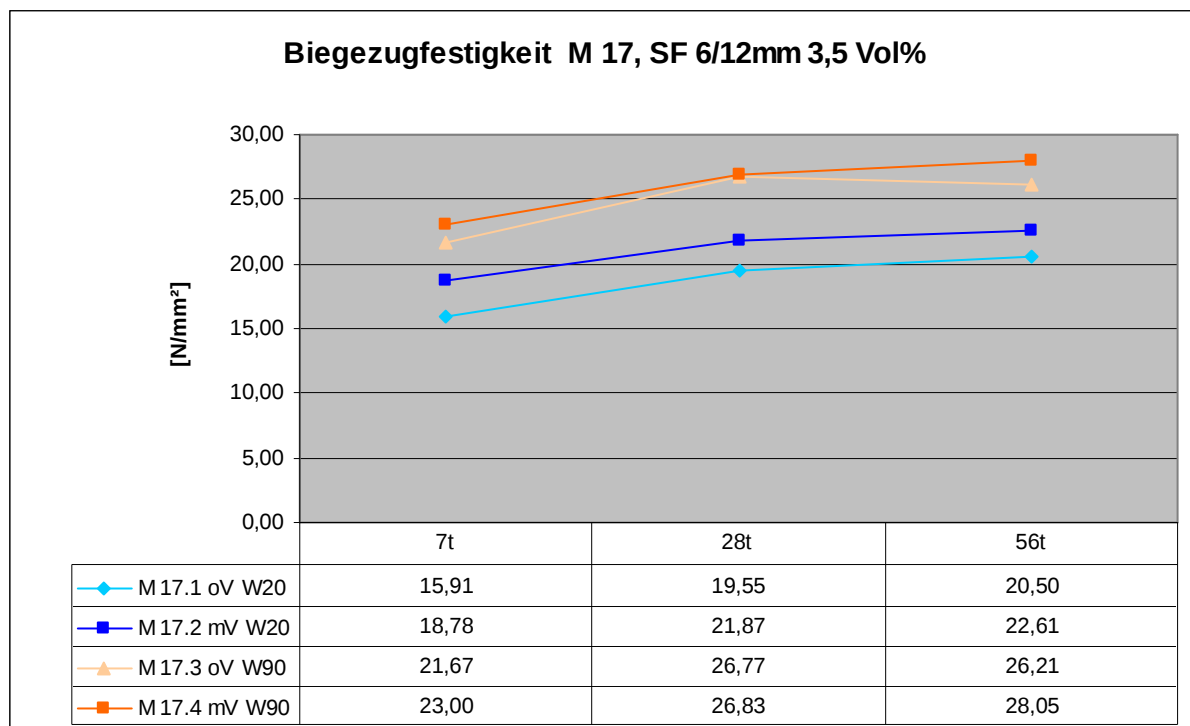
### 6.19 Mischung M 17: Stahlfaser 6/12 mm 3,5 Vol%

Wie bei der Mischung zuvor wurde die entsprechende Fasermischung noch einmal mit den dünneren Stahlfasern nachgemischt. Bei dieser Mischserie wurde die gleiche Mischrezeptur der Mischung M 8 herangezogen, mit dem Unterschied dass die Stahlfasern mit einem Durchmesser von 0,175 mm zum Einsatz kamen. Es wurde ein Stahlfasercocktail mit 6 und 12 mm langen Fasern mit Fasergehalten von 2,5 Vol% (12 mm) und 1,5 Vol% (6 mm) hergestellt. In Tabelle 58 sind die Frisch- und Festbetoneigenschaften der vier verschiedenen Mischungen aufgelistet.

Während sich bei den Mischungen M 17.1 oV und M 17.3 oV die gleichen Mischtemperaturen mit 38 °C einstellten, konnten die Mischungen mit Vakuum 36 und 35 °C erzielen. Die Ausbreitmaße der identischen Mischabläufe wichen um 0,5 °C ab und es stellten sich Werte von 24 und 23,5 cm ein. Die Mischungen konnten Luftporengehalte von 4,1 % und 0,8 % erreichen. Alle Festbetonrohddichten nach 28 Tagen lagen unter den Frischbetonrohddichten. Die Rohddichten der Frischbetone unterschieden sich nur um maximal 8 kg/m<sup>3</sup>, während die Rohddichten der Festbetone um ca. 26 kg/m<sup>3</sup> voneinander abwichen.

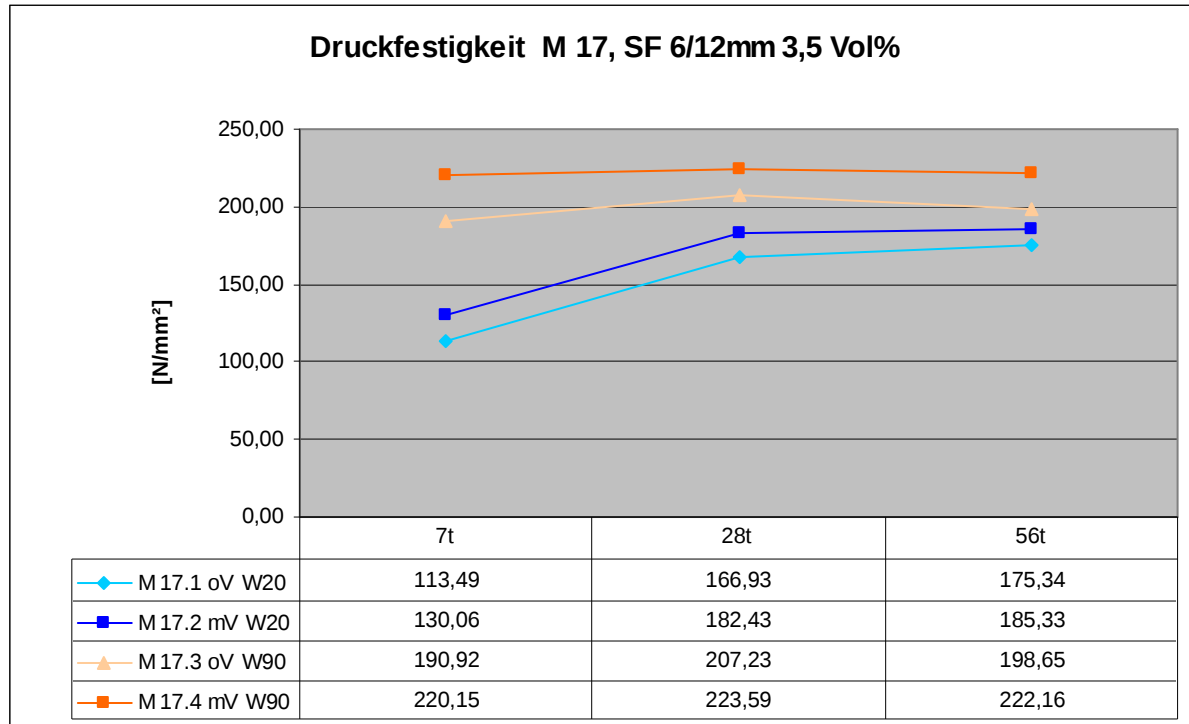
**Tabelle 58: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 17**

| Bezeichnung                   |     | M 17.1 oV W20 | M 17.2 mV W20 | M 17.3 oV W90 | M 17.4 mV W90 |
|-------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]               |     | 38,0          | 36,0          | 38,0          | 35,0          |
| Ausbreitmaß [cm]              |     | 24,0          | 24,0          | 23,5          | 23,5          |
| Luftporengehalt [%]           |     | 4,1           | 0,8           | 4,1           | 0,8           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m³] |     | 2511,5        | 2589,5        | 2519,0        | 2594,5        |
| Festbetonrohddichte [kg/m³]   |     | 2509,1        | 2588,2        | 2483,9        | 2561,1        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm²]         | 7t  | 15,91         | 18,78         | 21,67         | 23,00         |
|                               | 28t | 19,55         | 21,87         | 26,77         | 26,83         |
|                               | 56t | 20,50         | 22,61         | 26,21         | 28,05         |
| $\sigma_D$ [N/mm²]            | 7t  | 113,49        | 130,06        | 190,92        | 220,15        |
|                               | 28t | 166,93        | 182,43        | 207,23        | 223,59        |
|                               | 56t | 175,34        | 185,33        | 198,65        | 222,16        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm²]         | 7t  | 30,06         | 31,99         | 46,49         | 49,70         |
|                               | 28t | 40,13         | 42,24         | 47,07         | 50,62         |
|                               | 56t | 40,32         | 42,22         | 47,04         | 50,47         |

**Abbildung 111: Biegezugfestigkeiten Mischung M 17**

Die Abbildung 111 zeigt die Biegezugfestigkeitsverläufe vom 7. auf den 56. Tag der Mischreihe M 17. Bis auf die Probe M 17.3 oV konnte die Festigkeit mit der Zeit immer leicht gesteigert werden. Die Proben M 17.3 oV und M 17.4 mV weisen am 28. Tag fast dieselbe Biegezugfestigkeit von ca. 26,8 N/mm² auf. Während jedoch die Festigkeit der Probe M 17.3 oV nach 56 Tagen leicht abfällt, steigt die Festigkeit der

Probe M 17.4 um fast 2 N/mm<sup>2</sup>. Die Biegezugfestigkeit konnte durch das Vakuummischen im Durchschnitt um 7-10 % erhöht werden und durch die Heißwassernachbehandlungsmethode konnte ein Festigkeitsanstieg von 24-27 % gewonnen werden.

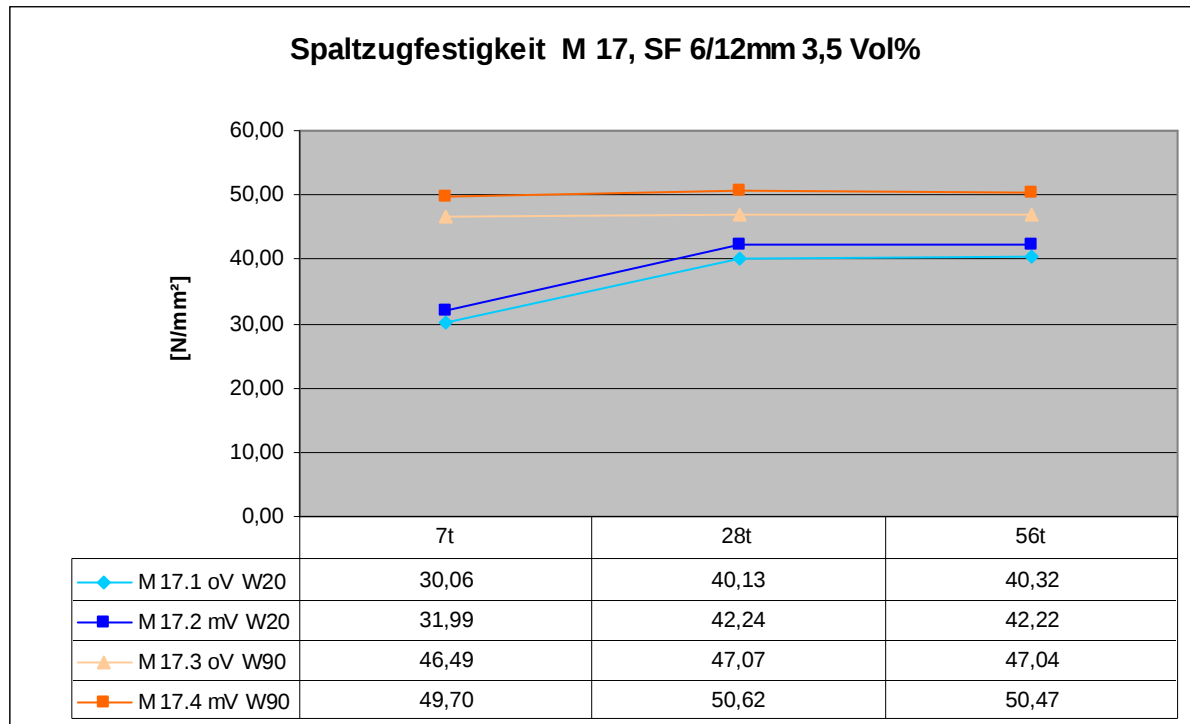


**Abbildung 112: Druckfestigkeiten Mischung M 17**

In Abbildung 112 kann man erkennen, dass die Druckfestigkeiten bei den Proben aus dem 20 °C Wasser vom 7. auf den 28. Tag um ca. 50 N/mm<sup>2</sup> zunahmen und danach noch bis zum 56. Tag leicht gesteigert werden konnten. Die Druckfestigkeiten der Proben aus dem Heißwasserbecken konnten bis zum 28. Tag leicht gesteigert werden, fallen aber am 56. Tag wieder leicht ab. Die Druckfestigkeiten nach 56 Tagen konnten durch den Vakuum Einfluss um 10 und 24 N/mm<sup>2</sup> und durch die Heißwassernachbehandlung um 23 und 37 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Nach 56 Tagen konnten die Proben aus dem 20 °C Wasserbecken Druckfestigkeitswerte von 175 und 185 N/mm<sup>2</sup> und die Proben aus dem Heißwasser Werte von 198 und 222 N/mm<sup>2</sup> aufzeigen.

Bild 113 zeigt die Spaltzugfestigkeitsverläufe der Probenserie M 17. Bei den 20 °C Wassergelagerten Proben stieg die Spaltzugfestigkeit innerhalb 21 Tagen um 10 N/mm<sup>2</sup>, während die heißwassergelagerten Proben die Festigkeit nur um 1 N/mm<sup>2</sup> vom 7. auf den 28. Tag erhöhen konnten. Die Spaltzugfestigkeiten von allen vier

Proben änderten sich vom 28. auf den 56. Tag nicht mehr. Ein durchschnittlicher Festigkeitsanstieg von 5-6 % konnte mit der Vakuumbehandlung erzielt werden und mithilfe der Heißwassernachbehandlung konnte eine Steigerung der Spaltzugfestigkeit von 17-18 % gewonnen werden.



**Abbildung 113: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 17**

## 6.20 Mischung M 18: Stahlfaser 6/12 mm und Polypropylenfaser

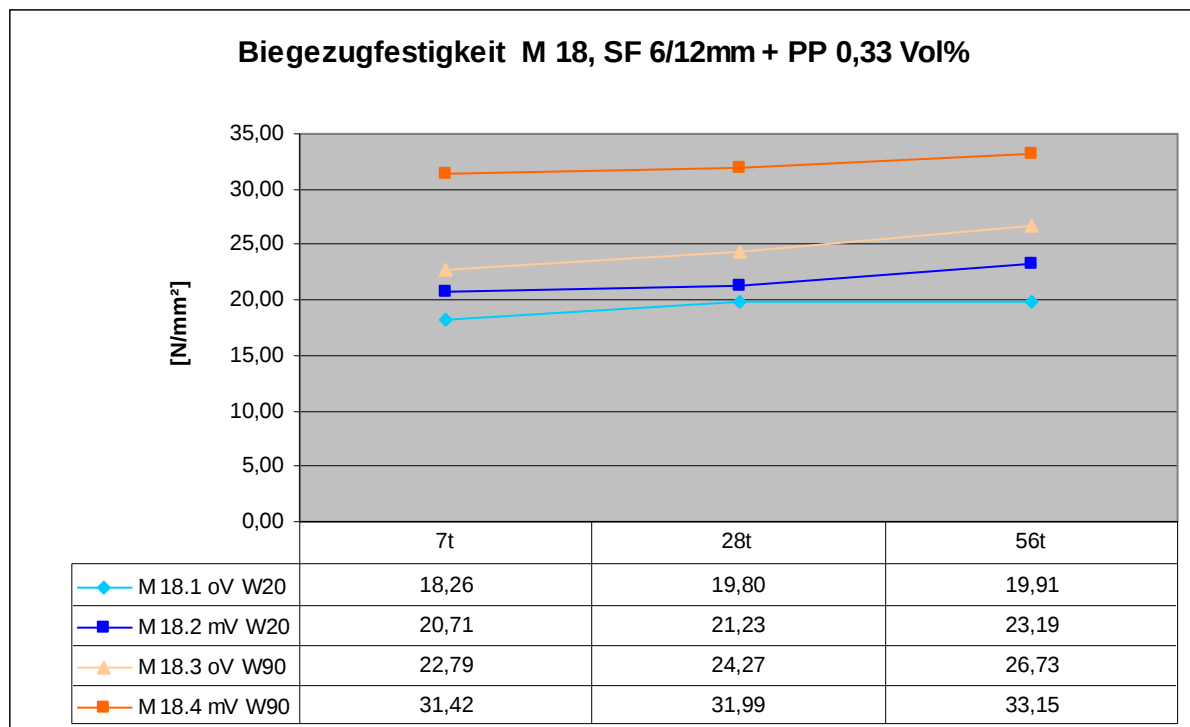
Für die Mischungen M 18 wurde die gleiche Mischrezeptur aus der Mischreihe M 15 herangezogen und durch die 6 mm langen Stahlfasern mit einem Durchmesser von 0,175 mm ersetzt. Die Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten dieser Mischungen sind in Tabelle 59 enthalten.

Die beiden Mischabläufe konnten bei allen vier Mischungen fast immer die gleichen Frischbetoneigenschaften erreichen. Für die Mischungen M 18.1 oV und M 18.3 oV stellten sich Mischtemperaturen von 38 °C und Ausbreitmaße von 22,5 cm und 22 cm ein. Weiters konnte ein Luftporengehalt von 4,1 und 4,2 % und fast identische Frischbetonrohdsichten von 2519,5 bzw. 2523,5 kg/m³ gemessen werden. Bei den Frischbetonen M 18.2 mV und M 18.4 mV konnten Mischtemperaturen von 36 °C

und Ausbreitmaße von 22,5 und 22 cm gemessen werden und es konnten Luftporengehalte von 0,9 % und Frischbetonrohddichten von 2599 und 260,5 kg/m<sup>3</sup> ermittelt werden. Alle Festbetonrohddichten liegen unter den Rohddichten der Frischbetone. Bei den Proben M 18.2 mV und M 18.4 mV liegen die Frisch- und Festbetonrohddichten um ca. 32 kg/m<sup>3</sup> auseinander und bei den Proben M 18.1 oV und M 18.3 oV beträgt die Abweichung der Rohddichten ca. 70 bzw. 56 kg/m<sup>3</sup>.

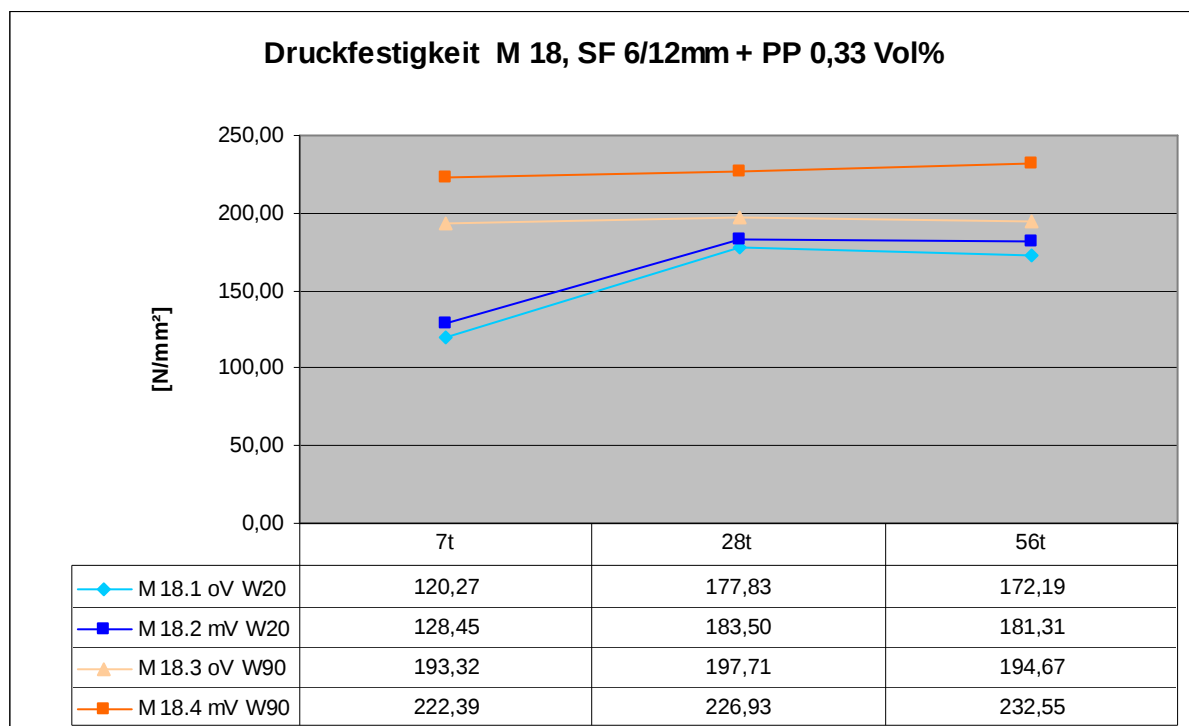
**Tabelle 59: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 18**

| Bezeichnung                                |     | M 18.1 oV W20 | M 18.2 mV W20 | M 18.3 oV W90 | M 18.4 mV W90 |
|--------------------------------------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Temperatur [°C]                            |     | 38,0          | 36,0          | 38,0          | 36,0          |
| Ausbreitmaß [cm]                           |     | 22,5          | 22,5          | 22,0          | 22,0          |
| Luftporengehalt [%]                        |     | 4,1           | 0,9           | 4,2           | 0,9           |
| Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ] |     | 2519,5        | 2599,0        | 2523,5        | 2602,5        |
| Festbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]   |     | 2450,9        | 2566,7        | 2467,2        | 2570,8        |
| $\sigma_{BZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 18,26         | 20,71         | 22,79         | 31,42         |
|                                            | 28t | 19,80         | 21,23         | 24,27         | 31,99         |
|                                            | 56t | 19,91         | 23,19         | 26,73         | 33,15         |
| $\sigma_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]            | 7t  | 120,27        | 128,45        | 193,32        | 222,39        |
|                                            | 28t | 177,83        | 183,50        | 197,71        | 226,93        |
|                                            | 56t | 172,19        | 181,31        | 194,67        | 232,55        |
| $\sigma_{Sp}$ [N/mm <sup>2</sup> ]         | 7t  | 29,24         | 33,36         | 46,55         | 49,89         |
|                                            | 28t | 32,10         | 34,68         | 46,82         | 49,16         |
|                                            | 56t | 31,09         | 32,68         | 47,17         | 49,08         |



**Abbildung 114: Biegezugfestigkeiten Mischung M 18**

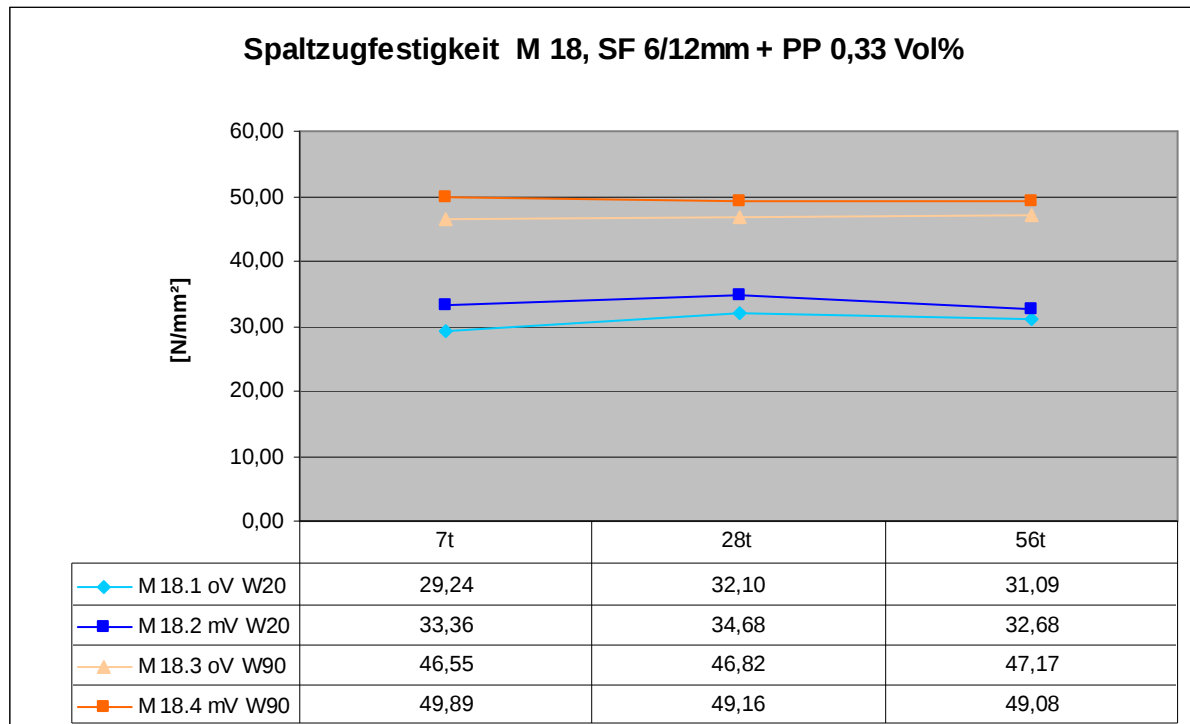
Die in Abbildung 114 dargestellten Biegezugfestigkeiten zeigen einerseits, dass sich bei allen Proben die Festigkeiten um weniger als 4 N/mm<sup>2</sup> erhöhen. Andererseits kann man einen gleich bleibenden Festigkeitsverlauf von den Proben M 18.1 oV und M 18.4 mV erkennen. Weiters fällt der große Festigkeitssprung zwischen den Proben M 18.3 oV und M 18.4 mV auf. So konnte die Biegezugfestigkeit nach 56 Tagen durch das Vakuummischen bei den Proben im Wasserbecken um 16 % und bei den Proben im Heißwasser um 24 % gesteigert werden. Durch die Nachbehandlung im Heißwasser erhöhte sich die Biegezugfestigkeit um 34 % bei den nichtvakuumgemischten Proben und um 42 % bei den vakuumgemischten Proben.



**Abbildung 115: Druckfestigkeiten Mischung M 18**

Die Druckfestigkeiten der beiden Wassergelagerten Proben verlaufen sehr ähnlich, wobei die vakuumgemischte Probe immer um 6-9 N/mm<sup>2</sup> höher als die nichtvakuumgemischte Probe liegt. Während die Probe 18.3 oV bis zum 28. Tag von 193 N/mm<sup>2</sup> auf 197 N/mm<sup>2</sup> leicht anstieg und am 56. Tag wieder auf 194 N/mm<sup>2</sup> leicht abfiel, konnte die Probe M 18.4 mV die Druckfestigkeit bis zum 56. Tag immer leicht steigern. Nach 56 Tagen stellten sich Druckfestigkeiten von 172, 181, 194 und 232 N/mm<sup>2</sup> ein. Mit der Vakuumbehandlung konnte eine Festigkeitssteigerung von 10

N/mm<sup>2</sup> bei den Wassergelagerten Proben und 38 N/mm<sup>2</sup> bei den heißwassergelagerten Proben erzielt werden.



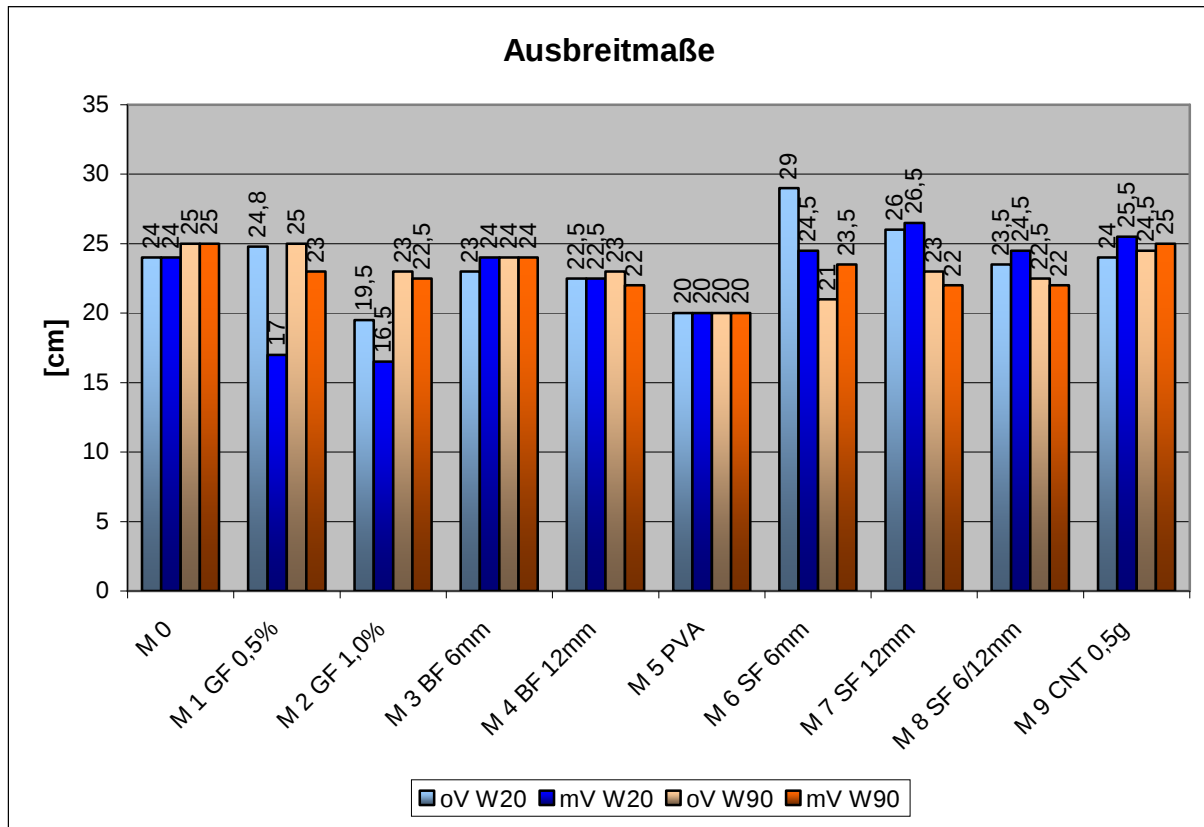
**Abbildung 116: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 18**

Auch die Spaltzugfestigkeiten der Proben aus dem 20 °C Wasserbecken bzw. der Proben aus dem Heißwasserbecken verlaufen ähnlich. Es fällt auf, dass innerhalb jeder Probe die Festigkeitssteigerung weniger als 3 N/mm<sup>2</sup> beträgt. Alle vier Proben weisen deshalb an allen drei Prüftagen die annähernd gleichen Festigkeitswerte auf. Die Spaltzugfestigkeit konnte durch das Vakuummischen im Schnitt um 1-2 N/mm<sup>2</sup> und durch die Nachbehandlung im Heißwasser um ca. 16 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden.

## 7. Interpretation und Zusammenhänge

### 7.1 Frischbetonergebnisse

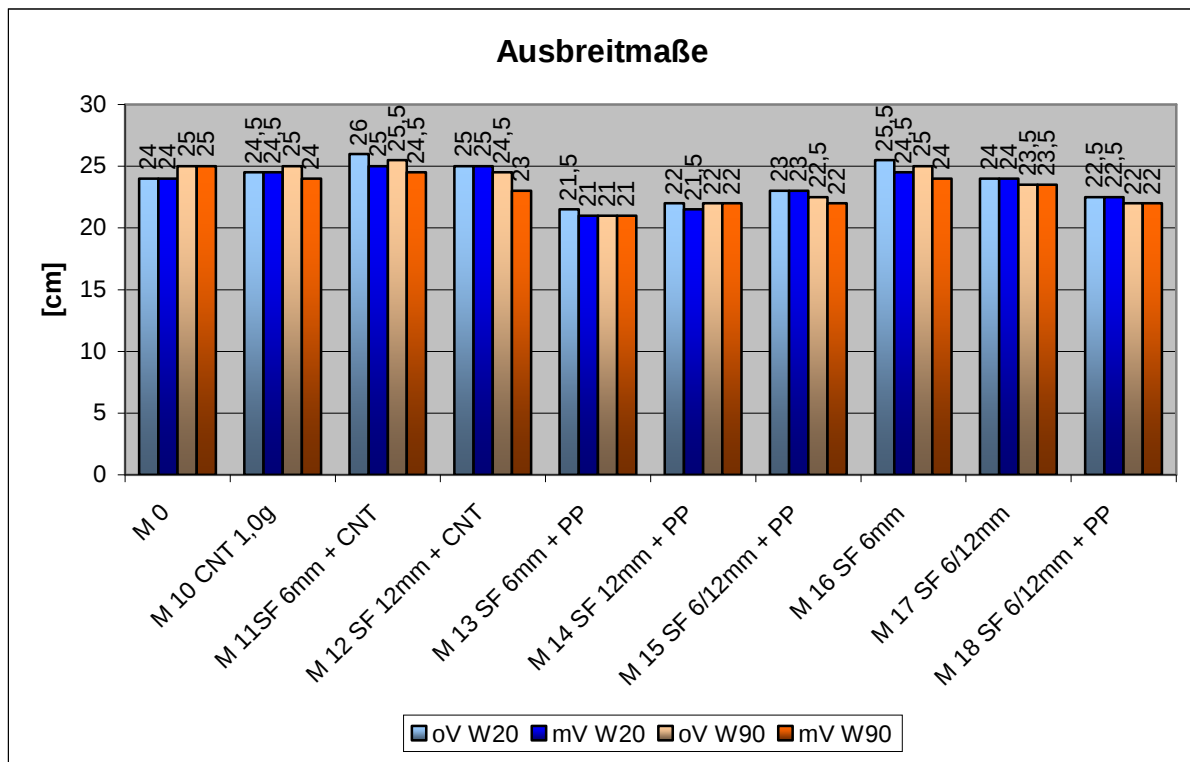
#### 7.1.1 Ausbreitmaß



**Abbildung 117: Ausbreitmaße der Mischungen M 0 - M 9**

Die Abbildungen 117 und 118 zeigen die Ausbreitmaße aller Mischungen. Dabei kann man feststellen, dass die Nullmischung nicht die maximalen Ausbreitmaße lieferte, obwohl bei allen anderen Mischungen Fasern als Ausgangstoffe vorkamen. Bei einigen Fasermischungen verbesserte sich sogar die Konsistenz des Frischbetons. Abgesehen von den beiden vakuumgemischten Ausreißermischungen, verschlechterte sich die Verarbeitbarkeit des Frischbetons durch den Einsatz von Glasfasern. Die Werte für die Ausbreitmaße liegen im Schnitt leicht unter der Nullmischung. Dies konnte auch bei den Basaltmischungen beobachtet werden. Die 6 mm langen Basaltfasermischungen konnten im Durchschnitt ein um 1-2 cm größeres Ausbreitmaß als die Vergleichsmischungen mit 12 mm langen Basaltfasern aufweisen. Die Mischreihe M 5 mit PVA-Fasern konnte Aufgrund der Klumpenbildung

nur Ausbreitmaße von 20 cm erreichen und weist somit die schlechtesten Werte aller Mischungen auf. Bei der Mischserie M 6 mit 6 mm langen Stahlfasern schwanken die Ausbreitmaße am deutlichsten. Die beiden nichtvakuumgemischten Frischbetone zeigten eine Abweichung von 8 cm auf, obwohl sie durch den gleichen Mischablauf hergestellt wurden. Gründe für diese Abweichung könnten einerseits Fehler während des Mischprozesses sein, andererseits könnte auch die Ausbreitmaßmessung zu spät durchgeführt worden sein, sodass der Frischbeton M 6.3 oV härter als der M 6.1 oV war und deshalb eine schlechtere Konsistenz aufwies. Über den Durchschnitt gesehen stellten sich bei den Stahlfasermischungen M 6 und M 7 die gleichen Ausbreitmaße wie bei der Nullmischung ein. Die Stahlfasermischungen mit 6 und 12 mm langen Fasern und einem Fasergehalt von 3,5 Vol% liegen im Mittel leicht unter den Ausbreitmaßen der Nullmischung.



**Abbildung 118: Ausbreitmaße der Mischungen M 0, M 10 - M 18**

Die beiden Mischungen M 9 und M 10 mit Carbon-Nanotubes konnten fast die gleichen Ausbreitmaße wie die Nullmischung erzielen, da die Carbon-Nanotubes wahrscheinlich auf Grund ihrer Größe offensichtlich kaum einen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons haben. Vergleicht man die Mischungen M 11 und M 12 mit Stahlfasern und CNTs mit den Mischungen M 6 und M 7 ohne CNTs, so kann man erkennen, dass die Mischungen mit CNTs die leicht besseren

Ausbreitmaße lieferten. Die Frischbetone M 13, M14 und M 15 mit Polypropylen- und Stahlfasern lagen alle deutlich unter den Ausbreitmaßwerten der Nullmischung. Obwohl die Mischungen der Reihe M 15 den größten Fasergehalt mit 3,83 Vol% aufweisen, stellte sich im Schnitt ein Ausbreitmaß von 22,5 cm ein. Die Frischbetone M 16 und M 17 mit dünnen 6 mm Stahlfasern konnten Ausbreitmaße von 23,5 bis 25,5 cm erreichen, und liegen damit ca. bei den Werte der Vergleichsmischungen mit dicken 6 mm Stahlfasern. Auch die Mischung M 18 weist den größten Fasergehalt mit 3,83 Vol% auf und konnte ein durchschnittliches Ausbreitmaß von 22,3 cm erreichen.

Der Mittelwert aller nichtvakuumgemischten Ausbreitmaße beträgt 23,5 cm und der Durchschnittswert der vakuumgemischten Ausbreitmaße wurde mit 22,9 cm berechnet. Die beiden Ausbreitmaßmittelwerte liegen also nur um 2,6 % auseinander. Im Vergleich zum normalgemischten Beton entsteht üblicherweise durch den Entzug von Luft am Ende des Mischprozesses eine zähflüssigere und kompaktere Betonmasse. Bei der Mischung M 6.1 oV stellte sich das größte Ausbreitmaß mit 29 cm ein und der kleinste Wert wurde bei dem Frischbeton M 2.2 mV mit 16, 5 cm gemessen.

### **7.1.2 Luftporengehalt**

Die Luftporengehalte aller 19 Mischungen sind in den Abbildungen 119 und 120 dargestellt. Die Nullmischung konnte bei dem Frischbetonen ohne Vakuum 4,1 und 4,0 % und bei dem Betonen mit Vakuum 0,8 % erreichen. Man kann erkennen, dass alle Fasermischungen, vor allem die nichtvakuumgemischten Frischbetone, immer leicht oder etwas mehr über den Luftgehalten der Nullmischung liegen. Während sich die Glasfasermischungen der Serie M 1 an die Luftgehalte der Nullmischung annähern, liegen die Werte für die Mischreihe M 2 leicht darüber. Die Frischbetone mit einem Glasfasergehalt von 1,0 Vol% konnten im Mittel 4,5 % und 0,8 % Luftgehalt erzielen. Bei den beiden Basaltfasermischungen liegen alle Werte deutlich über der Nullmischung. Mit den Mischungen M 5 mit PVA-Fasern konnten trotz starker Klumpenbildung immerhin Luftgehalte von 4,5 und 0,7 % gemessen werden. Bei den Stahlfasermischungen M 6, M 7 und M 8 stellten sich immer 0,8 % Luftgehalt bei den vakuumgemischten Frischbetonen ein. Bei den nichtvakuumgemischten Frischbetonen stellten sich Luftgehalte von 4,6 % bei M 6, 4,2 % bei M 7 und 4,0 % bei M 8 ein.

