

DIplomARBEIT

Master's Thesis

Untersuchungen der rheologischen Eigenschaften von UHPC-Prämix

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

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Elemer Bölskey

Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

ausgeführt am

Institut für Hochbau und Technologie

Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit

der Technischen Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Maximilian Mayrhofer

01128360

Wien, 09. April 2018

.....

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung und Ziel	1
1.3	Vorgangsweise.....	2
2	Grundlagen.....	4
2.1	Ultrahochfester Beton – UHPC.....	4
2.1.1	Allgemeines	4
2.1.2	Komponenten.....	5
2.1.3	Herstellung von UHPC	14
2.1.4	Festbetoneigenschaften.....	16
2.1.5	Anwendung von UHPC	19
2.2	Mischprozesse	21
2.2.1	Allgemeines	21
2.2.2	Misch- und Entmischungsvorgänge	21
2.2.3	Mischgüte	23
2.2.4	Mischzeit	24
2.2.5	Mischertypen	26
2.3	Rheologie	29
2.3.1	Allgemeines	29
2.3.2	Rheologische Größen	29
2.3.3	Newtonsches und Nicht-Newtonsches Fließverhalten.....	31
2.3.4	Wechselwirkungen in Feinstoffsuspensionen.....	34
2.3.5	Fließverhalten von Betonen	37

3	Vorversuche und Versuchsplanung.....	40
3.1	Vorbemerkungen.....	40
3.2	Zusammensetzung der UHPC-Mischungen.....	40
3.2.1	Zement	40
3.2.2	Gesteinskörnung	41
3.2.3	Zusatzstoffe	42
3.2.4	Zusatzmittel.....	42
3.2.5	Mischungsentwurf.....	43
3.3	Herstellung der Trockenmischungen.....	44
3.3.1	Mischertyp.....	45
3.3.2	Mischablauf	46
3.4	Versuchsablauf	46
3.4.1	Herstellung des Frischbetons	47
3.4.2	Frischbetonprüfungen.....	50
4	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	63
4.1	Mischleistung und Mischtemperatur	63
4.1.1	1. Versuchsreihe - Mischleistung und Mischtemperatur.....	63
4.1.2	2. Versuchsreihe - Mischleistung und Mischtemperatur.....	66
4.1.3	3. Versuchsreihe - Mischleistung und Mischtemperatur.....	67
4.2	Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie	70
4.2.1	1. Versuchsreihe - Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie.....	70
4.2.2	2. Versuchsreihe - Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie.....	75
4.2.3	3. Versuchsreihe - Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie.....	79
4.3	Ausbreitfließmaß	84
4.3.1	1. Versuchsreihe - Ausbreitfließmaß.....	84
4.3.2	2. Versuchsreihe - Ausbreitfließmaß.....	85

4.3.3	3. Versuchsreihe - Ausbreitfließmaß.....	85
4.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse - Ausbreitfließmaß.....	86
4.4	Trichterauslaufzeit.....	86
4.4.1	1. Versuchsreihe - Trichterauslaufzeit.....	86
4.4.2	2. Versuchsreihe - Trichterauslaufzeit.....	87
4.4.3	3. Versuchsreihe - Trichterauslaufzeit.....	87
4.4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse - Trichterauslaufzeit.....	88
4.5	Luftgehalt und Frischbetondichte	88
4.5.1	1. Versuchsreihe - Luftgehalt und Frischbetondichte	88
4.5.2	2. Versuchsreihe - Luftgehalt und Frischbetondichte	90
4.5.3	3. Versuchsreihe - Luftgehalt und Frischbetondichte	90
4.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse - Luftgehalt und Frischbetondichte	91
4.6	Vergleich der Versuchsreihen.....	92
4.6.1	Mischleistung und Mischtemperatur.....	93
4.6.2	Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie.....	95
4.6.3	Ausbreitfließmaß.....	97
4.6.4	Trichterauslaufzeit.....	97
4.6.5	Luftgehalt und Frischbetondichte	98
4.6.6	Zusammenfassung des Vergleichs	99
4.7	Zusammenhänge und Interpretation	102
4.7.1	Ausbreitfließmaß und Luftgehalt	102
4.7.2	Frischbetonrohddichte und Luftgehalt	103
4.7.3	Mischendtemperatur und Nettomischleistung.....	104
4.7.4	Dynamische Fließgrenze und Ausbreitfließmaß	105
4.7.5	Viskosität, Trichterauslaufzeit und Nettomischleistung	105
4.7.6	Viskosität und Thixotropie	106

4.7.7	Dynamische Fließgrenze und Viskosität.....	107
4.7.8	Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse.....	108
5	Zusammenfassung und Ausblick	111
5.1	Zusammenfassung.....	111
5.2	Ausblick.....	113
6	Abstract	115
7	Literatur.....	116

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Entwicklung zementgebundener Baustoffe zeigte in den letzten Jahrzehnten einen ständigen Aufwärtstrend. Grund dafür ist vor allem die stetige Forschung an leistungsfähigeren Zusatzmitteln und Zusatzstoffen. So ist man heute in der Lage unter Baustellenbedingungen, Betone bis zu einer Festigkeit von C100/115 oder höher herzustellen. [1].

Die letzte Steigerungsstufe in der Entwicklung von Betonen stellt der Ultrahochfeste Beton (UHPC, Ultra High Performance Concrete) dar. Diese Betonart, mit Druckfestigkeiten weit über 150 N/mm^2 und hervorragenden Dauerhaftigkeitseigenschaften, stellt einen innovativen Fortschritt in der Betontechnologie dar. Er ermöglicht dadurch nachhaltige und ökonomische Bauweisen mit außerordentlich filigranen Abmessungen, die bislang nur dem Stahlbau vorbehalten waren. Um diese hervorragenden Eigenschaften vollständig ausnutzen zu können, sind detaillierte Kenntnisse zur Herstellung und Verarbeitung des Betons notwendig. Grundlage für die besonderen Merkmale des Ultrahochfesten Betons ist die Reduktion des W/B-Wertes auf circa 0,2. Um trotzdem ausreichende Verarbeitungseigenschaften zu erreichen, wird im Zuge der Forschung sowohl die Betontechnologie, als auch die Mischtechnik laufend aktualisiert und verbessert. Verarbeitungseigenschaften wie das Fließ- und Entlüftungsverhalten, der Sedimentationswiderstand sowie der Schalungsdruck werden dabei durch die Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie bestimmt. Die gezielte Einstellung dieser rheologischen Größen ist daher unabdingbar für die erfolgreiche Anwendung von Ultrahochfestem Beton [2] [3].

1.2 Aufgabenstellung und Ziel

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen unterschiedlich langer Mischzeiten der trockenen Ausgangsmaterialien auf die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons festzustellen. Zusätzlich soll untersucht werden, inwiefern sich die rheologischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Dauer der Lagerung des trockenen Prämix verändern. Ziel ist es somit, herauszufinden, für welche Trockenmischdauer die besten Verarbeitungseigenschaften vorliegen und wie lange ein trockener Prämix, die rheologischen

Eigenschaften betreffend, haltbar ist. Dabei steht nicht das Erreichen von möglichst guten Verarbeitungseigenschaften im Vordergrund, sondern wie sich diese in Abhängigkeit von der Dauer der trockenen Mischzeit verändern.

1.3 Vorgangsweise

Um die beschriebenen Ziele zu erreichen, werden mehrere Mischungen mit unterschiedlichen Trockenmischzeiten hergestellt. Diese Prämixe werden daraufhin gelagert und in drei Versuchsreihen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen) zu Frischbeton verarbeitet. Um Aussagen über die rheologischen Eigenschaften bzw. Verarbeitungseigenschaften zu erhalten, wird der frisch hergestellte Beton dann mit verschiedenen Frischbetonprüfungen untersucht.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile: ein theoretischer Teil (Kapitel 2) und ein praktischer Teil (Kapitel 3 und 4). Im theoretischen Teil werden zunächst die Grundlagen des Ultrahochfesten Betons genauer dargestellt. Dazu wird im Detail auf die einzelnen Komponenten, die Herstellung, die Festbetoneigenschaften und die Anwendung von UHPC eingegangen. Des Weiteren werden ausgewählte Sachverhalte, die mit dem Mischprozess im Zusammenhang stehen, erläutert. Dies schließt Misch- und Entmischungsvorgänge, die Mischgüte, die Mischzeit und verschiedene Mischertypen mit ein. Im Anschluss werden die Grundlagen der Rheologie dargelegt. Es wird dazu detailliert auf rheologische Größen, das Newtonische und das Nicht-Newtonische Fließverhalten, Wechselwirkungen in Feinsuspensionen und auf das Fließverhalten von Betonen eingegangen. Ziel dieses theoretischen Teils ist somit alle für den praktischen Teil notwendigen Grundlagen zu beschreiben.

Der praktische Teil setzt sich aus der Beschreibung der Versuchsplanung (Kapitel 3) und der Versuchsdurchführung (Kapitel 4) zusammen. Im Kapitel der Versuchsplanung wird zunächst die Zusammensetzung der Mischungen erläutert, bevor der Ablauf und die Einzelheiten des Trockenmischens beschrieben werden. Zuletzt wird im Detail auf den Versuchsablauf, also den Prozess des Nassmischens und die einzelnen Frischbetonprüfungen, eingegangen. Im Kapitel der Versuchsdurchführung werden die Ergebnisse der Prüfverfahren dargestellt und ausgewertet. Im Anschluss daran erfolgt ein Vergleich der drei Versuchsreihen. Am Ende

werden die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen in Zusammenhang gebracht und interpretiert.

2 Grundlagen

2.1 Ultrahochfester Beton – UHPC

2.1.1 Allgemeines

Die stetige Entwicklung immer höherer und komplexerer Bauten in den letzten Jahren erforderte die Verbesserung der gebräuchlichen Baumaterialien. Durch die Erweiterung des Betons, mit den üblichen Komponenten Gesteinskörnung, Zement und Wasser, durch Zusatzmittel und Zusatzstoffe, wurde Beton zum 5-Stoff-System entwickelt [4]. Erste Forschungen im Bereich Ultrahochfester Betone (UHPC) begannen bereits in den 70er Jahren in den Vereinigten Staaten. Dabei wurden Zementleime mit Druckfestigkeiten bis zu 440 N/mm^2 hergestellt. Zur Anwendung kam der neue Baustoff erstmals beim Bau der Brücke *Sherbrooke Pedestrian/Bikeway* in Kanada im Jahre 1997 (Abbildung 2.1) [5].

Als ultrahochfest werden Betone dann bezeichnet, wenn sie Festigkeiten oberhalb der in der ÖNORM B 4710-1 definierten Festigkeitsklasse C100/115 erreichen [4]. Diese hohen Festigkeiten ergeben sich durch eine Verringerung der Porosität des Zementsteins, eine hohe Packungsdichte durch Erhöhung des Feinstkornanteils und aufgrund der Verringerung des theoretisch zur vollständigen Hydratation notwendigen Wasser-Bindemittel-Werts von 0,4 auf 0,20 bis 0,25. Dies wurde vor allem durch die Entwicklung effektiver Verflüssiger möglich, welche den Beton noch ausreichend verarbeitbar machen. Zur Verbesserung der Duktilität des Betons und zur Erhöhung der Biegezugfestigkeit werden oft Fasern aus metallischen oder synthetischen Stoffen zugemischt [6].



Abbildung 2.1: Fußgängerbrücke über den Fluss Magog in Sherbrooke, Kanada [7]

2.1.2 Komponenten

Zur Herstellung von UHPC werden zu den herkömmlichen Komponenten Wasser, Gesteinskörnung und Zement, Zusatzstoffe und Zusatzmittel benötigt (Abbildung 2.2).

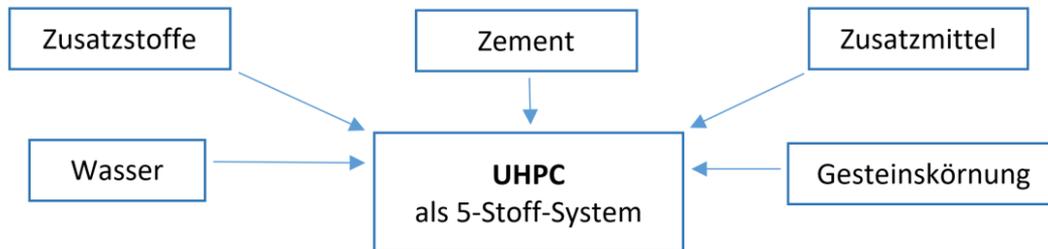


Abbildung 2.2: Ultrahochfester Beton als 5-Stoff-System

2.1.2.1 Zement

Zement ist ein feingemahlendes hydraulisches Bindemittel, das in Kombination mit Wasser, sowohl an der Luft, als auch unter Wasser erhärtet. Der dadurch entstehende Zementstein hat die Aufgabe die Zuschläge von Beton untereinander zu verkleben/verkitten [8].

Portlandzementklinker wird durch das Brennen und Sintern eines genau definierten Rohstoffgemisches hergestellt. Die Ausgangsstoffe sind Kalk, Sande, Tone und Mergel. Es entstehen durch das Brennen neue Verbindungen, die jeweils unterschiedlich zur Zementerhärtung beitragen. Sie werden Klinkerphasen genannt. Man unterscheidet vier Typen [9]:

- C_3S Tricalciumsilicat
- C_2S Dicalciumsilicat
- C_3A Tricalciumaluminat
- C_4AF Tetracalciumaluminat.

Durch das Tricalciumsilicat C_3S erhält der Zement seine wesentlichen Eigenschaften. Gemahlen und mit Wasser vermischt erhärtet es schnell, entwickelt dabei eine große Reaktionswärme und erlangt sehr hohe Festigkeiten.

Das kalkärmere Dicalciumsilicat C_2S versteift langsamer als das Tricalciumsilicat, erreicht aber nach einiger Zeit die gleichen Festigkeiten. Die entstehende Hydratationswärme ist dadurch geringer.

Die Verbindung Tricalciumaluminat C_3A reagiert rasch mit Wasser und erhärtet extrem schnell. Dieser Effekt muss durch Gipszugaben aufgehoben werden, da ansonsten die Verarbeitbarkeit des Betons beeinträchtigt werden würde.

Das Tetracalciumaluminat C_4AF trägt wenig zur hydraulischen Erhärtung bei [8].

Durch die Zugabe von Zusatzstoffen, wie beispielsweise Hüttensand oder Flugasche, können die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Zements gesteuert werden.

Da man für UHPC einen niedrigen W/Z-Wert anstrebt, eignen sich nur Zemente mit einem geringen Wasseranspruch [10]. Der Anteil von Tricalciumaluminat C_3A spielt in diesem Zusammenhang eine wesentliche Rolle. Bei einem geringen Anteil dieser Phase wird, aufgrund der daraus resultierenden geringeren Zugabe von Gips zur Erstarrungsregelung, weniger Wasser in Anspruch genommen [4]. So werden für Ultrahochfeste Betone in der Regel C_3A -arme bzw. C_3A -freie Portlandzemente verwendet.

2.1.2.2 Gesteinskörnung

Gesteinskörnungen bestehen aus einem Gemisch von Körnern aus natürlichem oder künstlichem, dichtem oder porigem Gestein. Der Zuschlag bildet mengen- und volumenmäßig den Hauptbestandteil des Betons und bestimmt deshalb im Wesentlichen die Eigenschaften des Betons [11].

Für Ultrahochfeste Betone werden meist feine Sande, mit einer Korngröße zwischen $150\ \mu\text{m}$ und $1\ \text{mm}$, in Kombination mit Gesteismehl verwendet, um ein möglichst dichtes Gefüge zu erhalten. Die poröse und heterogene Kontaktzone zwischen Gesteinskorn und Zementleim wird durch die Feinheit des Zuschlags eliminiert. Darüber hinaus wird ungebrochener Sand aufgrund des geringeren Wasseranspruchs gegenüber gebrochenem Material bevorzugt [12].

Die optimale Sieblinie kann nur mit Hilfe einer modifizierten Fullerkurve erfolgen, da Korndurchmesser unter $0,5\ \text{mm}$, sowie das Weglassen einzelner Korngruppen bei so genannten Fehlkörnungen in der eigentlichen Fullerkurve unberücksichtigt bleiben (Formel [2-1]) [13].

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,5}{D}\right)^n} \left[\left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0,5}{D}\right)^n \right] \quad [2-1]$$

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

D ...Größtkorndurchmesser des Zuschlaggemisches in mm

d ...Siebweite in mm

n ...Fullerexponent

Um die Anforderungen zu erfüllen, werden im Fall von Fehlkörnungen trotzdem alle Korngruppen ermittelt und der Massenanteil der weggelassenen Gruppen auf mehrere Korngruppen oder auf die beiden Nachbarkörnungen aufgeteilt. So ergibt sich für den Fall eines feineren Zuschlags mit einem Korndurchmesser < 0,5 mm folgende modifizierte Gleichung der parabolischen Kornverteilung [13]:

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,25}{D}\right)^n} \left[\left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0,25}{D}\right)^n \right] \quad [2-2]$$

Neben den Sanden wird für die Feinanteile (< 125 µm) unter anderem Quarzmehl verwendet. Aufgrund der großen Oberfläche des Quarzmehls kommt es zu geringeren Zementleimdicken und daraus resultierend zu höheren Festigkeiten [9]. Grundvoraussetzung für eine eindeutige Festigkeitssteigerung mittels Feinstquarz ist, dass durch diese Zugabe der Wasserbindemittelwert nur unwesentlich verändert wird. *Frank Dehn* geht in [12] davon aus, dass dies an dem geringen Wasseraufnahmevermögen des Quarzmehls liegt.

2.1.2.3 Anmachwasser, W/Z-Wert und W/B-Wert

Anmachwasser

Die Frischbetonmischung wird durch das Anmachwasser verarbeitbar und einbaufähig. Der Frischbeton erhärtet, da das Wasser mit den Bindemittelkörnern zu Zementstein reagiert. Der Gesamtwassergehalt setzt sich zusammen aus der Eigenfeuchte des Zuschlags und der Zusatzstoffe, dem wässrigen Anteil der Zusatzmittel sowie dem Zugabewasser (Abbildung 2.3) [10]. Die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung wiederum ist die Summe aus dem Oberflächenwasser und der Kernfeuchte. Das Oberflächenwasser ist jenes Wasser, welches an den Gesteinskörnungen haftet und die Kernfeuchte ist das Porenwasser der

Gesteinskörnung. Es ist zu beachten, dass die Kernfeuchte der Hydratation nicht zur Verfügung steht und somit nicht im Wasserzementwert berücksichtigt wird [14].

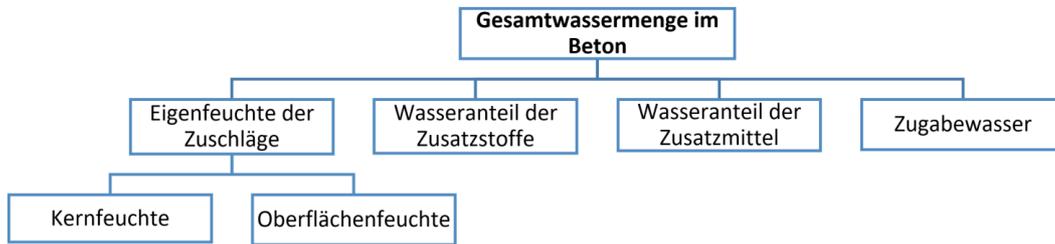


Abbildung 2.3: Zusammensetzung der Gesamtwassermenge

Als Zugabewasser kann ungeprüft Trinkwasser verwendet werden [9]. Restwasser, Wasser das beim Auswaschen oder Reinigen von Geräten genutzt wird oder Niederschlagswasser, darf nicht für Ultrahochfeste Betone als Zugabewasser verwendet werden [15].

