

Diploma Thesis

**Influence of dry mixing time on workability and compressive
strength of UHPC with conventional mixing technique**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

**Einfluss der Trockenmischdauer auf die Verarbeitbarkeit
und Druckfestigkeit von UHPC bei konventioneller
Mischtechnik**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Lorenz Sarsteiner, BSc

Matr.Nr.: 01426574

unter der Anleitung von

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

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Johannes Kirnbauer**

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/206, A-1040 Wien

Wien, im September 2018

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. **Elemer Bölskey** für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit an seinem Institut zu schreiben, bedanken. Mein besonderer Dank gilt außerdem Herrn Ass.Prof.Dipl.-Ing.Dr.-techn. **Heinrich Bruckner** für seine wertvolle Unterstützung beim Erstellen dieser Arbeit, sowie Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. **Johannes Kirnbauer**, der mir bei der Durchführung der Versuche stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie sowohl für die finanzielle, als auch für die mentale Unterstützung während des gesamten Studiums recht herzlich bedanken.

Kurzfassung

Aufgrund der Problematik, dass ultrahochfester Beton zwar extreme Festigkeiten erreicht, jedoch aufgrund sehr zähflüssiger Frischbetonkonsistenz nach wie vor Probleme in der Anwendung birgt, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Optimierung der rheologischen Eigenschaften von ultrahochfestem Beton. Dabei werden die Parameter Trockenmischdauer, Lagerungsdauer des Trockenbetons und Mischertyp variiert, um deren Einfluss auf die Konsistenz und die Fließfähigkeit zu ermitteln. Um eine entsprechend große Anzahl an Messwerten zu erhalten, werden neun verschiedene Trockenbetone, sogenannte Prämixe hergestellt, wobei die Trockenmischdauer dabei im Bereich 1,5 bis 480 Minuten variiert. Anschließend werden diese Prämixe im Alter von 0-72 Stunden, vier- und neun Wochen zu Frischbeton weiterverarbeitet, um so einerseits Aufschlüsse über den Einfluss der Trockenmischdauer und andererseits über den Einfluss der Lagerungsdauer von Trockenprämix zu erhalten. Zusätzlich dazu werden nach 24 Stunden, sowie nach 28 Tagen die Festbetoneigenschaften ermittelt, um zugleich Aufschluss über den Einfluss der genannten Parameter auf die Festigkeitseigenschaften zu erhalten. Außerdem wird die Packungsdichte jeder Probe ermittelt, um die gemessenen Werte besser interpretieren zu können.

Zu guter Letzt werden die im Zuge dieser Arbeit ermittelten Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen von *Mayrhofer* [1] und *Sacherl* [2] verglichen, um so den Einfluss des Mischers auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erhalten.

Die Arbeit gliedert sich dabei in einen theoretischen Teil, in dem die für das Verständnis der Versuche wesentlichen Grundlagen erarbeitet werden, und einen praktischen Teil, in dem die Ergebnisse der durchgeführten Versuche beschrieben, diskutiert und miteinander verglichen werden.

Abstract

Due to the problem, that Ultra-High Performance Concrete is reaching extreme strength, but still has problems in the application, because of very viscous consistency, this paper deals with the optimization of rheological characteristics of Ultra-High Performance Concrete. In this master thesis the parameters dry mixing time, storage period and mixing type will be varied, to see their influence on consistency and followability. In order to receive a correspondingly large amount of measured values, there will be produced nine dry premixes with different dry mixing times in the range of 1,5 to 480 minutes. Afterwards the dry premixes will be processed to wet concrete in the premix ages 0-72 hours, four- and nine weeks, to acquire information about the influence of dry mixing time on the one hand, and about the influence of dry mix age on the other hand. Additionally, there will be determined the hardened concrete characteristics after 24 hours and 28 days. Also, there will be analysed the pack density of every sample, in order to a closer understanding of the measured values.

Last but not least, the measurements of this master thesis will be compared with the work of *Mayrhofer* [1] and *Sacherl* [2], in order to obtain information about the influence of different mixing types on the fresh and hard characteristics of Ultra-High Performance Concrete.

Therefore, this paper is divided in a theoretical part, to work out the essential basics and a practical part, in which the experimental results will get described and compared with each other.

1 Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN.....	3
2.1	Ultrahochfester Beton	3
2.1.1	Allgemeines	3
2.1.2	Einzelbestandteile von UHPC.....	4
2.1.3	Betoneigenschaften.....	13
2.1.4	Relevanz und Anwendung	17
2.2	Der Mischprozess	19
2.2.1	Unterschiedliche Mischvorgänge	20
2.2.2	Mischgüte	21
2.2.3	Mischertypen.....	22
2.3	Rheologie	24
2.3.1	Beschreibung und Definition rheologischer Größen	24
2.3.2	Unterscheidung newtonsches und nicht newtonsches Fluid	26
2.3.3	Wechselwirkungen in Feinstoffsuspensionen	29
2.3.4	Fließverhalten von Beton und Zementleim	30
2.4	Packungsdichte.....	30
3	VORVERSUCHE UND VERSUCHSPLANUNG	33
3.1	Vorversuche	33
3.2	Versuchsplanung und Aufbau	34
3.2.1	Zusammensetzung der Mischung.....	34
3.2.2	Herstellung des Prämix.....	35
3.2.3	Versuchsaufbau	37
4	VERSUCHE UND AUSWERTUNG.....	48
4.1	Frischbetonprüfungen	48
4.1.1	Rheologische Eigenschaften	48
4.1.2	Packungsdichte.....	69

4.2	Festbetoneigenschaften	77
4.2.1	Druckfestigkeit.....	77
4.2.2	Biegezugfestigkeit.....	88
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	97
6	LITERATURVERZEICHNIS	100
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	105
8	TABELLENVERZEICHNIS.....	109

1 Einleitung

Aufgrund des Wunsches, immer höhere und zugleich filigranere Konstruktionen herzustellen, werden auch die Ansprüche an Beton als Baustoff immer höher. Aus diesem Grund, wurde im Bereich der Betontechnologie in den letzten Jahrzehnten intensiv geforscht, sodass es heute mithilfe von extrem leistungsfähigen Zusatzmitteln und Zusatzstoffen möglich ist, ultrahochfeste Betone mit Druckfestigkeiten von weit über 150N/mm^2 herzustellen. Neben den guten Festigkeitseigenschaften bieten diese Betone aufgrund des extrem dichten und beinahe porenfreien Korngefüges auch hervorragende Eigenschaften hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, sodass sich ein extrem breites Anwendungsspektrum für diese Betone eröffnet. Zusätzlich ergibt sich durch hohe Ressourceneffizienz die Möglichkeit, sowohl ökologisch, als auch ökonomisch neue Maßstäbe im Bereich der zementgebundenen Baustoffe zu setzen.

Aufgrund der geringen W/B Werte von ultrahochfestem Beton sind diese Betone sehr zähflüssig und schwer zu verarbeiten, wodurch die Verbesserung der rheologischen Eigenschaften ein zentrales Thema darstellt.

Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit den Auswirkungen unterschiedlich langer Mischzeiten der Trockenbestandteile des Betons, auf die rheologischen Eigenschaften und den damit einhergehenden Veränderungen der Festigkeitseigenschaften von ultrahochfestem Beton. Zusätzlich wird untersucht, wie sich die Lagerung des Trockenmischgutes sowie die Verwendung unterschiedlicher Mischer auf eben diese Eigenschaften auswirken.

Ziel ist es, ein mögliches Optimierungspotential der Fließeigenschaften von ultrahochfesten Betonen, durch Variation der genannten Parameter aufzuzeigen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen neun unterschiedlich lang gemischte Trockenbetonprämixe hergestellt werden, welche anschließend im Alter von 0-72 Stunden, vier Wochen und 9 Wochen zu Frischbeton weiterverarbeitet werden. Die Trockenmischdauer soll dabei im Bereich von 1,5 bis 480 Minuten variiert werden. Direkt nach dem Nassmischvorgang sollen die rheologischen Eigenschaften, dynamische Fließgrenzen, Viskosität und auch die Thixotropie mithilfe eines Rotationsrheometers ermittelt werden. Im Anschluss sollen Prüfprismen hergestellt werden, um die Druck- und Biegezugfestigkeit nach 24 Stunden und 28 Tagen ermitteln zu können.

Um die Veränderung der Betoneigenschaften durch die Variation der oben genannten Parameter Trockenmischdauer, Trockenbetonalter und Mischertyp und der damit einhergehenden Veränderung der Betoneigenschaften besser nachvollziehen zu können, wird zusätzlich die Packungsdichte jeder Betonprobe ermittelt.

Die Darstellung der Auswirkungen unterschiedlicher Mischertypen erfolgt anhand eines Vergleichs der Versuchsergebnisse dieser Arbeit, mit den Arbeiten von *Mayrhofer* [1] und *Sacherl* [2], deren Versuche mit einem anderen Betonmischer durchgeführt werden, ansonsten jedoch zeitgleich und unter denselben Rahmenbedingungen stattfinden.

Die Arbeit in einen theoretischen und einen praktischen Teil gegliedert. Im theoretischen Teil werden eingangs grundlegende Aspekte von UHPC wie die einzelnen Komponenten sowie die Frisch- und Festbetoneigenschaften erläutert, ehe die dem Mischprozess zugrundeliegenden Prinzipien erläutert werden. Weiters werden rheologische Kenngrößen, newton'sches Fließverhalten und Wechselwirkungen in Feinstoffsuspensionen erläutert, ehe abschließend noch Grundlagen zur Packungsdichte erläutert werden.

Der praktische Teil beginnt anschließend mit der Beschreibung des Versuchsaufbaus, ehe die Versuchsergebnisse der drei Versuchsserien beschrieben und anschließend sowohl untereinander, als auch mit den Ergebnissen von *Mayrhofer* und *Sacherl* verglichen werden.

2 Grundlagen

2.1 Ultrahochfester Beton

2.1.1 Allgemeines

Die stetig steigenden Anforderungen an Baustoffe und Baukonstruktionen haben in den letzten Jahrzehnten auch in der Betonforschung zu immer weiteren Verbesserungen der Baustoffeigenschaften geführt. Eine wesentliche Errungenschaft stellt hier die Entwicklung von ultrahochfestem Beton (UHPC – Ultra High Performance Concrete) mit Druckfestigkeiten von mehr als 150N/mm^2 dar.

Grundsätzlich werden Betone, die eine höhere Druckfestigkeit als die höchste in ÖNORM B4710 normierte Festigkeitsklasse C100/115 aufweisen, als ultrahochfeste Betone bezeichnet. Möglich werden diese hohen Druckfestigkeiten durch den Übergang von einem 3-Komponentensystem, bestehend aus Wasser, Zement und Gesteinskörnung zu einem 5-Phasensystem, bestehend aus Wasser, Zement, Zuschlagsstoffen, Gesteinskörnung und Zusatzmittel [3], und der damit einhergehenden Reduktion des W/Z-Wertes auf unter 0,25, welche durch Zugabe von Betonverflüssiger und Silicastaub erreicht werden kann [4].

Als einer der großen Meilensteine der in den 1980er Jahren einsetzenden Entwicklung von UHPC kann die Herstellung der Sherbrooke Footbridge (Abbildung 2.1) in Kanada 1997 mit einer Spannweite von 60m bezeichnet werden [5]. 2010 folgte dann mit der Errichtung der Wild Brücke in Völkermarkt (Abbildung 2.2) die erste Straßenbrücke aus ultrahochfestem Beton. Die 157m lange faserverstärkte Konstruktion kommt dabei vollständig ohne Bewehrungsstahl und Verschleißteile wie Lager und Fahrbahnübergänge aus, wodurch sich neben der Verringerung der Erhaltungskosten eine signifikante Steigerung der Lebensdauer durch den Entfall von korrosiven Baustoffen ergibt [6].



Abbildung 2.1: Sherbrooke Footbridge [7]



Abbildung 2.2: Wildbrücke Völkermarkt [8]

Die hohen Festigkeiten des Baustoffs ermöglichen eine wesentliche Reduktion von Bauteilabmessungen, vor allem bei druckbeanspruchten oder vorgespannten Bauteilen. Die daraus resultierende Verringerung des Eigengewichts ist speziell bei sehr hohen oder weitgespannten Bauwerken relevant und bietet neben dem ökologischen Faktor eines geringeren Rohstoffverbrauchs auch die Möglichkeit, hohe Gründungskosten bei schlechten Bodenverhältnissen über eine Verringerung der Eigenlasten wesentlich zu reduzieren [5].

2.1.2 Einzelbestandteile von UHPC

Ultrahochfester Beton besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Zement, Wasser, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe und Zusatzmittel, und stellt somit ein 5-Phasen System dar. Signifikanten Einfluss auf die im Gegensatz zu Normalbeton stark verbesserten Eigenschaften von UHPC haben dabei die Komponenten Mikrosilika und Hochleistungsverflüssiger.

2.1.2.1 Zement

Bereits vor über 2000 Jahren kam der erste Zement, beziehungsweise hochhydraulischer Kalk „Opus Caementinum“ auf römischen Baustellen zum Einsatz und besteht, heute wie damals, hauptsächlich aus Kalk und Ton. Es stellt ein feingemahlene hochhydraulisches Bindemittel dar, welches in Verbindung mit Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärtet [9].

Zur Herstellung wird ein Rohstoffgemisch aus Kalkstein/ Kalkmergel (CaCO_3 – Calciumcarbonat), Sand (SiO_2 – Kieselsäure), Ton/Mergel (Al_2O_3 – Tonerde) und eisenoxidischen Mineralen (Fe_2O_3 – Eisenoxid) in rund 100m langen Drehrohrofen auf bis zu 1450°C erhitzt und so bis zur Sinterung gebrannt. Der daraus erhaltene Portlandzementklinker enthält mehrere unterschiedliche Klinkermineralien bzw. Klinkerphasen, welche für die Eigenschaften des Zements von zentraler Bedeutung sind. Dabei unterscheidet man:

- **Tricalciumsilicat (C_3S):** Bestimmt mit einem Massenanteil von 40 – 80% die wesentlichen Eigenschaften des Zements. Neben hoher Spätfestigkeit und Hydratationswärme bestimmt er durch seine schnelle Erhärtung vor allem die Frühfestigkeit des Zements.
- **Dicalciumsilikat (C_2S):** Ist mit 2 – 30% im Klinker enthalten. Es ist weniger kalkhaltig als Tricalciumsilicat und erhärtet daher wesentlich langsamer als Tricalciumsilicat, erreicht dabei aber bei geringerer Hydratationstemperatur dieselbe Festigkeit.
- **Tricalciumaluminat (C_3A):** Diese Phase ist mit einem Massenanteil von 3 - 15% enthalten. Es reagiert sehr schnell mit Wasser und erhöht so die Anfangsfestigkeit des Zements. Um die Erhärtungsgeschwindigkeit zu verringern und eine sinnvolle Verarbeitungszeit zu

gewährleisten, muss dem Portlandzement bis zu 5% Gips zugesetzt werden. Hauptmerkmale dieser Phase sind die hohe Hydratationswärme und die Empfindlichkeit gegen Sulfate.

- **Calciumaluminatferrit (C₂AF):** Hat einen Massenanteil von 4 - 15% und trägt grundsätzlich wenig zur Erhärtung bei. Es entsteht durch Zugabe von eisenhaltigen Rohstoffen und wandelt das sulfatempfindliche Tricalciumaluminat in eine weniger empfindliche Phase um [9].

Um die reaktionsfähige Oberfläche der nach dem Brennen kieselgroßen Körner zu erhöhen, wird das Rohmaterial anschließend zementfein gemahlen. Dieses Klinkermehl, im Korngrößenbereich zwischen 0,001 und 0,1mm, würde in Verbindung mit Wasser allerdings sofort abbinden, sodass diesem rund 3-4% Gips zugegeben werden müssen, um eine vertretbare Verarbeitungszeit zu erreichen [10].

Zur Herstellung von UHPC Beton sind Zemente mit geringem Wasseranspruch und guter Fließmittelverträglichkeit geeignet. Üblicherweise kommen C₃A arme oder C₃A freie Portlandzemente zum Einsatz, da C₃A sehr schnell mit Wasser reagiert und sich somit schlecht auf die Verarbeitbarkeit auswirkt. Außerdem ist C₃A mit einer Hydratationswärmemenge von 1340 J/g die Phase mit der stärksten Wärmeentwicklung [9]. Da der Zementanteil von UHPC Beton mit 600 bis 1000kg/m³ im Vergleich zu Normalbeton mit rund 240 bis 350kg/m³ wesentlich höher ist, ist die freigesetzte Hydratationswärmemenge ebenfalls erheblich höher. Dies kann zu thermischen Zwangsspannungen und in weiterer Folge zu Rissen führen [10].

Weitere Vorteile von C₃A armen oder C₃A freien Zementen sind die geringe Ettringitbildung, welche sich positiv auf die Festigkeit des Betons auswirkt, und das geringere Adsorptionsvermögen, welches sich positiv auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons auswirkt [3] [4] [5].

Trotz der Wahl des „richtigen“ Zements sollte der Faktor, dass Zementeigenschaften grundsätzlich Schwankungen unterliegen, nicht außer Acht gelassen werden. So ist es möglich, dass unterschiedliche Zementchargen derselben Sorte aus demselben Zementwerk unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Festigkeit und Fließmittelverträglichkeit aufweisen, die zwar für die meisten Normalbetonanwendung völlig irrelevant sind, für die Herstellung und die Eigenschaften von UHPC jedoch von zentraler Bedeutung sein können [10].

Für die vorliegende Diplomarbeit wurde im Zuge der Versuche ein EN 197-1 - CEM I 52,5 N - SR 0 WT 38 C₃A-freier Zement der Firma *Lafarge* verwendet. Dieser wird vor allem bei Fertigteilen und Hochleistungsbetonen eingesetzt und zeichnet sich durch geringe Wärmeentwicklung, geringen Wasserbedarf und ausgezeichneter Frühhochfestigkeit aus. Einige Eigenschaften sind in Tabelle 2.1 aus [11] zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Eigenschaften CEM I 52,5 N – SR 0 WT 38 C₃A-frei [11]

Eigenschaften	Richtwerte	Normanforderungen	
		ON EN 197-1	ON B3327-1
Dichte in kg/dm ³	3,13	-	-
Druckfestigkeit (bei 20°C) in N/mm ²			
1 Tag	20	-	≥ 11
2 Tage	32	≥ 20	-
7 Tage	-	-	-
28 Tage	60	52,5	-
Mahlfeinheit (Blainewert) in cm ² /g	4500	-	≤ 5% Schwankung
Erstarrungsbeginn (bei 20°C) in min	140	≥ 45	≥ 90
Bluten in cm ³ nach 120min	3	-	≤ 20
Wärmeentwicklung in J/g Zement nach 15 h	240	-	≤ 290
Sulfatbeständigkeit bzw. C ₃ A-frei	0%	0% C ₃ A im Klinker	C ₃ A-frei

2.1.2.2 Gesteinskörnung

Da Beton zu 70 bis 75% aus Gesteinstoffen besteht und somit den Hauptbestandteil von Beton darstellt, bestimmen diese auch wesentlich die Eigenschaften des Betons. Häufig vorkommende Gesteinsarten sind in Tabelle 2.2 nach [3] dargestellt.

Um Betone mit hohen Festigkeiten herzustellen, müssen demnach auch Zuschläge mit hohen Festigkeitswerten verwendet werden. Außerdem ist die Wasseraufnahme des Gesteins für UHPC Beton von Relevanz [10].

Tabelle 2.2: Eigenschaften unterschiedlicher Gesteine [3]

Gesteinsart	Wasseraufnahme	Druckfestigkeiten	E-Modul
	[Ma.%]	[N/mm ²]	[10 ³ N/mm ²]
Granit	0,2-0,5	160-210	35-76
Diorit/Gabbro	0,2-0,4	170-300	50-60
Basalt	0,1-0,3	250-400	96(ρ=3,05)
Quarzit/ Grauwacke	0,2-0,5	150-300	60(ρ=2,65)
Sandstein	0,2-9,0	30-200	1,5-20

Zusätzlich zu den Gesteinseigenschaften selbst spielt die Korngröße bzw. die Korngrößenverteilung eine wesentliche Rolle. Je besser der Zuschlag korngestuft ist, desto höher wird die Dichte und desto weniger Hohlräume müssen mit Zementleim befüllt werden. Die Optimierung der Korngrößen erfolgt hierbei nach *W.A. Fuller*, der feststellte, dass die Dichte der Gesteinspackung erhöht werden könne, wenn jeder Hohlraum einer Korngrößenstufe mit einem jeweils kleineren Korn befüllt wird. Dabei

muss die Kornabstufung so gewählt werden, dass die kleineren Teilchen auch in die kleineren Zwischenräume hineingelangen und keine Teilchenbehinderungen stattfinden [12].

Die Berechnung der optimalen Kornzusammensetzung laut *Fuller* erfolgt nach Formel [2-1] aus [12].

$$A(d) = \left(\frac{d}{d_{max}}\right)^q \quad [2-1]$$

$A(d)$... Massenanteil von Korndurchmesser kleiner d , bezogen auf die Gesamtmasse

d_{max} ... Größtkorndurchmesser des Korngemisches

d = Korndurchmesser

q ... Korngrößenexponent, mit $q=0,5$ ergibt sich Fuller-Parabel

Da bei ultrahochfesten Betonen Zuschläge mit sehr geringen Korngrößen verwendet werden, wurde die Formel folgendermaßen adaptiert [12]:

$$A(d) = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,1}{d_{max}}\right)^{0,5}} * \left[\left(\frac{d}{d_{max}}\right)^{0,125} - \left(\frac{0,1}{d_{max}}\right)^{0,125} \right] \quad [2-2]$$

Üblicherweise kommen bei ultrahochfesten Betonen Zuschläge in Form von feinen Sanden mit Korngrößen zwischen 125 μm und 1000 μm und für darunterliegende Kornfraktionen Gesteinsmehl zum Einsatz. Durch die hohe Feinheit der Einzelkörner wird die sehr poröse und heterogene Kontaktzone zwischen Zementleim und Zuschlagskorn eliminiert, wodurch die Bildung von weichen Hydratationspunkten wie Ettringit und Calciumhydroxid beinahe gänzlich verhindert werden kann. Zusätzlich wird die Zementleimschichtdicke bei geringeren Korngrößen ebenfalls kleiner, was sich positiv auf die Festigkeit des Betons auswirkt [13].

Im Zuge der Versuche zu dieser Diplomarbeit wurde „Quarzsand H 32“ aus dem Werk Haltern der Firma *Quarzwirke GmbH* verwendet. Die Korngrößenverteilung dieses Quarzsandes ist in Tabelle 2.3 aus [14] dargestellt.

Tabelle 2.3: Korngrößenverteilung Quarzsand H32 nach [14]

Korngruppe	Massenanteil
[mm]	[M. %]
0,000-0,125	0
0,125-0,250	16
0,250-0,500	82
0,500-1,000	2
> 1,000	0

2.1.2.3 Anmachwasser

Um die Hydratation des Zements zu aktivieren, ist es notwendig Wasser zuzugeben. Dabei kann nahezu jedes in der Natur vorkommende Wasser verwendet werden, sofern es sich nicht negativ auf das Erstarren und Erhärten, die Wirkung von Zusatzmitteln, die Raumbeständigkeit des Zements sowie den Korrosionsschutz des Zements auswirkt. Inhaltsstoffe, die diese negativen Effekte auslösen, sind unter anderem Salze, Öle, Fette, Säuren oder Zucker. Aus diesem Grund kann beispielsweise Meerwasser auch nicht als Anmachwasser verwendet werden. Ebenso ist Moorwasser oder Restwasser, also Wasser, das aus Restbeton rückgewonnen wird oder mit dem Mischanlagen ausgewaschen werden, für die Herstellung von ultrahochfestem Beton ungeeignet. Trinkwasser ist jedoch immer und uneingeschränkt, selbst wenn es chloriert ist, als Zugabewasser geeignet. Eine Eignungsprüfung von Trinkwasser ist daher nicht erforderlich [3].

Da die notwendige Konsistenz bei ultrahochfesten Betonen im Wesentlichen über die Zugabe von Betonverflüssigern geregelt wird, wird die erforderliche Gesamtwassermenge hauptsächlich über die für die Hydratation erforderliche Menge bestimmt. Die Gesamtwassermenge (Abbildung 2.3) setzt sich aus Zugabewasser, Oberflächenfeuchte der Zuschlagsstoffe und Wasseranteile in Zusatzmitteln und Stoffen zusammen [15].

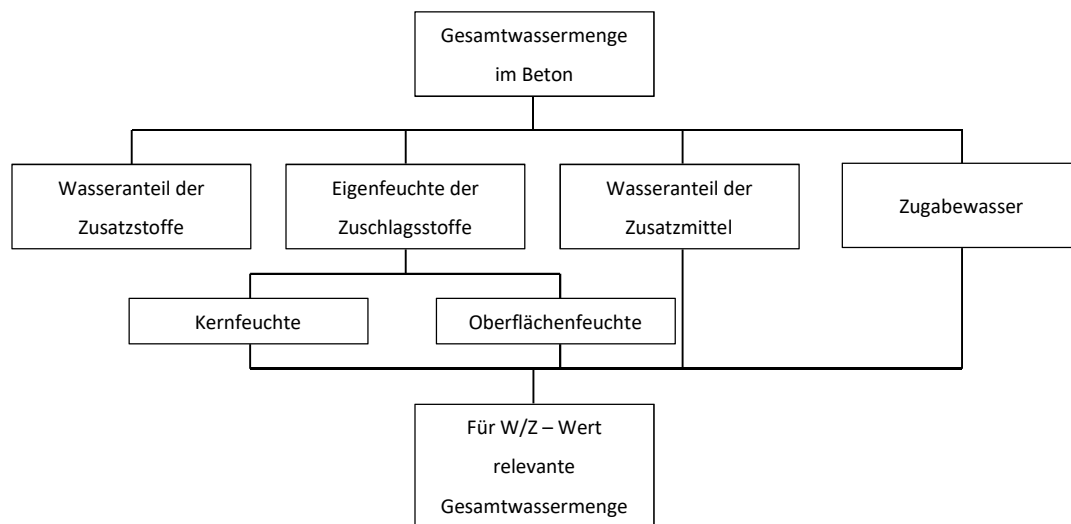


Abbildung 2.3: Zusammensetzung Gesamtwassermenge nach [15]

Für die im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit durchgeführten Versuche wurde herkömmliches Leitungswasser aus den Netzen der Stadt Wien verwendet.

W/Z – Wert

Der Wasserzementwert (W/Z-Wert) beschreibt das Massenverhältnis von Wasser und Zement im Beton und beeinflusst sowohl die Frischbeton- als auch die Festbetoneigenschaften maßgeblich. Ein hoher W/Z-Wert wirkt sich positiv auf die Plastizität und somit die Verarbeitbarkeit und

Verdichtbarkeit des Frischbetons aus. Die Festigkeit des erhärteten Betons nimmt jedoch mit zunehmendem W/Z-Wert ab [13].

Grundsätzlich kann Zement eine Wassermenge von ca. 40% seiner Masse binden. 25 Massenprozent werden dabei chemisch gebunden, die restlichen 15% werden von den Gelporen adsorbiert und stehen somit nicht für die Hydratation zur Verfügung. Dies bedeutet also, dass bei einem W/Z-Wert von 0,4 sämtliches dem Zement hinzugefügtes Wasser chemisch oder physikalisch gebunden wird. Beton mit einem W/Z-Wert von 0,4 lässt sich aber im Normalfall nicht so einfach verarbeiten. Deshalb wird in der Praxis die Wassermenge erhöht oder Fließmittel hinzugegeben, um die Fließfähigkeit des Betons zu erhöhen. Bei W/Z-Werten $> 0,4$ befindet sich allerdings freies, ungebundenes Wasser im Beton, welches Kapillarporen ausbildet und sich so negativ auf die Dichtigkeit und Festigkeit auswirkt.

Bei der Herstellung von UHPC Beton werden W/Z-Werte von $\leq 0,2$ angestrebt. Dabei findet die Hydratation nur oberflächlich auf den Zementpartikeln statt, der Kern jedoch bleibt als dichte Gesteinskörnung im Beton erhalten. Um diese ultrahochfesten Betone verarbeitbar zu machen, müssen allerdings Fließmittel eingesetzt werden. Die Auswirkungen verschiedener W/Z-Werte auf den Beton sind in Abbildung 2.4 dargestellt [15] [13].

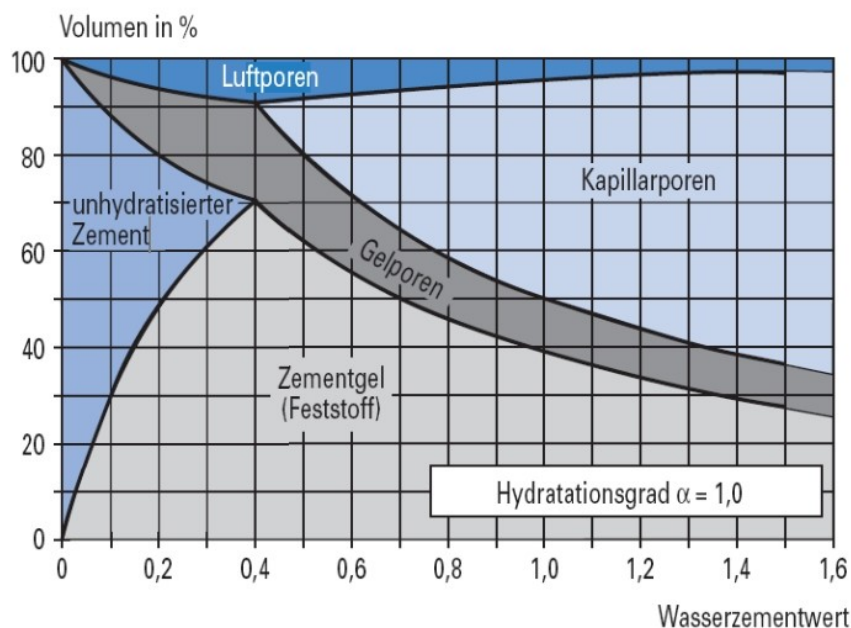


Abbildung 2.4: Einfluss des W/Z-Werts auf den Beton [16]

W/B-Wert

Analog zum W/Z -Wert gibt der W/B-Wert (Wasser-Bindemittel-Wert) das Verhältnis von Wasser zu allen hydraulisch wirkenden Bindemitteln und Zusatzstoffen im Beton an. Die Festigkeit nimmt auch

bei diesem mit geringer werdendem W/B-Wert zu. Während bei Normalbetonen W/B- Werte von ca. 0,45 üblich sind, wird dieser bei ultrahochfesten Betonen auf bis zu 0,14 reduziert [4].

Die Berechnung erfolgt dabei nach Formel [2-3], wobei für die einzelnen Zusatzstoffe (ZS) unterschiedliche Korrekturbeiwerte (k) angesetzt werden.

$$\frac{W}{B} = \frac{\text{Wasser}}{\text{Zement} + \sum k * \text{ZS}} \quad [2-3]$$

2.1.2.4 Zusatzstoffe

Als Zusatzstoffe werden mehlfeine Stoffe bezeichnet, die Frisch- oder Festbetoneigenschaften, wie beispielsweise Wärmeentwicklung, Dichtheit oder Verarbeitbarkeit, aber auch die Betonfarbe beeinflussen. Als Zusatzstoffe kommen dabei z.B. Gesteinsmehle oder Mikrosilika zum Einsatz. Dabei unterscheidet man vor allem zwischen Zusatzstoffen, die keinen Festigkeitsbeitrag leisten und hauptsächlich eine porenfüllende Wirkung haben, und Zusatzstoffen, die bei der Hydratation des Zements ebenfalls reagieren und einen Beitrag zur Betonfestigkeit leisten [10].

Diese Unterteilung erfolgt folgendermaßen [15]:

- Typ I (nahezu inert)
 - Gesteinsmehl nach EN12620
 - Pigmente nach ÖNORM EN 12878
- Typ II (puzzolanischer und latent hydraulischer Zusatzstoff)
 - Flugasche nach ÖNORM EN 450
 - Silikastaub nach ÖNORM EN 13263-1
 - Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe nach ÖNORM B 3309
 - Hüttensand nach ÖNORM EN 15167

Silikastaub

Als Silikastaub, oftmals auch als Mikrosilika bezeichnet, versteht man eine extrem feinkörnige amorphe Kieselsäure, welche bei der Herstellung von Siliziummetallen oder Ferrosilicium als kondensierter Filterstaub anfällt und aus den Rauchgasen gewonnen wird. Mit einer mittleren Korngröße von rund 1,0µm sind die Partikel zwischen 30 und 100mal kleiner als Zement. Dies hat den Vorteil, dass neben der puzzolanischen Reaktion dieses Typ II Zusatzstoffes und der daraus resultierenden Verbesserung der Festigkeitseigenschaften auch die Porenräume zwischen den Zementteilchen ausgefüllt werden. Dadurch erhöht sich die Packungsdichte, welche einen

wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften von UHPC hat. Dieser Fülleffekt sowie das Korngrößenverhältnis zwischen Silikastaub und Zement wird in Abbildung 2.5 verdeutlicht.

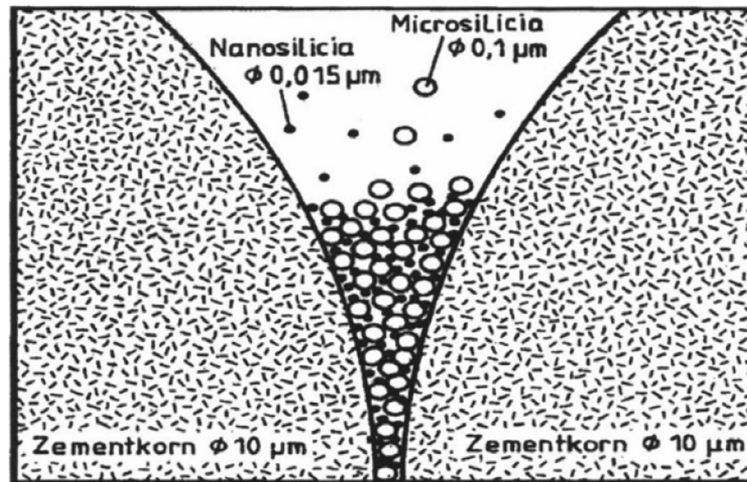


Abbildung 2.5: Größenvergleich zwischen Silikastaub und Zementkörnern [15]

Ein weiterer Vorteil der erhöhten Packungsdichte liegt in der verbesserten Verbundwirkung zwischen Zementstein und Gesteinskörnung. Außerdem verbessern sich die rheologischen Eigenschaften aufgrund von Schmiereffekten, die auf die nahezu perfekte Kugelform der Mikrosilikakörner zurückzuführen sind [10] [15] [4].

Im Zuge der Versuche für diese Arbeit wurde „Quarzmehl 10000“ der Firma *Quarzwerte GmbH* als inerter Zusatzstoff und „Microsilica Grade 940-U“ der Firma *Elkem ASA* als reaktiver Zusatzstoff verwendet.

Das nicht reaktive „Quarzmehl 10000“ dient dabei als Porenraumfüller und besitzt eine Rohdichte von rund $2,65\text{g/cm}^3$ bei Korngrößen kleiner $70\mu\text{m}$ [1].

Das reaktive „Microsilica-Grade 940-U“ besitzt eine Rohdichte von rund $2,30\text{g/cm}^3$ und hat dabei eine mittlere Oberfläche von 15 bis $30\text{m}^2/\text{g}$ [17].

2.1.2.5 Zusatzmittel

Zusatzmittel sind meist flüssige oder pulverförmige Zusätze, die Frisch- und/oder Festbetoneigenschaften durch chemische bzw. physikalische Wirkung beeinflussen. Als Höchstwert der zugegebenen Zusatzmittel werden vom *Verein Deutscher Zementwerke e.V.* 70g pro kg Zement bei einem Zusatzmittel und 80g pro kg Zement bei Verwendung mehrerer Zusatzmittel unterschiedlicher Wirkung für ultrahochfesten Beton angegeben. Für Normalbeton wird eine Höchstmenge von 50g pro kg Zement empfohlen [4].

Das in den Zusatzmitteln enthaltene Wasser muss ab einer Zusatzmittelmenge größer $3,0\text{l/m}^3$ Beton in der Berechnung des W/B-Wertes berücksichtigt werden [12].

Zusatzmittel werden in folgende Wirkungsgruppen nach DIN EN 934 unterteilt [10]:

- Betonverflüssiger
- Fließmittel
- Verzögerer
- Erstarrungsbeschleuniger
- Erhärtungsbeschleuniger
- Dichtungsmittel
- Stabilisierer
- Luftporenbildner.

Die am häufigsten verwendeten Zusatzmittel stellen Betonverflüssiger und Fließmittel dar. Diese sind speziell auch für die Herstellung von UHPC Beton von zentraler Bedeutung, um die extrem geringen W/B-Werte zu kompensieren und eine Verarbeitung des Betons zu ermöglichen.

Betonverflüssiger verbessern die Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei gleichbleibendem Wasser-Bindemittelwert oder verbessern die Festbetoneigenschaften durch Reduktion des Wasseranspruchs bei ebenfalls gleichbleibendem W/B-Wert. Mögliche Nebenwirkungen bei falscher Dosierung oder Anwendung können Festigkeitsminderung, Erstarrungsverzögerung oder Luftporeneintrag darstellen.

Fließmittel stellen besonders stark verflüssigend wirkende Zusatzmittel dar und dürfen, im Unterschied zu Betonverflüssigern, auch nachträglich in den Beton eingemischt werden. Die erzielte Wirkung entspricht dabei derselben wie bei Betonverflüssigern, also geringerer Wasserbedarf und verbesserte Verarbeitbarkeit [4].

Für Fließmittel kommen derzeit hauptsächlich folgende 5 Wirksubstanzen zur Anwendung [10]:

- Liginsulfonate
- Naphtalinsulfonate
- Melaminharze
- Acrylate
- Polycarboxylatether (PCE).

Die Polycarboxylatether stellen dabei die aktuellste Entwicklung dar und eröffnen neue Möglichkeiten in der Betontechnologie. Bei den Polycarboxylatethern beruht die Wirkungsweise neben dem Dispersionsmechanismus, also der elektrostatisch negativ geladenen

Zementpartikeloberfläche, welcher auch bei herkömmlichen Plastifizierern zur Anwendung gelangt, auf der Ausbildung von langen Seitenketten der Polymere (Polyetherketten), und stellen so eine räumliche Barriere dar, die zusätzliche sterische Abstoßungskräfte erzeugt [13] [4].

Im Zuge der Versuche zu dieser Arbeit wurde dem Beton das Fließmittel „MasterGlenium ACE 430“ der Firma *BASF Performance Products GmbH* hinzugefügt, welches auf dem beschriebenen Polycarboxylatether (PCE) basiert. Dieses bewirkt zusätzlich eine deutlich raschere Frühfestigkeitsentwicklung des Betons [18].

Außerdem wurde das Produkt „MasterSure 911“ der Firma *BASF Performance Products GmbH* als Konsistenzhalter verwendet. Dieser basiert ebenfalls auf PCE, trägt aber im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Fließmittel nur wenig zur Anfangsverflüssigung bei. Die Wirkung beginnt hingegen erst etwa 15-25min nach Zugabe und hält anschließend bis über 90min an [19].

Neben diesem für die Konsistenz verantwortlichen Zusatzmittel kam das Produkt „MasterFinish DF 370“ (Anm: Frühere Bezeichnung: *DCC- Entlüfter*) der Firma *BASF Performance Products GmbH* als Entlüfter zur Anwendung. Dieser sorgt für die Auflösung der im Frischbeton vorhandenen Lufteinschlüsse und erhöht somit die Betonqualität [20].

2.1.3 Betoneigenschaften

2.1.3.1 Homogenität

Aufgrund einiger Besonderheiten von Beton wie unterschiedliche Korngrößen, verschiedene E-Module und abweichende Temperaturexpansionskoeffizienten der Einzelbestandteile, wird Beton generell als heterogen angesehen. Im Vergleich zu Normalbeton besitzt ultrahochfester Beton jedoch ein wesentlich homogeneres Gefüge. Dies beruht vor allem auf besser abgestimmten Korngrößenverteilungen und einem vergleichsweise kleinen Größtkorndurchmesser von meist 1,0mm. Dadurch wird der Korngrößenunterschied zwischen Zementstein und Zuschlagsstoff wesentlich verringert. Ein weiterer Punkt ist die verminderte Schwächezone zwischen Zuschlagskorn und Zementstein, wodurch die unterschiedlichen E-Module wesentlich weniger ins Gewicht fallen. Aufgrund dieser - im Vergleich zu Normalbeton wesentlich verbesserten - Homogenität, weist UHPC teilweise Eigenschaften auf, die ihn in einigen Anwendungen sogar mit Stahl konkurrieren lassen [13].

2.1.3.2 Dichte und Porosität

Üblicherweise liegt die Rohdichte von UHPC Mischungen im Bereich um $2,60\text{g/cm}^3$ und somit um ca. 10% über der Rohdichte von Normalbeton. Diese vergleichsweise hohe Rohdichte von UHPC liegt hauptsächlich an der hohen erzielten Packungsdichte und der daraus resultierend wesentlich

dichteren und praktisch kapillarporenfreien Zementsteinmatrix. Üblicherweise liegt der Gesamtporenanteil nur bei 4,0 - 6,0Vol.-%. Der Anteil der für den Transport von Gasen und Flüssigkeiten entscheidenden Kapillarporen liegt bei ca. 1,5 - 2,0Vol.-%, was den Transport von Gasen und Flüssigkeiten beinahe zur Gänze verhindert. Die daraus resultierenden - im Vergleich zu Normalbeton wesentlich verringerten - Carbonatisierungstiefen wirken sich unter anderem positiv auf den Korrosionsschutz aus. Außerdem sind durch die hohe Dichte ein hoher Verschleiß-, Frost- und Tausalz widerstand, sowie hohe Widerstände gegen chemische Angriffe gegeben [21] [4] [22].

2.1.3.3 Druckfestigkeit

Der wichtigste Kennwert von Beton ist die Druckfestigkeit. Über diesen erfolgt beinahe in allen nationalen und internationalen Normen und Regelwerken die Unterteilung in die unterschiedlichen Betonklassen. Die Druckfestigkeit wird dafür gemäß EN12390 an Probewürfeln mit einer Kantenlänge von 150mm bzw. an Zylindern mit einer Höhe von 300mm und einem Durchmesser von 150mm ermittelt.

Die Festigkeitsklassen von Beton reichen in den gängigen Normungen bis zu einer Festigkeit von C100/115. Die Druckfestigkeit von UHPC liegt jedoch aufgrund der Zusammensetzung, Mischung und Nachbehandlung oftmals in Bereichen jenseits der 200N/mm², wodurch die üblichen Abmessungen von Prüfkörpern durch kleinere ersetzt werden müssen, sodass die vorhandenen Maschinen die Probekörper auch abdrücken können. Gängige Abmessungen für UHPC Probekörper sind entweder Probewürfel mit einer Seitenlänge von 100mm, oder es wird auf die Abmessungen der Zementprüfkörper von 40x40x160mm zurückgegriffen. Die Ermittlung der Druckfestigkeit dieser Zement-Prismen großen UHPC Proben ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

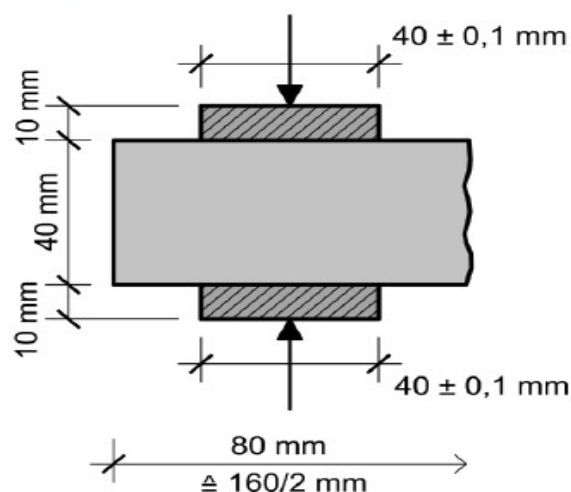


Abbildung 2.6: Druckfestigkeitsprüfung [23]

Im Unterschied zu Normalbeton liegt beim in Abbildung 2.6 dargestellten einaxialen Druckversuch bis kurz vor Erreichen der Druckfestigkeit ein beinahe linear elastisches Materialverhalten vor, wobei Elastizitätsmoduli zwischen 45.000 und 55.000N/mm² gemessen werden. Es liegt also ein ausgesprochen sprödes Bruchverhalten vor, weil sich kein sogenanntes „Fließplateau“ einstellt, sodass keine Anzeichen mehr für ein mögliches bevorstehendes Bauteilversagen vorliegen. Diesem spröden Bruchverhalten wird bei Bedarf, üblicherweise durch Faserzugabe und der damit einhergehenden Steigerung der Duktilität entgegengewirkt.

Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass Druckfestigkeiten bis rund 250N/mm² auch unter Baustellenbedingungen reproduzierbar sind. Unter Laborbedingungen und bei Anwendung von zusätzlicher Wärmebehandlung bei Temperaturen von 400°C und gleichzeitiger Stahlmantelung konnten jedoch in den späten 1990er Jahren bereits Druckfestigkeiten von bis zu 800N/mm² erreicht werden. Abbildung 2.7 zeigt das Materialverhalten bei einaxialer Druckbeanspruchung von Normalbeton, hochfestem Beton und ultrahochfestem Beton [13] [24] [21].