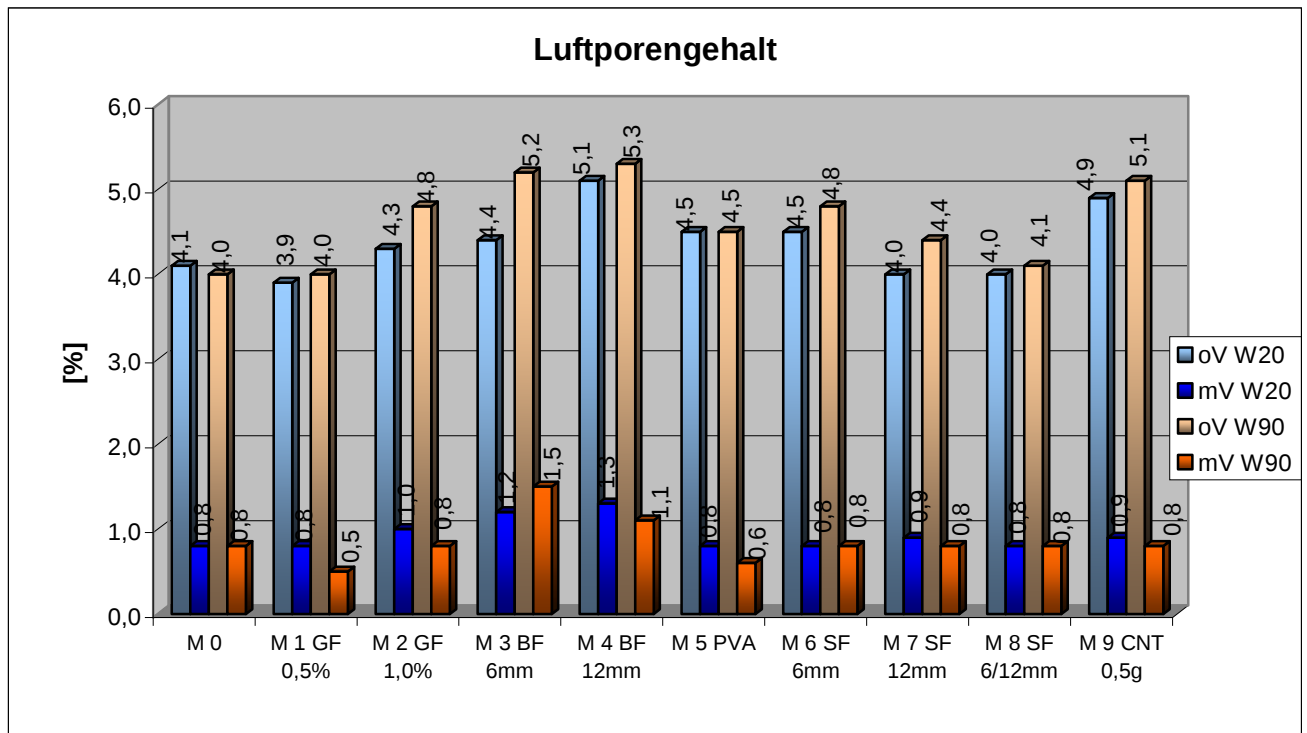


Abbildung 119: Luftporengehalte der Mischungen M 0 - M 9

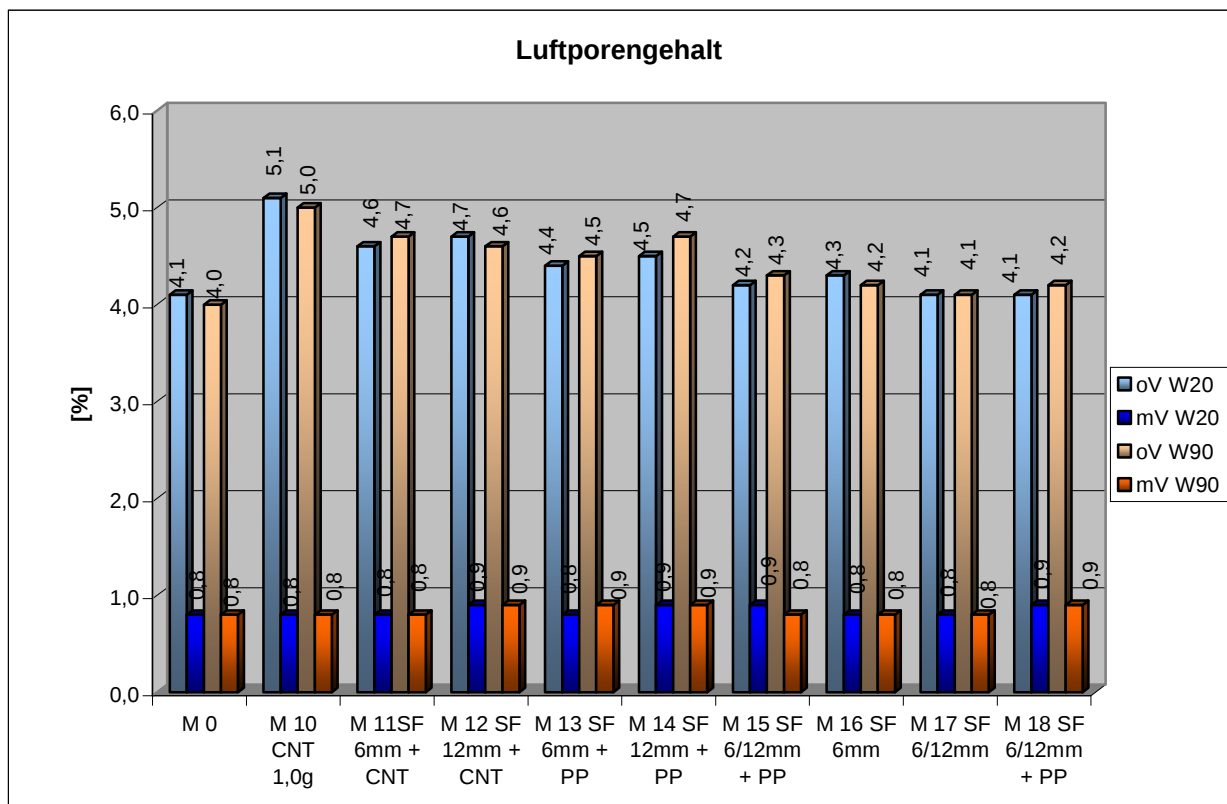


Abbildung 120: Luftporengehalte der Mischungen M 0, M 10 - M 18

Die beiden Mischungen M 9 und M 10 mit Carbon-Nanotubes konnten fast die gleichen Luftgehalte vorweisen, unterschieden sich aber bei den Frischbetonen ohne Vakuum doch deutlich mit 5,0 % von der Nullmischung. Die Mischungen M 11 und M 12 mit Stahlfasern und Carbon-Nanotubes zeigten die gleichen Luftgehalte auf. Vergleicht man die Werte der Mischungen M 6 und M 11, so treten kaum Abweichungen auf. Hingegen tritt bei den nichtvakuumbehandelten Frischbetonen M 7 und M 12 ein Unterschied von 0,4 % auf. Bei den Fasercocktails mit Stahlfasern und Polypropylenfasern stellen sich fast immer Luftgehalte von 4,5 % bei dem Frischbetonen ohne Vakuum und 0,9 bei den Frischbetonen mit Vakuum ein. Die beiden Mischungen M 15 und M 18 mit dem größten Fasergehalt von 3,83 Vol% konnten jeweils 4,4 % und 0,9 % erreicht werden. Die beiden Mischungen M 16 und M 17 mit dünnen 6 mm Stahlfasern ca. 4,2 % und 0,8 % erreichen. Die nichtvakuumgemischten Frischbetone der Mischreihe M 16 konnten damit einen um 0,4 % geringeren Luftgehalt als die gleichwertigen Mischungen M 6 mit dickeren 6 mm Stahlfasern vorweisen.

Im Durchschnitt ergibt sich ein Luftgehalt der nichtvakuumgemischten Frischbetone von 4,47 % und bei den vakuumgemischten Frischbetonen stellt sich ein durchschnittlicher Luftgehalt von 0,87 % ein. Anders ausgedrückt, konnte das Entlüften mit 60 mbar im letzten Mischabschnitt den Luftgehalt der vakuumgemischten Frischbetone um 3,61 % reduziert werden. Der größte Luftporengehalt stellte sich bei dem nichtvakuumgemischten Frischbeton M 4 mit 12 mm langen Basaltfasern mit 5,3 % ein und der kleinste Luftgehalt wurde bei der vakuumgemischten Glasfasermischung M 1 mit 0,5 % gemessen.

### 7.1.3 Frischbetonrohddichte

Die Abbildungen 121 und 122 zeigen die Frischbetonrohddichten aller Mischungen. Auf den ersten Blick kann man erkennen, dass sich die ersten Mischungen M 1 bis M 5 nur wenig von der Nullmischungen unterscheiden, alle Frischbetone in denen Stahlfasern enthalten sind, aufgrund des höheren Fasergewichts, deutlich über der Nullmischung liegen und das die beiden Mischungen M 9 und M 10 mit Carbon-Nanotubes nur ganz leicht von der Mullmischung abweichen. Unterscheidet man die Glasfasermischungen M 1 und M 2 miteinander, so sieht man, dass die Frischbetone

mit höherem Fasergehalt im Durchschnitt die kleineren Rohdichten als die Frischbetone aus M 1 aufweisen konnten.

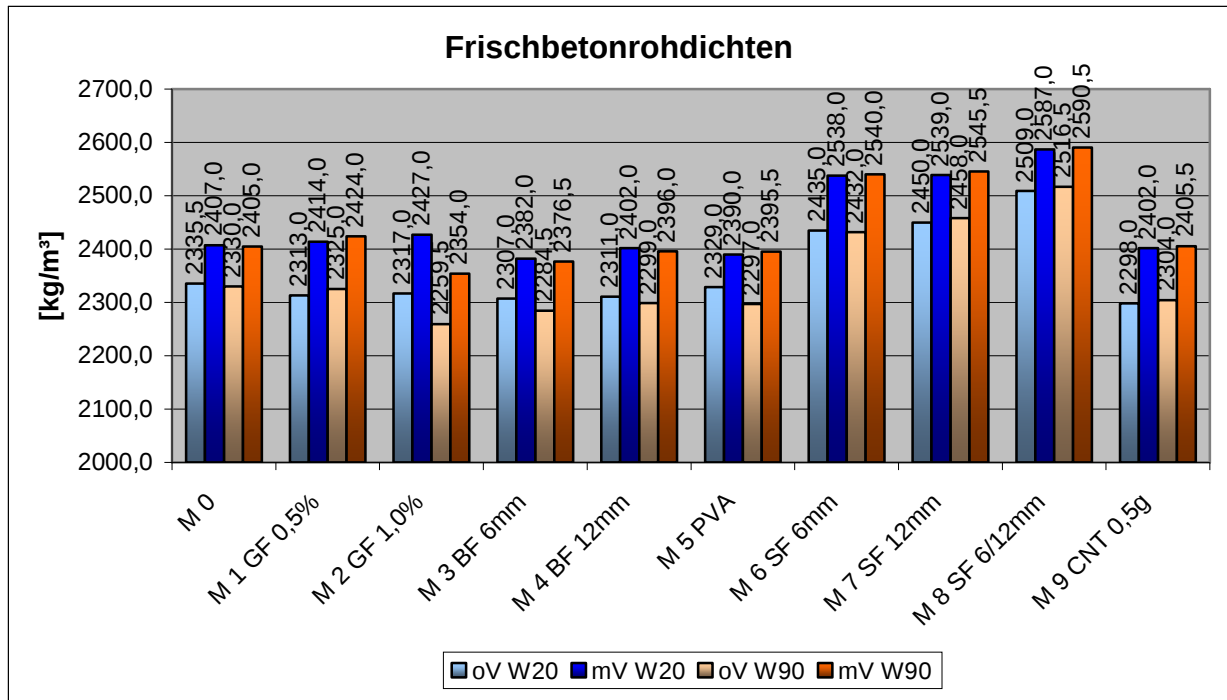


Abbildung 121: Frischbetonrohddichten der Mischungen M 0 - M 9

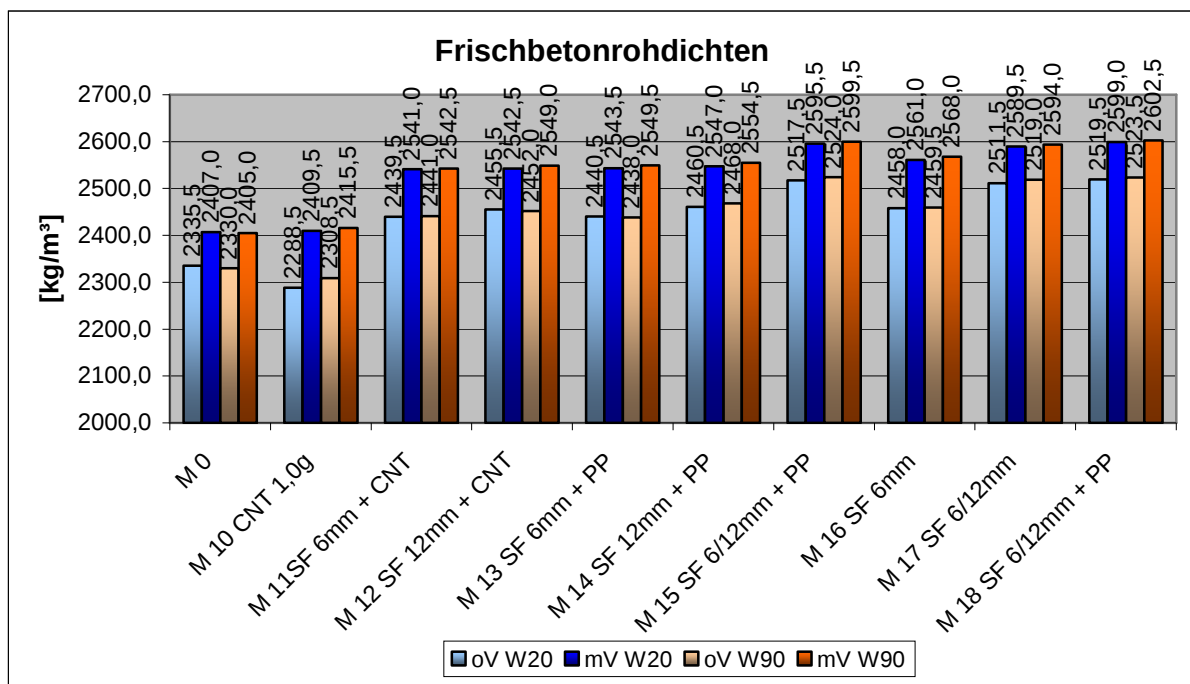


Abbildung 122: Frischbetonrohddichten der Mischungen M 0, M 10 - M 18

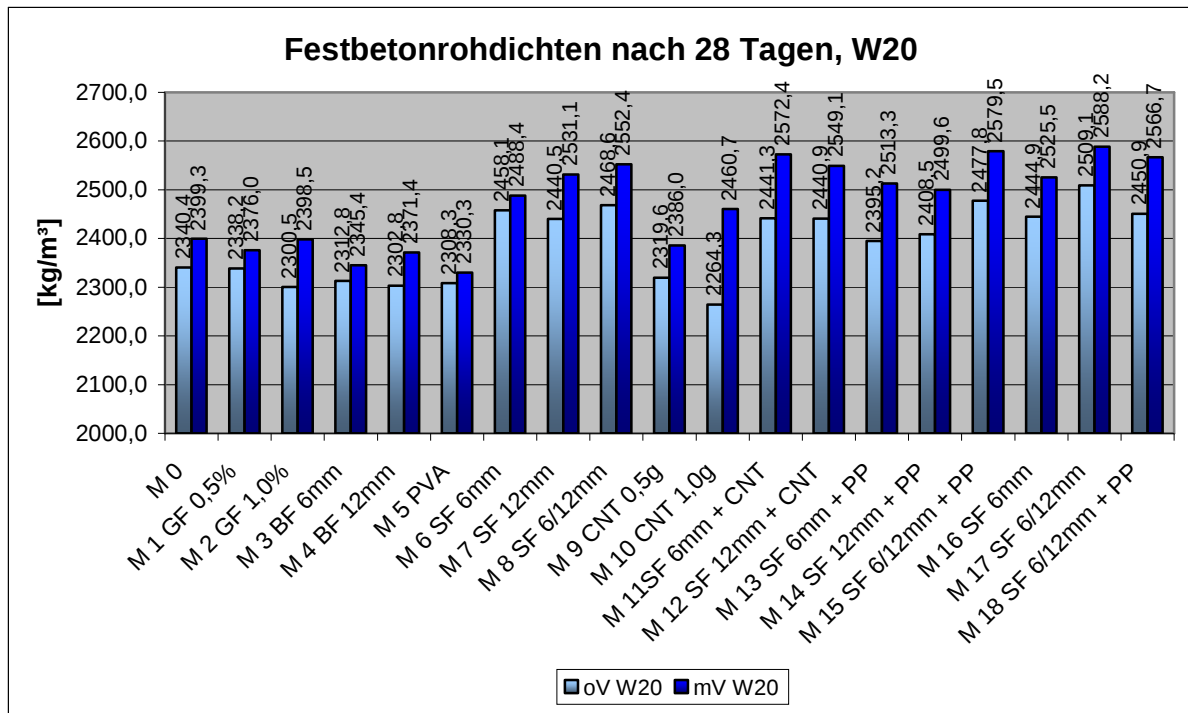
Die Basaltfasermischungen M 3 und M4 verhalten sich ähnlich, jedoch genau umgekehrt zu den Frischbetonen mit Glasfasern. Hier liegen die Rohdichten der Mischserie M 3 mit 6 mm langen Fasern im Mittel unterhalb der Rohdichten der Mischreihe M 4 mit 12 mm langen Basaltfasern. Aufgrund der Änderung der Faserlängen und Fasergehalte nehmen die Frischbetonrohdsichten bei allen Stahlfasermischungen zu. Dies kann man vor allem bei den Mischserien M 6, M 7, M8, aber auch bei M 10, M 11 und M 13, M 14, M 15 und den Mischungen M 16, M 17 und M 18 gut erkennen. Bei den Mischungen mit Carbon-Nanotubes M 9 und M 10 fällt auf, dass die Rohdichten der vakuumgemischten Frischbetone fast identisch mit der Nullmischung sind, während die Rohdichten der nichtvakuumgemischten Frischbetone immer unterhalb der Nullmischung liegen.

Im Durchschnitt liegen alle vakuumgemischten Frischbetonrohdsichten mit  $2622,0 \text{ kg/m}^3$  um 3,8 % höher als die nichtvakuumgemischten Rohdichten mit  $2526,32 \text{ kg/m}^3$ . Dieser Unterschied stellt sich durch den geringeren Luftgehalt im Frischbeton ein, der durch das Vakuummischen erzeugt wurde. Die größte Frischbetonrohdsichte wurde bei der vakuumgemischten Probe M 18 mit Stahl- und Polypropylenfasern mit  $2602,5 \text{ kg/m}^3$  und die kleinste Rohdsichte wurde bei dem nichtvakuumgemischten Frischbeton M 2 mit Glasfasern mit  $2259,5 \text{ kg/m}^3$  erzielt.

## 7.2 Festbetonergebnisse

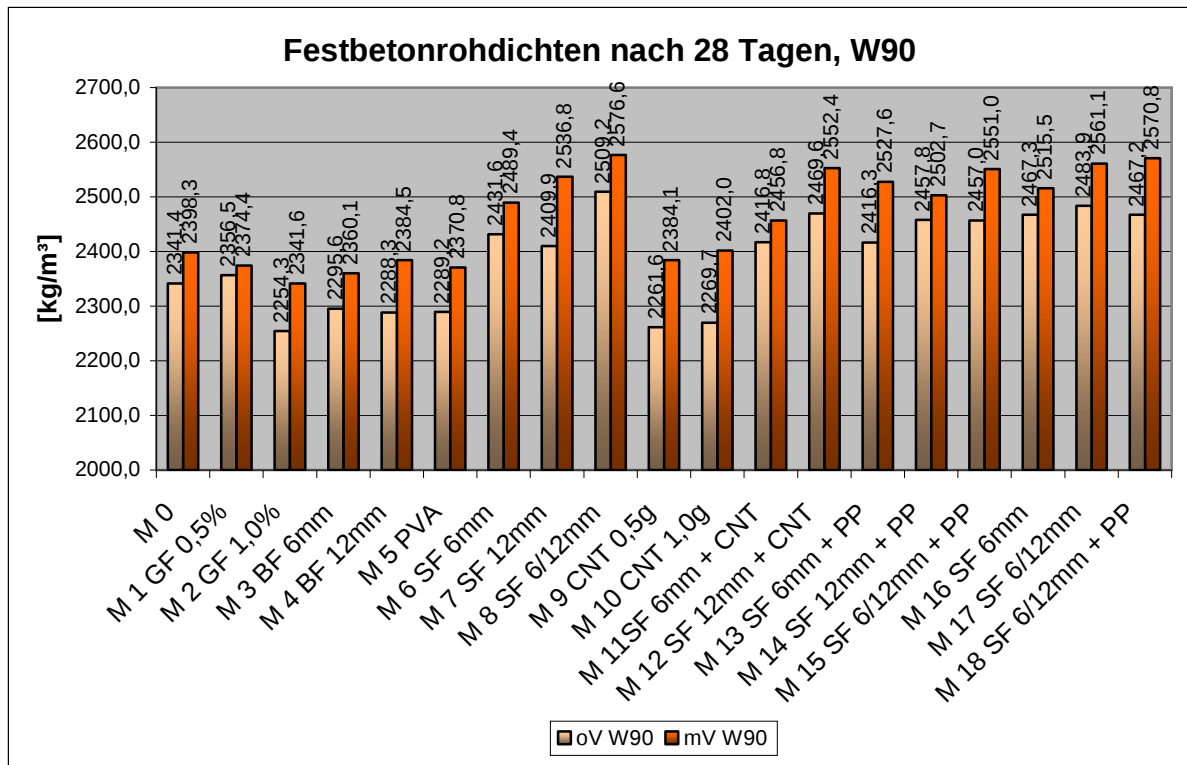
### 7.2.1 Festbetonrohdsichte

Die Festbetonrohdsichten der einzelnen Mischungen sind in den folgenden Abbildungen 123 und 124 nach den beiden Nachbehandlungsmethoden aufgeteilt und nur für den 28. Tag dargestellt. Die Ergebnisse sind als die Mittelwerte der drei geprüften Probeprismen der jeweiligen Mischungsart zu verstehen. Unsorgfältige Messung und Abwiegung können die Ergebnisse der Probekörper mit den Abmessungen von  $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$  stark beeinflussen. Da die Probekörper an einer Seite nicht ganz plan aushärten, können Messfehler und Verdichtungsporen die Ergebnisse verfälschen.



**Abbildung 123: Festbetonrohddichten aller Proben mit 20°C Wasserlagerung**

In der Abbildung 123 sind die Festbetonrohddichten nach 28 Tagen aller Proben mit der Nachbehandlung im 20 °C Wasserbecken dargestellt. Man sieht, dass sich die Rohddichten der Proben mit Glasfasern und Basaltfasern an die Werte der Nullmischung annähern, während die Proben mit PVA-Fasern die niedrigsten Festbetonrohddichten vorweisen konnten. Die Proben mit Stahlfasern verhalten sich alle ähnlich und ihre Rohddichten steigen mit zunehmendem Fasergehalt an. Während die Proben M 9 mit CNTs leicht unter der Nullmischung liegen, weichen die Rohddichten der Proben M 10 doch recht deutlich von der Nullmischung ab. Bei den Proben M 11 und M 12 mit Stahlfasern und CNTs konnten fast die gleichen Rohddichten erzielt werden, obwohl sie unterschiedliche Stahlfaserlängen besitzen. Die Proben mit Fasercocktails aus Stahl- und Polypropylenfasern mit einem Fasergehalt von 2,83 Vol% konnten ebenfalls fast die identischen Rohddichten erreichen. Bei den Proben M 15 mit dem größten Fasergehalt von 3,83 Vol% stellten sich auch hohe Festbetonrohddichten ein. Die größten Festbetonrohddichten nach 28 Tagen konnten die Proben M 17 mit 6 und 12 mm langen Stahlfasern vorweisen. Die niedrigsten Rohddichten wurden bei den Proben M 5 mit PVA-Fasern berechnet. Im Durchschnitt lagen die Festbetonrohddichten der vakuumgemischten Proben mit 2475,46 kg/m³ um 3,5 % über den nichtvakuumgemischten Proben mit durchschnittlichen Rohddichten von 2390,67 kg/m³.



**Abbildung 124: Festbetonrohddichten aller Proben mit Heißwasserlagerung**

Die in Abbildung 124 dargestellten Festbetonrohddichten nach 28 Tagen der Proben aus der Heißwassernachbehandlung zeigen wieder, dass alle Proben die mit 60 mbar am Ende des Mischprozesses entlüftet wurden, höhere Festbetonrohddichten vorweisen, als solche Proben die normal gemischt wurden. Im Mittel liegen alle rohddichten der Proben mit Vakuumbehandlung mit 2466,13 kg/m³ um 3,3 % höher, als die Rohddichten der Proben ohne Vakuumbehandlung mit 2386,48 kg/m³.

Auffällig ist, dass sich jene Proben, die mit der Nachbehandlung im 20 °C Wasserbecken ähnliche Rohddichten wie die Nullmischung vorweisen konnten, bei der Nachbehandlung im Heißwasser stärker mit ihrer Rohddichte von der Nullmischung abweichen. Besonders die nichtvakuumgemischten Proben schwanken sehr stark von den Festbetonrohddichten der Proben M 0.

Bei der Nachbehandlung im Heißwasser konnte die vakuumgemischte Probe M 8 mit 6 und 12 mm langen Stahlfasern und 3,5 Vol% Fasergehalt die größte Festbetondrohddichte nach 28 Tagen aufweisen und die nichtvakuumgemischte Probe M 2 mit 1,0 Vol% Glasfasern die niedrigste Festbetonrohddichte erzielen.

## 7.2.2 Biegezugfestigkeit

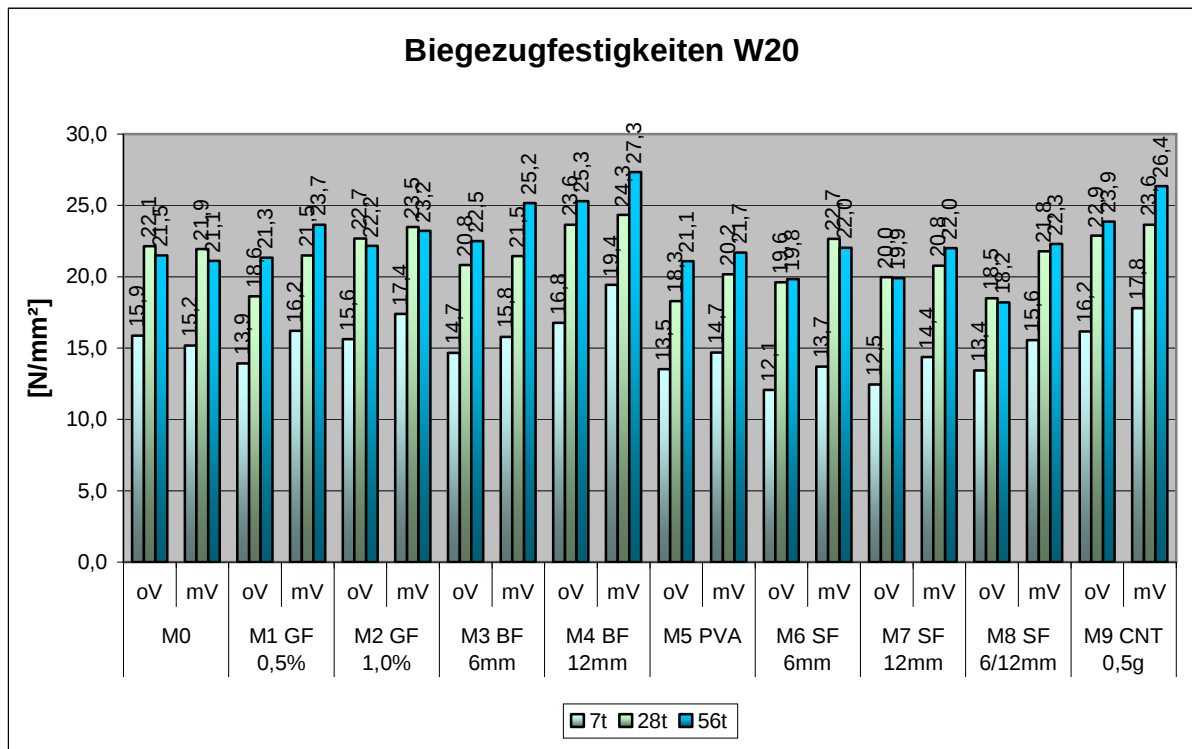


Abbildung 125: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit 20°C Wasserlagerung

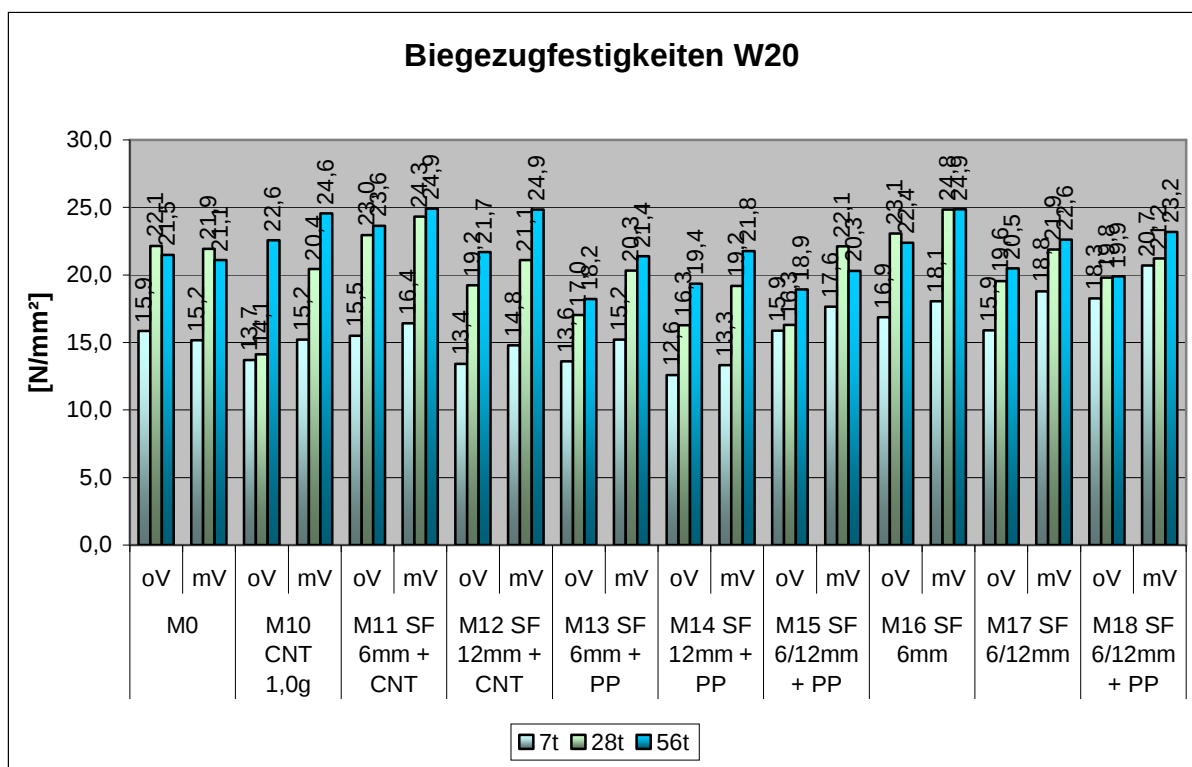


Abbildung 126: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit 20°C Wasserlagerung

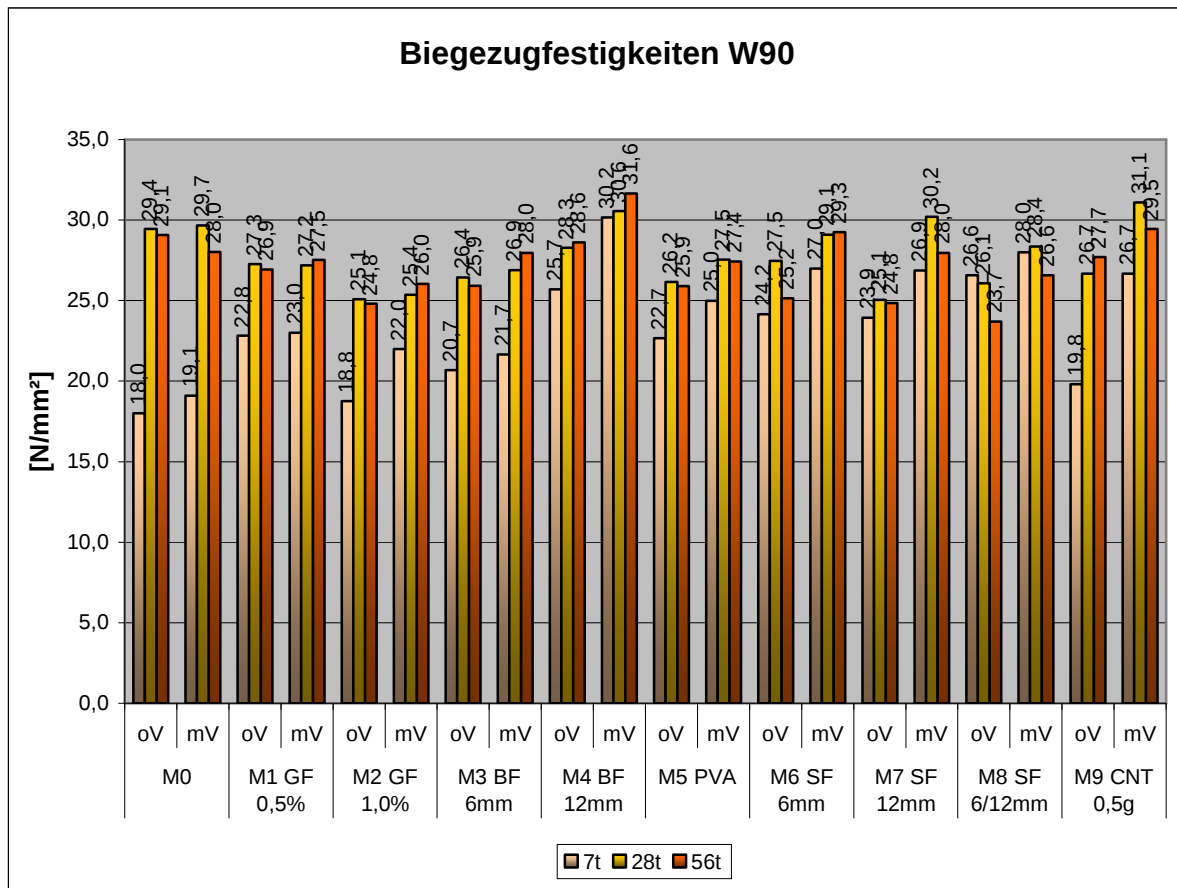
Die Abbildungen 125 und 126 zeigen die Biegezugfestigkeiten der nichtvakuum- und vakuumgemischten Proben aus den 20 °C Wasserbecken. Auf den ersten Blick kann man erkennen, dass die Biegezugfestigkeiten nicht bei allen Proben durch den Einsatz von Fasern gesteigert werden konnten. Weiters fällt auf, dass fast mit jeder Faserart durch die Variation des Fasergehalts die Biegezugfestigkeiten der Nullmischung über- und unterschritten werden können.

Betrachtet man die Biegezugfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen, so sieht man, dass nur Festigkeiten der Proben M 2 mit Glasfaser, M 4 mit 12 mm Basaltfasern, M 9 mit CNTs, M 11 mit Stahlfasern und CNTs und die Mischungen M 16, M 17 und M 18 mit den dünnen 6 mm Stahlfasern über den Werten der Nullmischung liegen. Jedoch steigern sich die Biegezugfestigkeiten nach 56 Tagen bei fast allen Proben, sodass die Festigkeiten der Nullmischungen überschritten werden konnten. Nur die Proben der Mischserien M 5 mit PVA-Fasern und M 15 mit Stahlfasern und Polypropylenfasern konnten die Biegezugwerte der Nullmischung nach 56 Tagen nicht erreichen.

Im Durchschnitt erreichten die nichtvakuumgemischten Proben eine Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen von 14,7 N/mm<sup>2</sup> und alle vakuumgemischten Proben eine Festigkeit von 16,3 N/mm<sup>2</sup>. Die Biegezugfestigkeiten der Proben mit normaler Wasserlagerung konnte somit um 10,7 % gesteigert werden. Die größte Biegezugfestigkeit nach 7 Tagen stellte sich bei der Probe M 18 mit 20,7 N/mm<sup>2</sup> und der kleinste Wert wurde bei der Probe M 6 mit 12,1 N/mm<sup>2</sup> erzielt.

Durch das Vakuummischen konnten die Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen im Mittel von 19,8 N/mm<sup>2</sup> auf 21,9 N/mm<sup>2</sup> um 11,1 % erhöht werden. Der Maximalwert nach 28 Tagen wurde bei der Mischung M 16 mit 24,8 N/mm<sup>2</sup> und Minimalwert bei der Probe M 10 mit 14,12 N/mm<sup>2</sup> festgestellt.

Nach 56 Tagen erreichten die Proben ohne Vakuumbehandlung eine durchschnittliche Biegezugfestigkeit von 21,2 N/mm<sup>2</sup> und die Proben mit Vakuumbehandlung konnten im Mittel um 10 % auf 23,3 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Der Größtwert nach 56 Tagen stellte sich mit 27,3 N/mm<sup>2</sup> bei der Probe M 4 mit Basaltfasern und der Kleinstwert mit 18,21 N/mm<sup>2</sup> bei der Probe M 8 mit Stahlfasern ein.



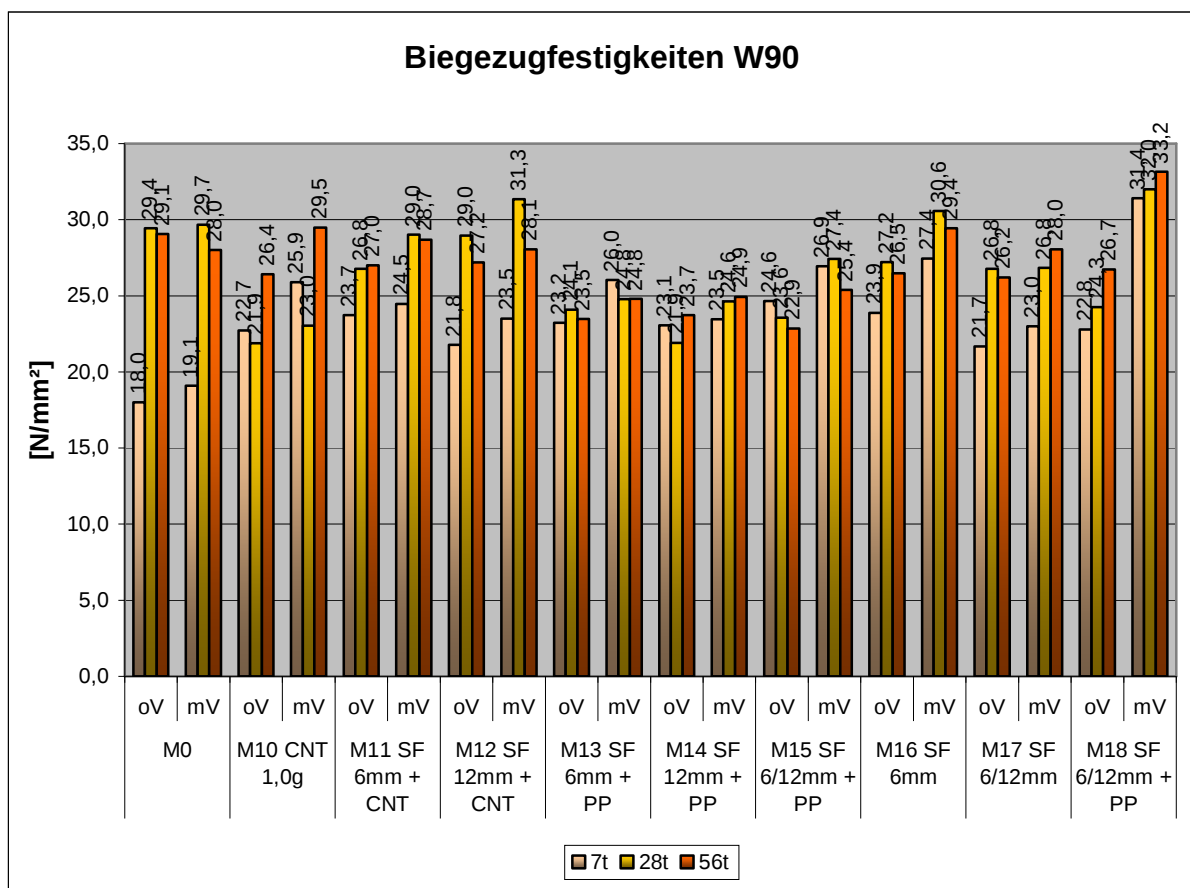
**Abbildung 127: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit Heißwasserlagerung**

In den Abbildungen 127 und 128 sind die Biegezugfestigkeiten der heißwassergelagerten Proben dargestellt. In den beiden Diagrammen fällt auf, dass die Biegezugfestigkeiten der Nullmischung nach 7 Tagen von jeder anderen Mischung übertroffen wurde, aber die Biegezugfestigkeiten nach 28 und 56 Tagen nur von ein paar bestimmten Mischungen höher als die der Nullmischung waren. So konnten z. B. nur die Proben M 4 mit Basaltfasern, M 7 mit 12 mm Stahlfasern, M 9 mit CNTs, M 12 mit Stahlfasern und CNTs, M 16 mit Stahlfasern und M 18 mit Stahl- und PP-Fasern die Festigkeiten der Nullmischung überbieten, und dass nur zum Teil mit den Vakuumbehandelten Proben.

Nach 7 Tagen stellten sich im Mittel Biegezugfestigkeiten für die Proben, die ohne Vakuum hergestellt wurden, von 22,7 N/mm² und für die Proben, die mit Vakuum produziert wurden, von 25,4 N/mm² ein. So konnte die 7-Tagesfestigkeit im Durchschnitt um 11,8 % gesteigert werden. Der größte Biegezugwert nach 7 Tagen wurde bei der Probe M 18 mit 31,4 N/mm² und der kleinste Wert bei der Nullmischung M 0 mit 18,0 N/mm² gemessen.

Nach 28 Tagen konnten die vakuumgemischten Proben von durchschnittlichen 28,2 N/mm<sup>2</sup> um 8,6 % gegenüber den nichtvakuumgemischten Proben mit einem Durchschnittswert von 25,9 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Der Minimalwert wurde dabei von der Probe M 10 und M 14 mit 21,9 N/mm<sup>2</sup> und der Maximalwert von der Probe M 18 mit 32 N/mm<sup>2</sup> erzielt.

Die Biegezugfestigkeiten nach 56 Tagen lagen im Schnitt bei den Proben ohne Vakuumbehandlung bei 22,9 N/mm<sup>2</sup> und bei den Proben mit Vakuumbehandlung bei 33,2 N/mm<sup>2</sup>. Der Vakuummischprozess konnte die Festigkeit nach 56 Tagen um 8,3 % erhöhen. Der Größtwert stellte sich bei der vakuumgemischten Probe M 18 mit 33,2 N/mm<sup>2</sup> und der Kleinstwert bei der nichtvakuumgemischten Probe M 15 mit 22,9 N/mm<sup>2</sup> ein, also jene Proben die sich nur durch die verschiedenen 6 mm langen Stahlfasern unterscheiden.