W/Z-Wert

Der Wasserzementwert ω ergibt sich aus dem Massenverhältnis des im Beton enthaltenen Wassers W zum Zement Z [2]:

$$\omega = \frac{W}{Z} \quad [2-3]$$

Der W/Z-Wert ist einer der wichtigsten Kennwerte des Frisch- und Festbetons. Mit zunehmendem W/Z-Wert wird der Frischbeton plastischer, besser verarbeitbar und besser verdichtbar. Wohingegen die Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit des Festbetons mit abnehmenden W/Z-Wert steigt (Abbildung 2.4) [9].

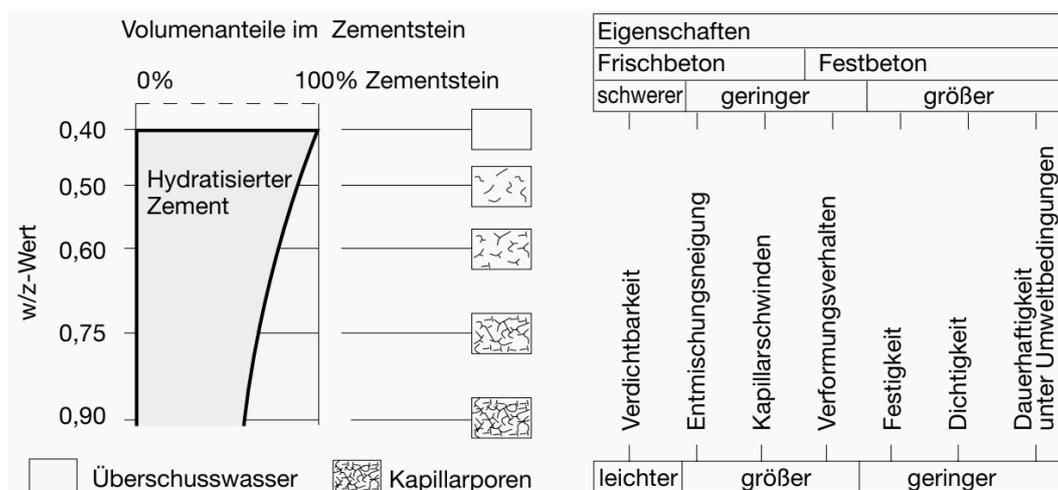


Abbildung 2.4: Frisch- und Festbetoneigenschaften abhängig vom W/Z-Wert [16]

Für eine vollständige Hydratation des Zements ist ein Wasserzementwert von ca. 0,4 nötig. Dieser hohe Wert ergibt sich unter anderem durch das Vorhandensein von Kapillarporen [12]. Obwohl bei kleineren Wasserzementwerten keine vollständige Hydratation möglich ist, wurden bereits Ultrahochfeste Betone mit einem W/Z-Wert von 0,15 erfolgreich hergestellt [10]. Bei diesen kleinen Werten hydratisieren die großen Zementpartikel nur oberflächlich. Die unhydratisierten Klinkerreste im Inneren liegen somit als feste und dichte Mikrokörnungen vor. Eingebettet durch das äußere Gefüge tragen sie zur Festigkeit bei [12]. Eine vollständige Hydratation ist somit nicht Voraussetzung für eine hohe Festigkeit. Um die Verarbeitbarkeit bei solch niedrigen W/Z-Werten zu gewährleisten, ist jedoch der Einsatz von Verflüssigern bzw. Fließmitteln unverzichtbar [2].

W/B-Wert

In der Betontechnologie wird auch die Kenngröße Wasserbindemittelwert (W/B-Wert) verwendet. Unter dem W/B-Wert versteht man das Massenverhältnis des Wassers zu allen in der Herstellung verwendeten, hydraulisch wirkenden Bindemitteln und Zusatzstoffen. Auch hier gilt wie beim W/Z-Wert, dass die Festigkeiten der Betone mit abnehmendem Wasserbindemittelwert zunehmen. Bei Normalbeton liegt dieser Wert bei etwa 0,45. Für UHPC wird Beton bis zu einem W/B-Wert von 0,14 verwendet [9].

2.1.2.4 Zusatzstoffe

In der ÖNORM B 4710-1 wird ein Zusatzstoff als ein fein verteilter Stoff definiert, der im Beton verwendet und während des Mischvorgangs zugeben wird, um bestimmte Eigenschaften zu beeinflussen [17].

Man unterscheidet zwei Arten von anorganischen Zusatzstoffen [11]:

- Inerte Zusatzstoffe (Typ I)
 - Gesteinsmehle nach EN12620
 - Pigmente nach ÖNORM EN 12878
- Reaktive, puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe (Typ II)
 - Flugasche nach EN 450
 - Silikatstaub nach ÖNORM EN 13263-1
 - Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) nach ÖNORM B 3309
 - Hüttensandmehl nach ÖNORM EN 15167

Zusatzstoffe des Typs II müssen bei der Ermittlung des Wasserzementwerts mittels des k-Wert-Ansatzes berücksichtigt werden (Formel [2-4]). Er erlaubt den Austausch des Begriffes „Wasserzementwert“ durch „Wasserbindemittelwert“. Die Konstante k ist dabei abhängig vom verwendeten Zusatzstoff [11].

$$\frac{W}{B} = \frac{W}{Z + k * Zusatzstoff} \quad [2-4]$$

Silikatstaub

Die Eigenschaften des Ultrahochfesten Betons hängen vor allem von einer hohen Packungsdichte ab. Für die Herstellung von UHPC wird am häufigsten Silikatstaub als Zusatzstoff verwendet, da er die Poren zwischen den Zementkörnern füllt und somit die Packungsdichte erhöht [18]. Durch die kompaktere Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung werden außerdem die weichen Anlagerungen von Calciumhydroxid und Ettringit deutlich reduziert. Dieser Effekt trägt zusätzlich zur Festigkeitssteigerung bei. Die Partikel haben einen mittleren Korndurchmesser von circa 0,15 µm und sind daher etwa 100-mal feiner als Zement (Abbildung 2.5) [10].

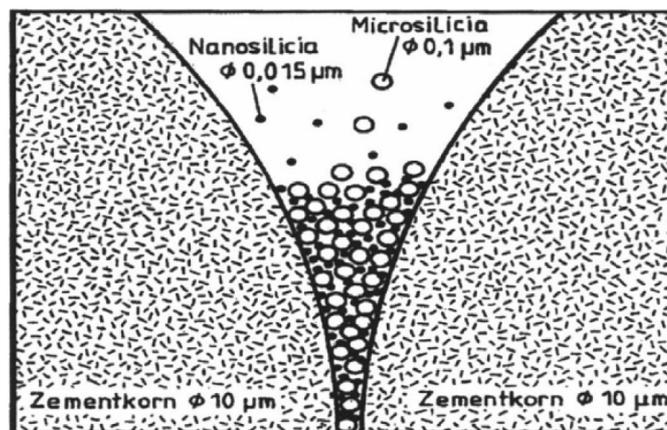


Abbildung 2.5: Füllereffekt von Mikro- und Nanosilika [2]

Die nahezu runden Partikel wirken des Weiteren wie ein Schmiermittel und verbessern die rheologischen Eigenschaften des Betons. Der Mikrosilikatstaubgehalt für UHPC liegt typischerweise bei etwa 25 M.-% bezogen auf den Zementgehalt [19].

Die höhere Festigkeit durch das Mikrosilika beruht außerdem auf seiner puzzolanischen Wirkung. Der Silikatstaub reagiert mit dem bei der Hydratation des Portlandzementklinkers entstehenden Calciumhydroxyd $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und es bilden sich weitere festigkeitssteigernde

Calciumsilicathydrat-Phasen (CSH) [9]. In [2-5] ist die Reaktion und ihre Reaktionsprodukte dargestellt [20]:



Flugasche

Auch Flugasche wurde bereits erfolgreich zur Herstellung von Ultrahochfestem Beton verwendet. Flugaschen gehören wie das Microsilika zu den puzzolanischen Zusatzstoffen. Die mittlere Partikelgröße ist mit 10-30 µm ähnlich zu der von Zement, aber sie besitzen eine kugelförmige Kornform. Flugasche reduziert die Frühfestigkeit von Beton und somit gleichzeitig die Wärmeentwicklung in den ersten Stunden [10] [21].

Gesteinsmehle

Als Gesteinsmehl wurde bisher meist fein gemahlener, kristalliner Quarz verwendet. Es gehört zu den inerten Zusatzstoffen und reagiert daher unter normalen Bedingungen nicht mit den restlichen Betonbestandteilen [21]. Außerdem weichen die Quarzmehlpartikel noch mehr von der idealen Kugelform ab, was die rheologischen Eigenschaften des UHPC negativ beeinflusst [10]. Alternativ zu Quarzmehl, als eher weniger geeigneter Zusatzstoff, kann Hüttensandmehl oder Kalksteinmehl verwendet werden. Laut Untersuchungen in [22] haben sich für diese Zusatzstoffe verbesserte rheologische Eigenschaften des Frischbetons ergeben und die Festbetoneigenschaften haben sich dabei nicht nennenswert verschlechtert.

2.1.2.5 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel sind flüssige oder pulverförmige Stoffe, die dem Beton in geringen Mengen zugegeben werden und durch chemische und/oder physikalische Wirkung bestimmte Eigenschaften des Frisch- oder Festbetons günstig beeinflussen. Die zugegebene Menge darf maximal 50 g/kg bezogen auf das Zementgewicht betragen. Überschreitet das Volumen an flüssigen Zusatzmitteln 3 l/m³ Beton, so muss die darin enthaltene Wassermenge bei der Berechnung des W/B-Wertes berücksichtigt werden [11].

Betonzusatzmittel werden in folgende Wirkungsgruppen unterteilt:

Tabelle 2.1: Wirkungen von Zusatzmitteln [2]

Kurzbezeichnung	Art des Zusatzmittels	Wirkung
BV	Betonverflüssiger	Verbesserung der Verarbeitbarkeit, Verminderung des Wasseranspruchs
FM	Fließmittel	Verflüssiger, Verminderung des Wasseranspruchs bei einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit
LP	Luftporenbildner	Erzeugen Luftporen, Verbesserung der Verarbeitbarkeit
DM	Dichtungsmittel	Verminderung der kapillaren Wasseraufnahme
VZ	Verzögerer	Verzögerung beim Erstarren des Zementleims und damit eine längere Verarbeitbarkeit
BE	Beschleuniger	Beschleunigung beim Erstarren des Zementleims und damit eine schnellere Wärmeentwicklung
EH	Einpresshilfen	Vermindertes Absetzen des Zementmörtels, verbessertes Fließen
ST	Stabilisierer	Verbesserung des Zusammenhaltevermögen und der Verarbeitbarkeit des Frischbetons

Die in Tabelle 2.1 genannten Zusatzmittel sind grundsätzlich auch für die Herstellung von Ultrahochfestem Beton geeignet. Eine große Bedeutung spielen jedoch die Fließmittel. Der reduzierten Verarbeitbarkeit von UHPC, aufgrund seiner sehr niedrigen W/B-Werte, kann nur durch den Einsatz großer Mengen hochleistungsfähiger Fließmittel entgegengewirkt werden [18].

Hochleistungsverflüssiger verbessern bei gleichem Wasserzementwert die Verarbeitbarkeit des Frischbetons (Abbildung 2.6 (1)) oder vermindern bei gleicher Konsistenz den Wasserzementwert (Abbildung 2.6 (2)). Auch eine Kombination der beiden Wirkungsweisen ist möglich. Dabei kommt es zu einer Reduzierung des Wasserzementwerts und gleichzeitig zu einer Verflüssigung (Abbildung 2.6 (3)) [9].

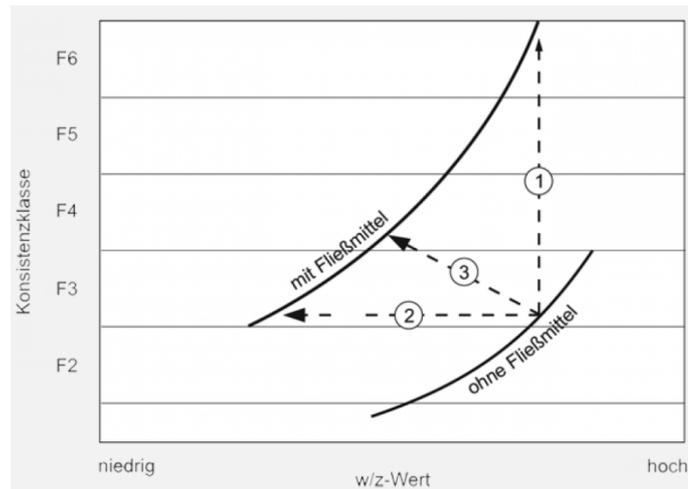


Abbildung 2.6: Wirkungsweise von Hochleistungsverflüssigern [23]

Für UHPC werden ausreichend wirksame Fließmittel basierend auf Polycarboxylatethern (PCE) verwendet. Diese haben den Vorteil gegenüber Fließmittel der älteren Generation, dass sie eine noch höhere Wasserreduktion, schnellere Festigkeitsentwicklungen und bessere Dauerhaftigkeiten bewirken. Inzwischen gibt es ein breites Angebot an unterschiedlichen PCE-Fließmitteln. Bei der Wahl des entsprechenden Mittels, muss die Verträglichkeit mit Zuschlag, Zement und Zusatzstoffen gewährleistet sein [9] [19] [24].

Die Wirkungsweise des PCE-Fließmittels (Abbildung 2.7) beruht zum einen darauf, dass sich dessen negativ geladene Polymere an der Oberfläche der Zementpartikel anlagern. Durch die negative Oberflächenladung kommt es zur Abstoßung der Körner (Elektrostatische Dispergierung). Zum anderen bewirken die langen Seitenketten der Polymere eine noch bessere Verflüssigung, da sie zusätzlich eine räumliche Barriere darstellen (sterische Dispergierung). Bei fortschreitender Hydratation und damit dem Anwachsen der Zementkörner, sorgen die langen Seitenketten darüber hinaus länger für eine Abstoßung, sodass der Beton über einen größeren Zeitraum verarbeitbar bleibt [9] [10].

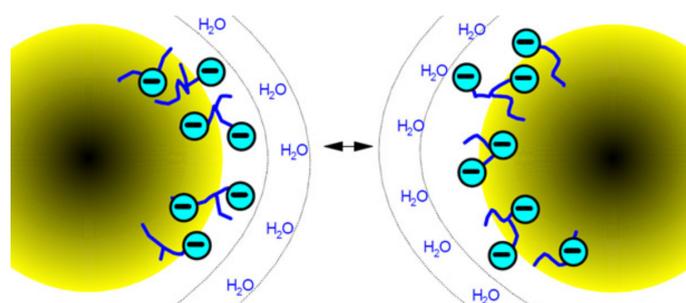


Abbildung 2.7: Wirkungsweise von PCE-Fließmitteln [25]

2.1.2.6 Fasern

Um die Zug- und Biegezugfestigkeit sowie die Duktilität zu erhöhen, können dem Beton Fasern zugegeben werden. Auch eine erhöhte Brandbeständigkeit kann durch die Verminderung des Abplatzens mittels Polypropylenfasern erzielt werden [11].

Ultrahochfesten Betonen werden vorwiegend Stahl- oder Polypropylenfasern zugesetzt. Die typischen Zugabemengen liegen zwischen 1,5 und 3,0 Vol.-% [12]. Einerseits müssen, zum Übertragen von hohen Verbundsspannungen, die Fasern besonders fest in das Gefüge der Betonmatrix eingebunden werden. Andererseits beruht die duktilisierende Wirkung darauf, dass die Reibung zwischen Matrix und Fasern überwunden wird und die Fasern selbst aber nicht reißen [24]. Bewährt haben sich glatte Stahldrahtfasern mit einem Verhältnis von Länge zu Durchmesser von 60 [10].

2.1.3 Herstellung von UHPC

Bis zur letztlichen Fertigstellung von Konstruktionen aus Ultrahochfestem Beton erfolgen zunächst einige Schritte auf die besondere Sorgfalt gelegt werden muss. Der Beton wird im Mischwerk unter bestimmten Bedingungen hergestellt, zur Baustelle transportiert, dort mit unterschiedlichen Verfahren entsprechend eingebaut sowie verdichtet und anschließend ausführlich nachbehandelt. Im Nachfolgenden wird auf die besonderen Bedingungen für den Transport, den Einbau und die Nachbehandlung von UHPC eingegangen. Da dem Mischprozess in dieser Arbeit eine wesentliche Rolle zukommt, wird dieser im Detail in 2.2 betrachtet.

2.1.3.1 Transport und Einbau

Zum Einbau von vakuumgemischtem UHPC auf der Baustelle eignen sich vor allem Betonpumpen. Der Einsatz von Betonpumpen verursacht keine negativen Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften des Betons [26]. Es konnte laut [26] sogar eine Senkung des Luftporengehalts festgestellt werden. Abhängig von der Viskosität des Frischbetons sind ähnlich wie für selbstverdichtende Betone auch große Fallhöhen möglich, ohne dass sich der Ultrahochfeste Beton entmischt [27].

Das anschließende Verteilen des Betons kann abhängig von der Bauteilgröße mit Außen- oder Oberflächenrüttlern erfolgen [9]. Um ein entsprechend dichtes Gefüge zu

erhalten ist die Verdichtung bei UHPC äußerst sorgfältig durchzuführen. Mischungen mit einem Mikrosilikaanteil benötigen generell eine höhere Verdichtungsenergie um einen geringen Luftporenanteil zu erreichen [2]. Außerdem sollte bei UHPC mit Fasern auf Innenrüttler eher verzichtet werden, da sonst faserfreie Rüttelgassen entstehen könnten [10]. Wird nicht eine fließfähige Konsistenz hergestellt, benötigt der zäh-viskose UHPC erfahrungsgemäß eine höhere Verdichtungsenergie um ihn zu entlüften [27]. Aber selbst bei langem intensiven Rütteln ist keine Segregation des Zuschlags zu befürchten. Ursache dafür ist die Klebrigkeit des Betons aufgrund des hohen Silikatstaubgehalts [12]. Eine Alternative der Verdichtung wäre das Aufbringen eines Umgebungsdruckes, sodass Lufteinschlüsse stark reduziert werden können [9].

2.1.3.2 Nachbehandlung

Beton benötigt für das Erreichen der geforderten Festbetoneigenschaften eine gewisse Erhärtungszeit und ausreichend Feuchtigkeit. Der Nachbehandlung kommt deshalb eine wesentliche Rolle zu [11].

Anders wie bei Normalbeton bildet sich bei UHPC nach der Verdichtung an der Oberfläche kein Wasserfilm aus, sondern eine dünne, geschlossene zähe Schicht. Eine sorgfältige Nachbehandlung ist unumgänglich, um einer möglichen Rissbildung durch Austrocknen entgegen zu wirken. Der Frischbeton kann durch das Abdecken mit einer Folie oder durch das Auftragen von Nachbehandlungsmitteln vor Verdunstung geschützt werden [27].

Eine weitere effektive Methode um die Eigenschaften des UHPC zu verbessern ist eine thermale Nachbehandlung. Eine Wärmebehandlung führt zu einer schnelleren Festigkeitsentwicklung und höheren Endfestigkeiten. Sie erfolgt durch das Erwärmen des Betons nach oder während des Abbindens bei normalem oder erhöhtem Druck. Diese Form der Nachbehandlung kommt jedoch nur bei der Herstellung von Fertigteilen zur Anwendung [19].