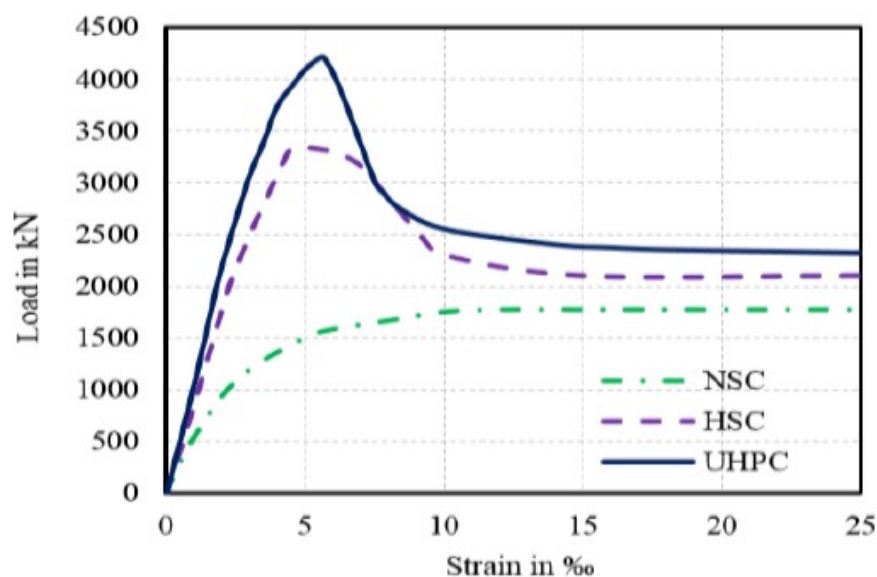


Abbildung 2.7: Betonverhalten unter einaxialer Druckbelastung [25]

2.1.3.4 Biegezugfestigkeit

Neben der Druckfestigkeit ist die Biegezugfestigkeit ein weiterer wichtiger Kennwert von Beton. Diese kann mittels der Drei-Punkt-Biegeprüfung ermittelt werden. Zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit von Normalbetonen nach ÖNORM B 3303 werden Balken mit den Abmessungen 120x120x360mm hergestellt und anschließend mit einer Einzellast in Feldmitte belastet, wobei die Last solange gesteigert wird, bis der Prüfkörper reißt. Die Last- und Auflagerrollen sind dabei drehbar gelagert. Üblicherweise liegt die Biegezugfestigkeit von C25/30 im Bereich zwischen 4,0 und 5,0N/mm² und ist somit wesentlich kleiner als die Druckfestigkeit.

Für die Prüfung von ultrahochfesten Betonen wird meist auf kleinere Prüfkörper zurückgegriffen. Häufig wird hier, analog zur Druckfestigkeitsprüfung, auf die Abmessungen der Zementprüfprismen mit 40x40x160mm zurückgegriffen, sodass die bei der Biegezugprüfung anfallenden Bruchhälften für die Druckfestigkeitsprüfung, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, verwendet werden können. Die Prüfgeometrie der Biegezugfestigkeitsprüfung ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

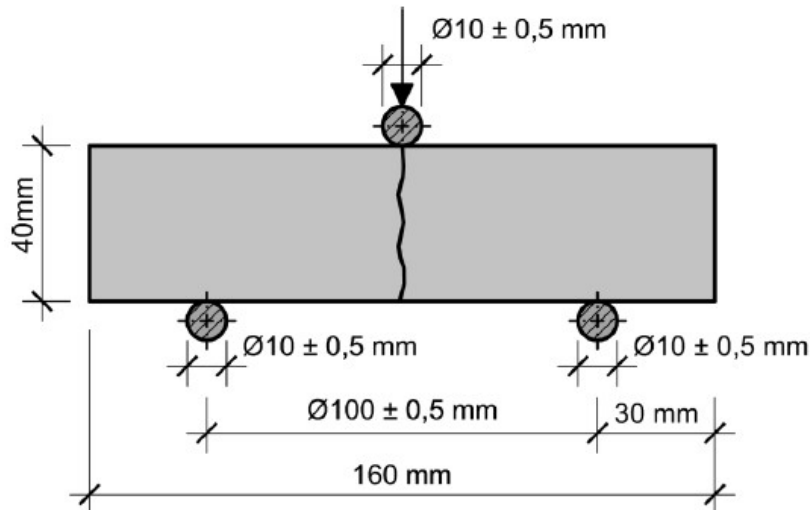


Abbildung 2.8: Drei-Punkt-Biegezugprüfung [23]

Die Biegezugfestigkeit errechnet sich anschließend aus der Bruchlast nach Formel [2-4].

$$f_{ct} = \frac{M}{W} = \frac{3 * F * l}{2 * b * h^2} \quad [2-4]$$

Die Biegezugfestigkeit von UHPC ohne Faserverstärkung ist üblicherweise ebenfalls in einem niedrigen Bereich zwischen 13 und 17 N/mm². Zu beachten ist jedoch die Prüfkörpergeometrie, da hier ein ausgeprägter Maßstabeffekt auftritt. So sind Biegezugfestigkeiten, die an Prüfkörpern mit den Abmessungen 40x40x160mm gemessen werden, rund 1,5mal höher als selbige bei Prüfkörperabmessungen von 150x150x700mm [21].

Der Größe der Probekörper hat also wesentlichen Einfluss auf die gemessene Biegezugfestigkeit, was vor allem auf bruchmechanische Effekte zurückgeführt werden kann.

Kommen zur Verstärkung Fasern hinzu, so sind Biegezugfestigkeiten zwischen 30 und 50N/mm² problemlos zu erreichen. Bei entsprechender Nachbehandlung, optimalem Fasergehalt und gleichzeitig optimaler Faserausrichtung wurden unter Laborbedingungen bereits Biegezugfestigkeiten von über 140N/mm² gemessen [26]. Aber auch bei faserverstärkten Prüfkörpern ist eine signifikante Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von der Probekörpergeometrie zu verzeichnen. Da es für Ultrahochfeste Betone noch keine normierte Klassifizierung gibt, ist es also

wichtig, die Umstände der Spannungsermittlung genau zu dokumentieren. In Abbildung 2.9 wird das Versagensverhalten von UHPC Proben mit Fasern und ohne Fasern im Biegezugversuch dargestellt.

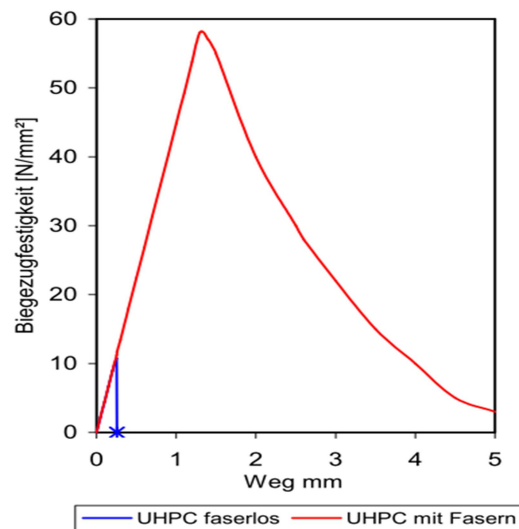


Abbildung 2.9: Kraft - Weg Diagramm für UHPC faserlos und faserverstärkt [13]

Hier lässt sich das spröde Bruchverhalten von faserlosem UHPC erkennen, der schlagartig versagt, und das wesentlich duktilere Bruchverhalten von faserverstärktem UHPC, der ein besseres Nachrissverhalten aufweist. Hier übernehmen die Fasern die Kraftübertragung zwischen den Rissufern und sorgen so für eine höhere Resttragfähigkeit [24] [13] [21].

2.1.4 Relevanz und Anwendung

Speziell hinsichtlich des massiven Ressourcen- und Energieverbrauchs von Beton und Zement stellt ultrahochfester Beton eine geeignete Möglichkeit dar, Bauteilabmessungen und somit Zement- und Energieverbrauch wesentlich zu reduzieren. In Österreich werden jährlich rund 3,7 Millionen Tonnen Zement produziert. Allein aufgrund der Tatsache, dass der Energieaufwand zur Produktion von einem Kilogramm Zement bei rund 0,6 bis 1,0 Kilowattstunden liegt, ist ein ressourcenoptimierter Einsatz von Zement erstrebenswert. Zusätzlich hat das geringere Transportaufkommen eine Verringerung von CO₂-Emissionen zur Folge [9] [5].

Neben dem umwelttechnischen Aspekt der Ressourceneinsparung spielt aber freilich auch die baupraktische Möglichkeit, extrem filigrane und anspruchsvolle Strukturen, welche eher an Stahlbauten als an massive Betonkonstruktionen erinnern, eine große Rolle. Dem wirtschaftlichen Anspruch möglichst preiswert und dauerhaft zu bauen, wird dabei ebenfalls entsprochen, da ein Großteil der höheren Kosten gegenüber herkömmlichen Betonen durch verringerten Materialverbrauch bereits wieder kompensiert werden kann. Betrachtet man Bauwerke ganzheitlich über deren gesamte Lebensdauer, so liegt die Vermutung nahe, aufgrund der geringeren

Erhaltungskosten sogar preiswerter zu bauen als mit herkömmlichen Betonen. Die Wildbrücke in Völkermarkt aus Abbildung 2.2 stellt hierzu ein gutes Beispiel dar, wie mit dem Einsatz von faserverstärktem UHPC extrem langlebige Bauwerke zu realisieren sind. Weiters stellt UHPC, mit seiner hohen Festigkeit auch einen geeigneten Baustoff für stark beanspruchte Industrieböden oder Maschinenfundamente dar.

Aufgrund des hohen Feinstoffgehalts besteht zudem die Möglichkeit, extrem feine Oberflächenstrukturen zu erzeugen. Dieser Aspekt wurde in den letzten Jahren auch zunehmend von Künstlern und Designern entdeckt, sodass die Herstellung von Betonmöbeln wie Tischen und Stühlen ebenso realisiert wurde, wie Sanitärobjekte oder Küchenarbeitsplatten. Aber auch kleine Objekte, wie Schmuckschatullen oder ähnliches werden mittlerweile aus ultrahochfestem Beton hergestellt [26].

Ein Beispiel für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von ultrahochfestem Beton ist eine Skulptur in Hagen, welche aus ebendiesem gefertigt wurde und in Abbildung 2.10 dargestellt ist.



Abbildung 2.10: Betonskulptur in Hagen [27]

Weiters sind in Abbildung 2.11 filigrane Betonobjekte abgebildet, die *Stangl* [28] im Zuge seiner Arbeit herstellen konnte.



Abbildung 2.11: Von *Stangl* hergestellte Objekte aus UHPC [28]

2.2 Der Mischprozess

Unter Mischen versteht man im Wesentlichen den Vorgang, verschiedene zunächst trockene Stoffe unterschiedlicher Größe in ein homogenes Gemisch zu vereinigen. Wobei der Mischprozess neben dem Zerkleinern und Trennen zu den ältesten mechanischen Verfahren der Geschichte gehört.

Beim Mischen von UHPC müssen die einzelnen Stoffe nach Wasserzugabe durch erzwungene Platzwechselfvorgänge von einem Partikelgemisch in eine Suspension überführt werden [29]. Das Ziel einer Mischung ist die gleichmäßige Verteilung aller Stoffkomponenten, wobei man von einer homogenen Mischung spricht, wenn alle Komponenten gleichmäßig verteilt sind [15].

Beim Mischen von Normalbeton ist die Wasserkonzentration relativ hoch, sodass das trockene Korngemisch nach Wasserzugabe rasch in eine flüssige Suspension umgewandelt wird.

Aufgrund der sehr geringen W/Z -Werte steht bei ultrahochfestem Betonen üblicherweise nicht genug Wasser zur Verfügung, um die einzelnen Partikel in Wasser zu dispergieren. Hier sind daher hohe Mischleistungen notwendig, um eine ausreichende Homogenisierung zu ermöglichen. Grundsätzlich kann UHPC jedoch mit allen herkömmlichen Zwangsmischern gemischt werden. Da aber speziell kleine Partikel, wie beispielsweise Mikrosilica, zur Bildung von Agglomeraten neigen, und diese nur durch sehr hohe Mischleistungen vollständig aufgebrochen werden können, empfiehlt es sich Intensivmischer zu verwenden, um die Wirkungsweise der bei UHPC eingesetzten feinen Pulver, wie beispielsweise Mikrosilica optimal auszunutzen. Die Betonqualität hängt somit auch von der Werkzeuggeschwindigkeit und einem damit verbundenen stärkeren Energieeintrag ab [26] [29] [15] [1].

Werden vor der Zugabe von Wasser und Fließmittel die Feststoffe gesondert trocken gemischt und ein sogenannter „Prämix“ (verkaufsfertige Mischung) hergestellt, so wird zwischen Trockenmischvorgang und Nassmischvorgang unterschieden. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Trennung zwischen Nass- und Trockenmischvorgang vorgenommen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Trockenmischzeiten auf die Frischbeton- sowie die Festbetoneigenschaften bei gleichbleibender Nassmischdauer zu untersuchen. Zusätzlich werden die Auswirkungen von zwei unterschiedlichen Mixern ausgewertet. In der vorliegenden Arbeit wurde ein konventioneller Hobart Mischer eingesetzt, während in den Arbeiten von *Mayrhofer* [1], und *Sacherl* [2] jeweils ein Eirich Intensivmischer zum Einsatz kam. Ansonsten wurde aber ein identer Versuchsablauf gewählt, um eine entsprechende Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen zu gewährleisten.

2.2.1 Unterschiedliche Mischvorgänge

Grundsätzlich werden beim Mischen zwei unterschiedliche Mechanismen unterschieden: die Dispersion, die im Wesentlichen den Vorgang zufälliger Platzwechsel einzelner Stoffkomponenten beschreibt, und die Konvektion, bei der das gesamte Material fortlaufend geteilt und nach einem Platzwechsel wiedervermengt wird. Die beiden Mechanismen werden in Abbildung 2.16 dargestellt.

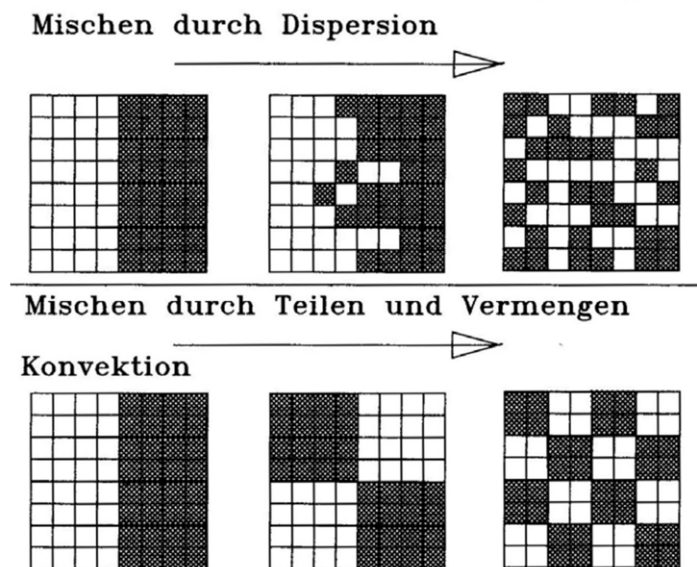


Abbildung 2.12: Unterscheidung Dispersion und Konvektion [30]

Neben dem Mischen können sich bei zu langer Mischdauer auch Entmischungsvorgänge einstellen. Diese Entmischung kann mit verschiedenartigen Bewegungsmustern der Einzelkomponenten begründet werden, die von unterschiedlichen Eigenschaften wie Dichte, Größe, Form, Anziehung und Reibung abhängig sind. Ein Beispiel wäre eine Entmischung durch Vibration, bei der die größeren Partikel aufschwimmen, während die kleineren Partikel zum Durchsickern neigen [26] [29] [15] [1].

2.2.2 Mischgüte

Die Mischgüte, also der Grad der Vermischung, stellt als messbare Größe das Qualitätskriterium für Mischungen dar. Die erreichte Homogenität hängt hauptsächlich von folgenden Größen nach [31] ab:

- Maschinelle Einflussgrößen: z.B. Werkzeuggeometrie und Bautyp
- Betriebseinflussgrößen: z.B. Füllgrad und Drehfrequenz
- Produkteinflussgrößen: z.B. Viskosität und Löslichkeit
- Umgebungseinflussgrößen: z.B. Temperatur und Druck.

Das optimale Zusammenwirken dieser Parameter sorgt somit für eine gute Mischgüte, wobei absolute Homogenität bei Feststoffgemischen grundsätzlich nicht erreichbar ist [15].

Die Bestimmung der Mischgüte erfolgt über eine Probenentnahme, wobei an möglichst vielen verschiedenen Stellen Proben entnommen werden sollten. Die aus der Untersuchung und Auswertung der Proben resultierende Abweichung von der erwarteten Konzentration kann anschließend durch die Varianz σ^2 nach Formel [3-4] beschrieben werden, wobei N_g die Anzahl der Proben darstellt, in die die Gesamtheit der Mischung unterteilt wird, x_i die Konzentration der einzelnen Proben beschreibt und p den zu erreichenden Sollwert darstellt.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_g} \sum_{i=1}^{N_g} (x_i - p)^2 \quad [2-5]$$

Da in den allermeisten Fällen aber nur Teile der Mischung untersucht werden, bietet sich die Ermittlung der Stichprobenvarianz S^2 nach Formel [2-6] an. Bei unbekanntem Sollwert kann der Wert μ durch den arithmetischen Mittelwert der Einzelkonzentrationen ersetzt werden.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \text{ mit } \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [2-6]$$

Dabei steigt die Mischungsqualität bei kleiner werdender Varianz naturgemäß an und stellt somit die Mischgüte dar. Eine zusätzliche Beurteilungsmöglichkeit bietet der Variationskoeffizient V nach Formel [2-7], der sich aus der Stichprobenvarianz und dem arithmetischen Mittel errechnet [15].

$$V = \frac{\sqrt{S^2}}{\mu} \quad [2-7]$$

2.2.3 Mischertypen

Im Bereich der Mischtechnik muss zwischen einer Vielzahl unterschiedlicher Geräte zur Homogenisierung von Beton unterschieden werden. Die grundlegendste Unterscheidung erfolgt dabei zwischen Chargenmischern und kontinuierlichen Mixchern [32].

Bei Chargenmischern erfolgt der Betrieb periodisch. Diese werden mit Mischgut befüllt und mischen dieses eine gewisse Zeit lang, ehe sie wieder entleert und neu befüllt werden. Hierbei ist auf eine angemessene Mischdauer zu achten, da bei zu langem Mischen die Gefahr von Entmischungsprozessen gegeben ist [32].

Bei kontinuierlichen Mixchern erfolgt eine stetige Mischgutzufuhr, sodass große Mengen gleichartiger Mischungen hergestellt werden können. Der Vorteil liegt hier in der wesentlich höheren Produktionsrate, da die Stehzeiten während der Befüllung und der Entleerung wegfallen. Da die Zusammensetzung von Beton aber aufgrund der erforderlichen Eigenschaften stets variiert, ist der Einsatz von kontinuierlichen Mixchern in der Baupraxis eher selten [32].

Für die Herstellung von Beton kommen im Wesentlichen mechanische Mischer zum Einsatz. Der Mischenergieeintrag erfolgt dabei beispielsweise über Schnecken, Rührer, Wirbler oder Knetschaufeln. Dabei kann man grundsätzlich zwischen Freifallmischern und Zwangsmischern unterscheiden. Bei Freifallmischern rutscht das Mischgut mehr oder weniger zufällig ab und vermischt sich so. Für die Herstellung von ultrahochfestem Beton ist diese Mischform allerdings nicht geeignet. Hier muss der Mischprozess in Zwangsmischern erfolgen, wobei grundsätzlich jeder Zwangsmischer für die Herstellung von UHPC geeignet ist. In diesen Mixchern wird das Mischgut zwangsweise bewegt, wobei der Eintrag der Mischenergie über ein Mischwerkzeug erfolgt. Eine Sonderstellung unter den Zwangsmischern nehmen hier Intensivmischer ein, wie sie in der Arbeit von *Mayrhofer* [1] und *Sacherl* [2] zur Anwendung kamen. Mit einem vergleichsweise sehr hohen Mischleistungseintrag kann eine sehr gute Betonqualität erzielt werden, wobei die Mischdauer im Vergleich zu herkömmlichen Zwangsmischern wesentlich verkürzt ausfallen kann. Für die Herstellung des Mischguts im Zuge dieser Arbeit wurde ein herkömmlicher Hobart Planetenmischer, wie er für die Zementprüfung nach ÖNORM EN 197-1 vorgesehen ist, eingesetzt.

2.2.3.1 Hobartmischer

Herkömmliche Hobart Mischer, wie sie für die Zementprüfung eingesetzt werden, stellen mechanische Planetenmischer dar. Hierbei steht der Mischbehälter, eine Schüssel aus nichtrostendem Stahl mit einem Fassungsvermögen von rund 5l, still und ist starr mit dem Mischergestell verbunden. Das Mischwerkzeug fährt langsam durch das Mischgut und dreht sich

sowohl um seine eigene Achse, als auch in einer Planetenbewegung um die Schüsselachse, wobei die beiden Drehrichtungen gegenläufig sind. In Abbildung 2.13 sind die Abmessungen des für die Zementprüfung vorgesehenen Flachrührers dargestellt, welcher auch für die Versuche zu dieser Arbeit verwendet wurde. Der Eintrag der Mischenergie erfolgt bei diesem Mischsystem hauptsächlich über Schubkräfte [33].

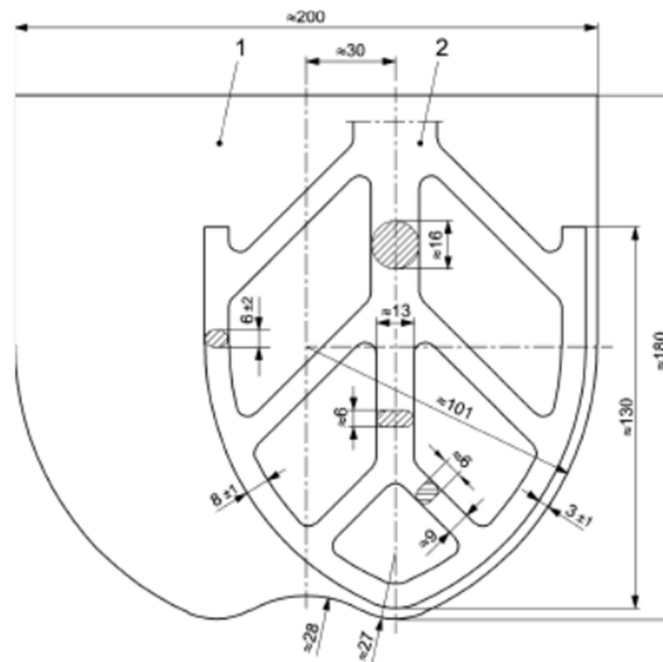


Abbildung 2.13: Abmessungen Rührwerk eines Hobart Mixers [33]

2.2.3.2 Intensivmischer

Ein häufig verwendeter Intensivmischer der Firma *Eirich* sowie dessen Mischprinzip sind in Abbildung 2.14 dargestellt. Dabei drehen sich sowohl der Wirbler als auch der Mischbehälter selbst. Zusätzlich ist der Mischbehälter schräggestellt, sodass das Mischgut zum Mischwerkzeug transportiert wird. Die dabei entstehende Materialbewegung ist durch Wurfkräfte, Fliehkräfte und dem freien Fall gekennzeichnet [15].

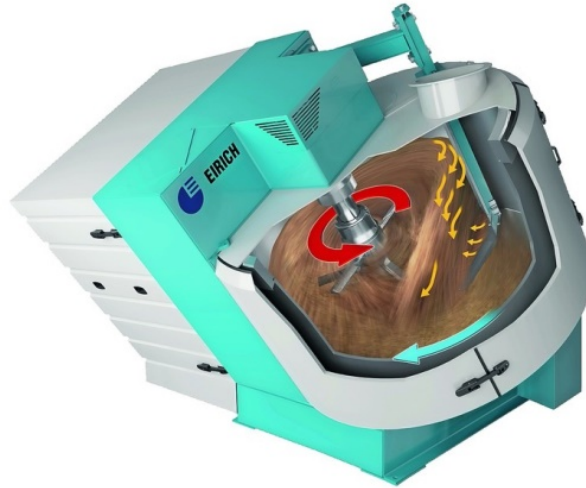


Abbildung 2.14: Mischprinzip eines Intensivmischers der Firma Eirich [34]

In Abbildung 2.14 erkennt man, dass der Mischbehälter das Mischgut mit seiner Drehbewegung nach oben transportiert, von wo es wieder zurück auf das Mischwerkzeug fällt. Zusätzlich sorgt ein Wandabstreifer für eine gute Mischgutzufuhr zum Wirbler. Über diese Mischtechnik ist es möglich, innerhalb jeder Umdrehung 100% des Mischgutes umzuwälzen [15].

2.3 Rheologie

Die Rheologie beschreibt die mechanische Reaktion eines Stoffes auf eine einwirkende Kraft, dessen Resultat immer eine Deformation ist, also entweder eine Verdrängung oder eine Verformung des Körpers darstellt. Sie beschreibt also das Fließverhalten von Flüssigkeiten und das Deformationsverhalten von Festkörpern infolge äußerer Kräfte. Dabei werden auch Stoffe mit Fließgrenze, die strukturphysikalisch zwischen einem Feststoff und einer Flüssigkeit einzuordnen sind, behandelt. Diese verhalten sich bei geringer Krafteinwirkung wie elastische Festkörper, bei Überschreitung der Fließgrenze beginnen sie aber zu fließen [35].

Rheologische Eigenschaften stellen wichtige Kennwerte für plastische Baustoffe dar und beschreiben die Verarbeitbarkeit ebendieser. Speziell für UHPC ist die Verarbeitbarkeit ein zentrales Problem, weil UHPC nur sehr geringe W/B-Werte aufweist und somit ohne Zugabe von Fließmitteln nicht verarbeitbar wäre [35].

2.3.1 Beschreibung und Definition rheologischer Größen

Zur Erklärung des Fließ- und Deformationsverhalten wird in der Rheologie oft von laminaren Schichtenströmungen ausgegangen, wobei die oberste bewegte Schicht die darunterliegende Schicht über Scherkräfte in Bewegung versetzt. Voraussetzung für dieses Modell ist, dass keine turbulente, sondern eine laminare Strömung vorherrscht. Um dieses Verhalten zu beschreiben, werden

physikalische Größen, die den mechanischen Widerstand, die Verformung sowie die Verformungsgeschwindigkeit beschreiben, eingeführt. Das einfachste Modell zur Herleitung und Beschreibung dieser Größen stellt dabei das Zwei-Platten-Modell dar, bei dem sich ein Volumenelement zwischen zwei parallelen Platten befindet. In Abbildung 2.15 findet sich eine geometrische Darstellung dieses Modells [35] [36].

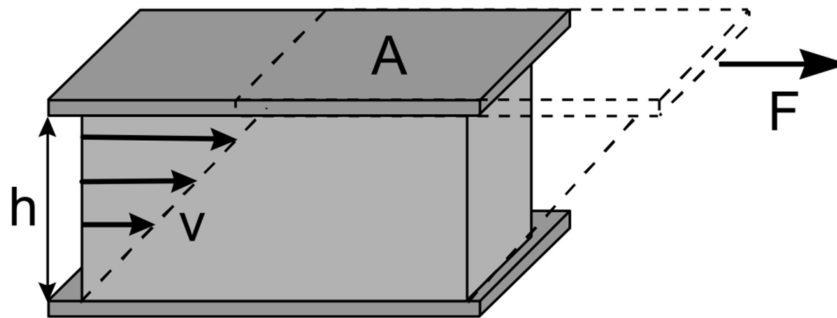


Abbildung 2.15: Zwei-Platten-Modell [36]

Unter der Annahme einer ebenen, laminaren und stationären Schichtenströmung (Abbildung 2.16) werden nun die physikalischen Parameter zur Beschreibung des Vorgangs definiert.

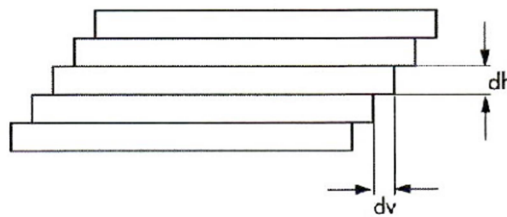


Abbildung 2.16: Ebene, laminare, Schichtenförmige Strömung einer Flüssigkeit [35]

Die Kraft F verschiebt die obere Platte mit der Fläche A und einem Abstand h zur unteren nicht bewegten Platte. Infolge von Kohäsionskräften verschiebt sich die darunterliegende Schicht ebenfalls. Dieser Vorgang wird als Scheren bezeichnet.

Die zugehörige Scherspannung τ [N/m^2 bzw. Pa] stellt dabei den Widerstand einer Substanz gegen die Bewegung dar und errechnet sich nach Formel [2-1] aus dem Quotienten der Scherkraft F [N] und der Scherfläche A [m^2].

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [2-8]$$

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] stellt das Geschwindigkeitsgefälle innerhalb der Flüssigkeit dar und errechnet sich nach Formel [2-9] aus dem Quotienten der Geschwindigkeit v [m/s] und dem Abstand h [m].

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad [2-9]$$

Die dynamische Viskosität η [Ns/m²] beschreibt die Zähigkeit einer Probe und ergibt sich nach Formel [2-10] aus dem Verhältnis von Schubspannung τ [N/m²] und Scherrate $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]. Diese ist speziell bei newtonschen Flüssigkeiten, bei denen die Viskosität eine stoffbezogene Konstante ist und nicht von der Scherrate abhängig ist, von Bedeutung.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [2-10]$$

Die Strukturviskosität beschreibt die Viskosität von Flüssigkeiten mit nicht newtonschem Fließverhalten, bei denen die Viskosität keine Stoffkonstante darstellt, sondern von der jeweiligen Scherrate abhängig ist. Sie errechnet sich nach Formel [2-11] aus dem Verhältnis von dynamischer Viskosität η [Ns/m²] zur Scherrate $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]. [35] [36].

$$\eta_{ST} = \frac{\eta}{\dot{\gamma}} \quad [2-11]$$

2.3.2 Unterscheidung newtonsches und nicht newtonsches Fluid

2.3.2.1 Newtonsches Fluid

Eine Flüssigkeit oder Gas, dessen Viskosität unabhängig von der Scherrate ist, stellt ein newtonsches Fluid dar. Die Schubspannung steigt linear mit der Scherrate an, die Viskosität wird aber nicht von der Scherrate beeinflusst und bleibt konstant. Sie stellt eine Stoffkonstante dar. Dieses newtonsche Fließverhalten ist in Abbildung 2.17 dargestellt.

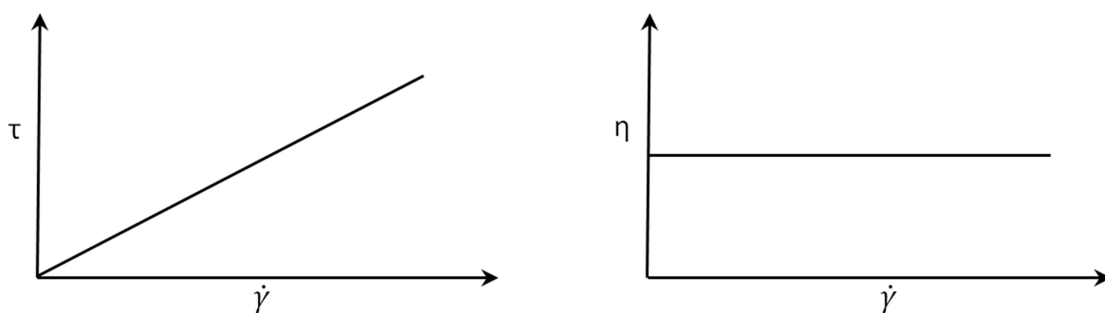


Abbildung 2.17: Newtonsches Fließverhalten [36]

Die Grundlage der Viskositätsmessung wurde also von Newton geschaffen, der die Beziehung zwischen Fließgeschwindigkeit und zugehöriger Kraft als proportionales Verhältnis festgestellt hat, und Formel [2-12] definierte, bei der sich die Schubspannung τ [N/m²] aus dem Produkt von Scherrate $\dot{\gamma}$ [s⁻¹] und dynamischer Viskosität η [Ns/m²] ergibt.

$$\tau = \dot{\gamma} * \eta$$

[2-12]

Eine Flüssigkeit mit newtonschem Fließverhalten wäre beispielsweise Wasser [37] [36].

2.3.2.2 Nicht newtonsches Fließverhalten

Flüssigkeiten, deren dynamische Viskosität zeit- oder scherratenabhängig ist, werden als nicht newtonsche Flüssigkeiten bezeichnet.

Die zeitunabhängigen Fließverhalten gliedern sich üblicherweise in folgende Kategorien:

- Substanzen mit strukturviskosem Fließverhalten
- Substanzen mit dilatantem Fließverhalten
- Substanzen mit Fließgrenze.

Die Zeitabhängigen Fließverhalten unterteilt sich in

- Thixotropie
- Rheopexie.

Zeitunabhängiges Fließverhalten

In Abbildung 2.18 werden die unterschiedlichen Formen zeitunabhängiger, nicht newtonscher Flüssigkeiten dargestellt und mit den Fließeigenschaften von newtonschen Flüssigkeiten verglichen. Das linke Diagramm vergleicht dabei den Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Scherspannung, das rechte Diagramm den Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität [1] [29].

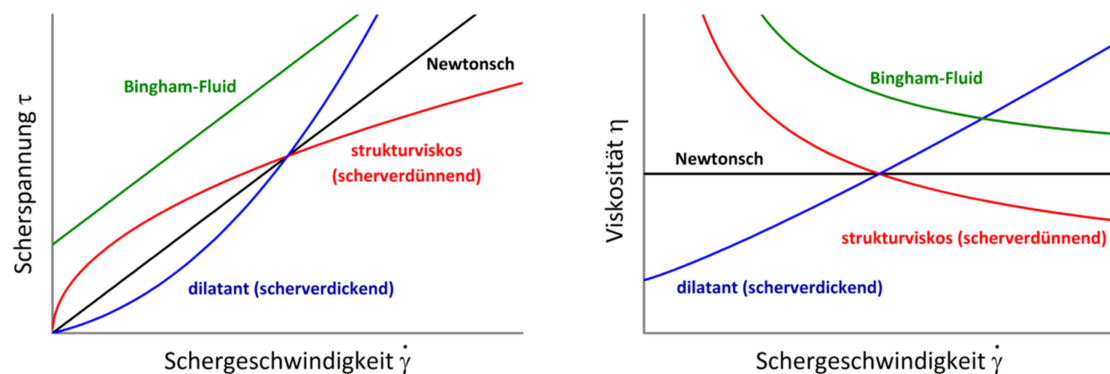


Abbildung 2.18: Nicht newtonsches Materialverhalten [38]

Bei Substanzen mit strukturviskosem Fließverhalten, oft auch als pseudoplastisches Fließverhalten bezeichnet, nimmt die dynamische Viskosität bei steigender Scherrate ab. Dies beruht vorwiegend auf der Auflösung von Agglomeraten durch die aufgebrachte Scherbeanspruchung, und auf

anfänglichen Verhakungen von Partikeln oder Makromolekülen, die ebenfalls bei steigender Scherbeanspruchung aufgelöst werden [36].

Substanzen mit dilatantem Fließverhalten setzen der Deformation mit wachsender Schergeschwindigkeit einen wachsenden Widerstand entgegen. Dies bewirkt eine Steigerung der Scherspannung sowie der Viskosität mit der Schergeschwindigkeit. Dieser Zustand wird bei Suspensionen vorgefunden, in denen durch die Scherbelastung ein Partikelzerfall verursacht wird, wodurch sich die spezifische Oberfläche erhöht und somit mehr Fläche durch die flüssige Phase benetzt werden muss [37] [36].

Substanzen mit Fließgrenze verhalten sich bis zu einer bestimmten Grenzschubspannung, der statischen Fließgrenze τ_0 , wie Festkörper. Wird dieser Wert erhöht, so verhalten sie sich wie Flüssigkeiten. Verhält sich das Fluid oberhalb der Fließgrenze wie ein newtonsches Fluid, so spricht man von einem Bingham'schen Fluid. Die zugehörige Scherspannungsfunktion ist in Formel [2-13] dargestellt [37].

$$\tau = \tau_0 + \eta * \dot{\gamma} \quad [2-13]$$

Die Scherspannung τ [N/m²] ergibt sich somit aus der statischen Fließgrenze τ_0 [N/m²] und dem Produkt aus Scherrate $\dot{\gamma}$ [s⁻¹] und dynamischer Viskosität η [Ns/m²].

Stoffe die nach dem Erreichen der Fließgrenze ein nichtlineares Fließverhalten aufweisen, also scherratenabhängig sind, werden beispielsweise mit dem Modell nach *Herschel* und *Bulkley* beschrieben [1] [36] [29].

Zeitabhängiges Fließverhalten

Der Abbau von inneren Strukturen in Fluiden durch äußere Krafteinwirkungen, und der vollständige Wiederaufbau nach Ende der Krafteinwirkung wird als Thixotropie A_{thix} bezeichnet, und stellt ein wichtiges zeitabhängiges rheologisches Phänomen für Beton und Zement dar. Ähnlich zum strukturviskosen Verhalten wird dies ebenfalls durch verhaken und verschlaufen der einzelnen Moleküle verursacht. Diese werden durch äußere Krafteinwirkungen aufgelöst und bauen sich nach Beendigung der Einwirkung wieder vollständig auf.

Bei rheoprexem Fließverhalten baut sich während der Schereinwirkung eine entsprechende Struktur auf, sodass der Scherwiderstand zunimmt und die Viskosität ansteigt. Dies stellt somit das Gegenteil der Thixotropie dar. Thixotropes und rheoprexes Materialverhalten werden in Abbildung 2.19 dargestellt [37] [36].

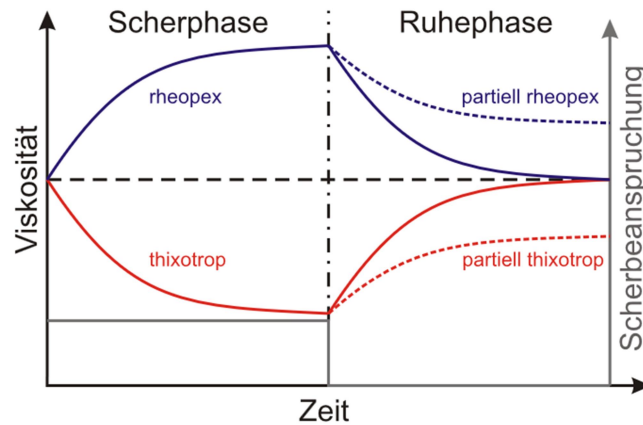


Abbildung 2.19: Thixotropie und Rheopexie [39]

2.3.3 Wechselwirkungen in Feinstoffsuspensionen

Rheologische Eigenschaften von Feinstoffsuspensionen, wie sie flüssiger UHPC darstellt, werden zu einem großen Teil durch interpartikuläre Wechselwirkungen sowie der Mikrostruktur der Suspension beeinflusst. In diesen Suspensionen ergeben sich zwischen den einzelnen Partikeln Interaktionen, sodass verschiedene Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln wirken und ein Partikelnetzwerk ergeben. Im Wesentlichen werden die rheologischen Eigenschaften von hochkonzentrierten Suspensionen bei geringen Scherraten hauptsächlich von den folgenden Wechselwirkungen beeinflusst:

- **Kolloidale Wechselwirkungen**
Durch Überlagerung der anziehenden *Van der Waals Kräfte*, elektrostatischen Wechselwirkungen sowie abstoßender sterischer Effekte, welche aus an der Partikel-Flüssigkeitsgrenze adsorbierten Polymeren resultieren, entstehen in Abhängigkeit des Abstandes der einzelnen Partikel anziehende oder abstoßende Kräfte.
- **Kontaktwechselwirkungen**
Kontaktwechselwirkungen entstehen durch Partikelkontaktpunkte und der daraus resultierenden Reibung. Die Packungsdichte hat wesentlichen Einfluss auf die Intensität von Kontaktwechselwirkungen. Außerdem wird sie von der Anzahl und der Geometrie der Kontaktpunkte wesentlich beeinflusst.
- **Kapillare Kräfte**
Durch die nur mehr partiell benetzten Partikeloberflächen kommt es zur Ausbildung von Flüssigkeitsbrücken zwischen den einzelnen Partikeln, wobei sich im flüssigen Medium ein Unterdruck ausbildet, sodass die beiden Partikel zueinander hingezogen werden [29].

2.3.4 Fließverhalten von Beton und Zementleim

Das Fließverhalten von Beton wird sowohl durch die disperse Phase (Feststoffe), also auch die dispergierende Phase (Wasser) beeinflusst, wobei die Intensität der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Wechselwirkungen wesentlichen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften haben. Diese werden wiederum von der zu benetzenden spezifischen Oberfläche der Feststoffe, der Partikelgrößenverteilung, Partikelform, Oberflächenladung und sterischen Wechselwirkungen beeinflusst.

In ihrem Fließverhalten vereinen hochkonzentrierte Zementsuspensionen sowohl Festkörpereigenschaften als auch Flüssigkeitseigenschaften. Sie verhalten sich näherungsweise wie ein in Abbildung 2.18 dargestelltes Bingham Fluid, wobei Sie sowohl eine statische Fließgrenze τ_0 , ab der sie zu fließen beginnen, als auch eine dynamische Fließgrenze τ_{0D} , an der der Fließvorgang endet, aufweisen. Weiters weist Beton ein thixotropes Materialverhalten auf, bei dem die Schubspannung bei zunehmender Scherbelastung abnimmt und nach Ende der Belastung wieder ihren Ausgangswert erreicht. Da dies aber neben den beschriebenen Wechselwirkungen auch von der einsetzenden Hydratation und einem damit einhergehenden Strukturbruch beeinflusst wird, lässt sich der Vorgang nicht beliebig oft wiederholen, sodass man bei Betonen von „unechter“ Thixotropie spricht [29].

2.4 Packungsdichte

Sowohl die Frischbetoneigenschaften als auch die Festbetoneigenschaften werden maßgeblich von der granulometrischen Zusammensetzung der Ausgangsstoffe beeinflusst. Um die Festigkeitseigenschaften sowie die Verarbeitbarkeit von UHPC zu verbessern, ist somit die Optimierung der Packungsdichte ein wesentliches Thema. Sie definiert den Anteil des Feststoffvolumens im Vergleich zum Gesamtvolumen und berechnet sich nach Formel [2-14], wobei ϵ den Hohlraumgehalt in Volumenprozent darstellt [26].

$$D = 1 - \frac{\epsilon}{100} \quad [2-14]$$

Durch einen geringeren Hohlraumanteil des Betons wird das Festbetongefüge wenig geschwächt, sodass Betone mit hohen Festigkeiten erzeugt werden können. Auch auf die Dauerhaftigkeit von Beton hat die Packungsdichte und somit der Hohlraumgehalt wesentlichen Einfluss.

Um eine hohe Packungsdichte zu erreichen, müssen die Hohlräume zwischen den jeweils größeren Partikeln jeweils mit kleineren Partikeln befüllt werden. Mit immer kleiner werden Partikeln nähert man sich der theoretisch maximalen Packungsdichte von $D = 1,0$. Definiert wird eine Packung über

die Anzahl der Partikelberührungspunkte, wobei jeweils mindestens 3 Berührungspunkte je Partikel vorhanden sein müssen. Dies wird in Abbildung 2.20 dargestellt.

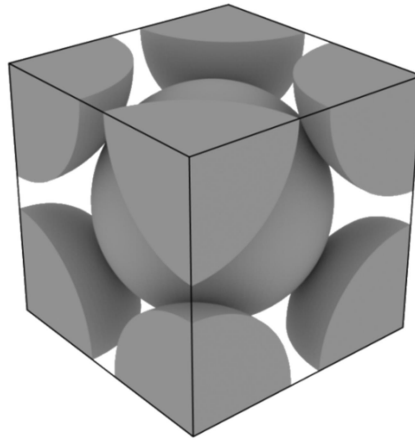


Abbildung 2.20: Packungsdichte [40]

Um eine optimale Packungsdichte zu erreichen, ist es somit wichtig, die Korngrößenverteilung gut abzustimmen. Durch die Wahl möglichst weitgestufter Sieblinienverläufe sind feinere Partikel zur Füllung der Hohlräume zwischen größeren Partikeln vorhanden. Die Korngrößenverteilung der gesamten Partikelmischung hat somit einen großen Einfluss auf die Packungsdichte. Am folgenden Beispiel nach [41] soll die Auswirkung der Korngrößenverteilung und des Mischungsverhältnisses auf die Packungsdichte erläutert werden: Zwei unterschiedlich feine Quarzmehle, Q1 mit einem mittleren Korndurchmesser von $2,9\mu\text{m}$ und Q2 mit $42\mu\text{m}$ weisen mit 47- und 48,6 Vol.-% in etwa gleiche Packungsdichten auf. Bei Variation der Mischverhältnisse dieser beiden Mehle ändert sich die Packungsdichte stetig, wobei eine maximale Packungsdichte von 54 Vol.-% bei einem Mischungsverhältnis von 30 zu 70 erreicht wird. Die Auswirkungen der Verhältnisvariation ist in Abbildung 2.21 dargestellt.

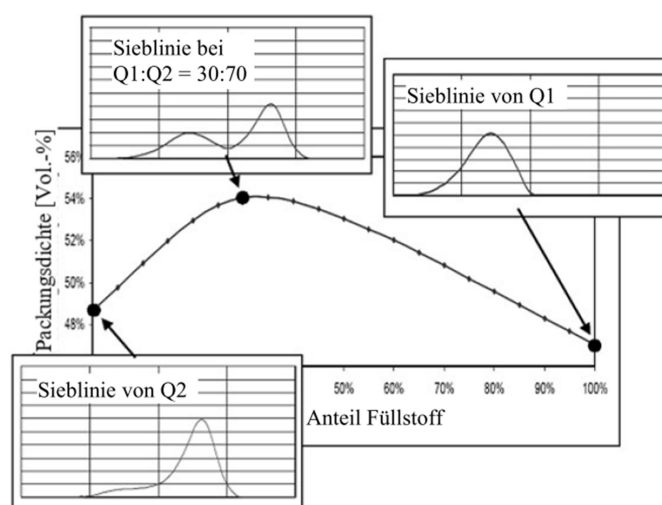


Abbildung 2.21: Variation des Mischungsverhältnisses zweier Quarzmehle und Auswirkung auf die Packungsdichte [41]

In Abbildung 2.21 zeigt sich, dass die Zugabe von größeren Partikeln die Packungsdichte bis zu einem gewissen Punkt, in diesem Fall bei 30% Volumenanteil, erhöht, ehe eine weitere Zugabe die Packungsdichte wieder verringert. Grund dafür sind zwischenpartikuläre Kräfte, die bei feinen Komponenten eine dichtere Zusammenlagerung verhindern.

Bei Beton sorgt die Zugabe von Feinteilen für eine Erhöhung der Gefügedichte, was darauf zurückzuführen ist, dass die größere Oberfläche der feineren Partikel die Wasserfilmdicke um die einzelnen Körner verringert, wodurch die zu überbrückende Distanz zwischen den einzelnen Körnern für die Hydratationspunkte abnimmt.