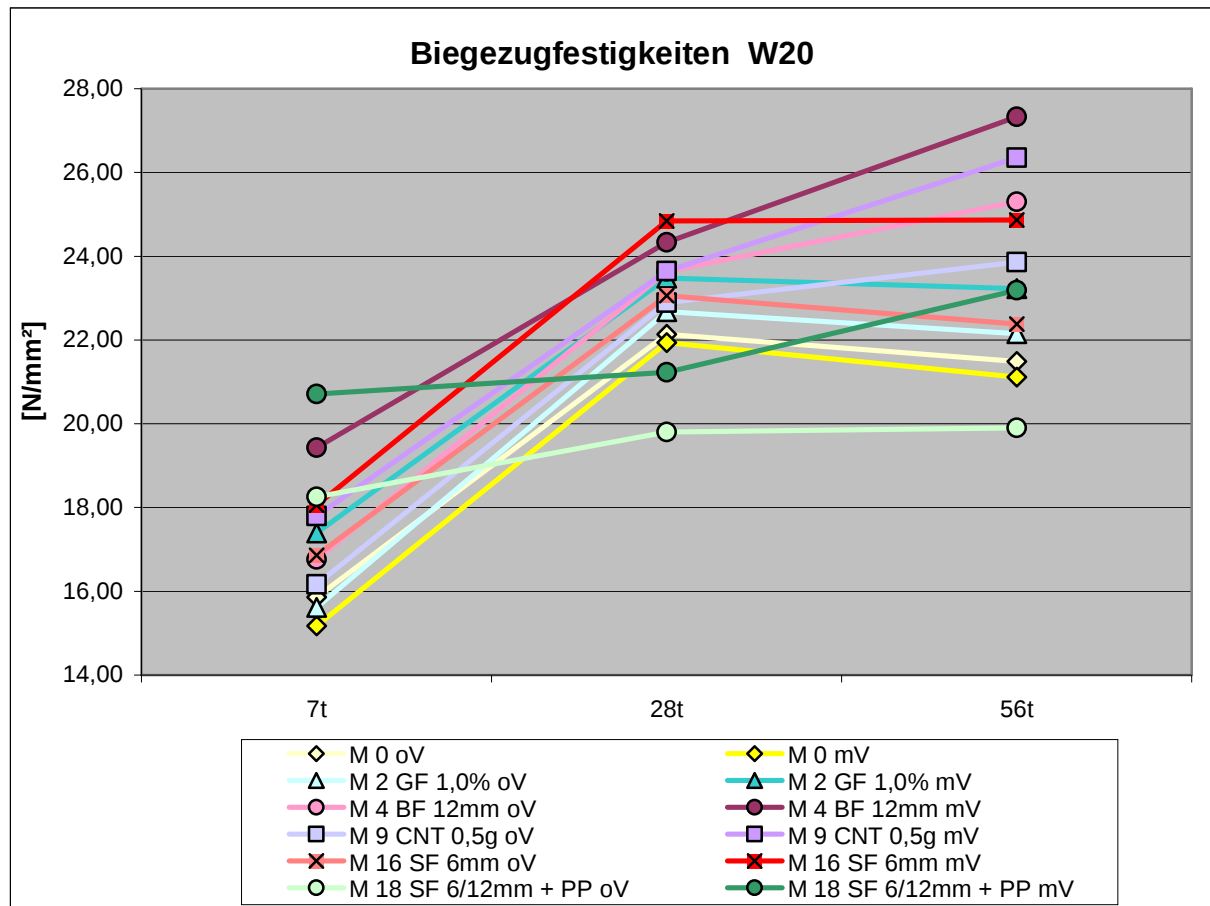


**Abbildung 128: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit Heißwasserlagerung**

Die Biegezugfestigkeiten konnten durch den Fasereinsatz nicht wirklich deutlich erhöht werden. Die Gründe dafür liegen einerseits daran, dass die eingesetzten Fasern, im Vergleich zu den Ausgangsstoffen, größer sind und sich deshalb nicht so gut ins Gefüge einpassen. Im Betongefüge wirken sie dort als „Fremdkörper“ und Feinanteile, wie Zement, Sand, Quarzmehl und Microsilika, können nicht immer die einzelnen Fasern gleichmäßig umhüllen. Andererseits kann nie richtig sichergestellt werden, wie sich die Fasern im Frischbeton ausrichten. Die Regel, dass sich die Fasern bei einem Ausbreitmaß zwischen 22 und 29 cm mit der Fließrichtung ausrichten, kann nicht bei jeder Faserart angewendet werden. Weiters sollte erwähnt werden, dass es sich bei den Biegezugfestigkeiten in dieser Arbeit um die Festigkeiten beim Auftreten des ersten Risses handelt. So zerbrachen die Proben mit Stahlfasern nie in zwei Bruchhälften, sondern konnten immer nur einen Riss an der Zugseite nach dem Biegezugversuch aufweisen. Deshalb können Proben mit Stahlfasern in der Regel etwas mehr Kräfte aufnehmen. Die Abbildung 129 zeigt einen Probekörper aus Stahlfasern nach dem Biegezugversuch. Man kann einerseits sehen, dass sich in der Probenmitte an der Zugseite ein Riss ausgebildet hat und andererseits, dass die Probe nicht in zwei Bruchhälften zerbrach.



**Abbildung 129: Stahlfaserprobe nach dem Biegezugversuch**

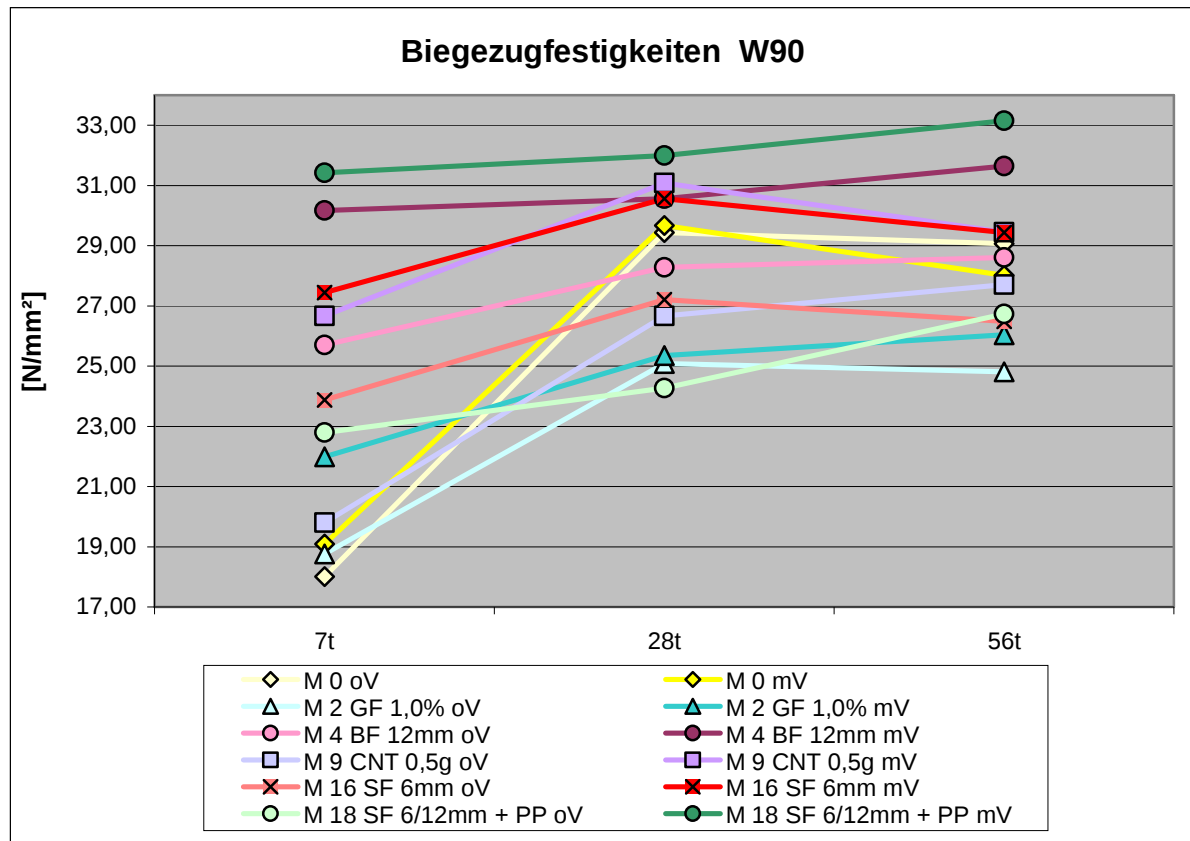


**Abbildung 130: Biegezugfestigkeitsverlauf von 6 ausgewählten Proben mit 20°C Wasserlagerung**

Die Abbildung 130 zeigt die Biegezugfestigkeitsverläufe von 6 unterschiedlichen Proben mit verschiedenen Faserarten aus der 20 °C Wasserlagerung, wobei die nichtvakuum- und die vakuumgemischten Proben dargestellt sind. Die beiden Proben mit Glasfasern liegen knapp über den Biegezugwerten der Nullmischung und die vakuumgemischte Probe mit Basaltfasern konnte die höchsten Festigkeiten vorweisen. Die beiden Proben mit Carbon-Nanotubes liefern ebenfalls gute Ergebnisse und liegen im Mittelfeld. Die Proben M 16 mit Stahlfasern und M 18 mit Stahl- und PP-Faser liegen im Durchschnitt höher als die Nullmischung, sie können aber nicht die Höchstwerte für die Biegezugfestigkeiten liefern.

In der Abbildung 131 sind die Biegezugfestigkeitsverläufe der ausgewählten Proben aus der Heißwasserlagerung dargestellt. Man kann gut erkennen, dass die Nullmischung im mittleren Bereich liegt. Die Glasfasermischungen konnten auch durch die Heißwasserbehandlung nicht die Festigkeiten der Nullmischung überbieten. Bei den Basaltfaserproben und den Proben mit CNTs konnten nur die

vakuummischten Proben immer höhere Festigkeiten als die Nullmischung erzielen und die vakuumgemischte Probe M 18 mit Stahl- und PP-Fasern konnte die höchsten Biegezugfestigkeitswerte vorzeigen.

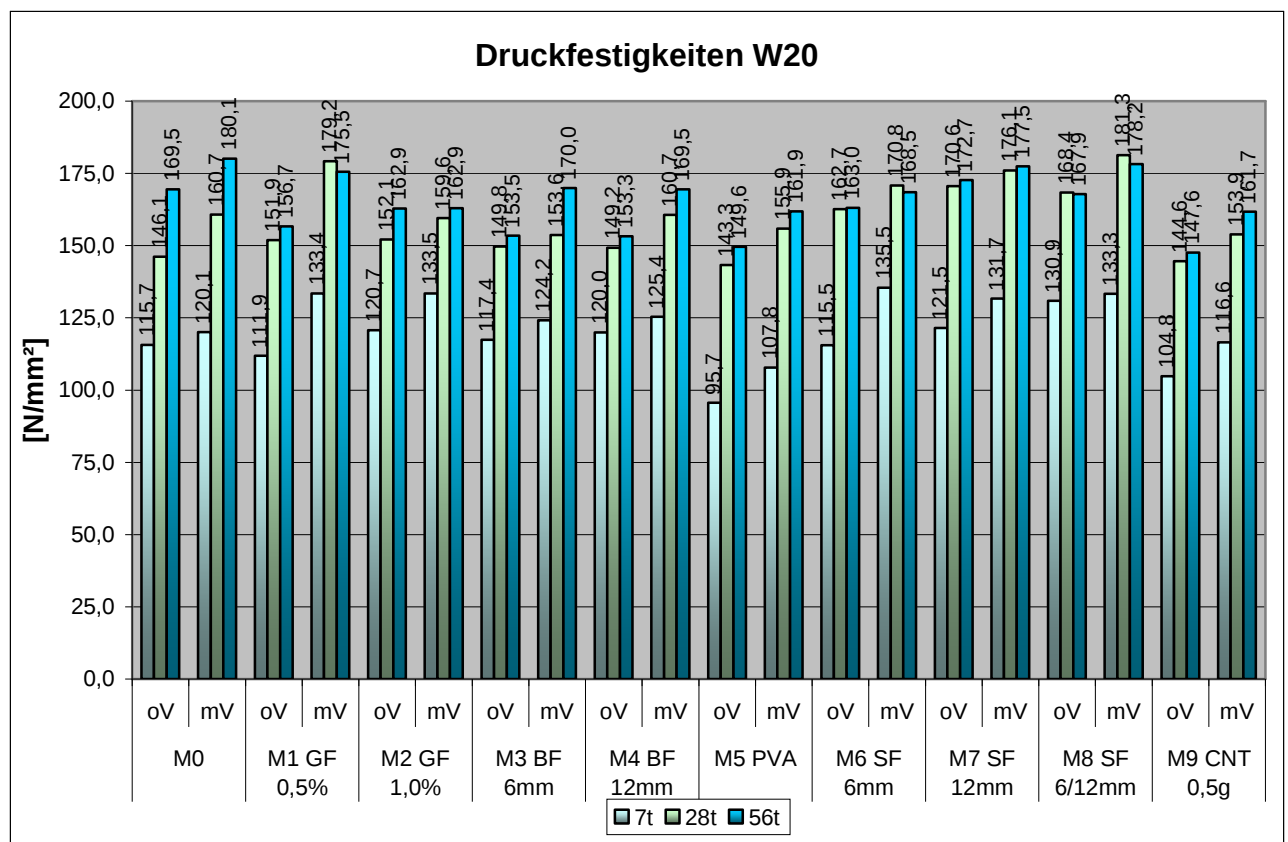


**Abbildung 131: Biegezugfestigkeitsverlauf von 6 ausgewählten Proben mit Heißwasserlagerung**

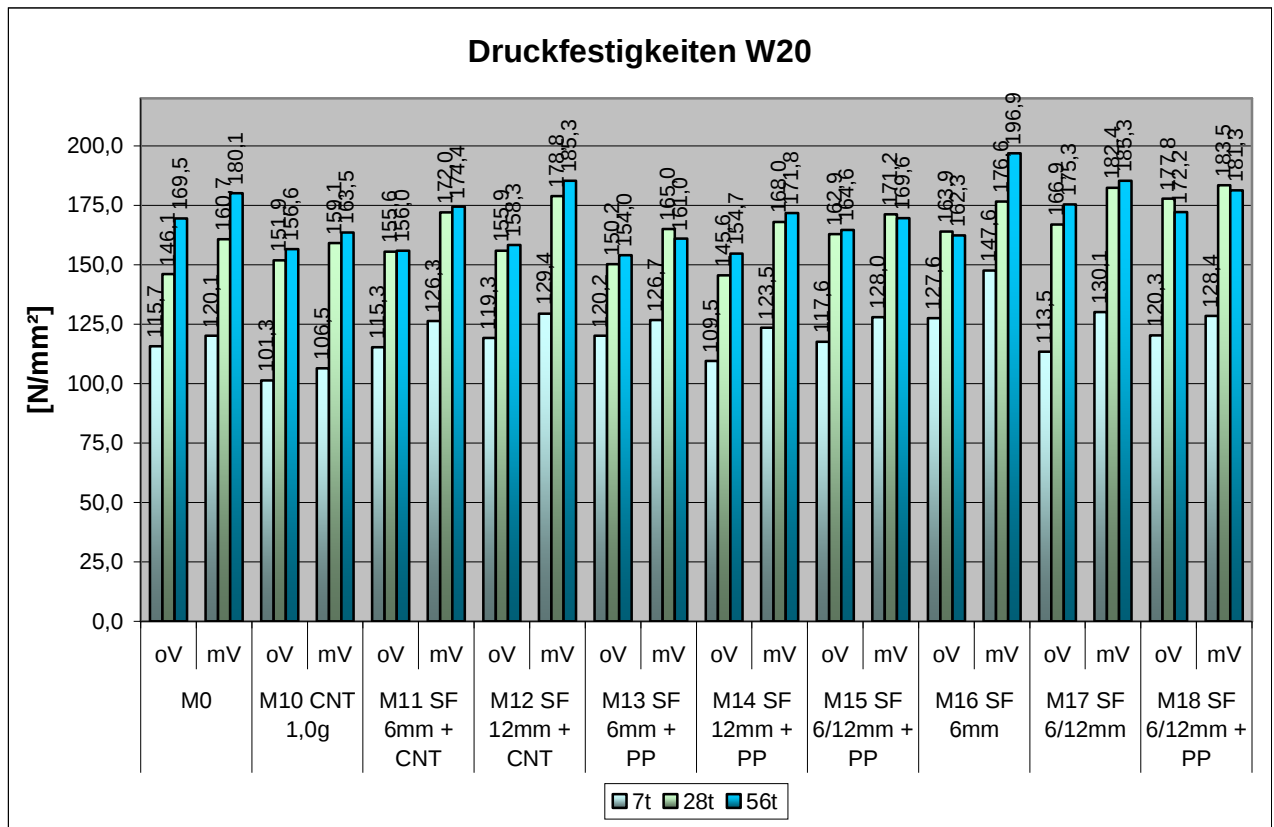
### 7.2.3 Druckfestigkeit

In den Abbildungen 132 und 133 sind die Druckfestigkeiten an den 7, 28 und 56 Tagen der 20 °C Wassergelagerten Proben dargestellt. Man sieht, dass die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen bei allen Proben über der Festigkeit der Nullmischung liegen, ausgenommen bei den Mischungen M 5, M 9 und M 14. Die Druckfestigkeiten nach 7 und 56 Tagen konnten auch Werte unter der Nullmischung aufweisen. Bei den beiden Glasfasermischungen M 1 und M 2 liegen die Druckfestigkeiten an allen Prüftagen über den Durchschnitt gesehen immer leicht über der Nullmischung. Die Basaltemischungen konnten nur am 7. und 28. Tag höhere Druckfestigkeiten als die Nullmischung erzielen. Nach 56 Tagen liegt die Nullmischung um ca. 8,1 % höher als die beiden Proben mit Basaltfasern. Die Probe

M 5 mit Polyvinylalkoholfasern konnte keine guten Druckfestigkeiten erzielen. Die Druckfestigkeiten der Stahlfaserproben M 6, M 7 und M 9 liegen alle über der Nullmischung und es konnte ein Anstieg der Festigkeiten mit zunehmender Faserlänge und Fasergehalt beobachtet werden. Vergleicht man die Proben M 9 und M 10 mit Carbon-Nanotubes mit der Nullmischung, so konnte keine Druckfestigkeitssteigerung durch den Einsatz von CNTs festgestellt werden, da die Werte alle unter der Nullmischung liegen. Auch die Verwendung von CNTs in Kombination mit Stahlfasern brachte keine Erhöhung der Druckfestigkeit, da die Festigkeiten der Proben M 11 und M 12 im Schnitt unter den Werten der Proben M 6 und M 7 liegen. Bei den Proben M 13, M 14 und M 15 mit PP-Fasern konnten nur die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen die Festigkeiten der Nullmischung überschreiten, die Druckfestigkeiten nach 7 und 56 Tagen lagen unter der Nullmischung. Alle Mischungen M 16, M 17 und M 18 mit dünnen 6 mm Stahlfasern konnten im Mittel höhere Druckfestigkeiten als die Nullmischung erzielen. So konnte z. B. die Probe M 18 mit dünnen 6 mm Stahlfasern eine um 7,2 % höhere Druckfestigkeit als die gleiche Probe M 15 mit dickeren 6 mm Stahlfasern erzielen.



**Abbildung 132: Druckfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit 20°C Wasserlagerung**



**Abbildung 133: Druckfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit 20°C  
Wasserlagerung**

Nach 7 Tagen konnten die nichtvakuumbehandelten Proben im Durchschnitt eine Druckfestigkeit von 115,7 N/mm<sup>2</sup> und die vakuumbehandelten Proben eine Festigkeit von 126,7 N/mm<sup>2</sup> vorweisen. Durch das Entlüften mit 60 mbar konnte die Druckfestigkeit somit um 9,5 % gesteigert werden. Der größte Wert der Druckfestigkeit nach 7 Tagen wurde von der Probe M 16 mit 147,6 N/mm<sup>2</sup> und der kleinste Wert von der Probe M 5 mit 95,7 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

Nach 28 Tagen konnte die Druckfestigkeit durch den Vakuumeffekt um 8,1 % gesteigert werden. Der Mittelwert aller nichtvakuumgemischten Proben lag bei 156,3 N/mm<sup>2</sup> und der Mittelwert der Vakuumgemischten Proben bei 168,9 N/mm<sup>2</sup>. Den Maximalwert der 28 Tagesfestigkeit konnte die Probe M 18 mit 183,5 N/mm<sup>2</sup> und den Minimalwert die Probe M 5 mit 143,3 N/mm<sup>2</sup> vorweisen.

Nach 56 Tagen konnten die Druckfestigkeiten der Vakuumgemischten Proben von durchschnittlichen 160,6 N/mm<sup>2</sup> um 8 % gegenüber den nichtvakuumgemischten Proben mit einem Durchschnittswert von 173,4 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Der

Größtwert der Druckfestigkeiten nach 56 Tagen konnte die Probe M 16 mit 196,9 N/mm<sup>2</sup> und den Kleinstwert die Probe M 9 mit CNTs mit 147,6 N/mm<sup>2</sup> vorweisen.

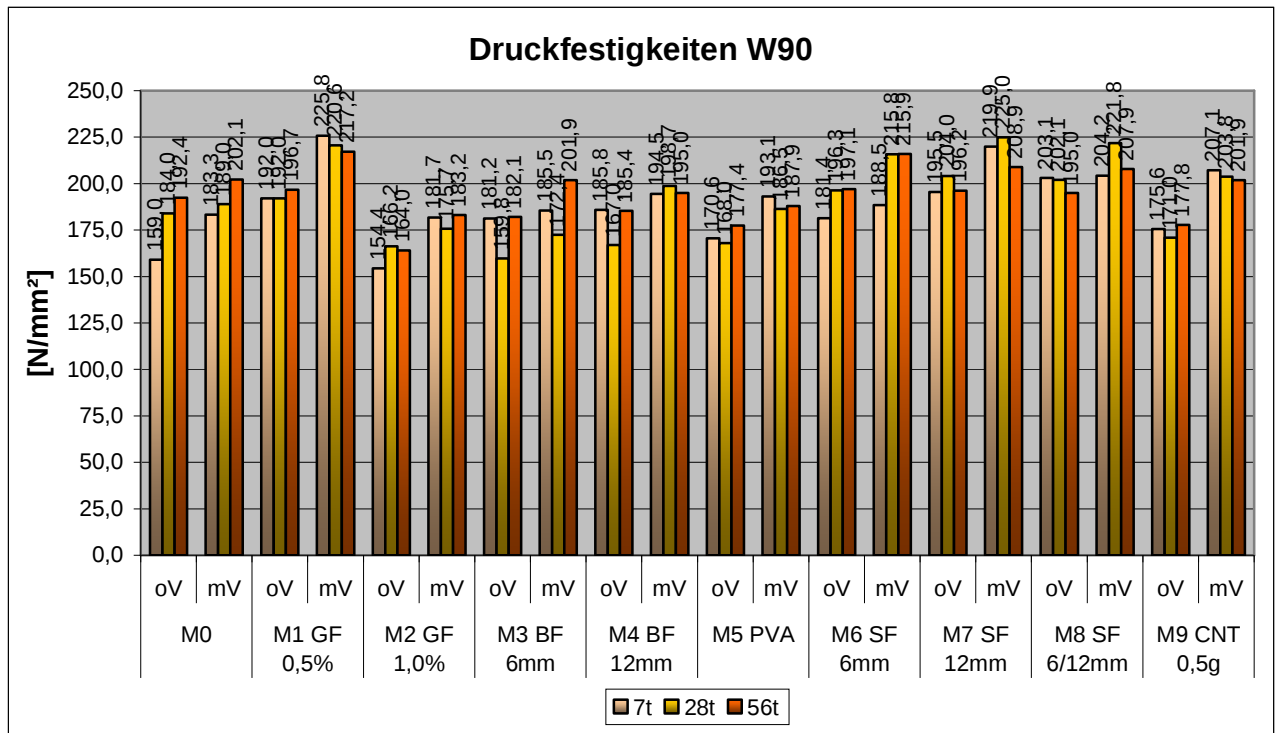


Abbildung 134: Druckfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit Heißwasserlagerung

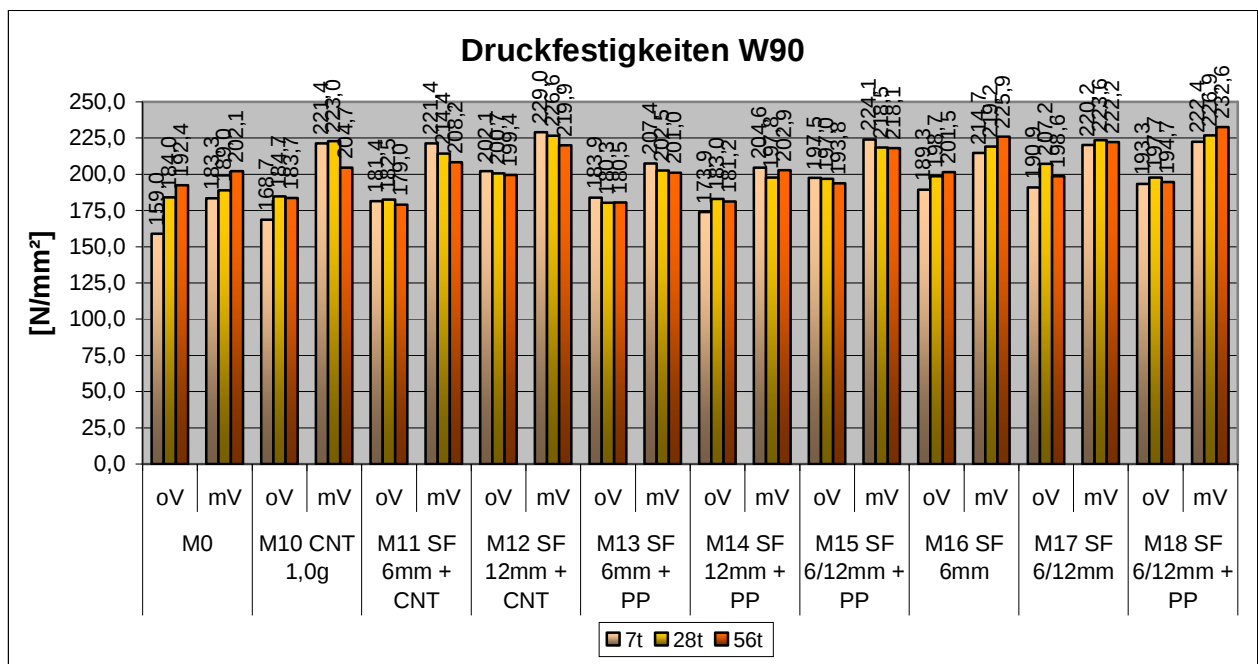


Abbildung 135: Druckfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit Heißwasserlagerung

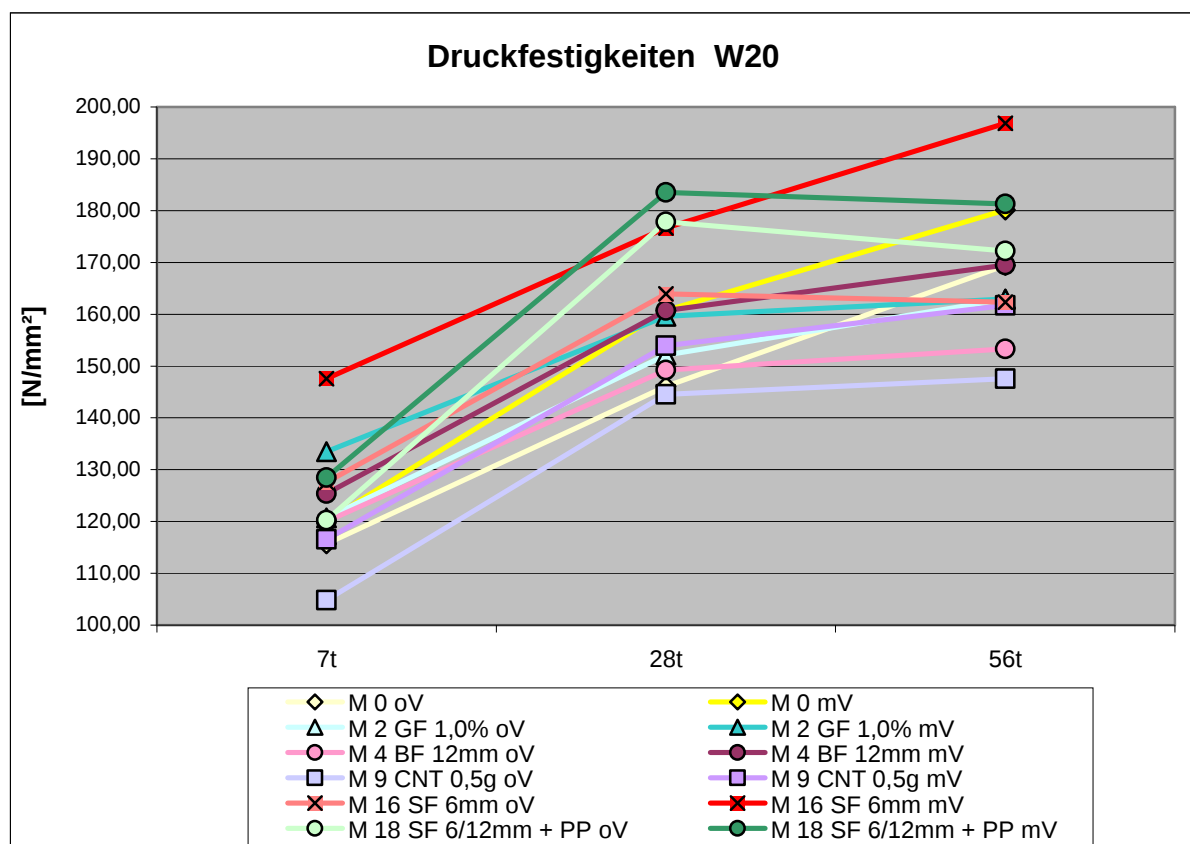
Die Abbildungen 134 und 135 zeigen die Druckfestigkeiten nach 7, 28 und 56 Tagen aller Proben aus der Heißwassernachbehandlung. Man kann gut erkennen, dass abgesehen von der Probe M 2 mit Glasfasern, alle Druckfestigkeiten nach 7 Tagen höher als die Festigkeiten der Nullmischung liegen. Die Festigkeiten nach 28 und 56 Tagen der Probekörper können sowohl oberhalb als auch unterhalb der Druckfestigkeiten der Nullmischung liegen. Die Proben M1 mit 0,5 Vol% Glasfasergehalt konnte deutlich höhere Druckfestigkeiten als die Nullmischung erzielen, während die Proben M 2 mit 1,0 Vol% Fasergehalt die geringsten Druckfestigkeiten von allen Proben aus der Heißwasserlagerung vorweisen konnte. Die vakuumgemischte Probe M 1 konnte im Durchschnitt Druckfestigkeiten von 221 N/mm<sup>2</sup> erzielen. Die beiden Basaltfaserproben M 3 und m 4 konnten im Schnitt gleich große bzw. leicht bessere Druckfestigkeitsergebnisse als die Nullmischung erreichen, wobei die Mischung M 4 mit 12 mm Basaltfasern höhere Druckfestigkeiten als die Mischung m 3 mit 6 mm Basaltfasern vorweisen konnte. Die Mischung M 5 mit PVA-Fasern erzielte nach der Heißwasserlagerung nicht die schlechtesten Druckfestigkeiten, lag aber über den Durchschnitt gesehen etwas unterhalb der Nullmischung. Die durchschnittlichen Druckfestigkeiten der Stahlfaserproben M 6, M 7 und M 8 lagen alle über der Nullmischung und nach 28 und 56 Tagen konnten fast immer Festigkeiten von über 200 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Die beiden Proben M 9 und M 10 mit Carbon-Nanotubes konnten im Schnitt Druckfestigkeiten von 174 und 179 N/mm<sup>2</sup> ohne Vakuumbehandlung und 204 und 216 N/mm<sup>2</sup> vorweisen. Durch die Kombination von CNTs und Stahlfasern stellten sich Druckfestigkeiten von ca. 180 und 200 N/mm<sup>2</sup> ohne Vakuummischen und Festigkeiten von ca. 215 und 225 N/mm<sup>2</sup> mit Vakuummischen bei den Probeserien M 11 und M 12 ein. Die Proben M 13, M 14 und M 15 mit Stahl- und PP-Fasern konnten die Druckfestigkeiten immer die Nullmischung überschreiten. Dabei kann man erkennen, dass die beiden Mischungen M 13 und M 14 fast die gleichen Festigkeiten aufweisen und die Probe M 15 Ergebnisse von 195 und 221 N/mm<sup>2</sup> lieferte. Die Proben M 16, M 17 und M 18 konnten die besten Druckfestigkeiten nach der Heißwasserbehandlung vorzeigen und es stellten sich Festigkeiten von knapp 200 N/mm<sup>2</sup> bei den nichtvakuumgemischten Probe und Festigkeiten von über 220 N/mm<sup>2</sup> bei den vakuumgemischten Proben ein.

Nach 7 Tagen lagen die durchschnittlichen Druckfestigkeiten der vakuumbehandelten Proben mit 207,8 N/mm<sup>2</sup> um 13,5 % höher als die

nichtvakuumbehandelten Proben mit 183,1 N/mm<sup>2</sup>. Der Höchstwert der 7 Tagesfestigkeit wurde bei der Probe M 12 mit 229 N/mm<sup>2</sup> und der kleinste Wert bei der Probe M 2 mit 154,4 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

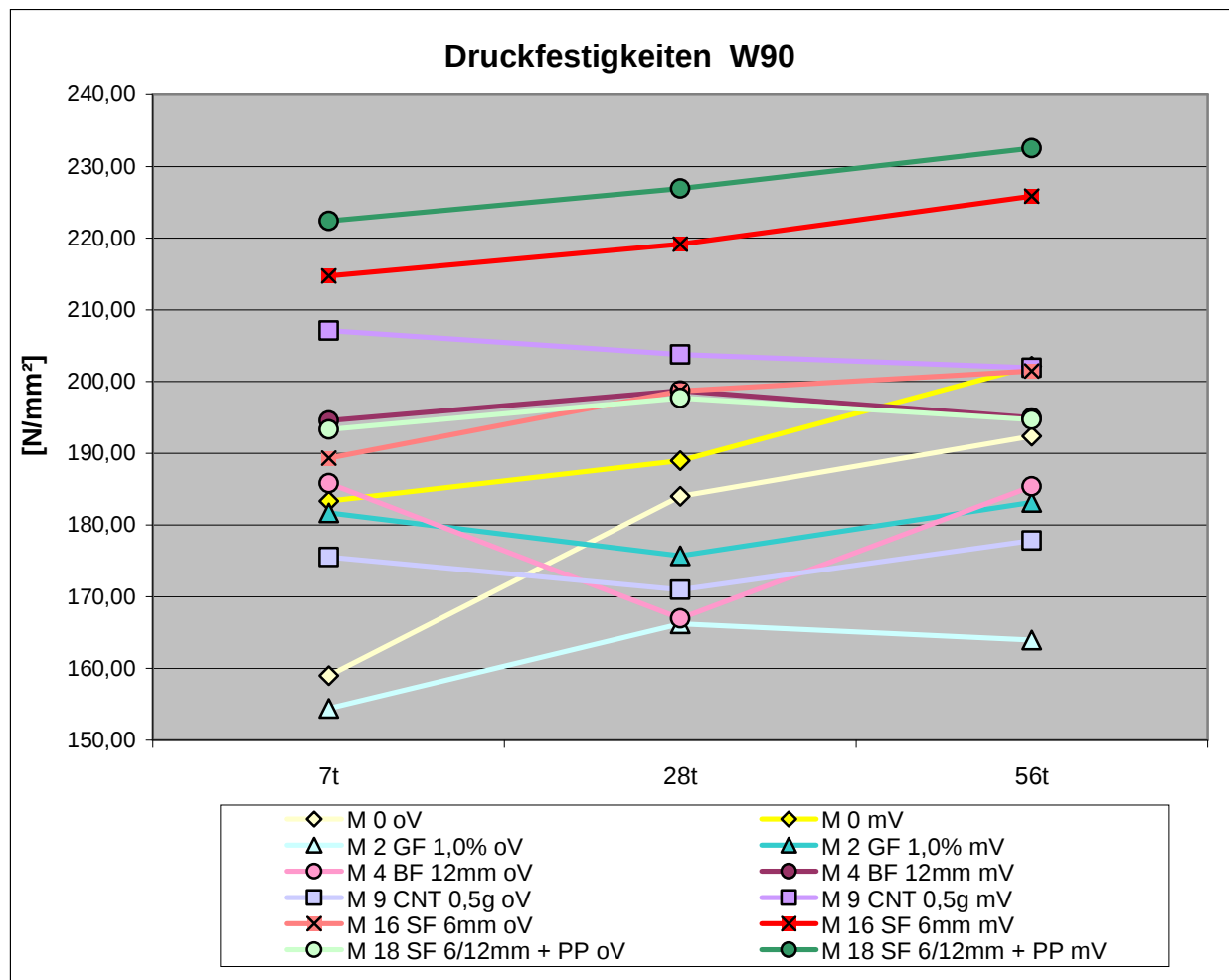
Nach 28 Tagen erreichten die Proben ohne Vakuum eine mittlere Druckfestigkeit von 186,4 N/mm<sup>2</sup> und die Proben mit Vakuum konnten eine Durchschnittsfestigkeit von 208,5 N/mm<sup>2</sup> vorlegen. Durch das Vakuummischen konnte ein Festigkeitsanstieg von 11,8 % nachgewiesen werden. Mit 226,9 N/mm<sup>2</sup> wurde der Maximalwert der Druckfestigkeit nach 28 Tagen bei der Probe M 18 und der niedrigste Wert bei der Probe M 3 mit 159,8 N/mm<sup>2</sup> festgestellt.

Nach 56 Tagen konnten die Druckfestigkeiten der vakuumgemischten Proben mit 208,3 N/mm<sup>2</sup> eine um 10,7 % höhere Druckfestigkeit als die nichtvakuumgemischten Proben mit 188,2 N/mm<sup>2</sup> erzielen. Im Durchschnitt lagen also die 28 Tagesdruckfestigkeiten leicht höher als die 56 Tagesfestigkeiten bei der Heißwassernachbehandlung. Der größte Wert der Druckfestigkeiten nach 56 Tagen wurde bei der Probe M 18 mit 232,6 N/mm<sup>2</sup> und der kleinste Wert bei der Probe M 2 mit 164 N/mm<sup>2</sup> beobachtet.



**Abbildung 136: Druckfestigkeitsverläufe von 6 ausgewählten Proben mit 20°C Wasserlagerung**

In der Abbildung 136 sind die Druckfestigkeitsverläufe von 6 unterschiedlichen Fasermischungen ohne Vakuum- und mit Vakuumbehandlung aus der 20 °C Wasserlagerung dargestellt. Die beiden Glasfaserproben konnten nur nach 7 Tagen größere Druckfestigkeiten als die Nullmischung vorweisen, danach liegen die Ergebnisse unter der Nullmischung. Die Proben mit 12 mm Basaltfasern konnten im Durchschnitt fast die gleichen Festigkeiten wie die Nullmischung vorweisen, liegen aber nach 56 Tagen unter den Ergebnissen der Nullmischung. Während die Druckfestigkeiten der Proben M 9 mit CNTs immer unter der Nullmischung liegen, konnten die Proben M 16 mit Stahlfasern immer über der Nullmischung bleiben, abgesehen von der nichtvakuumgemischten Probe am 56. Tag. Die beiden Proben M 18 konnten die größte Druckfestigkeit nach 28 Tagen erzielen, fallen aber dann nach 56 Tagen wieder leicht ab.