Grundsätzlich wird zwischen der feuchten und der trockenen Wärmebehandlung unterschieden. Die feuchte Wärmebehandlung erfolgt in einem Klimaschrank bei 100 % relativer Feuchte, in einem Wasserbad oder einem Autoklav. Die trockene Wärmebehandlung in einem Ofen. Der Temperaturbereich erstreckt sich von etwa 50 °C bis 400 °C [10].

In [5] wurde untersucht inwieweit sich eine unterschiedlich lange Wärmebehandlung auf die Festigkeitsentwicklung auswirkt. Dazu wurden Prüfkörper verschieden lange im Trockenschrank bei 90 °C behandelt. Wie in Abbildung 2.8 ersichtlich zeigt sich, dass bereits nach 24 Stunden die Druckfestigkeit von 147 N/mm² auf 230 N/mm² angestiegen ist. Danach nahm sie vergleichsweise nur noch wenig zu.

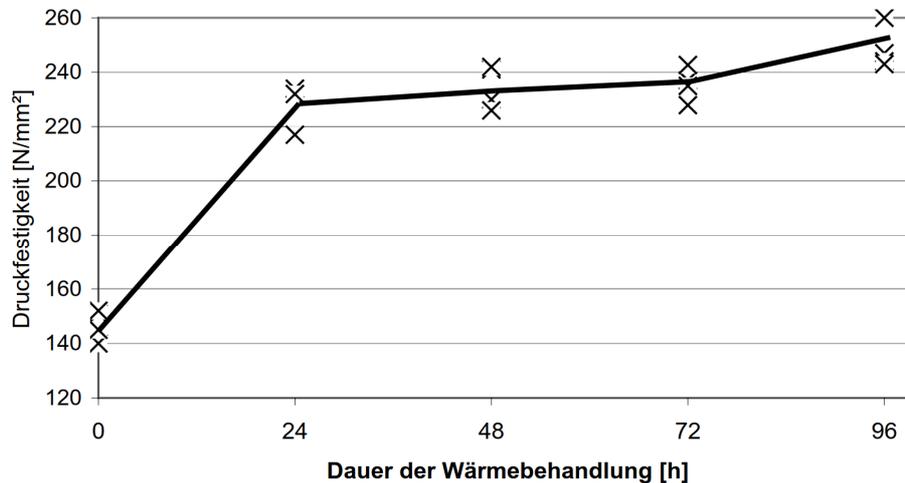


Abbildung 2.8: Druckfestigkeit (7 Tage) abhängig von der Warmbehandlungsdauer, 90 °C [5]

Wird die thermale Nachbehandlung bei Temperaturen über 90°C durchgeführt, so wird die puzzolanische Reaktion des Silikatstaubs beschleunigt. Außerdem wird die Mikrostruktur der entstehenden Hydratphasen verändert. So entsteht unter 200 °C der feste und dichte Tobermorit und über 200 °C kommt es zur Bildung anderer festigkeitssteigernder Silikathydrate wie Gyrolit und Xonolit [9].

Wichtig bei der Wärmebehandlung ist zudem, dass die Abkühlgeschwindigkeit nicht mehr als die Hälfte der Aufheizgeschwindigkeit betragen sollte, da sonst thermisch bedingte Mikrorisse auftreten können [27].

2.1.4 Festbetoneigenschaften

2.1.4.1 Homogenität

Im Grunde kann man bei klassischem Beton von einem heterogenen Baustoff sprechen, da Zuschlag und Zementstein unterschiedliche Eigenschaften wie zum Beispiel Durchmesser, E-Module und Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen.

Der UHPC hingegen ist um einiges homogener. Gründe hierfür sind:

- Grobe Zuschläge fehlen und werden durch feine Sande mit einem Größtkorn von circa 1 mm ersetzt
- Das Verhältnis des E-Moduls des Zuschlags zu dem des Zementleims liegt nahezu bei 1,0
- Die Temperaturkoeffizienten von Zementstein (bei kleinem W/B-Wert) und Quarz sind etwa gleich groß

Des Weiteren wird die Schwächezone zwischen Zuschlagskorn und Zementstein mittels Mikrosilika vermieden und die Zuschlagsmenge bei gleichzeitiger Erhöhung der Zement- und Mikrosilikamenge verringert (siehe 2.1.2.4).

Aufgrund der oben genannten Kennzeichen des UHPCs, kann man einen nahezu homogenen Baustoff herstellen [9] [15].

2.1.4.2 Dichte und Porosität

Die Rohdichte von Ultrahochfestem Beton beträgt ca. 2600 kg/m³ und liegt damit etwa 10 % über der von Normalbeton. Grund dafür ist die höhere Packungsdichte und die damit verbundene geringere Porosität des Festbetons [28].

Die Gesamtporosität setzt sich aus Luftporen, Kapillarporen und Gelporen zusammen und sinkt bei vollständig verdichtetem UHPC auf 4-6 Vol.-%. Luftporen (\varnothing 1 μ m – 1 mm) entstehen beim Mischvorgang, wenn Luft in das Zementgel gelangt. Gelporen (\varnothing 1 nm - 10 nm) entstehen mit der Bildung des Zementgels und sind unter normalen Bedingungen mit Porenlösung gefüllt. Kapillarporen (\varnothing 0,01 – 0,1 μ m) entstehen durch das überschüssige Wasser im Zementstein, welches nicht physikalisch in den Gelporen gespeichert ist und nicht an der Hydratation teilgenommen hat. Diese sind verantwortlich für Transportprozesse von Gasen und Flüssigkeiten und haben einen großen Einfluss auf die Festigkeit und den E-Modul des Betons [9] [29] [27].

In Abbildung 2.9 wurde die Porenradienverteilung zweier Ultrahochfester Betone C200 mit Hochfestem Beton C105 und Normalbeton C45/55 verglichen. Es zeigte sich, dass die Kapillarporen im UHPC fast ganz fehlen [27]. Dass es in diesem Bereich zu einer Abnahme des Porenvolumens kommt ist auf den Silikatstaubanteil zurückzuführen (siehe 2.1.2.5) [9].

Dank des geringen Anteils an Kapillarporen, wird das Eindringen von Chloriden und anderen Stoffen verhindert, so dass Ultrahochfester Beton einen hohen Widerstand gegen Frost- und Tausalzangriff aufweist, sowie geringe Carbonatisierungstiefen.

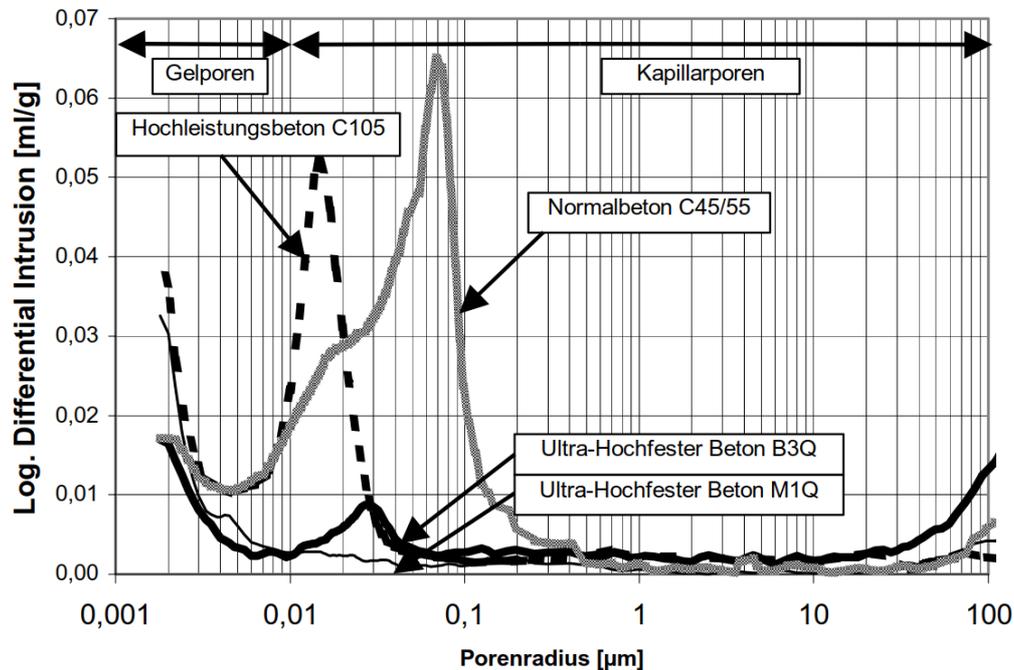


Abbildung 2.9: Vergleich der Porenradienverteilung von Normalbeton, HPC und UHPC [27]

2.1.4.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist eine der wichtigsten Eigenschaften des Betons und wird darüber hinaus auch zur Klassifizierung des Betons herangezogen. Sie wird an eigens dafür hergestellten Probekörper mittels Druckversuch nach 28 Tagen ermittelt [30].

Die Druckfestigkeit von Ultrahochfestem Beton ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Bei einer gewissenhaften Verarbeitung und optimal angepassten Nachbehandlung sind Druckfestigkeiten über 200 N/mm² möglich [19]. Im Vergleich zu normal- und hochfestem Beton zeichnet sich UHPC dadurch aus, dass er sich bis zum Erreichen der Druckfestigkeit weitgehend linear elastisch verhält, bevor sich durch Mikrorissbildung der Übergang zum Versagen zeigt [31]. Der Probekörper versagt nahezu explosionsartig. Durch die Zugabe von Fasern kann nach Erreichen der Druckfestigkeit ein duktiler Nachbruchverhalten erreicht werden (Abbildung 2.10) [27].

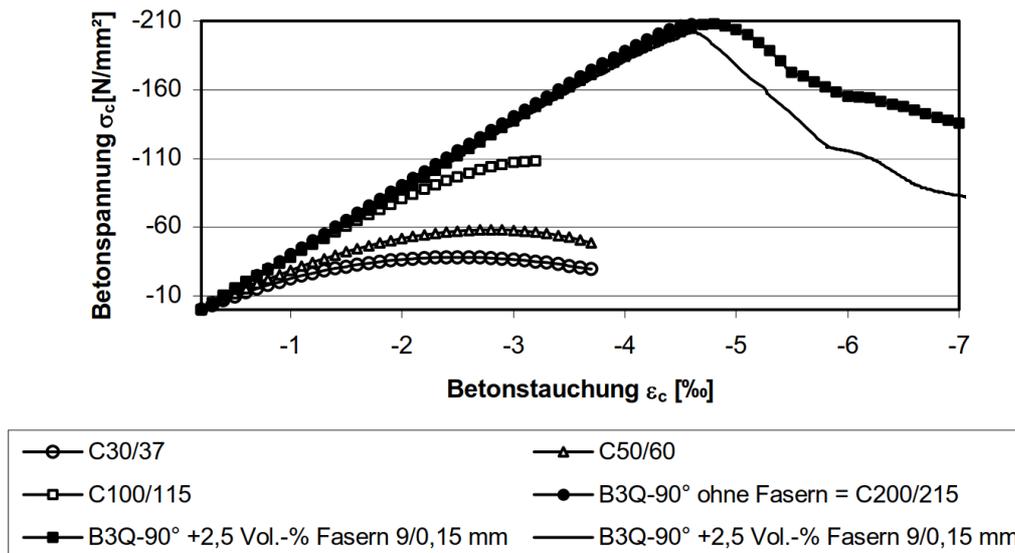


Abbildung 2.10: Spannungs-Stauchungskurve für Normalbeton, HPC und UHPC [27]

2.1.4.4 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit ist von den Eigenschaften des Zementsteins, den Eigenschaften des Zuschlags und der Haftung zwischen diesen beiden abhängig [28]. Da die Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag durch Fasern bedeutend erhöht werden kann, wird die Biegezugfestigkeit entscheidend durch die Faserbeigabe gesteuert. Somit kann UHPC durch die Zugabe von Stahlfasern Biegezugfestigkeiten über 30 N/mm^2 erreichen [9]. Normalbetone erreichen nur Werte zwischen 3 und 8 N/mm^2 [29]. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die maximal erreichbare Biegezugspannung etwa doppelt so groß ist wie diejenige, die beim Auftreten der ersten Risse erreicht wird [19].

2.1.5 Anwendung von UHPC

Nach dem ersten Einsatz 1996, beim Bau der Fuß- und Radwegbrücke Sherbrooke in Kanada (Abbildung 2.1), vollzog sich die Entwicklung von UHPC Bauten weitgehend in Frankreich. Dort wurde UHPC beispielsweise für Unterbauten und Rieselbauten des Kühlturms des Kraftwerks *Cattenom* verwendet. In den USA existierte ein Forschungsprojekt zur Entwicklung von Abwasserrohren, Druckrohrleitungen und Masten aus Ultrahochfestem Beton. In Österreich begann das wissenschaftliche Interesse an Ultrahochfesten Betonen vergleichsweise spät [12] [19]. In Völkermarkt in Kärnten wurde im Oktober 2010 die *Wild-Brücke*, die erste Bogenbrücke der Welt aus UHPC fertiggestellt (Abbildung 2.11). Sie besitzt eine Spannweite von 157 m [32].



Abbildung 2.11: Wild-Brücke aus UHPC in Völkermarkt, Kärnten [33]

Da die einzelnen Maßnahmen zur Herstellung des UHPC noch vergleichsweise hohe Kosten verursachen, sollte er mit den üblichen Betonen nicht in Konkurrenz treten. Die Feststellung, dass UHPC nicht mehr in die Kategorie der heterogenen Materialien einzuordnen ist (siehe 2.1.4.1), erlaubt es dem UHPC vielmehr mit Stahl und in dessen Einsatzgebiet zu konkurrieren. Filigrane, weit gespannte vorgefertigte Bauteile mit aufgelösten Querschnitten die gegebenenfalls vorgespannt sind, wären somit mögliche Anwendungen für UHPC. Hoch belastete Verbundstützen oder die Instandsetzung stark beanspruchter Tragwerke wären weitere Einsatzmöglichkeiten [9] [2] [19].

Aufgrund der ausgezeichneten Dauerhaftigkeitseigenschaften eignet sich UHPC besonders als Baustoff für Bauteile und Tragwerke die chemisch aggressiven Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Somit wäre UHPC als Ummantelung von entsprechenden Bauteilen und Tragwerken denkbar. Gleiches gilt bei hohen Oberflächenbeanspruchung, so kann UHPC auch für die Instandsetzung von Fahrbahnplatten zur Anwendung kommen [4] [19].

2.2 Mischprozesse

2.2.1 Allgemeines

Das Mischen gehört zu den ältesten mechanischen Verfahren, neben dem Zerkleinern und Trennen. Es gibt heutzutage wenige Produkte die nicht auf dem Weg ihrer Erzeugung mit dem Mischen in Berührung gekommen sind. Vor allem in der Nahrungsmittel-, Baustoff- und Pharmaindustrie [34].

Definiert werden kann Mischen als eine „Stoffvereinigung aus Komponenten“. Eine erfolgreiche Mischung ist erreicht, wenn die Zusammensetzung einer Probe aus der Mischung mit der Gesamtzusammensetzung der Mischung möglichst weitgehend übereinstimmt [35].

Das Mischen von Beton besteht somit im Wesentlichen darin, die zunächst trockenen Partikel unterschiedlicher Größe mit Wasser zu einem möglichst homogenen Gemisch zu vereinigen [3]. Dafür wird das Kornhaufwerk nach Wasserzugabe in eine Suspension übergeführt. Die Frischbetoneigenschaften sowie die Festbetoneigenschaften werden maßgeblich von der Mischgüte beeinflusst [36]. Wird zunächst ein Prämix des Trockenmaterials hergestellt, kann man zwischen dem Trockenmischvorgang und dem eigentlichen Nassmischen unterscheiden. Beim Trockenmischen werden zunächst die trockenen Ausgangstoffe (Zuschlag, Zement und Zusatzstoffe) gemischt. Der Prämix des trockenen Materials kann nun gelagert werden und dann bei Bedarf in einem weiteren Mischvorgang unter Wasserzugabe zu Beton vermengt werden.

2.2.2 Misch- und Entmischungsvorgänge

Der Mischvorgang kann in zwei wesentliche Mechanismen unterteilt werden, die aber einander überlagert sind: Dispersion und Konvektion (Abbildung 2.12).

Die Konvektion beschreibt eine Bewegung von größeren Partikelgruppen relativ zueinander. Die gesamte Materialmenge wird geteilt und nach einem Platzwechsellvorgang wieder vermengt. Somit verringert die Konvektion fortlaufend Größe und Abstand der ungemischten Bereiche im Mischer.

Die Dispersion beschreibt einen lokalen Effekt, den vollkommen zufälligen Platzwechsel der einzelnen Partikel infolge der durch das Mischwerkzeug erzeugten Bewegung. Sie ist vor

allein bei vorgemischten Systemen sinnvoll, um dann eine Feinvermischung auf kleinstem Raum herbei zu führen [34].

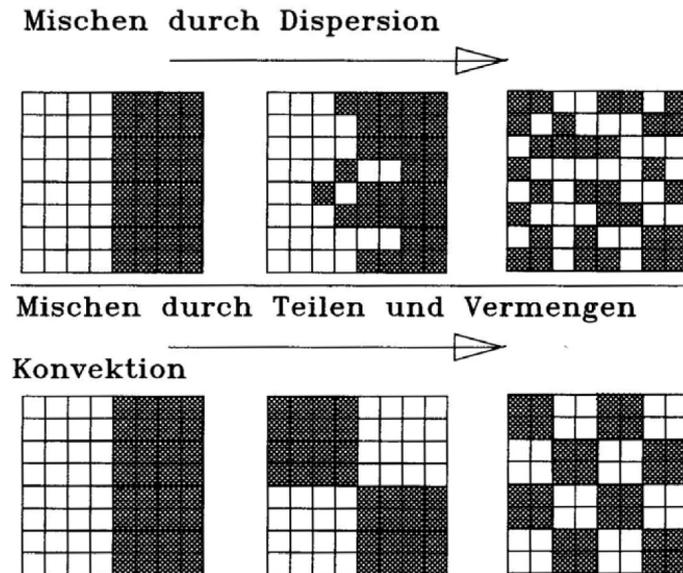


Abbildung 2.12: Mechanismen des Mischens [34]

Besitzen die Komponenten unterschiedliche Bewegungsverhalten, so kann es mit zunehmender Mischzeit neben dem Mischvorgang zu einem Entmischungsvorgang kommen. Grund dafür sind unterschiedliche Partikeleigenschaften, wie beispielsweise Größe, Form, Dichte, Anziehungskräfte, Reibung. So kommt es zum Beispiel bei Vibration zum Aufschwimmen der größeren Partikel und gleichzeitig zum Durchsickern der kleineren Partikel. Außerdem können sich Agglomerate durch interpartikuläre Kräfte ausbilden, wodurch der Platzwechsel beim Mischvorgang erschwert wird. Diese bilden sich unter anderem durch Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln, in Anwesenheit von geringen Flüssigkeitsmengen, elektrostatischen Kräften sowie wechselseitig induzierten Dipolkräften (van-der-Waals-Kräfte) bei Partikeln unter $30\ \mu\text{m}$ [34].

Bei der Herstellung von Ultrahochfestem Beton werden große Mengen an Zusatzstoffen mit einem Partikeldurchmesser kleiner $10\ \mu\text{m}$ verwendet, die zur Agglomeration neigen. Ziel ist es das Agglomerat zu benetzen, indem die enthaltende Luft durch Wasser- und Fließmittelmoleküle verdrängt wird [37]. Beim dispersiven Mischen können die Agglomerate aufgeschlossen werden [10]. Dazu sind jedoch hohe Schergeschwindigkeiten oder Umwälzgeschwindigkeiten notwendig [2].