Grundsätzlich sorgt eine hohe Packungsdichte für eine hohe Festigkeit und eine gute Dauerhaftigkeit, allerdings nimmt die Viskosität mit zunehmend dichter Packung ab, sodass hinsichtlich der Einbaubarkeit auf eine nicht zu dichte Packung zu achten ist. Der Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Viskosität ist in Abbildung 2.22 nach [41] dargestellt, wobei wiederum auf das Modell der beiden unterschiedlichen Quarzmehle aus Abbildung 2.21 zurückgegriffen wird [26] [28].

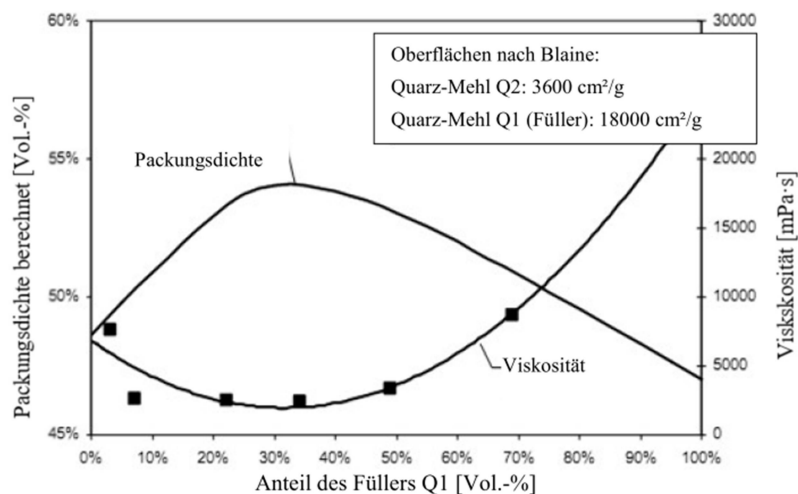


Abbildung 2.22: Zusammenhang zwischen Viskosität und Packungsdichte nach [41]

Die Berechnung der Packungsdichte für die vorliegende Arbeit erfolgte nach dem Modell von *Schwanda*. Mit diesem lässt sich der Hohlraumgehalt von beliebigen Korngrößenverteilungen berechnen. Wesentlicher Unterschied zu anderen Modellen ist, dass anstelle von Einzelbestandteilen eine ganz bestimmte Kornverteilungsfunktion zugrunde gelegt wird. Das Prinzip hinter diesem Modell besteht darin, dass ein Korngemisch in beliebig viele Korngrößen unterteilt wird. Anschließend werden diese der Reihe nach miteinander kombiniert und die Hohlraumanteile dieser Mischungen ermittelt, wobei der Hohlraumgehalt der größeren Körner jeweils von kleineren Körnern aufgefüllt werden [26] [28]. Eine detaillierte Darstellung des Modells nach *Schwanda* sowie den zugrundeliegenden Formeln findet sich in den Arbeiten von *Kirnbauer* [26] und *Stangl* [28].

3 Vorversuche und Versuchsplanung

Im Zuge dieser Arbeit wird der Einfluss der Trockenmischdauer, sowie der Einfluss von unterschiedlichen Trockenmischungsaltern auf Rheologie und Festigkeit von ultrahochfestem Beton untersucht. Aus diesem Grund ist es zielführend alle anderen Parameter, wie Betonrezeptur, Nassmischdauer, Mischintensität, sowie Geräte und Versuchsabläufe im Vorfeld festzulegen und während den Versuchsreihen nicht mehr zu verändern, um entsprechend vergleichbare Versuchsergebnisse zu erhalten.

Aus diesem Grund wurden im November 2017 mehrere Vorversuche durchgeführt, um zum einen mit den verwendeten Geräten vertraut zu werden und zum anderen praktikable Versuchsabläufe festzulegen. Die Hauptversuche wurden anschließend von Dezember 2017 bis März 2018 in den institutseigenen Laborräumen in der Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien durchgeführt. Angelehnt wurden die Versuchsabläufe an die im Zuge der Arbeit von *Santi* [42] durchgeführten Versuche.

Um eine anschließende Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Mischermodellen zu ermöglichen, wurden die Versuchsabläufe mit den Arbeiten von *Mayrhofer* [1] und *Sacherl* [2] abgestimmt, welche zeitgleich am Institut entstanden sind.

Im folgenden Kapitel 3.1. werden die Vorversuche beschrieben, ehe in Kapitel 3.2. die Grundlagen und Rahmenbedingungen der Hauptversuche erörtert werden.

3.1 Vorversuche

Im Zuge der Vorversuche im November 2017 wurden fünf Mischungen hergestellt, um zum einen den Mischablauf und zum anderen die zeitliche Abfolge der Versuchsauswertung festzulegen. Dabei wurden zwei verschiedene Hobart Mischer zur Homogenisierung des Betons verwendet und die Mischdauer zwischen 6,0min und 12,0min variiert, sowie die an den Geräten zur Verfügung stehenden Mischgeschwindigkeitsstufen laut Tabelle 3.3. unterschiedlich eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Leistungsmessung zur Erfassung der eingebrachten Mischleistung durchgeführt. Aufgrund der zu geringen Leistungszufuhr bei den verwendeten Hobart Mixern konnte hier aber keine Tendenz abgeleitet werden, wann das Mischgut „fertig“ gemischt ist, sondern nur eine nahezu konstante, nicht aussagekräftige Leistungskurve ermittelt werden. Aus diesem Grund wurde diese bei den Hauptversuchen nicht mehr durchgeführt.

Als optimales Mischprofil stellte sich das in Tabelle 3.4 beschriebene Konzept dar. Mit diesem wird eine gute Durchmischung erzielt, sodass auch die rheologischen Messungen brauchbare Ergebnisse liefern. Die Mischrezeptur sowie die übrige Auswertung der Versuche konnte für die Hauptversuche

unverändert herangezogen werden und wurde, wie im folgenden Kapitel 343.2. beschrieben, durchgeführt, sodass diese im vorliegenden Kapitel nicht weiter erläutert werden müssen.

3.2 Versuchsplanung und Aufbau

3.2.1 Zusammensetzung der Mischung

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Betonrezeptur nicht variiert, sondern konstant gehalten. Die verwendete Mischung setzt sich aus den Feststoffkomponenten Zement, Quarzsand, Quarzmehl und Microsilica, sowie aus den Flüssigkomponenten Wasser, Fließmittel, Konsistenzhalter und Entlüfter zusammen. Die Eigenschaften der Einzelkomponenten wurden bereits in Kapitel 2.1.2. eingehend erläutert, sodass an dieser Stelle keine weitere Beschreibung mehr erfolgt. Die im Zuge dieser Arbeit verwendete Rezeptur ist in Tabelle 3.1. für einen Kubikmeter Beton dargestellt.

Tabelle 3.1: Verwendete Betonrezeptur für 1m³ UHPC

Komponente	Produktbezeichnung	Hersteller	Masse
[-]	[-]	[-]	[kg]
Zement	CEM I 52,5 N - SR 0 WT 38 C ₃ A-frei	Lafarge	689,11
Quarzsand	Quarzsand H 32	Quarzwerke GmbH	927,50
Quarzmehl	Quarzmehl 10000	Quarzwerke GmbH	344,56
Mikrosilica	Microsilica Grade 940-U	Elkem ASA	172,28
Fließmittel	MasterGlenium ACE 430	BASF GmbH	31,01
Konzistenzhalter	MasterSure 911	BASF GmbH	13,78
Entlüfter	MasterFinish DF 370	BASF GmbH	1,00
Wasser	-	-	160,28
Summe			2.339,52

Eine Darstellung der einzelnen Komponenten für eine Mischung von 40dm³ Mischung findet sich in Abbildung 3.1 aus [1], wobei die Flüssigkomponenten bereits zu einem sogenannten Flüssigprämix vermischt wurden.



Abbildung 3.1: Darstellung der Einzelkomponenten für eine 40dm³ UHPC Mischung [1]

3.2.2 Herstellung des Prämix

Um den Einfluss des Alters der Trockenmischung, sowie unterschiedlicher Trockenmischdauern auf die Eigenschaften von UHPC zu ermitteln, wurden zu Beginn der Versuche Trockenmischungen hergestellt, welche im Folgenden als Prämix bezeichnet werden. Dabei wurden neun Chargen zu je 40dm³ Trockenmischung eingewogen und homogenisiert. Dieser Prämix wurde anschließend sowohl für die Versuche zu dieser Arbeit, als auch in den Arbeiten von *Mayrhofer* [1] und *Sacherl* [2] verwendet, sodass der Vergleich unterschiedlicher Mischertypen möglich ist.

Hergestellt wurde der Trockenprämix mit dem Intensivmischer R08W der Firma *Eirich*, welcher ein Fassungsvermögen von 75dm³ bzw. 120kg hat. Das zugrundeliegende Mischprinzip wird in Kapitel 2.2.3.2 erläutert, wobei sich sowohl die Umdrehungsgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs in einem Bereich von 38 bis 752 U/min bzw. 0,7 bis 13,8 m/s, als auch die Umdrehungsgeschwindigkeit des Mischbehälters in einem Bereich zwischen 3 und 55 U/min bzw. 0,1 und 2,2 m/s frei regeln lässt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit des Querstrommischens, bei dem sich Mischwerkzeug und Mischbehälter jeweils in entgegengesetzte Richtung bewegen.

Für die Herstellung des Trockenprämixes wurden eine Drehgeschwindigkeit von 428 U/min bzw. 7,9m/s des Wirblers, sowie eine Drehgeschwindigkeit von 27 U/min bzw. 1,1 m/s des Mischbehälters gewählt, wobei die Drehrichtungen gleichgerichtet waren. Der verwendete Mischer ist in Abbildung 3.2 dargestellt: *Eirich R08W Intensivmischer zur Herstellung des Prämix*.



Abbildung 3.2: Eirich R08W Intensivmischer zur Herstellung des Prämix

Insgesamt werden neun verschiedene Trockenmischdauern zwischen 90 Sekunden und 480 Minuten untersucht, wobei sich die Mischdauer jeweils in etwa verdoppelt. Die hergestellten Trockenmischungen sind in Tabelle dargestellt.

Tabelle 3.2: Variation der Trockenmischdauer

Nummer	Mischung	Trockenmischdauer	Mischphasenunterteilung
[-]	[-]	[min]	[-]
1	M1,5min	1,5	1 x 1,5min
2	M3min	3	1 x 3min
3	M7min	7	1 x 7min
4	M15min	15	1 x 15min
5	M30min	30	1 x 30min
6	M60min	60	1 x 60min
7	M120min	120	1 x 120min
8	M240min	240	2 x 120min
9	M480min	480	2 x 240min

Um eine Überhitzung von Mischer und Mischgut zu verhindern, wurden Mischungen, die länger als 120min dauern, jeweils in mehrere einzelne Mischphasen unterteilt. Zwischen den Mischvorgängen wurde jeweils 120min Pause bei geöffnetem Mischer gemacht, um das Mischgut und den Mischer abzukühlen. Anschließend wurden die einzelnen Mischungen in luftdicht verschlossenen Kübeln bei Raumtemperatur eingelagert.

Um die Gefahr von Fehlern beim Einwiegen von einzelnen Flüssigkomponenten zu minimieren, wurde zusätzlich auch ein Flüssigprämix hergestellt. Da die Flüssigkeitsmenge je Mischung nur rund

250g betrug, hätten, speziell beim Verflüssiger, bereits geringe Messfehler im Zehntelgrammbereich nicht unerhebliche Auswirkungen auf die erzielten Betoneigenschaften. Aus diesem Grund wurden mehrere Chargen Flüssigprämix zu je rund 16,5 Liter hergestellt. Dadurch konnten alle Versuche mit exakt derselben Flüssigmischung durchgeführt werden, sodass eine gute Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsergebnisse gewährleistet wird. Zusätzlich wurde dadurch das Risiko von möglichen Ungenauigkeiten beim Einwiegen eliminiert.

3.2.3 Versuchsaufbau

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche unterteilen sich grundsätzlich in drei einzelne Versuchsserien, im Zuge derer jeweils unterschiedlich lange gelagerter Trockenprämix verwendet wurde. Die untersuchten Trockenbetonalter waren 0 – 72 Stunden, vier Wochen und neun Wochen, wobei in jedem Prämixalter jeweils neun einzelne Versuche durchgeführt wurden, in denen die neun unterschiedlich lange trocken gemischten Prämixe verwendet wurden. Insgesamt ergeben sich somit 27 Versuche.

In den folgenden Unterkapiteln soll der generelle Versuchsaufbau und Ablauf erläutert werden, wobei sich jeder Versuch grundsätzlich in den Nassmischprozess, die Messung der rheologischen Kennwerte, die Untersuchung der Partikelgrößenverteilung, sowie die anschließenden Druck- und Biegezugprüfungen nach 24 Stunden und 28 Tagen einteilt.

3.2.3.1 Der Mischprozess

Das Nassmischen der UHPC Proben erfolgte mit dem konventionellen Hobart Mischer „Mortar Mixer“ der Firma *MBW Inc.*, welcher in Abbildung 3.3 dargestellt ist.



Abbildung 3.3: Hobartmischer "Mortar Mixer"

Das zugrundeliegende Mischprinzip dieses Planetenmischers wird in Kapitel 2.2.3.1. erläutert, wobei der Energieeintrag hauptsächlich über Scherkräfte erfolgt. Der verwendete Flachrührer dreht sich dabei sowohl um seine eigene Achse als auch in einer Planetenbewegung um die Mischbehälterachse. Dabei stehen zwei Mischgeschwindigkeiten zur Verfügung, welche in Tabelle 3.3. beschrieben werden.

Tabelle 3.3: Unterschiedliche Mischgeschwindigkeiten Mortar Mixer

Stufe	Bezeichnung	Rotation	Planetenbewegung
[-]	[-]	[min ⁻¹]	[min ⁻¹]
1	Niedrige Geschwindigkeit	140 ± 5	62 ± 5
2	Hohe Geschwindigkeit	285 ± 10	125 ± 10

Im Zuge der Vorversuche wurde versucht, ausschließlich mit der schnellen Stufe zu mischen. Durch die hohe Geschwindigkeit wurden aber zu Mischbeginn, bei dem sich lediglich das Trockenmischgut im Mischbehälter befand, große Teile des Mischguts aus dem Mischbehälter geschleudert, wodurch sich der W/B-Wert verändern würde. Um dies zu verhindern, wurde zu Anfang die langsamere Mischstufe verwendet. Der gesamte Mischablauf ist in Tabelle 3.4. dargestellt.

Tabelle 3.4: Mischablauf

Abschnitt	Beschreibung	Dauer	Geschwindigkeitsstufe
[-]	[-]	[s]	[-]
1	Trockenmischen	30	1
2	Flüssigkeitszugabe	30	1
3	Slow	60	1
4	Fast	540	2
	Summe	660	

Nach einem 30sekundigen Aufmischvorgang erfolgte die Zugabe des Flüssigprämix bei möglichst gleichbleibender Geschwindigkeit innerhalb von 30 Sekunden. Um einen Auswurf von Mischgut aus dem Behälter zu vermeiden, folgte anschließend noch ein 60sekundiger Mischabschnitt auf Geschwindigkeitsstufe eins, ehe anschließend noch neun Minuten auf Geschwindigkeitsstufe zwei gemischt wurde. Insgesamt ergibt sich also ein elfminütiger Mischprozess mit einer effektiven Nassmischdauer von zehn Minuten.

Da für die rheologischen Messungen rund 0,20 dm³ Mischgut und für die zur Druck- und Biegezugprüfung benötigten Prüfprismen rund 1,50dm³ Mischgut erforderlich sind, werden in Summe rund 1,8dm³ Mischgut pro Versuch benötigt. Im Zuge der Vorversuche hat sich allerdings

herausgestellt, dass bei dieser Menge relativ viel Material aus dem Mischbehälter geschleudert wird, sodass das Mischgut auf zwei Mischungen mit je $1,20\text{dm}^2$ aufgeteilt wurde, wobei mit beiden Mischungen sowohl die rheologischen Untersuchungen als auch die Partikelgrößenmessung vorgenommen wurde. Zusätzlich wurde jeweils ein Prismenprüfsatz zu je 3 Prismen für die Festbetonprüfungen betoniert. Da sich die Messung der Mischleistungseintrags, wie im vorangegangenen Kapitel 3.1. erläutert, als wenig aussagekräftig erwiesen hat, wurde auf ebendiese verzichtet. Im Zuge der Auswertung wurden jeweils Mittelwerte der Messgrößen aus den beiden hergestellten Mischungen verwendet.

3.2.3.2 Ermittlung der rheologischen Kennwerte

Gerätebeschreibung

Zur Ermittlung der rheologischen Kennwerte statische Fließgrenze, dynamische Fließgrenze, plastische Viskosität und Thixotropie wurde das Rotationsrheometer Viskomat NT der Fa. *Schleibinger Geräte*, dargestellt in Abbildung 3.4, verwendet.

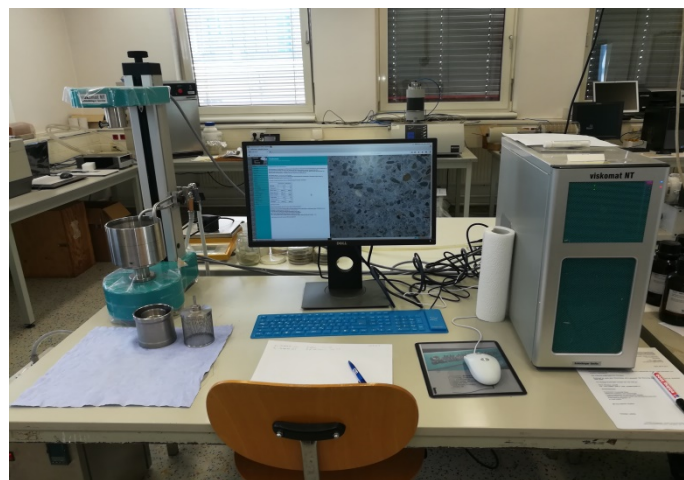


Abbildung 3.4: Verwendetes Rotationsrheometer Viskomat NT

Dieses beruht auf dem Prinzip, dass ein Messpaddel bzw. eine Messzelle in eine Suspension eintaucht und anschließend mit einer vordefinierten Rotationsgeschwindigkeit um seine eigene Achse gedreht wird. Dabei wird Winkelgeschwindigkeit und Widerstandsdrehmoment über die Zeit gemessen und in Diagrammen ausgegeben. Mit diesen lassen sich im Anschluss die eingangs erwähnten rheologischen Größen berechnen.

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurden mit einer Doppelringspalt-Messzelle nach *Vogel* [43] durchgeführt. Diese taucht in ein Ringspaltgefäß ein, welches mit einem Überlaufgefäß in der Mitte ausgestattet ist, sodass eine gleichbleibende Füllhöhe erzielt werden kann. Aufgrund der Messung von absoluten Drehmomenten im Rotationsrheometer ist dies wichtig, um für die Umrechnung auf Scherspannungen eine gleichbleibende Füllhöhe bzw. Scherfläche

gewährleisten zu können. Die Messzelle besteht aus einem filigranen, zylinderförmigen Streckmetallgitter und durchfährt mit diesem die Suspensionsflüssigkeit im Messbehälter, wobei die eigentliche Bewegung vom Messbehälter ausgeführt wird und die Messzelle starr und unbeweglich mit dem Gerät verbunden bleibt. Der Messbehälter wird über drei Justierschrauben zentriert und steht in einem Wasserbad, welches über einen externen Kryostaten konstant auf 25°C temperiert wird. Dies sorgt für eine gleichbleibende Suspensionstemperatur über alle Versuche.

Gesteuert wird das Gerät über einen separaten PC. Der einstellbare Drehzahlbereich liegt im Bereich von 0,001 – 400 U/min. Gemessen werden dabei Drehmomente im Bereich von 0 bis 500 Nmm. Bei größeren Widerständen schaltet das Gerät automatisch ab, um Schäden an der Mechanik zu verhindern. In Abbildung 3.5 sind Geometrie und Querschnitt von Messzelle und Messgefäß dargestellt.

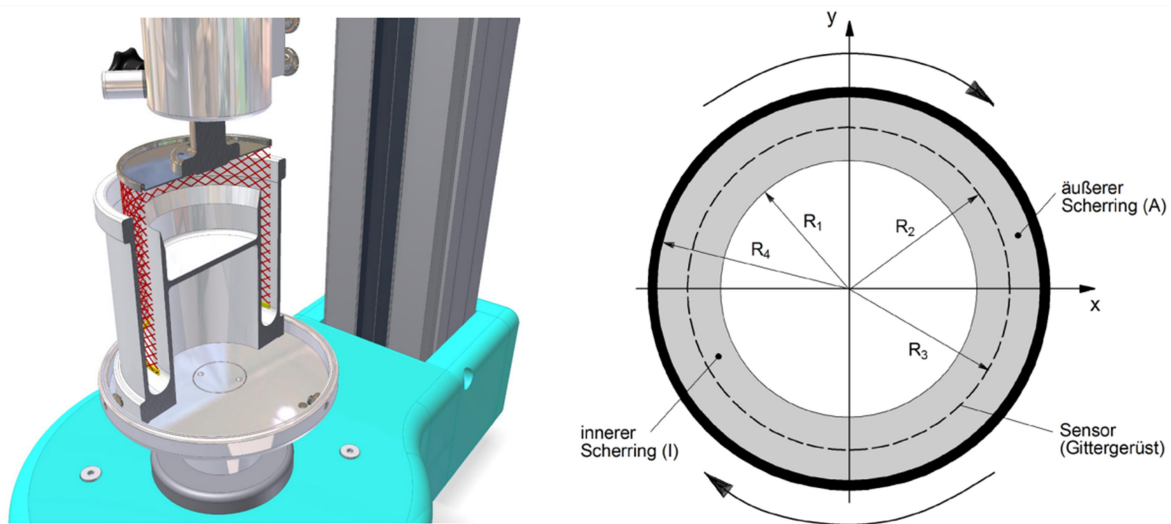


Abbildung 3.5: Darstellung von Doppelringspaltzelle und Messgefäß und Geometrie der Messzelle [29]

Über die definierte Messzellengeometrie mit den unterschiedlichen Radien R_1 , R_2 , R_3 und R_4 , sowie der festgelegten Winkelgeschwindigkeit Ω [s^{-1}] lässt die zugehörige Scherrate $\dot{\gamma}$ nach [43] wie folgt berechnen:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{s} * \left[\frac{1 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1} + \frac{1 + \left(\frac{R_4}{R_3}\right)^2}{\left(\frac{R_4}{R_3}\right)^2 - 1} \right] \quad [3-1]$$

Für die verwendete Korbzelle mit einem Durchmesser von 71,2mm und einer Probenhöhe von 64,8mm lässt sich die Scherrate $\dot{\gamma}$ vereinfachend über den Umrechnungsfaktor $c_s = 0,584$ wie folgt berechnen, wobei nun nicht mehr die Winkelgeschwindigkeit, sondern die Umdrehungsgeschwindigkeit N [U/min] in die Formel eingeht [29]:

$$\dot{\gamma} = c_s * N \quad [3-2]$$

Die Umrechnung des gemessenen Widerstands Drehmoments T in eine Schubspannung erfolgt Definitionsgemäß nach folgender Gleichung [43]:

$$\tau = \frac{T}{L * \pi * D_3^2} * \frac{1}{c_k} = 0,967 * T \quad [3-3]$$

Dabei stellt c_k einen Kalibrierungsfaktor dar, in den Randeinflüsse, gerätespezifische Eigenheiten sowie die Spaltgeometrie eingehen.

Ermittlung der Rohdaten

Unmittelbar nach dem Nassmischvorgang wird das Ringspaltgefäß mit Frischbeton gefüllt und in einem gesonderten Laborraum über die Stellschrauben im Gerät zentriert. Dieser Vorgang dauert in etwa 3:00 Minuten, sodass als Zeit zwischen Mischende und Rheometerstart eine Zeit von 3:30 Minuten festgelegt wurde. Zusätzlich dauert es anschließend noch ca. 40 Sekunden bis die Messzelle vollständig in die Suspension eingetaucht ist und das eingegebene Scherprofil startet. Für die Wahl eines geeigneten Scherratenprofils wurde die Arbeit von *Mazanec* [29] als Grundlage gewählt und die darin vorkommenden zwei Scherprofile zur Vereinfachung in ein einzelnes zusammengefügt. Der erste Teil des Scherratenprofils, welcher in Abbildung 3.6. dargestellt ist, dient dabei zur Ermittlung der dynamischen Fließgrenze, sowie der plastischen Viskosität η .

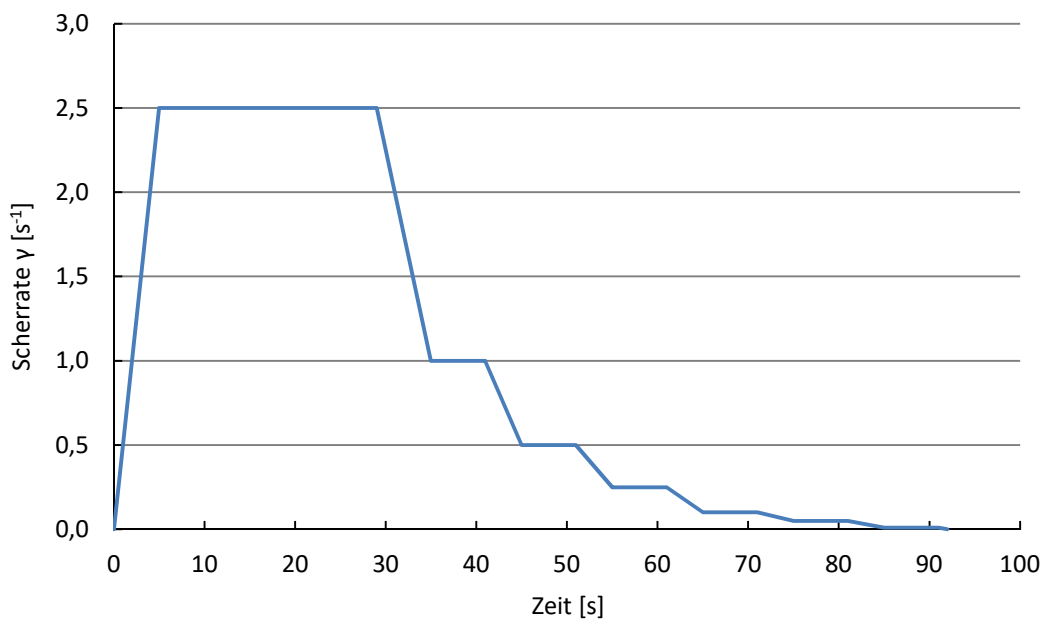


Abbildung 3.6: Scherratenprofil 1

Das erste Plateau dient dabei dem Aufbrechen von bereits gebildeten Hydratationsstrukturen und wird als Vorschere bezeichnet. Anschließend wird die Scherrate stufenweise reduziert und die plastische Viskosität für die Scherraten 2,5; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 und 0,01 s⁻¹ bestimmt. Eine tabellarische Darstellung des Scherprofils mit den nach Formel [3-2] ermittelten Gerätedrehzahlen findet sich nachfolgend in Tabelle 3.5.

Tabelle 3.5: Scherratenprofil 1

Zeit	Drehzahl N	Scherrate $\dot{\gamma}$
[s]	[U/min]	[s⁻¹]
0	0,000	0,00
5	4,281	2,50
29	4,281	2,50
35	1,712	1,00
41	1,712	1,00
45	0,856	0,50
51	0,856	0,50
55	0,428	0,25
61	0,428	0,25
65	0,171	0,10
71	0,171	0,10
75	0,086	0,05
81	0,086	0,05
85	0,017	0,01
91	0,017	0,01
92	0,000	0,00

Die Auswertung erfolgt ebenfalls in Anlehnung an die Arbeit von *Mazanec* [29], wobei aus den Messwerten T und N nach den Formeln [3-2] und [3-3] auf die geräteunabhängigen Parameter $\dot{\gamma}$ und τ rückgerechnet wird. Dafür werden die Mittelwerte des Drehmomenten Widerstands der einzelnen Plateaus berechnet. Nach dem in Kapitel 2.3 beschriebenen *Bingham* Modell lassen sich, unter Einbeziehung der zugehörigen Scherrate $\dot{\gamma}$ die Werte für die dynamische Fließgrenze τ_{0D} und die plastische Viskosität η bestimmen. Das erste Plateau wird dabei um den Vorschereprozess bereinigt, sodass der Mittelwert der gemessenen Scherspannung lediglich über die letzten 1,5 Sekunden gebildet wird.

Im unmittelbar darauffolgenden zweiten Teil des Scherratenprofils, welches in Abbildung 3.7 dargestellt ist, wird die statische Fließgrenze τ_0 , sowie erneut die dynamische Fließgrenze τ_{0D} ermittelt, aus denen sich nach Formel [3-4] die Thixotropie berechnen lässt.

$$A_{thix} = (\tau_{0(t)} - \tau_{0D})/t_p \quad [3-4]$$

Diese stellt den in Kapitel 2.3.2.2. beschriebenen zeitabhängigen Teil des Fließverhaltens dar. Sie ergibt sich durch die erste Ableitung der statischen Fließgrenze über die Ruhezeit t_p [29].

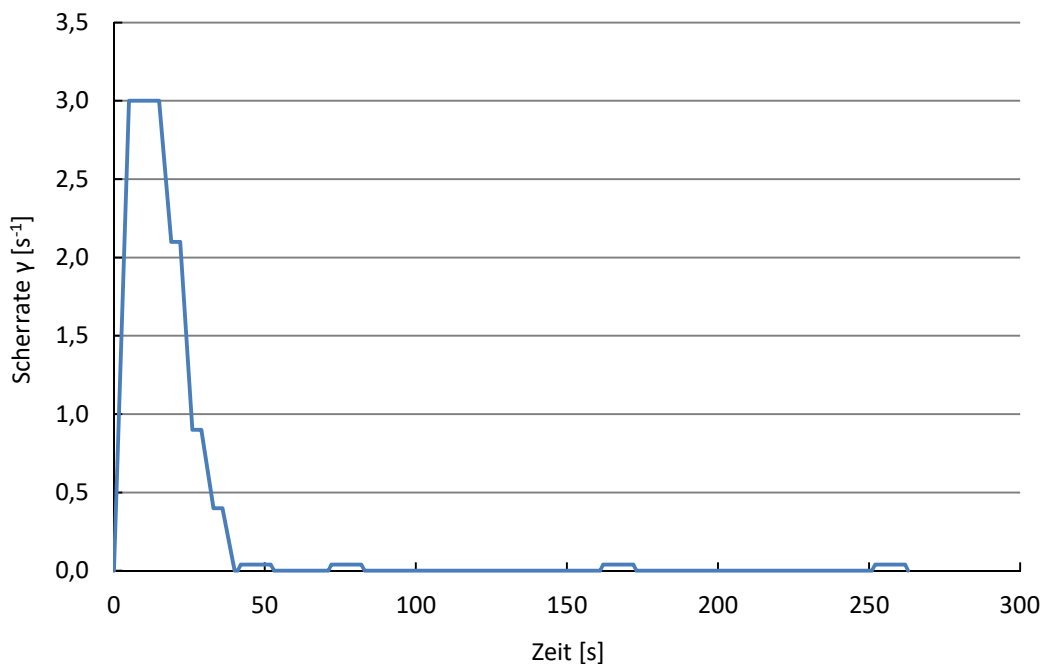


Abbildung 3.7: Scherratenprofil 2

Mittels dem zweiten Scherratenprofil wird, nach einem neuerlichen kurzen Vorschervorgang, die dynamische Fließgrenze für die Scherratenstufen 2,1; 0,9 und 0,4 s^{-1} ermittelt, ehe der nun folgende Strukturaufbau ermittelt wird. Das erfolgt in Abständen von 30, 120 und 210s, wobei die maximale Widerstandskraft, die benötigt wird, um die Messzelle durch die UHPC Suspension zu bewegen, bestimmt wird. Um lediglich Widerstände aus der Fließgrenze des UHPC zu erhalten, erfolgt dies bei einer relativ niedrigen Scherrate von 0,04 s^{-1} . Die Berechnung der geräteunabhängigen Parameter τ und $\dot{\gamma}$ erfolgt wiederum, analog zum Scherratenprofil 1, aus den Messwerten T und N, wobei das erste Plateau ebenfalls um den Vorschervorgang bereinigt wird und somit lediglich die letzten 0,5 Sekunden für die Ermittlung der Scherspannung herangezogen werden [29]. In der folgenden Tabelle ist das Scherratenprofil mit den zugehörigen Gerätedrehzahlen nochmals dargestellt.

Tabelle 3.6: Scherratenprofil 2

Zeit	Drehzahl N	Scherrate $\dot{\gamma}$
[s]	[U/min]	[s ⁻¹]
0	0	0
5	5,137	3
15	5,137	3
19	3,596	2,1
22	3,596	2,1
26	1,541	0,9
29	1,541	0,9
33	0,685	0,4
36	0,685	0,4
40	0	0
41	0	0
42	0,068	0,04
52	0,068	0,04
53	0	0
71	0	0
72	0,068	0,04
82	0,068	0,04
83	0	0
161	0	0
162	0,068	0,04
172	0,068	0,04
173	0	0
251	0	0
252	0,068	0,04
262	0,068	0,04
263	0	0

3.2.3.3 Ermittlung der Partikelgrößenverteilung

Zur Ermittlung der erzielten Packungsdichte wurde von jeder Mischung die Partikelgrößenverteilung gemessen. Dies erfolgte jeweils nach dem Start der rheologischen Messung mit einem Mastersizer 3000 der Firma *Malvern Panalytical* (Abbildung 3.8.). Dieses Gerät misst die Größe der Partikel

mithilfe von Laserbeugung. Es wird dabei die Intensität des gestreuten Lichts eines Laserstrahls gemessen, während dieser die jeweilige Probe durchdringt. Anhand dieser Daten wird dann die Größe der Partikel aus dem erzeugten Beugungsmuster berechnet [44].

Dabei werden kleine Mengen UHPC in einen mit destilliertem Wasser befüllten Einfüllbehälter gegeben bis eine Geräteabschattung von rund 12 bis 15% erreicht ist. Anschließend wird die Probe von einer rotierenden Schraube zerstreut, sodass die Körner frei durch das optische Messwerk fließen können.

Insgesamt werden pro Messlauf fünf Messdurchgänge durchgeführt und die erhaltenen Korngrößenverteilungen anschließend gemittelt.



Abbildung 3.8: Verwendetes Partikelgrößenmessgerät Mastersizer 3000

Die Auswertung der Daten und die Ermittlung der Packungsdichte erfolgt anschließend nach dem *Modell von Schwanda*. Mit diesem kann der Hohlraumgehalt von beliebigen Kornverteilungen berechnet werden. Neben der Korngrößenverteilung fließen die materialabhängigen Parameter k_0 , welcher die Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit der Partikel beschreibt, und w_0 , welcher die Reichweite der Teilchenbehinderung beschreibt, ein. Die Werte für diese Parameter wurden nach den Arbeiten von *Reschke* [45] und *Stangl* [28] mit $k_0=0,7$ und $w_0=2,0$ festgelegt. Die anschließende Berechnung der Packungsdichte erfolgt mit dem von *Stangl* [28] entwickelten Excel- Programm. Für eine detaillierte Beschreibung des zugrundeliegenden Formelapparats sei ebenfalls auf die Arbeit von *Stangl* [28] verwiesen.

3.2.3.4 Ermittlung der Festbetoneigenschaften

Biegezugfestigkeit

Die Ermittlung der Biegezugfestigkeit erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 [33] an 40x40x160mm großen Prismen. Dabei kam eine Prüfmaschine der Firma *Zwick*, mit einer maximalen Prüflast von 250 kN zum Einsatz, wobei jeweils nach 24 Stunden und 28 Tagen ein Prismensatz mit je 3 UHPC Prismen untersucht wurden.

Die Messung erfolgte dabei mittels 3-Punkt Biegeversuch bei einer Stützweite von 100mm und einer Laststeigerungsrate von 50N/s für 24 Stunden alten Probekörper und einer Laststeigerungsrate von 100N/s für 28 Tage alte Probekörper. Die Prüfkongfiguration ist in der folgenden Abbildung 3.9. dargestellt.



Abbildung 3.9: Verwendete Prüfmaschine für Biegezugversuche der Fa. Zwick

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsprüfung wurde ebenfalls in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 [33] durchgeführt, wobei dafür jeweils eine Bruchhälfte des Biegezugversuchs verwendet wurde. Die Prüfungen erfolgten mit einer Prüfmaschine der Firma *Toni Technik* mittels 40x40mm Druckplatten. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde mit 1N/mm²s für 24 Stunden alte Prismen und 3N/mm²s für 28 Tage alte Prismen gewählt, wobei die Last bis zum Bruch der Probe gesteigert wurde. In Abbildung 3.10 ist die Prüfkongfiguration der Druckfestigkeitsversuche dargestellt.



Abbildung 3.10: Verwendete Prüfmaschine für Druckversuche der Fa. Toni Technik

4 Versuche und Auswertung

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Versuche im Prämialter 0- 72h, vier Wochen sowie neun Wochen beschrieben. Dabei werden zuerst die Frischbetoneigenschaften, welche sich in rheologische Eigenschaften und Packungsdichte gliedern, und anschließend die Festbetoneigenschaften, welche sich in Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit gliedern, analysiert. In jedem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Prämialter separat betrachtet, ehe ein Vergleich über die unterschiedlichen Prämialter vorgenommen wird. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit mit den Ergebnissen von *Mayrhofer* [1] und *Sacherl* [2] verglichen, um so die Auswirkungen unterschiedlicher Mischertypen darzustellen.

4.1 Frischbetonprüfungen

4.1.1 Rheologische Eigenschaften

Im Zuge dieses Kapitels werden die mit dem Rotationsrheometer vorgenommenen Messungen ausgewertet und damit die rheologischen Kennwerte dynamische Fließgrenze τ_{0D} , Viskosität η sowie Thixotropie A_{thix} nach den Formeln in Kapitel 3.2.3.2 ermittelt. Als Grundlage der Auswertung dienen die Widerstandsdrehmomentenverläufe zu den einzelnen Proben.

4.1.1.1 Erste Versuchsreihe

Die Betonproben der ersten Versuchsreihe wurden mit 0-72h altem Trockenprämix hergestellt. In der folgenden Abbildung 4.1. werden die Scherspannungsverläufe der neun verschiedenen Trockenmischdauern, welche durch Scherprofil 1 hervorgerufen wurden, dargestellt. Diese bilden die Grundlage zur Berechnung der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} , sowie zur Viskosität η .

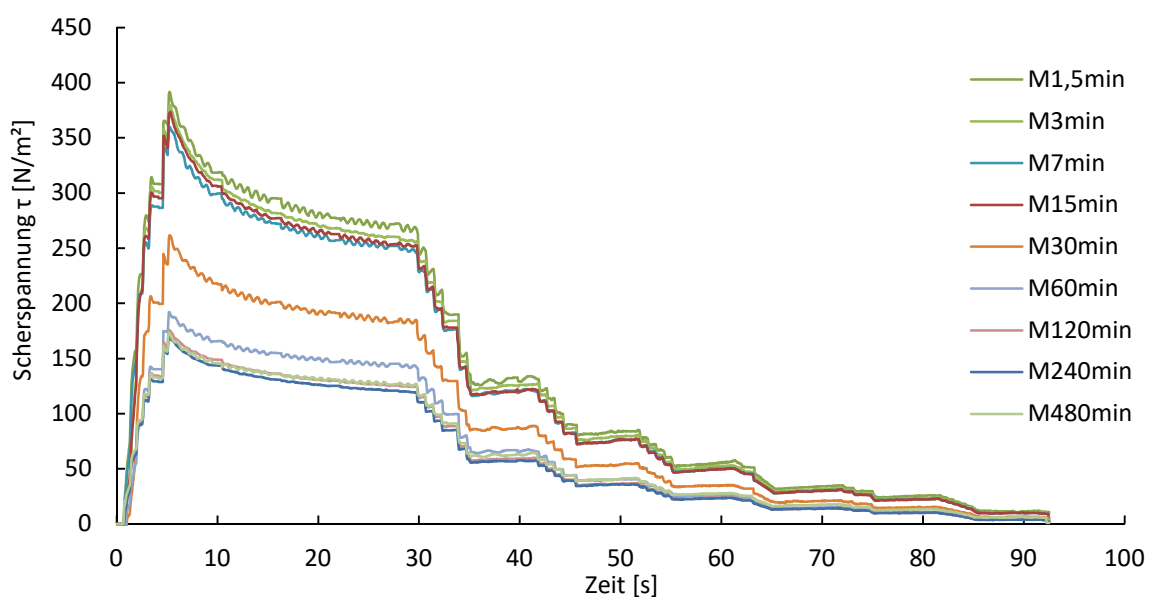


Abbildung 4.1: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 der 1. Versuchsreihe

Bereits bei Betrachtung der gemessenen Rohdaten lässt sich tendenziell erkennen, dass die Spannungen bei zunehmender Trockenmischdauer abnehmen, die Betonproben also fließfähiger, und somit besser verarbeitbar werden.

In der folgenden Abbildung 4.2. werden nun die ermittelten Scherspannungen τ über die Scherraten $\dot{\gamma}$ 2,5; 1,0; 0,5 und 0,25 aufgetragen, um mit Hilfe des *Bingham* Modells die plastische Viskosität sowie die dynamische Fließgrenze zu bestimmen.

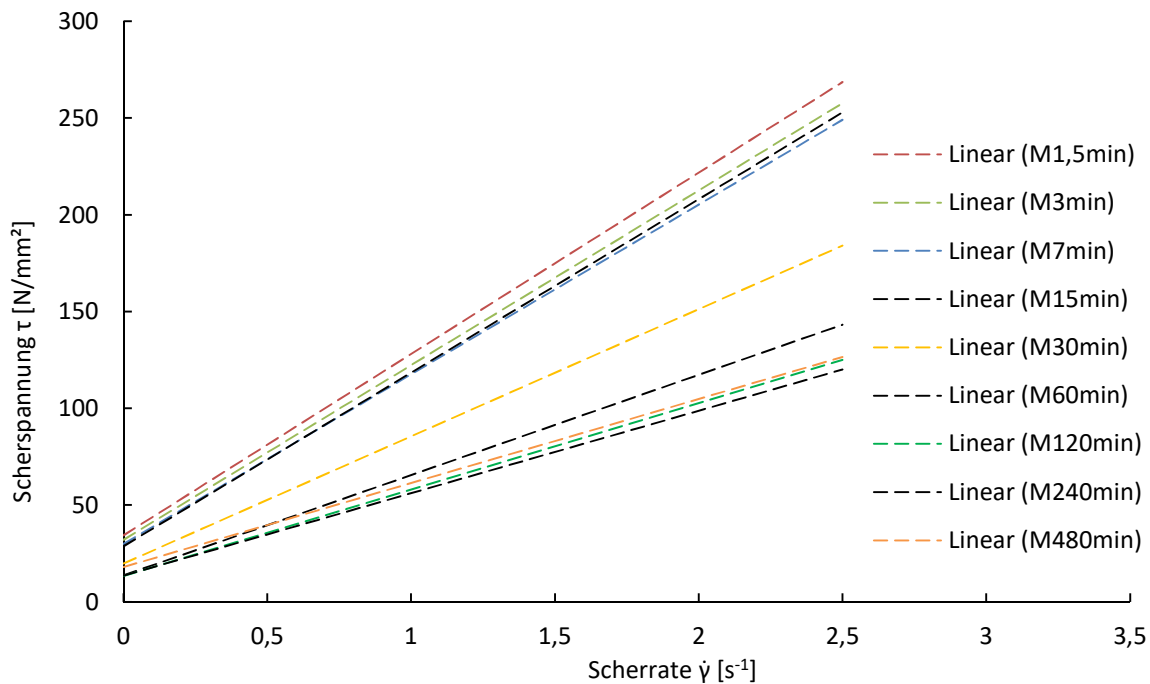


Abbildung 4.2: Linearisierte Fließkurven der 1. Versuchsreihe

Dabei zeigt sich grundsätzlich, dass sowohl die dynamische Fließgrenze, welche sich durch den τ -Wert am Null Punkt darstellt, als auch die Viskosität, welche durch die Steigung der einzelnen Geraden abgebildet wird, bei steigender Trockenmischdauer tendenziell abnehmen. Weiters zeigt sich, dass die beiden Werte nicht zwingend im selben Verhältnis zueinander stehen müssen. Dies ist beispielsweise bei der Mischung M480min ersichtlich, die im Bereich der dynamischen Fließgrenze eher im Bereich der 30 minütigen Mischung anzusiedeln ist, im Bereich der Viskosität aber eher der 480 minütigen Mischung ähnelt.

In der folgenden Abbildung 4.3. sind die ermittelten Werte für die dynamische Fließgrenze als Balkendiagramm über die unterschiedlichen Prämixalter graphisch dargestellt. Zum Vergleich werden dieselben Werte in Abbildung 4.4. als Liniendiagramm über eine logarithmische Zeitskala aufgetragen. Da jedoch die Mischdauer der einzelnen Datenpunkte so nicht mehr klar hervorgeht wird im Folgenden auf die Darstellung der Versuchsergebnisse in Form von Balkendiagrammen zurückgegriffen.