**Abbildung 137: Druckfestigkeitsverläufe von 6 ausgewählten Proben mit Heißwasserlagerung**

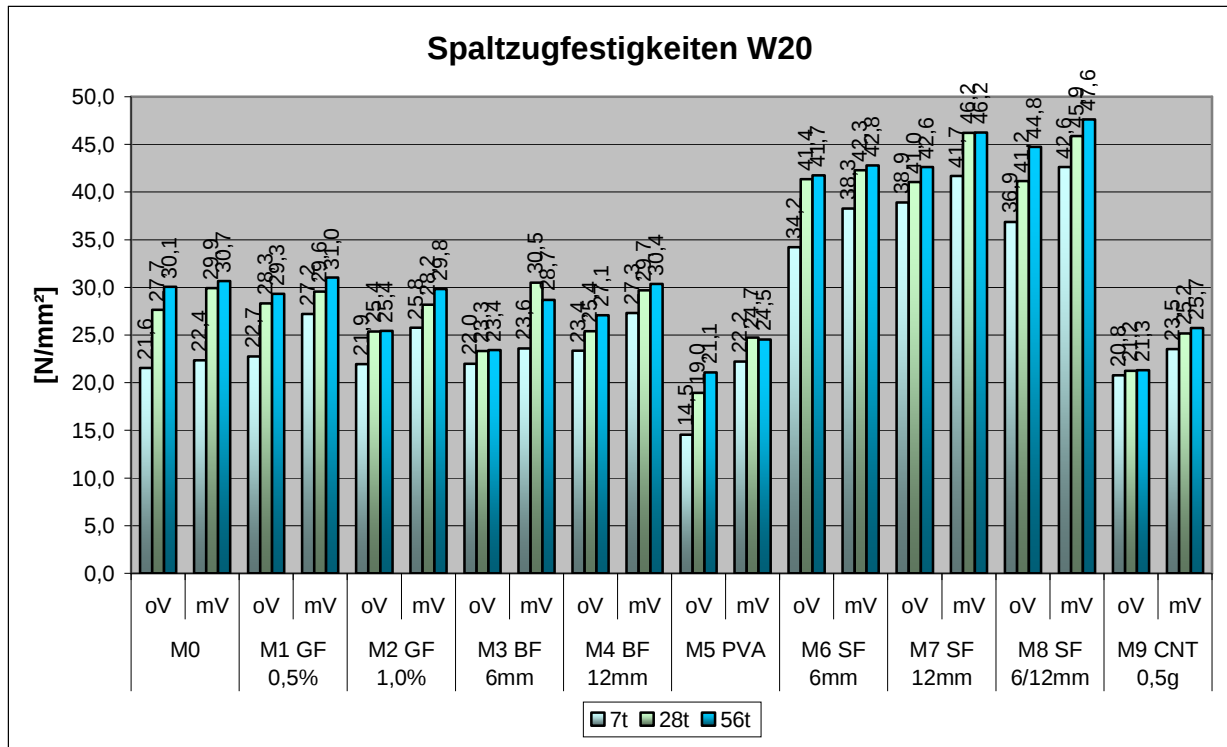
Die Druckfestigkeitsverläufe der Proben aus dem Heißwasserbecken von 6 unterschiedlichen Fasermischungen sind in Abbildung 137 dargestellt. Mit den Glasfaserproben konnten durchschnittliche Druckfestigkeiten von 162 und 180 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden und diese liegen damit unterhalb der Nullmischung. Bei der Betrachtung der Druckfestigkeitsverläufe der beiden Basaltfaserproben fällt auf, dass die Festigkeit nach 28 Tagen bei der nichtvakuumgemischten Probe abfällt und bei der Vakuumgemischten Probe leicht ansteigt. Am 7. und 56. Prüftag konnten beide Proben fast die gleiche Festigkeit von 186 bzw. 195 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Während die nichtvakuumbehandelte CNT-Probe einen Verlauf unter der Nullmischung aufzeigt, liegt verläuft die vakuumgemischte CNT Probe immer über der Nullmischung. Die beiden Druckfestigkeitsverläufe der Proben M 16 mit 6 mm Stahlfasern befinden sich immer oberhalb der Nullmischung. Die Verläufe der Proben M 18 mit Stahl- und PP-Fasern liegen im Durchschnitt über der Nullmischung, wobei die Probe M 18 mit Vakuumbehandlung den höchsten Druckfestigkeitsverlauf vorweisen kann.

Durch den Fasereinsatz konnte auch das Bruchverhalten verbessert werden. Bei Glas-, Basalt- und PVA-Fasern sowie Carbon-Nanotubes waren kaum Unterschiede zu nichtfaserverstärkten Ultrahochfesten Betonen erkennbar, da die Proben meist in mehrere Teile zerbrachen. Durch die Verwendung von Stahlfasern konnte ein mehrteiliger Bruch der Proben verhindert werden. Die folgende Abbildung 138 zeigt zwei Bruchhälften aus Stahlfasern nach dem Druckversuch, das linke Bild zeigt eine Probe mit 6 mm Stahlfaser und das rechte Bild eine Probe mit 6 und 12 mm langen Stahlfasern. Die beiden Proben wurden durch die Druckplatten zusammengedrückt und weisen nur Bruchabplatzungen an den Oberflächen auf.



**Abbildung 138: Zwei Stahlfaser Bruchhälften nach dem Druckversuch**

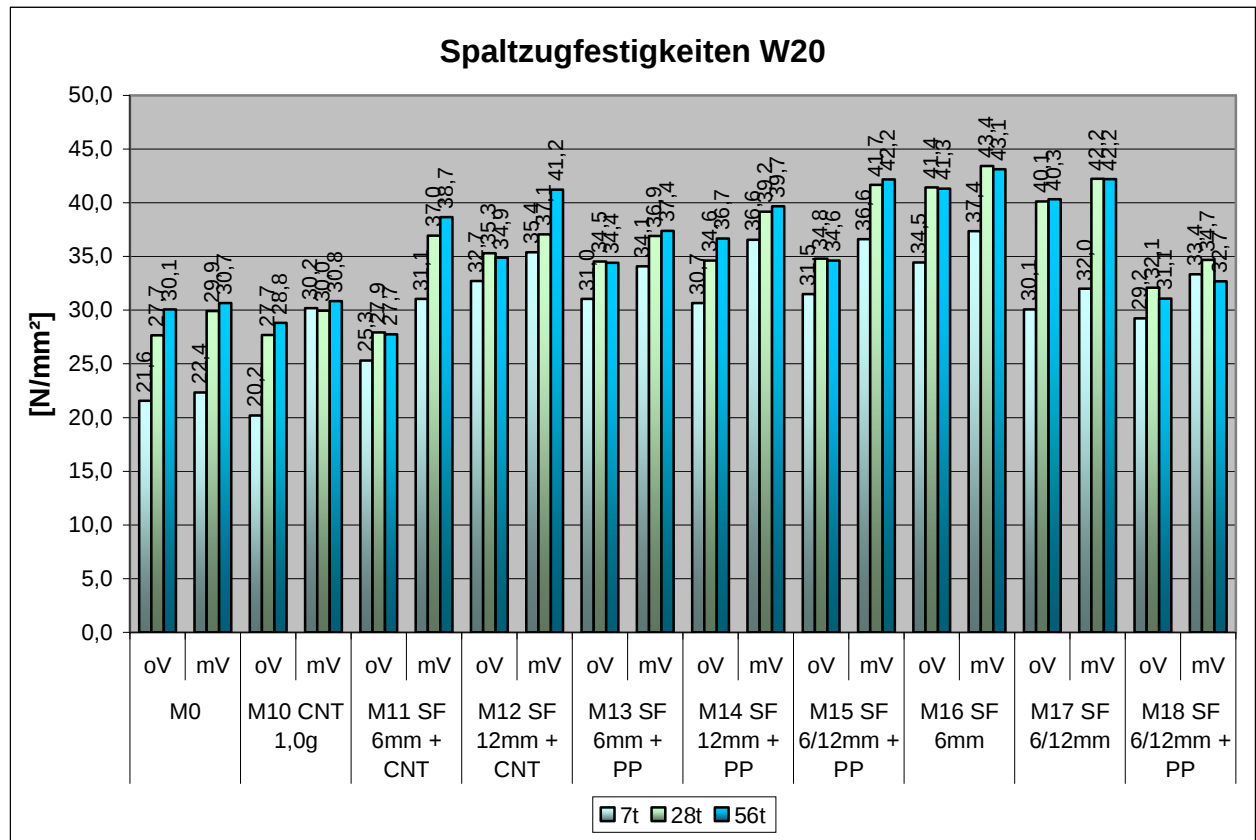
### 7.2.4 Spaltzugfestigkeit



**Abbildung 139: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit 20°C Wasserlagerung**

In den Abbildungen 139 und 140 sind die Spaltzugfestigkeiten aller Proben aus dem 20 °C Wasserbecken dargestellt. Während die Proben M 1 und M 2 mit Glasfasern und die Proben M3 und M 4 mit Basaltfasern sich kaum zu den Spaltzugfestigkeiten der Nullmischung unterscheiden und ähnliche Festigkeiten vorzeigen, liegen die Werte für die Proben M 5 mit PVA-Fasern deutlich unterhalb der Nullmischung. Die Stahlfaserproben M 6, M7 und M 8 konnten die Spaltzugfestigkeiten gegenüber der Nullmischung deutlich steigern, wobei die Probe M 8 die größten Festigkeiten dieser drei Probenserien aufweisen konnte. Bei den Proben M 9 und M 10 mit Carbon-Nanotubes fällt auf, dass die Spaltzugfestigkeiten viel enger beisammen liegen, im Mittel aber unter den Werten der Nullmischung fallen. Nur die vakuumgemischte Probe M 10 konnte mit ca. 30 N/mm² an allen Prüftagen bessere Festigkeiten als die Nullmischung vorweisen. Die Proben mit Stahlfasern und CNTs konnten die Spaltzugfestigkeiten dann wieder deutlicher steigern, jedoch erreichten sie nicht so hohe Werte wie die Proben M 6 und M 7 ohne CNTs. Die Festigkeiten der Proben mit Fasercocktails aus Stahl- und PP-Fasern lagen alle höher als die Nullmischung, und

nahm von Probe M 13 bis M 15 immer etwas zu. Mit den Stahlfaserproben M 16 und M 17 konnten Spaltzugfestigkeiten nach 28 und 56 Tagen von mehr als 40 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Die Mischung M 18 mit Stahl- und PP-Fasern lag zwar im Schnitt höher als die Nullmischung, mit ihr konnten aber nur Spaltzugfestigkeiten von ca. 31 und 33 N/mm<sup>2</sup> gewonnen werden.



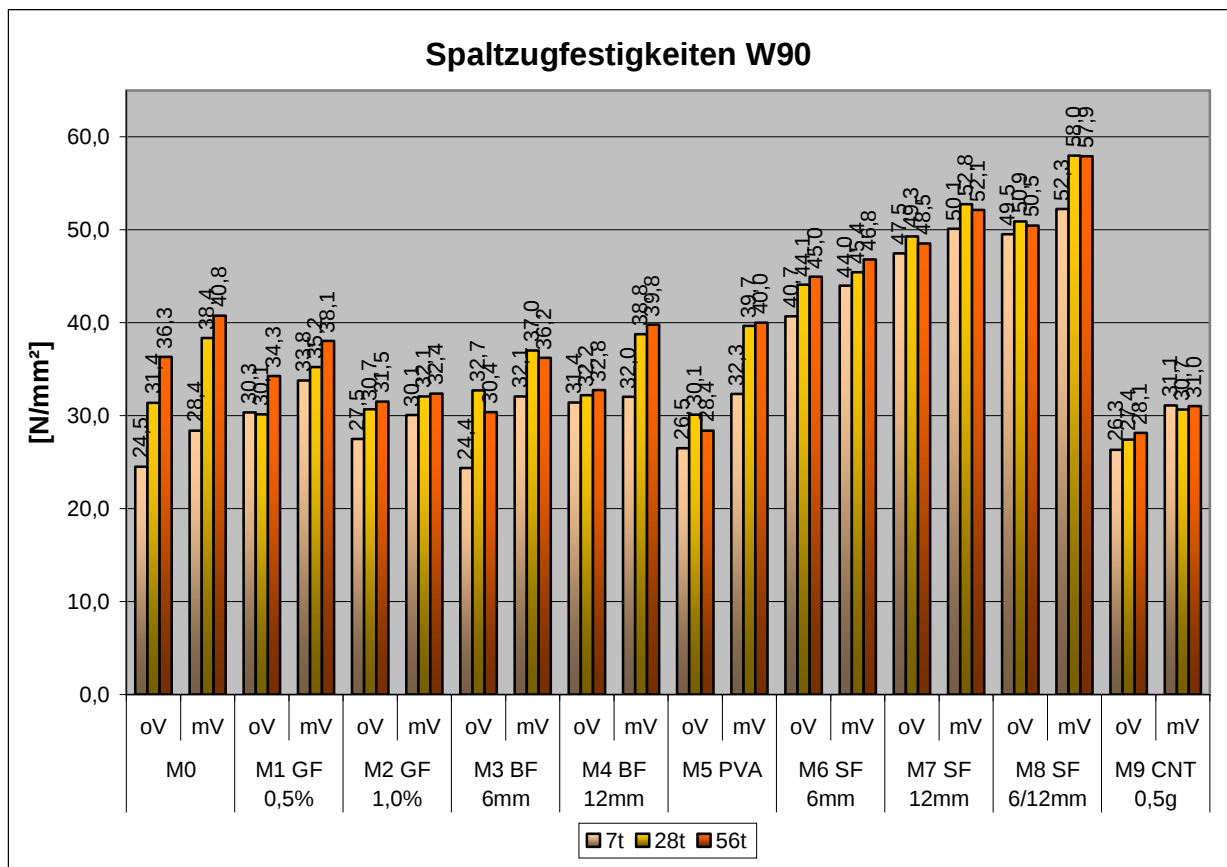
**Abbildung 140: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit 20°C Wasserlagerung**

Nach 7 Tagen konnten die vakuumgemischten Proben die Spaltzugfestigkeit im Durchschnitt von 31,6 N/mm<sup>2</sup> um 15 % gegenüber den nichtvakuumgemischten Proben mit 27,5 N/mm<sup>2</sup> steigern. Die Probe M 8 erreichte den größten Spaltzugfestigkeitswert nach 7 Tagen mit 42,6 N/mm<sup>2</sup> und mit 14,53 N/mm<sup>2</sup> stellt sich der kleinste Wert bei der Probe M 5 mit PVA-Fasern ein.

Nach 28 Tagen konnten durchschnittliche Festigkeitswerte von 31,7 N/mm<sup>2</sup> bei den Proben ohne Vakuumbehandlung und 35,5 N/mm<sup>2</sup> bei den Proben mit Vakuumbehandlung berechnet werden. Somit konnte die Spaltzugfestigkeit durch den Entzug von Luft während des letzten Mischabschnittes um 12 % erhöht werden. Nach 28 Tagen erreichte die Probe M 7 mit 12 mm Stahlfasern den Größtwert mit

46,2 N/mm<sup>2</sup> und der Kleinstwert konnte bei der Probe M 5 mit PVA-Fasern mit 19 N/mm<sup>2</sup> bestimmt werden.

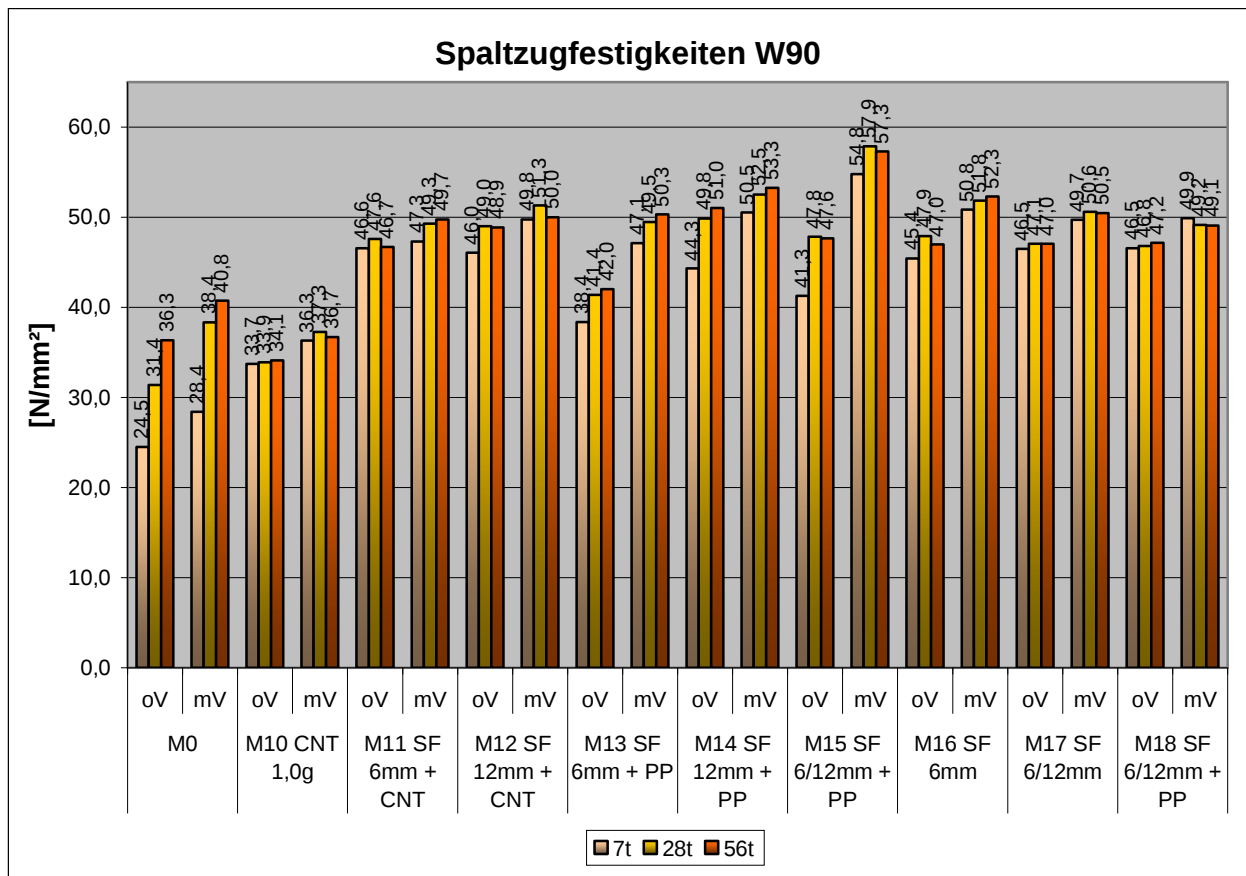
Die Spaltzugfestigkeiten nach 56 Tagen konnten bei den Proben aus dem 20 °C Wasserbecken durch das Vakuummischen im Mittel von 32,5 auf 36,1 N/mm<sup>2</sup> um 11,1 % gesteigert werden. Der Maximalwert der Spaltzugfestigkeiten nach 56 Tagen konnte bei der Probe M 8 mit 47,6 N/mm<sup>2</sup> und der Minimalwert wieder bei der Probe M 5 mit 21,1 N/mm<sup>2</sup> beobachtet werden.



**Abbildung 141: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit Heißwasserlagerung**

Die Abbildungen 141 und 142 zeigen die Spaltzugfestigkeiten nach 7, 28 und 56 Tagen aller Probekörper die im 90 °C Heißwasser nachbehandelt wurden. Auf den ersten Blick kann man einerseits erkennen, dass die Spaltzugfestigkeiten der heißwassergelagerten Proben innerhalb der einzelnen Probserien viel enger beisammen liegen als die Proben bei der normalen Wasserlagerung. Andererseits sieht man, dass nur jene Proben die Stahlfasern beinhalten eine höhere Spaltzugfestigkeit als die Nullmischung aufweisen können. Die Proben mit

Glasfasern konnten zwar die 7 Tagesfestigkeit der Nullmischung überschreiten, erreichten aber weder nach 28 noch nach 566 Tagen die Festigkeiten der Nullmischung. Bei den Proben M 3 und M 4 mit Basaltfasern konnten nur die 28 Tagesfestigkeiten der Vakuumbehandelten Proben die Werte der Nullmischung überbieten. Bei der Probe M 5 mit PVA-Fasern erzielten die Proben ohne Vakuum geringe Spaltzugfestigkeiten, während sich die Proben mit Vakuum an die Festigkeiten der Nullmischung annähern. Die Stahlfaserproben M 6, M 7 und M 8 konnten hohe Spaltzugfestigkeiten vorweisen, wobei die Festigkeiten von M 6 bis M 8 immer zunahmen.



**Abbildung 142: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit Heißwasserlagerung**

Die Spaltzugfestigkeiten der Proben mit Carbon-Nanotubes (M 9 und M 10) liegen alle eng beisammen und konnten nicht die Durchschnittswerte von der Nullmischung erreichen. Die Carbon-Nanotubes in Kombination mit Stahlfasern konnten die Spaltzugfestigkeiten an allen Prüftagen immer über 46 N/mm² halten. Bei den Proben M 13, M 14 und M 15 lagen alle Spaltzugfestigkeiten fast immer zwischen 40 N/mm²

und 51 N/mm<sup>2</sup>. Die vakuumgemischte Probe M 15 konnte sogar eine durchschnittliche Festigkeit von über 56 N/mm<sup>2</sup> vorweisen. Die restlichen Proben M 16, M17 und M 18 lieferten fast identische Spaltzugfestigkeiten und die Werte liegen meist zwischen 46 und 51 N/mm<sup>2</sup>.

Nach 7 Tagen stellten sich im Mittel Spaltzugfestigkeiten für die Proben, die ohne Vakuum hergestellt wurden, von 37,8 N/mm<sup>2</sup> und für die Proben, die mit Vakuum produziert wurden, von 42,2 N/mm<sup>2</sup> ein. So konnte die 7 Tagesfestigkeit im Durchschnitt um 11,6 % gesteigert werden. Der größte Spaltzugwert nach 7 Tagen wurde bei der Probe M 15 mit 54,8 N/mm<sup>2</sup> und der kleinste Wert bei der Probe M 3 mit 24,4 N/mm<sup>2</sup> gemessen.

Nach 28 Tagen konnten die vakuumgemischten Proben von durchschnittlichen 45,1 N/mm<sup>2</sup> um 11,4 % gegenüber den nichtvakuumgemischten Proben mit einem Durchschnittswert von 40,5 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Der Minimalwert wurde dabei von der Probe M 9 mit 27,4 N/mm<sup>2</sup> und der Maximalwert von der Probe M 8 mit 58 N/mm<sup>2</sup> erzielt.

Die Spaltzugfestigkeiten nach 56 Tagen lagen im Schnitt bei den Proben ohne Vakuumbehandlung bei 40,9 N/mm<sup>2</sup> und bei den Proben mit Vakuumbehandlung bei 45,5 N/mm<sup>2</sup>. Der Vakuummischprozess konnte die Festigkeit nach 56 Tagen um 11,2 % erhöhen. Der Größtwert stellte sich bei der vakuumgemischten Probe M 8 mit 57,9 N/mm<sup>2</sup> und der Kleinstwert bei der nichtvakuumgemischten Probe M 9 mit 22,9 N/mm<sup>2</sup> ein.

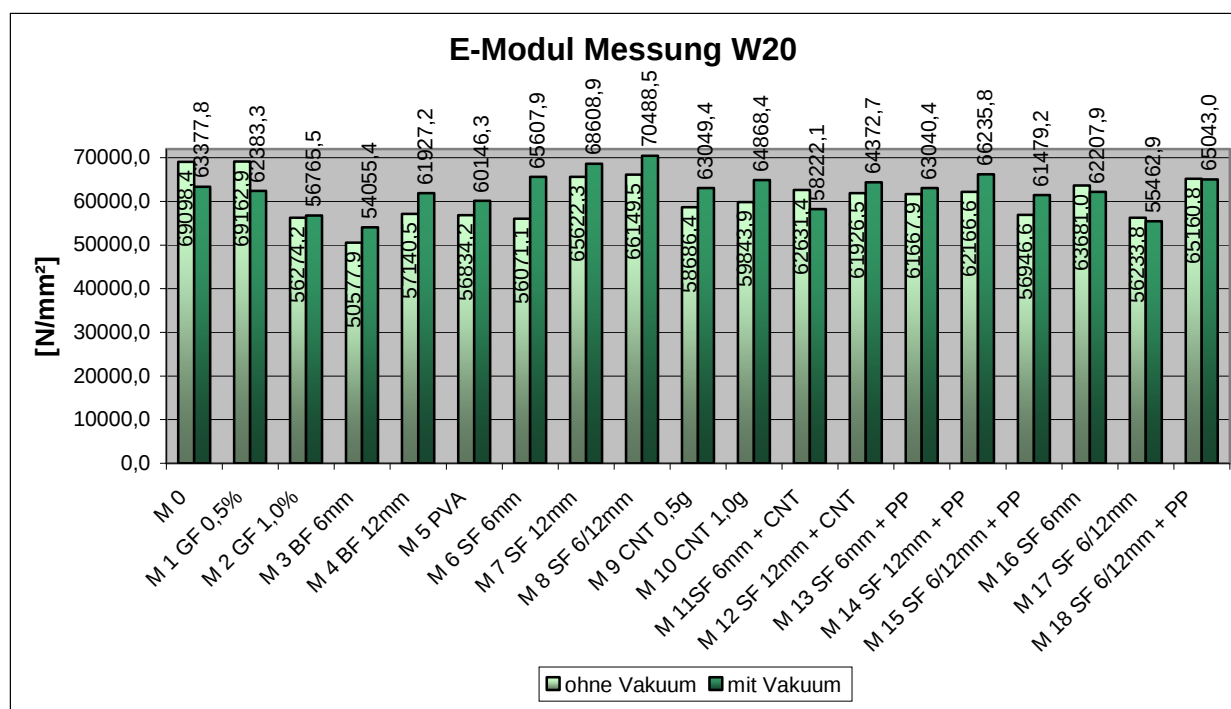


**Abbildung 143: Vier Spaltzugbruchhälften, linkes Bild: Basaltfaserprobe ohne/mit Vakuumbehandlung, rechtes Bild: Stahlfaserprobe ohne und mit Vakuumbehandlung**

Die Abbildung 143 zeigt vier Bruchhälften nach dem Spaltzugversuch. Im linken Bild ist eine Probe mit Basaltfasern dargestellt, wobei die linken Bruchhälften ohne Vakuumbehandlung und die rechten Bruchhälften mit Vakuumbehandlung gemischt wurden. Im rechten Bild sieht man eine Stahlfaserprobe, wobei die linken Probenhälften wieder nicht mit Vakuum gemischt und die rechten Hälften mit Vakuum gemischt wurden. Bei beiden Bildern kann man die größeren Luftporen bei den nichtvakuumgemischten Proben hälften gut erkennen, im Gegensatz zu den vakuumgemischten Proben, die nur kleinere Luftporen aufweisen konnten.

### 7.2.5 Elastizitätsmodul

Die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls wurde wie in Kapitel 4.2.5 beschreiben nach ÖNORM B 3303 nach 28 Tagen nach dem Mischtag durchgeführt. In den folgenden Abbildungen 144 und 145 sind die Ergebnisse der E-Modul Messung nach den beiden unterschiedlichen Nachbehandlungsmethoden dargestellt.



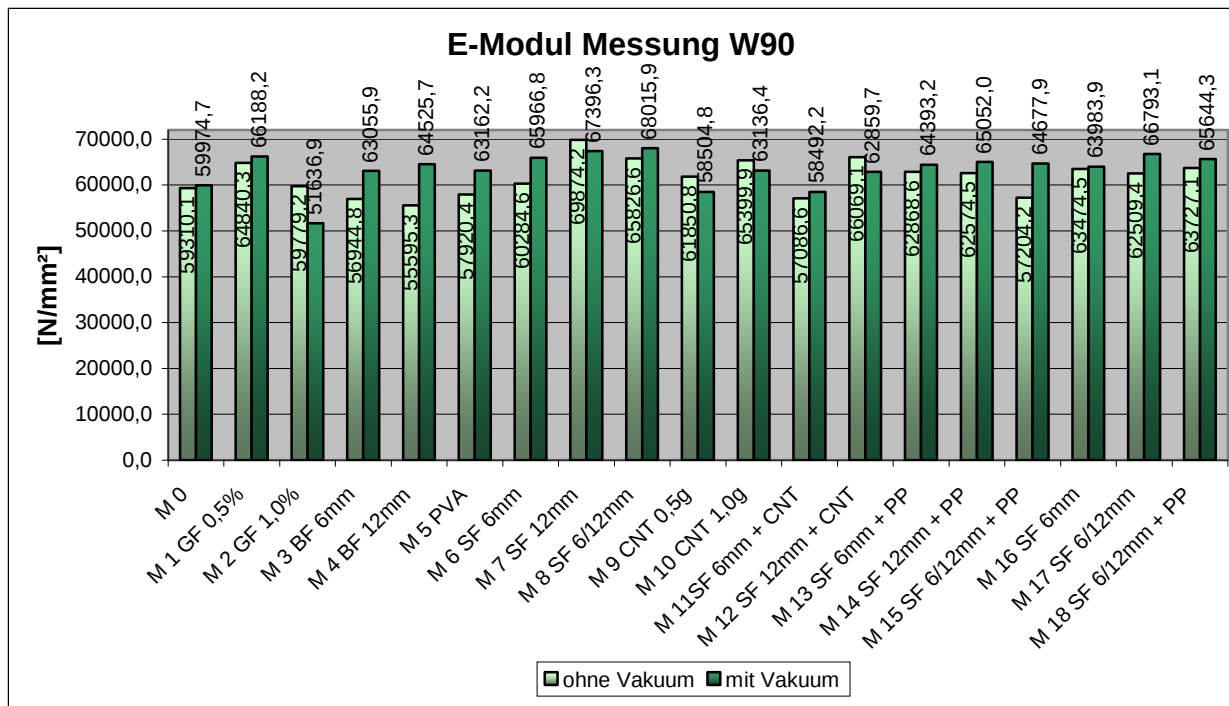
**Abbildung 144: E-Modulwerte der Proben mit 20 °C Wasserlagerung**

Da die Ergebnisse stark schwanken, können kaum aussagekräftige Zusammenhänge angegeben werden. In der Abbildung 144 ist zu erkennen, dass

die Probe M 1 nur sehr leicht von den Messwerten der Nullmischung abweichen. Jedoch lieferte die Probe M 2 mit 1,0 Vol% Glasfasergehalt einen deutlich niedrigeren E-Modul als die Probe M 1 mit 0,5 Vol% Fasergehalt. Die Proben M 4 mit 12 mm langen Basaltfasern konnten einen um ca. 7.000 N/mm<sup>2</sup> höheren E-Modul als die Proben mit 6 mm Basaltfasern vorweisen. Die Proben mit PVA-Fasern konnten ähnliche E-Module wie die Probe M 4 liefern, liegen aber sowohl mit als auch ohne Vakuumbehandlung unterhalb der Basaltfaserprobe M 4. Bei den Stahlfaserproben M 6, M 7 und M 8 konnte ein Anstieg der E-Modulwerte beobachtet werden. Die Ergebnisse steigen von M 6 zu M 8 von ca. 56.000 zu 66.100 N/mm<sup>2</sup> bei den Proben mit Vakuumbehandlung und von ca. 66.600 auf 68.600 und weiter auf 70.400 N/mm<sup>2</sup> bei den Proben mit Vakuumbehandlung an. Mit den Proben M 9 und M 10 mit Carbon-Nanotubes konnten sehr ähnliche Ergebnisse erzielt werden, wobei die Probe M 10 mit 1,0 g CNTs die etwas höheren E-Modulwerte einbrachte. Bei der Probe M 11 mit Stahlfasern und CNTs liegt der E-Modulwert von der nichtvakuumgemischten Probe höher als die vakuumgemischte Probe. Die Proben M 12 mit 12 mm Stahlfasern und CNTs konnten E-Module von ca. 62.000 und 64.000 N/mm<sup>2</sup> aufweisen und liegen damit etwas niedriger als die Vergleichsprobe M 7 ohne CNTs. Mit E-Modulen von 62.100 und 66.200 N/mm<sup>2</sup> bei den Proben M 14 mit 12 mm Stahl- und PP-Fasern lagen die Werte etwas höher als die E-Module der Probe M 13 mit 6 mm Stahl- und PP-Faser mit 61.600 und 63.000 N/mm<sup>2</sup>. Die Probe M 15 mit Stahl- und PP-Fasern mit dem größten Fasergehalt von 3,83 Vol% erzielte mit Vakuumbehandlung ca. 60.000 N/mm<sup>2</sup> und ohne Vakuumbehandlung etwas über 61.000 N/mm<sup>2</sup>. Die Proben M 16 und M 17 konnten nicht dieselben E-Modulwerte wie die Proben M 6 und M 7 erreichen, die E-Module lagen unter denen von M 6 und M 7. Bei der Probe M 18 mit Stahl- und PP-Fasern konnte fast kein Unterschied zwischen den E-Modulen der nichtvakuumgemischten und der vakuumgemischten Probe festgestellt werden.

Im Durchschnitt lagen die E-Module, die am 28. Tag festgestellt wurden, der vakuumgemischten Proben mit 62.491,7 N/mm<sup>2</sup> um 2,7 % höher als die nichtvakuumgemischten Proben mit 60.835 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Proben ohne Vakuumbehandlung konnte M 1 mit Glasfasern den größten Wert mit 69.162,9 N/mm<sup>2</sup> und die Probe M 3 mit Basaltfasern den kleinsten E-Modulwert mit 50.577,9 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Bei den Prüfkörpern mit Vakuumbehandlung wurde der höchste E-

Modulwert bei der Probe M 8 mit 70.488,5 N/mm<sup>2</sup> und der kleinste Wert wieder bei der Probe M 3 mit 54.055,4 N/mm<sup>2</sup> erzielt.



**Abbildung 145: E-Modulwerte der Proben mit Heißwasserlagerung**

In der Abbildung 145 sind die E-Modul Ergebnisse nach 28 Tagen aller Proben mit Heißwasserlagerung dargestellt. Man kann erkennen, dass die E-Module der nichtvakuumbehandelten Proben M 3, M 4, M 5, M 11 und M 15 unter der Nullmischung und bei den Vakuumbehandelten Proben M 2, M 9 und M 11 unter der Nullmischung liegen. Die Probe M 1 mit 0,5 Vol% Glasfasergehalt liegt mit ihren E-Modulen über der Nullmischung und lieferte höhere Werte als die Probe M 2 mit 1,0 Vol% Glasfasergehalt. Die beiden Basaltfasermischungen M 3 und M 4 als auch die PVA-Probe M 5 konnten fast die gleichen E-Modulwerte erzielen. Ein Anstieg der E-Module konnte wieder bei den Stahlfaserproben M 6, M 7 und M 8 beobachtet werden, die Werte erhöhen sich bei den Proben ohne Vakuum von ca. 60.000 auf 70.000 N/mm<sup>2</sup> und bei den Proben mit Vakuum von 66.000 auf 68.000 N/mm<sup>2</sup>. Der größte E-Modulwert wurde aber bei der Probe M 7 mit 69.874,2 N/mm<sup>2</sup> erzielt. Die beiden Proben mit CNTs M 9 und M 10 liegen im Durchschnitt mit ihren E-Modulen leicht über der Nullmischung, wobei die Probe M 10 die etwas höheren Werte vorweisen kann. E-Module von ca. 57.000 und 58.000 N/mm<sup>2</sup> stellten sich bei der Probe M 11 mit 6 mm Stahlfasern und CNTs ein und bei der Probe M 12 mit 12 mm

Stahlfasern und CNTs wurden Werte von ca. 66.000 und 62.600 N/mm<sup>2</sup> festgestellt. Beide Proben M 11 und M 12 lagen jedoch mit ihren E-Modulen unter den Werten der Vergleichsproben M 6 und M 7 ohne CNTs. Die Proben mit PP-Fasern konnten alle fast die gleichen E-Modulwerte im Bereich von 62.500 und 65.000 N/mm<sup>2</sup> vorweisen, nur die nichtvakuumgemischte Probe M 15 fällt etwas ab. Auch die E-Module der Proben M 16, M17 und M 18 erzielten ähnliche Werte und lagen meist in einem Bereich von 63.000 bis 66.000 N/mm<sup>2</sup>.

Im Schnitt lagen die E-Module nach 28 Tagen der vakuumgemischten Proben mit 63.340 N/mm<sup>2</sup> um 2,6 % höher als die nichtvakuumgemischten Proben mit 61.744,2 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Proben ohne Vakuumbehandlung konnte die Mischung M 7 mit Stahlfasern den größten Wert mit 69.874,2 N/mm<sup>2</sup> und die Probe M 4 mit Basaltfasern den kleinsten E-Modulwert mit 55.595,3 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Bei den Prüfkörpern mit Vakuumbehandlung wurde der höchste E-Modulwert bei der Probe M 8 mit 68.015,9 N/mm<sup>2</sup> und der kleinste Wert wieder bei der Probe M 2 mit 51.636,9 N/mm<sup>2</sup> erzielt.

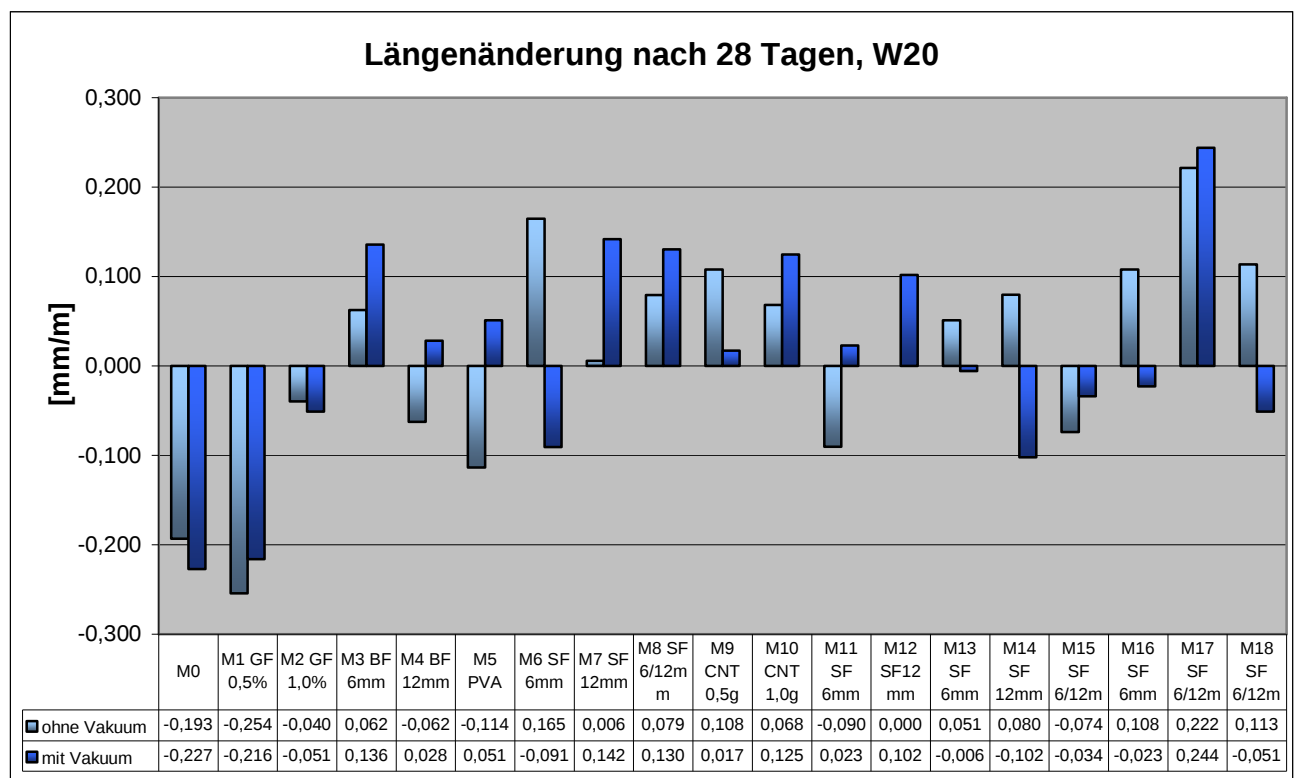
### 7.2.6 Schwindmaß

Die Schwindversuche wurden, wie im Kapitel 4.2.6 beschrieben, nach der ÖNORM B 3303 unter der Verwendung von 160x40x40 mm Probekörpern durchgeführt. Dabei wurden an den Proben nach dem Ausschalen Messzapfen auf die Stirnflächen geklebt. Nach der Trocknung des Klebers erfolgte die Nullmessung. Danach wurden die Proben der jeweiligen Nachbehandlungsmethode unterzogen. Nach 7 Tagen in den Wasserbecken kamen die Probekörper in einen Klimaraum mit 20 °C und ca. 65 % relativer Luftfeuchtigkeit, wo sie bis zum 28. Tag gelagert wurden. An den Messtagen wurden die Proben als auch der Referenzstab in der Klimakammer gemessen.

Die gewonnenen Daten, wie Schwind- und Gewichtsmessungen, und die Schwindverläufe können im Anhang eingesehen werden. Durch die 7-tägige Wasserbadlagerung trat ein deutliches Quellen der Proben auf. Durch die anschließende Aufbewahrung im Klimaraum konnte ein Schwinden der Betonkörper beobachtet werden. Neben der Schwingmessung wurde an denselben Messtagen die Zu- und Abnahme des Gewichts dokumentiert. Die Gewichtsmessung zeigte

ebenfalls bis zum 7. Tag eine leichte Zunahme durch das Quellen, danach nahm das Gewicht bis zum 28. Tag immer leicht ab.