2.2.3 Mischgüte

Der Begriff der Mischgüte dient dazu den Zustand und damit die Qualität einer Mischung zu beurteilen und somit die Effizienz des Mischvorgangs. Ziel ist es, die Ausgangsstoffe gleichmäßig zu verteilen, und somit eine ideale Homogenität zu erreichen [38]. Die ideale oder absolute Homogenität beschreibt das totale Gleichgewicht des gesamten Stoffes. Im Bereich der Feststoffmischungen gibt es keine absolute Homogenität, da der Mischvorgang stets zufällig abläuft. So kann maximal eine homogene Zufallsmischung erreicht werden [2].

Um die Mischgüte zu bestimmen, wird einer Mischung an vielen Stellen eine Probe entnommen und untersucht. Die daraus resultierende Abweichung von der zu erwartenden Konzentration der Gesamtmischung wird durch die Varianz beschrieben. Die theoretische Varianz σ^2 ergibt sich indem man die gesamte Mischung, in N_g Proben gleicher Größe aufteilt, die Konzentration x_i in jeder Probe bestimmt und mit dem Sollwert p vergleicht [34]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_g} \sum_{i=1}^{N_g} (x_i - p)^2 \quad [2-6]$$

Da man meist nur eine beliebige Anzahl n zufällig verteilter Proben analysiert, erhält man nur einen Schätzwert für die unbekannte Varianz σ^2 , die sogenannte Stichprobenvarianz S^2 . Ist die Konzentration p ebenfalls unbekannt, so wird diese durch den arithmetischen Mittelwert μ der Probenkonzentrationen x_i ersetzt. Die Stichprobenvarianz errechnet sich dann wie folgt [34]:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad \text{mit} \quad \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [2-7]$$

Die Homogenität einer Mischung ist umso besser, je kleiner die Abweichungen von der Konzentration der Gesamtmischung ist. Die homogene Zufallsmischung ist somit für die kleinstmögliche Varianz erreicht [35]. Sie kann zusätzlich mit dem Variationskoeffizienten V beurteilt werden. Dieser errechnet sich aus der Stichprobenvarianz und dem arithmetischen Mittelwert wie folgt [2]:

$$V = \frac{S}{\mu} \quad \text{mit} \quad S = \sqrt{S^2} \quad [2-8]$$

2.2.4 Mischzeit

Unter der Mischzeit wird der Zeitbedarf bis zum Erreichen einer bestimmten Mischgüte verstanden. Eine theoretische Vorhersage der Mischzeiten ist bis jetzt noch nicht möglich, daher müssen sie experimentell ermittelt werden. Hierfür wird in bestimmten Zeitabständen dem Mischer ein Probensatz entnommen und die Stichprobenvarianz bestimmt [34]. Der zeitliche Verlauf der Varianzen wird prinzipiell den in Abbildung 2.13 gezeigten Verlauf haben. Die Analyse dieses Verlaufs ermöglicht nun die Bestimmung der erforderlichen Mischzeit bis zum Erreichen der erreichbaren Mischgüte oder einer als ausreichend angesehenen Mischgüte [35].

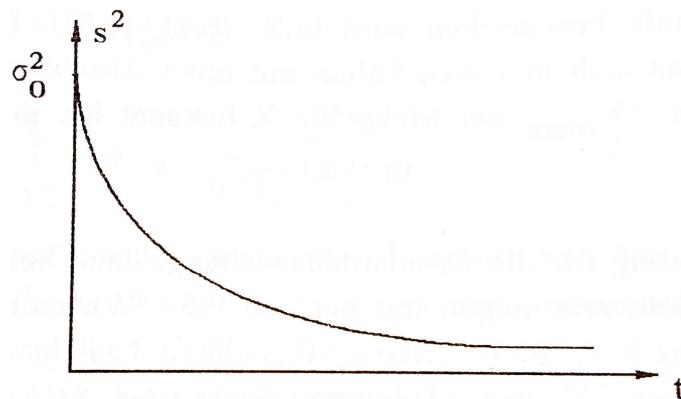


Abbildung 2.13: Zeitlicher Mischgüteverlauf [35]

Bei der Herstellung von UHPC muss grundsätzlich zwischen dem Trockenmischen zur Erzeugung des Prämix und dem eigentlichen Frischbetonmischen unter Wasserzugabe unterschieden werden. Die optimale Mischdauer der trockenen Ausgangsstoffe vor der Wasserzugabe soll im Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht werden. *Safranek* hat in [2] aber bereits Homogenisierungszeiten von 45 s, 90 s und 135 s angewendet. Dabei hat sich gezeigt, dass bei längerer Mischzeit das Ausbreitmaß größer und somit also die Verarbeitbarkeit verbessert wurde. Die Druckfestigkeit stieg ebenfalls eindeutig bei einer längeren Homogenisierungszeit.

Für die Betonherstellung unter Wasserzugabe lässt sich laut [39] die Mischdauer auch anhand der aufgezeichneten Leistung des Mischwerkzeugs ermitteln. Die Mischdauer lässt sich in fünf Phasen Unterteilen [10] [37]:

1. Ausbildung von Agglomeraten und Granulaten:

Die geringe Menge an Flüssigkeit zu Feststoffoberfläche führt zur Bildung feinsten Feststoffpartikel-Agglomerate, die die Flüssigkeitstropfen umgeben. Die Flüssigkeitsbrücken zwischen diesen Agglomeraten sind die Ursache für einen signifikanten Leistungsanstieg am Mischwerkzeug. Durch das weitere Intensivmischen wird das eingeschlossene Wasser an die Oberfläche gedrängt, wo sich weitere Feststoffteilchen anlagern. Es bilden sich sogenannte Granulate.

2. Vereinigung der Granulate:

Durch den weiteren Mischprozess stellt sich durch Konsolidierung eine Befeuchtung der Oberfläche der Granulate ein. Es kommt zu einem merklichen Anstieg der Antriebsleistung, da durch Flüssigkeitsbrücken die Kohäsion unter den Granulaten begünstigt wird.

3. Auflösung der Granulate und Übergang zur Suspension:

Durch weitere Scherung der Granulate wird Flüssigkeit freigesetzt, welche die Zwischenräume zwischen den Granulaten füllt und so die Kohäsion herabsetzt. Es kommt in Teilbereichen zu einem Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension und die Antriebsleistung nimmt ab.

4. Auflösung von Agglomeraten:

Mit der Fortführung des Mischvorgangs gelingt es die Feinstoffe zu deagglomerieren. Die Antriebsleistung sinkt weiter ab und die Fließfähigkeit erreicht ihr Maximum.

5. Übermischung:

Eine weitere Zufuhr von Mischenergie kann die Mischgüte des UHPC sowie Fließfähigkeit nicht mehr verbessern.

Die optimale Mischzeit ist für jede Mischungszusammensetzung eine Andere. Sie wird als Stabilisationszeit t_s bezeichnet [39].

Die Stabilisationszeit lässt sich ermitteln, indem zunächst die Leistungskurve in Bezug auf die maximale Leistung normalisiert wird und dann die Kurve nach dem Leistungsmaximum durch eine Exponentialfunktion angenähert wird. Der Zeitpunkt an dem die Steigung der Kurve den

Wert $-4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ erreicht, ist laut *Mazanec* die Stabilisationszeit (Abbildung 2.14). Man erhält zu diesem Zeitpunkt für jede Mischungszusammensetzung, unabhängig von der Werkzeuggeschwindigkeit, eine optimale Fließfähigkeit und somit eine bestmögliche Dispergierung. Es ist zu beachten, dass der Beginn der Mischzeit bei *Mazanecs* Versuchen ab dem Zeitpunkt der Wasserzugabe gezählt wurde [3] (eine detaillierte Beschreibung der Auswertung der Stabilisationszeit erfolgt in 3.4.1.2).

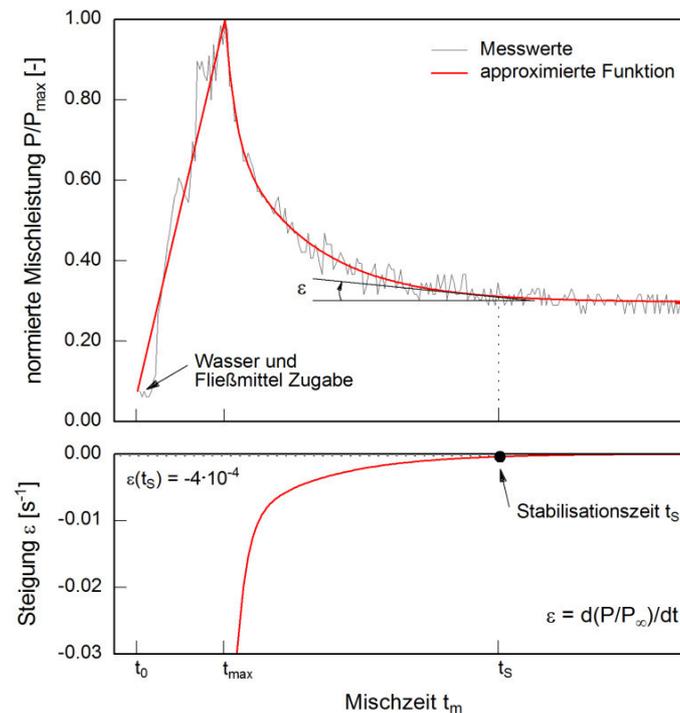


Abbildung 2.14: Ermittlung der Stabilisationszeit aus der normierten Mischleistung [3]

2.2.5 Mischertypen

Die technische Durchführung des Mischens von Beton kann durch eine Vielzahl von Apparaten erfolgen. Dabei ist grundsätzlich zwischen Chargenmischern und kontinuierlichen Mixern zu unterscheiden.

Chargenmischer werden periodisch eingesetzt, das heißt man befüllt sie, mischt eine bestimmte Zeit lang, entleert sie und beginnt mit dem Ablauf von vorne [40]. Für die Herstellung von Beton werden bei den Chargenmischern hauptsächlich Freifallmischer oder Zwangsmischer eingesetzt. Aufgrund der schnelleren Homogenisierung und besseren Mischwirkung werden vor allem Zwangsmischer bevorzugt [41].

Bei kontinuierlichen Mixern werden die Komponenten genau dosiert und kontinuierlich dem Mixer zugeführt. Die Schritte Dosierung, Mischen und Entleeren erfolgen lokal hintereinander. Die Komponenten werden zur Austragsstelle befördert und gleichzeitig durchmischt. Kontinuierliche Mixer sind in Mischanlagen wenig verbreitet [34] [41].

Zur Herstellung von UHPC können grundsätzlich herkömmliche Zwangsmischer verwendet werden. Da mit ihnen aber keine hohen Schergeschwindigkeiten erreicht werden können, empfiehlt sich der Einsatz eines Intensivmischers. Selbst wenn die Werkzeuggeschwindigkeit und Mischdauer eines Standard-Mischsystems erhöht wird, sorgt dies zwar für eine bessere Homogenisierung, aber infolge des hohen Energieeintrags nimmt die Frischbetontemperatur zu. Da die Wirkung der Fließmittel in besonderer Weise von der Temperatur abhängt, führt dies häufig zum frühzeitigen Verlust der Verarbeitbarkeit [37].

Ein häufig genutzter Intensivmischer zur Untersuchung und Herstellung von ultrahochfestem Beton ist der der Fa *Eirich*. In Abbildung 2.15 ist das spezielle Eirich-Mischsystem dargestellt.

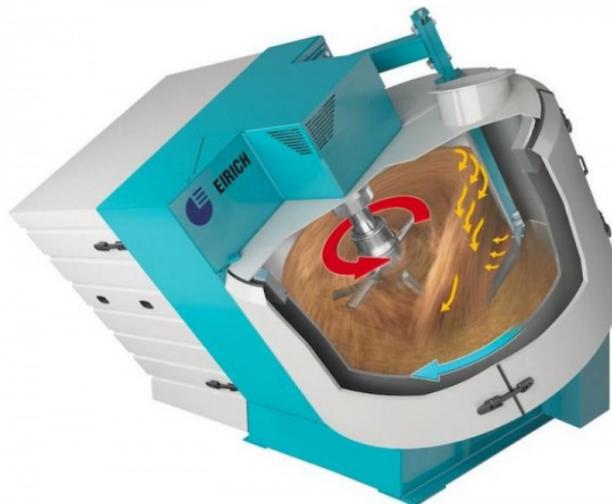


Abbildung 2.15: Mischprinzip eines Eirich-Intensivmischers [42]

Bei einem einfachen Zwangsmischer steht der Behälter still, so dass ein Teil der Bewegungsenergie der Mischwerkzeuge in Reibung und Verschleiß umgewandelt wird und somit verloren geht [2]. Beim Eirich-Mischer ist der Aufbereitungsvorgang und der Transport des Mischguts während des Prozesses getrennt, wodurch weit höhere Geschwindigkeiten des Wirblers bis zu 40 m/s erreicht werden können. Es dreht sich der Mischbehälter, weshalb es keine Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Mischgut und Behälter gibt. Der drehende Behälter gewährleistet zudem die Beförderung des Mischgutes zum Mischwerkzeug durch einen feststehenden Wandabstreifer. Es ist möglich innerhalb einer

Umdrehung 100 % des Mischguts umzuwahlen. So können mit dem Eirich-Intensivmischer bei hohen Werkzeuggeschwindigkeiten entstandene Agglomerate vollständig zerrieben werden und somit Suspensionen mit einem hohen Feststoff- und Feinanteilgehalt hergestellt werden [42].

Da bei Ultrahochfestem Beton, der geringe Luftgehalt des Frischbetons entscheidend für die höhere Rohdichte und die damit verbundene Druckfestigkeit ist, wird UHPC oft in einem Vakuummischprozess hergestellt. Da bei stark reduziertem Luftdruck im Mischer das Wasser bereits bei niedrigeren Temperaturen zu sieden beginnt, ist darauf zu achten, dass bei einer Mischungstemperatur von 30 °C der Druck im Mischer nicht weniger als 43 mbar beträgt. Andernfalls kommt es zu einem unerwünschten Wasserentzug [10]. Versuche an der *TU München* zeigten, dass bei einem Unterdruck von 40 mbar in der letzten Mischminute, die durch das intensive Mischen eingeschlagene Luft ausgetrieben werden konnte. So konnte die Rohdichte des UHPC noch erheblich gesteigert werden [12].

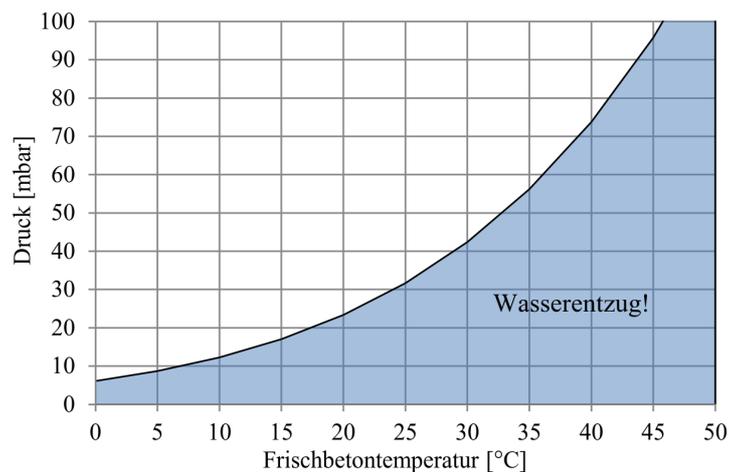


Abbildung 2.16: Siedekurve von Wasser abhängig vom Druck und der Frischbetontemperatur [10]

2.3 Rheologie

2.3.1 Allgemeines

Rheologie ist die Lehre vom Fließ- und Verformungsverhalten von Stoffen. Sie beschreibt das Fließen von Fluiden, sowie die Deformation von Festkörpern infolge äußerer einwirkender Kräfte [43]. Das Fließverhalten einer Flüssigkeit wird durch die Eigenschaften seiner Moleküle und deren Wechselwirkungen zueinander bestimmt. Diese sind so kompliziert, dass das Fließen von fließfähigen Stoffen meist nur messtechnisch quantitativ erfassbar wird [38].

In der Betontechnologie ist das Fließ- und Verformungsverhalten des Frischbetons grundlegend für seine Konsistenz. Die Konsistenz des Frischbetons unmittelbar nach dem Mischen beschreibt das Maß für die Verarbeitbarkeit des Betons [44]. Da UHPC sehr geringe W/B-Werte aufweist, ist das Fließverhalten eine problematische Eigenschaft dieses Betons. Um gute rheologische Eigenschaften zu gewährleisten, muss deshalb, besonders für Ultrahochfesten Beton, auf eine optimale Zusammensetzung und eine ausreichende Mischzeit geachtet werden. Nichts desto trotz ist eine gute Verarbeitbarkeit ohne den Einsatz von Fließmitteln nicht denkbar.

2.3.2 Rheologische Größen

Zur Bestimmung des Fließ- und Deformationsverhaltens gibt es physikalische Größen in der Rheologie, die den mechanischen Widerstand, die Verformung und die Verformungsgeschwindigkeit eines Fluids oder Feststoffes beschreiben [45]. Für die Herleitung der rheologischen Größen wird das *Zwei-Platten-Modell* eingesetzt:

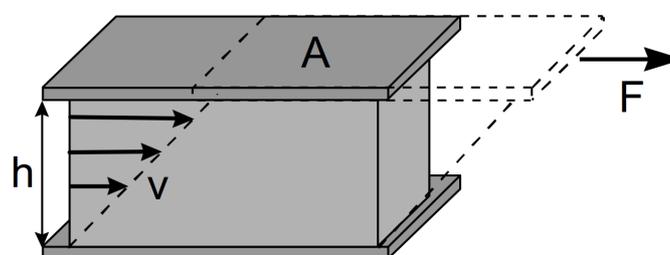


Abbildung 2.17: Das Zwei-Platten-Modell zur Definition rheologischer Größen [45]

Zur Bestimmung des Stoffverhaltens wird in der Rheologie von einer laminaren Schichtströmung ausgegangen. Wird bei dieser Strömungsart eine Schicht einer Probe

bewegt, so verschieben sich angrenzende Schichten infolge von Kohäsionskräften der Probe. Diese Verschiebung wird als Scherung bezeichnet [45]. In Abbildung 2.17 bewirkt die Kraft F die Verschiebung mit der konstanten Geschwindigkeit v der oberen Platte mit der Fläche A im Abstand h von der unbeweglichen unteren Platte.

Daraus resultieren die rheologische Größen Scherspannung τ , Scherrate $\dot{\gamma}$ und dynamische Viskosität η .

Die Scherspannung τ bezeichnet den Scherwiderstand, den eine Substanz einer Bewegung entgegensetzt. Sie ergibt sich folgendermaßen [45]:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [\text{Pa}] \quad [2-9]$$

F ...Scherkraft [N]

A ...Scherfläche [m^2]

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ stellt das Geschwindigkeitsgefälle innerhalb der Probe dar. Je höher dieses ist, desto höher ist auch die Scherbelastung. Die Scherrate lässt sich mit der Formel [2-10] berechnen [45]:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad [\text{s}^{-1}] \quad [2-10]$$

v ...Geschwindigkeit [m/s]

h ...Abstand [m]

Die dynamische Viskosität η beschreibt die Zähigkeit der Probe. Sie gibt das Verhältnis der Scherspannung zur Scherrate wieder [45]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad [2-11]$$

τ ...Schubspannung [Pa]

$\dot{\gamma}$...Scherrate [s^{-1}]

2.3.3 Newtonsches und Nicht-Newtonsches Fließverhalten

2.3.3.1 Newtonsches Fließverhalten

Ist die dynamische Viskosität konstant, also unabhängig von der Scherrate, handelt es sich um ein Newtonsches Fließverhalten (Abbildung 2.18) [36]. Dies entspricht einem idealviskosem Fließverhalten [45]. Dieses Verhalten ist nur für Gase und Flüssigkeiten mit kleinen Molmassen wie zum Beispiel Wasser zutreffend [38].