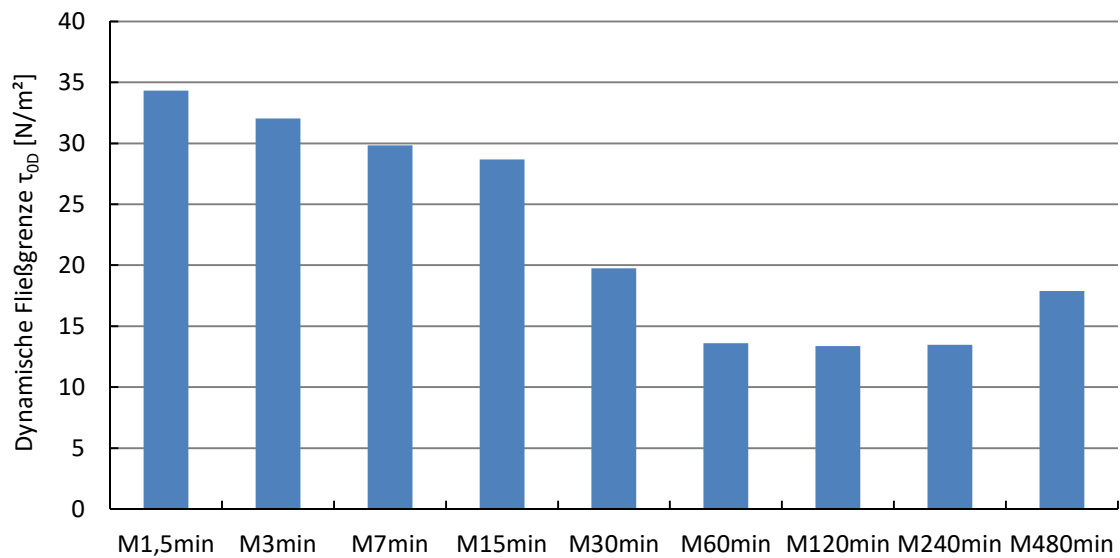


Abbildung 4.3: Dynamische Fließgrenzen der 1. Versuchsreihe

Hier lässt sich klar erkennen, dass die dynamischen Fließgrenzen der ersten Versuchsreihe bei zunehmender Trockenmischdauer abnehmen. Auffallend ist allerdings die Mischung M480min, die mit 17,89N/m² wesentlich höher als die vorhergehenden Mischungen liegt. Die Tatsache, dass die dynamischen Fließgrenzen der zweiten und dritten Versuchsreihe allerdings bei rund 9,00N/m² liegt, lässt vermuten, dass hier eine Messungenauigkeit vorliegt. Außerdem zeigt sich, dass die Mischungen bis 15 Minuten relativ geringe ähnliche dynamischen Fließgrenze aufweisen, im Bereich 15 – 60 Minuten große Unterschiede entstehen und anschließend nahezu konstante Werte gemessen wurden, speziell wenn man dem wesentlich höheren Wert für M480min als möglicher Messungenauigkeit nur geringe Aufmerksamkeit schenkt.

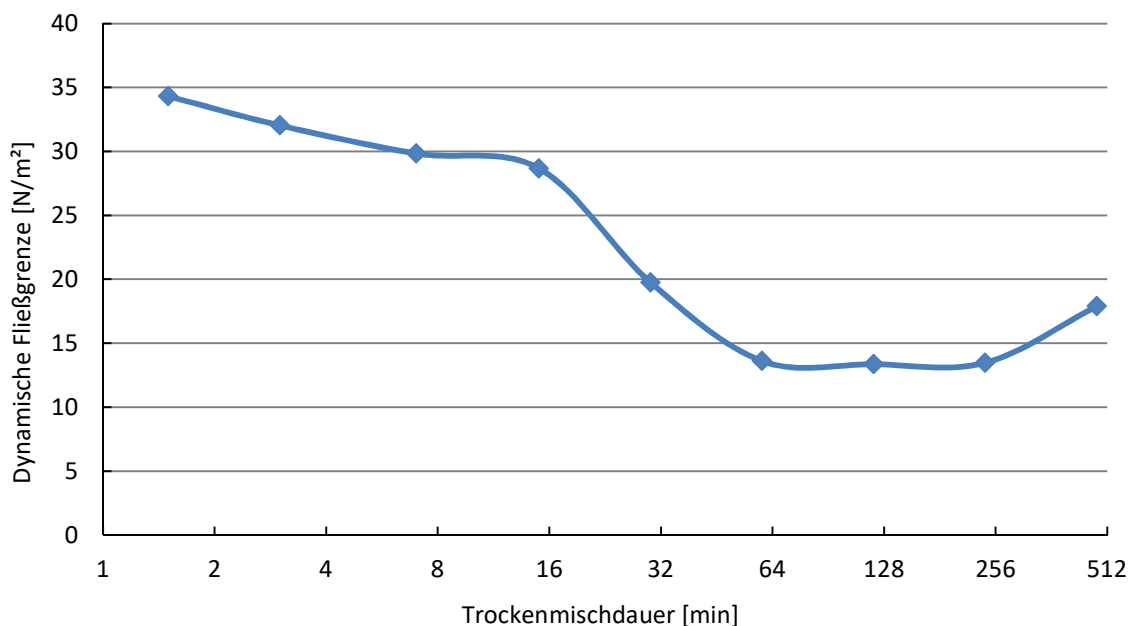


Abbildung 4.4: Dynamische Fließgrenzen der 1. Versuchsreihe in logarithmischer Darstellung

Die Entwicklung der Viskosität (Abbildung 4.5.) zeigt eine ähnliche Tendenz, lediglich die Proben mit einer Trockenmischdauer von 15 sowie 480 Minuten erfüllen diesen Trend mit leicht höheren Werten als die jeweilige Mischung davor nicht. Die Mischungen bis 15 Minuten weisen wiederum nur geringe Differenzen auf, ehe zwischen 15 und 60 Minuten eine klarer Abfall der Viskosität zu erkennen ist, um sich anschließend auf einen Wert um 40Ns/m^2 einzupendeln.

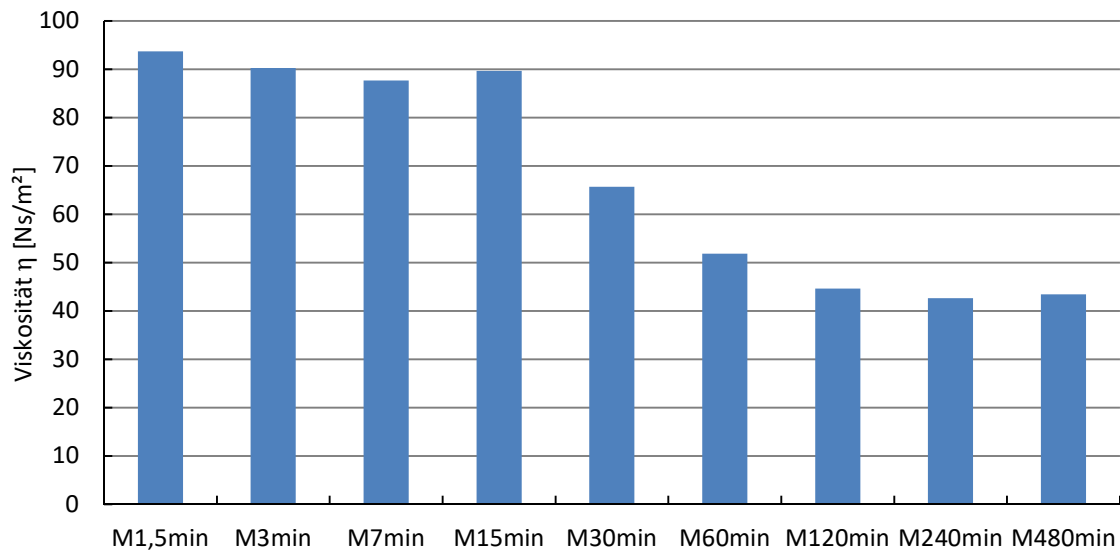


Abbildung 4.5: Viskosität der 1. Versuchsreihe

Direkt im Anschluss an Scherprofil 1 wurde Scherprofil 2 gestartet und die durch die Betonsuspension hervorgerufenen Drehmomentenwiderstände gemessen. Die ermittelten Scherspannungsverläufe der neun Betonproben sind in der folgenden Abbildung 4.6. zusammengefasst und dargestellt, wobei die Scherspannung analog zu Scherprofil 1 über die Trockenmischdauer abnimmt.

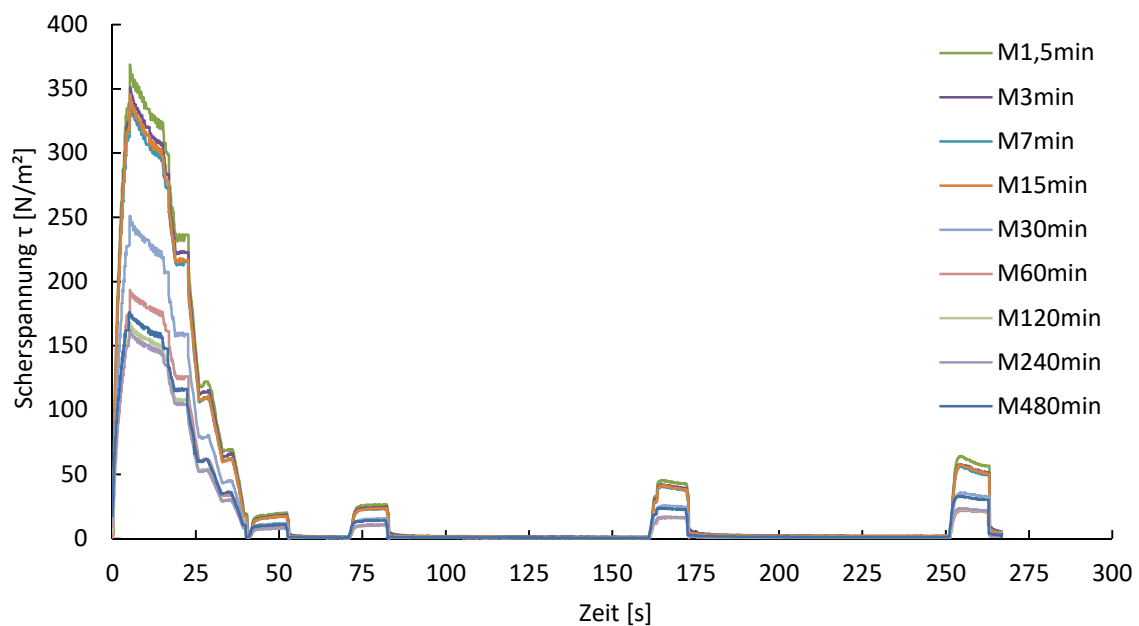


Abbildung 4.6: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 2 der 1. Versuchsreihe

Die ermittelten Scherspannungen werden nun über die Scherraten aufgetragen und die linearisierten Fließkurven in Abbildung 4.7 dargestellt. Mithilfe dieser lässt sich die Thixotropie A_{Thix} bestimmen.

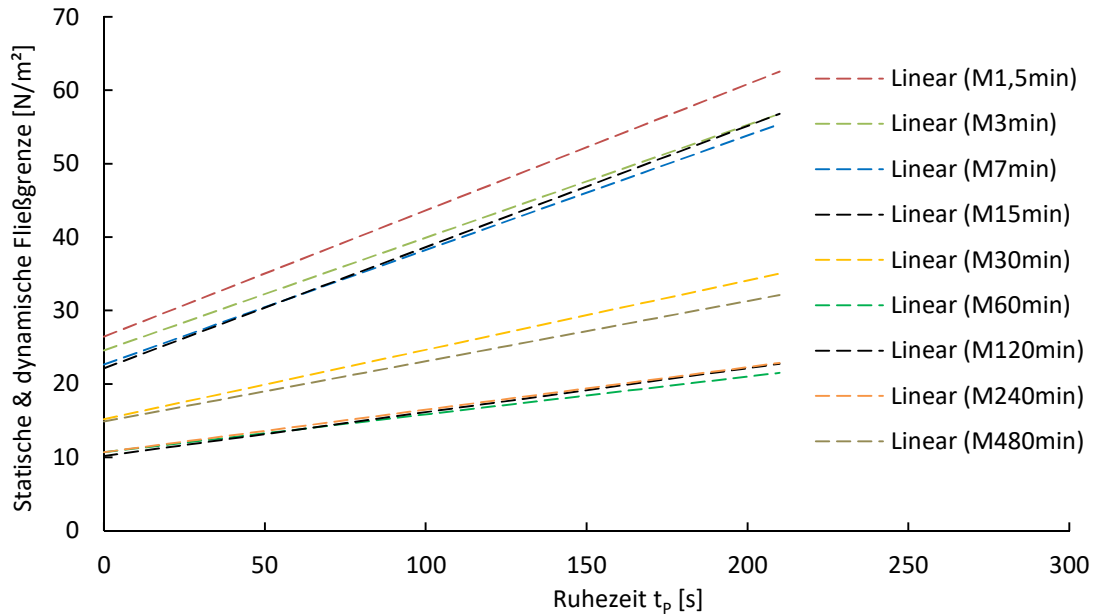


Abbildung 4.7: Linearisierte Fließkurven der 1. Versuchsreihe zur Bestimmung der Thixotropie

In diesen linearisierten Fließkurven stellt die Steigung der jeweiligen Geraden die Thixotropie A_{Thix} der einzelnen Proben dar. Über die dynamische Fließgrenze τ_{oD} wird diese aus der Ableitung der statischen Fließgrenze $\tau_{o(t)}$ nach Formel [3-4] errechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 4.8 dargestellt.

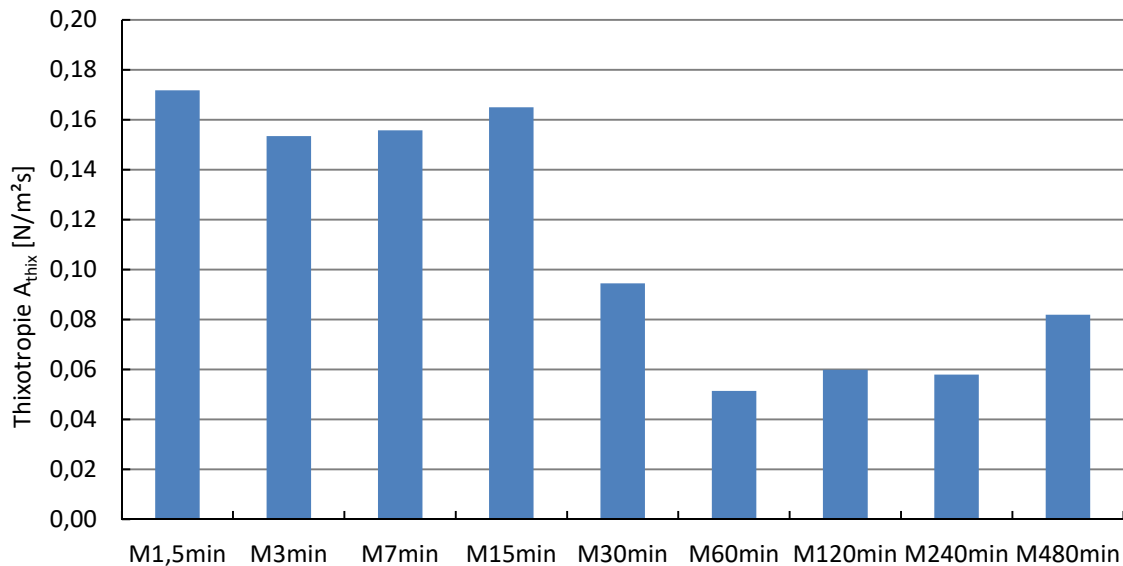


Abbildung 4.8: Thixotropie der 1. Versuchsreihe

Grundsätzlich liefert die Auswertung der Thixotropie einen ähnlichen Trend wie die dynamische Fließgrenze und die Viskosität, dieser ist jedoch weniger stetig. Die Proben werden hier annähernd in zwei Plateaus welche über die Proben von 1,5- bis 15min sowie 60- bis 480 Minuten reichen

unterteilt. In Tabelle 4.1 findet sich noch eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aus der ersten Versuchsreihe mit 0-72h altem Trockenprämix.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der 1. Versuchsreihe

Trockenmischdauer	dyn. Fließgrenze	Viskosität	Thixotropie
[-]	[N/m ²]	[Ns/m ²]	[N/m ² s]
M1,5min	34,31	93,70	0,172
M3min	32,03	90,27	0,154
M7min	29,83	87,68	0,156
M15min	28,67	89,69	0,165
M30min	19,75	65,72	0,094
M60min	13,60	51,83	0,051
M120min	13,36	44,63	0,060
M240min	13,47	42,63	0,058
M480min	17,89	43,47	0,082

4.1.1.2 Zweite Versuchsreihe

Im Folgenden werden die Proben der 2. Versuchsreihe, welche mit 4 Wochen altem Prämix hergestellt wurden, ausgewertet. Die Auswertung erfolgt dabei analog zum vorangegangenen Kapitel 4.1.1.1. Die Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 sowie die daraus resultierenden linearisierten Fließkurven sind in Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 grafisch dargestellt. Es zeigt sich, wie auch in Versuchsreihe eins, ein Abfallen der Scherspannung bei steigender Trockenmischdauer, allerdings wird dieser Verlauf erst ab der Mischung M30min stetig. Davor stellt sich diese Reihung nicht in der erwarteten Tendenz ein.

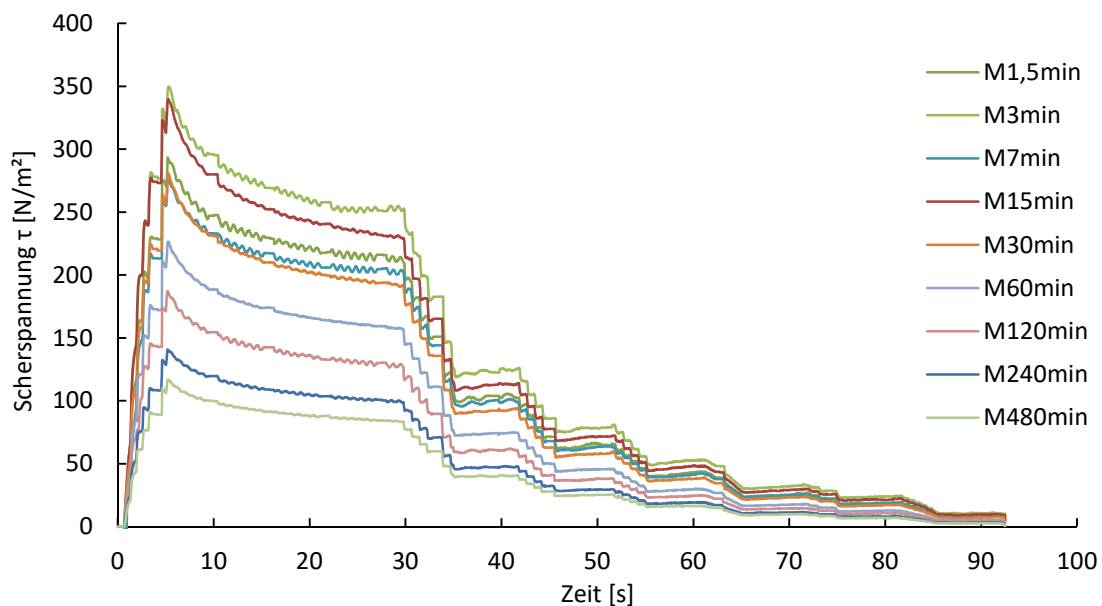


Abbildung 4.9: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 der 2. Versuchsreihe

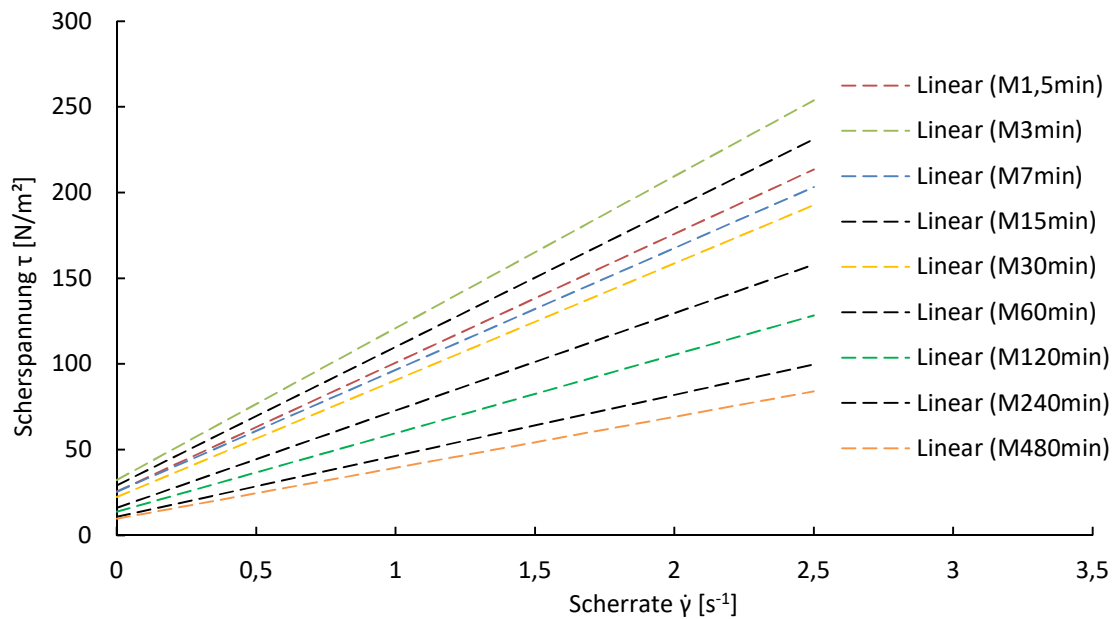


Abbildung 4.10: Linearisierte Fließkurven der 2. Versuchsreihe

Die linearisierten Fließkurven, welche als Grundlage zur Bestimmung von dynamischer Fließgrenze τ_{0D} und Viskosität η mittels des *Bingham*-Modells dienen, ergeben ebenfalls eine abfallende Tendenz der Scherspannung bei steigender Trockenmischdauer.

Nach Auswertung der Fließkurven ergeben sich die Werte für die dynamische Fließgrenze τ_{0D} wie in Abbildung 4.11 dargestellt.

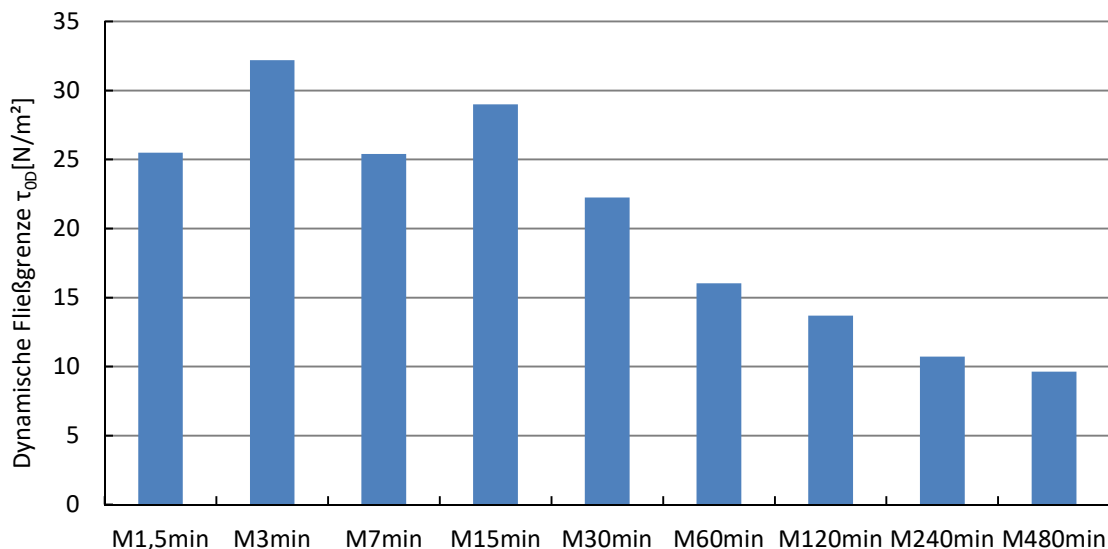


Abbildung 4.11: Dynamische Fließgrenzen der 2. Versuchsreihe

Betrachtet man diese, so erkennt man eine stetige Verringerung der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} im Bereich 15 - bis 480 Minuten Trockenmischdauer. Im Bereich 1,5 - bis 7 Minuten sind die Werte jedoch eher willkürlich verteilt, sodass M3min und M15min höhere dynamische Fließgrenzen als die

Mischungen M1,5min und M7min aufweisen. Eine triviale Begründung für diese Reihung lässt sich an dieser Stelle nicht nennen.

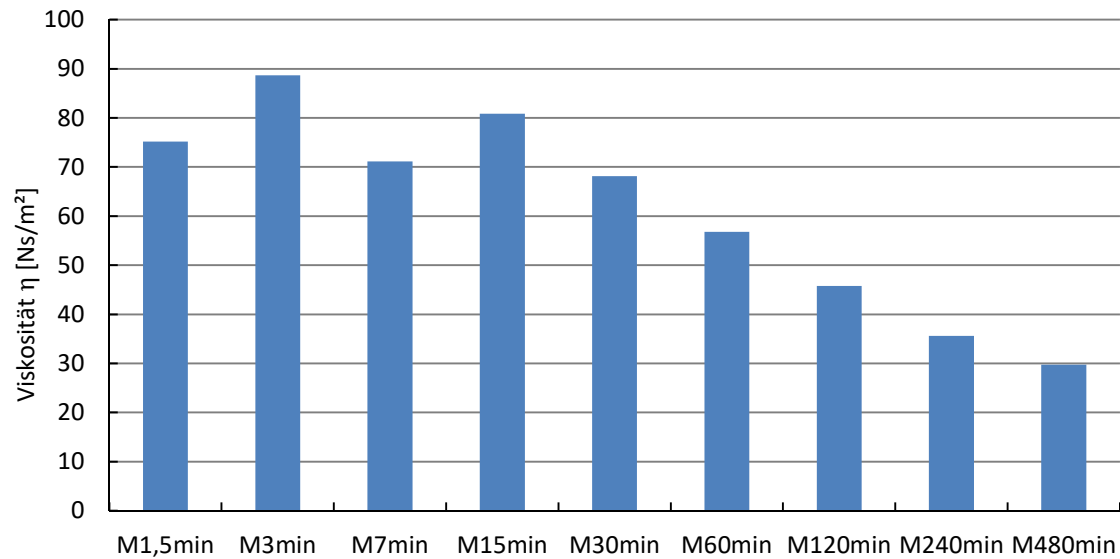


Abbildung 4.12: Viskosität der 2. Versuchsreihe

Die Entwicklung der Viskosität η in Abbildung 4.12 weist dieselbe Unstetigkeit für den Bereich M1,5min bis M7min auf, wobei sich ebenfalls ab M15min eine stetig abfallende Verlaufskurve ausbildet.

Abbildung 4.13 stellt nun die Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 2 graphisch dar. Diese werden in weiterer Folge analog zu 4.1.1.1 ausgewertet.

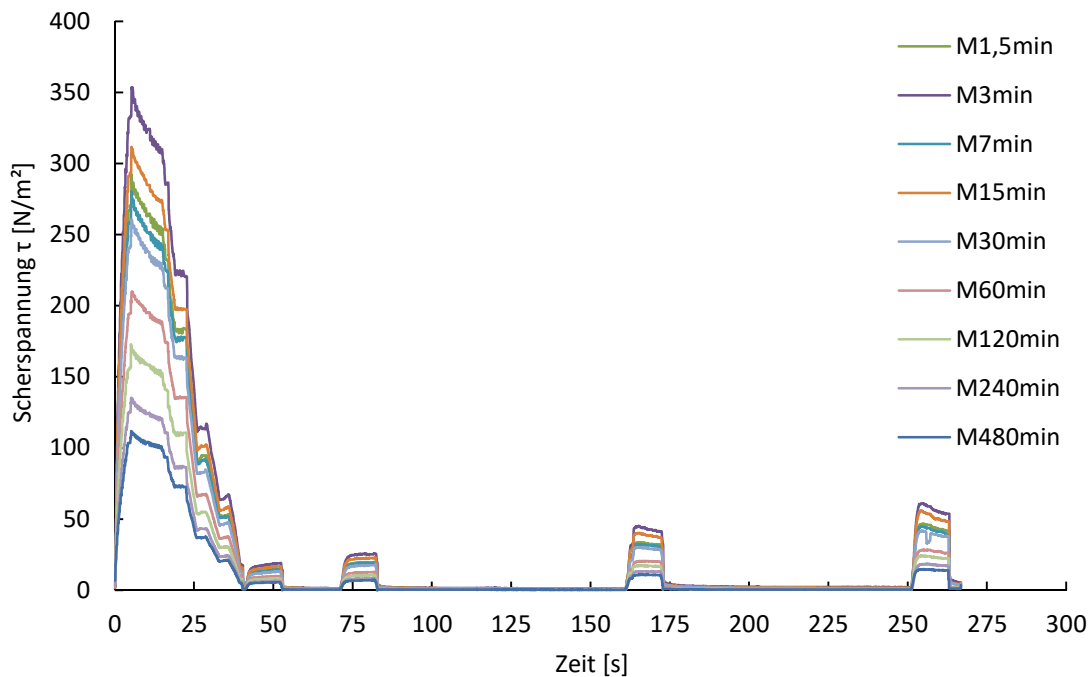


Abbildung 4.13: Scherspannungsverläufe der 2. Versuchsreihe zufolge Scherprofil 2

Die zugehörigen linearisierten Fließkurven zur Ermittlung der Thixotropie A_{Thix} sind im folgenden Diagramm (Abbildung 4.14) dargestellt.

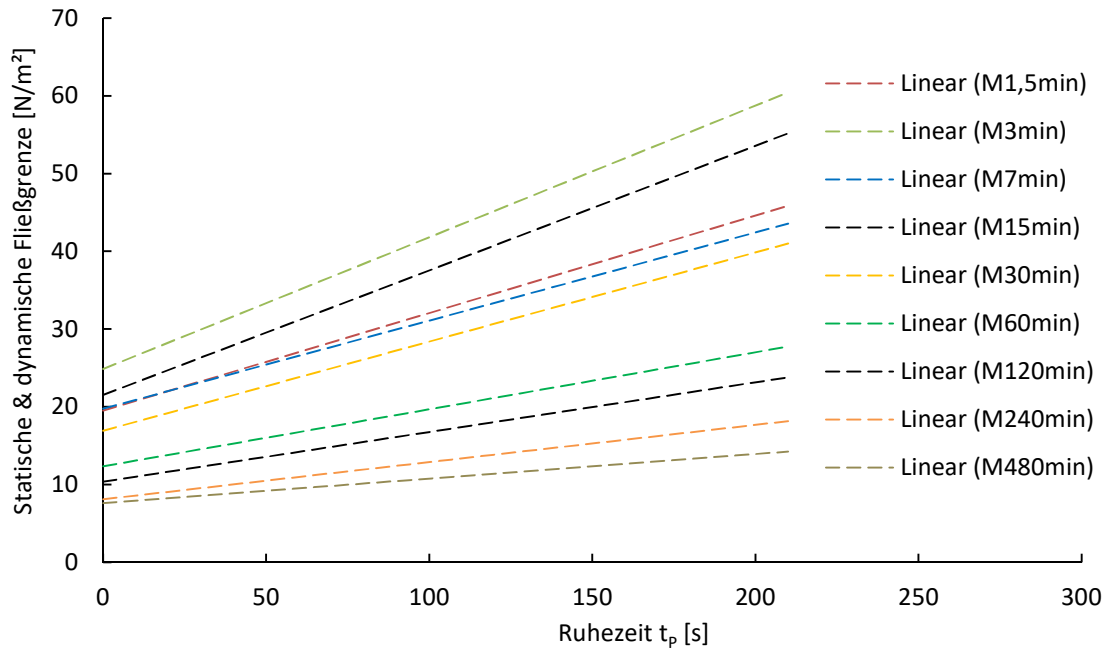


Abbildung 4.14: Linearisierte Fließkurven der 2. Versuchsreihe zur Bestimmung der Thixotropie

Nach Auswertung der ermittelten Fließkurven mittels Formel [3-4] ergeben sich die in Abbildung 4.15. dargestellten Werte für die Thixotropie A_{Thix} .

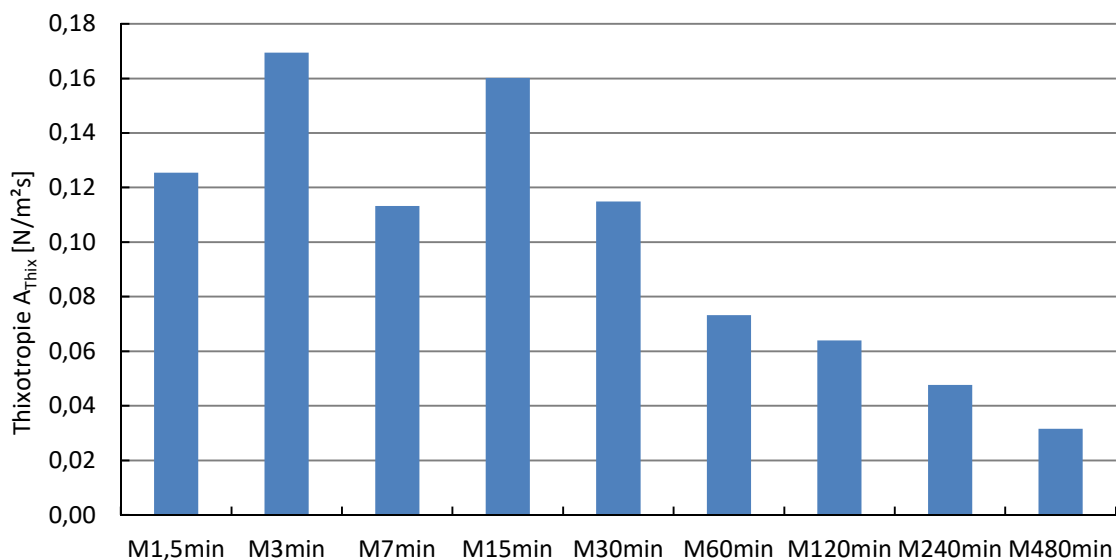


Abbildung 4.15: Thixotropie der 2. Versuchsreihe

Die Werte für die Thixotropie der einzelnen Mischungen stellen die bereits aus den vorangegangenen Abbildungen bekannte Entwicklung über die Trockenmischdauer dar, wobei der Bereich M1,5min bis M7min Unstetigkeiten aufweist, ehe sich ab Mischung M15min eine klar abfallende Tendenz der ermittelten Thixotropie einstellt.

Die zusammengefassten Ergebnisse zur 2. Versuchsreihe für dynamische Fließgrenze τ_{0D} , Viskosität η und Thixotropie A_{Thix} finden sich in der folgenden Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der 2. Versuchsreihe

Trockenmischdauer [-]	dyn. Fließgrenze [N/m ²]	Viskosität [Ns/m ²]	Thixotropie [N/m ² s]
M1,5min	25,48	75,18	0,125
M3min	32,20	88,66	0,169
M7min	25,41	71,12	0,113
M15min	29,01	80,85	0,160
M30min	22,25	68,16	0,115
M60min	16,04	56,78	0,073
M120min	13,70	45,81	0,064
M240min	10,72	35,62	0,048
M480min	9,64	29,72	0,032

4.1.1.3 Dritte Versuchsreihe

Die Mischungen zur 3. Versuchsreihe wurden mit neun Wochen altem Trockenprämix hergestellt. Die Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 sind in Abbildung 4.16, die zugehörigen linearisierten Fließkurven in Abbildung 4.17 grafisch dargestellt.

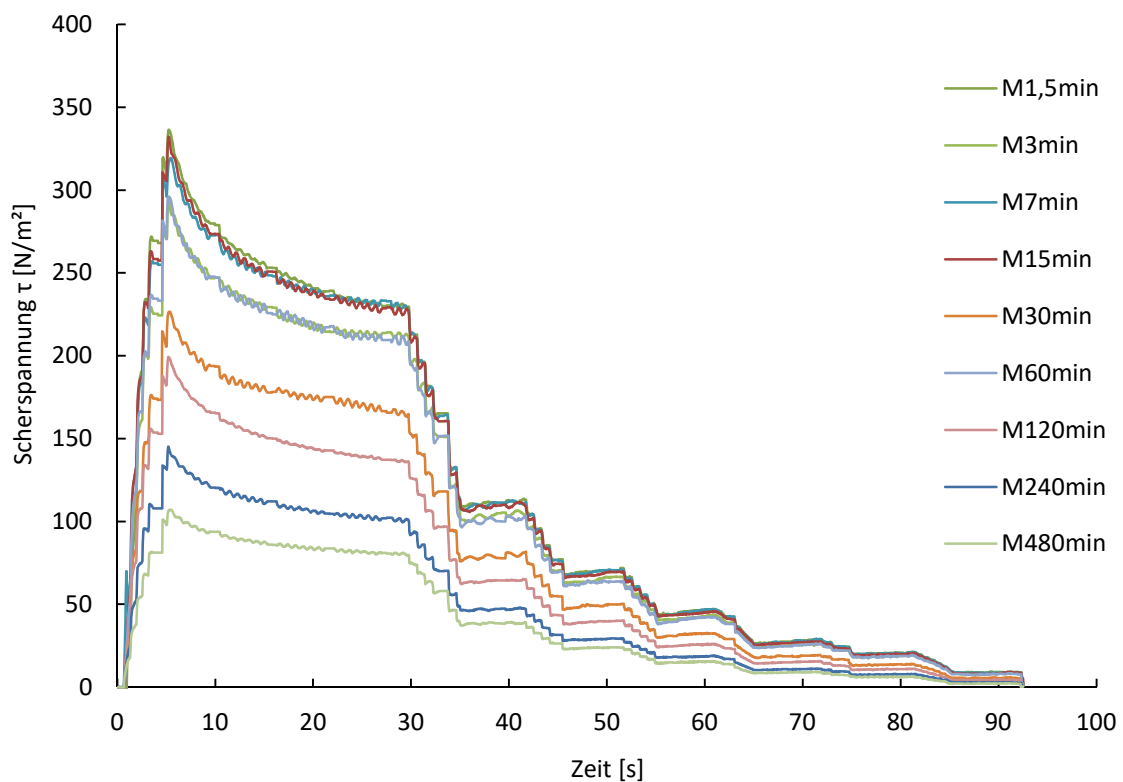


Abbildung 4.16: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 der 3. Versuchsreihe

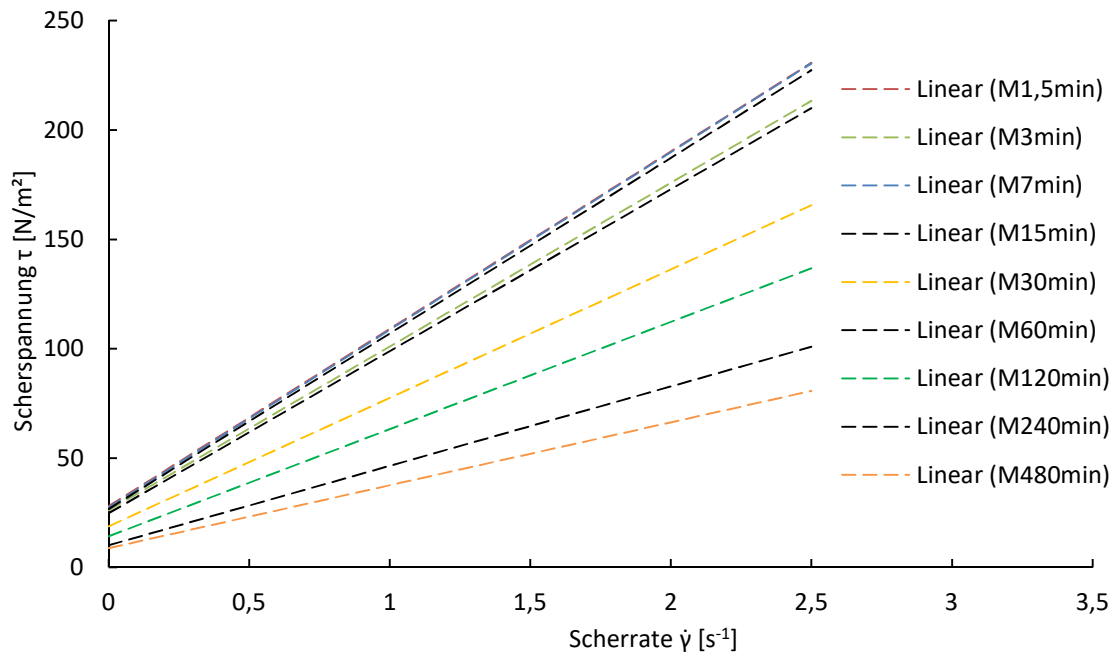


Abbildung 4.17: Linearisierte Fließkurven der 3. Versuchsreihe

Es zeigt sich wiederum die bereits in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigte Tendenz der abnehmenden Scherspannungen bei gleichzeitiger Steigerung der Trockenmischdauer, wenn auch in dieser Versuchsserie weniger ausgeprägt als bisher.

Die aus den linearisierten Fließkurven ermittelten Werte für die dynamische Fließgrenze finden sich in der folgenden Abbildung 4.18.

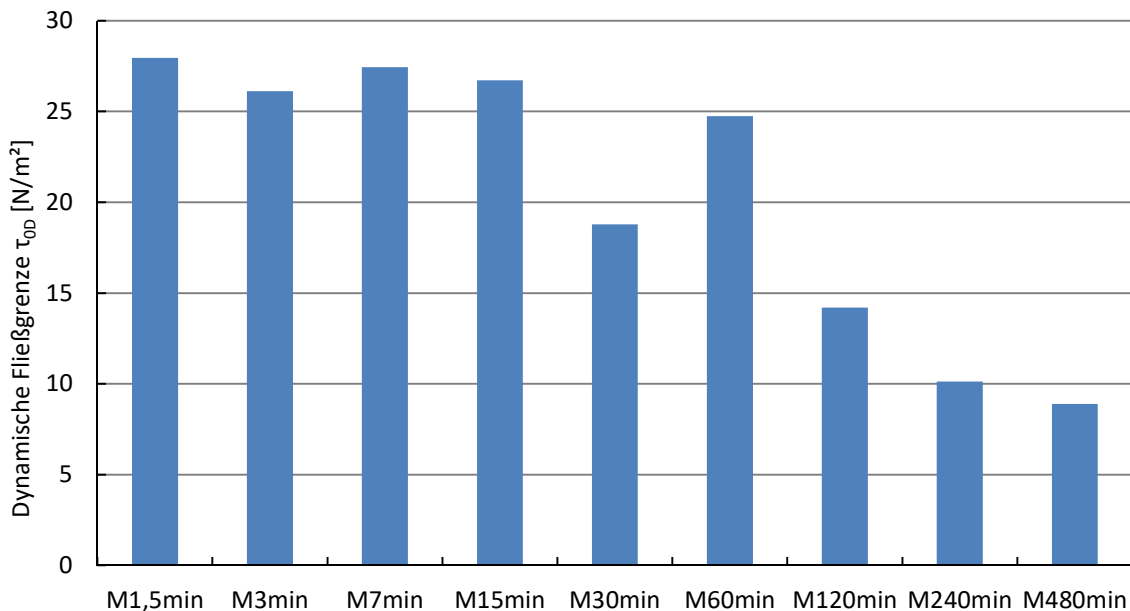


Abbildung 4.18: Dynamische Fließgrenzen der 3. Versuchsreihe

Auffallend ist hier die Mischung M60min, deren dynamische Fließgrenze τ_{0D} wesentlich höher als die der benachbarten Mischungen M30min und M120min ist. Wie auch schon bei der Mischung

M480min der ersten Versuchsreihe liegt hier der Schluss nahe, dass es sich um eine Messungenauigkeit handelt.

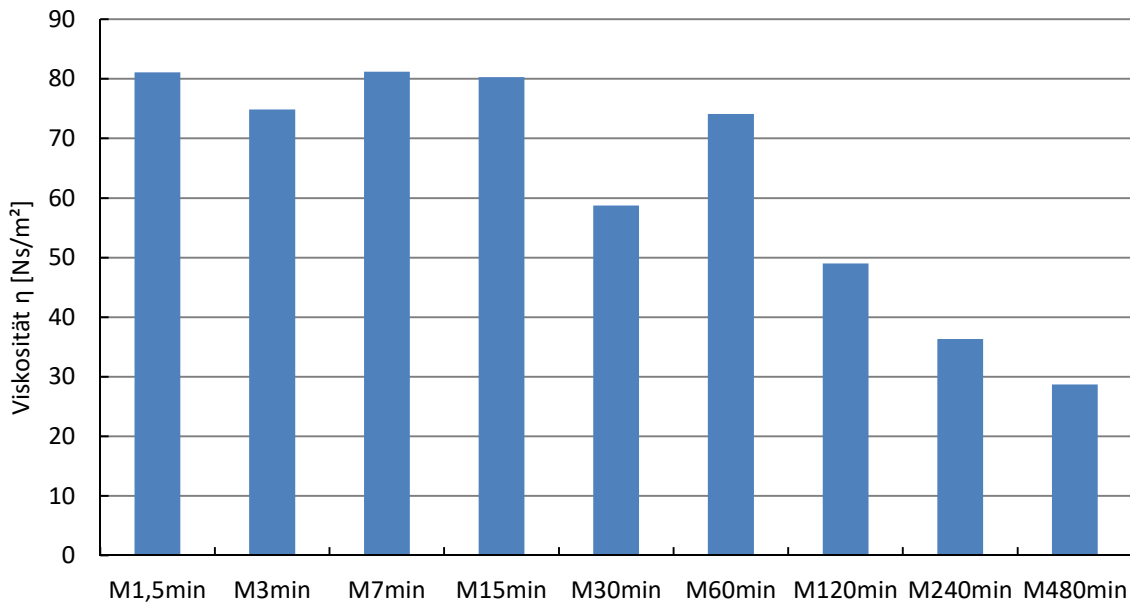


Abbildung 4.19: Viskosität der 3. Versuchsreihe

Die Viskosität η (Abbildung 4.19) entwickelt sich wiederum ähnlich wie die dynamische Fließgrenze τ_{0D} , wobei sich eine Art Plateau für die Mischungen M1,5min bis M15min einstellt, ehe die Werte, mit Ausnahme der Mischung M60min bis zur 480-minütigen Mischung, wie auch in den vorangegangenen Versuchsreihen abfallen.