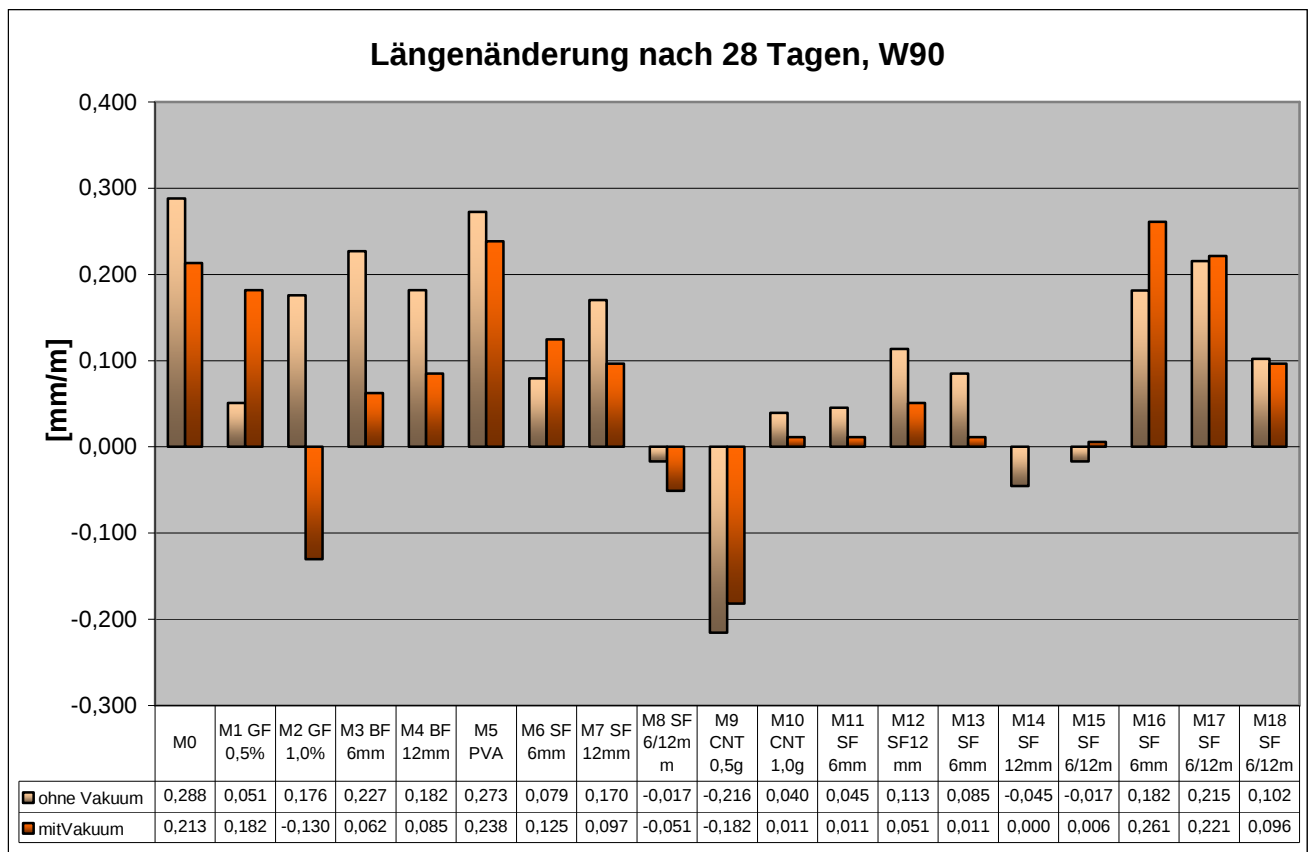
Betrachtet man die beiden Schwindverläufe für die jeweilige Nachbehandlungsart im Anhang, so kann man erkennen, dass alle Proben bedingt durch die Wasserlagerung bis zum 7. Tag leicht quellen und dann die Längen der Probekörper leicht abnehmen. Am 24. Tag ist bei allen Proben ein Sprung in den Schwindverläufen zu erkennen. Bei allen Schwindmessungen wurde zwar auf sorgfältiges Arbeiten und Messen viel Wert gelegt, da aber auch andere Personen den Klimaraum benutzten, können Messfehler durch Berührung bzw. Verstellung des Prüfgerätes nicht ausgeschlossen werden. Die Schwindverläufe liegen bei den Proben aus dem 20 °C Wasserbecken immer im Bereich von 0,3 bis -0,3 mm/m und bei den Proben aus dem Heißwasserbecken zwischen 0,4 und -0,3 mm/m. Die Abbildungen 146 und 147 zeigen die Längenänderungen nach 28 Tagen der jeweiligen Nachbehandlungsmethode.



**Abbildung 146: Längenänderungen aller Proben mit 20°C Wasserlagerung**

In der Abbildung 146 ist zu erkennen, dass die Proben der Nullmischung M 0, M 1 mit Glasfasern und M 17 mit 6 und 12 mm Stahlfasern die größten

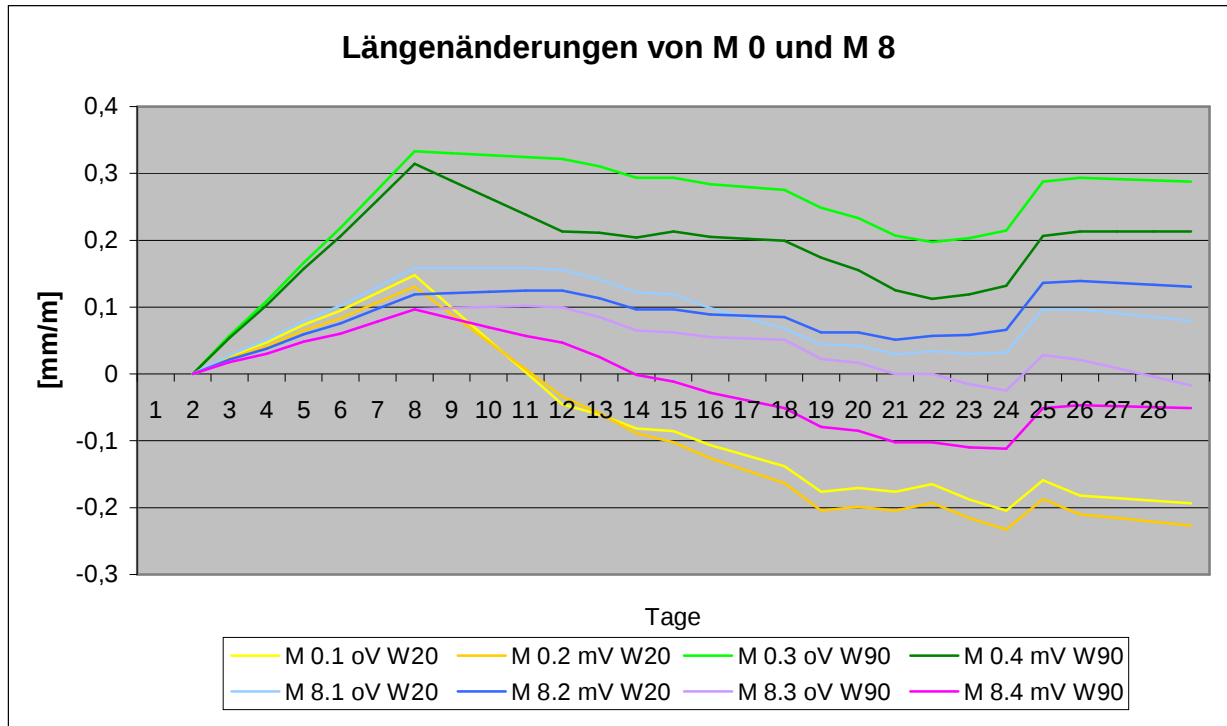
Längenänderungen vorweisen konnten. Die Werte der vakuumbehandelten Proben liegen nicht immer unter den Werten der nichtvakuumbehandelten Proben. Im Durchschnitt konnten die vakuumgemischten Proben ein Schwindmaß nach 28 Tagen von 0,094 mm/m und die nichtvakuumgemischten Proben einen durchschnittlichen Wert von 0,099 mm/m erreichen. Die Schwindmaße der Proben mit Vakuumbehandlung liegen also im Mittel um 5,1 % unter den Werten der nichtvakuumbehandelten Proben.



**Abbildung 147: Längenänderungen aller Proben mit Heißwasserlagerung**

Die Abbildung 147 zeigt die Längenänderungen am 28. Tag von allen Proben aus der Heißwassernachbehandlung. Man sieht einerseits, dass nicht mehr so viel Werte in den negativen Bereich fallen, wie bei der 20 °C Wassernachbehandlung. Die Proben M 2, M 8, M 9, M 14 und M 15 erzielten negative Schwindmaße nach 28 Tagen. Andererseits liegen die Schwindmaße der vakuumgemischten Proben, bis auf wenige Ausnahmen, unter den Schwindwerten der nichtvakuumbehandelten Proben.

Nach 28 Tagen konnten im Durchschnitt die Schwindmaße der nichtvakuumgemischten Proben mit 0,133 mm/m um 24 % höhere Werte als die vakuumgemischten Proben mit 0,107 mm/m aufweisen.



**Abbildung 148: Verlauf der Längenänderungen von 2 ausgewählten Proben**

Die Abbildung 148 zeigt einen Vergleich der Schwindmaße der Proben M 0 und M 8 mit 6/12 mm Stahlfasern. Man sieht, dass alle Proben bis zum 7. Tag leicht aufquellen und danach langsam an Länge verlieren. Während die Proben M 0.1 und M 0.2 aus dem 20 °C Wasserbecken die Länge nach 7 Tagen auf ca. 0,13 mm/m vergrößern und dann bis zum 28. Tag auf -0,2 mm/m abfallen, vergrößerten sich die Proben M 0.3 und M 0.4 aus dem Heißwasserbecken auf ca. 0,3 mm/m nach 7 Tagen und fallen bis zum 28. Tag nicht so stark ab. Sie kommen auch nicht in den negativen Wertebereich weisen nach 28 Tagen ein mittleres Schwindmaß von 0,25 mm/m auf. Die Stahlfaserproben M 8.1 und M 8.2 aus der 20 °C Wasserlagerung erzielten über die 28 Tage gesehen höhere Schwindmaße als die gleichen Proben M 8.3 und M 8.4 aus der 90 °C Wasserbehandlung. Bei beiden Nachbehandlungsarten vergrößert sich die Länge bis zum 7. Tag, jedoch fallen die Proben M 8.3 und M 8.4 stärker bis zum 28. Tag als die Proben M 8.1 und M 8.2. Nach 28 Tagen konnten die

Proben M 8.1 und M 8.3 mittlere Schwindmaße von ca. 0,1 mm/m und die Proben M 8.3 und M 8.4 Mittelwerte von -0,3 mm/m aufweisen.

Da sich die Schwindverläufe je nach Faserart und innerhalb derselben Mischreihen änderten, konnte auf keine Zusammenhänge geschlossen werden. So lagen bei den Schwindverläufen der Probenserien M 0, M 1, M 4, M 5, M 15, M 16 und M 17 die heißwassergelagerten Proben immer über den Verläufen der Proben mit 20 °C Wasserlagerung. Während die Probenserien M 8, M 9 und M 10 Schwindverläufe aufweisen konnten, bei denen die Proben aus dem Wasserbecken über den Verläufen der heißwassergelagerten Proben lagen. Bei den Probenreihen M 2, M 3, M 6, M 13, M 14 und M 18 lagen die Verläufe der Längenänderungen der Proben aus der normalen Wassernachbehandlung zwischen den beiden Kurven der Proben aus der 90 °C Heißwassernachbehandlung.

## 8. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit über Faserbewehrte ultrahochfeste Betone beinhaltet die Einflüsse und Auswirkungen eines Vakuummischens mit 60 mbar am Ende des Mischprozesses in Verbindung auf unterschiedliche Faserarten auf ausgewählte Frisch- und Festbetoneigenschaften. Weiters fand eine Untersuchung von zwei gängigen Nachbehandlungsmethoden für diese ultrahochfesten Betone statt. Für die Hauptversuche in dieser Arbeit wurden insgesamt 4x19 Mischungen hergestellt, die zu UHPC Proben mit den Abmessungen 160x40x40 mm weiterverarbeitet wurden. Die Mischvorgänge wurden im Hinblick auf zwei verschiedene Unterdrücke am Ende des Mischvorgangs verglichen. Einerseits wurden Mischungen mit dem Umgebungsdruck durchgeführt und andererseits wurde ein Vakuum mit 60 mbar im Mischbehälter für 90 Sekunden erzeugt.

Nach jedem der 76 Mischvorgänge wurden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Ermittlung des Ausbreitmaßes
- Ermittlung des Frischbetonluftgehalts
- Ermittlung der Frischbetonrohddichte

Als Nachbehandlungsmethoden vom 1. bis zum 56. Tag nach dem Ausschalen kamen zum Einsatz:

- Nachbehandlung durch Lagerung in einem Wasserbecken mit 20 °C vom 1. bis zum 56. Tag
- Nachbehandlung durch Lagerung in einem Wasserbecken mit 20 °C vom 1. bis zum 3. Tag, dann Lagerung vom 4. bis zum 7. Tag in einem Heißwasserbecken bei 90 °C, danach Lagerung im Wasserbecken mit 20 °C bis zum 56. Tag

Die Festbetonprüfungen fanden am 7., am 28. Tag und am 56. Tag nach dem Ausschalen statt. Zusätzlich wurden der Elastizitätsmodul nach 28 Tagen und das Schwindmaß bis zum 28. Tag ermittelt. Die Probekörper wurden folgenden Festbetonprüfungen unterzogen:

- Ermittlung der Festbetonrohddichte
- Biegezugfestigkeitsprüfung
- Druckfestigkeitsprüfung
- Spaltzugfestigkeitsprüfung
- Ermittlung des E-Moduls nach 28 Tagen
- Schwindmaßverlauf bis zum 28. Tag

Aus den durchgeführten Untersuchungen und Versuchen konnten folgende Kenntnisse gewonnen werden:

Einerseits konnte bewiesen werden, dass die vakuumgemischten Proben bei den Biegezug-, Druck- und Spaltzugfestigkeiten immer höhere Ergebnisse erzielten, egal welche Nachbehandlungsmethode zum Einsatz kam.

Andererseits konnte festgestellt werden, dass die Festigkeiten der Proben, die einer Nachbehandlung im Heißwasser mit 90 °C vom 4. bis zum 7. Tag unterzogen wurden, abgesehen von wenigen Ausnahmen, immer höhere Werte an den Prüftagen erzielen konnten als jene Proben, die im Wasserbecken mit 20 °C nachbehandelt wurden.

Weiters wurde beobachtet, dass sich die Vorteile der Vakuumbehandlung und die Vorteile der Heißwassernachbehandlung mit 90 °C weder gegenseitig aufheben noch gegenseitig verstärken.

Bezogen auf das Vakuummischen konnte festgestellt werden, dass durch das Aufbringen eines Unterdruckes mit 60 mbar im Mischbehälter während des letzten Mischabschnitts die Festigkeiten um 8 bis 15 % gesteigert werden konnten.

Mit Hilfe der Heißwasserlagerung mit 90 °C konnten die Biege-, Druck- und Spaltzugfestigkeiten im Unterschied zu den Proben mit 20 °C Wasserlagerung um bis zu 64 % erhöht werden.

Was den Fasereinsatz betrifft, so konnten die Biegezugfestigkeiten im Allgemeinen durch jede Faserart gesteigert werden. Die Druckfestigkeiten und Spaltzugfestigkeiten der Proben konnten vor allem mit Stahlfaser und Kombinationen aus Stahlfaser und Carbon-Nanotubes oder Stahlfasern und Polypropylenfasern erhöht werden. Außerdem konnte eine wesentliche Verbesserung des Bruchverhaltens bei den durchgeführten Biege-, Druck- und Spaltzugversuchen mit der Verwendung von Fasern im Beton erzielt werden.

Bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls konnte festgestellt werden, dass alle Proben E-Module im Bereich von 50.000 – 70.000 N/mm<sup>2</sup> erreichten und dass durch das Anlegen eines Unterdrucks mit 60 mbar am Ende des Mischprozesses die E-Modulwerte der Proben im Durchschnitt um 2,6 % erhöht werden konnten.

Bei der Messung der Schwindmaße konnte gezeigt werden, dass sich bei allen hergestellten Proben Längenänderungen nach 28 Tagen im Bereich von ca.  $\pm 0,3$  mm/m einstellten. Dabei erzielten die nichtvakuumbehandelten Proben im Schnitt um 5 – 24 % höhere Schwindmaße als die vakuumgemischten Proben.

## 9. Summary

The objective of this master thesis was the investigation of the influence of vacuum mixing for the production of ultra-high-performance concrete (UHPC) with several types of fibers. The main focus was on the impacts of different types of fibers on the fresh and hardened concrete properties. Ultra-high-performance concrete has a very high structural density and can achieve compressive strengths above 250 N/mm<sup>2</sup>. For the main experiments a total of 76 mixtures were prepared and in the next step they were processed into test samples with dimensions of 160x40x40 cm. In the preparation of different blends two mixing types were used. First the starting materials were mixed together with the ambient pressure. Then another blend was generated, which was exposed to a vacuum of 60 mbar at the end of the mixing process. After mixing, the fresh concrete testing and the filling of the formwork took place. With each fresh concrete, the slump test, the air filled pore and the bulk density were measured. Then the cured test samples were subjected to two common

curing methods and on the 7., 28. and 56. day the determination of bending tensile strength, compressive strength and splitting tensile strength of the concrete samples were executed. The measurement of the shrinkage till the 28. day and the determination of the modulus of elasticity on the 28. day were included as well.

The analysis and the results in this master thesis showed that the composition of the starting materials, the used fibers, the mixing process and the curing methods have a significant impact on the fresh and hardened concrete properties. The mechanical properties of ultra-high-performance concrete can be improved significantly with the use of correct composition, a vacuum mixer and the targeted application of curing methods. UHPC can certainly compete with building materials like steel and for this reason, ultra-high-performance concrete is used more frequently today and will play an important role for the building in the future.

## 10. Anhang

## Anhang A: Mischungsberechnung Ausgangsmischung

| Mischungsberechnung für UHPC                          |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------------------------------|-------|-------------------|--|
| durchgeführt von:                                     | Gerald Kurka                        |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Ort:                                                  | Labor 1030, Adolf-Blamauergasse 1-3 |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Datum:                                                | 01.12.2011                          |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Zweck:                                                | M 0 Nullmischung (0,26 5%)          |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| ◊ Grau hinterlegte Felder müssen eingetragen werden ◊ |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| <b>Anforderungen</b>                                  |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| W/Z-Wert                                              |                                     |                | 0,26                    | Fließmittel [M.% v. Z]    |                    | 5,00                                         |       |                   |  |
| Sand trocken [dm³/m³]                                 |                                     |                | 330,00                  | Entschäumer [M% v. FM]    |                    | 0,00                                         |       |                   |  |
| Luftgehalt (angenommen) [V.%]                         |                                     |                | 4,00                    | w/Fv                      |                    | 0,441                                        |       |                   |  |
|                                                       |                                     |                |                         | Relativdichte rechnerisch |                    | 0,835                                        |       |                   |  |
| <b>Matrix</b>                                         |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
|                                                       | Bezeichnung                         | Anteile [M. 1] | Anteile [V. 1]          | Masse [kg]                | Rohdichte [kg/dm³] | Stoffraum [dm³]                              |       |                   |  |
| Fließmittel                                           | Sika FM 209                         | 5,00           | 4,59                    | 36,60                     | 1,09               | 33,58                                        | 30,00 | Feststoff [M.%]   |  |
| Wasser inkl. FM-Anteil flüssig                        | Wasser                              | 26,00          | 26,00                   | 190,32                    | 1,00               | 190,32                                       |       |                   |  |
| FM Festanteil                                         |                                     | 1,50           | 1,09                    | 10,98                     | 1,38               | 7,96                                         |       |                   |  |
| Zement                                                | CEM I 42,5 R                        | 100,00         | 32,26                   | 732,01                    | 3,10               | 236,13                                       |       |                   |  |
| Zusatzstoff 1                                         | Elkem 940 U                         | 25,00          | 10,87                   | 183,00                    | 2,30               | 79,57                                        |       |                   |  |
| Zusatzstoff 2                                         | Quarzmehl 10000                     | 42,00          | 15,85                   | 307,45                    | 2,65               | 116,02                                       |       |                   |  |
| Zusatzstoff 3                                         | nv                                  | 0,00           | 0,00                    | 0,00                      | 2,65               | 0,00                                         |       |                   |  |
| Entschäumer                                           | nv                                  | 0,00           | 0,00                    | 0,00                      | 1,00               | 0,00                                         |       |                   |  |
|                                                       |                                     | 194,50         | 86,06                   | 1423,77                   | 2,26               | 630,00                                       |       |                   |  |
| <b>Zuschläge</b>                                      |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
|                                                       | Bezeichnung                         | Anteil [%]     | Trocken-M. [kg]         | Rohdichte tr [kg/dm³]     | Stoffraum tr [dm³] | Wassergehalt [M. %]                          |       | Feucht-M. [kg/m³] |  |
|                                                       |                                     |                |                         |                           |                    | [I]                                          |       |                   |  |
| Sand 1                                                | ME 0-0,5                            | 100            | 874,5                   | 2,65                      | 330                | 0                                            | 0,00  | 874,50            |  |
| Sand 2                                                | nv                                  | 0              | 0                       | 2,65                      | 0                  | 0                                            | 0,00  | 0,00              |  |
| Sand 3                                                | nv                                  | 0              | 0                       | 2,8                       | 0                  | 0                                            | 0,00  | 0,00              |  |
| ***                                                   |                                     | 100            | 874,50                  | 2,65                      | 330,00             |                                              | 0,00  | 874,50            |  |
| <b>Fasern</b>                                         |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
|                                                       | Bezeichnung                         | Anteil [M.%]   | Zugabe [kg/m³]          | Rohdichte [kg/dm³]        | Stoffraum [dm³]    |                                              |       |                   |  |
| Faser 1                                               | nv                                  | 0,00           | 0,00                    | 2,85                      | 0,00               | Stoffraum der Fasern wird vom Sand abgezogen |       |                   |  |
| Faser 2                                               | nv                                  | 0,00           | 0,00                    | 0,91                      | 0,00               |                                              |       |                   |  |
| Faser 3                                               | nv                                  | 0,00           | 0,00                    | 7,85                      | 0,00               |                                              |       |                   |  |
|                                                       |                                     | 0,00           | 0,00                    | 0,00                      | 0,00               |                                              |       |                   |  |
| <b>Stoffraum</b>                                      |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
|                                                       | Anteil [V. %]                       | Anteil [M. %]  | Masse [kg]              | Rohdichte [kg/dm³]        | Stoffraum [dm³]    |                                              |       |                   |  |
| Luft                                                  | 4,00                                | 0,00           | 0,00                    | 0,00                      | 40,00              |                                              |       |                   |  |
| Matrix                                                | 63,00                               | 61,95          | 1423,77                 | 2,26                      | 630,00             |                                              |       |                   |  |
| Zuschläge                                             | 33,00                               | 38,05          | 874,50                  | 2,65                      | 330,00             |                                              |       |                   |  |
| Fasern                                                | 0,00                                | 0,00           | 0,00                    | 0,00                      | 0,00               |                                              |       |                   |  |
| Frischbetonrohndichte                                 |                                     |                | 2298,27                 | 4,910                     | 1000,00            |                                              |       |                   |  |
| Wasserzugabe gesamt [l/m³]:                           |                                     |                | 164,70                  |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| <b>Mischung</b>                                       |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
|                                                       | Volumen der Mischung                | 2,70 dm³       |                         | V Kontrolle               |                    |                                              |       |                   |  |
|                                                       | Bezeichnung                         | Einwaage       |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Wasser                                                | Wasser                              | 444,7 g        |                         | 2700                      |                    |                                              |       |                   |  |
| Zement                                                | CEM I 42,5 R                        | 1976,4 g       |                         | 444,70                    |                    |                                              |       |                   |  |
| Zusatzstoff 1                                         | Elkem 940 U                         | 494,1 g        |                         | 637,56                    |                    |                                              |       |                   |  |
| Zusatzstoff 2                                         | Quarzmehl 10000                     | 830,1 g        |                         | 214,83                    |                    |                                              |       |                   |  |
| Zusatzstoff 3                                         | nv                                  | 0,0 g          |                         | 313,25                    |                    |                                              |       |                   |  |
| Fließmittel                                           | Sika FM 209                         | 98,8 g         |                         | 0,00                      |                    |                                              |       |                   |  |
| Entschäumer                                           | nv                                  | 0,0 g          |                         | 90,66                     |                    |                                              |       |                   |  |
| Sand 1                                                | ME 0-0,5                            | 2361,2 g       |                         | 0,00                      |                    |                                              |       |                   |  |
| Sand 2                                                | nv                                  | 0,0 g          |                         | 891,00                    |                    |                                              |       |                   |  |
| Sand 3                                                | nv                                  | 0,0 g          |                         | 0,00                      |                    |                                              |       |                   |  |
| Faser 1                                               | nv                                  | 0,0 g          |                         | 0,00                      |                    |                                              |       |                   |  |
| Faser 2                                               | nv                                  | 0,0 g          |                         | 0,00                      |                    |                                              |       |                   |  |
| Faser 3                                               | nv                                  | 0,0 g          |                         | 0,00                      |                    |                                              |       |                   |  |
| <b>Mischreihenfolge und Dauer</b>                     |                                     |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Mischertyp:                                           | Eirich R 02                         |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Mischart:                                             | Gleichstrommischen                  |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Wirblertyp:                                           | Stiftenwirbler                      |                | Mischbehälter           |                           | Wirbler            |                                              |       |                   |  |
| Mischreihenfolge:                                     | [s]                                 | [min]          |                         |                           | [U/min]            | [m/s]                                        |       |                   |  |
| 1) Cem, MS, QM, QS                                    | 90,0                                | 01:30          | Stufe 1                 |                           | 1250               | 7,9                                          |       |                   |  |
| 2) Wasser einfüllen+1/2 FM                            | 30,0                                | 00:30          |                         |                           | 1250               | 7,9                                          |       |                   |  |
| 3) Mischen                                            | 80,0                                | 01:20          |                         |                           | 1250               | 7,9                                          |       |                   |  |
| 4) Mischpause                                         | 0,0                                 | 00:00          |                         |                           | 0                  | 0,0                                          |       |                   |  |
| 5) Mischen                                            | 30,0                                | 00:30          |                         |                           | 500                | 3,1                                          |       |                   |  |
| 6) FM einfüllen                                       | 0,0                                 | 00:00          |                         |                           | 0                  | 0,0                                          |       |                   |  |
| 7) Nachmischen                                        | 0,0                                 | 00:00          |                         |                           | 0                  | 0,0                                          |       |                   |  |
| 8) Enlüften [60 mbar]                                 | 0,0                                 | 00:00          |                         |                           | 0                  | 0,0                                          |       |                   |  |
| Summe                                                 | 230,0                               | 03:50          |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Frischbetonprüfung Datum:                             | 01.12.2011                          |                | Festbetonprüfung Datum: |                           | 29.12.2011         |                                              |       |                   |  |
| Ausbreitmaß: SFM                                      | 25 cm                               |                | Biegezug:               |                           | 22,14 N/mm²        |                                              |       |                   |  |
| Rohdichte:                                            | 2335,5 kg/m³                        |                | Druck:                  |                           | 146,11 N/mm²       |                                              |       |                   |  |
| Luftgehalt:                                           | 4,1 %                               |                | Rohdichte:              |                           | 2340,41 kg/m³      |                                              |       |                   |  |
| Mischungstemperatur:                                  | 41 °C                               |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |
| Nachbehandlung:                                       | 20°C Wasserbecken                   |                |                         |                           |                    |                                              |       |                   |  |

## Anhang B: Schwind- und Gewichtstabellen

Schwindmessung Proben M 0 - M 9

|  |                    |
|--|--------------------|
|  | Messwerte          |
|  | Werte interpoliert |
|  | Wochenende Sa, So  |

| L-Kalib.0 | L-Kalib.t           | 1,939 | 1,938 | 1,938 | 1,937 | 1,937 | 1,936 | 1,935 | 1,934 | 1,933 | 1,932   | 1,931 | 1,932 | 1,934 | 1,933 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,934 | 1,933 | 1,934 | 1,932 | 1,931 | 1,929 | 1,916 | 1,915 | 1,915 | 1,915 | 1,915 |       |
|-----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 176,22    | Länge               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10      | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    |       |
| Probe     | L <sub>0</sub> Prob | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]    | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  |       |
| M 0.1     | 175,94              | 1,581 | 1,585 | 1,588 | 1,592 | 1,596 | 1,599 | 1,603 | 1,594 | 1,584 | 1,575   | 1,565 | 1,563 | 1,562 | 1,560 | 1,556 | 1,553 | 1,549 | 1,545 | 1,545 | 1,545 | 1,545 | 1,540 | 1,535 | 1,530 | 1,525 | 1,524 | 1,524 | 1,523 |       |
| M 0.2     | 176,21              | 1,876 | 1,879 | 1,882 | 1,886 | 1,889 | 1,892 | 1,895 | 1,887 | 1,879 | 1,870   | 1,862 | 1,859 | 1,855 | 1,852 | 1,848 | 1,844 | 1,839 | 1,835 | 1,835 | 1,835 | 1,835 | 1,830 | 1,825 | 1,820 | 1,815 | 1,814 | 1,813 | 1,812 |       |
| M 0.3     | 177,12              | 2,732 | 2,741 | 2,750 | 2,760 | 2,769 | 2,778 | 2,787 | 2,786 | 2,784 | 2,783   | 2,781 | 2,780 | 2,779 | 2,778 | 2,776 | 2,775 | 2,773 | 2,771 | 2,767 | 2,764 | 2,760 | 2,760 | 2,760 | 2,760 | 2,760 | 2,760 | 2,759 | 2,759 |       |
| M 0.4     | 178,16              | 3,709 | 3,718 | 3,726 | 3,735 | 3,744 | 3,752 | 3,761 | 3,756 | 3,750 | 3,745   | 3,739 | 3,740 | 3,740 | 3,741 | 3,740 | 3,738 | 3,737 | 3,735 | 3,731 | 3,726 | 3,722 | 3,722 | 3,723 | 3,723 | 3,723 | 3,723 | 3,723 | 3,723 |       |
| M 1.1     | 177,02              | 2,595 | 2,597 | 2,599 | 2,601 | 2,603 | 2,605 | 2,607 | 2,608 | 2,609 | 2,610   | 2,606 | 2,601 | 2,597 | 2,592 | 2,583 | 2,573 | 2,564 | 2,558 | 2,552 | 2,546 | 2,540 | 2,536 | 2,533 | 2,529 | 2,528 | 2,528 | 2,527 | 2,526 |       |
| M 1.2     | 176,00              | 1,679 | 1,679 | 1,680 | 1,680 | 1,680 | 1,681 | 1,681 | 1,680 | 1,680 | 1,679   | 1,677 | 1,675 | 1,672 | 1,670 | 1,664 | 1,657 | 1,651 | 1,646 | 1,641 | 1,635 | 1,630 | 1,628 | 1,626 | 1,624 | 1,622 | 1,621 | 1,619 | 1,617 |       |
| M 1.3     | 176,14              | 1,821 | 1,826 | 1,830 | 1,835 | 1,839 | 1,844 | 1,848 | 1,843 | 1,839 | 1,834   | 1,832 | 1,830 | 1,827 | 1,825 | 1,824 | 1,823 | 1,822 | 1,819 | 1,816 | 1,813 | 1,810 | 1,809 | 1,809 | 1,808 | 1,808 | 1,807 | 1,807 | 1,806 |       |
| M 1.4     | 176,20              | 1,850 | 1,854 | 1,858 | 1,863 | 1,867 | 1,871 | 1,875 | 1,875 | 1,876 | 1,876   | 1,875 | 1,873 | 1,872 | 1,870 | 1,870 | 1,869 | 1,869 | 1,868 | 1,867 | 1,865 | 1,864 | 1,863 | 1,861 | 1,860 | 1,860 | 1,859 | 1,859 | 1,858 |       |
| M 2.1     | 176,47              | 1,829 | 1,832 | 1,835 | 1,838 | 1,841 | 1,844 | 1,847 | 1,847 | 1,846 | 1,846   | 1,846 | 1,845 | 1,845 | 1,840 | 1,835 | 1,830 | 1,825 | 1,819 | 1,813 | 1,807 | 1,805 | 1,803 | 1,801 | 1,799 | 1,799 | 1,799 | 1,798 | 1,798 |       |
| M 2.2     | 176,50              | 1,869 | 1,872 | 1,874 | 1,877 | 1,880 | 1,882 | 1,885 | 1,884 | 1,884 | 1,883   | 1,882 | 1,882 | 1,881 | 1,876 | 1,872 | 1,867 | 1,862 | 1,858 | 1,853 | 1,849 | 1,847 | 1,845 | 1,843 | 1,841 | 1,840 | 1,839 | 1,837 | 1,836 |       |
| M 2.3     | 176,22              | 1,792 | 1,795 | 1,798 | 1,801 | 1,803 | 1,806 | 1,809 | 1,811 | 1,813 | 1,815   | 1,817 | 1,818 | 1,820 | 1,816 | 1,813 | 1,809 | 1,805 | 1,804 | 1,802 | 1,801 | 1,801 | 1,801 | 1,800 | 1,800 | 1,799 | 1,799 | 1,799 | 1,799 |       |
| M 2.4     | 176,38              | 1,755 | 1,758 | 1,761 | 1,764 | 1,767 | 1,770 | 1,773 | 1,766 | 1,758 | 1,751   | 1,746 | 1,740 | 1,735 | 1,731 | 1,728 | 1,724 | 1,720 | 1,719 | 1,717 | 1,716 | 1,715 | 1,714 | 1,712 | 1,711 | 1,710 | 1,710 | 1,709 | 1,708 |       |
| M 3.1     | 176,17              | 1,853 | 1,856 | 1,858 | 1,861 | 1,864 | 1,866 | 1,869 | 1,867 | 1,865 | 1,863   | 1,862 | 1,861 | 1,859 | 1,858 | 1,855 | 1,853 | 1,850 | 1,849 | 1,848 | 1,846 | 1,845 | 1,844 | 1,844 | 1,843 | 1,842 | 1,842 | 1,841 | 1,840 |       |
| M 3.2     | 176,72              | 2,304 | 2,307 | 2,310 | 2,313 | 2,316 | 2,319 | 2,322 | 2,321 | 2,321 | 2,320   | 2,319 | 2,318 | 2,316 | 2,315 | 2,313 | 2,312 | 2,310 | 2,309 | 2,309 | 2,308 | 2,307 | 2,306 | 2,306 | 2,305 | 2,305 | 2,305 | 2,304 | 2,304 |       |
| M 3.3     | 176,12              | 1,694 | 1,700 | 1,707 | 1,713 | 1,719 | 1,726 | 1,732 | 1,730 | 1,728 | 1,726   | 1,724 | 1,723 | 1,721 | 1,719 | 1,718 | 1,717 | 1,716 | 1,716 | 1,715 | 1,715 | 1,715 | 1,713 | 1,712 | 1,711 | 1,711 | 1,711 | 1,710 | 1,710 |       |
| M 3.4     | 176,01              | 1,576 | 1,578 | 1,579 | 1,581 | 1,582 | 1,584 | 1,585 | 1,582 | 1,578 | 1,575   | 1,574 | 1,574 | 1,573 | 1,572 | 1,572 | 1,571 | 1,571 | 1,569 | 1,568 | 1,566 | 1,564 | 1,564 | 1,564 | 1,564 | 1,564 | 1,564 | 1,563 | 1,563 |       |
| M 4.1     | 176,01              | 1,660 | 1,668 | 1,675 | 1,683 | 1,690 | 1,698 | 1,705 | 1,700 | 1,695 | 1,690   | 1,686 | 1,682 | 1,682 | 1,673 | 1,664 | 1,655 | 1,648 | 1,641 | 1,634 | 1,627 | 1,627 | 1,626 | 1,626 | 1,626 | 1,626 | 1,625 | 1,625 | 1,625 |       |
| M 4.2     | 176,40              | 1,839 | 1,842 | 1,844 | 1,847 | 1,850 | 1,852 | 1,855 | 1,854 | 1,854 | 1,853   | 1,850 | 1,847 | 1,845 | 1,841 | 1,836 | 1,832 | 1,831 | 1,830 | 1,828 | 1,827 | 1,825 | 1,824 | 1,822 | 1,822 | 1,821 | 1,821 | 1,820 | 1,820 |       |
| M 4.3     | 176,25              | 1,622 | 1,626 | 1,630 | 1,634 | 1,637 | 1,641 | 1,645 | 1,645 | 1,645 | 1,645   | 1,644 | 1,644 | 1,644 | 1,642 | 1,640 | 1,638 | 1,637 | 1,635 | 1,634 | 1,632 | 1,632 | 1,631 | 1,631 | 1,631 | 1,631 | 1,630 | 1,630 | 1,630 |       |
| M 4.4     | 176,73              | 1,832 | 1,841 | 1,849 | 1,858 | 1,867 | 1,875 | 1,884 | 1,876 | 1,868 | 1,860   | 1,856 | 1,852 | 1,844 | 1,845 | 1,845 | 1,846 | 1,843 | 1,841 | 1,838 | 1,835 | 1,832 | 1,828 | 1,825 | 1,825 | 1,824 | 1,824 | 1,823 | 1,823 |       |
| M 5.1     | 176,16              | 2,144 | 2,148 | 2,151 | 2,155 | 2,158 | 2,162 | 2,165 | 2,163 | 2,162 | 2,160   | 2,157 | 2,153 | 2,151 | 2,146 | 2,142 | 2,137 | 2,132 | 2,131 | 2,129 | 2,128 | 2,128 | 2,127 | 2,127 | 2,126 | 2,126 | 2,120 | 2,113 | 2,107 | 2,100 |
| M 5.2     | 176,22              | 1,395 | 1,401 | 1,406 | 1,412 | 1,418 | 1,423 | 1,429 | 1,426 | 1,422 | 1,419   | 1,414 | 1,410 | 1,401 | 1,400 | 1,399 | 1,398 | 1,397 | 1,393 | 1,389 | 1,385 | 1,384 | 1,383 | 1,382 | 1,381 | 1,381 | 1,381 | 1,380 | 1,380 |       |
| M 5.3     | 176,11              | 1,712 | 1,722 | 1,732 | 1,742 | 1,752 | 1,762 | 1,772 | 1,772 | 1,771 | 1,771   | 1,769 | 1,767 | 1,765 | 1,763 | 1,760 | 1,758 | 1,755 | 1,750 | 1,745 | 1,740 | 1,740 | 1,739 | 1,739 | 1,738 | 1,738 | 1,737 | 1,737 | 1,736 |       |
| M 5.4     | 176,15              | 1,487 | 1,493 | 1,499 | 1,505 | 1,511 | 1,517 | 1,523 | 1,522 | 1,520 | 1,519   | 1,518 | 1,518 | 1,517 | 1,516 | 1,516 | 1,515 | 1,514 | 1,513 | 1,512 | 1,511 | 1,510 | 1,510 | 1,509 | 1,508 | 1,507 | 1,507 | 1,506 | 1,505 |       |
| M 6.1     | 176,20              | 2,535 | 2,540 | 2,544 | 2,549 | 2,553 | 2,558 | 2,562 | 2,561 | 2,561 | 2,560   | 2,559 | 2,558 | 2,556 | 2,555 | 2,553 | 2,552 | 2,550 | 2,549 | 2,548 | 2,547 | 2,546 | 2,545 | 2,543 | 2,542 | 2,542 | 2,541 | 2,541 | 2,540 |       |
| M 6.2     | 176,28              | 2,534 | 2,540 | 2,546 | 2,553 | 2,559 | 2,565 | 2,571 | 2,562 | 2,552 | 2,543   | 2,538 | 2,533 | 2,527 | 2,522 | 2,517 | 2,511 | 2,506 | 2,505 | 2,503 | 2,502 | 2,500 | 2,499 | 2,497 | 2,496 | 2,496 | 2,495 | 2,495 | 2,494 |       |
| M 6.3     | 176,23              | 2,187 | 2,189 | 2,191 | 2,193 | 2,195 | 2,197 | 2,199 | 2,198 | 2,196 | 2,195   | 2,193 | 2,192 | 2,190 | 2,188 | 2,187 | 2,187 | 2,186 | 2,185 | 2,184 | 2,182 | 2,181 | 2,180 | 2,179 | 2,178 | 2,178 | 2,178 | 2,177 | 2,177 |       |
| M 6.4     | 176,25              | 2,199 | 2,201 | 2,203 | 2,205 | 2,207 | 2,209 | 2,211 | 2,210 | 2,210 | 2,209   | 2,208 | 2,207 | 2,206 | 2,205 | 2,203 | 2,202 | 2,200 | 2,200 | 2,200 | 2,199 | 2,199 | 2,199 | 2,198 | 2,198 | 2,198 | 2,197 | 2,197 | 2,197 |       |
| M 7.1     | 176,06              | 1,883 | 1,887 | 1,891 | 1,895 | 1,898 | 1,902 | 1,906 | 1,901 | 1,896 | 1,891   | 1,888 | 1,886 | 1,883 | 1,880 | 1,878 | 1,876 | 1,874 | 1,873 | 1,872 | 1,870 | 1,869 | 1,866 | 1,864 | 1,861 | 1,861 | 1,861 | 1,860 | 1,860 |       |
| M 7.2     | 176,12              | 1,728 | 1,731 | 1,734 | 1,737 | 1,739 | 1,742 | 1,745 | 1,744 | 1,742 | 1,741   | 1,740 | 1,739 | 1,738 | 1,737 | 1,736 | 1,734 | 1,733 | 1,732 | 1,732 | 1,731 | 1,730 | 1,730 | 1,730 | 1,730 | 1,730 | 1,729 | 1,729 | 1,729 |       |
| M 7.3     | 176,30              | 1,918 | 1,922 | 1,925 | 1,929 | 1,932 | 1,936 | 1,939 | 1,939 | 1,938 | 1,938   | 1,938 | 1,937 | 1,937 | 1,936 | 1,935 | 1,935 | 1,934 | 1,933 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,930 | 1,929 | 1,928 | 1,927 | 1,926 | 1,925 | 1,924 |       |
| M 7.4     | 176,09              | 1,884 | 1,886 | 1,888 | 1,891 | 1,893 | 1,895 | 1,897 | 1,896 | 1,896 | 1,895   | 1,894 | 1,893 | 1,891 | 1,890 | 1,889 | 1,887 | 1,886 | 1,885 | 1,883 | 1,882 | 1,880 | 1,879 | 1,879 | 1,878 | 1,878 | 1,878 | 1,877 | 1,877 |       |
| M 8.1     | 176,31              | 1,881 | 1,885 | 1,889 | 1,893 | 1,897 | 1,901 | 1,905 | 1,904 | 1,903 | 1,902   | 1,901 | 1,899 | 1,898 | 1,896 | 1,892 | 1,889 | 1,885 | 1,884 | 1,883 | 1,881 | 1,880 | 1,878 | 1,877 | 1,875 | 1,874 | 1,873 | 1,872 | 1,871 |       |
| M 8.2     | 176,38              | 1,681 | 1,684 | 1,687 | 1,690 | 1,692 | 1,695 | 1,698 | 1,697 | 1,697 | 1,696   | 1,695 | 1,694 | 1,693 | 1,692 | 1,691 | 1,689 | 1,688 | 1,687 | 1,686 | 1,685 | 1,684 | 1,683 | 1,683 | 1,682 | 1,682 | 1,681 | 1,681 | 1,680 |       |
| M 8.3     | 176,35              | 1,752 | 1,754 | 1,756 | 1,759 | 1,761 | 1,763 | 1,765 | 1,764 | 1,764 | 1,763   | 1,762 | 1,760 | 1,759 | 1,757 | 1,756 | 1,754 | 1,753 | 1,751 | 1,749 | 1,747 | 1,745 | 1,741 | 1,738 | 1,734 | 1,732 | 1,730 | 1,727 | 1,725 |       |
| M 8.4     | 176,33              | 1,423 | 1,425 | 1,427 | 1,430 | 1,432 | 1,434 | 1,436 | 1,433 | 1,429 | 1,426   | 1,423 | 1,421 | 1,418 | 1,415 | 1,412 | 1,409 | 1,406 | 1,404 | 1,402 | 1,400 | 1,398 | 1,396 | 1,393 | 1,391 | 1,391 | 1,391 | 1,390 | 1,390 |       |
| M 9.1     | 176,15              | 2,069 | 2,073 | 2,076 | 2,080 | 2,084 | 2,087 | 2,091 | 2,089 | 2,087 | 2,084   | 2,082 | 2,081 | 2,079 | 2,078 | 2,077 | 2,075 | 2,074 | 2,072 | 2,071 | 2,069 | 2,068 | 2,067 | 2,067 | 2,066 | 2,065 | 2,065 | 2,064 | 2,064 |       |
| M 9.2     | 176,20              | 2,451 | 2,455 | 2,459 | 2,463 | 2,467 | 2,471 | 2,475 | 2,473 | 2,471 | 2,469</ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