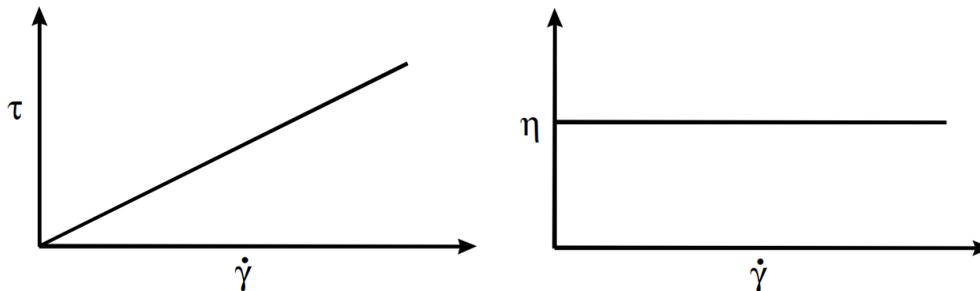


Abbildung 2.18: Fließ- und Viskositätskurve bei newtonschen Fließverhalten [45]

Nach dem Newtonschen Fließgesetz entspricht somit die Viskosität der Steigung der Fließkurve [44]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [Pa] \quad [2-12]$$

2.3.3.2 Nicht-Newtonsches Fließverhalten

Sobald die dynamische Viskosität durch die Scherrate oder der Zeit beeinflusst wird, handelt es sich um ein Nicht-Newtonsches Fließverhalten. Also kann man grundsätzlich zwischen einem zeitunabhängigen und einem zeitabhängigen Nicht-Newtonschen Fließverhalten unterscheiden [38].

Zeitunabhängiges Fließverhalten

Verringert sich die dynamische Viskosität mit steigender Scherrate, ergibt sich ein strukturviskoses Fließverhalten (Abbildung 2.19). Dieses Verhalten lässt sich durch Ausrichten und Deformation von Partikeln unter der Wirkung zunehmender Scherkräfte erklären. Desweiteren nimmt mit zunehmender Scherrate ein anfängliches Verschlaufen von Makromolekülen ab.

Nimmt die Viskosität mit steigender Scherrate zu, bezeichnet man das Fließverhalten als dilatant (Abbildung 2.19). Ursache dafür ist ein zunehmendes gegenseitiges Behindern der

Partikel bei zunehmender Bewegung. Dieses Verhalten ist sehr selten und tritt nur bei Suspensionen mit hohem Feststoffgehalt auf [38].

Bei strukturviskosem oder dilatantem Fließverhalten ist die dynamische Viskosität keine Stoffkonstante und wird deshalb bei solchen Nicht-Newton'schen Stoffen als *scheinbare Viskosität* bezeichnet [45].

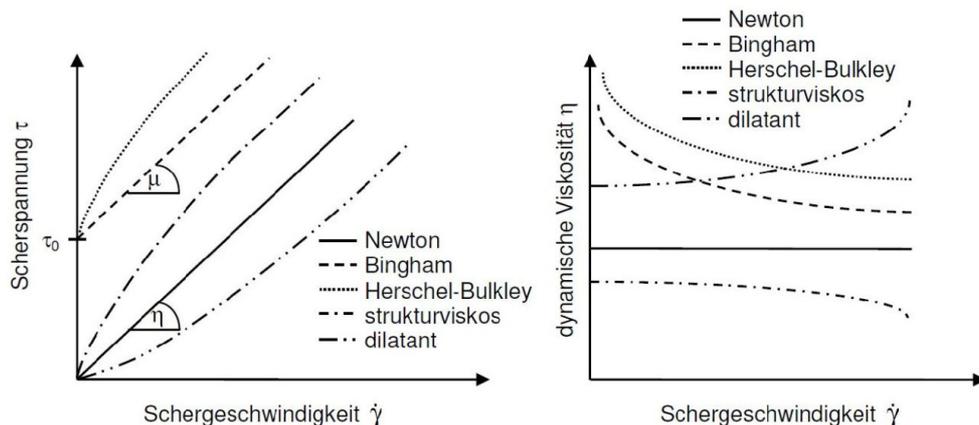


Abbildung 2.19: Fließ- und Viskositätskurve bei unterschiedlichen Fließverhalten [36]

In Abbildung 2.19 ist auch die Fließ- und Viskositätskurve eines Bingham- und eines Herschel-Bulkley-Körpers dargestellt. Diese Stoffe fangen erst ab einer gewissen Mindestschubspannung zum Fließen an und werden als plastisch bezeichnet. Dieser charakteristische Grenzwert wird die statische Fließgrenze τ_0 genannt. Bis zum Erreichen dieser kritischen Schubspannung verhalten sich solche Stoffe aufgrund eines intermolekularen Netzes von Bindungskräften wie starre Festkörper [38]. Die statische Fließgrenze gibt somit Aufschluss über das Sedimentationsverhalten von größeren Gesteinskörnungen nach dem Einbringen oder wird verwendet, um die zeitliche Entwicklung des Schalungsdrucks abzuschätzen [3].

Neben der statischen Fließgrenze existiert zudem die dynamische Fließgrenze τ_{0D} . Sie stellt die Scherkraft dar, bei deren Unterschreitung ein Stoff zum Fließen aufhört. Somit der Übergang von einem plastischen Material zu einem Feststoff [46]. Meist wird die dynamische Fließgrenze geprüft, da sich mit ihr das Fließverhalten von Zementleim oder Beton in der Schalung beschreiben lässt [3].

Die Fließkurve eines Bingham-Körpers wird durch die Formel [2-13] mit der plastischen Viskosität μ (Formel [2-14]) und der Fließgrenze τ_0 beschrieben [36]:

$$\tau = \tau + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad [Pa] \quad [2-13]$$

$$\mu = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}} \quad [kN \cdot s/m^2] \quad [2-14]$$

Zeitabhängiges Fließverhalten

Viele Suspensionen zeigen ein Fließverhalten abhängig von der Dauer der Scherbeanspruchung. Grund dafür ist, dass die Bindungskräfte der Moleküle und Partikel mit der Scherzeit beeinflusst werden. Ist die ursprüngliche Viskosität vollkommen reversibel, kann man zwischen thixotropen und rheopexen Stoffen unterscheiden [38]. Thixotrope Stoffe sind fest, werden aber bei mechanischer Einwirkung wie beispielsweise Rühren flüssig. Rheopexe Flüssigkeiten erhöhen bei Belastung die Zähigkeit, sie werden fest. Dieses rein zeitabhängige Verhalten können durch Versuche mit konstanter Scherbelastung bestimmt werden [45].

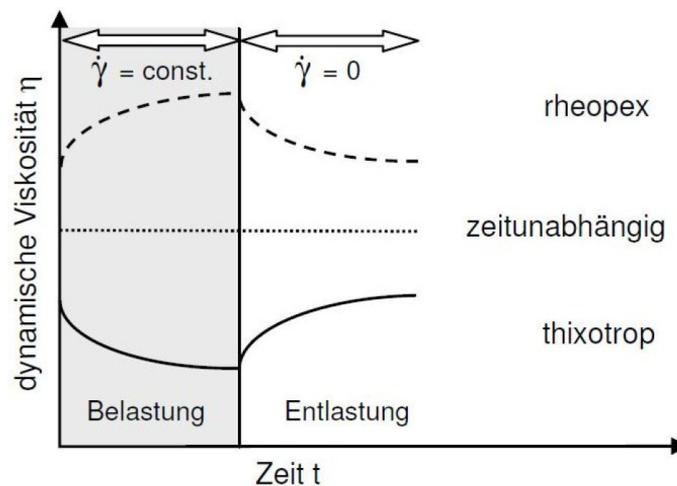


Abbildung 2.20: Zeitabhängigkeit zweier Stoffe bei konstanter Scherbelastung [46]

Wie in Abbildung 2.20 erkennbar erfolgt bei thixotropen Stoffen, bei konstantem Geschwindigkeitsgradienten, eine zeitliche Abnahme der Viskosität bis zu einem Minimalwert. Nach Abbruch der Beanspruchung erfolgt eine Regeneration der Bindungskräfte zwischen Makromolekülen und Teilchen. Die ursprüngliche Viskosität wird bei den meisten Stoffen nach einigen Stunden wieder erreicht.

Die Rheopexie beschreibt das umgekehrte Phänomen der Thixotropie. Die Viskosität nimmt mit der Beanspruchungsdauer zu [46].

Der Thixotropie kommt für Ultrahochfesten Beton eine besondere Bedeutung zu. Während bei Betonen mit hohen Fließgeschwindigkeiten eine hohe Thixotropie hinsichtlich der Sedimentation und des Schalungsdrucks von Vorteil ist, kann bei UHPC, mit üblicherweise geringen Fließgeschwindigkeiten, eine sehr ausgeprägte Thixotropie zu einem vorzeitigen Abbruch des Fließvorgangs oder zu einer unzureichenden Entlüftung des Betons führen [47].

Das zeitabhängige Fließverhalten von UHPC ist abhängig von der adsorbierten Fließmittelpolymermenge, der Anzahl der direkten Partikelkontakte und der chemischen Anfangsreaktion des Zements. Ultrahochfester Beton weist aufgrund seiner sehr hohen Feststoffkonzentration eine geringe Thixotropie auf. Laut *Mazanec* nimmt mit abnehmender Feststoffkonzentration die Thixotropie bis zu einem Maximum zu, da ebenfalls die erforderliche Polymermenge und damit die Stärke der abstoßenden Wechselwirkungen sinken. Eine weitere Abnahme der Feststoffkonzentration führt wieder zu einer Abnahme der Thixotropie, da die Anzahl der direkten Partikelkontakte abnimmt [3].

2.3.4 Wechselwirkungen in Feinstoffsuspensionen

Das Fließverhalten von Zementleimen wird sowohl durch die dispergierten Feststoffe, sowie durch die dispergierende Phase (Wasser) beeinflusst. Die Feststoffe beeinflussen die rheologischen Eigenschaften abhängig von deren zu benetzenden spezifischen Oberfläche, der Partikelgrößenverteilung, der Form der Teilchen und der Oberflächenladung.

Neben der Größe und der Form der Einzelpartikel sind die Haftkräfte zwischen den Teilchen untereinander für das rheologische Verhalten von dispersen Systemen verantwortlich. Bei Zementsuspensionen mit Teilchen unterschiedlicher Größe wirken verschiedene Kräfte zwischen den Partikeln. Bei diesen hochkonzentrierten Suspensionen wirken besonders kolloidale Wechselwirkungen und Kontaktwechselwirkungen [35] [3].

Zusätzlich wirken in feuchten Partikelgemischen die Kapillarkräfte aufgrund von Flüssigkeitsbrücken. Sie sind gegenüber den anderen Haftkräften etwa um den Faktor 10 größer und somit die dominierende Kraft [48].

Aufgrund des hohen Feststoffgehaltes und des niedrigen W/Z-Wertes von Ultrahochfestem Beton, werden dessen rheologische Eigenschaften vorwiegend durch interpartikuläre Kontakte und Reibung und weniger durch die dispergierende Phase (Wasser) beeinflusst [3].

2.3.4.1 Kolloidale Wechselwirkungen

Bei den kolloidalen Wechselwirkungen ergibt sich eine Überlappung der anziehenden van-der-Waals-Kräfte, der Elektrostatische Kräfte und der abstoßenden sterischen Effekte [3].

Die van-der-Waals-Kräfte ergeben sich auf Grund von Dipol-Wechselwirkungen zwischen den Atomen und Molekülen der benachbarten Oberflächen [35].

Die Elektrostatischen Kräfte wirken bei gleichgeladenen Partikeln abstoßend und zwischen gegenpolig geladenen Oberflächen anziehend. Sie beruht somit auf der statischen Oberflächenladung der Zementpartikel [45]. Fließmittel machen sich diesen Effekt zu Nutze, indem sie die Oberflächenladung der Zementpartikel so verändern, dass eine elektrostatische Abstoßung entsteht (siehe 2.1.2.5).

Sterische Effekte ergeben sich durch die Anwesenheit von Polymeren mit Seitenketten. Osmotische Effekte der ungeladenen Seitenketten sorgen dafür, dass die Partikel auf Abstand gehalten werden und wirken somit den van-der-Waals-Kräften entgegen, da sie nur bei engem Kontakt von großer Bedeutung sind [3].

2.3.4.2 Kontaktwechselwirkungen

Die Kontaktwechselwirkungen ergeben sich aus Kontakt und Reibung zwischen den einzelnen Partikeln und sind somit direkt abhängig von der Partikelpackung bzw. Packungsdichte. Die wesentlichen Parameter der Partikelpackung sind die Anzahl der Kontaktpunkte und die Geometrie der Kontakte, welche sich aus der Form der Teilchen und dessen spezifischen Oberfläche ergeben.

Durch intensives Mischen lässt sich annähernd die maximal mögliche Feststoffkonzentration ϕ_{\max} erreichen. Diese beschreibt die maximale Packung von steifen nicht interagierenden Partikeln eines Teilchengemisches. Die maximal mögliche Feststoffkonzentration ϕ_{\max} gibt rechnerisch den Anteil des Feststoffvolumens am Gesamtvolumen eines Partikelgemisches an (Formel [2-15]) [3].

$$\phi_{max} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) \quad [2-15]$$

ϕ_{max} ...maximal mögliche Feststoffkonzentration

ε ...Hohlraumgehalt zwischen den Partikeln

Da für die Herstellung von UHPC, neben dem bereits feinen Quarzsand, zusätzlich Silikatstaub als Zusatzstoff verwendet wird, können die Hohlräume zwischen den größeren Teilchen ausgefüllt werden. So ergibt sich für UHPC eine maximal mögliche Feststoffkonzentration in der Größenordnung von etwa 90 Vol.-% [3].

2.3.4.3 Kapillarkräfte

Kapillarkräfte treten bei Suspensionen auf bei denen die Partikeloberflächen nicht mehr vollständig benetzt werden können. Haftkraftbestimmend sind dabei die Kohäsion des Bindemittels und die Adhäsion am Festkörper. Kommt es zu Kapillarkräften zwischen zwei Partikeln bei Flüssigkeiten mit niedriger Zähigkeit wie Wasser, so spricht man von frei beweglichen Flüssigkeitsbrücken.

Ist die Brückenoberfläche wie in Abbildung 2.21 gekrümmt, kommt es im Inneren der Flüssigkeit zu einem kapillaren Unterdruck. Daraus resultiert, dass die Partikel zueinander hingezogen werden. Die Anziehungskraft kann abhängig von geometrischen (Füllwinkel 2β , Kugeldurchmesser d , Abstand a) und stofflichen Einflussgrößen (Oberflächenspannung γ , Randwinkel δ) berechnet werden [35].

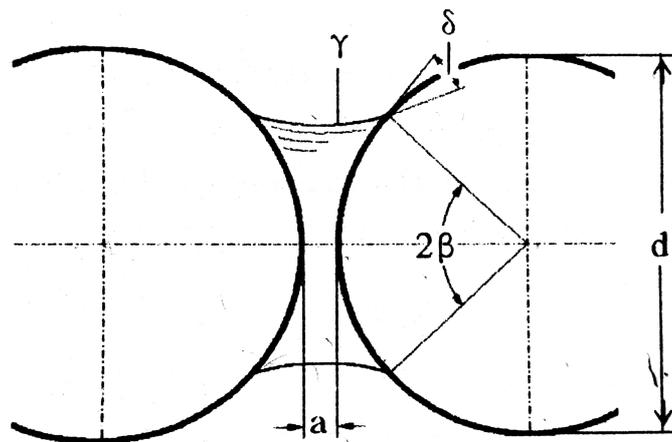


Abbildung 2.21: Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei kugelförmigen Partikeln [35]

Kommt es bei einem erhöhten Wassergehalt zu einer vollständigen Benetzung der Partikel, so nehmen die Kapillarkräfte rasch ab und verschwinden bei einem wassergesättigten Hohlraum zwischen den Teilchen komplett [3].

2.3.5 Fließverhalten von Betonen

Um das Frischbetonverhalten von Beton zu beschreiben und ihn somit optimal in den Einbauprozess einzugliedern, ist die Kenntnis rheologischer Größen unumgänglich. *Ferraris* und *de Larrard* fassen in [49] einige Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Frischbetons und den rheologischen Größen zusammen. Daraus resultiert, dass die plastische Viskosität beispielsweise die Pumpfähigkeit des frischen Betons beschreibt und die Fließgrenze unter anderem den Widerstand des Frischbetons gegen das Abrutschen auf einer schiefen Ebene erklärt und somit in Zusammenhang mit dem Ausbreitmaß steht.

Betone sind plastische Stoffe, das heißt sie fangen erst ab einer Mindestschubspannung zu fließen an und kommen zum Stillstand, sobald eine gewisse Schubspannung unterschritten wird. Sie besitzen folglich eine statische und dynamische Fließgrenze (siehe 2.3.3.2). Das rheologische Verhalten von Zementleimen und Betonen kann vereinfacht als Bingham-Körper beschrieben werden (Abbildung 2.22).

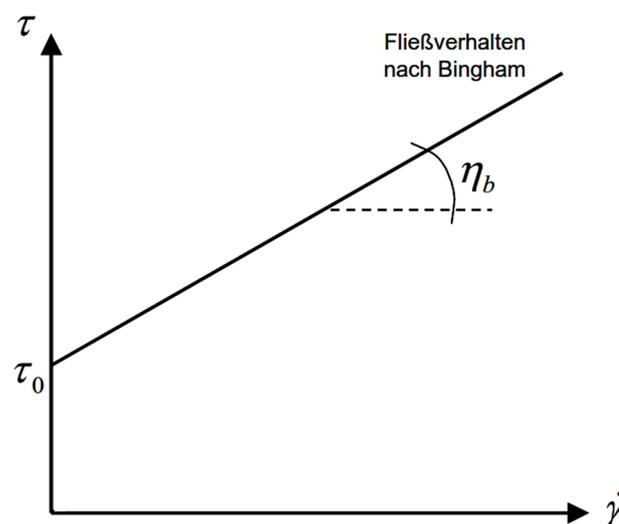


Abbildung 2.22: Fließverhalten eines Bingham-Körpers [50]

Bei dem Fließverhalten nach Bingham steigt die Schubspannung proportional mit zunehmender Schergeschwindigkeit. Dieser Proportionalitätsfaktor wird als (Bingham-) Viskosität η_b bezeichnet.

Es ergibt sich somit folgender Zusammenhang [50]:

$$\tau = \tau_0 + \eta_b \cdot \dot{\gamma} \quad [2-16]$$

Die dabei zu überwindende statische Fließgrenze τ_0 beruht maßgeblich auf den interpartikulären Kräften und der Partikelpackung. Sie baut sich zum einen auf indem die Partikel beim Aufbringen einer Schubspannung durch interpartikuläre Kräfte verhaken und sich gegenseitig behindern. Zum anderen tritt Reibung zwischen den Partikeln auf, wenn weniger oder gerade so viel Wasser im Beton vorhanden ist, dass die Hohlräume zwischen den Teilchen (Gesteinskörnung, Zusatzstoffe und Zement) gefüllt sind (Abbildung 2.23) [50].