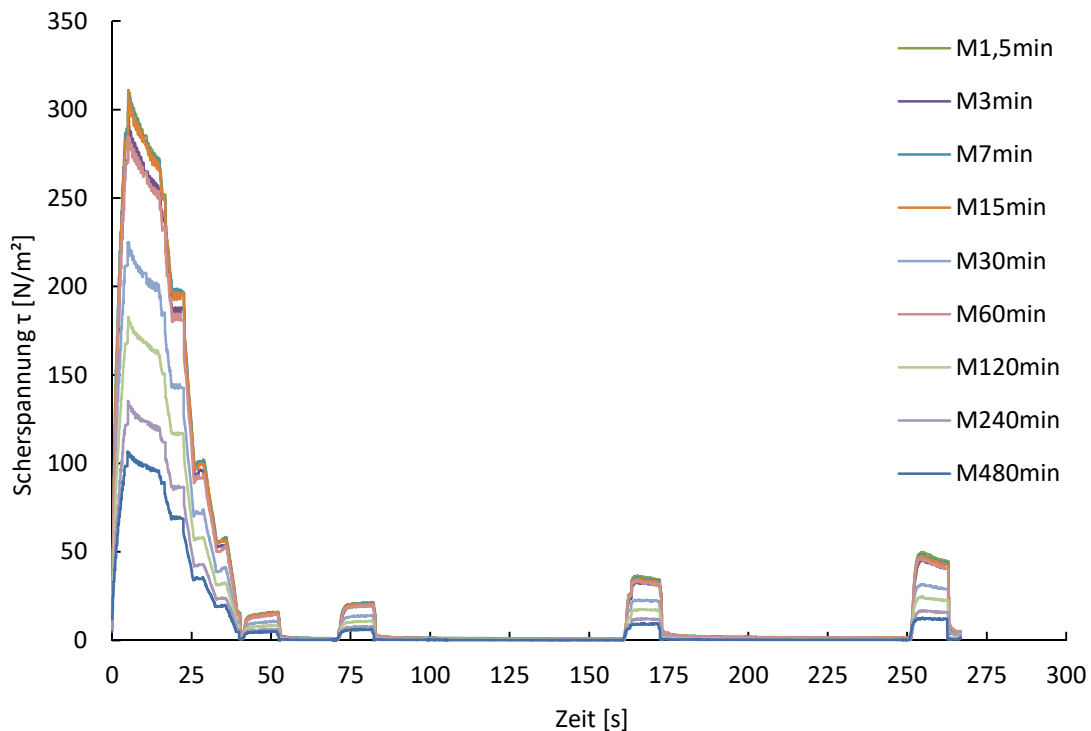


Abbildung 4.20: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 2 der 3. Versuchsreihe

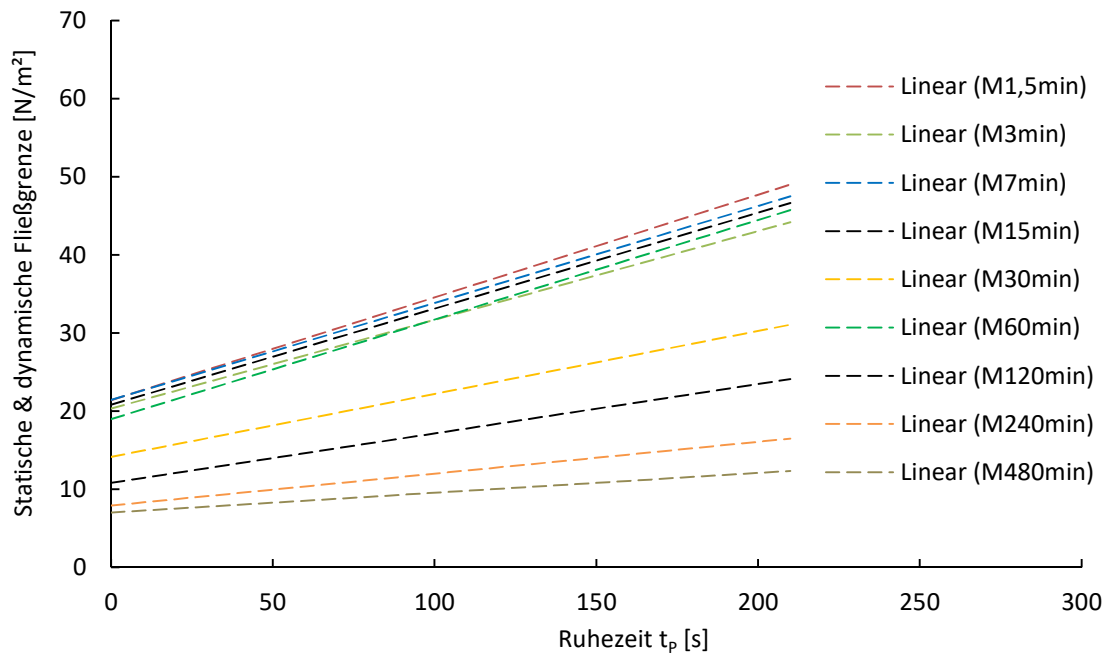


Abbildung 4.21: Linearisierte Fließkurven der 3. Versuchsreihe zur Bestimmung der Thixotropie

Die Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 2 (Abbildung 4.20.), sowie die zugehörigen linearisierten Fließkurven (Abbildung 4.21.) bilden die Grundlage für die Ermittlung der in Abbildung 4.22 dargestellten Thixotropie.

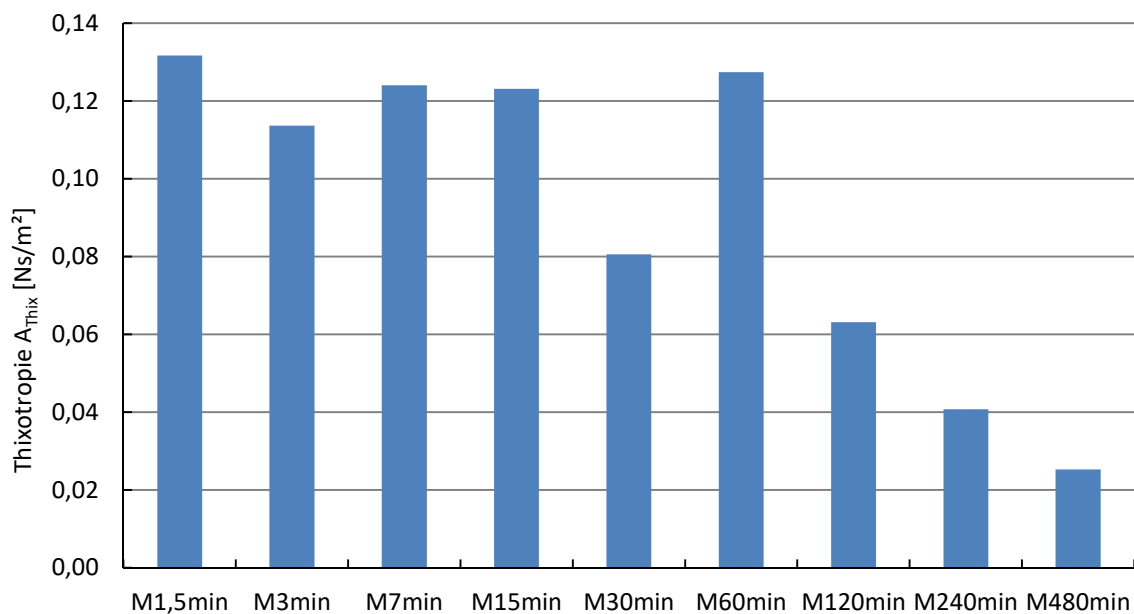


Abbildung 4.22: Thixotropie der 3. Versuchsreihe

Auffallend ist auch hier die Mischung M60min, die als Ausreißer die ansonsten stetige Verringerung zwischen M15min und M480min durchkreuzt.

In Tabelle 4.3 werden die Ergebnisse der ermittelten rheologischen Parameter von Versuchsreihe drei nochmals gesammelt dargestellt.

Tabelle 4.3: Ergebnisse der 3. Versuchsreihe

Trockenmischdauer	dyn. Fließgrenze	Viskosität	Thixotropie
[-]	[N/m ²]	[Ns/m ²]	[N/m ² s]
M1,5min	27,95	81,11	0,132
M3min	26,12	74,86	0,114
M7min	27,45	81,18	0,124
M15min	26,72	80,28	0,123
M30min	18,79	58,74	0,081
M60min	24,75	74,10	0,127
M120min	14,20	49,01	0,063
M240min	10,13	36,33	0,041
M480min	8,89	28,72	0,025

4.1.1.4 Einfluss des Trockenprämixalters auf die rheologischen Eigenschaften

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss des Trockenbetonalters auf die rheologischen Eigenschaften behandelt. Dabei werden die rheologischen Werte dynamische Fließgrenze τ_{0D} (Abbildung 4.23), Viskosität η (Abbildung 4.24) und Thixotropie A_{Thix} (Abbildung 4.25) der drei Versuchsreihen miteinander verglichen. Das Trockenbetonalter bei Durchführung der ersten Versuchsreihe betrug dabei 0-72h, das Trockenbetonalter der zweiten Versuchsreihe betrug 4 Wochen, und das der dritten 9 Wochen.

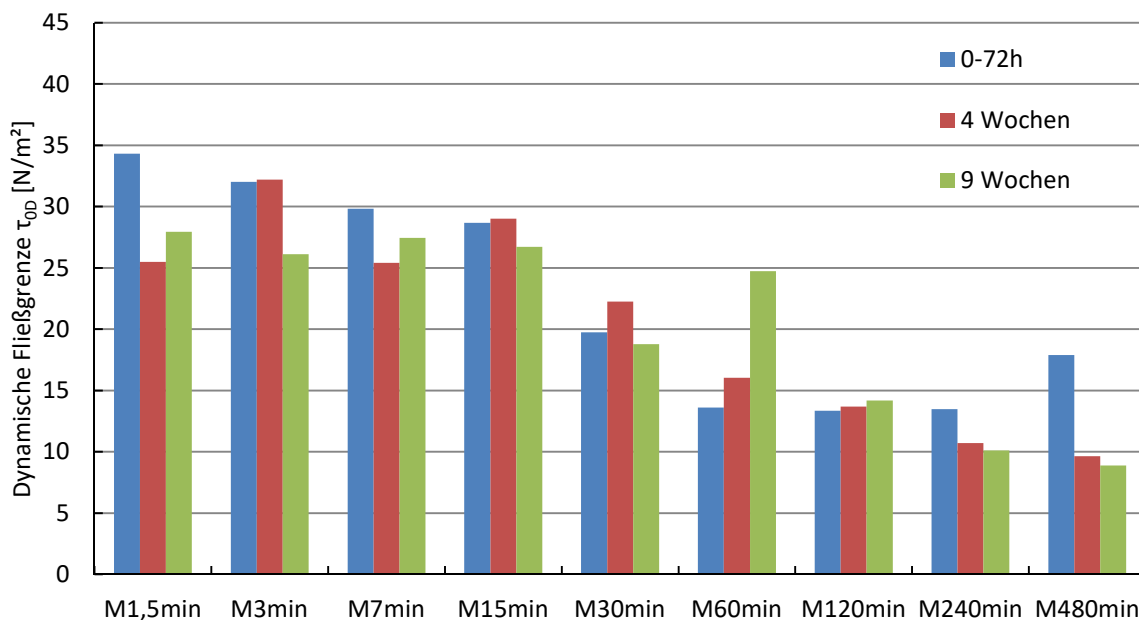


Abbildung 4.23: Einfluss des Prämixalters auf die dynamische Fließgrenze

Bei Betrachtung der dynamischen Fließgrenzen der einzelnen Versuchsreihen zeigt sich, dass die dynamische Fließgrenze grundsätzlich bei allen Versuchsreihen über die Trockenmischdauer abnimmt. Am ausgeprägtesten ist dies, wenn man von der Probe M480min absieht, im Betonalter 0-72h zu erkennen. Bei den anderen beiden Versuchsreihen bildet sich bis M15min erst eine Art Plateau, bevor die Werte sukzessive abnehmen. Auffällig ist auch, dass die Proben im Betonalter 0-72h, welche im Mittel bei $22,55\text{N/m}^2$ liegen, wesentlich höhere dynamische Fließgrenzen aufweisen, als die Proben, welche mit eingelagertem Prämix hergestellt wurden. Die Mittelwerte liegen hier bei $20,49\text{N/m}^2$ für die zweite Versuchsserie, im Trockenbetonalter von vier Wochen und bei $20,55\text{N/m}^2$ für die dritte Versuchsreihe, im Trockenbetonalter neun Wochen.

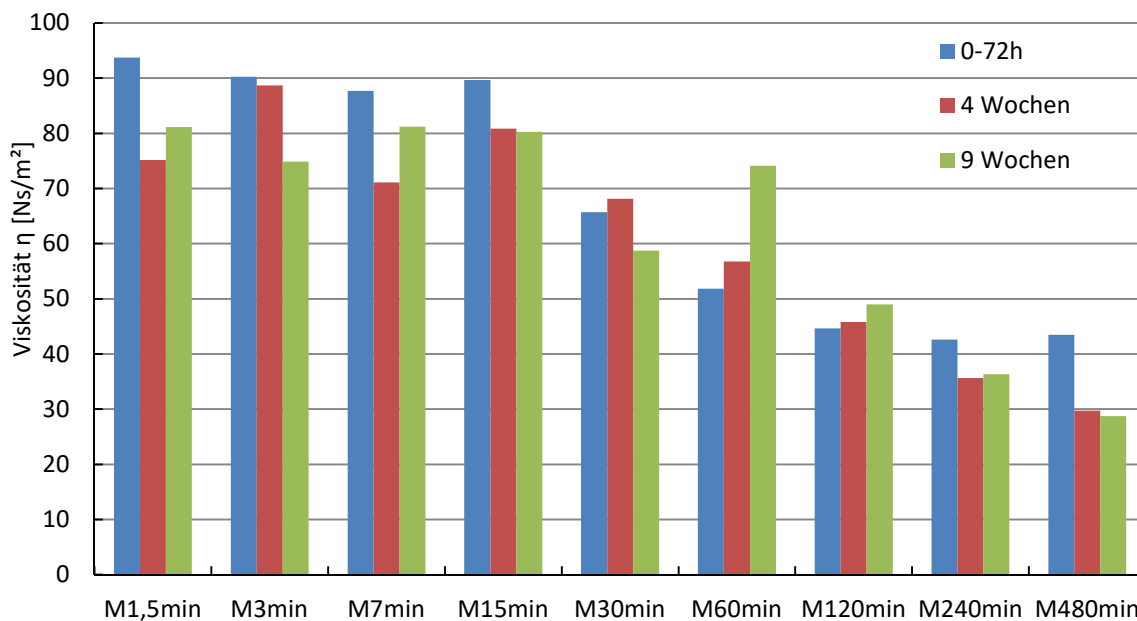


Abbildung 4.24: Einfluss des Prämixalters auf die Viskosität

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Betrachtung der Werte für die Viskosität (Abbildung 4.24) über das Trockenprämixalter. Hier liegen die Mittelwerte der Versuchsergebnisse bei $67,74\text{Ns/m}^2$ für die erste, $61,32\text{Ns/m}^2$ für die zweite, und $62,70\text{Ns/m}^2$ für die dritte Versuchsreihe. Auch hier kann man somit festhalten, dass die Viskosität nach einer gewissen Lagerungsdauer des Trockenbetons abnimmt. Interessant ist allerdings, dass die Werte der letzten Versuchsreihe sowohl für die dynamische Fließgrenze als auch für die Viskosität gegenüber der zweiten Versuchsreihe leicht zunehmen. Hierzu stellt sich die Frage, ob diese erneute Zunahme den Trend, flüssig werdender Betone bei längerer Lagerung grundsätzlich umkehrt, oder ob es sich dabei lediglich um eine normale Schwankungsbreite handelt.

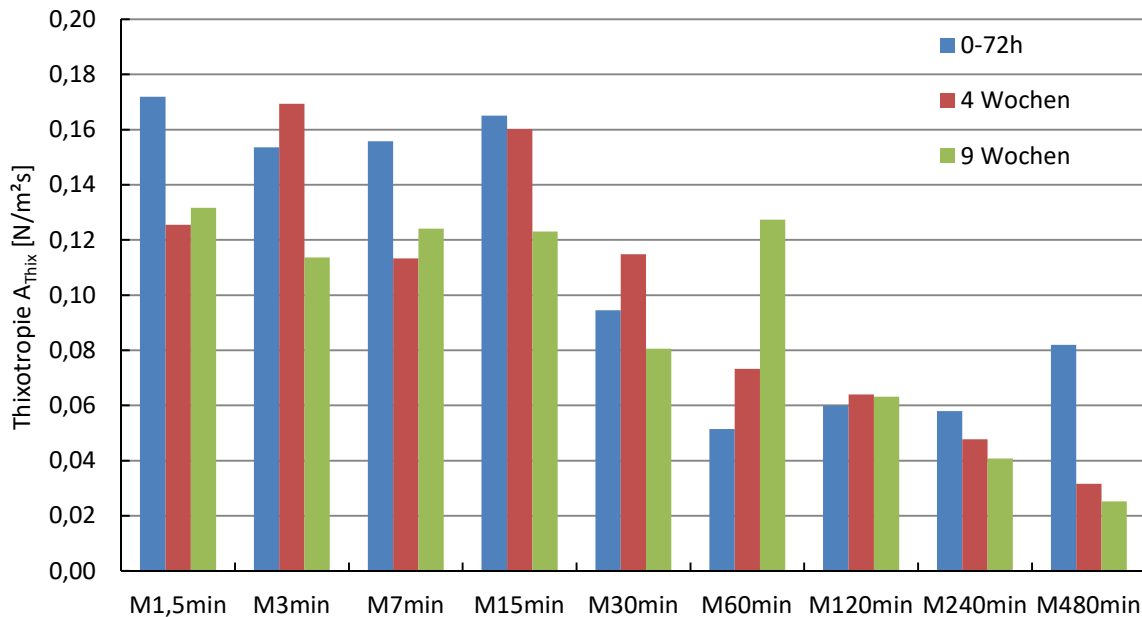


Abbildung 4.25: Einfluss des Prämixalters auf die Thixotropie

Bildet man die Mittelwerte der Thixotropie über die einzelnen Prämixalter, so ergeben sich die Werte 0,110 für die erste, 0,100 für die zweite und 0,092 für die dritte Versuchsreihe. Die Thixotropie nimmt also im Gegensatz zur Viskosität und zur dynamischen Fließgrenze bei steigendem Trockenbetonalter stetig ab.

4.1.1.5 Einfluss des Mixers auf die rheologischen Eigenschaften

Die Auswirkungen unterschiedlicher Mixer auf die rheologischen Eigenschaften von UHPC werden im Folgenden gezeigt. Dabei werden die Daten dieser Arbeit mit den Ergebnissen von *Mayrhofer* [1] verglichen, dessen Arbeit zeitgleich und unter denselben Versuchsbedingungen am Institut entstanden ist. Zum Einsatz kam dabei ein *R02 Eirich* Intensivmischer. Der Mischablauf für die Proben von *Mayrhofer* [1] ist in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Mischablauf *Mayrhofer* [1]

Abschnitt	Beschreibung	Dauer	Drehzahl Mixer
[-]	[-]	[s]	[U/min]
1	Trockenmischen	30	1200
2	Flüssigkeitszugabe	30	1200
3	Nassmischen	120	1200
	Summe	180	

Das Kapitel gliedert sich in die Unterkapitel dynamische Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie. Die Darstellung für die drei Versuchsserien erfolgt dabei jeweils in drei Balkendiagrammen.

Dynamische Fließgrenze

Die im Zuge dieser Arbeit ermittelten Werte für die dynamische Fließgrenze werden in den folgenden drei Abbildungen getrennt für die erste (Abbildung 4.26), zweite (Abbildung 4.27) und dritte Versuchsreihe (Abbildung 4.28) mit den Werten von *Mayrhofer* verglichen, um Aufschluss über den Einfluss des verwendeten Mixers zu erhalten.

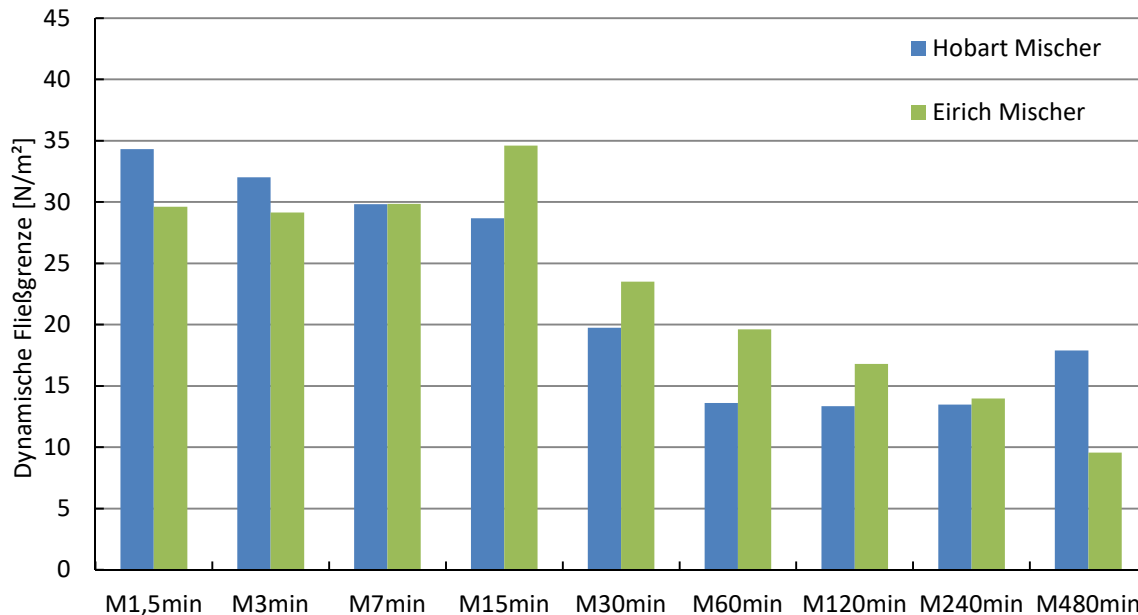


Abbildung 4.26: Einfluss des Mischertyps auf die dynamische Fließgrenze der 1. Versuchsreihe

Grundsätzlich zeigt sich die zu erwartende Abnahme der dynamischen Fließgrenze bei zunehmender Trockenmischdauer bei beiden Mischertypen. Interessanterweise bildet sich allerdings beim Eirich Mischer bis etwa 15 Minuten Trockenmischdauer ein Plateau aus, ehe die dynamische Fließgrenze stetig abnimmt. Bei den mittels Hobartmischer homogenisierten Mischungen zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Hier fällt die dynamische Fließgrenze stetig ab, ehe sich ab M60min eine Art Plateau ausbildet. Der Wert für M15min des Eirichmischers wird in dieser Betrachtung ebenso wie der Wert M480min des Hobartmischers im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen als zu hoch eingeschätzt und nicht berücksichtigt.

Weiters kann festgehalten werden, dass mit 10 Minuten Nassmischdauer im Hobart Mischer ähnliche Werte für die dynamische Fließgrenze erreicht werden können, wie nach zwei Minuten in einem Eirich Intensivmischer. Es ist also in etwa die fünffache Nassmischdauer notwendig, um die wesentlich geringere Mischleistung des Hobartmischers im Vergleich zum Eirichmischer zu kompensieren.

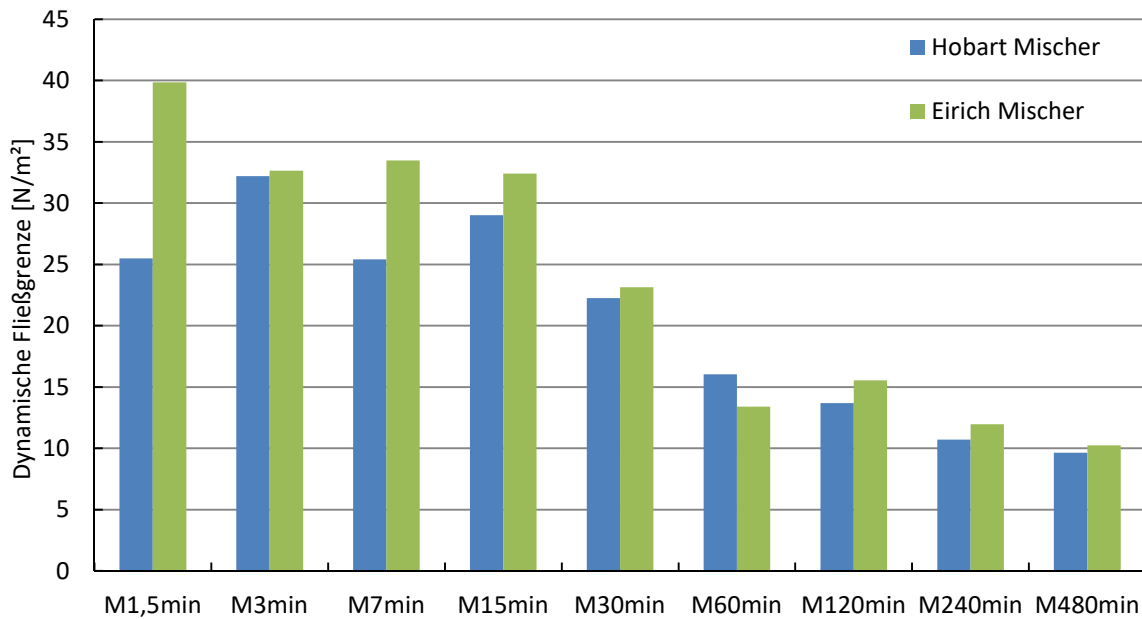


Abbildung 4.27: Einfluss des Mischertyps auf die dynamische Fließgrenze der 2. Versuchsreihe

Für die zweite und dritte Versuchsreihe ergibt sich ebenfalls ein Bild ähnlicher Fließgrenzenverläufe. Allerdings sind im Vergleich zur ersten Versuchsreihe immer wieder größere Differenzen bei gleicher Trockenmischdauer vorhanden. Ein Muster lässt sich darin aber nicht erkennen. Auch ist die Abnahme der dynamischen Fließgrenze über die Trockenmischdauer bei beiden Mixern relativ un stetig, was darauf schließen lässt, dass noch andere, in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigte Faktoren Einfluss auf die Höhe der dynamischen Fließgrenze nehmen könnten.

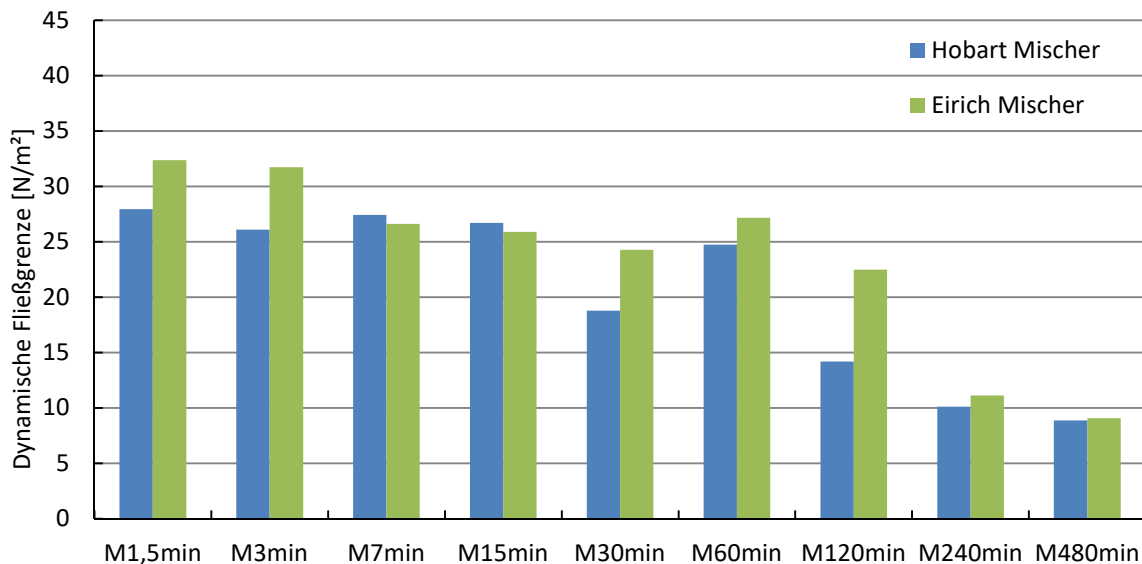


Abbildung 4.28: Einfluss des Mischertyps auf die dynamische Fließgrenze der 3. Versuchsreihe

Viskosität

Im Folgenden wird die Viskosität der unterschiedlich homogenisierten Proben verglichen. Die Werte für die erste Versuchsreihe finden sich in Abbildung 4.29, die der zweiten in Abbildung 4.30 und die der dritten in Abbildung 4.31.

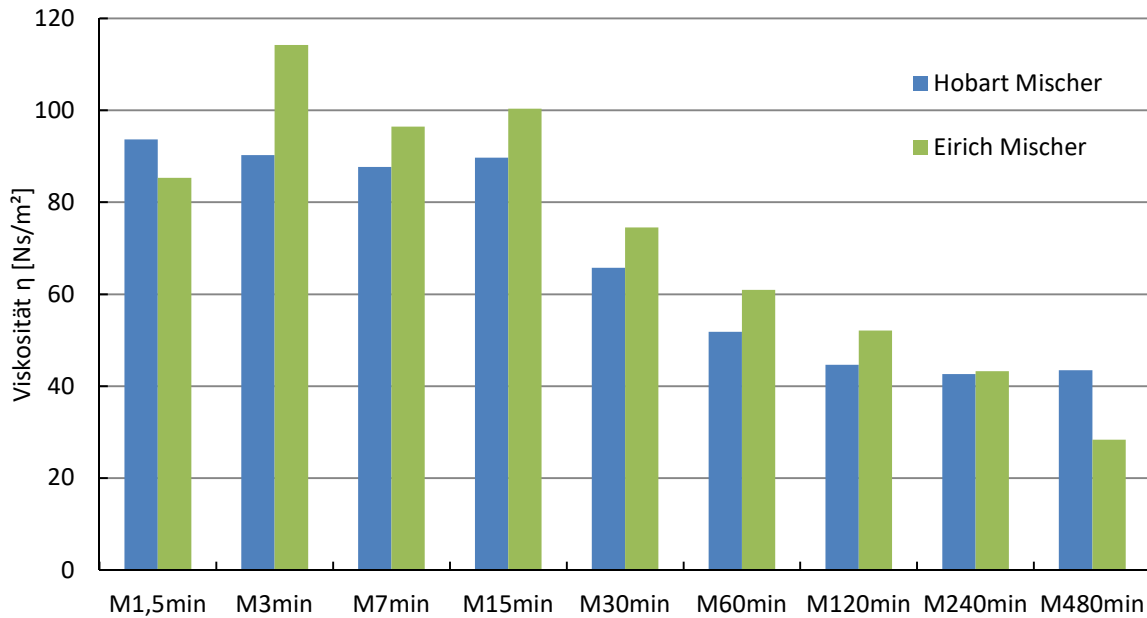


Abbildung 4.29: Einfluss des Mischertyps auf die Viskosität der 1. Versuchsreihe

Im Vergleich zu den Werten für die dynamische Fließgrenze verlaufen die Werte für die Viskosität bei beiden Mixern in allen drei Versuchsreihen wesentlich synchroner. Größere Abweichungen sind somit wesentlich seltener. Außerdem zeigt sich, dass der Einfluss der Trockenmischdauer erst nach ca. 30 bis 60 Minuten Trockenmischdauer sichtbar wird.

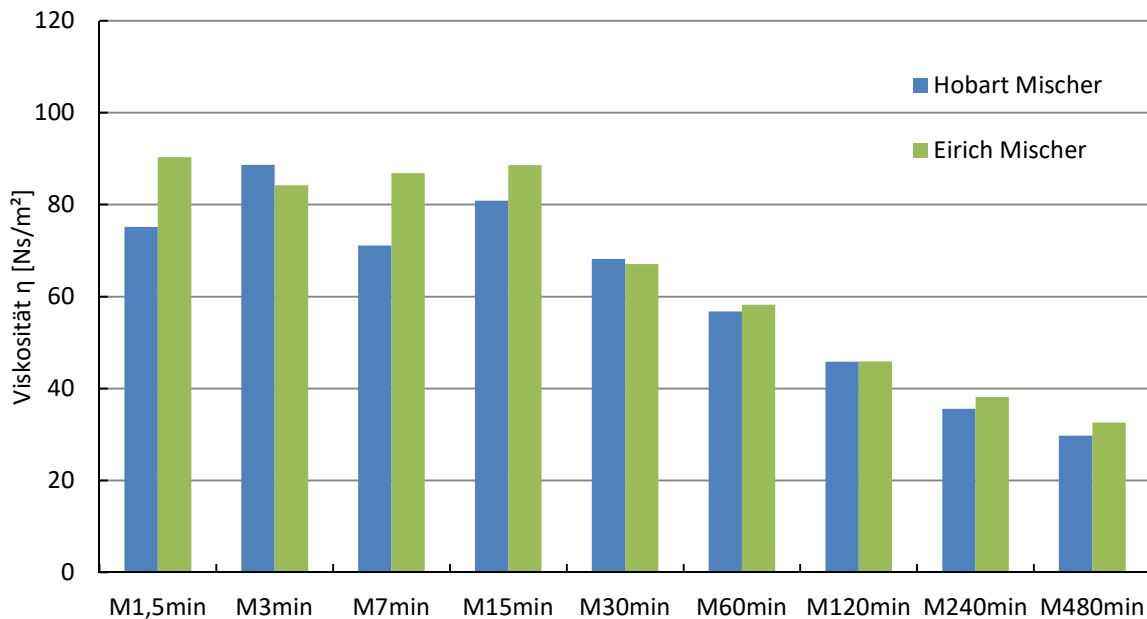


Abbildung 4.30: Einfluss des Mischertyps auf die Viskosität der 2. Versuchsreihe

Es fällt aber auf, dass die Viskosität bei beiden Mischertypen nicht nur durch längeres Trockenmischen, sondern auch durch längeres Zwischenlagern des Trockenmischgutes verbessert werden kann. Die Abnahme ist dabei wesentlich gleichmäßiger als noch bei der dynamischen Fließgrenze.

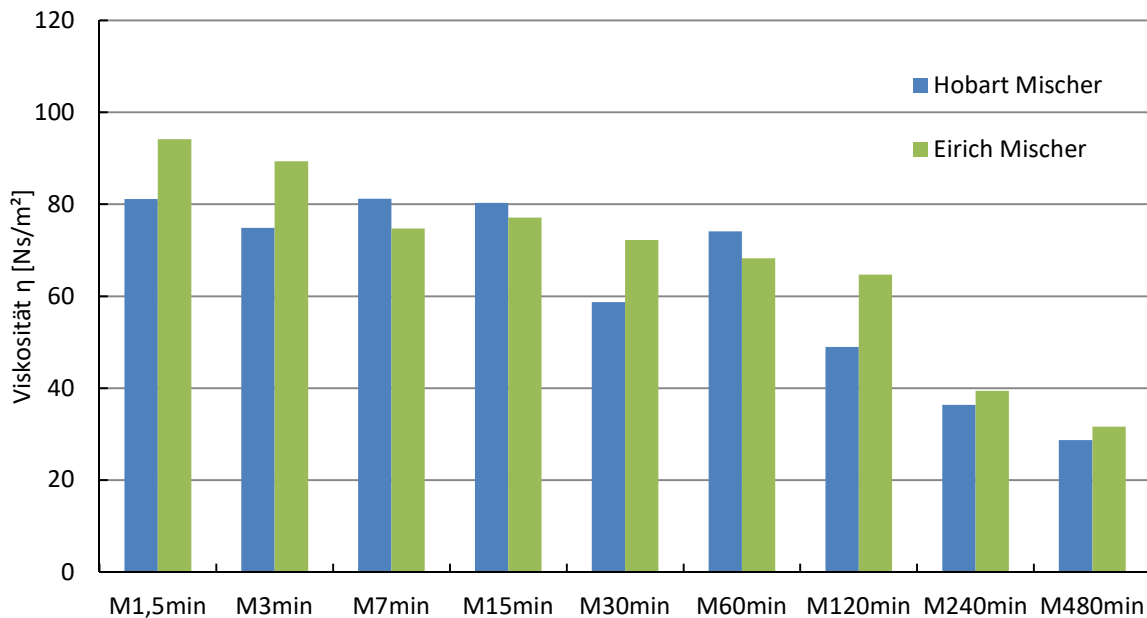


Abbildung 4.31: Einfluss des Mischertyps auf die Viskosität der 3. Versuchsreihe

Thixotropie

Der Einfluss der beiden Mischertypen auf die Thixotropie erfolgt anhand der nachstehenden Abbildungen für die Versuchsreihen eins (Abbildung 4.32), zwei (Abbildung 4.33) und drei (Abbildung 4.34).

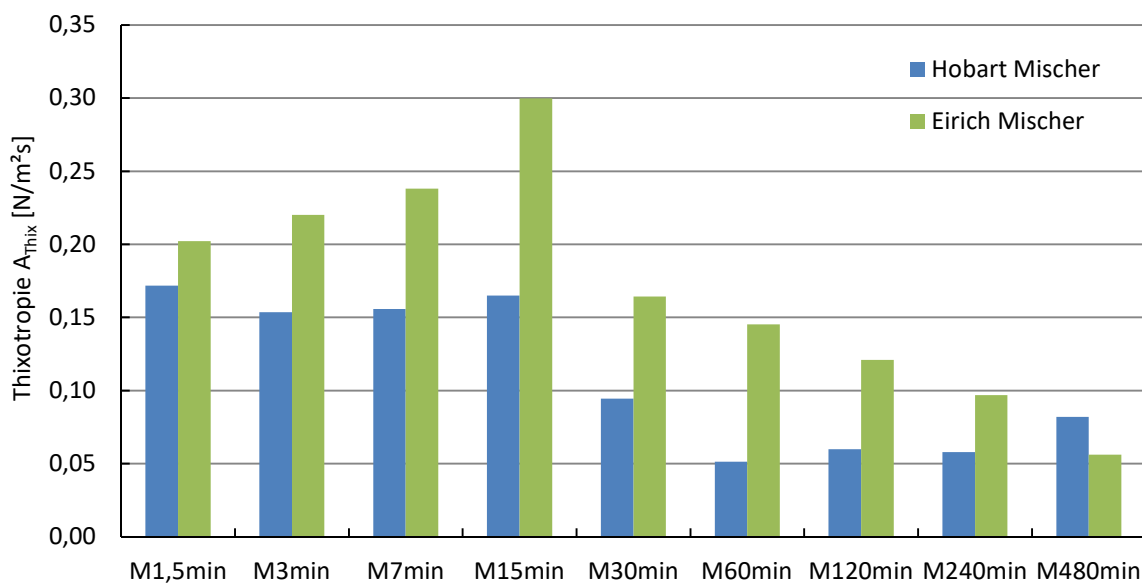


Abbildung 4.32: Einfluss des Mischertyps auf die Thixotropie der 1. Versuchsreihe

Auffällig ist hier vor allem der große Unterschied der Thixotropie, der durch die Verwendung unterschiedlicher Mischertypen verursacht wird. Wurden für die bereits analysierten Werte der dynamischen Fließgrenze sowie der Viskosität recht ähnliche Werte erzielt, so ist die Thixotropie der Eirich Mischungen teilweise doppelt so hoch wie die der Hobart-Mischungen. Das bedeutet also, dass die mittels Hobartmischer homogenisierten Mischungen wesentlich weniger schnell ansteifen und somit offensichtlich länger fließfähig bleiben als die Eirich-Mischungen. Es stellt sich die Frage, ob dies an der unterschiedlichen Mischweise oder an der insgesamt länger gewählten Nassmischdauer im Hobartmischer liegt?

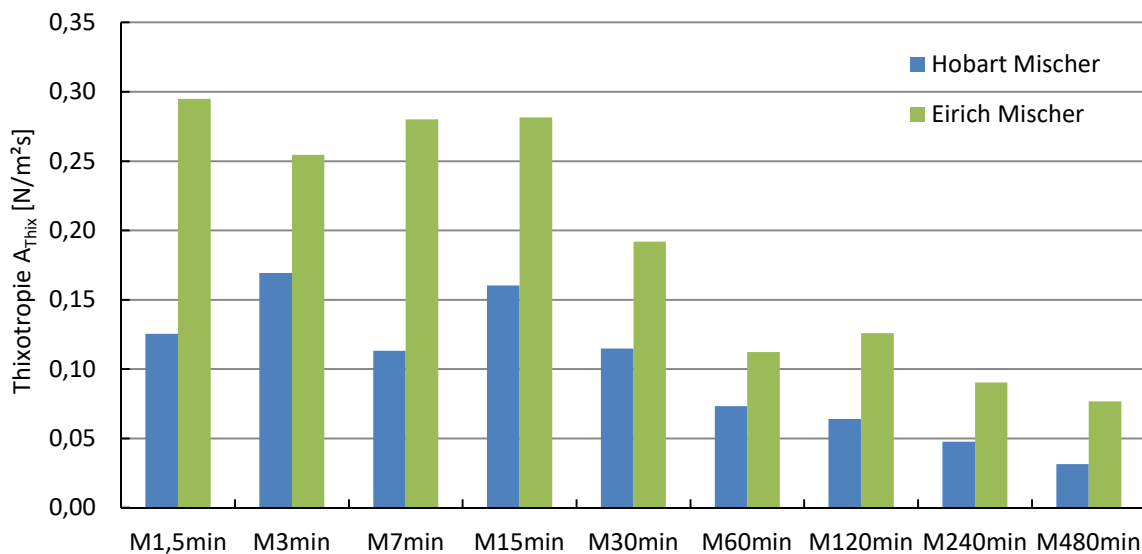


Abbildung 4.33: Einfluss des Mischertyps auf die Thixotropie der 2. Versuchsreihe

Weiters nimmt die Thixotropie erst mit längerer Trockenmischdauer ab. Im Bereich M1,5min bis M30min ergeben sich relativ ähnliche Werte, ehe diese bei Verlängerung der Trockenmischdauer abnehmen.

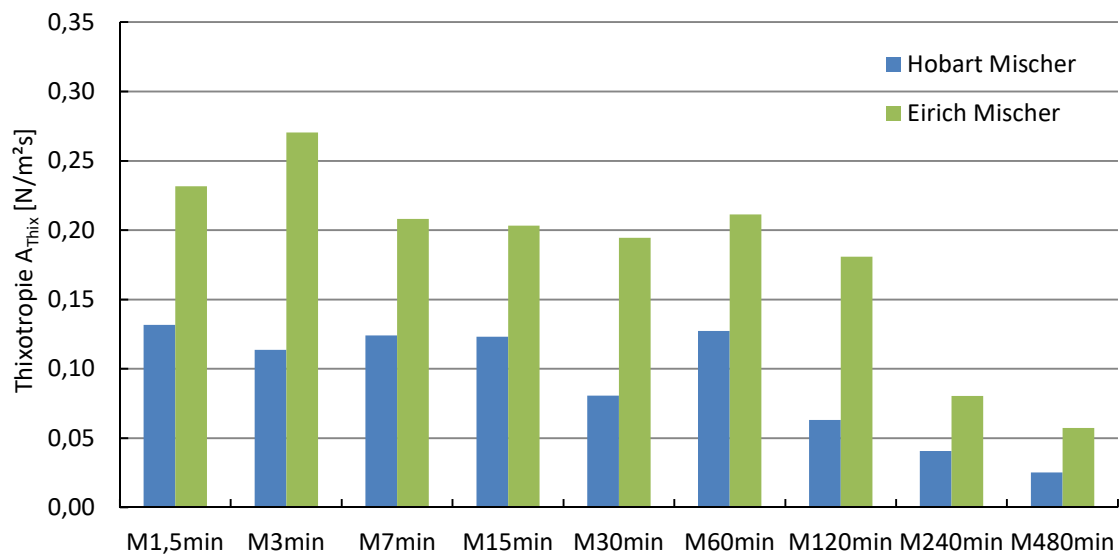


Abbildung 4.34: Einfluss des Mischertyps auf die Thixotropie der 3. Versuchsreihe

4.1.2 Packungsdichte

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Packungsdichte der einzelnen Proben. Es folgt eine Betrachtung der Partikelgrößenverteilungen zu den Versuchsserien eins bis drei, ehe der Einfluss der Trockenmischdauer, der Lagerungsdauer des Trockenprämix sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Mischer auf die Packungsdichte analysiert werden.

Die Darstellung der gemessenen Partikelgrößenverteilungen erfolgt in den Abbildungen 4.35. bis 4.37. jeweils auf ganzen Seiten, um eine entsprechende Lesbarkeit zu gewährleisten.

Grundsätzlich stellen sich bei allen Messungen sehr ähnliche Versuchsergebnisse ein, sodass alle Partikelgrößen vier Spitzenwerte besitzen, welche die Volumenanteile der einzelnen Kornfraktionen darstellen. Diese sind geordnet nach steigender Korngröße:

- Mikrosilika
- Quarzmehl
- Zement
- Quarzsand.

Betrachtet man nun die Partikelgrößenverteilungen der drei Versuchsreihen, so ergibt sich eine Tendenz, größer werdender Volumenanteile im Bereich 100 bis 1000 μm , also im Bereich der Korngrößen des Quarzsandes, welcher die größte Kornfraktion darstellt. Dies bedingt natürlich kleinere Volumenanteile in den Kornfraktionen <100 μm , also in den Kornfraktionen Mikrosilika, Quarzmehl und Zement. Am stetigsten ist dieser Trend in der Versuchsreihe zwei (Abbildung 4.36) ausgeprägt. Aber auch in Versuchsreihe eins (Abbildung 4.35), bei der die fünf längsten Mischzeiten (M30min bis M480min) zugleich auch die größten Größtkornanteile besitzen, und in Versuchsreihe drei (Abbildung 4.37) ist diese Entwicklung relativ eindeutig ausgeprägt. Daraus lässt sich die grundsätzliche Tendenz ableiten, dass die Verlängerung der Trockenmischdauer zu vermehrter Agglomeratbildung führt und somit der Anteil größerer Körner zunimmt.