## Schwindmessung Proben M 10 - M 18

|  |                    |
|--|--------------------|
|  | Messwerte          |
|  | Werte interpoliert |
|  | Wochenende Sa, So  |

| L <sub>Kalib,0</sub> | L <sub>Kalib,t</sub> | 1,939 | 1,938 | 1,938 | 1,937 | 1,937 | 1,936 | 1,935 | 1,934 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,932 | 1,934 | 1,933 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,934 | 1,933 | 1,934 | 1,932 | 1,931 | 1,929 | 1,916 | 1,915 | 1,915 | 1,915 | 1,915 |
|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 176,22               | Länge                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    |
| Probe                | L <sub>0, Prob</sub> | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  |
| M 10.1               | 176,14               | 2,335 | 2,339 | 2,342 | 2,346 | 2,350 | 2,353 | 2,357 | 2,355 | 2,352 | 2,350 | 2,347 | 2,344 | 2,342 | 2,339 | 2,338 | 2,338 | 2,337 | 2,336 | 2,334 | 2,332 | 2,330 | 2,329 | 2,328 | 2,326 | 2,325 | 2,324 | 2,324 | 2,323 |
| M 10.2               | 176,26               | 2,220 | 2,224 | 2,227 | 2,231 | 2,234 | 2,238 | 2,241 | 2,240 | 2,239 | 2,238 | 2,237 | 2,235 | 2,234 | 2,232 | 2,231 | 2,230 | 2,228 | 2,227 | 2,225 | 2,224 | 2,222 | 2,222 | 2,221 | 2,221 | 2,220 | 2,219 | 2,219 | 2,218 |
| M 10.3               | 177,19               | 2,231 | 2,234 | 2,236 | 2,239 | 2,242 | 2,244 | 2,247 | 2,244 | 2,242 | 2,239 | 2,236 | 2,234 | 2,231 | 2,229 | 2,228 | 2,227 | 2,226 | 2,225 | 2,223 | 2,222 | 2,220 | 2,219 | 2,218 | 2,217 | 2,216 | 2,215 | 2,215 | 2,214 |
| M 10.4               | 178,11               | 2,429 | 2,432 | 2,435 | 2,438 | 2,440 | 2,443 | 2,446 | 2,443 | 2,440 | 2,437 | 2,434 | 2,432 | 2,430 | 2,428 | 2,425 | 2,423 | 2,420 | 2,417 | 2,415 | 2,414 | 2,412 | 2,411 | 2,411 | 2,410 | 2,409 | 2,408 | 2,408 | 2,407 |
| M 11.1               | 177,09               | 2,110 | 2,112 | 2,113 | 2,115 | 2,116 | 2,118 | 2,119 | 2,118 | 2,117 | 2,116 | 2,115 | 2,115 | 2,114 | 2,112 | 2,111 | 2,109 | 2,107 | 2,106 | 2,104 | 2,102 | 2,100 | 2,099 | 2,097 | 2,096 | 2,096 | 2,095 | 2,095 | 2,094 |
| M 11.2               | 176,22               | 1,671 | 1,673 | 1,674 | 1,676 | 1,677 | 1,679 | 1,680 | 1,679 | 1,679 | 1,678 | 1,677 | 1,676 | 1,675 | 1,671 | 1,666 | 1,662 | 1,661 | 1,660 | 1,659 | 1,658 | 1,657 | 1,656 | 1,655 | 1,654 | 1,653 | 1,653 | 1,652 | 1,651 |
| M 11.3               | 176,18               | 2,800 | 2,801 | 2,803 | 2,804 | 2,805 | 2,807 | 2,808 | 2,807 | 2,806 | 2,805 | 2,804 | 2,803 | 2,802 | 2,799 | 2,795 | 2,792 | 2,791 | 2,790 | 2,789 | 2,789 | 2,788 | 2,787 | 2,786 | 2,786 | 2,785 | 2,785 | 2,784 | 2,784 |
| M 11.4               | 176,27               | 1,872 | 1,874 | 1,877 | 1,879 | 1,881 | 1,884 | 1,886 | 1,885 | 1,883 | 1,882 | 1,881 | 1,880 | 1,879 | 1,876 | 1,872 | 1,869 | 1,867 | 1,864 | 1,862 | 1,860 | 1,858 | 1,855 | 1,853 | 1,852 | 1,852 | 1,851 | 1,851 | 1,850 |
| M 12.1               | 176,48               | 3,085 | 3,088 | 3,090 | 3,093 | 3,096 | 3,098 | 3,101 | 3,100 | 3,098 | 3,097 | 3,096 | 3,095 | 3,094 | 3,091 | 3,089 | 3,086 | 3,083 | 3,080 | 3,077 | 3,075 | 3,072 | 3,069 | 3,066 | 3,065 | 3,064 | 3,063 | 3,062 | 3,061 |
| M 12.2               | 176,55               | 1,712 | 1,716 | 1,719 | 1,723 | 1,727 | 1,730 | 1,734 | 1,733 | 1,731 | 1,730 | 1,728 | 1,727 | 1,725 | 1,723 | 1,721 | 1,719 | 1,717 | 1,716 | 1,714 | 1,713 | 1,711 | 1,710 | 1,708 | 1,708 | 1,707 | 1,707 | 1,706 | 1,706 |
| M 12.3               | 176,28               | 1,471 | 1,473 | 1,475 | 1,478 | 1,480 | 1,482 | 1,484 | 1,483 | 1,482 | 1,481 | 1,480 | 1,479 | 1,478 | 1,477 | 1,476 | 1,475 | 1,474 | 1,474 | 1,473 | 1,472 | 1,471 | 1,471 | 1,470 | 1,469 | 1,469 | 1,468 | 1,468 | 1,467 |
| M 12.4               | 176,31               | 1,672 | 1,674 | 1,677 | 1,679 | 1,681 | 1,684 | 1,686 | 1,685 | 1,684 | 1,683 | 1,682 | 1,680 | 1,679 | 1,677 | 1,676 | 1,674 | 1,672 | 1,670 | 1,668 | 1,666 | 1,664 | 1,662 | 1,660 | 1,659 | 1,659 | 1,658 | 1,658 | 1,657 |
| M 13.1               | 176,11               | 1,830 | 1,831 | 1,833 | 1,834 | 1,835 | 1,837 | 1,838 | 1,836 | 1,834 | 1,833 | 1,831 | 1,829 | 1,827 | 1,826 | 1,824 | 1,823 | 1,822 | 1,821 | 1,821 | 1,820 | 1,819 | 1,818 | 1,818 | 1,817 | 1,817 | 1,816 | 1,816 | 1,815 |
| M 13.2               | 176,77               | 1,692 | 1,695 | 1,698 | 1,701 | 1,704 | 1,707 | 1,710 | 1,708 | 1,706 | 1,705 | 1,703 | 1,701 | 1,699 | 1,697 | 1,695 | 1,692 | 1,689 | 1,686 | 1,684 | 1,681 | 1,678 | 1,675 | 1,674 | 1,672 | 1,671 | 1,670 | 1,668 | 1,667 |
| M 13.3               | 176,18               | 1,871 | 1,873 | 1,876 | 1,878 | 1,880 | 1,883 | 1,885 | 1,884 | 1,882 | 1,881 | 1,879 | 1,878 | 1,877 | 1,876 | 1,875 | 1,874 | 1,873 | 1,872 | 1,870 | 1,869 | 1,868 | 1,867 | 1,866 | 1,865 | 1,865 | 1,864 | 1,863 | 1,862 |
| M 13.4               | 176,07               | 2,998 | 3,000 | 3,002 | 3,004 | 3,005 | 3,007 | 3,009 | 3,007 | 3,006 | 3,004 | 3,003 | 3,001 | 2,998 | 2,994 | 2,991 | 2,989 | 2,988 | 2,986 | 2,985 | 2,983 | 2,982 | 2,980 | 2,979 | 2,979 | 2,978 | 2,977 | 2,977 | 2,976 |
| M 14.1               | 176,04               | 1,682 | 1,684 | 1,686 | 1,689 | 1,691 | 1,693 | 1,695 | 1,693 | 1,692 | 1,690 | 1,689 | 1,687 | 1,684 | 1,682 | 1,679 | 1,678 | 1,678 | 1,677 | 1,676 | 1,675 | 1,675 | 1,674 | 1,674 | 1,673 | 1,673 | 1,673 | 1,672 | 1,672 |
| M 14.2               | 176,46               | 2,054 | 2,056 | 2,058 | 2,060 | 2,062 | 2,064 | 2,066 | 2,065 | 2,064 | 2,063 | 2,062 | 2,061 | 2,056 | 2,052 | 2,047 | 2,045 | 2,042 | 2,040 | 2,037 | 2,035 | 2,032 | 2,030 | 2,027 | 2,024 | 2,021 | 2,018 | 2,015 | 2,012 |
| M 14.3               | 176,29               | 3,654 | 3,656 | 3,658 | 3,660 | 3,662 | 3,664 | 3,666 | 3,664 | 3,663 | 3,661 | 3,660 | 3,658 | 3,653 | 3,648 | 3,643 | 3,641 | 3,639 | 3,637 | 3,636 | 3,634 | 3,632 | 3,630 | 3,629 | 3,627 | 3,626 | 3,625 | 3,623 | 3,622 |
| M 14.4               | 176,53               | 1,891 | 1,893 | 1,894 | 1,896 | 1,897 | 1,899 | 1,900 | 1,898 | 1,896 | 1,895 | 1,893 | 1,891 | 1,887 | 1,884 | 1,880 | 1,879 | 1,877 | 1,876 | 1,875 | 1,874 | 1,872 | 1,871 | 1,870 | 1,870 | 1,869 | 1,868 | 1,868 | 1,867 |
| M 15.1               | 176,12               | 1,991 | 1,993 | 1,995 | 1,997 | 1,998 | 2,000 | 2,002 | 2,000 | 1,998 | 1,995 | 1,993 | 1,991 | 1,987 | 1,984 | 1,980 | 1,977 | 1,975 | 1,972 | 1,969 | 1,966 | 1,964 | 1,961 | 1,960 | 1,959 | 1,958 | 1,956 | 1,955 | 1,954 |
| M 15.2               | 176,27               | 2,747 | 2,748 | 2,749 | 2,751 | 2,752 | 2,753 | 2,754 | 2,753 | 2,752 | 2,750 | 2,749 | 2,748 | 2,745 | 2,741 | 2,738 | 2,735 | 2,732 | 2,729 | 2,727 | 2,724 | 2,721 | 2,718 | 2,718 | 2,718 | 2,717 | 2,717 | 2,717 | 2,717 |
| M 15.3               | 176,18               | 2,061 | 2,063 | 2,064 | 2,066 | 2,068 | 2,069 | 2,071 | 2,069 | 2,067 | 2,066 | 2,064 | 2,062 | 2,059 | 2,057 | 2,054 | 2,052 | 2,050 | 2,048 | 2,045 | 2,043 | 2,041 | 2,039 | 2,038 | 2,037 | 2,037 | 2,036 | 2,035 | 2,034 |
| M 15.4               | 176,19               | 2,569 | 2,571 | 2,573 | 2,575 | 2,576 | 2,578 | 2,580 | 2,578 | 2,576 | 2,575 | 2,573 | 2,571 | 2,569 | 2,566 | 2,564 | 2,562 | 2,560 | 2,558 | 2,557 | 2,555 | 2,553 | 2,551 | 2,550 | 2,549 | 2,549 | 2,548 | 2,547 | 2,546 |
| M 16.1               | 176,27               | 2,439 | 2,446 | 2,453 | 2,460 | 2,467 | 2,474 | 2,481 | 2,478 | 2,474 | 2,471 | 2,469 | 2,467 | 2,465 | 2,464 | 2,463 | 2,462 | 2,459 | 2,456 | 2,453 | 2,450 | 2,447 | 2,444 | 2,441 | 2,440 | 2,438 | 2,437 | 2,435 | 2,434 |
| M 16.2               | 176,21               | 2,517 | 2,520 | 2,523 | 2,526 | 2,529 | 2,532 | 2,535 | 2,533 | 2,532 | 2,530 | 2,527 | 2,525 | 2,522 | 2,521 | 2,520 | 2,519 | 2,515 | 2,512 | 2,508 | 2,504 | 2,500 | 2,497 | 2,493 | 2,492 | 2,491 | 2,491 | 2,490 | 2,489 |
| M 16.3               | 176,29               | 2,181 | 2,188 | 2,195 | 2,202 | 2,209 | 2,216 | 2,223 | 2,224 | 2,224 | 2,225 | 2,222 | 2,219 | 2,216 | 2,215 | 2,213 | 2,212 | 2,210 | 2,207 | 2,205 | 2,203 | 2,201 | 2,198 | 2,196 | 2,195 | 2,193 | 2,192 | 2,190 | 2,189 |
| M 16.4               | 176,25               | 2,194 | 2,200 | 2,206 | 2,212 | 2,217 | 2,223 | 2,229 | 2,228 | 2,227 | 2,226 | 2,225 | 2,223 | 2,222 | 2,221 | 2,221 | 2,220 | 2,220 | 2,219 | 2,219 | 2,219 | 2,219 | 2,218 | 2,218 | 2,218 | 2,217 | 2,217 | 2,216 | 2,216 |
| M 17.1               | 176,02               | 2,501 | 2,508 | 2,514 | 2,521 | 2,528 | 2,534 | 2,541 | 2,540 | 2,539 | 2,538 | 2,536 | 2,535 | 2,534 | 2,533 | 2,530 | 2,527 | 2,523 | 2,520 | 2,520 | 2,519 | 2,519 | 2,518 | 2,518 | 2,518 | 2,517 | 2,517 | 2,516 | 2,516 |
| M 17.2               | 176,17               | 1,843 | 1,849 | 1,855 | 1,861 | 1,866 | 1,872 | 1,878 | 1,876 | 1,875 | 1,873 | 1,872 | 1,870 | 1,869 | 1,867 | 1,867 | 1,867 | 1,866 | 1,866 | 1,866 | 1,865 | 1,865 | 1,864 | 1,864 | 1,864 | 1,863 | 1,863 | 1,862 | 1,862 |
| M 17.3               | 176,34               | 2,005 | 2,009 | 2,013 | 2,017 | 2,020 | 2,024 | 2,028 | 2,028 | 2,027 | 2,027 | 2,027 | 2,026 | 2,026 | 2,025 | 2,024 | 2,023 | 2,023 | 2,022 | 2,022 | 2,021 | 2,021 | 2,021 | 2,021 | 2,020 | 2,020 | 2,019 | 2,019 | 2,019 |
| M 17.4               | 176,19               | 2,649 | 2,654 | 2,658 | 2,663 | 2,668 | 2,672 | 2,677 | 2,676 | 2,675 | 2,674 | 2,673 | 2,672 | 2,671 | 2,670 | 2,669 | 2,669 | 2,668 | 2,668 | 2,667 | 2,667 | 2,667 | 2,666 | 2,666 | 2,666 | 2,665 | 2,665 | 2,664 | 2,664 |
| M 18.1               | 176,36               | 2,166 | 2,170 | 2,173 | 2,177 | 2,181 | 2,184 | 2,188 | 2,186 | 2,183 | 2,181 | 2,179 | 2,177 | 2,174 | 2,172 | 2,171 | 2,170 | 2,168 | 2,167 | 2,167 | 2,166 | 2,166 | 2,165 | 2,165 | 2,164 | 2,164 | 2,163 | 2,163 | 2,162 |
| M 18.2               | 176,33               | 1,931 | 1,934 | 1,937 | 1,941 | 1,944 | 1,947 | 1,950 | 1,946 | 1,943 | 1,939 | 1,936 | 1,932 | 1,929 | 1,925 | 1,919 | 1,914 | 1,908 | 1,902 | 1,902 | 1,901 | 1,901 | 1,900 | 1,900 | 1,900 | 1,899 | 1,899 | 1,898 | 1,898 |
| M 18.3               | 176,31               | 1,936 | 1,940 | 1,944 | 1,949 | 1,953 | 1,957 | 1,961 | 1,958 | 1,955 | 1,952 | 1,950 | 1,947 | 1,944 | 1,941 | 1,940 | 1,938 | 1,937 | 1,935 | 1,935 | 1,934 | 1,934 | 1,933 | 1,933 | 1,932 | 1,932 | 1,931 | 1,931 | 1,930 |
| M 18.4               | 176,28               | 2,998 | 3,001 | 3,003 | 3,006 | 3,009 | 3,011 | 3,014 | 3,013 | 3,011 | 3,010 | 3,009 | 3,008 | 3,006 | 3,005 | 3,003 | 3,000 | 2,998 | 2,995 | 2,995 | 2,994 | 2,994 | 2,993 | 2,993 | 2,993 | 2,992 | 2,992 | 2,991 | 2,991 |

## Längenänderung auf Meter bezogen

$$\varepsilon_t = \frac{mess_{Prob,t} - mess_{Kalib,t} - mess_{Prob,0} + mess_{Kalib,0}}{L_{0Prob}}$$

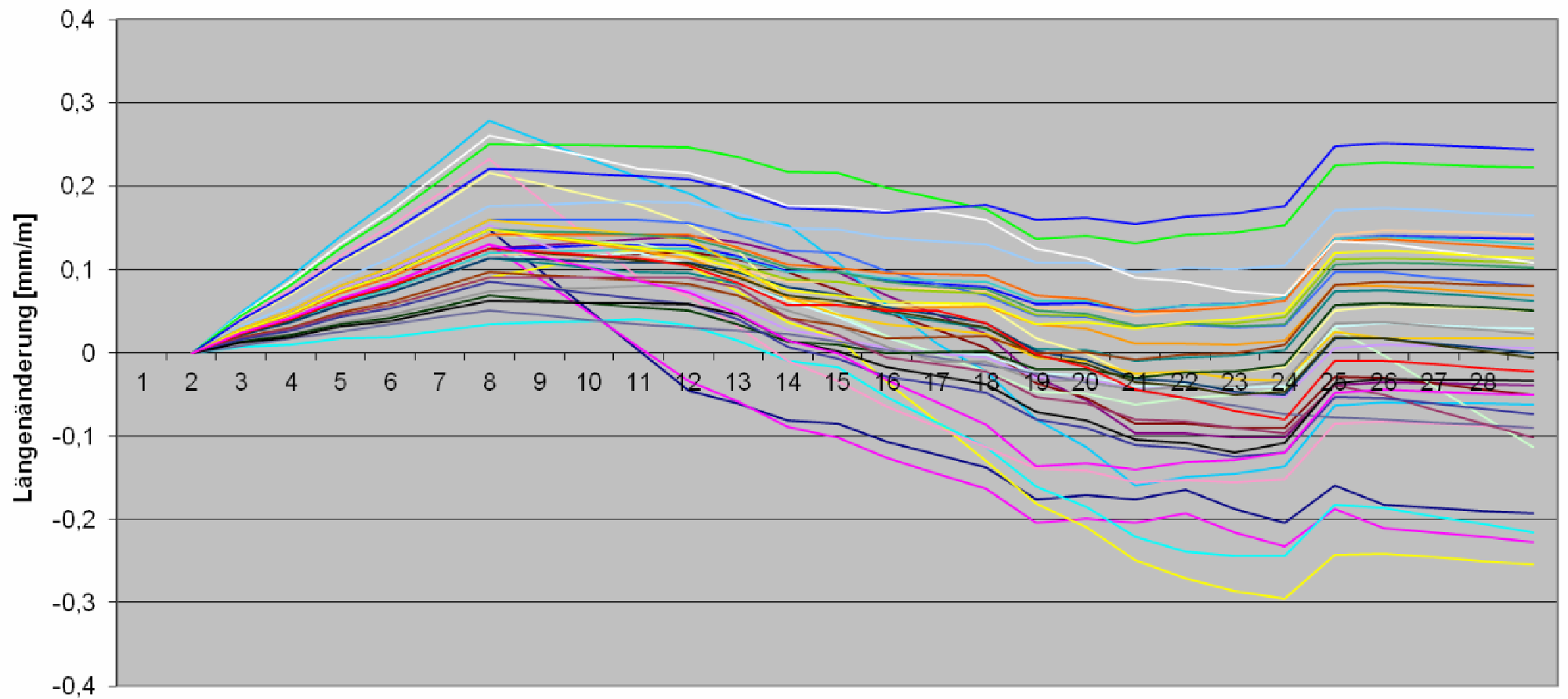
| Probe        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | 21     | 22     | 23     | 24     | 25     | 26     | 27     | 28     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| M 0.1 oV W20 | 0,000 | 0,027 | 0,047 | 0,074 | 0,095 | 0,121 | 0,148 | 0,099 | 0,051 | 0,003 | -0,045 | -0,061 | -0,081 | -0,085 | -0,107 | -0,122 | -0,138 | -0,176 | -0,171 | -0,176 | -0,165 | -0,188 | -0,205 | -0,159 | -0,182 | -0,186 | -0,189 | -0,193 |
| M 0.2 mV W20 | 0,000 | 0,024 | 0,042 | 0,065 | 0,083 | 0,107 | 0,131 | 0,089 | 0,048 | 0,007 | -0,034 | -0,059 | -0,089 | -0,102 | -0,126 | -0,145 | -0,163 | -0,204 | -0,199 | -0,204 | -0,193 | -0,216 | -0,233 | -0,187 | -0,210 | -0,216 | -0,221 | -0,227 |
| M 0.3 oV W90 | 0,000 | 0,057 | 0,109 | 0,167 | 0,218 | 0,276 | 0,333 | 0,330 | 0,327 | 0,325 | 0,322  | 0,311  | 0,294  | 0,294  | 0,284  | 0,279  | 0,275  | 0,248  | 0,233  | 0,207  | 0,198  | 0,203  | 0,215  | 0,288  | 0,294  | 0,292  | 0,290  | 0,288  |
| M 0.4 mV W90 | 0,000 | 0,054 | 0,103 | 0,157 | 0,206 | 0,260 | 0,314 | 0,289 | 0,264 | 0,239 | 0,213  | 0,211  | 0,204  | 0,213  | 0,205  | 0,202  | 0,199  | 0,174  | 0,155  | 0,125  | 0,112  | 0,119  | 0,132  | 0,206  | 0,213  | 0,213  | 0,213  | 0,213  |
| M 1.1 oV W20 | 0,000 | 0,017 | 0,028 | 0,045 | 0,056 | 0,073 | 0,090 | 0,102 | 0,113 | 0,124 | 0,105  | 0,073  | 0,037  | 0,017  | -0,036 | -0,083 | -0,130 | -0,181 | -0,209 | -0,249 | -0,271 | -0,286 | -0,296 | -0,243 | -0,241 | -0,246 | -0,250 | -0,254 |
| M 1.2 mV W20 | 0,000 | 0,008 | 0,009 | 0,017 | 0,019 | 0,027 | 0,034 | 0,036 | 0,038 | 0,040 | 0,033  | 0,014  | -0,010 | -0,017 | -0,053 | -0,083 | -0,114 | -0,161 | -0,185 | -0,220 | -0,239 | -0,244 | -0,244 | -0,182 | -0,186 | -0,196 | -0,206 | -0,216 |
| M 1.3 oV W90 | 0,000 | 0,031 | 0,057 | 0,088 | 0,114 | 0,145 | 0,176 | 0,155 | 0,134 | 0,114 | 0,106  | 0,088  | 0,064  | 0,057  | 0,051  | 0,051  | 0,051  | 0,017  | 0,006  | -0,017 | -0,023 | -0,021 | -0,013 | 0,057  | 0,060  | 0,057  | 0,054  | 0,051  |
| M 1.4 mV W90 | 0,000 | 0,029 | 0,053 | 0,082 | 0,106 | 0,135 | 0,165 | 0,172 | 0,180 | 0,187 | 0,184  | 0,170  | 0,150  | 0,148  | 0,146  | 0,149  | 0,153  | 0,129  | 0,128  | 0,115  | 0,119  | 0,117  | 0,121  | 0,187  | 0,190  | 0,187  | 0,184  | 0,182  |
| M 2.1 oV W20 | 0,000 | 0,023 | 0,040 | 0,062 | 0,079 | 0,102 | 0,125 | 0,128 | 0,132 | 0,136 | 0,140  | 0,132  | 0,119  | 0,096  | 0,068  | 0,045  | 0,023  | -0,028 | -0,057 | -0,096 | -0,096 | -0,102 | -0,102 | -0,040 | -0,035 | -0,037 | -0,038 | -0,040 |
| M 2.2 mV W20 | 0,000 | 0,021 | 0,036 | 0,057 | 0,072 | 0,093 | 0,113 | 0,115 | 0,117 | 0,119 | 0,121  | 0,111  | 0,096  | 0,075  | 0,048  | 0,027  | 0,006  | -0,036 | -0,055 | -0,085 | -0,085 | -0,091 | -0,091 | -0,028 | -0,030 | -0,037 | -0,044 | -0,051 |
| M 2.3 oV W90 | 0,000 | 0,022 | 0,038 | 0,060 | 0,076 | 0,097 | 0,119 | 0,136 | 0,153 | 0,170 | 0,185  | 0,189  | 0,187  | 0,172  | 0,150  | 0,135  | 0,119  | 0,095  | 0,093  | 0,079  | 0,088  | 0,091  | 0,099  | 0,170  | 0,176  | 0,176  | 0,176  | 0,176  |
| M 2.4 mV W90 | 0,000 | 0,023 | 0,040 | 0,062 | 0,079 | 0,102 | 0,125 | 0,089 | 0,053 | 0,017 | -0,008 | -0,043 | -0,085 | -0,101 | -0,122 | -0,137 | -0,153 | -0,178 | -0,180 | -0,193 | -0,189 | -0,190 | -0,186 | -0,119 | -0,118 | -0,122 | -0,126 | -0,130 |
| M 3.1 oV W20 | 0,000 | 0,021 | 0,036 | 0,057 | 0,072 | 0,093 | 0,114 | 0,108 | 0,102 | 0,096 | 0,095  | 0,082  | 0,064  | 0,062  | 0,047  | 0,038  | 0,028  | 0,004  | 0,003  | -0,010 | -0,006 | -0,004 | 0,004  | 0,074  | 0,075  | 0,071  | 0,067  | 0,062  |
| M 3.2 mV W20 | 0,000 | 0,023 | 0,040 | 0,062 | 0,079 | 0,102 | 0,124 | 0,126 | 0,128 | 0,130 | 0,129  | 0,116  | 0,098  | 0,096  | 0,087  | 0,083  | 0,079  | 0,058  | 0,059  | 0,050  | 0,057  | 0,058  | 0,066  | 0,136  | 0,140  | 0,139  | 0,137  | 0,136  |
| M 3.3 oV W90 | 0,000 | 0,042 | 0,078 | 0,119 | 0,155 | 0,197 | 0,238 | 0,233 | 0,227 | 0,221 | 0,217  | 0,202  | 0,180  | 0,176  | 0,170  | 0,170  | 0,170  | 0,150  | 0,153  | 0,145  | 0,153  | 0,153  | 0,159  | 0,227  | 0,231  | 0,230  | 0,229  | 0,227  |
| M 3.4 mV W90 | 0,000 | 0,014 | 0,023 | 0,037 | 0,045 | 0,060 | 0,074 | 0,061 | 0,047 | 0,034 | 0,036  | 0,026  | 0,010  | 0,011  | 0,009  | 0,013  | 0,017  | -0,010 | -0,014 | -0,030 | -0,028 | -0,023 | -0,011 | 0,062  | 0,067  | 0,065  | 0,064  | 0,062  |
| M 4.1 oV W20 | 0,000 | 0,048 | 0,091 | 0,139 | 0,182 | 0,230 | 0,278 | 0,256 | 0,233 | 0,210 | 0,192  | 0,162  | 0,153  | 0,108  | 0,057  | 0,011  | -0,023 | -0,080 | -0,114 | -0,159 | -0,150 | -0,146 | -0,136 | -0,064 | -0,059 | -0,060 | -0,061 | -0,062 |
| M 4.2 mV W20 | 0,000 | 0,021 | 0,036 | 0,057 | 0,072 | 0,093 | 0,113 | 0,115 | 0,117 | 0,119 | 0,107  | 0,084  | 0,062  | 0,043  | 0,019  | 0,000  | -0,001 | -0,026 | -0,027 | -0,040 | -0,038 | -0,042 | -0,040 | 0,032  | 0,035  | 0,033  | 0,031  | 0,028  |
| M 4.3 oV W90 | 0,000 | 0,027 | 0,049 | 0,077 | 0,098 | 0,126 | 0,153 | 0,159 | 0,165 | 0,170 | 0,172  | 0,162  | 0,153  | 0,148  | 0,136  | 0,130  | 0,128  | 0,102  | 0,099  | 0,085  | 0,095  | 0,098  | 0,108  | 0,180  | 0,185  | 0,184  | 0,183  | 0,182  |
| M 4.4 mV W90 | 0,000 | 0,055 | 0,104 | 0,158 | 0,207 | 0,262 | 0,317 | 0,277 | 0,238 | 0,198 | 0,182  | 0,155  | 0,096  | 0,106  | 0,109  | 0,119  | 0,109  | 0,076  | 0,066  | 0,045  | 0,038  | 0,025  | 0,017  | 0,088  | 0,092  | 0,089  | 0,087  | 0,085  |
| M 5.1 oV W20 | 0,000 | 0,026 | 0,045 | 0,071 | 0,091 | 0,116 | 0,142 | 0,138 | 0,134 | 0,131 | 0,117  | 0,092  | 0,068  | 0,047  | 0,020  | -0,001 | -0,023 | -0,047 | -0,049 | -0,062 | -0,054 | -0,051 | -0,043 | 0,028  | -0,003 | -0,040 | -0,077 | -0,114 |
| M 5.2 mV W20 | 0,000 | 0,038 | 0,070 | 0,108 | 0,140 | 0,178 | 0,216 | 0,202 | 0,189 | 0,176 | 0,155  | 0,122  | 0,062  | 0,062  | 0,057  | 0,057  | 0,057  | 0,017  | 0,000  | -0,028 | -0,023 | -0,023 | -0,017 | 0,051  | 0,055  | 0,054  | 0,052  | 0,051  |
| M 5.3 oV W90 | 0,000 | 0,062 | 0,119 | 0,182 | 0,238 | 0,301 | 0,363 | 0,367 | 0,371 | 0,375 | 0,368  | 0,351  | 0,329  | 0,321  | 0,307  | 0,298  | 0,290  | 0,244  | 0,221  | 0,187  | 0,196  | 0,199  | 0,207  | 0,278  | 0,281  | 0,278  | 0,275  | 0,273  |
| M 5.4 mV W90 | 0,000 | 0,040 | 0,074 | 0,114 | 0,148 | 0,187 | 0,227 | 0,225 | 0,223 | 0,221 | 0,223  | 0,214  | 0,199  | 0,200  | 0,196  | 0,197  | 0,199  | 0,176  | 0,176  | 0,165  | 0,172  | 0,173  | 0,180  | 0,250  | 0,251  | 0,247  | 0,243  | 0,238  |
| M 6.1 oV W20 | 0,000 | 0,031 | 0,057 | 0,088 | 0,114 | 0,145 | 0,176 | 0,178 | 0,180 | 0,182 | 0,180  | 0,167  | 0,149  | 0,148  | 0,138  | 0,134  | 0,131  | 0,108  | 0,108  | 0,096  | 0,102  | 0,100  | 0,104  | 0,170  | 0,173  | 0,170  | 0,167  | 0,165  |
| M 6.2 mV W20 | 0,000 | 0,041 | 0,076 | 0,116 | 0,151 | 0,192 | 0,233 | 0,185 | 0,138 | 0,091 | 0,067  | 0,031  | -0,010 | -0,034 | -0,064 | -0,089 | -0,113 | -0,139 | -0,142 | -0,156 | -0,153 | -0,155 | -0,151 | -0,085 | -0,082 | -0,085 | -0,088 | -0,091 |
| M 6.3 oV W90 | 0,000 | 0,017 | 0,028 | 0,045 | 0,057 | 0,074 | 0,091 | 0,089 | 0,087 | 0,085 | 0,081  | 0,065  | 0,044  | 0,040  | 0,036  | 0,038  | 0,040  | 0,016  | 0,014  | 0,001  | 0,006  | 0,006  | 0,011  | 0,079  | 0,084  | 0,082  | 0,081  | 0,079  |
| M 6.4 mV W90 | 0,000 | 0,017 | 0,028 | 0,045 | 0,057 | 0,074 | 0,091 | 0,093 | 0,095 | 0,096 | 0,096  | 0,085  | 0,068  | 0,068  | 0,059  | 0,055  | 0,051  | 0,033  | 0,037  | 0,030  | 0,040  | 0,043  | 0,053  | 0,125  | 0,129  | 0,128  | 0,126  | 0,125  |
| M 7.1 oV W20 | 0,000 | 0,027 | 0,049 | 0,077 | 0,098 | 0,126 | 0,153 | 0,131 | 0,108 | 0,085 | 0,075  | 0,054  | 0,027  | 0,017  | 0,006  | 0,000  | -0,006 | -0,030 | -0,031 | -0,044 | -0,040 | -0,049 | -0,053 | 0,006  | 0,010  | 0,009  | 0,007  | 0,006  |
| M 7.2 mV W20 | 0,000 | 0,022 | 0,038 | 0,060 | 0,076 | 0,097 | 0,119 | 0,117 | 0,115 | 0,114 | 0,114  | 0,102  | 0,085  | 0,085  | 0,078  | 0,076  | 0,074  | 0,053  | 0,054  | 0,044  | 0,051  | 0,057  | 0,068  | 0,142  | 0,146  | 0,145  | 0,143  | 0,142  |
| M 7.3 oV W90 | 0,000 | 0,026 | 0,045 | 0,071 | 0,091 | 0,116 | 0,142 | 0,146 | 0,149 | 0,153 | 0,156  | 0,147  | 0,133  | 0,136  | 0,132  | 0,134  | 0,136  | 0,115  | 0,116  | 0,106  | 0,113  | 0,113  | 0,119  | 0,187  | 0,187  | 0,182  | 0,176  | 0,170  |
| M 7.4 mV W90 | 0,000 | 0,018 | 0,030 | 0,048 | 0,061 | 0,079 | 0,097 | 0,098 | 0,100 | 0,102 | 0,101  | 0,088  | 0,070  | 0,068  | 0,061  | 0,059  | 0,057  | 0,031  | 0,028  | 0,014  | 0,017  | 0,019  | 0,027  | 0,097  | 0,101  | 0,099  | 0,098  | 0,097  |
| M 8.1 oV W20 | 0,000 | 0,028 | 0,051 | 0,079 | 0,102 | 0,130 | 0,159 | 0,159 | 0,159 | 0,159 | 0,156  | 0,142  | 0,122  | 0,119  | 0,098  | 0,083  | 0,068  | 0,044  | 0,043  | 0,030  | 0,034  | 0,030  | 0,032  | 0,096  | 0,096  | 0,091  | 0,085  | 0,079  |
| M 8.2 mV W20 | 0,000 | 0,022 | 0,038 | 0,060 | 0,076 | 0,097 | 0,119 | 0,121 | 0,123 | 0,125 | 0,125  | 0,113  | 0,096  | 0,096  | 0,089  | 0,087  | 0,085  | 0,062  | 0,062  | 0,051  | 0,057  | 0,059  | 0,066  | 0,136  | 0,139  | 0,136  | 0,133  | 0,130  |
| M 8.3 oV W90 | 0,000 | 0,018 | 0,030 | 0,048 | 0,060 | 0,078 | 0,096 | 0,098 | 0,100 | 0,102 | 0,099  | 0,085  | 0,065  | 0,062  | 0,055  | 0,053  | 0,051  | 0,023  | 0,017  | 0,000  | 0,000  | -0,015 | -0,025 | 0,028  | 0,021  | 0,009  | -0,004 | -0,017 |
| M 8.4 mV W90 | 0,000 | 0,018 | 0,030 | 0,048 | 0,060 | 0,078 | 0,096 | 0,083 | 0,070 | 0,057 | 0,047  | 0,026  | -0,001 | -0,011 | -0,028 | -0,040 | -0,051 | -0,079 | -0,085 | -0,102 | -0,102 | -0,110 | -0,112 | -0,051 | -0,047 | -0,048 | -0,050 | -0,051 |
| M 9.1 oV W20 | 0,000 | 0,026 | 0,047 | 0,074 | 0,095 | 0,121 | 0,148 | 0,141 | 0,133 | 0,126 | 0,119  | 0,106  | 0,087  | 0,085  | 0,077  | 0,074  | 0,071  | 0,045  | 0,044  | 0,030  | 0,034  | 0,035  | 0,043  | 0,112  | 0,114  | 0,112  | 0,110  | 0,108  |
| M 9.2 mV W20 | 0,000 | 0,028 | 0,051 | 0,079 | 0,102 | 0,131 | 0,159 | 0,153 | 0,148 | 0,142 | 0,136  | 0,104  | 0,066  | 0,045  | 0,034  | 0,028  | 0,023  | -0,006 | -0,009 | -0,025 | -0,023 | -0,031 | -0,034 | 0,026  | 0,017  | 0,017  | 0,017  | 0,017  |
| M 9.3 oV W90 | 0,000 | 0,022 | 0,038 | 0,060 | 0,076 | 0,097 | 0,119 | 0,112 | 0,105 | 0,098 | 0,091  | 0,057  | 0,017  | -0,006 | -0,041 | -0,071 | -0,101 | -0,153 | -0,182 | -0,221 | -0,244 | -0,253 | -0,255 | -0,196 | -0,204 | -0,208 | -0,212 | -0,216 |
| M 9.4 mV W90 | 0,000 | 0,023 | 0,040 | 0,062 | 0,079 | 0,102 | 0,125 | 0,118 | 0,111 | 0,104 | 0,096  | 0,057  | 0,011  | -0,017 | -0,044 | -0,065 | -0,087 | -0,131 | -0,149 | -0,180 | -0,193 | -0,206 | -0,213 | -0,158 | -0,170 | -0,174 | -0,178 | -0,182 |