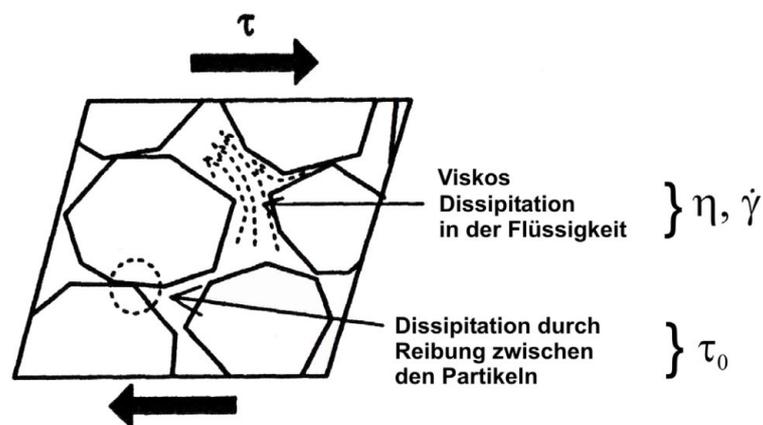


Abbildung 2.23: Beitrag der Feststoffpartikel und des Wassers zum Scherwiderstand von Beton [3]

Bei einem erhöhten Wassergehalt des Partikelgemisches bilden sich Gleitfilme zwischen den Teilchen, so dass ein Fließen des Betons möglich wird [3].

Für die Fließgrenze τ_0 ist nach *Bingham* zufolge, das Grundgerüst der Körner verantwortlich. Dies lässt sich mit dem Verhältnis von aktueller Feststoffkonzentration ϕ zur maximal möglichen Feststoffkonzentration ϕ_{\max} ausdrücken. Die Fließgrenze ist somit folgende Funktion [3]:

$$\tau_0 = f\left(\frac{\phi}{\phi_{\max}}\right) \quad [2-17]$$

Folglich erhöht sich die Fließgrenze, wenn der Volumengehalt der Feststoffe im Gesamtraum und damit die Anzahl der interpartikulären Kontakte ansteigt. Diese werden von der Form und Rauheit des Korns, der Adsorption von Fließmitteln und bei feineren Stoffen vor allem von den interpartikulären Kräften gesteuert [50].

Die Viskosität η_b stellt eine wichtige Einflussgröße auf die Beweglichkeit und die Fließgeschwindigkeit von Suspensionen dar. Sie wird somit maßgeblich von der Suspension bzw. dem Leim und der in der Suspension enthaltenen Partikel bestimmt. Nach *Ferraris* und *de Larrard* ergibt sich daraus folgender Zusammenhang [49]:

$$\eta = \eta_0 \cdot g\left(\frac{\phi}{\phi_{max}}\right) \quad [2-18]$$

η_0 ...Viskosität des Fluids der Suspension

$g(\phi/\phi_{max})$...Funktion der relativen Packungsdichte (vgl. Formel [2-17])

Die Fließfähigkeit von Beton bzw. die Fließgrenze und die Viskosität lassen sich also über das Verhältnis von aktueller Feststoffkonzentration und maximal möglicher Feststoffkonzentration berechnen.

Bei Ultrahochfestem Beton wird neben den Zementpartikeln auch eine große Menge an Mikrosilika eingesetzt. Durch den Austausch von Zement durch feinere Zusatzstoffe wird die Partikelabstufung verbessert und die maximal mögliche Feststoffkonzentration erhöht. Daraus resultiert, dass die plastische Viskosität abnimmt. Bei sehr feinen Zusatzstoffen, wie es bei Mikrosilika der Fall ist, können anziehende interpartikuläre Kräfte jedoch diesen Effekt aufheben [3].

3 Vorversuche und Versuchsplanung

3.1 Vorbemerkungen

Der experimentelle Teil der Arbeit wird am institutseigenen Labor durchgeführt und beinhaltet die Herstellung sowie die Versuche des Frischbetons. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten ist darauf zu achten, dass die durchzuführenden Versuche stets unter denselben Bedingungen ablaufen. Verfälschende Einflüsse wie abweichende Mischrezepturen, Mischtemperaturen, Mischintensitäten, Versuchszeiten und Messprofile sollen wenn möglich vermieden werden.

Der Mischprozess selbst und die Vorgangsweise werden in Anlehnung an die Arbeit „Einfluss der Trockenmischdauer auf die rheologischen Eigenschaften von UHPC“, welche durch *Daniela Santi* am *Institut für Hochbau und Technologie - Zentrum für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit* entstand, festgelegt. Dies ermöglicht, falls später nötig, einen Zusammenhang zwischen den jeweiligen Versuchsergebnissen herzustellen.

Nachfolgend wird zunächst auf die Zusammensetzung der UHPC-Mischungen und der Herstellung der Prämixe mit unterschiedlichen Trockenmischdauern eingegangen. Anschließend wird in 3.4 der generelle Versuchsablauf erläutert.

3.2 Zusammensetzung der UHPC-Mischungen

Da es nicht Gegenstand der Arbeit ist unterschiedliche Zusammensetzungen und Typen der Komponenten zu untersuchen, sondern die trockenen Ausgangsstoffe unterschiedlich lange zu homogenisieren, wird von einem bewehrten Rezept für UHPC ausgegangen.

3.2.1 Zement

Als Zement wird ein CEM I 52,5 N SR WT 38 C3A-frei der Fa. *Lafarge* verwendet. Diese Zementart verbindet die hervorragende Widerstandsfähigkeit von C₃A-freien Zementen mit dem Erhärtungsverhalten eines frühhochfesten Portlandzements. Trotz der schnellen Erhärtung zeichnet sich dieser Zement durch eine geringe Wärmeentwicklung, eine gute Verarbeitbarkeit, einen geringen Wasserbedarf und eine ausgezeichnete Nacherhärtung

aus [51]. Die Tabelle 3.1 zeigt eine Auswahl an technischen Eigenschaften des CEM I 52,5 N SR WT 38 C3A-frei.

Tabelle 3.1: Eigenschaften des CEM I 52,5 N SR WT 38 C3A-frei der Fa. *Lafarge* [51]

Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung	Richtwerte	Normanforderungen	
		ON EN 197-1	ON B 3327-1
Dichte in kg/dm ³	3,13	-	-
Druckfestigkeit (bei 20° C) in MPa (=N/mm ²)			
1 Tag	20	-	≥ 11
2 Tage	32	≥ 20	-
7 Tage	-	-	-
28 Tage	60	≥ 52,5	-
Biegezugfestigkeit (bei 20° C) 28 Tage in MPa	-	-	-
Mahlfeinheit (Blainewert) in cm ² /g	4.500	-	≤ 5% Schwankung
Erstarrungsbeginn (bei 20° C) in min	140	≥ 45	≥ 90
Bluten in cm ³ nach 120 min	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

3.2.2 Gesteinskörnung

Für die Betonrezeptur wird als Gesteinskörnung „Haltern Quarzsand H32“ der Fa. *Quarzwerke Österreich* verwendet. Der Rohsand, der unter dem Grundwasserspiegel ansteht wird mit Saugbaggern gewonnen und anschließend entschlammte, hydroklassiert und getrocknet. Der Haltern Quarzsand zeichnet sich durch eine hohe chemische Reinheit aus, sein SiO₂-Gehalt liegt über 99 %. Der Quarzsand H32 besitzt eine mittlere Korngröße von 0,32 mm und eine theoretische spezifische Oberfläche von 74 cm²/g [52]. In Tabelle 3.2 ist die Korngrößenverteilung des Haltern Quarzsand H32 dargestellt.

Tabelle 3.2: Korngrößenverteilung des Quarzsand H32 der Fa. *Quarzwerke Österreich* [52]

Kornklasse [mm]	Mengenanteil [M-%]
> 0,500	2
0,355 – 0,500	27
0,250 – 0,355	55
0,180 – 0,250	14
0,125 – 0,180	2
0,090 – 0,125	-
< 0,090	-

3.2.3 Zusatzstoffe

Als reaktiver Zusatzstoff wird „Microsilica Grade 940-U“ der Fa. *Elkem* beigegeben. Zusätzlich wird als inerter Zusatzstoff Quarzmehl 10000 der Fa. *Quarzwerte Österreich* verwendet. Das Microsilica Grade 940-U ist ein Pulver aus ultrafeinen, amorphen Kugeln aus Siliciumdioxid (Abbildung 3.1). Der Durchmesser einer Mikrosiliciumkugel beträgt in etwa $0,15\ \mu\text{m}$. Da diese teilweise in Agglomeraten vorliegen ergibt sich eine breite Partikelgrößenverteilung, die zu einer hohen Packungseffizienz führt. Die Rohdichte beläuft sich auf ungefähr $2,3\ \text{kg}/\text{dm}^3$ und die spezifische Oberfläche variiert zwischen 150.000 und $300.000\ \text{cm}^2/\text{g}$ [53].

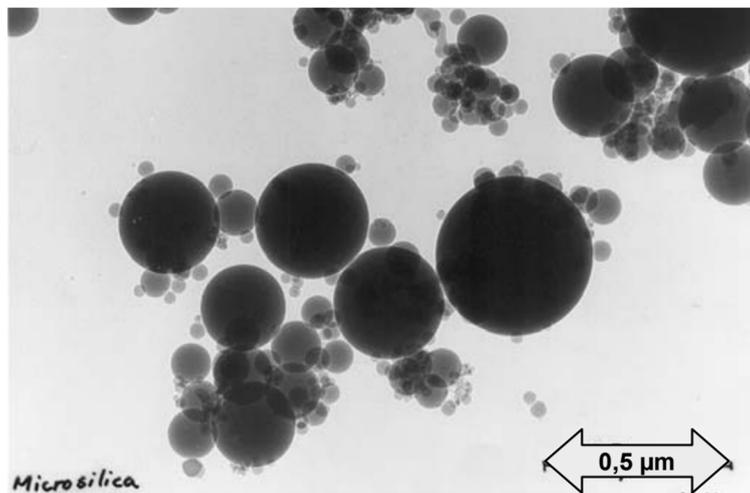


Abbildung 3.1: Microsilikapartikel der Fa. *Elkem*, aufgenommen mit einem Transmissionselektronenmikroskop [54]

Das beigegebene Quarzmehl 10000 besitzt eine Rohdichte von $2,65\ \text{kg}/\text{dm}^3$. Bei diesem Quarzmehl handelt es sich um ein besonders fein gemahlene Produkt. Der Durchmesser der Partikel beträgt maximal $70\ \mu\text{m}$ [55].

3.2.4 Zusatzmittel

Um eine gute Verarbeitbarkeit bei einem geringem W/B-Wert zu gewährleisten, wird dem Beton das Fließmittel „MasterGlenium ACE 430“ der Fa. *BASF Performance Products GmbH* beigegeben. Dieses ist ein Fließmittel auf Basis eines Polycarboxylatethers (PCE) und sorgt somit durch eine sterische sowie eine elektrostatische Dispergierung für ein Verflüssigen des Frischbetons (siehe 2.1.2.5). Durch die Molekülstruktur des PCEs ergibt sich außerdem eine

frühere Hydrationsreaktion. Daraus resultiert eine deutlich raschere Frühfestigkeitsentwicklung des Betons [56].

Neben dem Fließmittel wird der Konsistenzhalter „MasterSure 911“ der Fa. *BASF Performance Products GmbH* beigemischt. Der Konsistenzhalter basiert ebenfalls auf PCE und trägt nur sehr gering zur Anfangsverflüssigung bei. Die Wirkung des Konsistenzhalters beginnt etwa 15-25 min nach Zugabe und hält bis deutlich über 90 min an [57].

Des Weiteren wird als Entlüfter der „MasterFinish DF 370“ (bisher: DCC-Entlüfter) der Fa. *BASF Performance Products GmbH* verwendet. Durch die spezielle Wirkung des Entlüfters wird die Tendenz, die im Frischbeton vorliegenden Lufteinschlüsse auszutreiben, stark erhöht [58].

In Tabelle 3.3 sind ausgewählte Eigenschaften der verwendeten Zusatzmittel aufgelistet:

Tabelle 3.3: Dichte und pH-Wert der verwendeten Zusatzmittel [56] [57] [58]

Zusatzmittel	Dichte (bei +20°C) [kg/dm ³]	pH-Wert [-]
MasterGlenium ACE 430	1,06	4,5-6,5
MasterSure 911	1,02-1,06	4,5-6,5
MasterFinish DF 370	1,04-1,08	5,0-7,0

3.2.5 Mischungsentwurf

Die Zusammensetzung des Betons für die Versuchsreihen ist in Tabelle 3.4 dargestellt. Dabei wurde ein Luftgehalt von 2,0 V.-% angenommen. Im Rahmen von Vorversuchen wurde das Betonrezept erprobt. Es stellte sich heraus, dass eine erhöhte Zugabe des Fließmittels erforderlich sein wird, um eine optimale Konsistenz des Frischbetons für nachfolgenden Versuche zu erreichen. So wird der Fließmittelgehalt, bezogen auf die Zementmenge, von 4,5 % auf 5,0 % erhöht. Für den zu untersuchenden Beton erhalten wir unter Berücksichtigung der erhöhten Fließmittelmenge einen W/B-Wert von etwa 0,24.

Tabelle 3.4: Mischungsentwurf für 1 m³ Beton

Bestandteil	Bezeichnung	Hersteller	Gewicht [kg]
Zement	CEM I 52,5 N	Lafarge	689,11
Quarzsand	H32	Quarzwerke	927,50
Mikrosilika	Grade 940-U	Elkem	172,28
Quarzmehl	QM 10000	Quarzwerke	344,56
Fließmittel (4,5%)	MasterGlenium ACE 430	BASF	31,01
Konsistenzhalter	MasterSure 911	BASF	13,78
Entlüfter	MasterFinish DF 370	BASF	1
Wasser			160,27
Summe			2339,51

In Abbildung 3.2 sind die einzelnen Bestandteile für eine Mischung mit einem Volumen von 40 dm³ beispielhaft dargestellt. Um eventuelle Messfehler zu eliminieren werden die flüssigen Bestandteile für die nachfolgenden Versuche zu einem Flüssigkeits-Prämix vermengt (siehe 3.4.1.2).



Abbildung 3.2: Bestandteile für eine Betonmischung von 40 dm³

3.3 Herstellung der Trockenmischungen

Ziel der Arbeit ist es die rheologischen Eigenschaften von Ultrahochfestem Beton mit jeweils unterschiedlichen Trockenmischdauern zu untersuchen. So werden vor der eigentlichen

Herstellung des Frischbetons unter Flüssigkeitszugabe die trockenen Komponenten (Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe) verschieden lange gemischt, um die unterschiedlichen Prämixe zu erhalten.

3.3.1 Mischertyp

Alle Trockenmischungen dieser Arbeit werden mit dem Intensivmischer R08W der Fa. *Eirich* hergestellt (Abbildung 3.3). Das Fassungsvermögen des Mischbehälters beträgt 75 Liter bzw. maximal 120 kg. Das Mischprinzip wurde in 2.2.5 detailliert erläutert.



Abbildung 3.3: Eirich-Intensivmischer R08W und dessen Steuereinheit

Das Gerät wird über den sich im Steuerungsschrank befindenden Touch-Screen vollautomatisch bedient. Die Drehzahl für das Mischwerkzeug kann von 38 bis 752 U/min (0,7 bis 13,8 m/s) eingestellt werden. Zudem kann die Drehrichtung auch umgekehrt werden. Beim *Gleichstrommischen* drehen sich Wirbler und Mischbehälter in dieselbe Richtung. Wohingegen beim *Querstrommischen* der Wirbler gegensinnig zum Mischbehälter dreht. Die Drehzahl des Mischbehälters wiederum kann zwischen 3 und maximal 55 U/min (0,1 bis 2,2 m/s) gewählt werden.

Für den Vorgang des Trockenmischens in dieser Arbeit wird eine Umdrehungsgeschwindigkeit des Wirblers von 7,9 m/s (428 U/min) im Gleichstrom eingestellt. Der Mischbehälter dreht mit einer Geschwindigkeit von 1,1 m/s (27 U/min).

3.3.2 Mischablauf

Es werden insgesamt neun Serien mit verschiedenen Mischdauern hergestellt (Tabelle 3.5). Dabei beträgt die kürzeste Mischzeit 90 Sekunden und die längste 8 Stunden. Da mit zunehmender Mischzeit die Temperatur des Mischguts und des Mixers zunimmt, wird die Mischdauer für die Serien mit einer Mischzeit länger als 120 min in einzelne Mischdauerabschnitte unterteilt. Damit das Mischgut und der Mixer ausreichend abkühlen können, erfolgt zwischen diesen einzelnen Abschnitten eine Pause von mindestens 120 min.

Tabelle 3.5: Serien der Trockenmischdauer

Serie	Trockenmischdauer [min]	Mischerdauerabschnitte [min]	Mischungsbezeichnung
1	1,5	1,5	M1,5min
2	3	3	M3min
3	7	7	M7min
4	15	15	M15min
5	30	30	M30min
6	60	60	M60min
7	120	120	M120min
8	240	2 mal 120	M240min
9	480	2 mal 240	M480min

Es werden jeweils 40 Liter bzw. 85,34 kg Trockenmischgut pro Serie hergestellt. Diese hohe Menge ergibt sich daraus, dass parallel zu dieser Arbeit *Simon Sacherl* und *Lorenz Sarsteiner* in ihren Arbeiten ebenfalls Versuche mit UHPC durchführen und die Mischungen verwenden.

3.4 Versuchsablauf

Nachdem die einzelnen Prämixe mit jeweils unterschiedlichen Trockenmischdauern hergestellt wurden, erfolgt das Nassmischen und daraufhin die Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften. Damit der Hydrationsprozess noch nicht eintritt, ist darauf zu achten, die Frischbetonprüfungen nach dem Nassmischen in einem möglichst kurzen Zeitrahmen durchzuführen.

Da zusätzlich aufgezeigt werden soll inwiefern sich die Frischbetoneigenschaften abhängig vom Alter des Prämix verhalten, wird jede Mischung in drei unterschiedlichen Altersstufen

untersucht. Die ersten Versuche erfolgen in einem Alter von bis zu 48 Stunden, die zweiten in einem Alter von 4 Wochen und die letzten in einem Alter von 9 Wochen. Die Lagerung des Prämix erfolgt dabei bei Raumtemperatur in verschließbaren Plastikkübeln.

3.4.1 Herstellung des Frischbetons

Nach der Herstellung des Trockengemisches erfolgt die Herstellung des Frischbetons durch Zugabe von Wasser, Fließmittel und Entschäumer. Es wird nachfolgend auf den verwendeten Mischertyp eingegangen und anschließend der Mischvorgang im Detail erläutert.

3.4.1.1 Mischertyp

Alle UHPC-Mischungen werden mit dem Intensivmischer R02 der Fa. *Eirich* homogenisiert (Abbildung 3.4). Das Fassungsvermögen beträgt maximal 5 Liter bzw. maximal 8 kg. Das Mischprinzip ist dasselbe wie beim Intensivmischer R08W (siehe 2.2.5). Diese Ausführung des Mixers besitzt keine automatische Steuerung, so dass alle Funktionen manuell bedient werden müssen. Über einen Frequenzumrichter kann die Drehzahl für das Mischwerkzeug von 70 bis 4535 U/min eingestellt werden. Die Drehzahl des Mischbehälters wiederum kann auf Stufe 1 (42 U/min) oder Stufe 2 (83 U/min) gestellt werden.