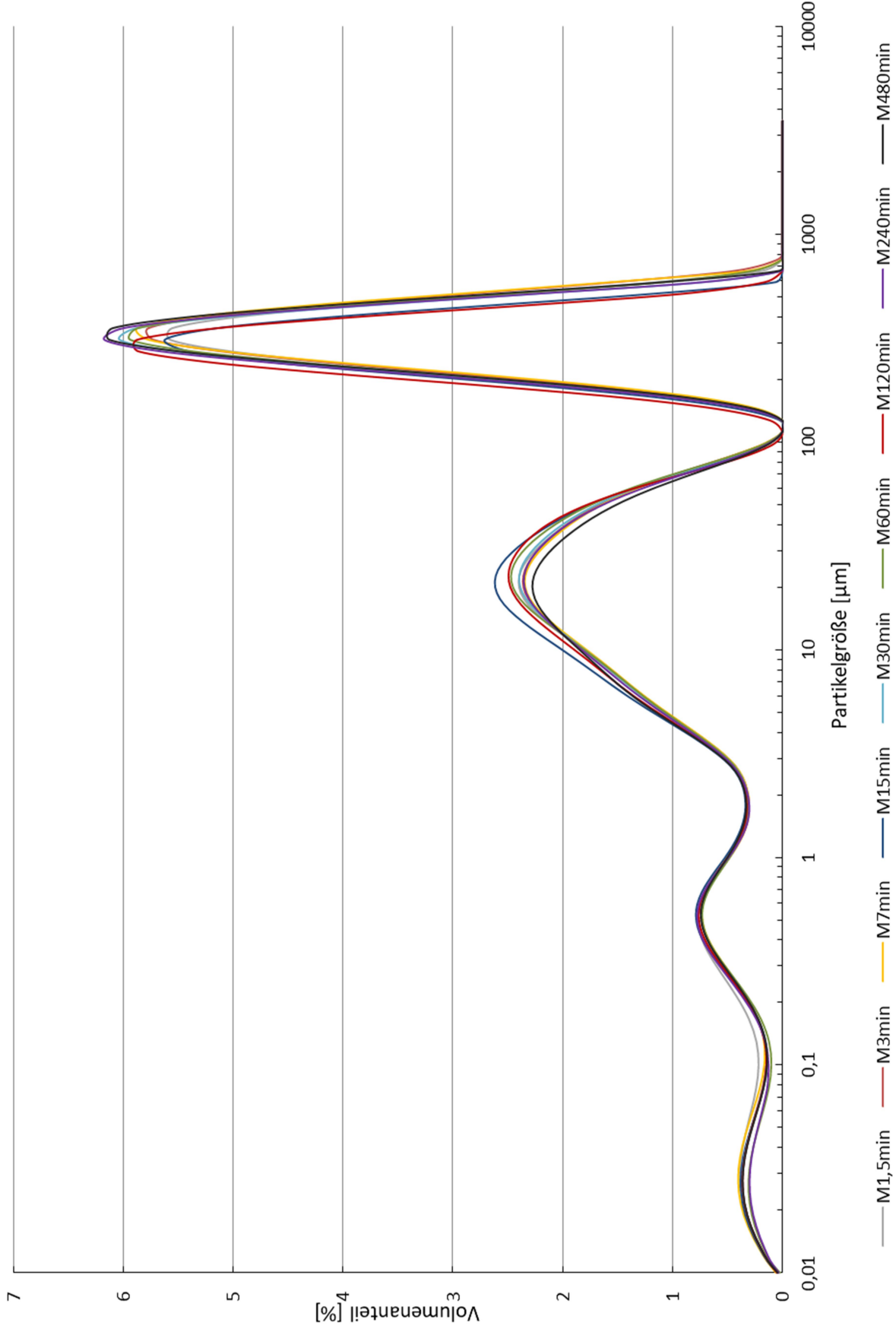


Abbildung 4.35: Partikelgrößenverteilungen der 1. Versuchsreihe

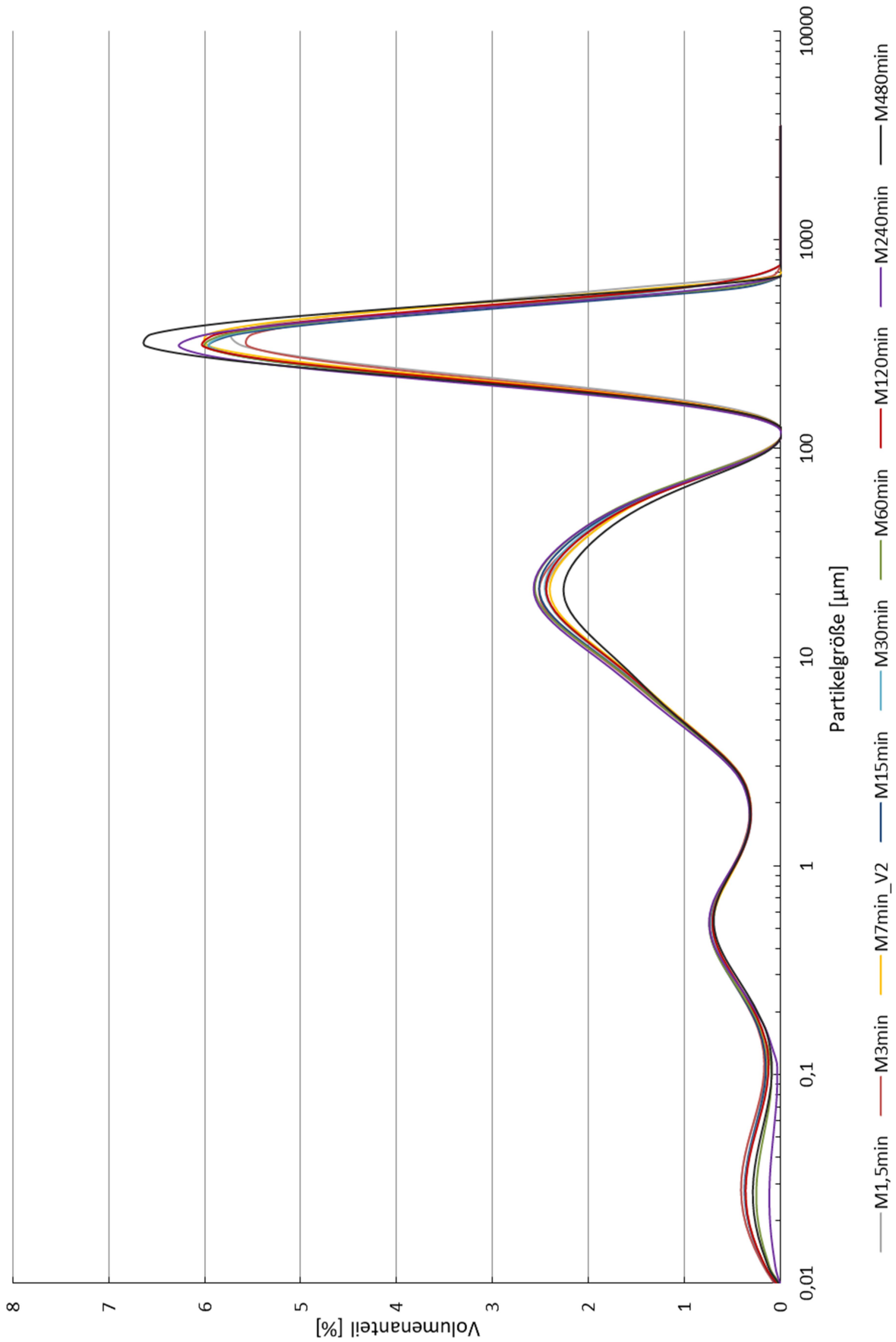


Abbildung 4.36: Partikelgrößenverteilung der 2. Versuchsreihe

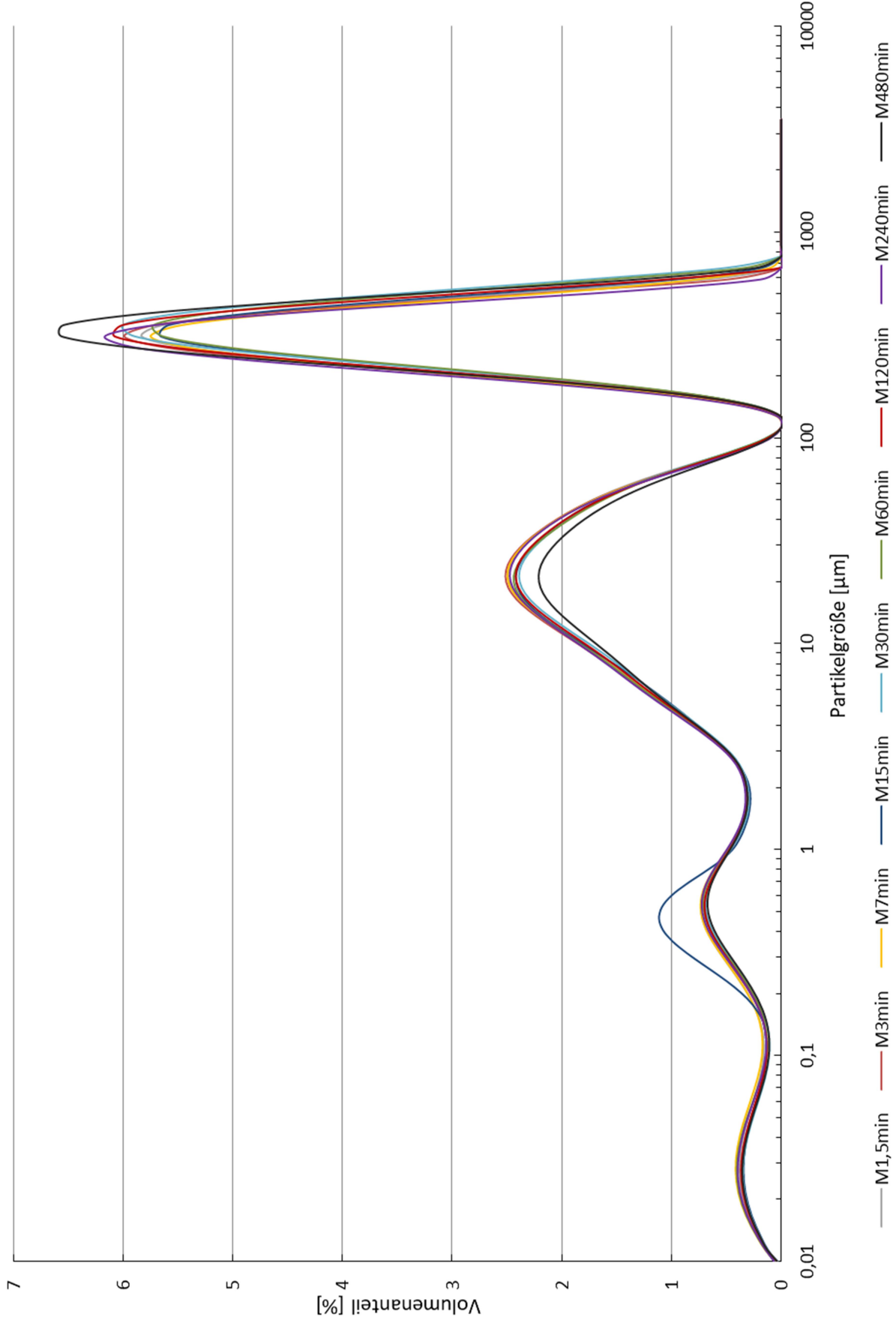


Abbildung 4.37: Partikelgrößenverteilungen der 3. Versuchsreihe

4.1.2.1 Einfluss des Trockenprämixalters auf die Packungsdichte

Aus den in den Abbildungen 4.35 bis 4.37 dargestellten Partikelgrößenverläufen lässt sich nun mithilfe der in Kapitel 3.2.3.3 beschriebenen Vorgangsweise die Packungsdichte der einzelnen Proben errechnen. Die Werte aller Proben sind in der folgenden Abbildung 4.38 dargestellt.

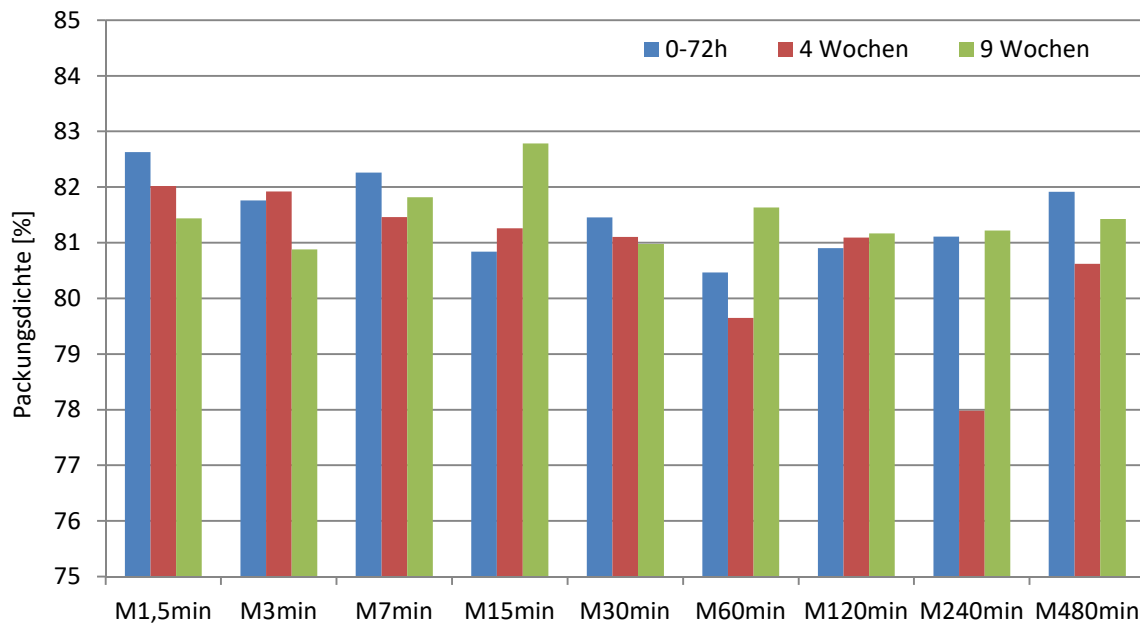


Abbildung 4.38: Einfluss des Prämixalters auf die Packungsdichte

Es zeigt sich, dass die Packungsdichte von der Trockenmischdauer nur sehr wenig beeinflusst wird und somit nur eine sehr leichte Verringerung der Packungsdichte bei Verlängerung der Trockenmischdauer auftritt. Auch eine Lagerung des Trockenprämix hat keine großen Auswirkungen auf die Packungsdichte. Insgesamt ist die Packungsdichte der zweiten Versuchsreihe aber mit 80,79% im Mittel, wesentlich geringer als die der beiden anderen Versuchsreihen, wo die mittlere Packungsdichte bei 81,48% liegt. Klammert man allerdings die Mischung M240min der zweiten Versuchsreihe aus, welche eine unrealistisch hohe Abweichung darstellt, so liegt die mittlere Packungsdichte der zweiten Versuchsreihe mit 81,14% ebenfalls im Bereich der anderen beiden Versuchsreihen.

Eine allgemeine Aussage über die Veränderung der Packungsdichte über die Trockenmischdauer lässt sich daher mit den ermittelten Werten in dieser Arbeit nicht machen. Es kann lediglich eine leicht fallende Packungsdichte bei Verlängerung der Trockenmischdauer festgestellt werden.

4.1.2.2 Einfluss des Mischers auf die Packungsdichte

Der Einfluss des Mischertyps auf die Packungsdichte wird im Folgenden analysiert. Es werden dabei die Daten dieser Arbeit mit den Ergebnissen von *Sacherl* [2] verglichen, dessen Arbeit zeitgleich und unter denselben Versuchsbedingungen am Institut entstanden ist. Zum Einsatz kam dabei ein R02

Eirich Intensivmischer. Der gewählte Mischablauf für die Versuche von *Sacherl* ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Mischablauf Sacherl [2]

Abschnitt	Beschreibung	Dauer	Drehzahl Mischer
[-]	[-]	[s]	[U/min]
1	Trockenmischen	30	1200
2	Flüssigkeitszugabe	30	1200
3	Nassmischen	120	1200
	Summe	180	

Der Vergleich der Packungsdichten erfolgt in den folgenden drei Diagrammen, wobei die Messergebnisse für die drei Versuchsreihen jeweils in einem Diagramm dargestellt werden.

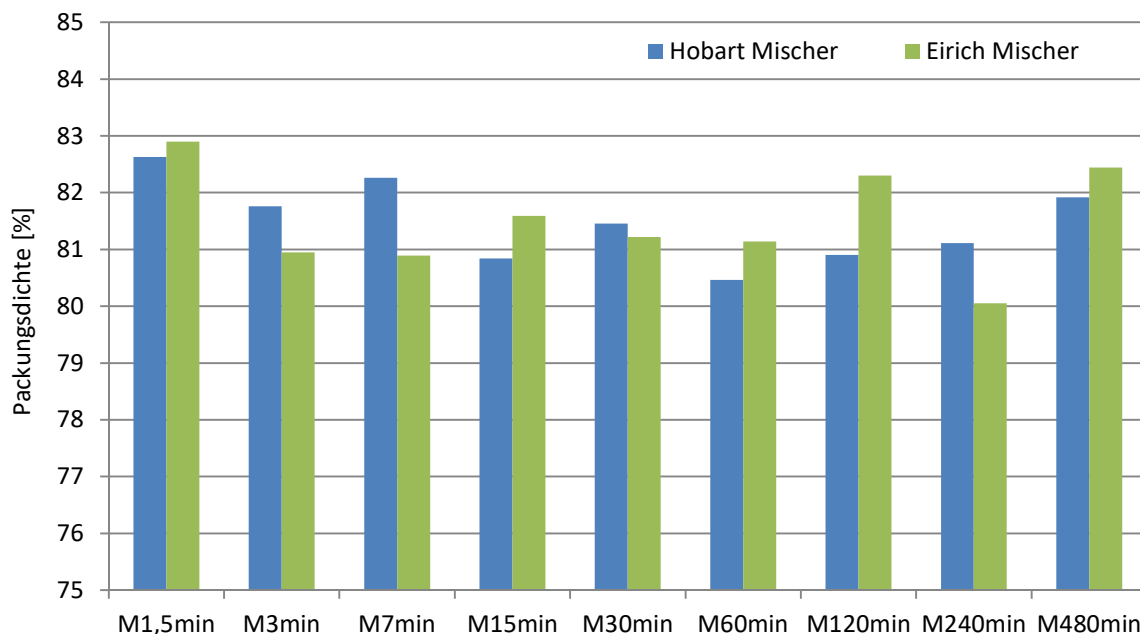


Abbildung 4.39: Einfluss des Mischertyps auf die Packungsdichte der 1. Versuchsreihe

Die Packungsdichten der ersten Versuchsreihe für die beiden untersuchten Mischertypen weichen im Wesentlichen nur recht wenig voneinander ab. Dies zeigen auch die Mittelwerte der Messergebnisse, welche 81,48% bei den Hobartmischungen bzw. 81,50% bei den Eirichmischungen betragen. Bei genauerer Betrachtung lassen sich jedoch trotzdem Unterschiede erkennen. So nimmt die Packungsdichte der Hobartmischungen über die Trockenmischdauer tendenziell ab, während eine gedachte Trendlinie für die Eirichmischungen praktisch konstant verlaufen würde.

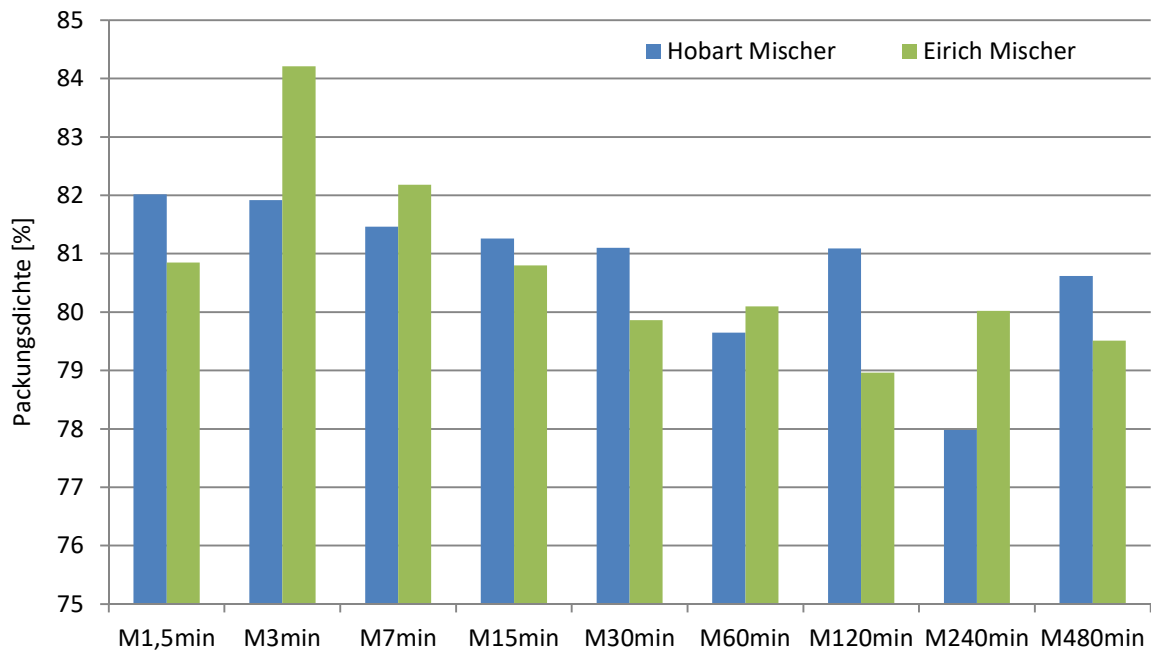


Abbildung 4.40: Einfluss des Mischertyps auf die Packungsdichte der 2. Versuchsreihe

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zeigen hingegen ein deutliches Abfallen der Packungsdichte bei beiden Mischertypen. Insgesamt sind die mittleren Packungsdichten von rund 80,75% für die beiden Mischertypen einander recht ähnlich, allerdings ergibt sich im Vergleich zur ersten Versuchsserie eine recht signifikante Verringerung um rund 0,75%. Damit lassen sich auch die verbesserten rheologischen Eigenschaften der zweiten Versuchsreihe im Vergleich zur ersten Versuchsreihe erklären.

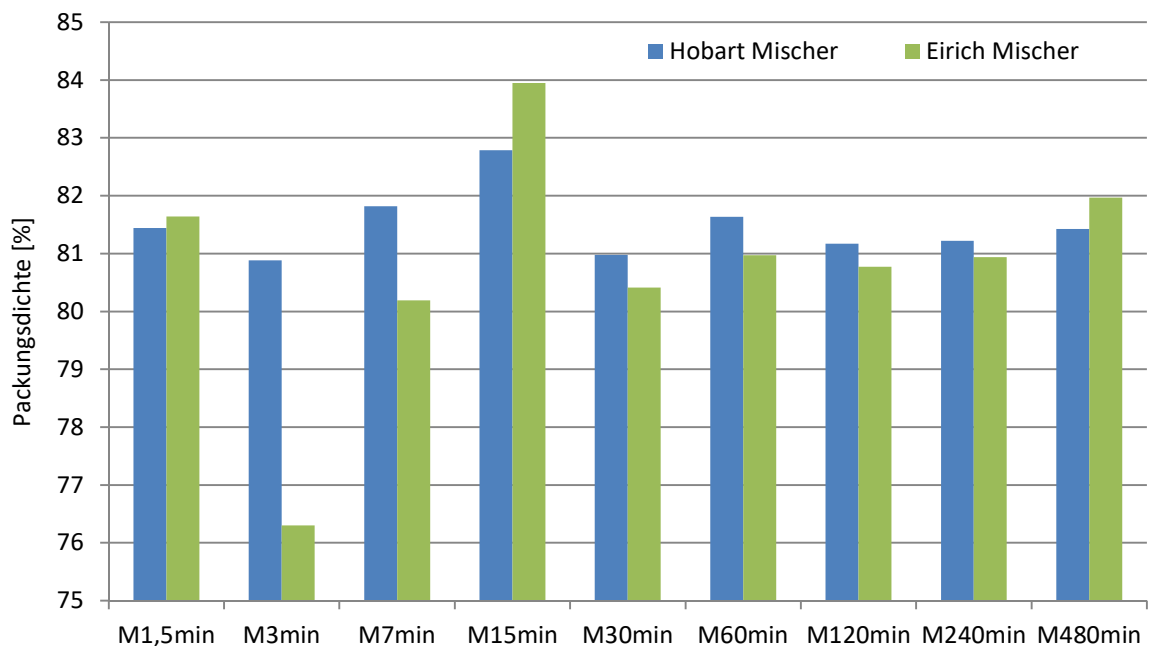


Abbildung 4.41: Einfluss des Mischertyps auf die Packungsdichte der 3. Versuchsreihe

Bei Betrachtung der Ergebnisse der dritten Versuchsreihe springen vor allem die Werte der Proben M3min und M15min der Eirichserie ins Auge, die jeweils extrem niedrig bzw. extrem hoch sind.

Insgesamt stellt sich bei beiden Mischern, unter Außerachtlassung dieser Extremwerte, wieder ein recht flacher Verlauf über die Trockenmischdauer ein, wobei auffällt, dass die Hobartmischungen jeweils etwas höhere Packungsdichten aufweisen, als die Eirichmischungen. Die Mittelwerte liegen, ohne Berücksichtigung des Wertes M3min der Eirichserie, mit 81,43% für die Hobartserie und 81,38% für die Eirichserie wiederum recht nahe beieinander. Im Vergleich mit den Versuchsergebnissen der zweiten Serie sind diese jedoch trotzdem wesentlich höher. Fraglich ist, ob die Verringerung der Packungsdichte der zweiten Versuchsserie und die damit einhergehende Verbesserung der rheologischen Werte mehr oder weniger zufällig ist oder ob diese tatsächlich an der vierwöchigen Lagerungsdauer des Trockenprämix liegt. Die Tatsache, dass die Packungsdichten der neunwöchigen Mischungen wieder ansteigen und analog dazu die rheologischen Kennwerte schlechter werden, zeigt jedenfalls, dass eine Verringerung der Packungsdichte und somit eine Verbesserung der Fließeigenschaften bei längerer Lagerung erzielt werden kann, dieser Verlauf jedoch nicht stetig ist. Somit wären weitere Untersuchungen in kürzeren Lagerungsabständen und zusätzlich Versuche mit mehr als neun Wochen altem Prämix notwendig, um diese Verläufe präzisieren zu können und eine fundierte Aussage über den Einfluss der Prämixlagerung auf Rheologie und Packungsdichte machen zu können.

4.2 Festbetoneigenschaften

In diesem Kapitel werden die Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeit, sowie zur Biegezugfestigkeit, wie in Kapitel 3.2.3.4 beschrieben, ausgewertet und analysiert. Die Prüfungen wurden für die verschiedenen Prämialter 0-72h, vier Wochen und neun Wochen, sowohl nach 24 Stunden, als auch nach 28 Tagen durchgeführt. Neben der Messung der mechanischen Kennwerte wurden die Prüfprismen abgewogen und abgemessen, um aus den gemessenen Bruchlasten die entsprechenden Spannungen zu ermitteln. Das Kapitel setzt sich aus den beiden Kapiteln Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit zusammen, welche sich wiederum in die Auswertung der einzelnen Versuchsreihen, den Vergleich der unterschiedlichen Prämialter und den Einfluss unterschiedlicher Mischer auf die Festbetoneigenschaften gliedern.

4.2.1 Druckfestigkeit

4.2.1.1 Erste Versuchsreihe

Die ermittelten Werte der 24 Stunden Druckfestigkeit der ersten Versuchsreihe, sind in Abbildung 4.42. dargestellt.

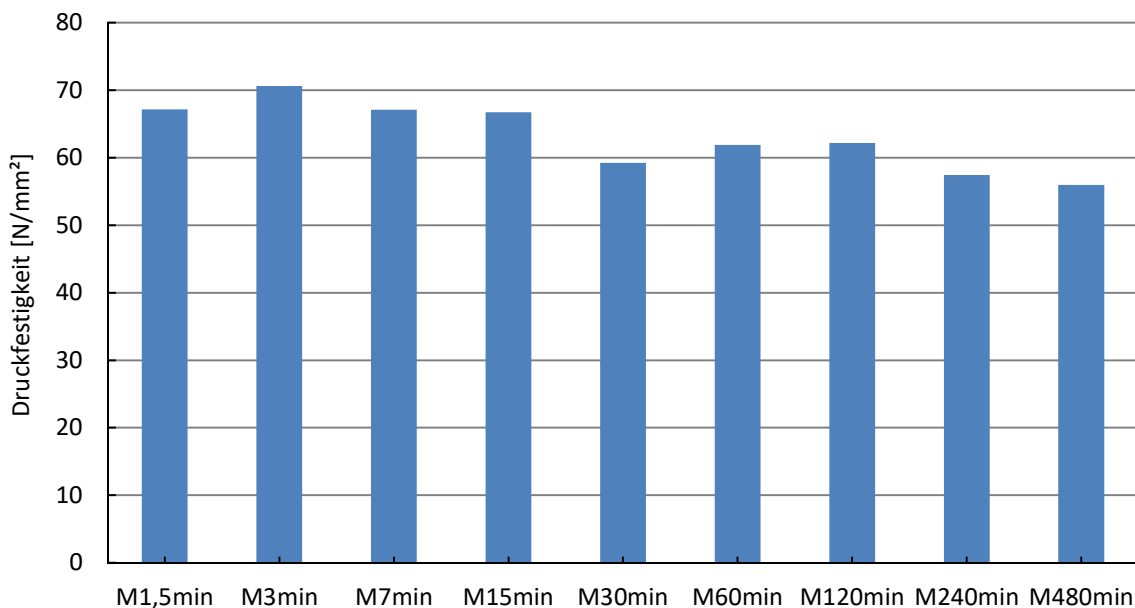


Abbildung 4.42: 24h Druckfestigkeit 1. Versuchsreihe

Betrachtet man die ermittelten Druckfestigkeiten und deren Entwicklung über die Trockenmischdauer, so lässt sich eine tendenzielle Verringerung der Druckfestigkeit über die Trockenmischdauer erkennen. Diese Verringerung ist aber bei weitem nicht so ausgeprägt wie bei den gemessenen rheologischen Kennwerten. So liegt die Differenz zwischen der höchsten gemessenen Druckfestigkeit der Probe M3min und der geringsten der Probe M480min nur bei rund 15 N/mm². Auch die Stetigkeit ist weniger ausgeprägt als bei den rheologischen Kennwerten.

Grundsätzlich sind Druckfestigkeitswerte von bis zu 70N/mm^2 nach 24 Stunden aber sehr beachtliche Werte und mit gängigen Druckfestigkeiten von Normalbeton nach 24 Stunden nicht vergleichbar. Die folgende Abbildung 4.43 stellt nun die Druckfestigkeit der ersten Versuchsreihe nach 28 Tagen dar.

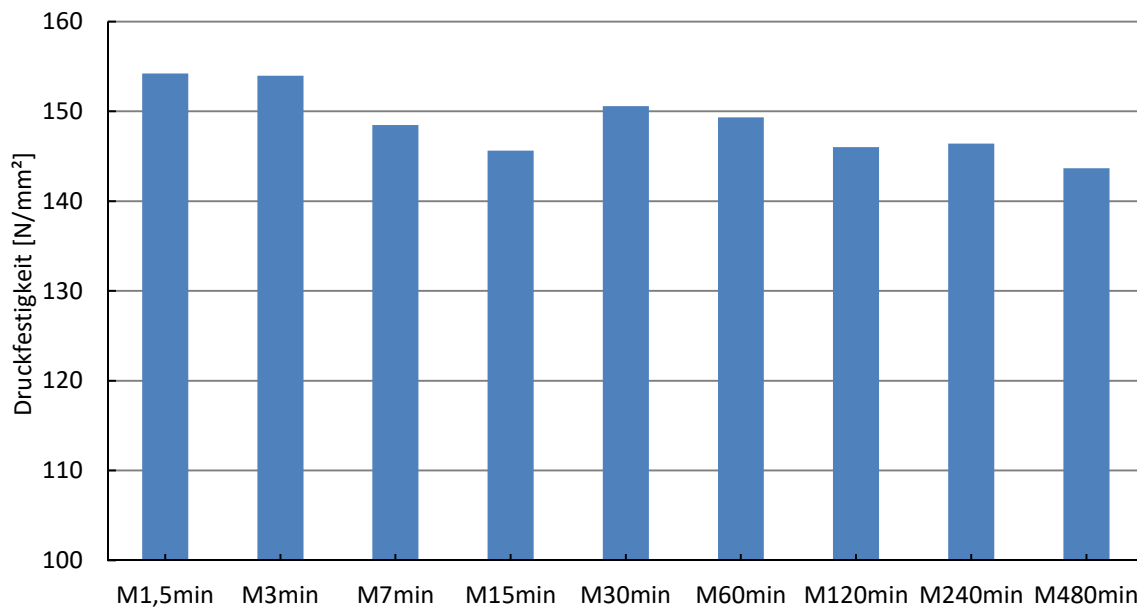


Abbildung 4.43: 28 Tage Druckfestigkeit 1. Versuchsreihe

Auch hier zeigt sich die Tendenz geringer werdender Druckfestigkeit bei längerer Trockenmischdauer gut, wobei die Festigkeiten in einem Bereich von rund 150N/mm^2 liegen. Interessant ist allerdings die Tatsache, dass die absolute Differenz zwischen größter und geringster Druckfestigkeit nach 28 Tagen nur mehr bei rund 10N/mm^2 liegt, und somit sowohl relativ als auch absolut gesehen wesentlich geringer geworden ist. Es liegt somit die Vermutung nahe, dass die Trockenmischdauer die Frühfestigkeit wesentlich stärker beeinflusst als die Spätfestigkeit.

4.2.1.2 Zweite Versuchsreihe

Die Druckfestigkeit nach 24 Stunden der zweiten Versuchsreihe ist in Abbildung 4.44 dargestellt. Dabei zeigt sich mit wenigen Ausnahmen eine relativ stetige Tendenz der bereits in Versuchsreihe eins beobachteten Verringerung der Druckfestigkeit bei gleichzeitiger Steigerung der Trockenmischdauer. Die Differenzen sind allerdings wesentlich größer als noch in Versuchsreihe eins.

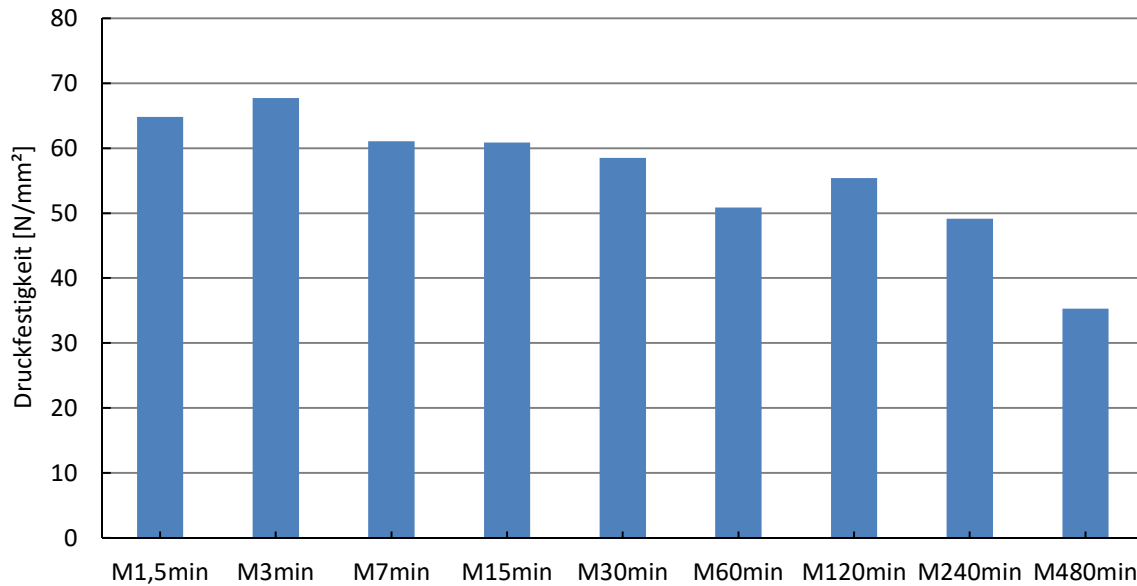


Abbildung 4.44: 24h Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe

In der folgenden Abbildung 4.45 findet sich die Druckfestigkeit nach 28 Tagen. Auffallend ist hier vor allem die Mischung M240min, welche eine signifikant geringere Druckfestigkeit als die anderen Mischungen aufweist. Speziell unter dem Aspekt, dass die Mischung nach 24 Stunden keine Auffälligkeiten gezeigt hat und die Mittelwerte immer aus drei geprüften Prismen ermittelt werden und die Prüfergebnisse dieser drei Prismen nahezu ident sind, kann hier eine fehlerhafte Messung quasi ausgeschlossen werden. Eine triviale Erklärung für diese Auffälligkeit lässt sich an dieser Stelle nicht finden.

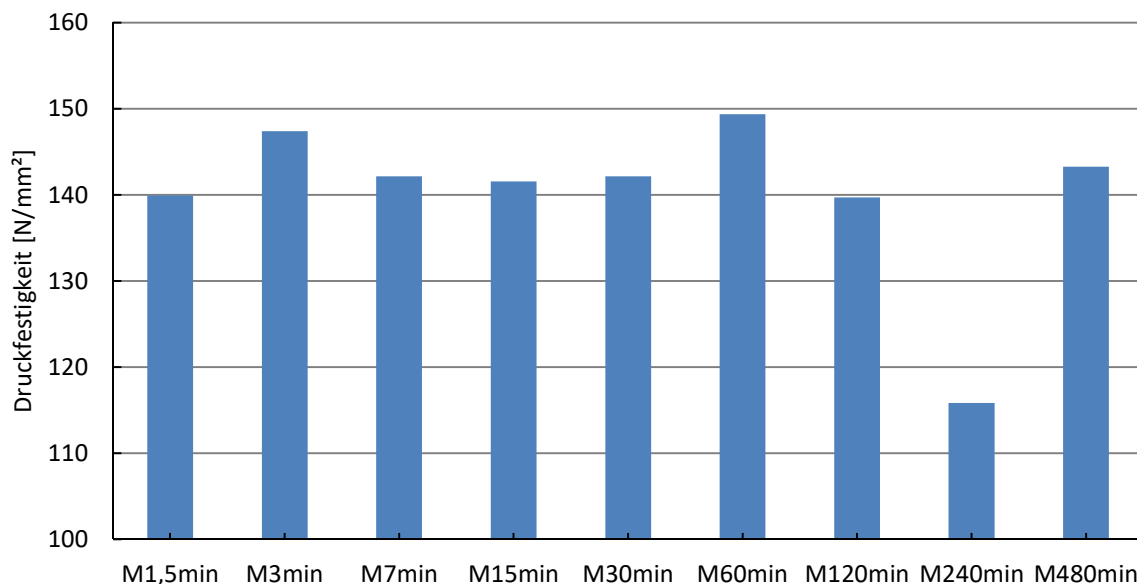


Abbildung 4.45: 28 Tage Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe

Weiters bestätigt sich die im vorangegangenen Kapitel geäußerte Vermutung, dass sich die Trockenmischdauer vor allem auf die Frühfestigkeit auswirkt, im weiteren Erhärtungsverlauf aber wesentlich an Einfluss verliert.

4.2.1.3 Dritte Versuchsreihe

Die 24 Stunden Druckfestigkeit der dritten Versuchsreihe findet sich in Abbildung 4.46. Diese zeigt wiederum die tendenzielle Verringerung der Druckfestigkeit bei höheren Trockenmischdauern. Diese verringert sich aber erst im Bereich der drei längsten Trockenmischdauern wesentlich und bildet davor eine Art Plateau gleichbleibender Druckfestigkeiten aus.

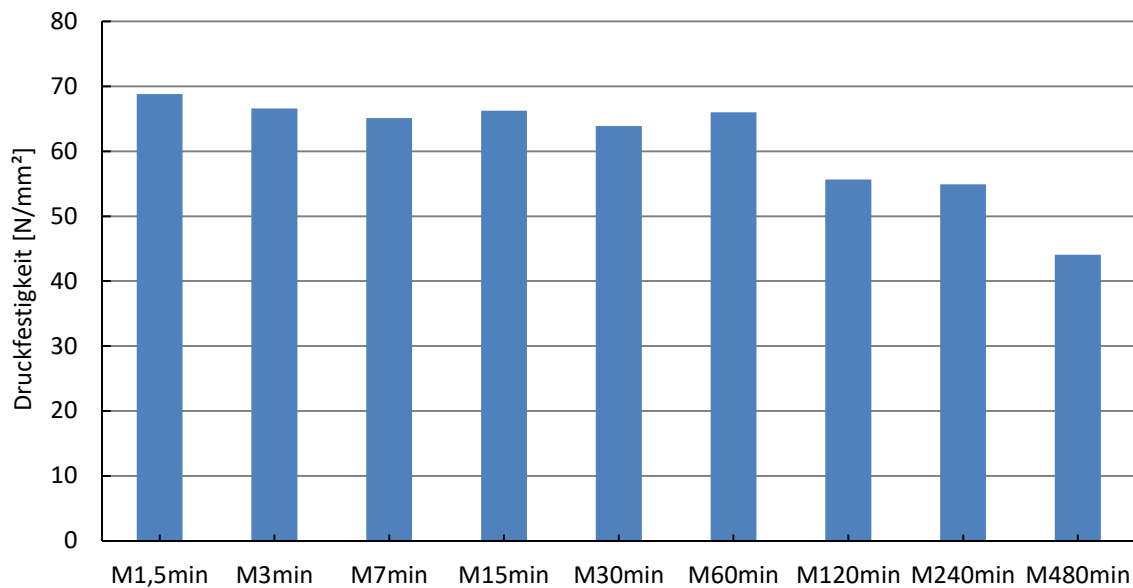


Abbildung 4.46: 24h Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe

Betrachtet man die 28 Tage Druckfestigkeiten der dritten Versuchsreihe (Abbildung 4.47), so springt die beinahe willkürliche Entwicklung über die Trockenmischdauer ins Auge. Besitzt die Mischung M30min nach 28 Tagen die höchste Druckfestigkeit, so besitzen die Mischungen M1,5min und M480min die geringsten. Betrachtet man nun nochmalig die 24 Stunden Druckfestigkeit dieser beiden Mischungen, so erkennt man, dass diese zu diesem Zeitpunkt noch die größte gemessene Differenz der Druckfestigkeit aufweisen und erst im Aushärteprozess nach 24 Stunden ähnliche Werte ausbilden.

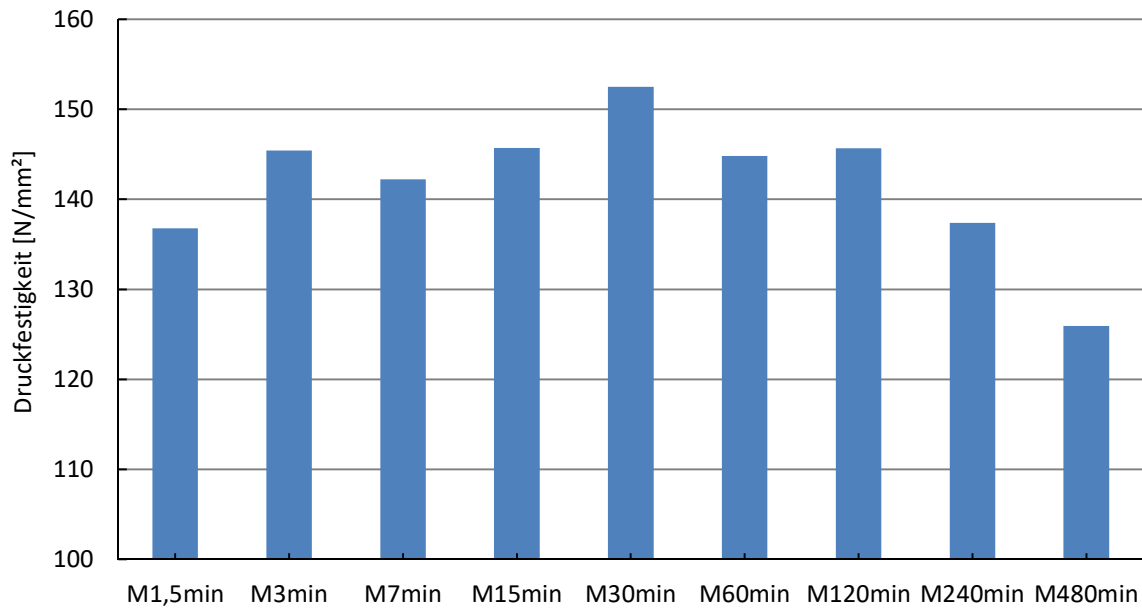


Abbildung 4.47: 28 Tage Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe

4.2.1.4 Einfluss des Trockenprämixalters auf die Druckfestigkeit

Das folgende Kapitel vergleicht die einzelnen Versuchsreihen untereinander und beschreibt die Auswirkungen der unterschiedlichen Lagerungsdauern des Trockenprämix auf die Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton. Die Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Versuchsreihen nach 24 Stunden finden sich in der folgenden Abbildung 4.48.

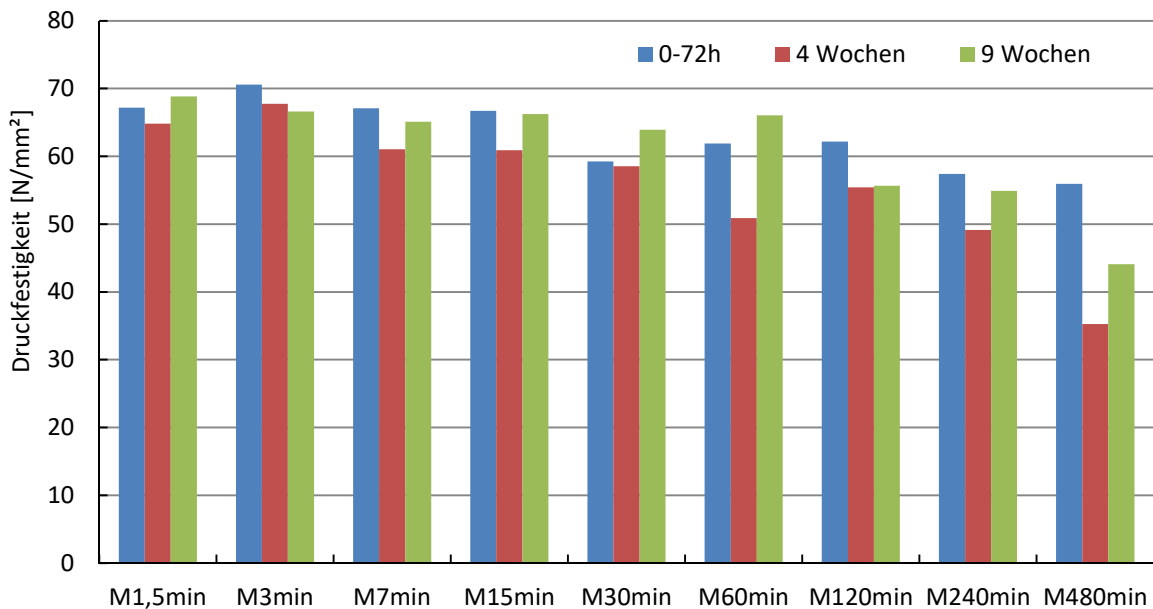


Abbildung 4.48: Einfluss des Prämixalters auf die 24h Druckfestigkeit

Wie bereits oben erwähnt, nimmt die Druckfestigkeit grundsätzlich ab, je länger der Beton vorab trockengemischt wurde. Interessanterweise erreicht aber die zweite Versuchsreihe nach 4 Wochen Lagerung wesentlich geringere Festigkeitswerte als die beiden anderen Versuchsreihen. Es scheint

also, dass die Lagerung des Trockenbetons kurzfristig negative Auswirkungen auf die Frühfestigkeit hat, nach einer gewissen Zeit aber wieder zunimmt. Im Mittel fallen die Druckfestigkeiten aber nach neun Wochen immer noch geringer aus, als die des jüngsten Prämix der ersten Versuchsreihe im Alter von 0-72h.