## Längenänderung auf Meter bezogen

$$\varepsilon_t = \frac{\text{mess}_{\text{Prob},t} - \text{mess}_{\text{Kalib},t} - \text{mess}_{\text{Prob},0} + \text{mess}_{\text{Kalib},0}}{L_{0\text{Prob}}}$$

| Probe         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | 21     | 22     | 23     | 24     | 25     | 26     | 27     | 28     |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| M 10.1 oV W20 | 0,000 | 0,026 | 0,047 | 0,074 | 0,095 | 0,121 | 0,148 | 0,139 | 0,131 | 0,122 | 0,114 | 0,093 | 0,066 | 0,057  | 0,053  | 0,054  | 0,055  | 0,034  | 0,028  | 0,011  | 0,011  | 0,010  | 0,014  | 0,081  | 0,079  | 0,076  | 0,072  | 0,068  |
| M 10.2 mV W20 | 0,000 | 0,026 | 0,045 | 0,071 | 0,091 | 0,116 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,142 | 0,127 | 0,106 | 0,102  | 0,095  | 0,094  | 0,092  | 0,068  | 0,064  | 0,049  | 0,051  | 0,054  | 0,062  | 0,133  | 0,136  | 0,132  | 0,129  | 0,125  |
| M 10.3 oV W90 | 0,000 | 0,021 | 0,036 | 0,056 | 0,071 | 0,092 | 0,113 | 0,103 | 0,093 | 0,083 | 0,073 | 0,055 | 0,030 | 0,023  | 0,017  | 0,017  | 0,017  | -0,006 | -0,009 | -0,024 | -0,023 | -0,023 | -0,017 | 0,051  | 0,051  | 0,047  | 0,043  | 0,040  |
| M 10.4 mV W90 | 0,000 | 0,022 | 0,037 | 0,059 | 0,075 | 0,096 | 0,118 | 0,107 | 0,095 | 0,084 | 0,073 | 0,056 | 0,034 | 0,028  | 0,013  | 0,003  | -0,007 | -0,039 | -0,043 | -0,058 | -0,056 | -0,055 | -0,048 | 0,021  | 0,022  | 0,019  | 0,015  | 0,011  |
| M 11.1 oV W20 | 0,000 | 0,008 | 0,017 | 0,025 | 0,034 | 0,042 | 0,051 | 0,045 | 0,040 | 0,034 | 0,030 | 0,026 | 0,023 | 0,013  | 0,004  | -0,006 | -0,015 | -0,025 | -0,035 | -0,044 | -0,054 | -0,064 | -0,073 | -0,077 | -0,080 | -0,084 | -0,087 | -0,090 |
| M 11.2 mV W20 | 0,000 | 0,014 | 0,023 | 0,037 | 0,045 | 0,060 | 0,074 | 0,076 | 0,078 | 0,079 | 0,079 | 0,068 | 0,051 | 0,032  | 0,008  | -0,011 | -0,011 | -0,034 | -0,034 | -0,045 | -0,040 | -0,040 | -0,034 | 0,035  | 0,036  | 0,032  | 0,027  | 0,023  |
| M 11.3 oV W90 | 0,000 | 0,013 | 0,021 | 0,034 | 0,042 | 0,055 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,057 | 0,040 | 0,026  | 0,008  | -0,006 | -0,005 | -0,027 | -0,026 | -0,036 | -0,030 | -0,029 | -0,023 | 0,049  | 0,052  | 0,050  | 0,048  | 0,045  |
| M 11.4 mV W90 | 0,000 | 0,019 | 0,032 | 0,051 | 0,064 | 0,083 | 0,102 | 0,100 | 0,098 | 0,096 | 0,096 | 0,085 | 0,068 | 0,055  | 0,036  | 0,023  | 0,015  | -0,015 | -0,022 | -0,041 | -0,042 | -0,049 | -0,051 | 0,019  | 0,022  | 0,018  | 0,015  | 0,011  |
| M 12.1 oV W20 | 0,000 | 0,021 | 0,036 | 0,057 | 0,072 | 0,093 | 0,113 | 0,111 | 0,110 | 0,108 | 0,108 | 0,096 | 0,079 | 0,070  | 0,055  | 0,045  | 0,035  | 0,002  | -0,009 | -0,031 | -0,036 | -0,046 | -0,051 | 0,017  | 0,017  | 0,011  | 0,006  | 0,000  |
| M 12.2 mV W20 | 0,000 | 0,026 | 0,047 | 0,074 | 0,094 | 0,121 | 0,147 | 0,145 | 0,143 | 0,142 | 0,138 | 0,123 | 0,102 | 0,096  | 0,085  | 0,079  | 0,076  | 0,050  | 0,047  | 0,032  | 0,035  | 0,032  | 0,034  | 0,105  | 0,109  | 0,106  | 0,104  | 0,102  |
| M 12.3 oV W90 | 0,000 | 0,018 | 0,030 | 0,048 | 0,061 | 0,078 | 0,096 | 0,096 | 0,096 | 0,096 | 0,096 | 0,085 | 0,068 | 0,068  | 0,062  | 0,062  | 0,064  | 0,043  | 0,045  | 0,035  | 0,042  | 0,044  | 0,051  | 0,121  | 0,124  | 0,120  | 0,117  | 0,113  |
| M 12.4 mV W90 | 0,000 | 0,019 | 0,032 | 0,051 | 0,064 | 0,083 | 0,102 | 0,102 | 0,102 | 0,102 | 0,100 | 0,087 | 0,068 | 0,064  | 0,055  | 0,051  | 0,045  | 0,017  | 0,011  | -0,006 | -0,006 | -0,011 | -0,011 | 0,059  | 0,061  | 0,058  | 0,054  | 0,051  |
| M 13.1 oV W20 | 0,000 | 0,013 | 0,021 | 0,034 | 0,042 | 0,055 | 0,068 | 0,064 | 0,059 | 0,055 | 0,050 | 0,034 | 0,013 | 0,009  | 0,000  | 0,001  | 0,002  | -0,020 | -0,019 | -0,030 | -0,024 | -0,023 | -0,014 | 0,057  | 0,060  | 0,057  | 0,054  | 0,051  |
| M 13.2 mV W20 | 0,000 | 0,023 | 0,040 | 0,062 | 0,079 | 0,102 | 0,124 | 0,120 | 0,115 | 0,111 | 0,106 | 0,091 | 0,068 | 0,062  | 0,051  | 0,040  | 0,030  | -0,003 | -0,014 | -0,036 | -0,040 | -0,051 | -0,047 | 0,019  | 0,017  | 0,009  | 0,002  | -0,006 |
| M 13.3 oV W90 | 0,000 | 0,019 | 0,032 | 0,051 | 0,064 | 0,083 | 0,102 | 0,100 | 0,098 | 0,095 | 0,093 | 0,079 | 0,062 | 0,062  | 0,057  | 0,056  | 0,055  | 0,032  | 0,031  | 0,019  | 0,024  | 0,023  | 0,029  | 0,098  | 0,099  | 0,095  | 0,090  | 0,085  |
| M 13.4 mV W90 | 0,000 | 0,016 | 0,027 | 0,043 | 0,053 | 0,069 | 0,085 | 0,082 | 0,078 | 0,075 | 0,072 | 0,057 | 0,027 | 0,013  | -0,006 | -0,009 | -0,012 | -0,038 | -0,041 | -0,056 | -0,054 | -0,057 | -0,049 | 0,021  | 0,023  | 0,019  | 0,015  | 0,011  |
| M 14.1 oV W20 | 0,000 | 0,018 | 0,030 | 0,048 | 0,061 | 0,079 | 0,097 | 0,093 | 0,090 | 0,086 | 0,083 | 0,068 | 0,042 | 0,032  | 0,017  | 0,019  | 0,020  | -0,001 | 0,001  | -0,009 | -0,002 | 0,000  | 0,009  | 0,081  | 0,085  | 0,083  | 0,081  | 0,080  |
| M 14.2 mV W20 | 0,000 | 0,017 | 0,028 | 0,045 | 0,057 | 0,074 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,079 | 0,042 | 0,021  | -0,006 | -0,014 | -0,022 | -0,053 | -0,061 | -0,080 | -0,083 | -0,091 | -0,096 | -0,040 | -0,051 | -0,068 | -0,085 | -0,102 |
| M 14.3 oV W90 | 0,000 | 0,017 | 0,028 | 0,045 | 0,057 | 0,074 | 0,091 | 0,087 | 0,084 | 0,081 | 0,077 | 0,062 | 0,023 | 0,000  | -0,028 | -0,033 | -0,038 | -0,066 | -0,071 | -0,087 | -0,086 | -0,091 | -0,087 | -0,021 | -0,023 | -0,030 | -0,038 | -0,045 |
| M 14.4 mV W90 | 0,000 | 0,014 | 0,023 | 0,037 | 0,045 | 0,059 | 0,074 | 0,069 | 0,065 | 0,060 | 0,056 | 0,040 | 0,008 | -0,008 | -0,028 | -0,030 | -0,032 | -0,056 | -0,057 | -0,070 | -0,066 | -0,068 | -0,060 | 0,009  | 0,011  | 0,008  | 0,004  | 0,000  |
| M 15.1 oV W20 | 0,000 | 0,016 | 0,026 | 0,043 | 0,053 | 0,069 | 0,085 | 0,078 | 0,072 | 0,065 | 0,058 | 0,040 | 0,008 | -0,008 | -0,028 | -0,038 | -0,048 | -0,080 | -0,090 | -0,111 | -0,115 | -0,125 | -0,120 | -0,053 | -0,054 | -0,061 | -0,067 | -0,074 |
| M 15.2 mV W20 | 0,000 | 0,012 | 0,019 | 0,031 | 0,038 | 0,050 | 0,062 | 0,061 | 0,060 | 0,059 | 0,058 | 0,045 | 0,015 | 0,002  | -0,017 | -0,028 | -0,038 | -0,071 | -0,082 | -0,104 | -0,109 | -0,119 | -0,109 | -0,036 | -0,031 | -0,032 | -0,033 | -0,034 |
| M 15.3 oV W90 | 0,000 | 0,015 | 0,025 | 0,040 | 0,049 | 0,064 | 0,079 | 0,075 | 0,070 | 0,066 | 0,061 | 0,045 | 0,019 | 0,009  | -0,006 | -0,012 | -0,019 | -0,048 | -0,054 | -0,072 | -0,073 | -0,079 | -0,073 | -0,004 | -0,003 | -0,008 | -0,012 | -0,017 |
| M 15.4 mV W90 | 0,000 | 0,016 | 0,026 | 0,043 | 0,053 | 0,069 | 0,085 | 0,081 | 0,076 | 0,072 | 0,067 | 0,051 | 0,026 | 0,019  | 0,006  | 0,001  | -0,004 | -0,032 | -0,036 | -0,053 | -0,052 | -0,057 | -0,050 | 0,019  | 0,020  | 0,015  | 0,010  | 0,006  |
| M 16.1 oV W20 | 0,000 | 0,045 | 0,085 | 0,130 | 0,170 | 0,216 | 0,261 | 0,248 | 0,234 | 0,221 | 0,216 | 0,199 | 0,176 | 0,176  | 0,170  | 0,170  | 0,159  | 0,125  | 0,113  | 0,091  | 0,085  | 0,074  | 0,068  | 0,134  | 0,132  | 0,124  | 0,116  | 0,108  |
| M 16.2 mV W20 | 0,000 | 0,023 | 0,040 | 0,062 | 0,079 | 0,102 | 0,125 | 0,121 | 0,117 | 0,114 | 0,104 | 0,083 | 0,057 | 0,057  | 0,051  | 0,051  | 0,036  | -0,002 | -0,018 | -0,045 | -0,054 | -0,070 | -0,079 | -0,010 | -0,009 | -0,014 | -0,018 | -0,023 |
| M 16.3 oV W90 | 0,000 | 0,045 | 0,085 | 0,130 | 0,170 | 0,216 | 0,261 | 0,270 | 0,280 | 0,289 | 0,278 | 0,255 | 0,227 | 0,225  | 0,217  | 0,216  | 0,208  | 0,178  | 0,171  | 0,152  | 0,151  | 0,143  | 0,142  | 0,208  | 0,205  | 0,197  | 0,189  | 0,182  |
| M 16.4 mV W90 | 0,000 | 0,039 | 0,072 | 0,111 | 0,144 | 0,183 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,219 | 0,206 | 0,187 | 0,189  | 0,185  | 0,187  | 0,191  | 0,173  | 0,177  | 0,169  | 0,179  | 0,183  | 0,193  | 0,264  | 0,268  | 0,266  | 0,263  | 0,261  |
| M 17.1 oV W20 | 0,000 | 0,044 | 0,081 | 0,125 | 0,163 | 0,206 | 0,250 | 0,249 | 0,248 | 0,248 | 0,247 | 0,235 | 0,217 | 0,216  | 0,197  | 0,185  | 0,172  | 0,136  | 0,140  | 0,132  | 0,141  | 0,144  | 0,153  | 0,225  | 0,228  | 0,226  | 0,224  | 0,222  |
| M 17.2 mV W20 | 0,000 | 0,039 | 0,072 | 0,111 | 0,144 | 0,183 | 0,221 | 0,218 | 0,215 | 0,212 | 0,208 | 0,194 | 0,174 | 0,170  | 0,169  | 0,173  | 0,177  | 0,159  | 0,162  | 0,154  | 0,163  | 0,167  | 0,176  | 0,247  | 0,251  | 0,249  | 0,246  | 0,244  |
| M 17.3 oV W90 | 0,000 | 0,027 | 0,049 | 0,077 | 0,098 | 0,126 | 0,153 | 0,157 | 0,161 | 0,165 | 0,169 | 0,162 | 0,149 | 0,153  | 0,147  | 0,147  | 0,147  | 0,125  | 0,129  | 0,121  | 0,131  | 0,135  | 0,145  | 0,217  | 0,221  | 0,219  | 0,217  | 0,215  |
| M 17.4 mV W90 | 0,000 | 0,032 | 0,059 | 0,091 | 0,117 | 0,149 | 0,182 | 0,182 | 0,182 | 0,182 | 0,182 | 0,170 | 0,153 | 0,153  | 0,150  | 0,153  | 0,156  | 0,136  | 0,140  | 0,132  | 0,141  | 0,144  | 0,153  | 0,225  | 0,228  | 0,226  | 0,224  | 0,221  |
| M 18.1 oV W20 | 0,000 | 0,026 | 0,047 | 0,074 | 0,095 | 0,121 | 0,147 | 0,140 | 0,133 | 0,126 | 0,118 | 0,100 | 0,075 | 0,068  | 0,061  | 0,060  | 0,058  | 0,034  | 0,037  | 0,028  | 0,037  | 0,040  | 0,048  | 0,119  | 0,122  | 0,119  | 0,116  | 0,113  |
| M 18.2 mV W20 | 0,000 | 0,024 | 0,042 | 0,065 | 0,083 | 0,107 | 0,130 | 0,116 | 0,101 | 0,087 | 0,072 | 0,046 | 0,015 | 0,000  | -0,033 | -0,060 | -0,086 | -0,136 | -0,133 | -0,141 | -0,132 | -0,128 | -0,119 | -0,048 | -0,044 | -0,047 | -0,049 | -0,051 |
| M 18.3 oV W90 | 0,000 | 0,029 | 0,053 | 0,082 | 0,106 | 0,135 | 0,164 | 0,154 | 0,143 | 0,133 | 0,122 | 0,100 | 0,073 | 0,062  | 0,054  | 0,051  | 0,048  | 0,023  | 0,026  | 0,017  | 0,026  | 0,028  | 0,037  | 0,108  | 0,111  | 0,108  | 0,105  | 0,102  |
| M 18.4 mV W90 | 0,000 | 0,021 | 0,036 | 0,057 | 0,072 | 0,093 | 0,113 | 0,112 | 0,110 | 0,109 | 0,107 | 0,094 | 0,075 | 0,074  | 0,060  | 0,051  | 0,043  | 0,011  | 0,015  | 0,007  | 0,016  | 0,019  | 0,028  | 0,100  | 0,103  | 0,101  | 0,099  | 0,096  |

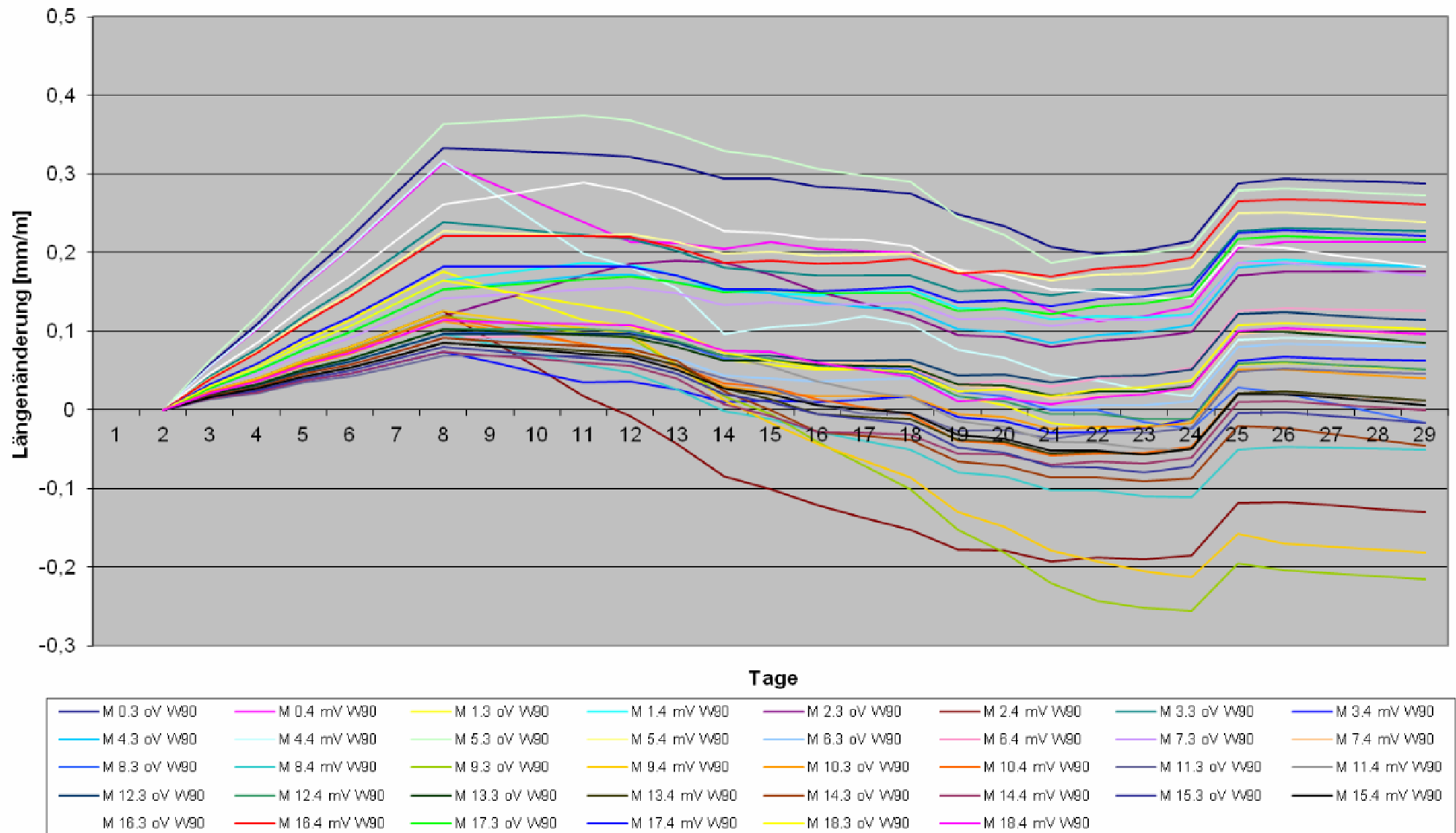
## Längenänderungen W20



Tage

|               |               |               |               |               |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| M 0.1 oV W20  | M 0.2 mV W20  | M 1.1 oV W20  | M 1.2 mV W20  | M 2.1 oV W20  | M 2.2 mV W20  | M 3.1 oV W20  | M 3.2 mV W20  |
| M 4.1 oV W20  | M 4.2 mV W20  | M 5.1 oV W20  | M 5.2 mV W20  | M 6.1 oV W20  | M 6.2 mV W20  | M 7.1 oV W20  | M 7.2 mV W20  |
| M 8.1 oV W20  | M 8.2 mV W20  | M 9.1 oV W20  | M 9.2 mV W20  | M 10.1 oV W20 | M 10.2 mV W20 | M 11.1 oV W20 | M 11.2 mV W20 |
| M 12.1 oV W20 | M 12.2 mV W20 | M 13.1 oV W20 | M 13.2 mV W20 | M 14.1 oV W20 | M 14.2 mV W20 | M 15.1 oV W20 | M 15.2 mV W20 |
| M 16.1 oV W20 | M 16.2 mV W20 | M 17.1 oV W20 | M 17.2 mV W20 | M 18.1 oV W20 | M 18.2 mV W20 |               |               |

## Längenänderungen W90



## Gewichtsmessung Proben M 0 - M 9

|  |                    |
|--|--------------------|
|  | Messwerte          |
|  | Werte interpoliert |
|  | Wochenende Sa, So  |

| L <sub>Kalib,0</sub> | L <sub>Kalib,t</sub> | 1,939 | 1,938 | 1,938 | 1,937 | 1,937 | 1,936 | 1,935 | 1,934 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,932 | 1,934 | 1,933 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,934 | 1,933 | 1,934 | 1,932 | 1,931 | 1,929 | 1,916 | 1,915 | 1,915 | 1,915 | 1,915 |
|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 176,22               | Länge                | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    |
| Probe                | L <sub>0 Prob</sub>  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  |
| M 0.1                | 175,94               | 621,4 | 622,0 | 622,5 | 623,1 | 623,6 | 624,2 | 624,7 | 624,5 | 624,3 | 624,1 | 623,9 | 624,0 | 624,0 | 624,1 | 624,1 | 624,0 | 624,0 | 623,9 | 623,8 | 623,6 | 623,5 | 623,5 | 623,5 | 623,5 | 623,5 | 623,4 | 623,4 | 623,3 |
| M 0.2                | 176,21               | 619,3 | 619,8 | 620,2 | 620,7 | 621,1 | 621,6 | 622,0 | 621,9 | 621,8 | 621,6 | 621,5 | 621,4 | 621,4 | 621,3 | 621,3 | 621,3 | 621,2 | 621,2 | 621,1 | 620,9 | 620,8 | 620,8 | 620,8 | 620,8 | 620,7 | 620,7 | 620,6 | 620,6 |
| M 0.3                | 177,12               | 611,2 | 611,7 | 612,2 | 612,8 | 613,3 | 613,8 | 614,3 | 614,4 | 614,4 | 614,5 | 614,5 | 614,6 | 614,6 | 614,7 | 614,7 | 614,7 | 614,7 | 614,6 | 614,6 | 614,6 | 614,5 | 614,5 | 614,6 | 614,6 | 614,6 | 614,5 | 614,5 | 614,5 |
| M 0.4                | 178,16               | 622,6 | 623,1 | 623,6 | 624,2 | 624,7 | 625,2 | 625,7 | 625,8 | 625,9 | 625,9 | 626,0 | 626,1 | 626,1 | 626,2 | 626,2 | 626,2 | 626,1 | 626,1 | 626,1 | 626,0 | 626,0 | 626,0 | 626,1 | 626,1 | 626,1 | 626,0 | 626,0 | 625,9 |
| M 1.1                | 177,02               | 609,1 | 609,7 | 610,2 | 610,8 | 611,3 | 611,9 | 612,4 | 612,2 | 612,0 | 611,8 | 611,8 | 611,7 | 611,7 | 611,6 | 611,3 | 611,0 | 610,7 | 610,7 | 610,8 | 610,8 | 610,8 | 610,7 | 610,5 | 610,4 | 610,4 | 610,4 | 610,4 | 610,4 |
| M 1.2                | 176,00               | 614,1 | 614,6 | 615,1 | 615,7 | 616,2 | 616,7 | 617,2 | 617,1 | 617,0 | 616,9 | 616,9 | 616,8 | 616,8 | 616,7 | 616,6 | 616,4 | 616,3 | 616,3 | 616,4 | 616,4 | 616,4 | 616,4 | 616,3 | 616,2 | 616,1 | 616,2 | 616,2 | 616,2 |
| M 1.3                | 176,14               | 600,8 | 601,3 | 601,7 | 602,2 | 602,7 | 603,1 | 603,6 | 603,6 | 603,5 | 603,5 | 603,5 | 603,4 | 603,4 | 603,3 | 603,3 | 603,2 | 603,2 | 603,2 | 603,3 | 603,3 | 603,3 | 603,3 | 603,2 | 603,2 | 603,2 | 603,2 | 603,2 |       |
| M 1.4                | 176,20               | 619,7 | 620,1 | 620,5 | 620,9 | 621,3 | 621,7 | 622,1 | 622,0 | 622,0 | 621,9 | 621,9 | 621,9 | 621,8 | 621,8 | 621,8 | 621,7 | 621,7 | 621,7 | 621,8 | 621,8 | 621,8 | 621,8 | 621,7 | 621,7 | 621,7 | 621,7 | 621,7 | 621,7 |
| M 2.1                | 176,47               | 614,5 | 615,0 | 615,4 | 615,9 | 616,4 | 616,8 | 617,3 | 617,2 | 617,2 | 617,1 | 616,8 | 616,4 | 616,1 | 616,0 | 615,9 | 615,8 | 615,7 | 615,6 | 615,6 | 615,5 | 615,5 | 615,5 | 615,5 | 615,5 | 615,5 | 615,4 | 615,4 | 615,3 |
| M 2.2                | 176,50               | 628,7 | 629,2 | 629,7 | 630,3 | 630,8 | 631,3 | 631,8 | 631,7 | 631,7 | 631,6 | 631,2 | 630,9 | 630,5 | 630,4 | 630,3 | 630,2 | 630,1 | 630,1 | 630,1 | 630,0 | 630,0 | 630,0 | 629,9 | 629,9 | 629,9 | 629,9 | 629,9 | 629,9 |
| M 2.3                | 176,22               | 607,4 | 607,9 | 608,5 | 609,0 | 609,5 | 610,1 | 610,6 | 610,5 | 610,5 | 610,4 | 610,2 | 609,9 | 609,7 | 609,7 | 609,6 | 609,6 | 609,5 | 609,5 | 609,4 | 609,4 | 609,4 | 609,5 | 609,5 | 609,5 | 609,4 | 609,4 | 609,3 | 609,3 |
| M 2.4                | 176,38               | 610,2 | 610,8 | 611,3 | 611,9 | 612,4 | 613,0 | 613,5 | 613,4 | 613,4 | 613,3 | 613,1 | 613,0 | 612,8 | 612,8 | 612,7 | 612,7 | 612,6 | 612,6 | 612,5 | 612,5 | 612,5 | 612,5 | 612,5 | 612,5 | 612,5 | 612,4 | 612,4 | 612,4 |
| M 3.1                | 176,17               | 611,9 | 612,2 | 612,5 | 612,8 | 613,1 | 613,4 | 613,7 | 613,4 | 613,2 | 612,9 | 612,9 | 612,8 | 612,8 | 612,5 | 612,3 | 612,3 | 612,0 | 612,0 | 611,9 | 611,9 | 611,8 | 611,8 | 611,7 | 611,7 | 611,7 | 611,6 | 611,6 | 611,6 |
| M 3.2                | 176,72               | 613,0 | 613,4 | 613,8 | 614,2 | 614,5 | 614,9 | 615,3 | 615,0 | 614,7 | 614,4 | 614,4 | 614,4 | 614,3 | 614,3 | 614,0 | 613,8 | 613,5 | 613,5 | 613,4 | 613,4 | 613,3 | 613,3 | 613,2 | 613,2 | 613,2 | 613,1 | 613,1 | 613,1 |
| M 3.3                | 176,12               | 600,2 | 600,5 | 600,7 | 601,0 | 601,2 | 601,5 | 601,7 | 601,6 | 601,6 | 601,5 | 601,5 | 601,5 | 601,4 | 601,4 | 601,4 | 601,4 | 601,4 | 601,4 | 601,3 | 601,3 | 601,2 | 601,2 | 601,1 | 601,1 | 601,1 | 601,2 | 601,2 | 601,2 |
| M 3.4                | 176,01               | 617,9 | 618,1 | 618,3 | 618,6 | 618,8 | 619,0 | 619,2 | 619,1 | 619,1 | 619,0 | 619,0 | 619,0 | 618,9 | 618,9 | 618,9 | 618,8 | 618,8 | 618,8 | 618,7 | 618,7 | 618,6 | 618,6 | 618,5 | 618,5 | 618,6 | 618,6 | 618,6 | 618,6 |
| M 4.1                | 176,01               | 612,8 | 612,2 | 611,5 | 610,9 | 610,3 | 609,6 | 609,0 | 608,7 | 608,4 | 608,1 | 608,0 | 607,9 | 607,8 | 607,7 | 607,7 | 607,6 | 607,6 | 607,5 | 607,5 | 607,4 | 607,4 | 607,3 | 607,3 | 607,3 | 607,3 | 607,3 | 607,3 | 607,3 |
| M 4.2                | 176,40               | 626,5 | 625,9 | 625,3 | 624,7 | 624,1 | 623,5 | 622,9 | 622,6 | 622,3 | 622,0 | 621,9 | 621,8 | 621,7 | 621,6 | 621,6 | 621,5 | 621,5 | 621,4 | 621,4 | 621,3 | 621,3 | 621,2 | 621,2 | 621,2 | 621,2 | 621,2 | 621,2 | 621,2 |
| M 4.3                | 176,25               | 603,0 | 602,3 | 601,7 | 601,0 | 600,3 | 599,7 | 599,0 | 598,9 | 598,9 | 598,8 | 598,8 | 598,8 | 598,8 | 598,8 | 598,8 | 598,8 | 598,7 | 598,7 | 598,7 | 598,6 | 598,6 | 598,5 | 598,5 | 598,5 | 598,6 | 598,6 | 598,6 | 598,6 |
| M 4.4                | 176,73               | 632,9 | 633,4 | 633,9 | 634,5 | 635,0 | 635,5 | 636,0 | 636,0 | 636,0 | 636,0 | 636,0 | 636,0 | 635,9 | 635,9 | 635,8 | 635,8 | 635,7 | 635,7 | 635,6 | 635,6 | 635,5 | 635,5 | 635,5 | 635,5 | 635,5 | 635,5 | 635,5 | 635,5 |
| M 5.1                | 176,16               | 597,7 | 598,7 | 599,6 | 600,6 | 601,6 | 602,5 | 603,5 | 603,4 | 603,2 | 603,1 | 603,1 | 603,1 | 603,1 | 603,0 | 603,0 | 602,9 | 602,8 | 602,8 | 602,7 | 602,7 | 602,7 | 602,6 | 602,6 | 602,6 | 602,6 | 602,5 | 602,5 | 602,5 |
| M 5.2                | 176,22               | 600,8 | 601,7 | 602,6 | 603,5 | 604,3 | 605,2 | 606,1 | 606,0 | 605,8 | 605,7 | 605,7 | 605,7 | 605,7 | 605,6 | 605,6 | 605,5 | 605,4 | 605,4 | 605,3 | 605,3 | 605,2 | 605,2 | 605,1 | 605,1 | 605,1 | 605,0 | 605,0 | 605,0 |
| M 5.3                | 176,11               | 601,2 | 602,2 | 603,2 | 604,2 | 605,1 | 606,1 | 607,1 | 607,0 | 606,9 | 606,9 | 606,9 | 606,9 | 606,9 | 606,8 | 606,8 | 606,7 | 606,6 | 606,6 | 606,5 | 606,5 | 606,5 | 606,5 | 606,5 | 606,5 | 606,5 | 606,4 | 606,4 | 606,4 |
| M 5.4                | 176,15               | 605,4 | 606,4 | 607,4 | 608,4 | 609,3 | 610,3 | 611,3 | 611,2 | 611,2 | 611,1 | 611,1 | 611,1 | 611,1 | 611,1 | 611,0 | 611,0 | 610,9 | 610,8 | 610,8 | 610,7 | 610,7 | 610,7 | 610,7 | 610,7 | 610,6 | 610,6 | 610,5 | 610,4 |
| M 6.1                | 176,20               | 643,1 | 643,5 | 643,9 | 644,4 | 644,8 | 645,2 | 645,6 | 645,5 | 645,5 | 645,4 | 645,2 | 645,1 | 644,9 | 644,7 | 644,6 | 644,6 | 644,5 | 644,5 | 644,4 | 644,4 | 644,4 | 644,3 | 644,2 | 644,2 | 644,1 | 644,1 | 644,0 | 644,0 |
| M 6.2                | 176,28               | 642,4 | 642,8 | 643,2 | 643,6 | 643,9 | 644,3 | 644,7 | 644,6 | 644,6 | 644,5 | 644,4 | 644,3 | 644,1 | 644,0 | 643,9 | 643,9 | 643,8 | 643,8 | 643,7 | 643,7 | 643,6 | 643,5 | 643,4 | 643,3 | 643,3 | 643,2 | 643,2 | 643,2 |
| M 6.3                | 176,23               | 640,8 | 641,3 | 641,8 | 642,3 | 642,8 | 643,3 | 643,8 | 643,7 | 643,7 | 643,6 | 643,6 | 643,5 | 643,5 | 643,4 | 643,4 | 643,3 | 643,3 | 643,3 | 643,2 | 643,2 | 643,1 | 643,0 | 643,0 | 642,9 | 642,9 | 642,8 | 642,8 | 642,8 |
| M 6.4                | 176,25               | 647,7 | 648,2 | 648,8 | 649,3 | 649,8 | 650,4 | 650,9 | 650,8 | 650,8 | 650,7 | 650,7 | 650,7 | 650,6 | 650,6 | 650,5 | 650,5 | 650,4 | 650,4 | 650,3 | 650,3 | 650,2 | 650,1 | 650,0 | 649,9 | 649,9 | 649,9 | 649,8 | 649,8 |
| M 7.1                | 176,06               | 659,4 | 659,9 | 660,4 | 660,9 | 661,3 | 661,8 | 662,3 | 662,2 | 662,2 | 662,1 | 661,9 | 661,7 | 661,4 | 661,2 | 661,1 | 661,1 | 661,0 | 661,0 | 661,0 | 660,9 | 660,9 | 660,8 | 660,7 | 660,6 | 660,6 | 660,5 | 660,5 | 660,5 |
| M 7.2                | 176,12               | 661,1 | 661,6 | 662,0 | 662,5 | 662,9 | 663,4 | 663,8 | 663,7 | 663,7 | 663,6 | 663,5 | 663,4 | 663,3 | 663,2 | 663,1 | 663,1 | 663,0 | 663,0 | 662,9 | 662,9 | 662,8 | 662,7 | 662,5 | 662,4 | 662,4 | 662,3 | 662,3 | 662,3 |
| M 7.3                | 176,30               | 646,7 | 646,4 | 646,2 | 645,9 | 645,6 | 645,4 | 645,1 | 645,0 | 644,9 | 644,9 | 644,9 | 645,0 | 645,0 | 644,9 | 644,9 | 644,8 | 644,8 | 644,7 | 644,7 | 644,6 | 644,5 | 644,3 | 644,2 | 644,2 | 644,2 | 644,1 | 644,1 | 644,1 |
| M 7.4                | 176,09               | 657,5 | 658,0 | 658,6 | 659,1 | 659,6 | 660,2 | 660,7 | 660,6 | 660,6 | 660,5 | 660,5 | 660,5 | 660,4 | 660,4 | 660,3 | 660,3 | 660,2 | 660,1 | 660,1 | 660,0 | 659,9 | 659,9 | 659,8 | 659,8 | 659,7 | 659,7 | 659,7 | 659,7 |
| M 8.1                | 176,31               | 664,8 | 665,4 | 666,0 | 666,6 | 667,1 | 667,7 | 668,3 | 668,2 | 668,2 | 668,1 | 667,9 | 667,8 | 667,6 | 667,4 | 667,3 | 667,3 | 667,2 | 667,2 | 667,1 | 667,1 | 667,0 | 666,9 | 666,9 | 666,8 | 666,8 | 666,7 | 666,7 | 666,7 |
| M 8.2                | 176,38               | 671,8 | 672,4 | 672,9 | 673,5 | 674,0 | 674,6 | 675,1 | 675,0 | 675,0 | 674,9 | 674,8 | 674,7 | 674,5 | 674,4 | 674,3 | 674,3 | 674,2 | 674,2 | 674,1 | 674,1 | 674,0 | 673,9 | 673,8 | 673,7 | 673,7 | 673,6 | 673,6 | 673,6 |
| M 8.3                | 176,35               | 651,9 | 652,5 | 653,1 | 653,7 | 654,2 | 654,8 | 655,4 | 655,3 | 655,3 | 655,2 | 655,2 | 655,3 | 655,3 | 655,3 | 655,2 | 655,2 | 655,1 | 655,1 | 655,0 | 655,0 | 654,9 | 654,8 | 654,7 | 654,6 | 654,6 | 654,5 | 654,5 | 654,5 |
| M 8.4                | 176,33               | 666,9 | 667,6 | 668,4 | 669,1 | 669,8 | 670,6 | 671,3 | 671,2 | 671,2 | 671,1 | 671,1 | 671,2 | 671,2 | 671,2 | 671,1 | 671,1 | 671,0 | 670,9 | 670,9 | 670,8 | 670,6 | 670,4 | 670,2 | 670,2 | 670,1 | 670,1 | 670,1 | 670,1 |
| M 9.1                | 176,15               | 609,3 | 609,7 | 610,1 | 610,5 | 610,9 | 611,3 | 611,7 | 611,7 | 611,6 | 611,6 | 611,5 | 611,4 | 611,3 | 611,2 | 611,1 | 611,1 | 611,0 | 610,9 | 610,8 | 610,8 | 610,7 | 610,5 | 610,3 | 610,1 | 609,9 | 609,9 | 609,8 | 609,8 |
| M 9.2                | 176,20               | 627,5 | 627,6 | 627,6 | 627,7 | 627,7 | 627,8 | 627,8 | 627,8 | 627,7 | 627,7 | 627,6 | 627,5 | 627,5 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