Abbildung 3.4: Eirich-Intensivmischer R02 (rechts) mit Vakuumanlage (links)

Wie in Abbildung 3.4 erkennbar, ist bei diesem Intensivmischer zusätzlich eine Vakuumpumpe angeschlossen. Dabei handelt es sich um eine Vakuumpumpe Typ PL 26 M.A.M 15 0.0 A der Fa. *Sterling*. Bei den Mischvorgängen dieser Arbeit wird jedoch auf ein Mischen unter Vakuum verzichtet.

Es wird für alle Mischvorgänge ein Stiftenwirbler als Mischwerkzeug verwendet. Dieser rotiert mit einer Drehzahl von 1200 U/min im Gleichstrom. Das ergibt bei einem Werkzeugdurchmesser von 125 mm eine Umfangsgeschwindigkeit von circa 7,9 m/s. Der Mischbehälter wird auf eine Drehzahl von 42 U/min (Stufe 1) eingestellt.

3.4.1.2 Mischablauf

Zur Herstellung des Frischbetons wird zunächst ein Gemisch aus Wasser, Fließmittel und Entschäumer vorbereitet. Da dieses Gemisch für die Herstellung aller Serien verwendet wird, können somit Fehler durch abweichende Mischrezepturen eliminiert werden. Es werden nach den vorgegebenen Mischungsverhältnissen (siehe 3.2.5) circa 16,5 Liter Flüssigkeits-Prämix hergestellt (Tabelle 3.6).

Tabelle 3.6: Zusammensetzung des Flüssigkeits-Prämix

Bestandteil	Bezeichnung	Hersteller	Gewicht [g]	Volumen [dm ³]
Wasser			12822	12,822
Fließmittel	MasterGlenium ACE 430	BASF	2756	2,341
Konsistenzhalter	MasterSure 911	BASF	1103	1,061
Entlüfter	MasterFinish DF 370	BASF	8	0,076
Summe				16,56

Für jede Serie wird nun der Prämix mit dem benötigten Flüssigkeits-Prämixanteil für 3,2 Liter Frischbetonmischung eingewogen. Vor der Zugabe der Flüssigkeit wird das Trockengemisch zunächst nochmal für 30 Sekunden aufgemischt. Dann wird das Flüssigkeitsgemisch konstant innerhalb von 30 Sekunden dem Trockenanteil zugegeben. Abschließend erfolgt eine zweiminütige Homogenisierung (Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7: Mischablauf zur Herstellung von UHPC

Vorgang	Drehzahl [U/min]		Dauer [s]
	Behälter	Mischwerkzeug	
Aufmischen Prämix	1200	42	30
Zugabe Flüssigkeits-Prämix	1200	42	30
Homogenisieren	1200	42	120

Zudem wird jeweils die Temperatur im Intensivmischer zu Mischende festgehalten. Ziel ist es dadurch Informationen über den Grad der Homogenisierung zu bekommen. Mit zunehmender Homogenisierung nimmt die Temperatur im Mischer ab, da durch eine bessere Homogenisierung die Verzahnung zwischen den reibenden Gesteinskörnungen abnimmt und somit die nötige Leistung des Mixers sinkt. Zusätzlich kommt es zu einer Reduktion der Wärme aufgrund geringerer Reibung.

Des Weiteren wird die Leistung des Intensivmischers während des Nassmischens direkt mittels eines angeschlossenen Computers und entsprechender Verkabelung festgehalten. Die Leistungsaufnahme erfolgt durch Messung von Strom und Spannung. Die während des Mischvorgangs eingebrachte elektrische Antriebsleistung des Mixers wird erfasst und aufgezeichnet. So lassen sich zusätzlich Aussagen über die Mischgüte treffen. Man erhält Erkenntnisse darüber, ob die Mischungszusammensetzung die Stabilisationszeit t_s erreicht hat und somit bestmögliche Fließeigenschaften vorliegen (siehe 2.2.4).

Zur Ermittlung der Stabilisationszeit t_s wird analog zu der Auswertung von *Mazanec* vorgegangen (siehe 2.2.4, Abbildung 2.14) [3]. Die Stabilisationszeit gibt die Zeit an, bei der sich die Leistungskurve des Mixers nach Erreichen der maximalen Antriebsleistung der Asymptote annähert. Im ersten Schritt wird die Nettoleistung P berechnet, indem man von der aufgezeichneten Leistungskurve die Leerlaufleistung des Mixers subtrahiert. Dann wird die Nettoleistung P auf die maximale Nettoleistung P_{max} normiert. Da die Aufzeichnung der Leistung in einem Intervall von einer halben Sekunde erfolgte und sich somit Schwankungen in der Messkurve ergeben, wird zur Berechnung von t_s die aufgezeichnete Leistungskurve mit Funktionen approximiert (Abbildung 3.5). Zwischen dem Mischzeitpunkt der Flüssigkeitszugabe t_0 bis zum Erreichen der maximalen Leistung zum Zeitpunkt t_{max} erfolgt dies durch eine lineare Approximation. Der darauffolgende Bereich wird mit einer abnehmenden Exponentialfunktion angenähert (Formel [3-1]).

$$\frac{P}{P_{max}} = P_0 + P_1 e^{-\frac{t-t_{max}}{t_1}} + P_2 e^{-\frac{t-t_{max}}{t_2}} \quad [3-1]$$

P_0, P_1, P_2 ...anzupassende Leistungsparameter

t_1, t_2 ...anzupassende Zeitparameter

Die Stabilisationszeit ist als die Zeit definiert, die benötigt wird bis die Kurvensteigung $\varepsilon = d(P/P_{\max}) / dt$ ein Kriterium von $\varepsilon(t_s) = -4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ erreicht. Sie lässt sich somit durch die erste Ableitung der Formel [3-1] berechnen.

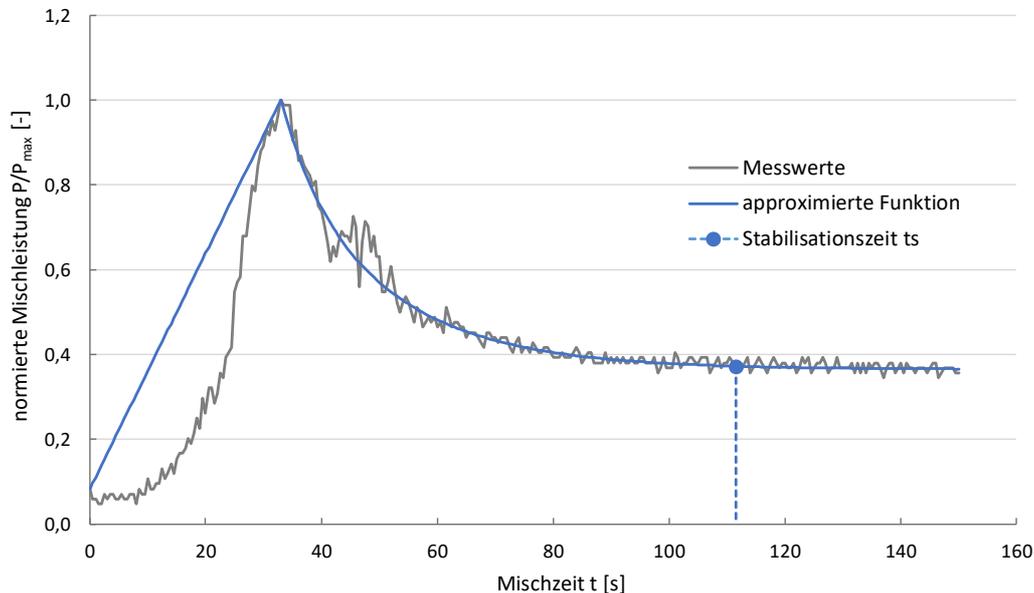


Abbildung 3.5: Bestimmung der Stabilisationszeit t_s aus der normierten Mischleistung P/P_{\max}

Zusätzlich wurde der Mittelwert der Nettoleistung P bis 5 Sekunden nach Erreichen der Stabilisationszeit ermittelt. Ziel ist es, weitere Aussagen der Viskosität der einzelnen Mischungen zu erhalten.

3.4.2 Frischbetonprüfungen

Die Eigenschaften des Frischbetons werden durch dessen Verarbeitbarkeit und Konsistenz beschrieben. Unter der Verarbeitbarkeit versteht man die rheologischen Eigenschaften des Betons, wie Fließgrenze und Viskosität. Ebenso wird sie durch die Konsistenz selbst bestimmt. Die Konsistenz beschreibt die Steife des Frischbetons und hängt vom Wassergehalt, Zementgehalt, der Kornzusammensetzung und der Kornform sowie wie von der Art und Menge der Zusatzmittel ab [59].

Weitere Aussagen lassen sich durch die Bestimmung des Luftgehalts im Frischbeton treffen. Wesentlich für die Homogenität des Betons ist ein geringer Luftgehalt. Selbst vollständig verdichteter Beton enthält stets einen geringen Anteil an Luft [2].

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgen folgende Frischbetonprüfungen:

- Bestimmung von Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie im Rheometer
- Messen des Ausbreitfließmaßes mittels Setztrichter
- Bestimmung der Trichterauslaufzeit mittels V-Trichter
- Ermittlung des Luftgehalts sowie der Frischbetonrohddichte mittels Luftporentopf

Alle folgenden Angaben des Frischbetonalters beziehen sich auf den Zeitpunkt nach der Flüssigkeitszugabe.

3.4.2.1 Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie

Die statische und dynamische Fließgrenze, die plastische Viskosität sowie die Thixotropie werden mittels Doppelringspalt-Messzelle im Rheometer ermittelt.

Rheometer mit Doppelringspalt-Messzelle

Das Prinzip eines Rotationsrheometers beruht darauf, dass ein Messkörper in die Probe eingetaucht wird und mit einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit gedreht wird. Aus den am Gerät messbaren Größen, Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit über die Zeit, lassen sich bei definierten Verhältnissen rheologische Größen ermitteln [45].

In dieser Arbeit wurde zur Untersuchung der Frischbetoneigenschaften mit dem Rotationsrheometer *Viskomat NT* der Fa. *Schleibinger Geräte* gearbeitet (Abbildung 3.6). Dabei handelt es sich um ein Universalviskosimeter zur Bestimmung der rheologischen Größen von Suspensionen wie Zementleim, Zementmörtel, Betonmörtel und Ähnlichem, bis zu einer Korngröße von zwei Millimetern. Das Prinzip besteht darin, dass zunächst der Messkopf mit einem entsprechenden Scherkörper automatisch in den Messtopf mit dem Prüfgut fährt. Dann rotiert der Messtopf, welcher auf einem Aluminiumsockel mit Synchronantrieb befestigt ist, mit den vorab eingestellten Umdrehungsgeschwindigkeiten. Das Drehmoment wird elektronisch gemessen. Die Temperierung erfolgt über einen externen Kryostaten [60] [61].



Abbildung 3.6: Rotationsrheometer Viskomat NT mit Steuerungseinheit

Die Elektronik befindet sich in einem separaten Gehäuse. Von dort wird das Gerät gesteuert und überwacht. Es kann eine Drehzahl von 0,001-400 U/min eingestellt werden, wobei ein Messbereich von -500 bis +500 Nmm möglich ist. Der separate PC bereitet die Messergebnisse (Zeit, Drehmoment, Geschwindigkeit) auf und speichert sie [60].

Für die folgenden Versuche wurde als Scherkörper die Korbzelle (Doppelringspalt-Messzelle) gewählt (Abbildung 3.7). Sie setzt sich aus einem inneren starren Messkörper und einem Ringspalt-Gefäß mit Überlauftasse zusammen. Damit das Ringspalt-Gefäß während der Messung mittels Wasser aus dem Kryostat auf 20 °C temperiert werden kann, wird es während der Versuche wiederum in einen größeren Messtopf eingesetzt.

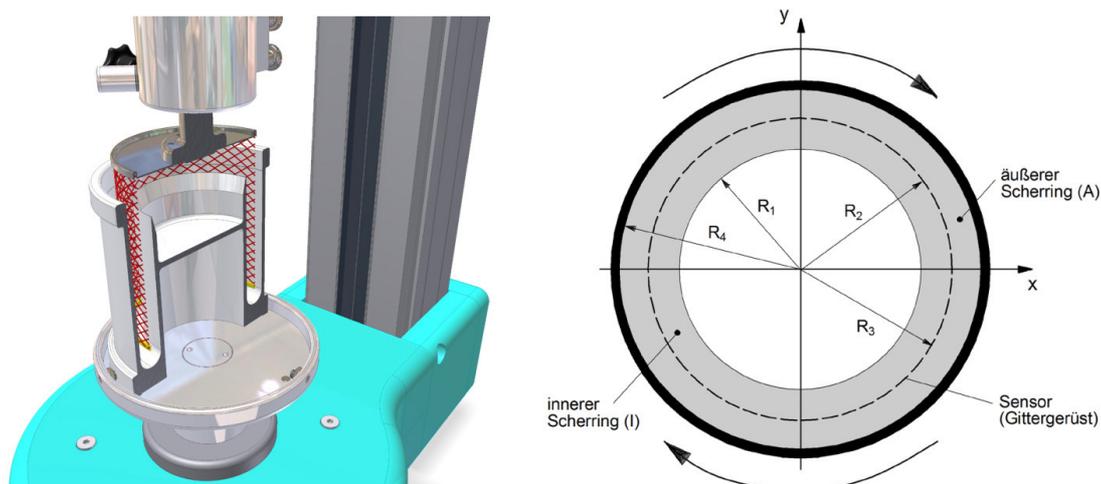


Abbildung 3.7: Doppelringspalt-Messzelle im Viskomat NT (links) und Querschnitt (rechts) [3]

Die Messzelle selbst besteht aus einem filigranen Gitter. Sie ermöglicht im Gegensatz zu anderen Scherkörpern aufgrund ihrer definierten Geometrie eine absolute Bestimmung der

rheologischen Größen. Sie wurde von *Vogel* [62], mit dem Ziel ein definiertes Scherfeld zu erhalten, entwickelt. Es wird annähernd eine Fluid-in-Fluid-Scherung realisiert. Das heißt es wird der bei Suspensionen kritische Adhäsionsverbund zwischen Suspension und Oberfläche der Messzelle durch einen Kohäsionsverbund ersetzt, wodurch ein Wandgleiten vermieden wird. Somit können aufgebrauchte Beanspruchungen physikalisch definiert werden und daraus geräteunabhängige Messgrößen ermittelt werden [63].

Das Fließfeld ergibt sich aus den Hauptabmessungen der Messzelle. Die Scherrate $\dot{\gamma}$ lässt sich somit folgendermaßen berechnen [62]:

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

Ω ...Winkelgeschwindigkeit

R_1, R_2, R_3, R_4 ...Radien des inneren und äußeren Scherrings (siehe Abbildung 3.7)

Für die verwendete Korbzelle mit dem Durchmesser $D = 71,2$ mm und der Probenhöhe $L = 64,8$ mm lässt sich die Scherrate $\dot{\gamma}$ vereinfachend mit dem Umrechnungsfaktor c_s von 0,584 ermitteln, wobei N die Umdrehungsgeschwindigkeit des Messgefäßes in [U/min] ist [3]:

$$\dot{\gamma} = c_s \cdot N \quad [s^{-1}] \quad [3-3]$$

Die Scherspannung τ wiederum lässt sich vereinfacht durch die Multiplikation des Widerstandsdrehmomentes T mit dem Kalibrierungsfaktor c_K berechnen [3]:

$$\tau = \frac{T}{(L \cdot \pi \cdot D^2)} \cdot \frac{1}{c_K} \approx c_K \cdot T \quad \text{mit } c_K = 0,967 \quad [3-4]$$

τ ...Scherspannung [Pa]

T ...Widerstandsdrehmoment [Nmm]

L ...Durchmesser Korbzelle [mm]

D ...Probenhöhe [mm]

Versuchsablauf

Nach dem Nassmischen wird der Frischbeton direkt in das Ringspalt-Gefäß eingefüllt und zum Rheometer ins Labor im darüberliegenden Stock transportiert. Unmittelbar danach wird der Viskomat gestartet. Die Korbzelle fährt automatisch in die Probe und die rheologische Messung beginnt im Frischbetonalter von etwa 3,5 min.

Das Scherratenprofil wird in Anlehnung an die Arbeit von *Mazanec* [3] ausgewählt. Es werden zwei Scherratenprofile direkt aufeinander folgend eingestellt.

Zunächst wird zur Ermittlung der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} und der plastischen Viskosität η , sowie deren zeitlichen Entwicklung, das in Abbildung 3.8 dargestellte Scherratenprofil 1 benutzt.

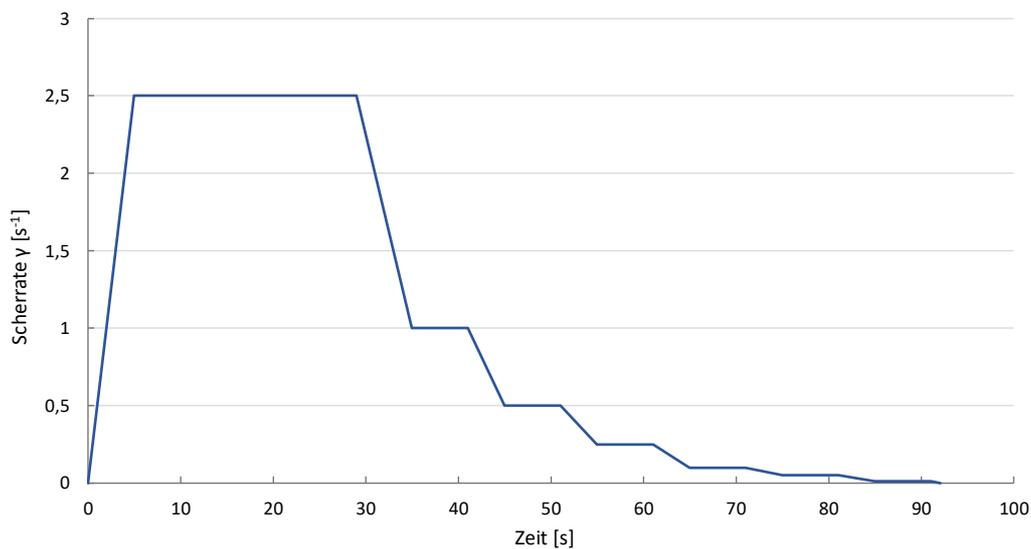


Abbildung 3.8: Scherratenprofil 1

Zum Abbau der Ruhestruktur wird die Probe vorerst für 24 Sekunden mit einer Scherrate von $\dot{\gamma} = 2,5 s^{-1}$ vorgeschert. Bereits gebildete Strukturen der Hydratation werden so wieder aufgebrochen. Dann erfolgt die Bestimmung der plastischen Viskosität geschwindigkeitsgesteuert in Stufen von $\dot{\gamma} = 2,5; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1$ und $0,05 s^{-1}$ für jeweils 6 Sekunden. Zur Eingabe der Stufen in den Viskomaten NT werden mittels der Formel [3-3] zusätzlich die Umdrehungen pro Minute pro Stufe berechnet. Das Scherprofil 1 ist nochmals in der Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Tabelle 3.8: Scherratenprofil 1

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

Die Versuchsauswertung erfolgt in Anlehnung an die Arbeit von *Mazanec* [3]. Nach Durchführung des Versuchs erhält man die Messrohdaten T und N. Mit den Formeln [3-3] und [3-4] lassen sich diese Messwerte in die geräteunabhängigen Parameter Scherspannung τ und Scherrate $\dot{\gamma}$ umrechnen. Daraus ergibt sich, exemplarisch für eine repräsentative UHPC-Probe, der in Abbildung 3.9 links dargestellte Messablauf. Nun ermittelt man die Mittelwerte der einzelnen Plateaus der Scherstufen 2,5 bis 0,01 s^{-1} . Da bei der ersten Stufe, der Scherrate von 2,5 s^{-1} , die vorderen Werte aus dem Strukturabbau des Vorscherens resultieren, wird der Mittelwert lediglich über die letzten 1,5 Sekunden des Plateaus gebildet. Trägt man dann die Mittelwerte der Scherspannung τ gegenüber der Scherrate $\dot{\gamma}$ auf, so erhält man im Bereich von 2,5 bis 0,25 s^{-1} einen linearen Verlauf. Unter Annahme des bekannten Bingham-Modells $\tau = \tau_0 + \dot{\gamma} \cdot \eta$ (siehe 2.3.5) lassen sich die dynamische Fließgrenze τ_{0D} und die plastische Viskosität η bestimmen.