Weiters nimmt die Schwankung dieses Phänomens mit zunehmender Trockenmischdauer zu. Sind die Mischungen bis M30min noch relativ ähnlich, so verstärkt sich die Schwankungsbreite der Druckfestigkeiten zwischen den Trockenbetonaltern ab M60min merklich.

In Abbildung 4.49 wird der Einfluss der Trockenmischdauer auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen beschrieben.

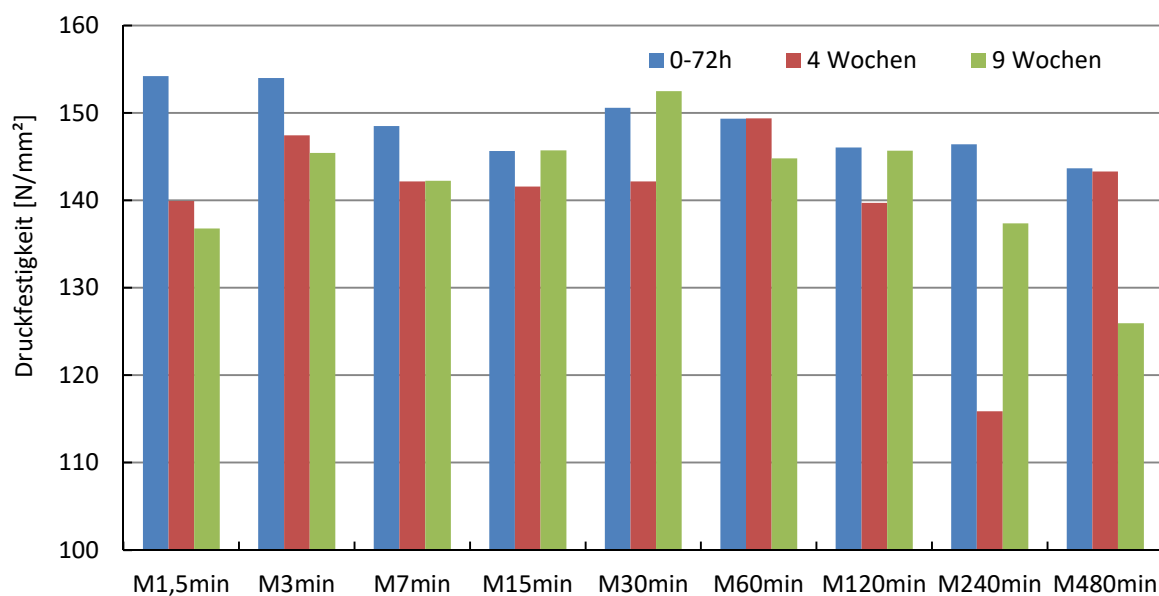


Abbildung 4.49: Einfluss des Prämixalters auf die 28 Tage Druckfestigkeit

Der grundsätzliche Trend, der bereits nach Betrachtung der 24 Stunden Druckfestigkeit auffallend war, nämlich, dass die Festigkeiten des 4 Wochen alten Trockenbetons tendenziell geringer ausfallen als die übrigen Versuchsreihen, stellt sich auch bei der Druckfestigkeit nach 28 Tagen ein.

Die höchsten Druckfestigkeiten ergeben sich nach 0-72h Lagerung. Eine Ausnahme bildet die Mischung M30min, bei der die neun Wochen alte Mischung etwas höhere Werte liefert. Nach Auswertung aller Daten lässt sich also festhalten, dass die höchsten Druckfestigkeiten unmittelbar nach dem Trockenmischvorgang zu erreichen sind und anschließend stark abfallen, ehe sie sich im Zeitraum 4 bis 9 Wochen nach Trockenmischvorgang wieder etwas erhöhen. Interessant wäre in diesem Zusammenhang, ob diese Entwicklung grundsätzlich auch über längere Zeit beibehalten wird, und die Druckfestigkeit nach einer gewissen Lagerungsdauer die Druckfestigkeiten der ersten Versuchsreihe sogar wieder übersteigen. Eine Verlängerung der Lagerungsdauer bei zukünftigen

Versuchen sollte somit angedacht werden, um eine fundierte Aussage zum Einfluss der Lagerung von Trockenprämix auf die Betonkennwerte machen zu können.

4.2.1.5 Einfluss des Mixers auf die Druckfestigkeit

Die Auswirkungen unterschiedlicher Mixer auf die Druckfestigkeit von UHPC werden im Folgenden aufgezeigt. Dabei werden die Daten dieser Arbeit mit den Ergebnissen von *Sacherl* [2] verglichen, dessen Arbeit zeitgleich und unter denselben Versuchsbedingungen am Institut entstanden ist. Zum Einsatz kam dabei ein *RO2 Eirich* Intensivmischer. Der gewählte Mischablauf für die Versuche von *Sacherl* ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Die Grundlage des Vergleichs bilden Balkendiagramme, welche die 24 Stunden, sowie die 28 Tage Druckfestigkeiten der drei Versuchsreihen darstellen. In den folgenden Abbildungen werden die 24 Stunden Druckfestigkeit der ersten (Abbildung 4.50), zweiten (Abbildung 4.51) und dritten (Abbildung 4.52) Versuchsreihe verglichen.

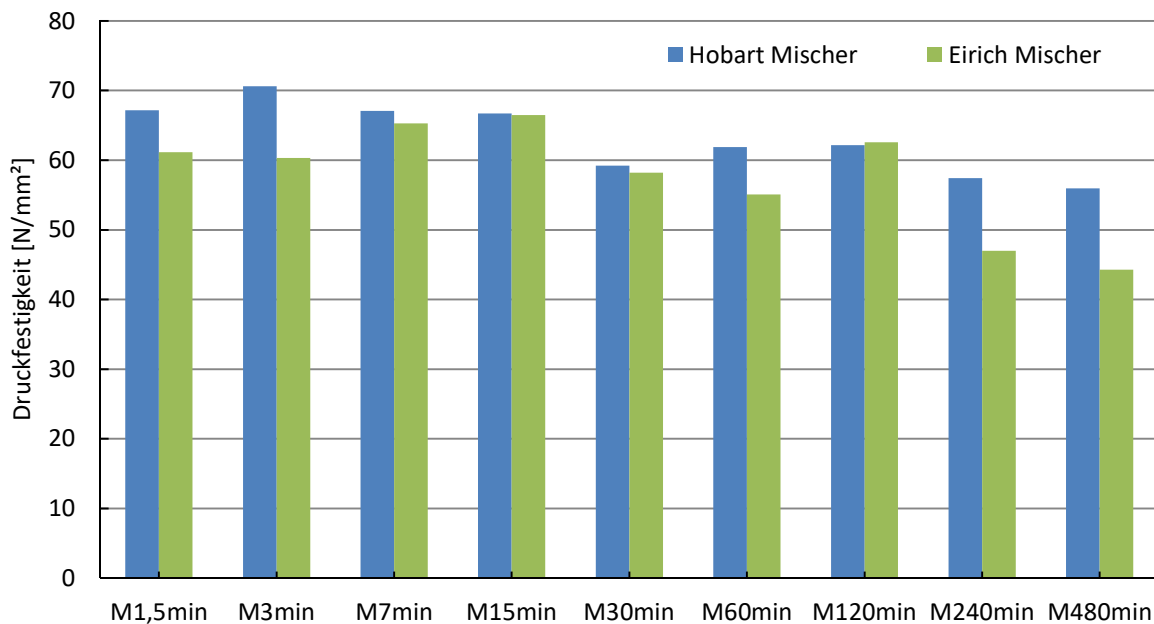


Abbildung 4.50: Einfluss des Mischertyps auf die 24 Stunden Druckfestigkeit der 1. Versuchsreihe

Betrachtet man die Frühfestigkeitsentwicklung der ersten Versuchsreihe unter Anwendung unterschiedlicher Mixer, so stellt man fest, dass die Proben, welche mit dem Hobart Mischer homogenisiert wurden, eine tendenziell höhere Druckfestigkeit besitzen. Die größten Differenzen weisen dabei die letzten beiden Mischungen M240min und M480min auf. Insgesamt weisen aber beide Probenserien eine - wenn auch unetliche – Tendenz geringer werdender Druckfestigkeit bei zugleich größer werdender Trockenmischdauer auf.

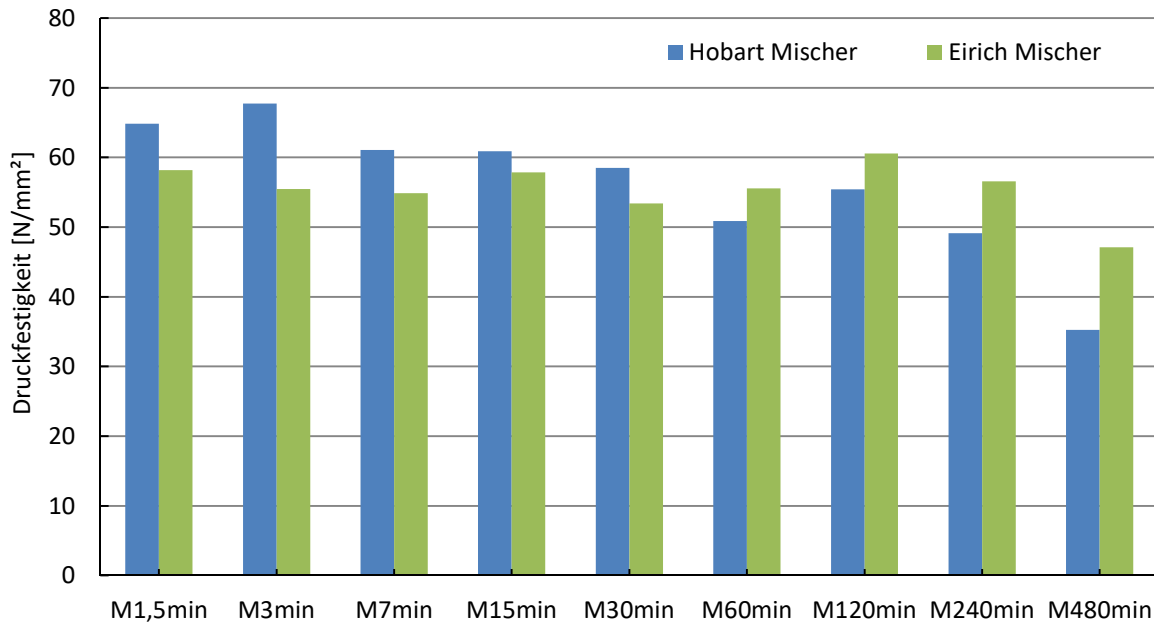


Abbildung 4.51: Einfluss des Mischertyps auf die 24 Stunden Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe

Betrachtet man nun die 24 Stunden Druckfestigkeit der zweiten Versuchsreihe, so ergibt sich ein leicht anderes Bild. Erreichen die kürzeren Mischungen M1,5min bis M30min beim Mischen mittels Hobart Mischer noch höhere Druckfestigkeiten als die Proben von *Sacherl*, so stellt sich bei den Proben ab M60min das Gegenteil ein. Bildet man den Mittelwert über beide Serien, so ergibt sich bei beiden ein relativ ähnlicher Wert um 56N/mm^2 . Zum Vergleich: Die Mittelwerte der ersten Versuchsreihe liegen bei rund 63N/mm^2 für die Hobart Serie und 58N/mm^2 für die Eirich Serie und somit wesentlich über den Werten der zweiten Serie.

Die Werte der dritten Versuchsreihe in Abbildung 4.52 bestätigen die erwähnten Tendenzen der zweiten Versuchsreihe ebenfalls. So sind auch hier die Druckfestigkeiten der Hobartmischungen bis M30min leicht über den der Eirichmischungen, ehe sich dieser Trend umkehrt. Bildet man den Mittelwert über alle Proben, so liegen die Eirichmischungen mit rund 62N/mm^2 leicht über jenen der Hobartmischungen mit rund 61N/mm^2 . Insgesamt sind die Werte jedoch wieder höher als die der zweiten Versuchsreihe.

Interessant wäre in diesem Zusammenhang für zukünftige Arbeiten eine längere Lagerung des Trockenprämix über neun Wochen hinaus zu realisieren, um festzustellen, ob sich diese Tendenzen mit weiterer Lagerung fortsetzen und sich die Druckfestigkeit bei längerer Lagerung weiter erhöht oder ob diese Entwicklungen lediglich Schwankungen ohne besondere Tendenzen darstellen.

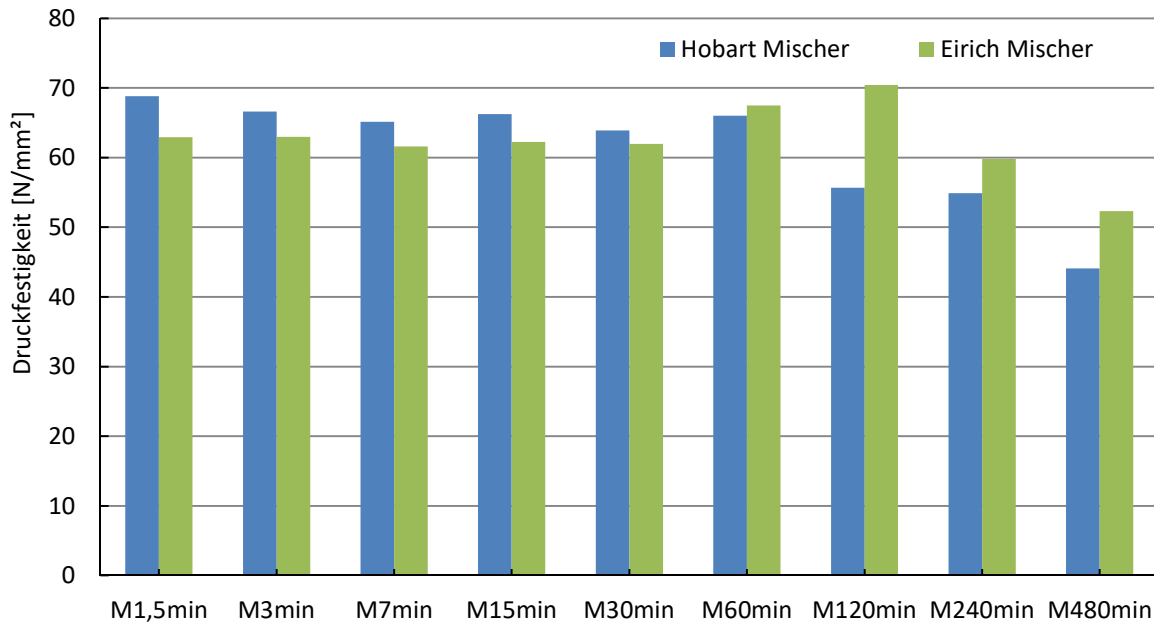


Abbildung 4.52: Einfluss des Mischertyps auf die 24 Stunden Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe

Die folgenden Abbildungen bilden den Vergleich der 28 Tage Festigkeit der ersten (Abbildung 4.53), zweiten (Abbildung 4.54) und dritten (Abbildung 4.55) Versuchsreihe.

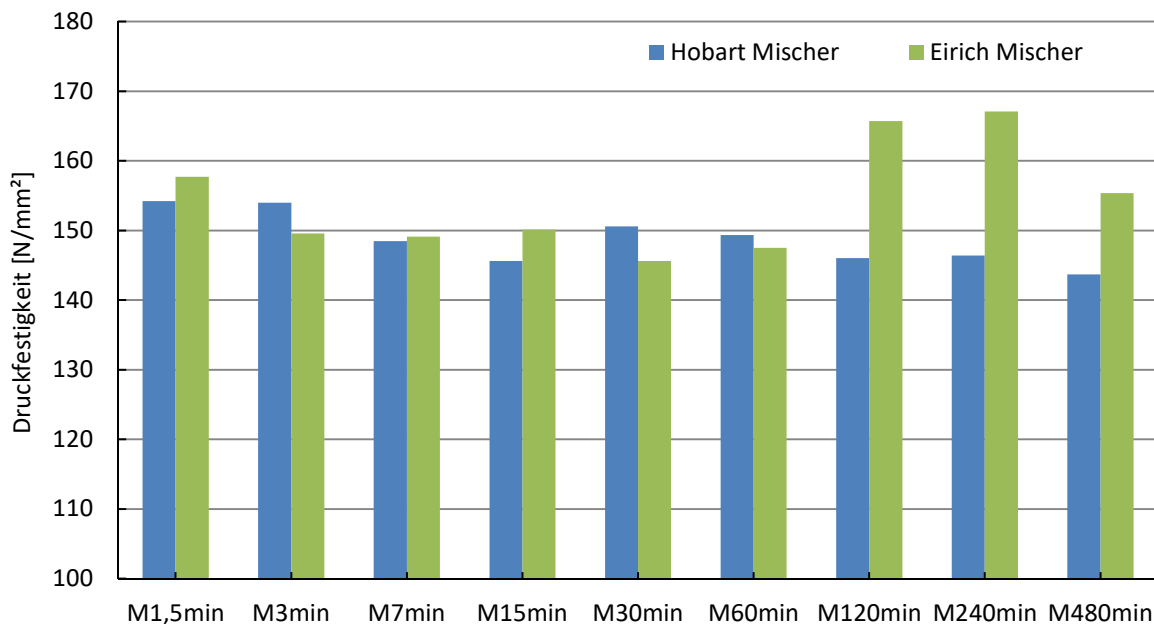


Abbildung 4.53: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Druckfestigkeit der 1. Versuchsreihe

Bei Betrachtung der 28 Tage Druckfestigkeit der ersten Versuchsreihe fällt auf, dass die Eirichmischungen M120min M240in und M480min eklatant höhere Werte aufweisen als die zugehörigen Hobartmischungen. Im Vergleich zu den 24 Stunden Druckfestigkeiten derselben Serie haben diese also bei höheren Trockenmischdauern wesentlich bessere Festigkeitsentwicklungen als die Hobartmischungen.

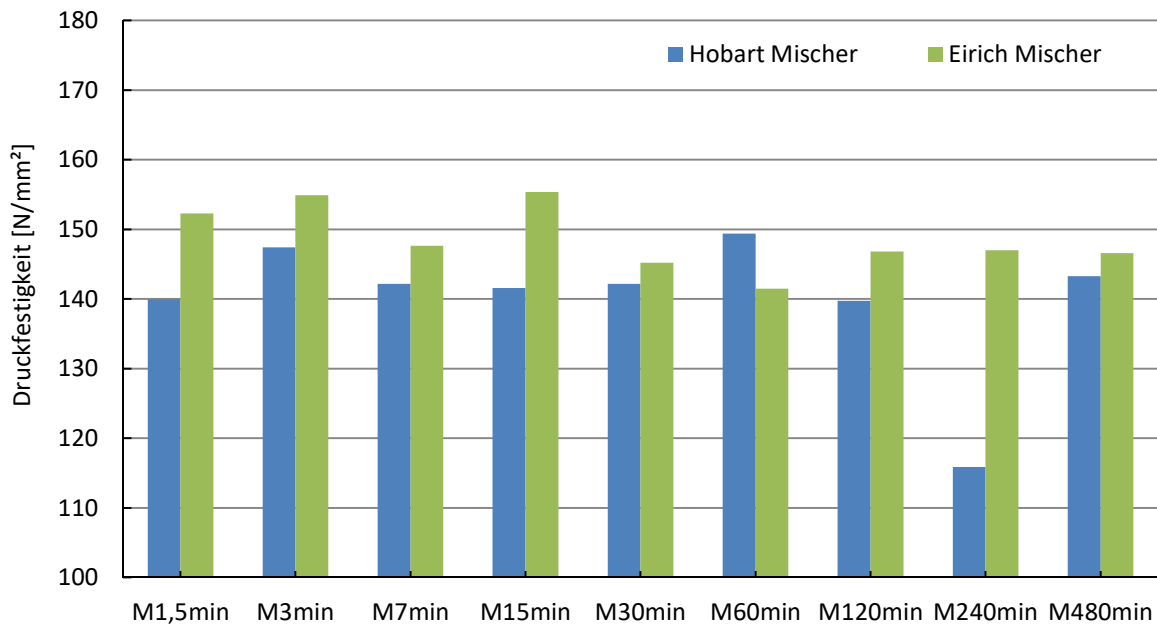


Abbildung 4.54: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe

Die Zweite Serie verstärkt die Tendenz höherer Festigkeit bei besserem Mischwerkzeug noch weiter. Hier sind bis auf die Mischung M60min bei allen Eirichmischungen höhere Druckfestigkeiten gemessen worden als bei den Hobartmischungen. Insgesamt sind aber auch hier die Werte der zweiten Serie wesentlich niedriger als die Werte der Versuchsserien eins und drei.

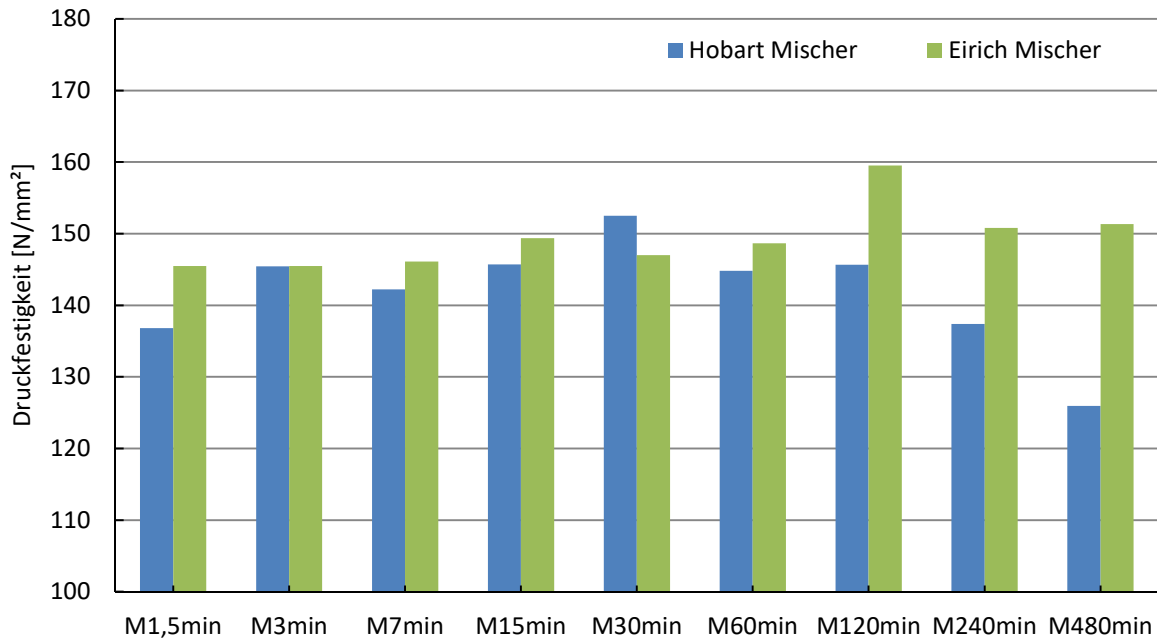


Abbildung 4.55: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe

Die abschließende Betrachtung der dritten Versuchsserie liefert ebenfalls die Tendenz, dass bei längerer Trockenmischdauer die Eirich Mischungen wesentlich höhere Druckfestigkeiten aufweisen als die Hobart Mischungen, welche speziell in diesem Bereich stark an Druckfestigkeit einbüßen.

Abschließend lässt sich also festhalten, dass der Einfluss der Trockenmischdauer bei Mischern im Leistungsbereich von gewöhnlichen Baustellenmischern wesentlich höher ist, als bei Hochleistungsmischern. Eine Verbesserung der Druckfestigkeit durch weitere Steigerung der Trockenmischdauer scheint jedoch nicht möglich. Hier liegt eher die Vermutung nahe, dass die Druckfestigkeit einen in etwa konstanten Wert annimmt.

4.2.2 Biegezugfestigkeit

4.2.2.1 Erste Versuchsreihe

Die folgende Abbildung 4.56 stellt die Entwicklung der Biegezugfestigkeit der ersten Versuchsreihe nach 24 Stunden bei steigender Trockenmischdauer graphisch dar.

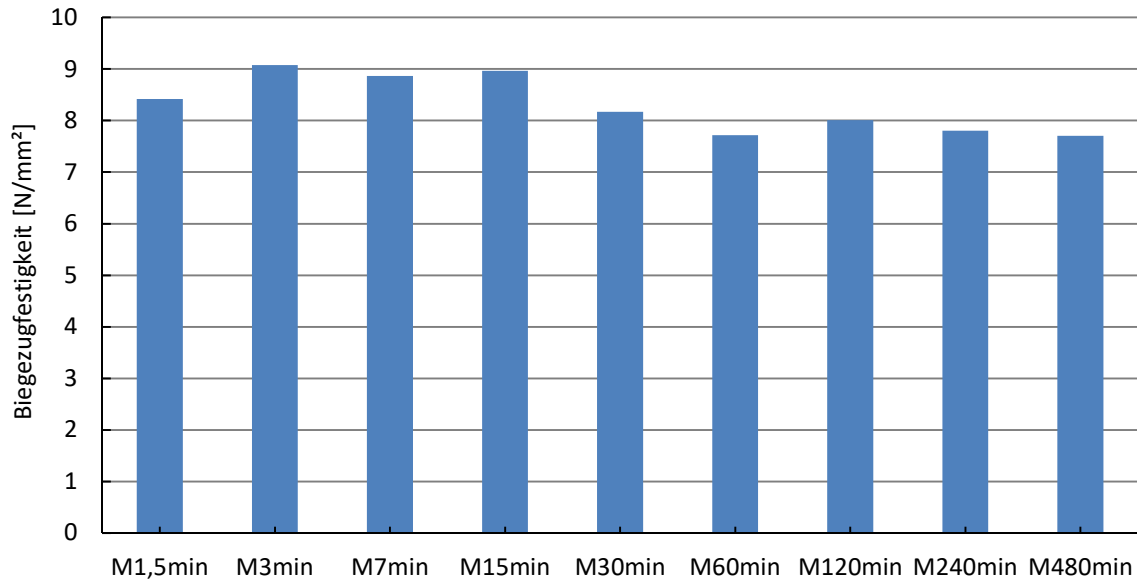


Abbildung 4.56: 24h Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe

Dabei stellt sich eine geringe Abnahme der Biegezugfestigkeit bei steigender Trockenmischdauer - speziell nach 15 Minuten - ein. Die Absolut Werte liegen in etwa zwischen 7,8 und 9,1 N/mm², streuen also vergleichsweise wenig. Die Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen finden sich in Abbildung 4.57.

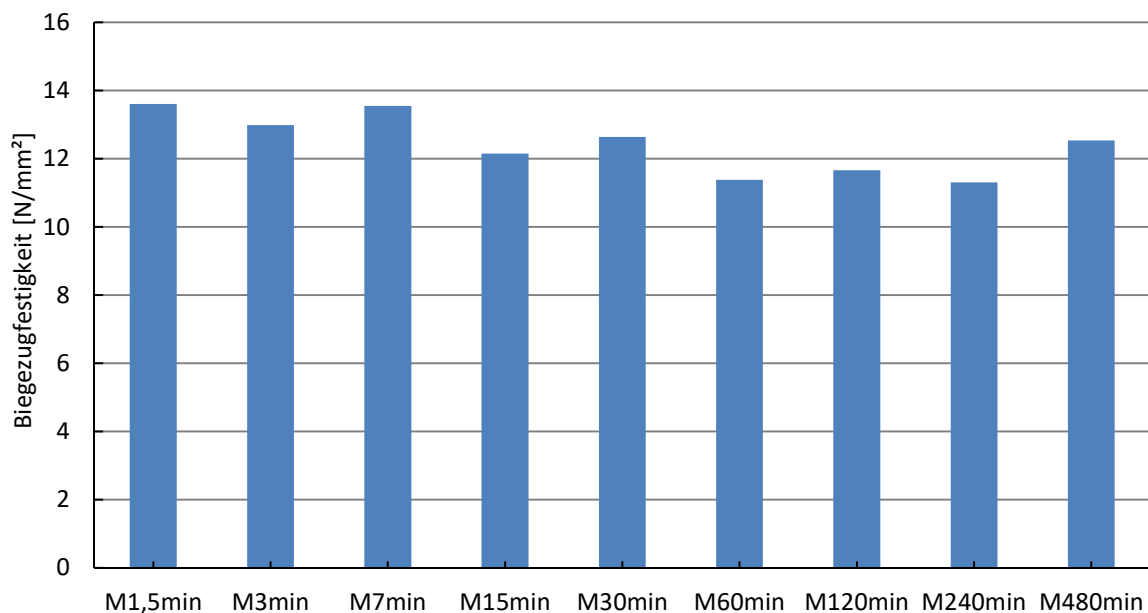


Abbildung 4.57: 28 Tage Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe

Auch hier stellt sich eine stetige Verringerung der Biegezugfestigkeit über die Trockenmischdauer ein. Lediglich die Mischung M480min weist eine größere Abweichung zu diesem Trend auf. Auffallend ist allerdings die relativ geringe Steigerung der 28 Tage Biegezugfestigkeit im Vergleich zur 24 Stunden Festigkeit. So steigert sich der Mittelwert über alle Proben nur um etwa 50%, von rund 8 auf 12 N/mm². Im Vergleich dazu hat sich die Druckfestigkeit mit rund 140% Steigerung im Mittel mehr als verdoppelt. Die Biegezugfestigkeit erreicht also vergleichsweise schnell ein höheres Niveau und steigert sich im weiteren Erhärtungsverlauf nur noch gering.

4.2.2.2 Zweite Versuchsreihe

In Abbildung 4.58. findet sich die 28 Tage Biegezugfestigkeit der zweiten Versuchsreihe.

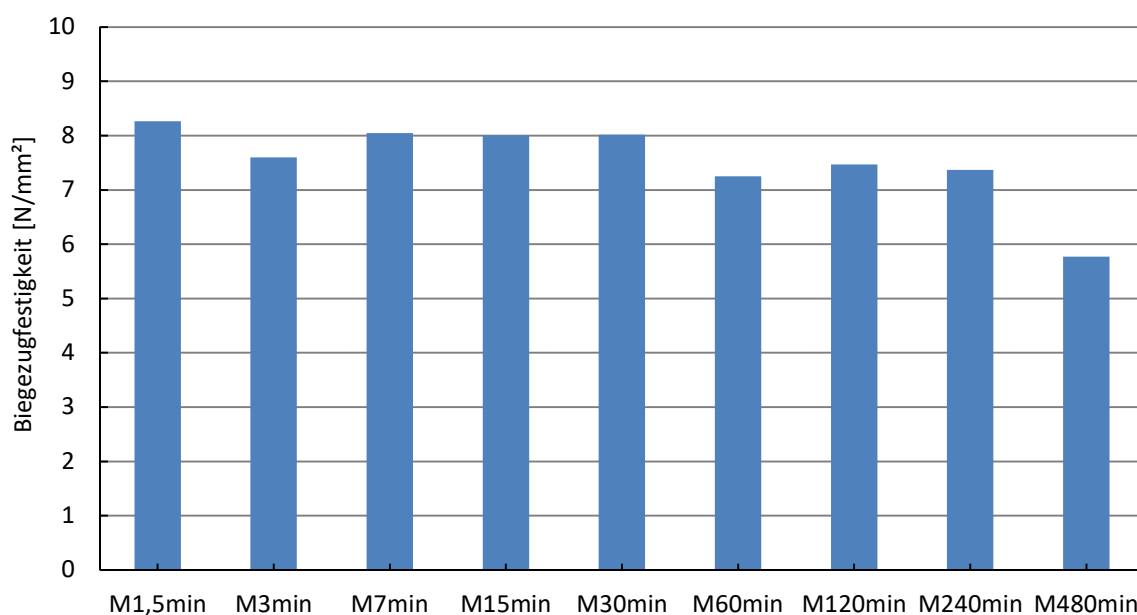


Abbildung 4.58: 24h Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe

Markant ist hier, dass sich bis zur Mischung M30min ein bereits in den vorangegangenen Kapiteln beobachtetes Plateau einstellt, ehe die Biegezugfestigkeit beginnt abzunehmen.

Abbildung 4.61 zeigt nun die Biegezugfestigkeiten der zweiten Versuchsreihe nach 28 Tagen. Hier stellt sich ebenfalls eine in etwa gleichbleibende Biegezugfestigkeit bis zur Probe M15min ein. Interessanterweise steigt die Festigkeit anschließend merklich an und fällt erst mit den letzten beiden Mischungen wieder unter die Anfangswerte. Im Vergleich zur 24 Stunden Festigkeit liegt wieder eine Steigerung von rund 50% vor. Diese im Vergleich zur Druckfestigkeit relativ geringe Steigung konnte bereits in der ersten Versuchsserie beobachtet werden.

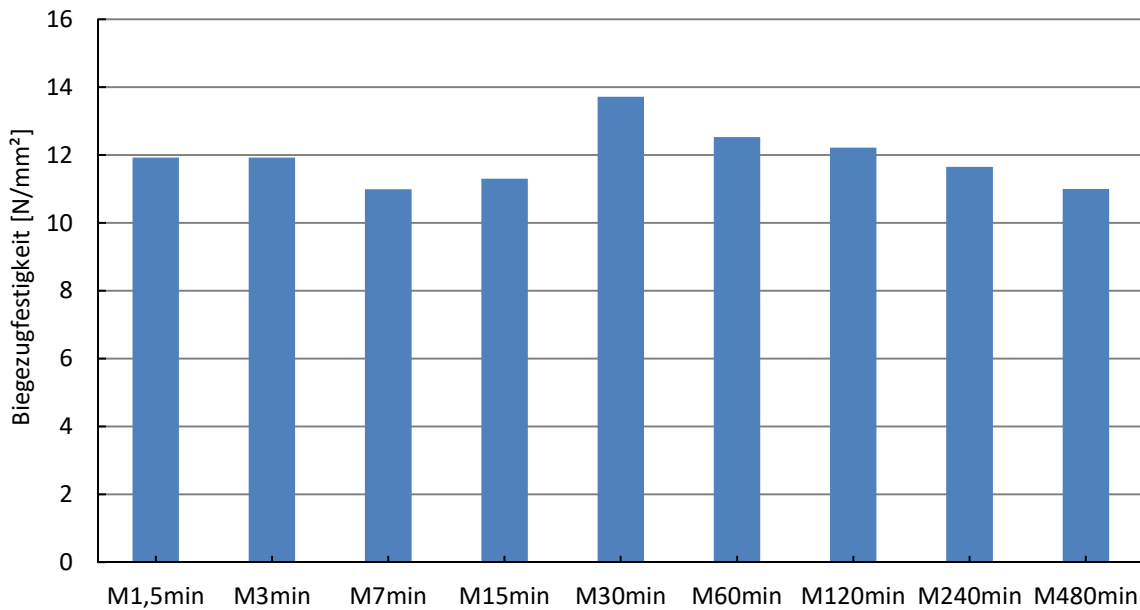


Abbildung 4.59: 28 Tage Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe

4.2.2.3 Dritte Versuchsreihe

Die Biegezugfestigkeit der dritten Versuchsreihe nach 24 Stunden (Abbildung 4.60) und 28 Tagen (Abbildung 4.61) wird im Folgenden beschrieben.

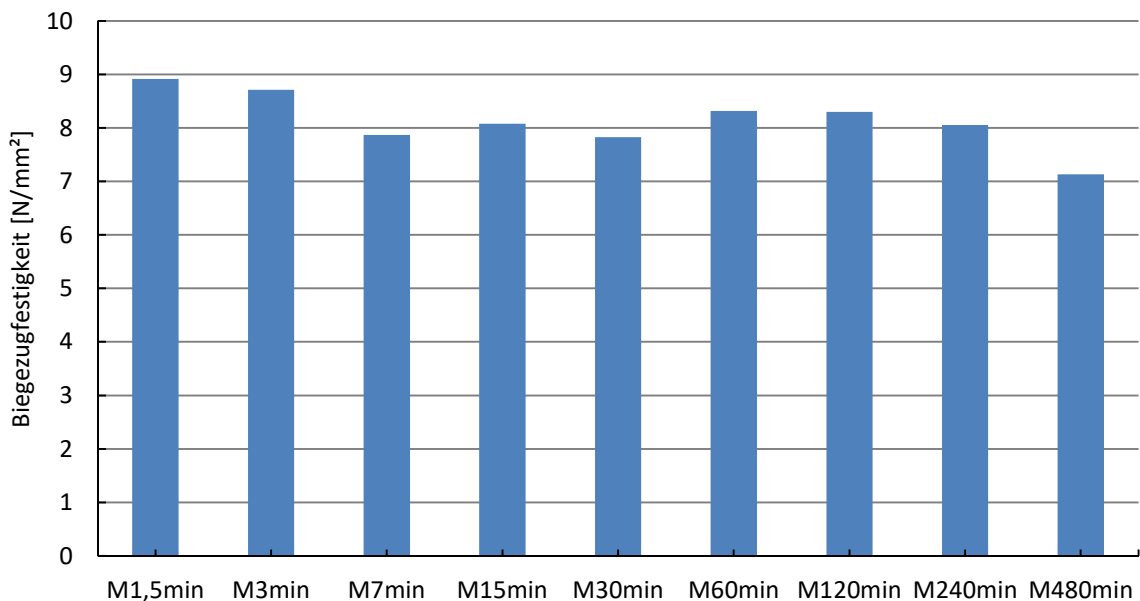


Abbildung 4.60: 24h Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe

Die Werte der Biegezugfestigkeit nach 24 Stunden nehmen auch in der dritten Versuchsreihe bei zunehmender Trockenmischdauer ab. Hier stellt sich ein recht stetiger Verlauf ohne Plateaubildung oder Ausreißer ein. Die Abnahme erfolgt aber im Wesentlichen in den ersten drei Proben, ehe die Werte noch einmal leicht ansteigen und sich anschließend bei der Probe M480min auf ein Minimum reduzieren.

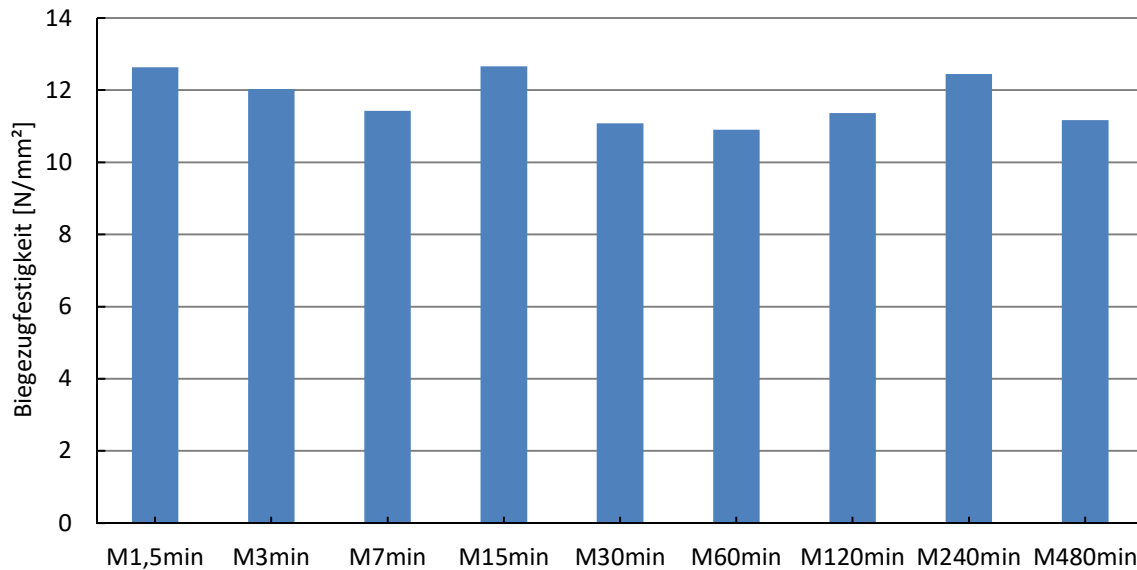


Abbildung 4.61: 28 Tage Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe

Das Bild der Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen liefert wiederum einen wesentlich weniger stetigen Verlauf. So liegen die Werte der Mischungen M7min, M30min, M60min, M120min und M480min allesamt bei einem Wert um 11N/mm², während die Mischungen M15min und M240min eher Ausreißer darstellen.

4.2.2.4 Einfluss des Trockenprämixalters auf die Biegezugfestigkeit

Die Entwicklung der 24h Biegezugfestigkeit über die drei Versuchsreihen in den Prämixaltern 0-72h, 4 Wochen und 9 Wochen (Abbildung 4.62) verläuft im Vergleich zur Druckfestigkeit relativ gleichmäßig und ohne große Abweichungen. Lediglich die Mischung M480 der zweiten Versuchsreihe weicht stärker von den anderen beiden Proben ab.

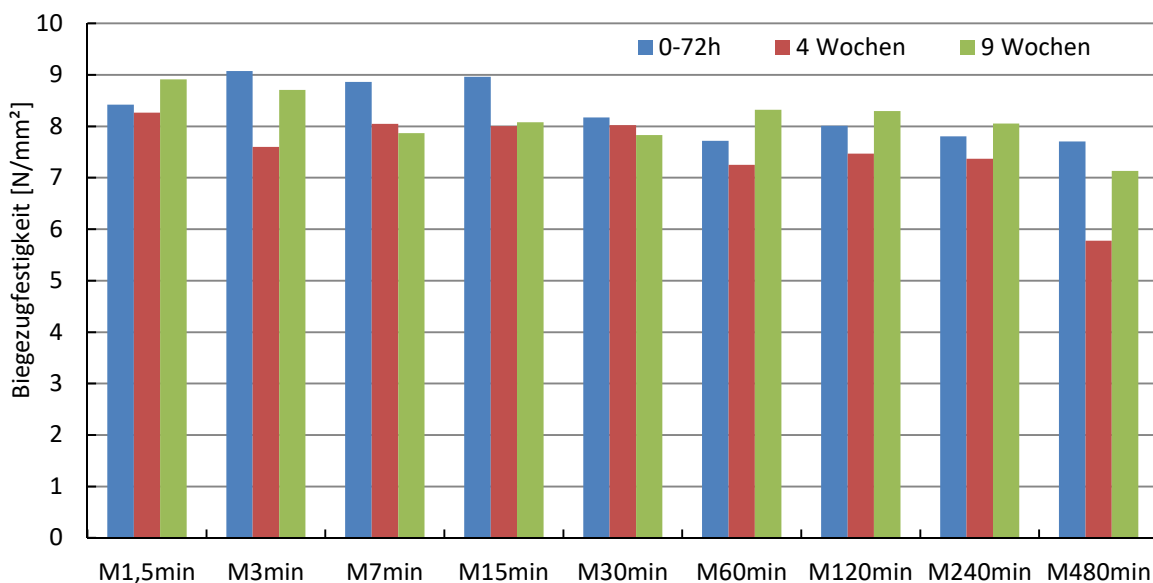


Abbildung 4.62: Einfluss des Prämixalters auf die 24h Biegezugfestigkeit

Es zeigt sich aber dasselbe Phänomen wie bereits bei den Untersuchungen zur Druckfestigkeit, nämlich dass die Werte der zweiten Versuchsreihe am geringsten ausfallen. Speziell bei den Proben mit längerer Trockenmischdauer zeigt sich dies relativ deutlich. Betrachtet man aber die folgende Abbildung 4.63, welche die Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen darstellt, so bemerkt man, dass dieser Effekt bei längerer Erhärtungsdauer wesentlich geringer wird. Insgesamt liegen die erreichten Biegezugfestigkeiten zwischen 11 und 14 N/mm² nach 28 Tagen und somit vergleichsweise nahe an den 24 Stunden Werten.

Zusammenfassend muss aber festgestellt werden, dass das Trockenbetonalter nur einen sehr geringen Einfluss auf die erzielte Biegezugfestigkeit von UHPC hat.

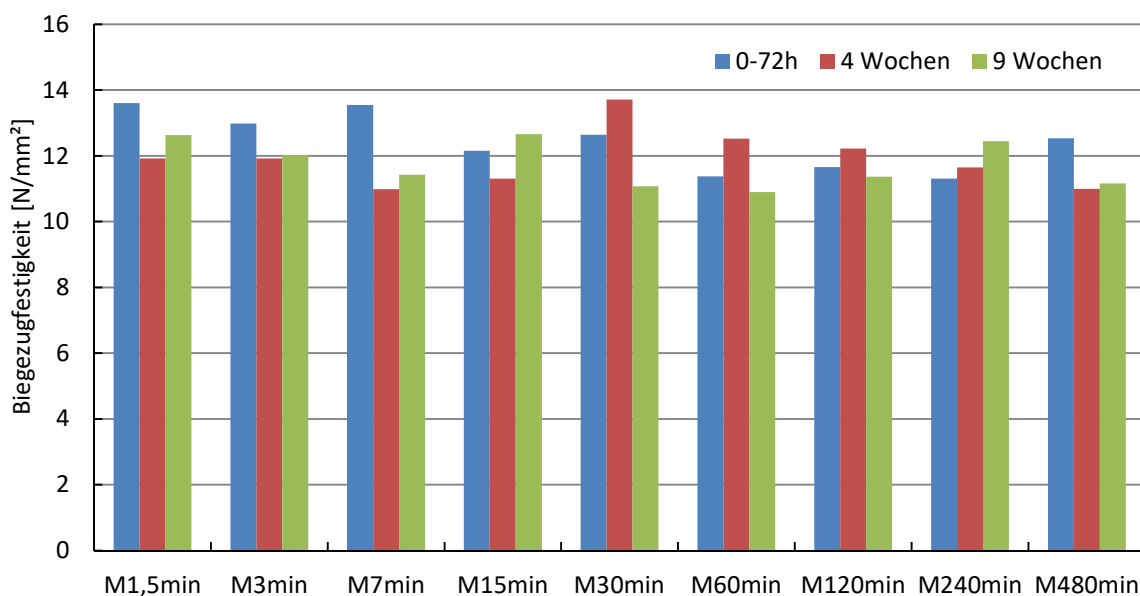


Abbildung 4.63: Einfluss des Prämixalters auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit

4.2.2.5 Einfluss des Mischers auf die Biegezugfestigkeit

Der Vergleich unterschiedlicher Mischermodelle und deren Auswirkung auf die Biegezugfestigkeit erfolgt Analog zu Kapitel 4.2.1.5. Dazu werden die Werte dieser Arbeit mit der Arbeit von *Sacherl* [2] verglichen, welche zeitgleich und unter denselben Rahmenbedingungen am institutseigenen Labor entstanden ist.