## Gewichtsmessung Proben M 10 - M 18

|  |                    |
|--|--------------------|
|  | Messwerte          |
|  | Werte interpoliert |
|  | Wochenende Sa, So  |

| -Kalib,0 | -Kalib,t            | 1,939 | 1,938 | 1,938 | 1,937 | 1,937 | 1,936 | 1,935 | 1,934 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,932 | 1,934 | 1,933 | 1,933 | 1,932 | 1,931 | 1,934 | 1,933 | 1,934 | 1,320 | 1,931 | 1,929 | 1,916 | 1,915 | 1,915 | 1,915 | 1,915 |       |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 176,22   | Länge               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    |       |
| Probe    | L <sub>0,Prob</sub> | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]  |       |
| M 10.1   | 176,14              | 617,2 | 617,8 | 618,3 | 618,9 | 619,5 | 620,0 | 620,6 | 620,5 | 620,5 | 620,4 | 620,3 | 620,3 | 620,2 | 620,2 | 620,0 | 619,8 | 619,5 | 619,3 | 619,2 | 619,0 | 618,9 | 618,9 | 618,8 | 618,8 | 618,7 | 618,7 | 618,6 | 618,6 |       |
| M 10.2   | 176,26              | 635,5 | 636,0 | 636,5 | 637,1 | 637,6 | 638,1 | 638,6 | 638,5 | 638,5 | 638,4 | 638,3 | 638,3 | 638,2 | 638,2 | 638,0 | 637,8 | 637,5 | 637,3 | 637,1 | 636,9 | 636,7 | 636,7 | 636,6 | 636,6 | 636,5 | 636,5 | 636,4 | 636,4 |       |
| M 10.3   | 177,19              | 607,2 | 607,7 | 608,3 | 608,8 | 609,3 | 609,9 | 610,4 | 610,3 | 610,1 | 610,0 | 609,8 | 609,8 | 609,7 | 609,7 | 609,6 | 609,5 | 609,4 | 609,3 | 609,1 | 609,0 | 608,8 | 608,8 | 608,7 | 608,7 | 608,6 | 608,6 | 608,5 | 608,5 |       |
| M 10.4   | 178,11              | 635,3 | 635,8 | 636,2 | 636,7 | 637,2 | 637,6 | 638,1 | 638,0 | 638,0 | 637,9 | 637,8 | 637,8 | 637,8 | 637,8 | 637,7 | 637,7 | 637,6 | 637,5 | 637,3 | 637,2 | 637,0 | 637,0 | 636,9 | 636,9 | 636,8 | 636,8 | 636,7 | 636,7 |       |
| M 11.1   | 177,09              | 663,1 | 663,6 | 664,1 | 664,6 | 665,0 | 665,5 | 666,0 | 665,9 | 665,9 | 665,8 | 665,5 | 665,3 | 665,0 | 664,9 | 664,9 | 664,8 | 664,7 | 664,6 | 664,5 | 664,4 | 664,3 | 664,2 | 664,1 | 664,1 | 664,0 | 664,0 | 663,9 | 663,9 |       |
| M 11.2   | 176,22              | 666,0 | 666,4 | 666,8 | 667,2 | 667,5 | 667,9 | 668,3 | 668,2 | 668,2 | 668,1 | 668,0 | 668,0 | 667,9 | 667,8 | 667,8 | 667,7 | 667,6 | 667,6 | 667,5 | 667,4 | 667,3 | 667,3 | 667,2 | 667,2 | 667,1 | 667,1 | 667,0 | 667,0 |       |
| M 11.3   | 176,18              | 656,3 | 656,8 | 657,2 | 657,7 | 658,2 | 658,6 | 659,1 | 659,0 | 659,0 | 658,9 | 658,9 | 659,0 | 659,0 | 658,9 | 658,9 | 658,8 | 658,8 | 658,8 | 658,8 | 658,9 | 658,9 | 658,9 | 658,9 | 658,9 | 658,8 | 658,8 | 658,7 | 658,7 |       |
| M 11.4   | 176,27              | 662,3 | 662,9 | 663,4 | 664,0 | 664,5 | 665,1 | 665,6 | 665,5 | 665,5 | 665,4 | 665,4 | 665,4 | 665,4 | 665,3 | 665,3 | 665,2 | 665,2 | 665,2 | 665,2 | 665,2 | 665,2 | 665,2 | 665,2 | 665,1 | 665,1 | 665,0 | 665,0 |       |       |
| M 12.1   | 176,48              | 638,4 | 638,9 | 639,3 | 639,8 | 640,3 | 640,7 | 641,2 | 641,1 | 641,1 | 641,0 | 640,9 | 640,8 | 640,7 | 640,6 | 640,6 | 640,5 | 640,6 | 640,7 | 640,8 | 640,8 | 640,9 | 641,0 | 641,1 | 640,9 | 640,6 | 640,4 | 640,1 | 639,9 |       |
| M 12.2   | 176,55              | 638,2 | 638,7 | 639,2 | 639,7 | 640,2 | 640,7 | 641,2 | 641,1 | 641,1 | 641,0 | 641,0 | 640,9 | 640,9 | 640,8 | 640,8 | 640,7 | 640,7 | 640,6 | 640,6 | 640,5 | 640,5 | 640,4 | 640,4 | 640,4 | 640,3 | 640,3 | 640,2 | 640,2 |       |
| M 12.3   | 176,28              | 642,6 | 643,1 | 643,7 | 644,2 | 644,7 | 645,3 | 645,8 | 645,7 | 645,7 | 645,6 | 645,7 | 645,8 | 645,9 | 645,8 | 645,8 | 645,7 | 645,7 | 645,7 | 645,7 | 645,7 | 645,7 | 645,7 | 645,7 | 645,6 | 645,6 | 645,5 | 645,5 |       |       |
| M 12.4   | 176,31              | 644,3 | 644,8 | 645,4 | 645,9 | 646,4 | 647,0 | 647,5 | 647,4 | 647,4 | 647,3 | 647,3 | 647,4 | 647,4 | 647,3 | 647,3 | 647,2 | 647,2 | 647,2 | 647,2 | 647,2 | 647,2 | 647,2 | 647,2 | 647,1 | 647,1 | 647,0 | 647,0 |       |       |
| M 13.1   | 176,11              | 640,2 | 640,8 | 641,3 | 641,9 | 642,5 | 643,0 | 643,6 | 643,4 | 643,2 | 642,9 | 642,7 | 642,5 | 642,4 | 642,4 | 642,3 | 642,3 | 642,2 | 642,2 | 642,2 | 642,2 | 642,1 | 642,1 | 642,1 | 642,0 | 642,0 | 642,0 | 641,9 | 641,9 |       |
| M 13.2   | 176,77              | 668,8 | 669,3 | 669,7 | 670,2 | 670,6 | 671,1 | 671,5 | 671,4 | 671,3 | 671,2 | 671,1 | 671,0 | 670,9 | 670,9 | 670,8 | 670,7 | 670,7 | 670,6 | 670,6 | 670,5 | 670,5 | 670,4 | 670,4 | 670,3 | 670,3 | 670,3 | 670,2 | 670,2 |       |
| M 13.3   | 176,18              | 641,5 | 642,0 | 642,6 | 643,1 | 643,6 | 644,2 | 644,7 | 644,6 | 644,5 | 644,5 | 644,4 | 644,3 | 644,2 | 644,2 | 644,1 | 644,1 | 644,0 | 644,0 | 644,0 | 644,0 | 643,9 | 643,9 | 643,9 | 643,8 | 643,8 | 643,8 | 643,7 | 643,7 |       |
| M 13.4   | 176,07              | 663,6 | 664,1 | 664,6 | 665,2 | 665,7 | 666,2 | 666,7 | 666,7 | 666,7 | 666,6 | 666,6 | 666,6 | 666,5 | 666,5 | 666,4 | 666,4 | 666,3 | 666,3 | 666,3 | 666,3 | 666,2 | 666,2 | 666,2 | 666,1 | 666,1 | 666,0 | 666,0 |       |       |
| M 14.1   | 176,04              | 648,9 | 649,4 | 649,8 | 650,3 | 650,7 | 651,2 | 651,6 | 651,5 | 651,3 | 651,2 | 651,0 | 650,9 | 650,8 | 650,8 | 650,7 | 650,6 | 650,6 | 650,5 | 650,4 | 650,3 | 650,3 | 650,2 | 650,2 | 650,1 | 650,1 | 650,1 | 650,0 | 650,0 |       |
| M 14.2   | 176,46              | 650,0 | 650,5 | 651,1 | 651,6 | 652,1 | 652,7 | 653,2 | 653,1 | 653,0 | 652,8 | 652,7 | 652,6 | 652,5 | 652,5 | 652,4 | 652,3 | 652,3 | 652,2 | 652,2 | 652,1 | 652,1 | 652,0 | 652,0 | 651,9 | 651,9 | 651,9 | 651,8 | 651,8 |       |
| M 14.3   | 176,29              | 651,3 | 651,9 | 652,4 | 653,0 | 653,5 | 654,1 | 654,6 | 654,5 | 654,4 | 654,4 | 654,3 | 654,3 | 654,2 | 654,2 | 654,1 | 654,1 | 654,0 | 654,0 | 654,0 | 654,0 | 653,9 | 653,9 | 653,9 | 653,8 | 653,8 | 653,7 | 653,7 |       |       |
| M 14.4   | 176,53              | 646,2 | 646,8 | 647,3 | 647,9 | 648,4 | 649,0 | 649,5 | 649,4 | 649,3 | 649,2 | 649,1 | 649,0 | 648,9 | 648,9 | 648,8 | 648,8 | 648,7 | 648,7 | 648,6 | 648,6 | 648,5 | 648,5 | 648,5 | 648,4 | 648,4 | 648,3 | 648,3 |       |       |
| M 15.1   | 176,12              | 656,7 | 657,2 | 657,7 | 658,3 | 658,8 | 659,3 | 659,8 | 659,6 | 659,4 | 659,1 | 658,9 | 658,7 | 658,6 | 658,6 | 658,5 | 658,4 | 658,4 | 658,3 | 658,3 | 658,2 | 658,2 | 658,1 | 658,1 | 658,0 | 658,0 | 657,9 | 657,9 |       |       |
| M 15.2   | 176,27              | 672,7 | 673,2 | 673,8 | 674,3 | 674,8 | 675,4 | 675,9 | 675,7 | 675,5 | 675,4 | 675,2 | 675,0 | 674,9 | 674,9 | 674,8 | 674,8 | 674,7 | 674,7 | 674,6 | 674,6 | 674,5 | 674,5 | 674,4 | 674,4 | 674,3 | 674,3 |       |       |       |
| M 15.3   | 176,18              | 661,1 | 661,6 | 662,1 | 662,6 | 663,0 | 663,5 | 664,0 | 663,3 | 662,6 | 661,9 | 661,2 | 660,5 | 660,4 | 660,4 | 660,3 | 660,3 | 660,2 | 660,2 | 660,1 | 660,1 | 660,0 | 660,0 | 660,0 | 659,9 | 659,9 | 659,9 | 659,8 | 659,8 |       |
| M 15.4   | 176,19              | 658,3 | 658,8 | 659,3 | 659,8 | 660,2 | 660,7 | 661,2 | 661,6 | 662,1 | 662,5 | 663,0 | 663,4 | 663,3 | 663,3 | 663,2 | 663,2 | 663,1 | 663,1 | 663,1 | 663,1 | 663,0 | 663,0 | 662,9 | 662,9 | 662,9 | 662,8 | 662,8 | 662,7 | 662,7 |
| M 16.1   | 176,27              | 660,4 | 660,9 | 661,5 | 662,0 | 662,5 | 663,1 | 663,6 | 663,5 | 663,5 | 663,4 | 663,3 | 663,2 | 663,1 | 663,1 | 663,1 | 663,1 | 663,1 | 663,0 | 663,0 | 663,0 | 663,0 | 662,9 | 662,9 | 662,9 | 662,8 | 662,8 | 662,7 | 662,7 |       |
| M 16.2   | 176,21              | 657,7 | 658,2 | 658,7 | 659,2 | 659,6 | 660,1 | 660,6 | 660,5 | 660,5 | 660,4 | 660,3 | 660,2 | 660,1 | 660,1 | 660,1 | 660,1 | 660,1 | 660,1 | 660,1 | 660,0 | 660,0 | 660,0 | 660,0 | 659,9 | 659,9 | 659,8 | 659,8 |       |       |
| M 16.3   | 176,29              | 653,5 | 654,0 | 654,6 | 655,1 | 655,6 | 656,2 | 656,7 | 656,6 | 656,6 | 656,5 | 656,4 | 656,4 | 656,3 | 656,3 | 656,3 | 656,3 | 656,2 | 656,2 | 656,2 | 656,2 | 656,1 | 656,1 | 656,1 | 656,0 | 656,0 | 655,9 | 655,9 |       |       |
| M 16.4   | 176,25              | 673,1 | 673,6 | 674,2 | 674,7 | 675,2 | 675,8 | 676,3 | 676,2 | 676,2 | 676,1 | 676,1 | 676,1 | 676,1 | 676,1 | 676,1 | 676,1 | 676,1 | 676,0 | 676,0 | 676,0 | 676,0 | 675,9 | 675,9 | 675,8 | 675,8 | 675,7 | 675,7 |       |       |
| M 17.1   | 176,02              | 673,6 | 674,1 | 674,6 | 675,2 | 675,7 | 676,2 | 676,7 | 676,6 | 676,5 | 676,4 | 676,3 | 676,2 | 676,1 | 676,0 | 675,9 | 675,9 | 675,8 | 675,7 | 675,7 | 675,6 | 675,6 | 675,6 | 675,6 | 675,5 | 675,5 | 675,5 | 675,5 |       |       |
| M 17.2   | 176,17              | 669,4 | 669,9 | 670,5 | 671,0 | 671,5 | 672,1 | 672,6 | 672,5 | 672,4 | 672,3 | 672,3 | 672,2 | 672,1 | 672,0 | 671,9 | 671,9 | 671,8 | 671,7 | 671,7 | 671,6 | 671,6 | 671,6 | 671,5 | 671,5 | 671,5 | 671,4 | 671,4 |       |       |
| M 17.3   | 176,34              | 665,0 | 665,6 | 666,2 | 666,8 | 667,4 | 668,0 | 668,6 | 668,5 | 668,4 | 668,3 | 668,3 | 668,2 | 668,1 | 668,0 | 667,9 | 667,9 | 667,8 | 667,7 | 667,7 | 667,6 | 667,6 | 667,5 | 667,5 | 667,4 | 667,4 | 667,3 | 667,3 |       |       |
| M 17.4   | 176,19              | 653,0 | 653,5 | 654,0 | 654,6 | 655,1 | 655,6 | 656,1 | 656,0 | 655,9 | 655,8 | 655,8 | 655,7 | 655,6 | 655,5 | 655,4 | 655,4 | 655,3 | 655,2 | 655,2 | 655,1 | 655,1 | 655,0 | 654,9 | 654,9 | 654,8 | 654,8 | 654,7 | 654,7 |       |
| M 18.1   | 176,36              | 664,3 | 664,8 | 665,4 | 665,9 | 666,4 | 667,0 | 667,5 | 667,4 | 667,3 | 667,2 | 667,2 | 667,1 | 667,0 | 666,9 | 666,8 | 666,8 | 666,7 | 666,6 | 666,6 | 666,5 | 666,5 | 666,4 | 666,4 | 666,3 | 666,3 | 666,2 | 666,2 | 666,1 |       |
| M 18.2   | 176,33              | 664,6 | 665,1 | 665,7 | 666,2 | 666,7 | 667,3 | 667,8 | 667,7 | 667,6 | 667,5 | 667,4 | 667,3 | 667,2 | 667,1 | 667,0 | 667,0 | 666,9 | 666,8 | 666,8 | 666,8 | 666,7 | 666,7 | 666,7 | 666,6 | 666,6 |       |       |       |       |

## 11. Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit des W/Z-Wertes [10].....                                                                 | 1  |
| Abbildung 2: Aufbau der Diplomarbeit .....                                                                                                 | 3  |
| Abbildung 3: Mikrostruktur von Normalbeton, HPC und UHPC [4].....                                                                          | 5  |
| Abbildung 4: Größenunterschied Zement und Microsilika [4].....                                                                             | 8  |
| Abbildung 5: Ausgangsstoffe für Beton .....                                                                                                | 9  |
| Abbildung 6: Gesamtwasserzugabe [9] .....                                                                                                  | 12 |
| Abbildung 7: Hydratation von Normabeton [13] .....                                                                                         | 15 |
| Abbildung 8: Hydratation von UHPC [13].....                                                                                                | 16 |
| Abbildung 9: Rissbildung im Beton mit und ohne Faser [11].....                                                                             | 20 |
| Abbildung 10: Unterschiedliche Fasertypen [23].....                                                                                        | 21 |
| Abbildung 11: Einbindung einer Faser gleicher Länge im normalen Beton (links) und<br>im UHPC (rechts) [11] .....                           | 23 |
| Abbildung 12: Einwandige Kohlenstoffnanoröhre und mehrwandige<br>Kohlenstoffnanoröhre [54] .....                                           | 27 |
| Abbildung 13: Last-Durchbiegungsdiagramm [64] .....                                                                                        | 31 |
| Abbildung 14: Vergleich der Porenradienverteilung verschiedener Betone [38].....                                                           | 38 |
| Abbildung 15: Bruchenergie und Biegezugfestigkeit verschiedener Materialien [40]                                                           | 43 |
| Abbildung 16: UHPC „x-shaped“ – Querschnitt verglichen mit einem I-Profil aus Stahl<br>[11].....                                           | 45 |
| Abbildung 17: Vergleich verschiedener Betonquerschnitte aus verschiedenen<br>Materialien [11].....                                         | 46 |
| Abbildung 18: Sherbrooke Bridge, Kanada [29].....                                                                                          | 47 |
| Abbildung 19: Seonyu Footbridge, Seoul, Korea [23] .....                                                                                   | 48 |
| Abbildung 20: Betonprobewürfel für das Beschießen mit Hochgeschwindigkeits-<br>projektilen [11].....                                       | 52 |
| Abbildung 21: Zerstörungsgrad der Probewürfel nach dem Beschuss [11]; linkes Bild:<br>Normalbeton, rechtes Bild: HPSRFC.....               | 53 |
| Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Eirich-Intensivmischers .....                                                                 | 58 |
| Abbildung 23: Vakuum-Kompaktanlage (Fa Sterling, Typ: PL 26 M.A.M 15 0.0A) und<br>Eirich-Intensivmischer (Typ: R 02/VC, Baujahr 2008)..... | 61 |
| Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Unterdruck und Temperatur [32] .....                                                                   | 62 |
| Abbildung 25: Abwägen des gefüllten Luftporenbehälters .....                                                                               | 68 |
| Abbildung 26: Luftporentopf und Verschlussdeckel zur Bestimmung des Luftgehalts<br>im Frischbeton.....                                     | 69 |
| Abbildung 27: Ausbreittisch mit Setztrichter zur Ermittlung des Ausbreitmaßes .....                                                        | 70 |
| Abbildung 28: Ausbreitplatte mit Setztrichter zur Ermittlung des Setzfließmaßes .....                                                      | 71 |
| Abbildung 29: 3 Schalungen für 3 Probekörper mit den Abmessungen 40x40x160<br>mm.....                                                      | 72 |
| Abbildung 30: Prüfmaschine Zwick 250Z nach ÖNORM EN 196-1                                                                                  | 74 |
| Abbildung 31: Drei-Punkt-Lastverfahren                                                                                                     | 74 |
| Abbildung 32: Prüfmaschine TONI Technik Modell 2040.....                                                                                   | 74 |
| Abbildung 33: Druckversuch nach ÖNORM EN 196-1.....                                                                                        | 74 |
| Abbildung 34: Spaltzugversuch nach ÖNORM EN 12390-6 .....                                                                                  | 76 |
| Abbildung 35: Schema für Belastungszyklus für den statischen Elastizitätsmodul<br>gemäß ÖNORM B 3303 [63] .....                            | 78 |
| Abbildung 36: E-Modulprüfung auf Prüfmaschine TONI Technik.....                                                                            | 79 |
| Abbildung 37: linkes Bild: Prüfkörper mit Messzapfen, rechtes Bild: Referenzstab...                                                        | 80 |
| Abbildung 38: linkes Bild: Messvorrichtung mit Referenzstab, rechtes Bild:<br>Messvorrichtung mit Prüfkörper.....                          | 80 |

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 39: Lagerungsbedingungen der Schwindversuche .....                                                                                                                      | 81  |
| Abbildung 40: Mischreihenfolge und eingebrachte Mischleistung im Intensivmischer<br>R08 Vac, UHPC mit Fasercocktail 2,5 Vol.-% Stahlfasern und 0,3 Vol.-% PP-<br>Fasern [32]..... | 84  |
| Abbildung 41: Hybrider Mischablauf [59] .....                                                                                                                                     | 85  |
| Abbildung 42: Einfluss der Mischdauer [59].....                                                                                                                                   | 90  |
| Abbildung 43: Biegezugfestigkeitsverlauf für VV_7.1 und VV_7.2 .....                                                                                                              | 106 |
| Abbildung 44: Biegezugfestigkeitsverlauf für VV_7.3 und VV_7.4 .....                                                                                                              | 106 |
| Abbildung 45: Druckfestigkeitsverlauf für VV_7.1 und VV_7.2.....                                                                                                                  | 107 |
| Abbildung 46: Druckfestigkeitsverlauf für VV_7.3 und VV_7.4.....                                                                                                                  | 108 |
| Abbildung 47: Frischbetoneigenschaften Mischung M 0.....                                                                                                                          | 119 |
| Abbildung 48: Vergleich Frisch- und Festbetonrohddichte Mischung M0.....                                                                                                          | 119 |
| Abbildung 49: Biegezugfestigkeiten Mischung M0.....                                                                                                                               | 120 |
| Abbildung 50: Druckfestigkeiten Mischung M0 .....                                                                                                                                 | 121 |
| Abbildung 51: Spaltzugfestigkeiten Mischung M0.....                                                                                                                               | 122 |
| Abbildung 52: Glasfaser mit 12mm Länge.....                                                                                                                                       | 123 |
| Abbildung 53: Biegezugfestigkeiten Mischung M 1.....                                                                                                                              | 125 |
| Abbildung 54: Druckfestigkeiten Mischung M 1 .....                                                                                                                                | 125 |
| Abbildung 55: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 1.....                                                                                                                              | 126 |
| Abbildung 56: Biegezugfestigkeiten Mischung M 2.....                                                                                                                              | 128 |
| Abbildung 57: Druckfestigkeiten Mischung M 2 .....                                                                                                                                | 128 |
| Abbildung 58: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 2.....                                                                                                                              | 129 |
| Abbildung 59: Basaltfaser 6mm.....                                                                                                                                                | 130 |
| Abbildung 60: Biegezugfestigkeiten Mischung M 3.....                                                                                                                              | 132 |
| Abbildung 61: Druckfestigkeiten Mischung M 3 .....                                                                                                                                | 132 |
| Abbildung 62: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 3.....                                                                                                                              | 133 |
| Abbildung 63: Basaltfaser 12 mm.....                                                                                                                                              | 134 |
| Abbildung 64: Biegezugfestigkeiten Mischung M 4.....                                                                                                                              | 135 |
| Abbildung 65: Druckfestigkeiten Mischung M 4 .....                                                                                                                                | 136 |
| Abbildung 66: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 4.....                                                                                                                              | 137 |
| Abbildung 67: Polyvinylalkoholfaser 6 mm .....                                                                                                                                    | 138 |
| Abbildung 68: Biegezugfestigkeiten Mischung M 5.....                                                                                                                              | 140 |
| Abbildung 69: Druckfestigkeiten Mischung M 5 .....                                                                                                                                | 140 |
| Abbildung 70: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 5.....                                                                                                                              | 141 |
| Abbildung 71: Stahlfaser 6 mm .....                                                                                                                                               | 142 |
| Abbildung 72: Biegezugfestigkeiten Mischung M 6.....                                                                                                                              | 144 |
| Abbildung 73: Druckfestigkeiten Mischung M 6 .....                                                                                                                                | 144 |
| Abbildung 74: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 6.....                                                                                                                              | 145 |
| Abbildung 75: Stahlfaser 12 mm .....                                                                                                                                              | 146 |
| Abbildung 76: Biegezugfestigkeiten Mischung M 7.....                                                                                                                              | 148 |
| Abbildung 77: Druckfestigkeiten Mischung M 7 .....                                                                                                                                | 148 |
| Abbildung 78: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 7.....                                                                                                                              | 149 |
| Abbildung 79: Biegezugfestigkeiten Mischung M 8.....                                                                                                                              | 151 |
| Abbildung 80: Druckfestigkeiten Mischung M 8 .....                                                                                                                                | 152 |
| Abbildung 81: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 8.....                                                                                                                              | 153 |
| Abbildung 82: linkes Bild: CNT-Behälter; rechtes Bild: CNT mit 0,5 g.....                                                                                                         | 154 |
| Abbildung 83: Aufbereitung der CNTs mittels Ultraschalgerät .....                                                                                                                 | 154 |
| Abbildung 84: Biegezugfestigkeiten Mischung M 9.....                                                                                                                              | 156 |
| Abbildung 85: Druckfestigkeiten Mischung M 9 .....                                                                                                                                | 157 |
| Abbildung 86: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 9.....                                                                                                                              | 158 |
| Abbildung 87: Carbon-Nanotubes 1,0 g.....                                                                                                                                         | 159 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 88: Biegezugfestigkeiten Mischung M 10.....                                             | 160 |
| Abbildung 89: Druckfestigkeiten Mischung M 10 .....                                               | 161 |
| Abbildung 90: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 10.....                                             | 161 |
| Abbildung 91: Biegezugfestigkeiten Mischung M 11.....                                             | 163 |
| Abbildung 92: Druckfestigkeiten Mischung M 11 .....                                               | 164 |
| Abbildung 93: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 11.....                                             | 164 |
| Abbildung 94: Biegezugfestigkeiten Mischung M 12.....                                             | 166 |
| Abbildung 95: Druckfestigkeiten Mischung M 12 .....                                               | 167 |
| Abbildung 96: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 12.....                                             | 168 |
| Abbildung 97: Polypropylenfasern 6 mm .....                                                       | 169 |
| Abbildung 98: Biegezugfestigkeiten Mischung M 13.....                                             | 170 |
| Abbildung 99: Druckfestigkeiten Mischung M 13 .....                                               | 171 |
| Abbildung 100: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 13.....                                            | 172 |
| Abbildung 101: Biegezugfestigkeiten Mischung M 14.....                                            | 174 |
| Abbildung 102: Druckfestigkeiten Mischung M 14 .....                                              | 174 |
| Abbildung 103: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 14.....                                            | 175 |
| Abbildung 104: Biegezugfestigkeiten Mischung M 15.....                                            | 177 |
| Abbildung 105: Druckfestigkeiten Mischung M 15 .....                                              | 178 |
| Abbildung 106: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 15.....                                            | 178 |
| Abbildung 107: Stahlfaser 6 mm und 0,175 mm Durchmesser .....                                     | 179 |
| Abbildung 108: Biegezugfestigkeiten Mischung M 16.....                                            | 180 |
| Abbildung 109: Druckfestigkeiten Mischung M 16 .....                                              | 181 |
| Abbildung 110: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 16.....                                            | 182 |
| Abbildung 111: Biegezugfestigkeiten Mischung M 17 .....                                           | 183 |
| Abbildung 112: Druckfestigkeiten Mischung M 17 .....                                              | 184 |
| Abbildung 113: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 17.....                                            | 185 |
| Abbildung 114: Biegezugfestigkeiten Mischung M 18.....                                            | 186 |
| Abbildung 115: Druckfestigkeiten Mischung M 18 .....                                              | 187 |
| Abbildung 116: Spaltzugfestigkeiten Mischung M 18.....                                            | 188 |
| Abbildung 117: Ausbreitmaße der Mischungen M 0 - M 9 .....                                        | 189 |
| Abbildung 118: Ausbreitmaße der Mischungen M 0, M 10 - M 18 .....                                 | 190 |
| Abbildung 119: Luftporengehalte der Mischungen M 0 - M 9.....                                     | 192 |
| Abbildung 120: Luftporengehalte der Mischungen M 0, M 10 - M 18.....                              | 192 |
| Abbildung 121: Frischbetonrohrichten der Mischungen M 0 - M 9 .....                               | 194 |
| Abbildung 122: Frischbetonrohrichten der Mischungen M 0, M 10 - M 18 .....                        | 194 |
| Abbildung 123: Festbetonrohrichten aller Proben mit 20°C Wasserlagerung.....                      | 196 |
| Abbildung 124: Festbetonrohrichten aller Proben mit Heißwasserlagerung .....                      | 197 |
| Abbildung 125: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit 20°C Wasserlagerung .....            | 198 |
| Abbildung 126: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit 20°C Wasserlagerung .....     | 198 |
| Abbildung 127: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit Heißwasserlagerung .....             | 200 |
| Abbildung 128: Biegezugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit Heißwasserlagerung .....      | 201 |
| Abbildung 129: Stahlfaserprobe nach dem Biegezugversuch.....                                      | 202 |
| Abbildung 130: Biegezugfestigkeitsverlauf von 6 ausgewählten Proben mit 20°C Wasserlagerung ..... | 203 |
| Abbildung 131: Biegezugfestigkeitsverlauf von 6 ausgewählten Proben mit Heißwasserlagerung .....  | 204 |
| Abbildung 132: Druckfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit 20°C Wasserlagerung .....               | 205 |

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 133: Druckfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit 20°C<br>Wasserlagerung .....                                                                              | 206 |
| Abbildung 134: Druckfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit Heißwasserlagerung ..                                                                                            | 207 |
| Abbildung 135: Druckfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit<br>Heißwasserlagerung .....                                                                               | 207 |
| Abbildung 136: Druckfestigkeitsverläufe von 6 ausgewählten Proben mit 20°C<br>Wasserlagerung .....                                                                         | 209 |
| Abbildung 137: Druckfestigkeitsverläufe von 6 ausgewählten Proben mit<br>Heißwasserlagerung .....                                                                          | 210 |
| Abbildung 138: Zwei Stahlfaser Bruchhälften nach dem Druckversuch .....                                                                                                    | 211 |
| Abbildung 139: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit 20°C Wasserlagerung<br>.....                                                                                  | 212 |
| Abbildung 140: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit 20°C<br>Wasserlagerung .....                                                                           | 213 |
| Abbildung 141: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0 - M 9 mit Heißwasserlagerung<br>.....                                                                                   | 214 |
| Abbildung 142: Spaltzugfestigkeiten der Proben M 0, M 10 - M 18 mit<br>Heißwasserlagerung .....                                                                            | 215 |
| Abbildung 143: Vier Spaltzugbruchhälften, linkes Bild: Basaltfaserprobe ohne/mit<br>Vakuumbehandlung, rechtes Bild: Stahlfaserprobe ohne und mit<br>Vakuumbehandlung ..... | 216 |
| Abbildung 144: E-Modulwerte der Proben mit 20 °C Wasserlagerung .....                                                                                                      | 217 |
| Abbildung 145: E-Modulwerte der Proben mit Heißwasserlagerung .....                                                                                                        | 219 |
| Abbildung 146: Längenänderungen aller Proben mit 20°C Wasserlagerung .....                                                                                                 | 221 |
| Abbildung 147: Längenänderungen aller Proben mit Heißwasserlagerung .....                                                                                                  | 222 |
| Abbildung 148: Verlauf der Längenänderungen von 2 ausgewählten Proben .....                                                                                                | 223 |

## 12. Tabellenverzeichnis

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Klinkerphasen [5] .....                                                | 10 |
| Tabelle 2: Zusatzmittel für Beton [16] .....                                      | 17 |
| Tabelle 3: Faserarten und Kennwerte [23] .....                                    | 19 |
| Tabelle 4: Gängigsten Stahl- und Kunststofffasern [23] .....                      | 20 |
| Tabelle 5: Einige Eigenschaften von Carbon-Nanotubes [52] [53] .....              | 28 |
| Tabelle 6: Luftdurchlässigkeit verschiedener Betone [41] .....                    | 43 |
| Tabelle 7: Maximale Bauhöhe [23] .....                                            | 50 |
| Tabelle 8: Einteilung der Hydratation in Phasen [26] .....                        | 54 |
| Tabelle 9: Kenngrößen verschiedener Vakua [30] .....                              | 60 |
| Tabelle 10: Überblick über die Ausgangsstoffe .....                               | 65 |
| Tabelle 11: Überblick über den Mischprozess .....                                 | 66 |
| Tabelle 12: Verschiedene Mischreihenfolgen des Mischprozesses 1 [32] .....        | 83 |
| Tabelle 13: Mischreihenfolge für Intensivmischer mit Vakuum-Peripherie [32] ..... | 83 |
| Tabelle 14: Mischreihenfolgen der 3 Mischprozesse .....                           | 86 |
| Tabelle 15: Verwendete Materialien Vorversuch 1 .....                             | 86 |
| Tabelle 16: Frischbetoneigenschaften Vorversuch 1 .....                           | 87 |
| Tabelle 17: Festigkeiten des Vorversuchs 1 .....                                  | 88 |
| Tabelle 18: Ausgangsstoffe und deren Massenanteile für den Vorversuch 2 .....     | 92 |
| Tabelle 19: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 2 .....                      | 93 |
| Tabelle 20: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 2 .....               | 94 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 21: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 3 .....                                     | 95  |
| Tabelle 22: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 3.....                               | 96  |
| Tabelle 23: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 3 .....                       | 96  |
| Tabelle 24: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 4 .....                                     | 98  |
| Tabelle 25: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 4.....                               | 98  |
| Tabelle 26: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 4 .....                       | 98  |
| Tabelle 27: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 5 .....                                     | 100 |
| Tabelle 28: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 5.....                               | 100 |
| Tabelle 29: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 5 .....                       | 101 |
| Tabelle 30: Ausgangsstoffe für den Vorversuch 6 .....                                     | 103 |
| Tabelle 31: Frischbetoneigenschaften des Vorversuchs 6.....                               | 103 |
| Tabelle 32: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Vorversuchs 6 .....                       | 103 |
| Tabelle 33: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten des Vorversuchs 7 .....             | 105 |
| Tabelle 34: Ausgangsstoffe für die Versuche T 1 bis T 4.....                              | 109 |
| Tabelle 35: Ausgangsstoffe für die Versuche T 5 bis T 7.....                              | 109 |
| Tabelle 36: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten der Versuchsreihe T 1 bis T 7 ..... | 109 |
| Tabelle 37: Ausgangsstoffe für die Hauptversuche .....                                    | 114 |
| Tabelle 38: Verwendete Fasern für die Hauptversuche .....                                 | 114 |
| Tabelle 39: Mischreihenfolge der Hauptversuche.....                                       | 115 |
| Tabelle 40: Überblick über die Hauptversuche .....                                        | 117 |
| Tabelle 41: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M0 .....                   | 118 |
| Tabelle 42: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M1 .....                   | 123 |
| Tabelle 43: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 2 .....                  | 127 |
| Tabelle 44: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 3 .....                  | 131 |
| Tabelle 45: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 4 .....                  | 134 |
| Tabelle 46: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 5 .....                  | 138 |
| Tabelle 47: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 6 .....                  | 142 |
| Tabelle 48: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 7 .....                  | 147 |
| Tabelle 49: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 8 .....                  | 150 |
| Tabelle 50: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 9 .....                  | 155 |
| Tabelle 51: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 10 .....                 | 159 |
| Tabelle 52: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 11 .....                 | 162 |
| Tabelle 53: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 12 .....                 | 166 |
| Tabelle 54: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 13 .....                 | 169 |
| Tabelle 55: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 14 .....                 | 173 |
| Tabelle 56: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 15 .....                 | 176 |
| Tabelle 57: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 16 .....                 | 180 |
| Tabelle 58: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 17 .....                 | 183 |
| Tabelle 59: Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten Mischung M 18 .....                 | 186 |

## 13. Gleichungsverzeichnis

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Formel 1: Wasser-Zement-Wert .....                         | 6  |
| Formel 2: Wasser-Bindemittel-Wert.....                     | 7  |
| Formel 3: Fullerkurve [11] .....                           | 13 |
| Formel 4: modifizierte Fullerkurve [11] .....              | 13 |
| Formel 5: Bruchenergie [64] .....                          | 32 |
| Formel 6: Maximale Höhe, Aus der Spannungsformel [23]..... | 49 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Formel 7: Chemische Reaktion von $C_3S$ und $C_2S$ .....                                      | 56 |
| Formel 8: Chemische Reaktion von $C_3A$ und $C_4(A,F)$ .....                                  | 56 |
| Formel 9: Hydratationsgrad, Berechnung über die Festigkeit .....                              | 57 |
| Formel 10: Hydratationsgrad, Berechnung über die Wärmefreisetzung.....                        | 57 |
| Formel 11: Hydratationsgrad, Berechnung über die Menge an chemisch<br>gebundenem Wasser ..... | 57 |
| Formel 12: Rohdichte des Frischbetons .....                                                   | 67 |
| Formel 13: Rohdichte .....                                                                    | 73 |
| Formel 14: Biegezugfestigkeit .....                                                           | 73 |
| Formel 15: Druckfestigkeit.....                                                               | 75 |
| Formel 16: Spaltzugfestigkeit .....                                                           | 76 |
| Formel 17: E-Modul Bestimmung [63] .....                                                      | 77 |
| Formel 18: Längenänderung bezogen auf die Zeit [62] .....                                     | 81 |

## 14. Literaturverzeichnis

- [1] Kolleger Johann, Betonbau Stahlbau, IV. Auflage, S. 1.1-1.5, September 2005
- [2] Horvath Johannes, Beiträge zum Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, Dissertation TU Wien, 2003
- [3] Horvath Johannes, Entwicklung von hochfesten Blähglasbeton, Diplomarbeit TU Wien, 1998
- [4] Lins Michael, Verhalten von Ultrahochfesten Beton unter Brandbeanspruchung, Diplomarbeit TU Wien, 2004
- [5] Schneider Ulrich, Wiener Baustofflehre Blätter – Bindemittel, TU Wien, Institut 206, 12. Auflage, 2003
- [6] Spanka G., Thielen G., Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Betonzusatzmittel und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten, Beton, Heft 5, S. 320-327, 1995
- [7] Thielen G., Spanka G., Grube H., Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel, Beton, Heft 11, S. 802-808, 1995
- [8] Härig Siegfried, Klausen Dietmar, Hoscheid Rudolf, Technologie der Baustoffe, 14. Auflage, C. F. Verlag, Heidelberg 2003
- [9] Richter Thomas, Hochfester Beton – Hochleistungsbeton, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf 1999
- [10] Horvath Johannes, Beiträge zum Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, Dissertation TU Wien 2003
- [11] Schneider Ulrich, Horvath Johannes, Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Heft 8, Wien 2003
- [12] Berger Mathias, Einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften Ultrahochfester Betone, Diplomarbeit TU Wien, 2008
- [13] Schneider Ulrich, Horvath Johannes, Wiener Baustofflehre Blätter – Sondergebiete der Werkstoffe im Bauwesen, 1. Auflage, TU Wien, Institut 206, 2003
- [14] Ebeling K., Knopp W., Pickhardt R., Beton – Herstellung nach Norm, Verlag Bau und Technik, Köln, 2002
- [15] Härig Siegfried, Klausen Dietmar, Hoscheid Rudolf, Technologie der Baustoffe, 14. Auflage, C. F. Verlag, Heidelberg 2003

- [16] Zement Merkblatt Betontechnik B3 Betonzusätze – Zusatzmittel und Zusatzstoffe, Herausgeber: Verein deutscher Zementwerke, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2005
- [17] Schneider Ulrich, Horvath Johannes, Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Heft 8, S. 12-15, Wien 2003
- [18] Schrimpf M., Lietzmann M., Orgass M, Dehn F., Stabilisierende Wirkung von Mikrosilika auf SVB, 2002
- [19] [www.cemex.de/bauchemie/betonzusatzmittel](http://www.cemex.de/bauchemie/betonzusatzmittel) 14. 12. 2009
- [20] Gay M., Kleen E., Zusatzmittel für Ultrahochleistungsbeton, Berlin 2003
- [21] Held M., Ein Beitrag zur Herstellung und Bemessung von Druckgliedern aus hochfesten Normalbeton, Dissertation TH Darmstadt, 1992
- [22] Kützing Lars, Duktiler Hochleistungsbeton mit Pilotanwendungen, Leipziger Massivbau Seminar, Band 10, Kap II, Leipzig, 2000
- [23] Rummelin Andreas Timo, Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen, Diplomarbeit FH Stuttgart, 2005
- [24] Hilsdorf H. K., Brameshuber W., Faserbewehrter Mörtel und Beton – Theoretische Grundlagen, Technische Akademie Esslingen
- [25] Naaman Antoine, Fasern mit verbesserter Haftung, Beton und Stahlbetonbau, Heft 4, 2000
- [26] Stark J., Möser B., Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff, Basel 2000
- [27] Thomas A., Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, S. 9, 2006
- [28] Berger Mathias, Einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften Ultrahochfester Betone, Diplomarbeit TU Wien, 2008
- [29] Safranek Karin, Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone, Diplomarbeit TU Wien, 2007
- [30] Wikipedia Vakuum: <http://de.wikipedia.org/wiki/vakuum> 21. 07. 2010
- [31] <http://de.wikipedia.org/wiki/Fl%C3%BCssigkeitsringpumpe>
- [32] Schachinger A., Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 57, 2007
- [33] Schneider Ulrich, Sonderkapitel der Baustofflehre Hochfester Beton, Wiener Baustofflehre Blätter, TU Wien, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Wien, 1998

- [34] Homepage der Fa. Eirich: <http://www.eirich.de> 24. 07. 2010
- [35] Betontechnologen Symposium, Mischen – Steuern – Protokollieren, Heft 5, 2005
- [36] Pfeiler Andreas, Auswirkungen der Nachbehandlung bei höheren Temperaturen auf die Dauerfestigkeit von Reactive Powder Concrete, Diplomarbeit TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Wien, 2000
- [37] Dreyer Jürgen, Bauphysikalische Schadensprozesse, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik, TU Wien, 1999
- [38] Fehling E., Schmidt M., Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Beton, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, Kassel University Press GmbH, Kassel 2005
- [39] Maidl Bernhard, Stahlfaserbeton, Verlag für Architekten und technische Wissenschaften, Berlin 1991
- [40] Cheyrezy M., Behloul M., Dowd W., Dauriac C., Reactive Powder Concrete Application for Seismic Design, American Concrete Institute Convention, October 29, 1998
- [41] Roux N., Andrade M., Sanujan A., Experimental Study of Reactive Powder Concrete, Journals of Materials in Civil Engineering, February 1996
- [42] Schneider Ulrich, Bausanierung, Wiener Baustofflehre Blätter, TU Wien, Schriftenreihe des Instituts für Hochbau und Technologie, 5. Auflage, Wien, 2005
- [43] Sherbrook Bridge Daten  
[http://www.spp1182.de/download/schi253\\_38/20081014\\_Schi253-38V.pdf](http://www.spp1182.de/download/schi253_38/20081014_Schi253-38V.pdf)  
[http://de.wikipedia.org/wiki/ultrahochfester\\_beton](http://de.wikipedia.org/wiki/ultrahochfester_beton) 20. 08. 2011
- [44] Zielinski Krzysztof, Untersuchungen zu Basaltfasern als Faserbewehrung, TU Poznan, Poznan 2005
- [45] Schießl P., Ultrahochfester Beton, Skriptum zur Vertiefungsvorlesung Bauingenieurwesen Grundfachvorlesung Baustoffingenieurwesen des Fachs Baustoffkunde, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU München, München 2005
- [46] Schachinger I., Untersuchungen an Hochleistungs – Feinkorn Beton, 38. Forschungskolloquium des DAfStb, Tu München, 2000

- [47] König G., Zink M., Hochleistungsbeton – Bemessung und Anwendung, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001
- [48] König R., Wagner J. P., Microsilika, Handbuch der Firma Woermann
- [49] Bornemann R., Schmidt M., Brandverhalten von ultrahochfesten Betonen, Beton Jg 52, 2002
- [50] BASF Construction Polymers GmbH, Technisches Merkblatt – Wirkung von Fließmittel, Trostberg, Deutschland, 2006
- [51] <http://de.wikipedia.org> Wolkenkratzer, Höchste Gebäude, 2011
- [52] <http://de.wikipedia.org> Kohlenstoffnanoröhren 22. 08. 2011  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffnanor%C3%B6hren> 22. 08. 2011
- [53] <http://www.baytubes.com> Carbon-Nanotubes 22. 08. 2011  
[http://www.baytubes.com/product\\_production/index.html](http://www.baytubes.com/product_production/index.html) 22. 08. 2011
- [54] [www.tedpella.com](http://www.tedpella.com) 22. 08. 2011  
[http://www.tedpella.com/gold\\_html/Nanotubes.html](http://www.tedpella.com/gold_html/Nanotubes.html) 22. 08. 2011
- [55] Yakowlew, Grigory, Yadviga Keriene, Nanobewehrung im Schaumbeton, Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 2, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2007
- [56] <http://innovationsallianz.nrw.de/kleine-teilchen-ganz-gross.html> 22. 08. 2011
- [57] de Larrard F., Sedran Th., Optimization of ultra-high-performance concrete by use of a packing model, Cem. Concr. Res., Vol. 24(6), 1994
- [58] Bonneau O., Lachemi M., Dallaire E., Mechanical Properties and Durability of two Industrial Reactive Powder Concretes, ACI Materials Journal, Juli-August 1997
- [59] Lowke Dirk, Optimierung des Mischablaufs für Selbstverdichtende Betone, TU München, 2005
- [60] Czernin W., Über die Schrumpfung des erhärteten Zements, Zement-Kalk-Gips Nr. 12, 1956
- [61] Rapp Martin, Ferchenbauer Mario, Schwinden von ultrahochfestem Beton, Interdisziplinäre Seminararbeit, TU Wien, 2010
- [62] ÖNORM B 3303, Messung der Längenänderung  $\epsilon$  von Betonprobekörpern, S. 41
- [63] ÖNORM B3303, Statischer Elastizitätsmodul  $E_b$  von Probekörpern, S. 24
- [64] Grimm, R.; Einfluss bruchmechanischer Kenngrößen auf das Biege- und Schubtragverhalten hochfester Betone, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 477, Berlin 1997