In den folgenden Diagrammen sind die 24 Stunden Biegezugfestigkeiten der Versuchsreihen eins (Abbildung 4.64), zwei (Abbildung 4.65) und drei (Abbildung 4.66) grafisch dargestellt.

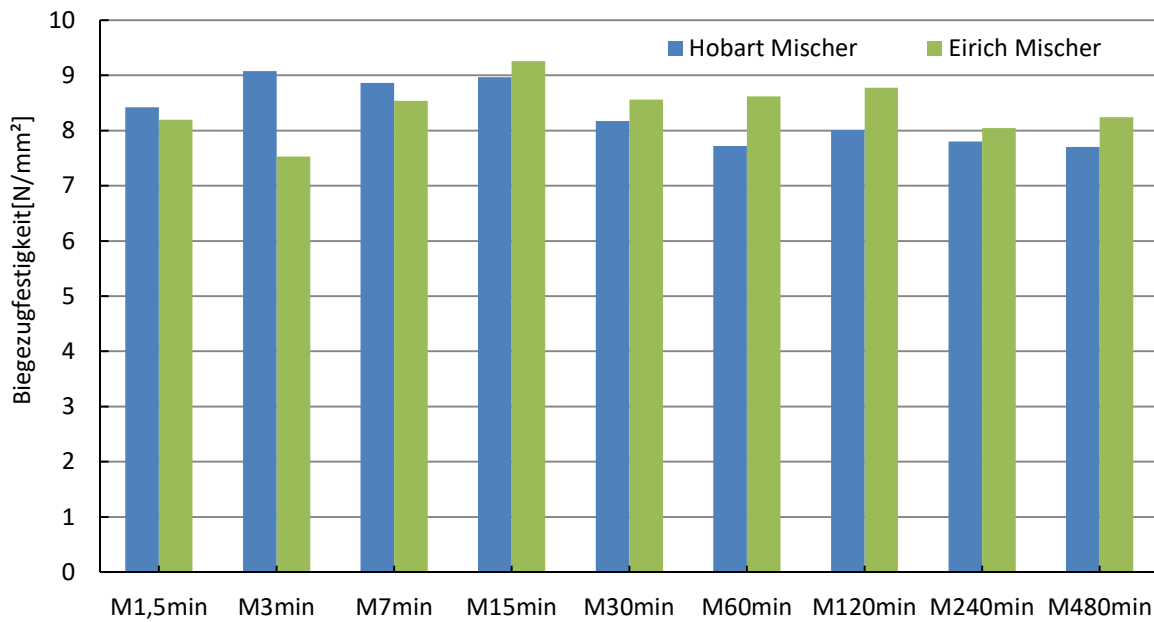


Abbildung 4.64: Einfluss des Mischertyps auf die 24h Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe

Bei Betrachtung der Biegezugfestigkeitswerte nach 24 Stunden der ersten Versuchsreihe fällt auf, dass die Eirichmischungen leicht höhere Biegezugfestigkeiten aufweisen als die Hobartmischungen. Die Differenz der Mittelwerte liegt jedoch nur bei $0,12\text{N/mm}^2$. Bemerkenswert ist dies vor allem, weil die 24 Stunden Druckfestigkeit (Abbildung 4.50) derselben Versuchsreihe ein genau umgekehrtes Bild ergeben hat. Des Weiteren ist speziell bei den Eirichmischungen keine Tendenz kleiner werdender Biegezugfestigkeiten über die Trockenmischdauer erkennbar. Diese ist nur bei den Hobartmischungen erkennbar. Mit einer durchschnittlichen Biegezugfestigkeit von $8,35\text{N/mm}^2$ über beide Serien weisen die Proben der ersten Versuchsreihe die höchste Frühfestigkeit auf.

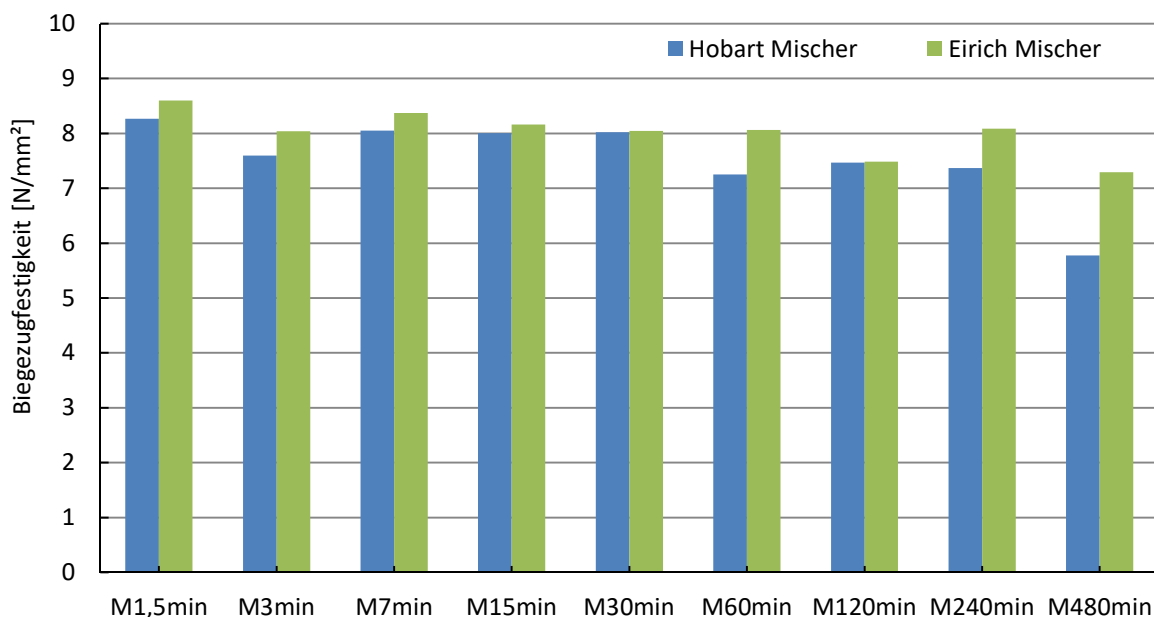


Abbildung 4.65: Einfluss des Mischertyps auf die 24h Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe

Die Proben der zweiten Versuchsreihe nach 24 Stunden (Abbildung 4.65) liefern die geringsten Biegezugfestigkeiten der drei Serien. Waren in der ersten Versuchsserie die Werte der Hobartmischungen für die ersten drei Trockenmischdauern noch höher als die der Eirichmischungen, so zeigt sich bei Versuchsreihe zwei ein Bild, bei dem sämtliche Eirichmischungen zumindest gleiche, zumeist aber höhere Werte als die Hobartmischungen aufweisen.

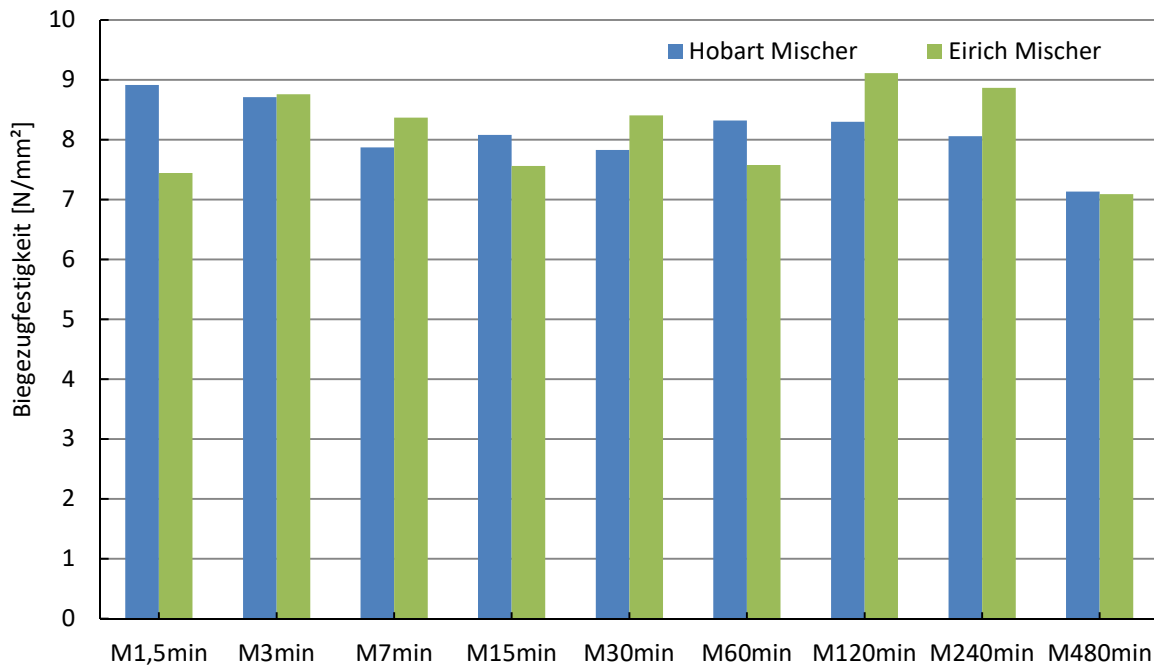


Abbildung 4.66: Einfluss des Mischertyps auf die 24h Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe

Die frühen Biegezugfestigkeiten der dritten Versuchsreihe (Abbildung 4.66) weisen wiederum relativ wenig Tendenz hinsichtlich fallender Festigkeitswerte bei steigender Trockenmischdauer auf. Auch beim Vergleich zwischen Hobartmischungen und Eirichmischungen lassen sich keine Differenzen feststellen.

Insgesamt sind die Biegezugfestigkeiten nach 24 Stunden aufgrund fehlender Trendentwicklungen nicht geeignet, um Aussagen hinsichtlich der Qualität der Mischungen bei verschiedenen Mischertypen zu machen.

In den folgenden Abbildungen werden die Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen der ersten (Abbildung 4.67), zweiten (Abbildung 4.68) und dritten (Abbildung 4.69) Versuchsreihe dargestellt.

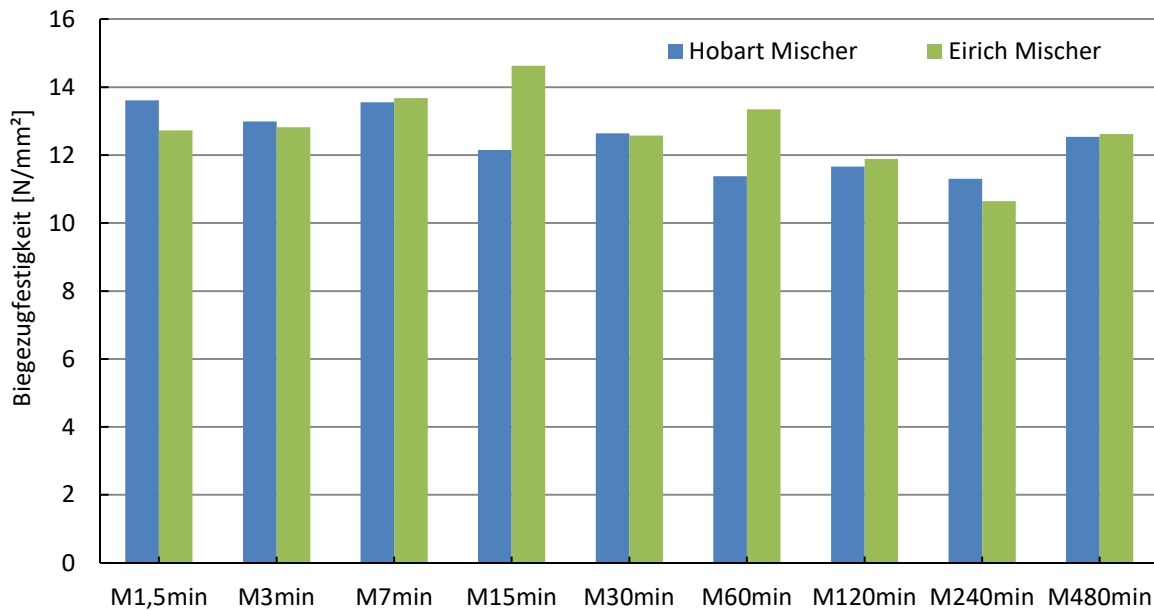


Abbildung 4.67: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe

Auch nach 28 Tagen wirken die Biegezugfestigkeiten der ersten Versuchsreihe eher willkürlich über die Trockenmischdauer verteilt. Klare Entwicklungen hinsichtlich fallender Biegezugfestigkeiten bei steigender Trockenmischdauer lassen sich bei beiden Mixern, speziell aber bei den Eirichmischungen, nicht erkennen. Die Werte der Eirichmischungen liegen, wie auch schon nach 24 Stunden, leicht über den der Hobartmischungen. Ebenfalls sind auch hier die Werte der ersten Versuchsreihe nach 28 Tagen, verglichen mit den beiden anderen Versuchsreihen, im Mittel die höchsten.

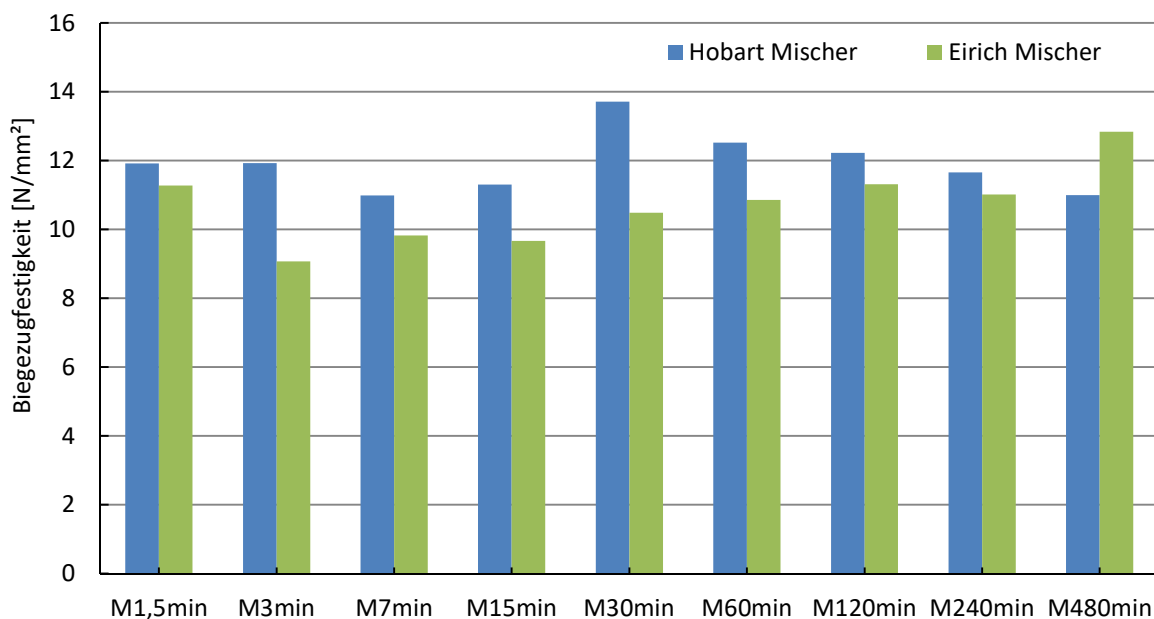


Abbildung 4.68: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe

Interessanterweise ergeben sich bei der 28 Tage Biegezugfestigkeit der zweiten Versuchsreihe, (Abbildung 4.68) für die Proben, welche mittels Eirichmischer homogenisiert wurden, bei acht von neun Trockenmischdauern geringere Biegezugfestigkeiten. Lediglich die Mischung M480min weist hier einen höheren Wert auf. Speziell wenn man sich die Biegezugfestigkeiten nach 24 Stunden (Abbildung 4.65) in Erinnerung ruft, stellt dies ein in dieser Form nicht zu erwartendes Ergebnis dar. Insgesamt fallen auch nach 28 Tagen die Biegezugfestigkeitswerte der zweiten Versuchsreihe am niedrigsten aus. Eine Tendenz fallender Festigkeiten lässt sich aber auch bei diesen Messergebnissen nicht feststellen.

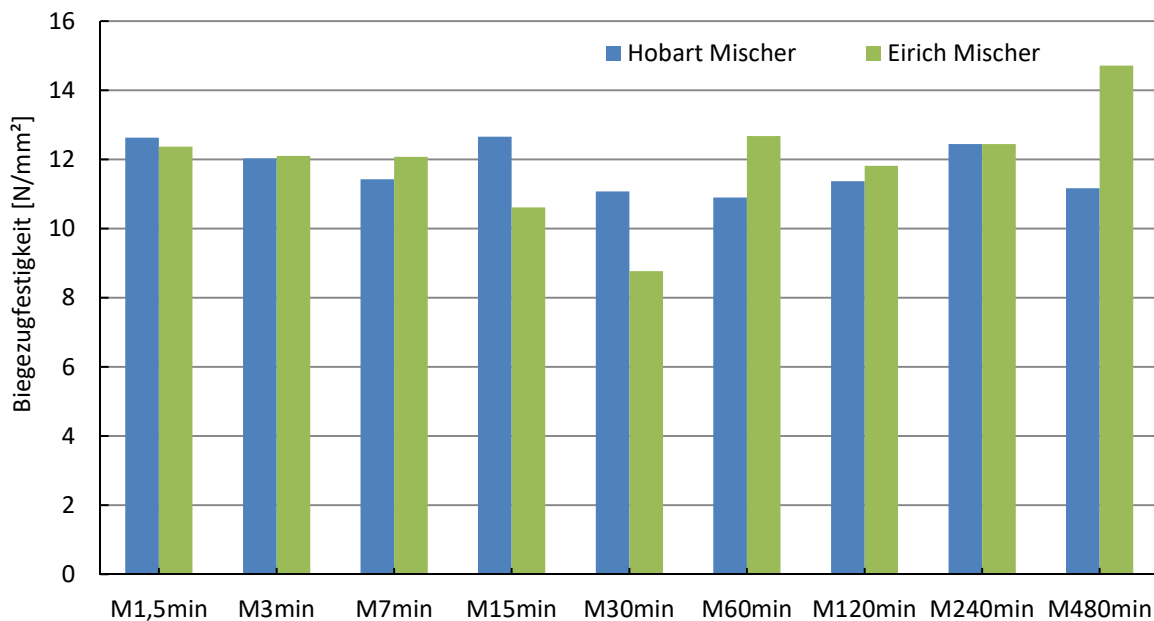


Abbildung 4.69: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe

Betrachtet man die 28 Tage Biegezugfestigkeit der dritten Versuchsreihe (Abbildung 4.69), so springt sofort der Wert der M480min Eirich Mischung ins Auge, welcher signifikant höher ist als der der Hobart Mischung. Ansonsten lässt sich aber wiederum keine eindeutige Aussage bezüglich höherer Biegezugfestigkeitsausbildung bei einem der beiden Mischer treffen. Auch stellt sich keine fallende Festigkeit bei steigender Trockenmischdauer ein.

Insgesamt muss also gesagt werden, dass die Trockenmischdauer praktisch keine erkennbare Auswirkung auf die Biegezugfestigkeit hat. Ebenso hat die Wahl des Mixers keine signifikante Auswirkung auf ebendiese. Liegen die Frühfestigkeiten der Hobartmischungen leicht über den der Eirichmischungen, so ergibt sich nach 28 Tagen das umgekehrte Bild. Die Differenzen der beiden Mittelwerte liegen dabei aber maximal bei $0,20\text{N/mm}^2$. Da die gemessene Biegezugfestigkeit speziell von kleineren Fehlstellen oder Unebenheiten stark beeinflusst wird, sind die erwähnten Differenzen zu gering, um hier eine tatsächliche Aussage über den Einfluss unterschiedlicher Mischer zu treffen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Da ultrahochfester Beton als relativ junger, aber noch wenig erforschter Baustoff gilt, jedoch zunehmende baupraktische Relevanz erfährt, ist eine lückenlose Erforschung unumgänglich. Aus diesem Grund hat sich die vorliegende Arbeit das Ziel gesetzt, die Einflüsse der Trockenmischdauer, der Prämixlagerungsdauer und des Mischertyps auf die Fließ- und Festigkeitseigenschaften von ultrahochfestem Beton zu ermitteln.

Dazu wurden insgesamt 27 Betonproben, mit unterschiedlich lange gemischtem und unterschiedlich lange gelagertem Trockenprämix hergestellt und anschließend die Kennwerte dynamische Fließgrenze, Viskosität, Thixotropie, Packungsdichte sowie Druck- und Biegezugfestigkeit ermittelt. Als Mischer kam dabei ein herkömmlicher Hobart Planetenmischer zum Einsatz.

Um zusätzlich noch Erkenntnisse über den Einfluss der Mischleistung auf die Qualität von ultrahochfestem Beton herauszufinden, wurden abschließend die ermittelten Werte mit den Ergebnissen der zeitgleich entstandenen Arbeiten von *Mayrhofer* [1] und *Sacherl* [2] verglichen, sodass ein möglichst breites Einflusspektrum auf die Eigenschaften von ultrahochfestem Beton analysiert werden konnte. In deren Arbeiten kam ein Eirich Intensivmischer zum Einsatz, ansonsten wurden die Versuchsbedingungen aber exakt gleich gewählt.

Nach der Analyse der im vorangegangenen Kapitel dargestellten Versuchsergebnisse kann festgestellt werden, dass sich speziell die rheologischen Kennwerte dynamische Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie mit einer Verlängerung der Trockenmischdauer durchaus verbessern lassen. Speziell im Bereich 15 bis 30 Minuten Trockenmischdauer verbessern sich die Fließeigenschaften signifikant. Insgesamt hält der positive Trend aber bis zu einer Mischdauer von acht Stunden unverändert an. Dieses Verhalten zeigt sich unabhängig vom verwendeten Mischer, wobei mit einem herkömmlichen Mischer in etwa fünf Mal so lange gemischt werden muss als mit einem Intensivmischer, um in etwa dieselbe Fließfähigkeit zu erreichen. Die gemessenen Werte zeigen aber, dass die rheologischen Kennwerte der mittels Eirichmischer homogenisierten Betonproben ab einer Mischdauer von vier bis acht Stunden keine weiteren Verbesserungen mehr aufweisen. Dies ist vermutlich auf die wesentlich höhere Mischleistung des Eirichmischers zurückzuführen. Bei Verwendung eines Hobartmischers sinken die Werte jedoch unverändert bis 8 Stunden Mischdauer, sodass die Vermutung nahe liegt, dass durch eine weitere Verlängerung der Trockenmischdauer auch die Fließfähigkeit weiter verbessert werden kann. Hinsichtlich dieser Ergebnisse wäre es für zukünftige Arbeiten sinnvoll, die Trockenmischdauer weiter zu verlängern, um herauszufinden, wie lange diese Tendenz anhält und ob sich eventuell sogar die wesentlich geringere Mischleistung des Hobartmischers, im Vergleich zum Eirichmischer, kompensieren lässt. Als

zusätzlicher Unterschied im Fließverhalten muss außerdem die Tixotropie erwähnt werden, die bei Verwendung des Hobartmischers wesentlich niedrigere Werte liefert.

Über den Einfluss der Trockenbetonlagerungsdauer auf die rheologischen Kennwerte kann auf Basis der durchgeführten Versuche keine eindeutige Aussage gemacht werden, da die rheologischen Kennwerte zwar durch vierwöchige Prämixlagerung verbessert werden konnten, diese aber nach 9 Wochen wieder schlechter wurden. Es kann somit lediglich festgehalten werden, dass eine vierwöchige Lagerung positive Effekte auf die Fließfähigkeit hat. Ob sich diese mit zunehmender Lagerungsdauer jedoch weiter verbessern lässt oder wieder schlechter wird und der Prämix sogar eine Art Verfallsdatum hat, muss erst in zukünftigen Untersuchungen festgestellt werden.

Im Bereich der Packungsdichte wurden unabhängig von Trockenmischdauer, Lagerungsdauer und Mischertyp relativ ähnliche Werte gemessen, sodass kein wesentlicher Einfluss der erwähnten Parameter auf die Packungsdichte festgestellt werden konnte. Lediglich die zweite Versuchsreihe mit vier Wochen altem Prämix lieferte bei zunehmender Trockenmischdauer leicht sinkende Werte für die Packungsdichte. Zusätzlich fielen die Werte für die Packungsdichte für diese Versuchsreihe im Mittel leicht geringer aus, als für die beiden anderen Versuchsreihen. Aufgrund der Tatsache, dass die gemessenen Werte aber für alle Versuchsreihen beinahe ident sind, lässt sich keine allgemeine Aussage hinsichtlich der Auswirkungen des Prämixalters auf die Packungsdichte machen.

Der Einfluss der Trockenmischdauer auf die Druck- und Biegezugfestigkeiten verläuft in etwa gegengleich zu den rheologischen Eigenschaften. Je besser die Fließeigenschaften, desto schlechter sind tendenziell die Festigkeitseigenschaften. Eine Verlängerung der Trockenmischdauer verschlechtert somit die Betonfestigkeit, wobei gesagt werden muss, dass dies vor allem die Frühfestigkeiten nach 24 Stunden betrifft. Die 28 Tage Festigkeiten hingegen werden nur unwesentlich von der Trockenmischdauer beeinflusst. Dies lässt den Schluss zu, dass eine längere Trockenmischdauer und somit bessere rheologische Eigenschaften mit geringeren Frühfestigkeiten einhergehen. Der Einfluss der Trockenbetonlagerung verhält sich ebenfalls diametral zur Rheologie, sodass nach vier Wochen Lagerung die schlechtesten Festigkeitswerte sowohl nach 24 Stunden als auch nach 28 Tagen gemessen wurden. Die Tatsache, dass die Festigkeiten nach neunwöchiger Lagerung jedoch erneut zunehmen, lässt mit den vorliegenden Versuchsergebnissen keine eindeutige Aussage bezüglich der Auswirkung der Trockenbetonlagerung auf die Festigkeit zu. Um hier eine fundierte Aussage treffen zu können, sind in zukünftigen Arbeiten weitere Versuche mit älteren Prämixchargen sowie einem eventuell dichteren Netz an untersuchten Prämixaltern notwendig.

Der durch den Mischertyp verursachte Unterschied in den Betonfestigkeiten ist hingegen klar erkennbar. Die Versuchsserien, welche mit Eirichmischer hergestellt wurden, haben im Mittel

allesamt höhere Druck- und Biegezugfestigkeiten, als die mittels Hobartmischer hergestellten Versuchsproben.

Alles in allem lässt sich somit sagen, dass eine längere Trockenmischdauer die rheologischen Kennwerte verbessert, gleichzeitig aber die Festigkeit verschlechtert, wobei dies hauptsächlich die Frühfestigkeit nach 24 Stunden betrifft. Nach 28 Tagen hat die verlängerte Trockenmischdauer wesentlich weniger Einfluss auf die Festigkeit. Für die praktische Anwendung kann, unter dem Aspekt, dass der Erhärtungsprozess auch über die 28 Tage Grenze weiter andauert, somit festgehalten werden, dass die endgültige Betonfestigkeit von einer verlängerten Trockenmischdauer nur sehr wenig beeinflusst wird.

Für eine allgemeine Aussage hinsichtlich der Auswirkungen des Prämixalters auf die Betonkennwerte reichen die vorliegenden Versuchsergebnisse jedoch nicht aus. Hierzu kann lediglich festgehalten werden, dass die rheologischen Größen durch vierwöchige Prämixlagerung verbessert werden, nach neun Wochen allerdings wieder schlechter werden. Somit sind weitere Untersuchungen in kürzeren Lagerungsabständen und zusätzliche Versuche mit mehr als neun Wochen altem Prämix notwendig, um die Auswirkungen präzisieren und somit eine fundierte Aussage über den Einfluss der Prämixlagerung auf die rheologischen Eigenschaften von ultrahochfestem Beton treffen zu können.

6 Literaturverzeichnis

- [1] M. Mayrhofer, *Untersuchungen der rheologischen Eigenschaften von UHPC-Prämix*, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, 2018.
- [2] S. Sacherl, *Prämix für UHPC - Einfluss auf die Festbetoneigenschaften*, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, 2018.
- [3] U. Schneider, J. Kirnbauer und L. Rossbacher, *Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften vakuumgemischter ultrahochfester Betone*, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie E206/1, 2010.
- [4] U. Schneider, J. Kirnbauer und M. Berger, *Einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften ultrahochfester Betone*, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie E206/1, 2009.
- [5] G. König, K. Holschemacher und F. Dehn, *Ultrahochfester Beton*, Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2003.
- [6] W. Herzog, „Verband Österreichischer Beton und Fertigteilwerke,“ 25. 11. 2015. [Online]. Available: <http://blog.voeb.com/ultrahochfester-beton-wild-bruecke-2/>. [Zugriff am 20. 04. 2018].
- [7] www.fhwa.dot.gov, [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/images/fig18.jpg>. [Zugriff am 23. 04. 2018].
- [8] www.meinbezirk.at, [Online]. Available: https://media05.regionaut.meinbezirk.at/2010/09/28/2514774_web.jpg?1285659944. [Zugriff am 23. 04. 2018].
- [9] U. H. Schneider, *Bindemittel - Wiener Baustofflehre Blätter*, Wien: TU Wien, Institut 206, 2007.
- [10] R. Springenschmid, *Betontechnologie in der Praxis*, Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2007.
- [11] Lafarge, „www.lafarge.at,“ 2018. [Online]. Available: http://www.lafarge.at/uploads/tx_templavoila/PDB_DER_CONTRAGRESS_52_5_MDF_2018.p

- df. [Zugriff am 11. 05. 2018].
- [12] U. Schneider, H. Bruckner und H. Harand, Frischbeton - Wiener Baustofflehre Blätter, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, 2007.
- [13] U. Schneider und J. Horvath, Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen, Wien: TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2003.
- [14] Quarzwerke GmbH, „Leistungserklärung Quarzsand H32,“ 2016. [Online]. Available: https://www.quarzwerke.com/fileadmin/quarzwerke/Leistungserklaerungen/Leistungserkl-Sortenverz-EN12620-SMH__Mai_2015__Revision_1.pdf. [Zugriff am 11. 05. 2018].
- [15] K. Safranek, U. Schneider, H. Hadubrand und H. Bruckner, Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, 2008.
- [16] S. Oehmichen, „arnold-chemie,“ 29. 01. 2010. [Online]. Available: <http://arnold-chemie.de/externes/Zementstein-Phasendiagramm.jpeg>. [Zugriff am 30. 04. 2018].
- [17] Elkem ASA, „www.elkem.com Elkem Microsilica - Product Characteristics,“ [Online]. Available: https://www.elkem.com/documents/esm/refractories/technical-papers/datablad_materialch.pdf?t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCfg%3d%3d&t_q=material+characteristics&t_tags=language%3aen%2csiteid%3ab4507aef-cacb-43ad-8c0d-0d1d32566a53&t_ip=128.131.203.157&t_hit.. [Zugriff am 12. 05. 2018].
- [18] BASF Performance Products GmbH, „www.master-builders-solutions.basf.at; Technisches Datenblatt "MasterGlenium ACE430",“ [Online]. Available: [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20\(Austria\)/BASF-MasterGlenium-ACE-430-tds.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20(Austria)/BASF-MasterGlenium-ACE-430-tds.pdf). [Zugriff am 12. 05. 2018].
- [19] BASF Performance Products GmbH, „www.master-builders-solutions.basf.com; Technisches Datenblatt "MasterSure 911",“ [Online]. Available: [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20\(Austria\)/basf-mastersure-911-tdb.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20(Austria)/basf-mastersure-911-tdb.pdf). [Zugriff am 12. 05. 2018].
- [20] BASF Performance Products GmbH, „www.master-builders-solutions.basf.com; Technisches Datenblatt "MasterFinish DF 370",“ [Online]. Available: [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20\(Austria\)/BASF-MasterFinish-DF-](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20(Austria)/BASF-MasterFinish-DF-)

- 370-tds.pdf. [Zugriff am 12. 05. 2018].
- [21] K. Bergmeister, F. Fingerlos und J. Wörner, BetonKalender, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG, 2013.
- [22] T. Rümmelin, Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen, Stuttgart: Fachhochschule Stuttgart, Fakultät für Bauingenieurwesen, 2005.
- [23] Verband Österreichischer Ziegelwerke, „www.ziegel.at,“ [Online]. Available: <http://www.ziegel.at/ziegeltechnik/mauerwerk/baustoff-bauteil-und-bauwerkspruefungen>. [Zugriff am 12. 05. 2018].
- [24] U. Schneider, Festbeton - Wiener Baustofflehre Blätter, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, 2007.
- [25] E. Fehling, „www.researchgate.net - Analysis of circular steel tube confined UHPC stub columns,“ 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/L-S-curves-with-NSC-HSC-and-UHPC_fig1_315106760. [Zugriff am 12. 05. 2018].
- [26] J. Kirnbauer, Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete, Wien: TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen - Diss., 2013.
- [27] K. Bärwinkel, „www.wikipedia.org,“ [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52073276>. [Zugriff am 27. 05. 2018].
- [28] A. Stangl,
Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton , Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, 2011.
- [29] O. Mazanec, Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen, München: Technische Universität München - Fakultät für BAuingenieur- und Vermessungswesen, 2013.
- [30] R. Weinekötter und H. Gericke, Mischen von Feststoffen, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1995.
- [31] M. Kraume, Mischen und Rühren, Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2003.
- [32] H. Wilke, R. Buhse und K. gro0, Mischer - Verfahrenstechnische Grundlagen und apparative

- Anwendungen, Essen: Vulkan Verlag, 1991.
- [33] Austrian Standards Institute, ÖNORM EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2016.
- [34] T. Lansdorf, „www.prozesstechnik-online.de,“ 17. 08. 2017. [Online]. Available: <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/verfahren-chemie/verfahren-mechanisch/multifunktionale-mischer/>. [Zugriff am 27. 05. 2018].
- [35] C. Baumert, Rheometrische Mischprozessführung - Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer zur Herstellung von Hochleistungsbeton mit definierten rheologischen Eigenschaften, Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, 2012.
- [36] O. Blask, Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen, Siegen: Universität-Gesamthochschule Siegen, Fachbereich 8, 2002.
- [37] R. Lenk, Rheologie der Kunststoffe, München: Carl Hanser Verlag, 1971.
- [38] D. Haba, „www.wikipedia.org,“ [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30255276>. [Zugriff am 18. 05. 2018].
- [39] D. Spura, „www.wikipedia.org,“ [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20075820>. [Zugriff am 18. 05. 2018].
- [40] J. Schneider, „www.wikipedia.org,“ [Online]. Available: Von Johannes Schneider - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41537389>. [Zugriff am 25. 05. 2018].
- [41] M. Schmidt und C. Geisenahnslüke, „Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra- Hochleistungs - und von selbstverdichtendem Beton,“ *beton*, Nr. 5, p. 224, 2005.
- [42] D. Santi, Einfluss der Trockenmischdauer auf die rheologischen Eigenschaften von UHPC, Wien: TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie, 2018.
- [43] R. Vogel, Eine Messzelle für Spezialmörtel, Weimar: R. Vogel - Forschung, 20017.
- [44] Malvern Panalytical, [Online]. Available: <https://www.malvernpanalytical.com/de/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000>. [Zugriff am 29. 06. 2018].

- [45] T. Reschke, Der Einfluss der Graulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton; Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, 2000.
- [46] M. Schmidt und E. Fehring, Entwicklung, dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC), Kassel: kassel university press GmbH, 2005.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Sherbrooke Footbridge [7].....	3
Abbildung 2.2: Wildbrücke Völkermarkt [8].....	3
Abbildung 2.3: Zusammensetzung Gesamtwassermenge nach [15]	8
Abbildung 2.4: Einfluss des W/Z-Werts auf den Beton [16].....	9
Abbildung 2.5: Größenvergleich zwischen Silikastaub und Zementkörnern [15]	11
Abbildung 2.6: Druckfestigkeitsprüfung [23]	14
Abbildung 2.7: Betonverhalten unter einaxialer Druckbelastung [25]	15
Abbildung 2.8: Drei-Punkt-Biegezugprüfung [23]	16
Abbildung 2.9: Kraft - Weg Diagramm für UHPC faserlos und faserverstärkt [13]	17
Abbildung 2.10: Betonskulptur in Hagen [27]	18
Abbildung 2.11: Von <i>Stangl</i> hergestellte Objekte aus UHPC [28]	19
Abbildung 2.12: Unterscheidung Dispersion und Konvektion [30]	20
Abbildung 2.13: Abmessungen Rührwerk eines Hobart Mixers [33]	23
Abbildung 2.14: Mischprinzip eines Intensivmischers der Firma Eirich [34].....	24
Abbildung 2.15: Zwei-Platten-Modell [36]	25
Abbildung 2.16: Ebene, laminare, Schichtenförmige Strömung einer Flüssigkeit [35].....	25
Abbildung 2.17: Newtonsches Fließverhalten [36]	26
Abbildung 2.18: Nicht newtonsches Materialverhalten [38]	27
Abbildung 2.19: Thixotropie und Rheopexie [39]	29
Abbildung 2.20: Packungsdichte [40]	31
Abbildung 2.21: Variation des Mischungsverhältnisses zweier Quarzmehle und Auswirkung auf die Packungsdichte [41]	31
Abbildung 2.22: Zusammenhang zwischen Viskosität und Packungsdichte nach [41]	32
Abbildung 3.1: Darstellung der Einzelkomponenten für eine 40dm ³ UHPC Mischung [1]	35
Abbildung 3.2: Eirich R08W Intensivmischer zur Herstellung des Prämix	36

Abbildung 3.3: Hobartmischer "Mortar Mixer"	37
Abbildung 3.4: Verwendetes Rotationsrheometer Viskomat NT.....	39
Abbildung 3.5: Darstellung von Doppelringspaltzelle und Messgefäß und Geometrie der Messzelle [29]	40
Abbildung 3.6: Scherratenprofil 1	41
Abbildung 3.7: Scherratenprofil 2	43
Abbildung 3.8: Verwendetes Partikelgrößenmessgerät Mastersizer 3000.....	45
Abbildung 3.9: Verwendete Prüfmaschine für Biegezugversuche der Fa. Zwick.....	46
Abbildung 3.10: Verwendete Prüfmaschine für Druckversuche der Fa. Toni Technik	47
Abbildung 4.1: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 der 1. Versuchsreihe.....	48
Abbildung 4.2: Linearisierte Fließkurven der 1. Versuchsreihe	49
Abbildung 4.3: Dynamische Fließgrenzen der 1. Versuchsreihe	50
Abbildung 4.4: Dynamische Fließgrenzen der 1. Versuchsreihe in logarithmischer Darstellung	50
Abbildung 4.5: Viskosität der 1. Versuchsreihe.....	51
Abbildung 4.6: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 2 der 1. Versuchsreihe.....	51
Abbildung 4.7: Linearisierte Fließkurven der 1. Versuchsreihe zur Bestimmung der Thixotropie	52
Abbildung 4.8: Thixotropie der 1. Versuchsreihe.....	52
Abbildung 4.9: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 der 2. Versuchsreihe.....	53
Abbildung 4.10: Linearisierte Fließkurven der 2. Versuchsreihe	54
Abbildung 4.11: Dynamische Fließgrenzen der 2. Versuchsreihe	54
Abbildung 4.12: Viskosität der 2. Versuchsreihe.....	55
Abbildung 4.13: Scherspannungsverläufe der 2. Versuchsreihe zufolge Scherprofil 2.....	55
Abbildung 4.14: Linearisierte Fließkurven der 2. Versuchsreihe zur Bestimmung der Thixotropie	56
Abbildung 4.15: Thixotropie der 2. Versuchsreihe.....	56
Abbildung 4.16: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 1 der 3. Versuchsreihe.....	57
Abbildung 4.17: Linearisierte Fließkurven der 2. Versuchsreihe	58
Abbildung 4.18: Dynamische Fließgrenzen der 3. Versuchsreihe	58

Abbildung 4.19: Viskosität der 3. Versuchsreihe.....	59
Abbildung 4.20: Scherspannungsverläufe zufolge Scherprofil 2 der 3. Versuchsreihe.....	59
Abbildung 4.21: Linearisierte Fließkurven der 3. Versuchsreihe zur Bestimmung der Thixotropie	60
Abbildung 4.22: Thixotropie der 3. Versuchsreihe.....	60
Abbildung 4.23: Einfluss des Prämixalters auf die dynamische Fließgrenze.....	61
Abbildung 4.24: Einfluss des Prämixalters auf die Viskosität.....	62
Abbildung 4.25: Einfluss des Prämixalters auf die Thixotropie	63
Abbildung 4.26: Einfluss des Mischertyps auf die dynamische Fließgrenze der 1. Versuchsreihe	64
Abbildung 4.27: Einfluss des Mischertyps auf die dynamische Fließgrenze der 2. Versuchsreihe	65
Abbildung 4.28: Einfluss des Mischertyps auf die dynamische Fließgrenze der 3. Versuchsreihe	65
Abbildung 4.29: Einfluss des Mischertyps auf die Viskosität der 1. Versuchsreihe	66
Abbildung 4.30: Einfluss des Mischertyps auf die Viskosität der 2. Versuchsreihe	66
Abbildung 4.31: Einfluss des Mischertyps auf die Viskosität der 3. Versuchsreihe	67
Abbildung 4.32: Einfluss des Mischertyps auf die Thixotropie der 1. Versuchsreihe	67
Abbildung 4.33: Einfluss des Mischertyps auf die Thixotropie der 2. Versuchsreihe	68
Abbildung 4.34: Einfluss des Mischertyps auf die Thixotropie der 3. Versuchsreihe	68
Abbildung 4.35: Partikelgrößenverteilungen der 1. Versuchsreihe	70
Abbildung 4.36: Partikelgrößenverteilung der 2. Versuchsreihe	71
Abbildung 4.37: Partikelgrößenverteilungen der 3. Versuchsreihe	72
Abbildung 4.38: Einfluss des Prämixalters auf die Packungsdichte	73
Abbildung 4.39: Einfluss des Mischertyps auf die Packungsdichte der 1. Versuchsreihe.....	74
Abbildung 4.40: Einfluss des Mischertyps auf die Packungsdichte der 2. Versuchsreihe.....	75
Abbildung 4.41: Einfluss des Mischertyps auf die Packungsdichte der 3. Versuchsreihe.....	75
Abbildung 4.42: 24h Druckfestigkeit 1. Versuchsreihe	77
Abbildung 4.43: 28 Tage Druckfestigkeit 1. Versuchsreihe.....	78
Abbildung 4.44: 24h Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe	79

Abbildung 4.45: 28 Tage Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe	79
Abbildung 4.46: 24h Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe	80
Abbildung 4.47: 28 Tage Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe	81
Abbildung 4.48: Einfluss des Prämixalters auf die 24h Druckfestigkeit	81
Abbildung 4.49: Einfluss des Prämixalters auf die 28 Tage Druckfestigkeit.....	82
Abbildung 4.50: Einfluss des Mischertyps auf die 24 Stunden Druckfestigkeit der 1. Versuchsreihe ..	83
Abbildung 4.51: Einfluss des Mischertyps auf die 24 Stunden Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe ..	84
Abbildung 4.52: Einfluss des Mischertyps auf die 24 Stunden Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe ..	85
Abbildung 4.53: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Druckfestigkeit der 1. Versuchsreihe	85
Abbildung 4.54: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Druckfestigkeit der 2. Versuchsreihe	86
Abbildung 4.55: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Druckfestigkeit der 3. Versuchsreihe	86
Abbildung 4.56: 24h Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe	88
Abbildung 4.57: 28 Tage Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe	88
Abbildung 4.58: 24h Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe	89
Abbildung 4.59: 28 Tage Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe	90
Abbildung 4.60: 24h Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe	90
Abbildung 4.61: 28 Tage Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe	91
Abbildung 4.62: Einfluss des Prämixalters auf die 24h Biegezugfestigkeit	91
Abbildung 4.63: Einfluss des Prämixalters auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit.....	92
Abbildung 4.64: Einfluss des Mischertyps auf die 24h Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe	93
Abbildung 4.65: Einfluss des Mischertyps auf die 24h Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe	93
Abbildung 4.66: Einfluss des Mischertyps auf die 24h Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe	94
Abbildung 4.67: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit der 1. Versuchsreihe ...	95
Abbildung 4.68: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit der 2. Versuchsreihe ...	95
Abbildung 4.69: Einfluss des Mischertyps auf die 28 Tage Biegezugfestigkeit der 3. Versuchsreihe ...	96

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Eigenschaften CEM I 52,5 N – SR 0 WT 38 C ₃ A-frei [11]	6
Tabelle 2.2: Eigenschaften unterschiedlicher Gesteine [3].....	6
Tabelle 2.3: Korngrößenverteilung Quarzsand H32 nach [14].....	7
Tabelle 3.1: Verwendete Betonrezeptur für 1m ³ UHPC.....	34
Tabelle 3.2: Variation der Trockenmischdauer	36
Tabelle 3.3: Unterschiedliche Mischgeschwindigkeiten Mortar Mixer.....	38
Tabelle 3.4: Mischablauf	38
Tabelle 3.5: Scherratenprofil 1	42
Tabelle 3.6: Scherratenprofil 2	44
Tabelle 4.1: Ergebnisse der 1. Versuchsreihe.....	53
Tabelle 4.2: Ergebnisse der 2. Versuchsreihe.....	57
Tabelle 4.3: Ergebnisse der 3. Versuchsreihe.....	61
Tabelle 4.4: Mischablauf Mayrhofer [1].....	63
Tabelle 4.5: Mischablauf Sacherl [2]	74