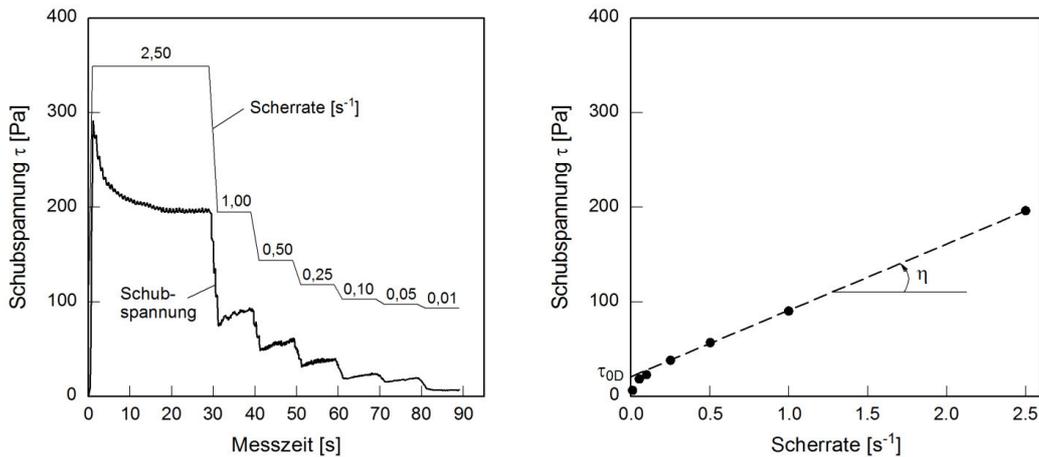


Abbildung 3.9: Exemplarische Darstellung der aufgezeichneten Scherspannung τ für eine UHPC-Probe (links) und dessen Fließkurve (rechts) [3]

Darauffolgend wird zur Ermittlung der statischen Fließgrenze τ_0 und erneut der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} (siehe 2.3.3.2, Zeitunabhängiges Fließverhalten), sowie deren zeitlichen Entwicklung, das in Abbildung 3.10 dargestellte Scherratenprofil 2 benutzt. Mittels statischer und dynamischer Fließgrenze lässt sich außerdem die Thixotropie A_{thix} ermitteln. Sie ergibt sich durch die erste Ableitung der statischen Fließgrenze über die Ruhezeit t_p [3]:

$$A_{thix} = (\tau_0 - \tau_{0D})/t_p \quad [3-5]$$

Die Thixotropie gibt Aufschluss darüber, wie schnell sich der Beton nach dem Mischvorgang wieder regeneriert bzw. verfestigt und bestimmt somit den zeitlichen Verlauf der Viskosität (siehe 2.3.3.2, Zeitabhängiges Fließverhalten) [47].

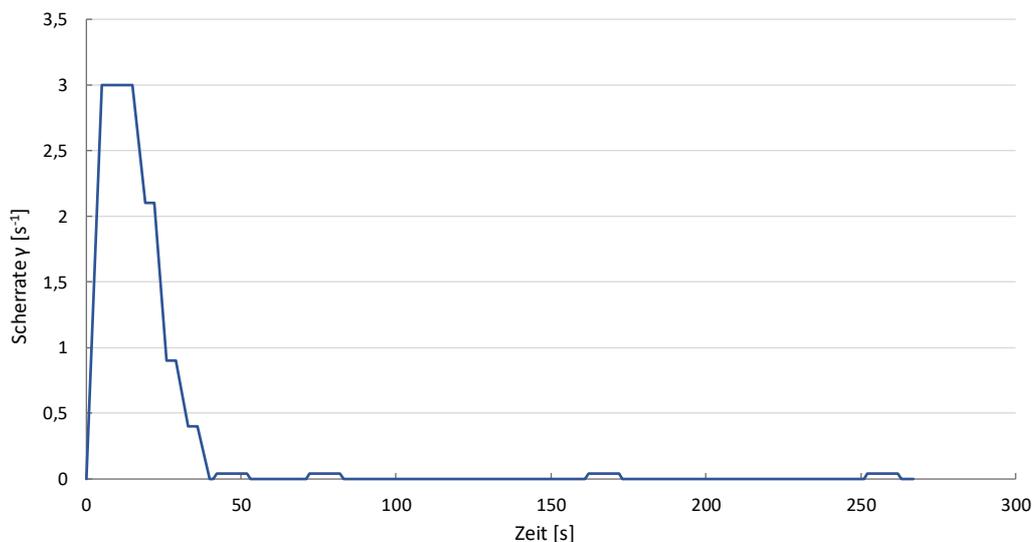


Abbildung 3.10: Scherratenprofil 2

Zur Ermittlung von τ_0 und τ_{0D} wird der UHPC im Messtopf zunächst erneut für eine Dauer von 10 s bei einer Scherrate $\dot{\gamma}$ von $3,0 \text{ s}^{-1}$ vorgeschert. Dann erfolgt die Bestimmung der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} in Stufen von $\dot{\gamma} = 2,1; 0,9$ und $0,4 \text{ s}^{-1}$ für jeweils 3 s. Die Messzeit wird so kurz gewählt, damit ein Strukturaufbau während der Messung vermieden wird. Anschließend wird zur Ermittlung des Strukturaufbaus die maximale Widerstandskraft, die benötigt wird um die Messzelle durch den UHPC zu bewegen, bestimmt. Die Messung erfolgt bei einer Scherrate von $\dot{\gamma} = 0,04 \text{ s}^{-1}$ in regelmäßigen Abständen von 30, 120 und 210 s, für jeweils 10 s. Die Scherrate wird niedrig gehalten, damit die gemessene Widerstandskraft vorwiegend aus der Fließgrenze des UHPC resultiert [47]. Das Scherprofil 2 ist nochmals in der Tabelle 3.9 zusammengefasst.

Tabelle 3.9: Scherratenprofil 2

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

251	0	0
252	0,04	0,068
262	0,04	0,068
263	0	0
267	0	0

Analog zu der Auswertung des Scherratenprofils 1, erhält man nach der Messung die Messrohdaten T und N, welche sich mit den Formeln [3-3] und [3-4] in die geräteunabhängigen Parameter Scherspannung und Scherrate umrechnen lassen. In Abbildung 3.11 ist exemplarisch der daraus ermittelte Messverlauf für eine UHPC-Probe aus den Vorversuchen dargestellt.

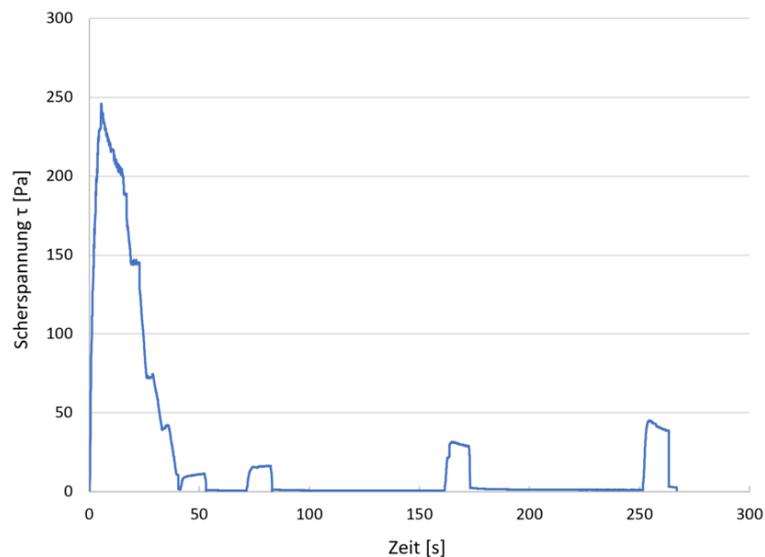


Abbildung 3.11: Aufgezeichnete Scherspannung τ für eine UHPC-Probe

Die Bestimmung der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} kann dann sinngemäß wie für das Scherratenprofil 1 unter Annahme des Bingham-Gesetzes für den Scherratenbereich von $3,0$ bis $0,4 \text{ s}^{-1}$ erfolgen (Abbildung 3.12). Da bei der ersten Stufe, der Scherrate von $3,0 \text{ s}^{-1}$, die früheren Werte erneut aus dem Abbau der Struktur resultieren, wird der Mittelwert lediglich über die letzten $0,5$ Sekunden des Plateaus gebildet.

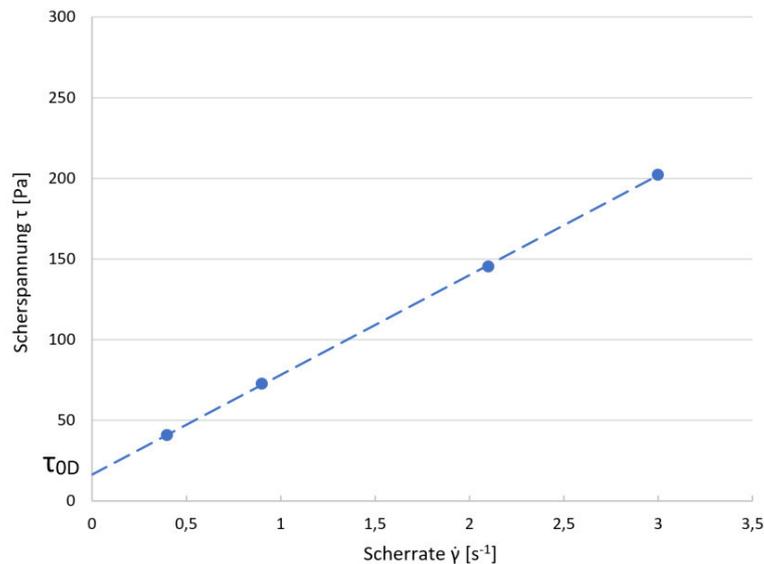


Abbildung 3.12: Bestimmung der dynamischen Fließgrenze

In der Abbildung 3.13 ist die Ermittlung der Thixotropie dargestellt. Wie bereits beschrieben, lässt sich diese mit der ersten Ableitung der statischen Fließgrenze $\tau_{0(t)}$ über die Zeit berechnen (Formel [3-6]). Sie ergibt sich also, indem man die Steigung der linearen Funktion, für die zuvor ermittelte dynamische Fließgrenze und der statischen Fließgrenzen zu den Zeitpunkten 30, 120 und 210 s, berechnet.

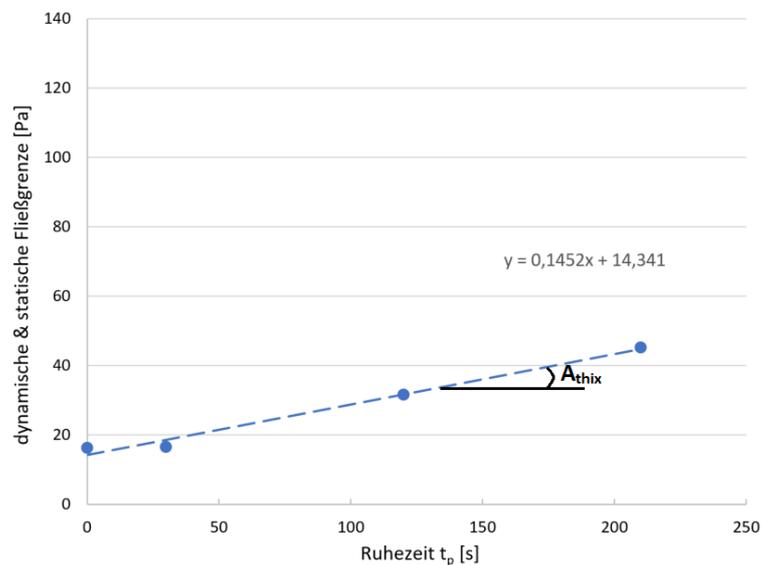


Abbildung 3.13: Bestimmung der Thixotropie A_{thix}

3.4.2.2 Ausbreitfließmaß

Zur Erfassung wesentlicher Kenngrößen der Konsistenz und somit auch für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons erfolgt parallel zu den Untersuchungen im Rheometer die

Ermittlung des Ausbreitfließmaßes mittels Setztrichter (Abbildung 3.14). Das Ausbreitfließmaß bzw. Setzfließmaß beschreibt die dynamische Fließgrenze τ_{0D} einer Mischung [64].



Abbildung 3.14: Setztrichter zur Bestimmung des Ausbreitfließmaßes

Die Bestimmung des Ausbreitfließmaßes erfolgt, wie in Abbildung 3.14 dargestellt, auf der Edelstahloberfläche eines Labortisches. Dazu wird der Setztrichter mittig auf die saubere, trockene und waagrechte Platte gestellt. Danach wird der Trichter mit dem Beton gleichmäßig befüllt. Nachdem der überstehende Beton plan abgestrichen wurde, wird der Trichter senkrecht abgezogen. Zu diesem Zeitpunkt ist der Frischbeton etwa 3 Minuten alt. Nach einer Zeit von etwa 2 Minuten wird der Durchmesser des Kuchens in zwei zueinander senkrechten Richtungen gemessen, der Mittelwert dieser Messungen ergibt das Ausbreitfließmaß.

3.4.2.3 Trichterauslaufzeit

Um weitere rheologische Aussagen zu erhalten wird noch ein Trichterauslaufzeit-Versuch durchgeführt. Dieser erfolgt in einem Betonalter von etwa 4,5 Minuten. Die Trichterauslaufzeit ist ein Maß für die Viskosität η des Betons [64].

Zur Ermittlung der Trichterauslaufzeit wird die Zeit gemessen, die der Beton benötigt, um in einem zusammenhängenden Strahl aus dem V-Trichter auszulaufen. Dazu wird der in Abbildung 3.15 dargestellte Trichter gefüllt und plan abgestrichen. Dann wird die Verschlussöffnung am Trichterende gelöst und die Zeit gestoppt bis man nach Auslaufen des Betons von oben durch den Trichter hindurchsehen kann.



Abbildung 3.15: V-Trichter

3.4.2.4 Luftgehalt und Frischbetondichte

Im Anschluss an die Untersuchungen des Ausbreitfließmaßes und der Trichterauslaufzeit wird ein Teil des Frischbetons zur Ermittlung des Luftgehalts und der Rohdichte verwendet. Die Bestimmung dieser beiden Frischbetoneigenschaften erfolgt mit dem Luftporentopf (Abbildung 3.16).

Ermittlung des Luftgehalts

Der Luftgehalt des Frischbetons wird mittels Druckausgleichverfahren ermittelt. Hierfür wird zwischen dem Beton und einem mit Druckluft gefüllten Behälter Druckausgleich hergestellt und der durch den Luftgehalt des Frischbetons bedingte Druckabfall wird auf einem Manometer als prozentualer Luftgehalt abgelesen [28]. Der Luftgehalt ermöglicht Aussagen über die Verdichtbarkeit und die daraus zu erwartenden Eigenschaften des Festbetons (siehe 2.1.4.2) [16].



Abbildung 3.16: Luftporentopf zur Bestimmung des Luftgehalts des Frischbetons

Der leere und saubere Luftporentopf mit einem Volumen von 1 Liter wird zunächst angefeuchtet und daraufhin mit dem Frischbeton befüllt. Der Beton wird durch Klopfen an die Behälterwand verdichtet und dann plan abgestrichen. Der Gefäßrand wird sorgfältig gesäubert und der Behälter mit dem Verschlussaggregat druckdicht verschlossen. Um den verbleibenden Hohlraum zu füllen, wird mit einer Spritzflasche Wasser durch eines der beiden Ventile gelassen, bis es beim anderen Ventil wieder austritt. Die beiden Ventile werden geschlossen und es wird mittels Pumpe Luft in die Luftkammer gepumpt bis der Zeiger des Manometers hinter der Eichmarkierung steht. Daraufhin wird Luft entlassen bis der Zeiger genau null anzeigt. Dann wird durch betätigen des Druckknopfventils und gleichzeitigem Klopfen an die Behälterwand Luft entlassen. Zu diesem Zeitpunkt ist der Frischbeton etwa 7,5 Minuten alt. Das Manometer zeigt nun den prozentuellen Luftgehalt des Frischbetons an.

Ermittlung der Frischbetonrohddichte

Die Bestimmung der Rohddichte erfolgt ebenfalls im Behälter des Frischbetons, unmittelbar vor dem Messen des Luftgehalts in einem Frischbetonalter von circa 6,5 Minuten. Dafür bestimmt man das Gewicht des mit Frischbeton gefüllten Luftporentopfes, um sich dann mit der Formel [3-6] die Rohddichte ρ_r errechnen zu können [16].

$$\rho_r = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [kg/m^3] \quad [3-6]$$

m₂ ...Masse des gefüllten Behälters [kg]

m₁ ...Masse des leeren Behälters [kg]

V ...Volumen des Behälters [m³]

4 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Frischbetonprüfungen dargestellt und ausgewertet. Dabei werden die drei Versuchsreihen, mit dem Alter von 48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen zunächst separat betrachtet und anschließend in Zusammenhang gebracht. Danach werden die Ergebnisse der einzelnen Frischbetonprüfungen untereinander verglichen und interpretiert.

4.1 Mischleistung und Mischtemperatur

Um bereits während des Mischvorgangs Aussagen über die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons zu erhalten, wurde jeweils die Mischtemperatur und die Mischleistung aufgenommen. Die Stabilisationszeit t_s erhält man dann, indem die Messergebnisse wie in 3.3.2 beschrieben ausgewertet werden. Für alle Mischungen der drei Versuchsreihen wurde die Stabilisationszeit erreicht, so dass bestmögliche Fließeigenschaften vorlagen. Zusätzlich wurde die Nettomischleistung P , kurz nach Erreichen der Stabilisationszeit, untersucht.

4.1.1 1. Versuchsreihe - Mischleistung und Mischtemperatur

In der Abbildung 4.1 sind die approximierten Kurven der normierten Mischleistung für die Mischungen M1,5min, M30min und M480min zu erkennen. Aus Gründen der besseren Übersicht, werden in dieser Grafik nur die Messverläufe von drei Mischungen dargestellt. Bei einer erhöhten Mischdauer der trockenen Ausgangsstoffe, zeigt sich ein früheres Erreichen der Stabilisationszeit t_s .

Es ist zu erkennen, dass die approximierten Kurven die in Kapitel 2.2.4 beschriebenen fünf Phasen der Mischdauer zeigen. Der Zeitpunkt 0 gibt den Zeitpunkt der Flüssigkeitszugabe an. Durch Ausbildung von Agglomeraten und Granulaten und daraufhin zur Vereinigung dieser Granulate steigt die Mischleistung bis zu einem Maximum linear an (Phase 1 und 2). Durch weitere Scherung kommt es zu einem Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension und die Mischleistungskurve nimmt exponentiell ab (Phase 3 und 4). Nach Erreichen von t_s ist eine Verbesserung der Fließfähigkeit nicht mehr möglich (Phase 5).

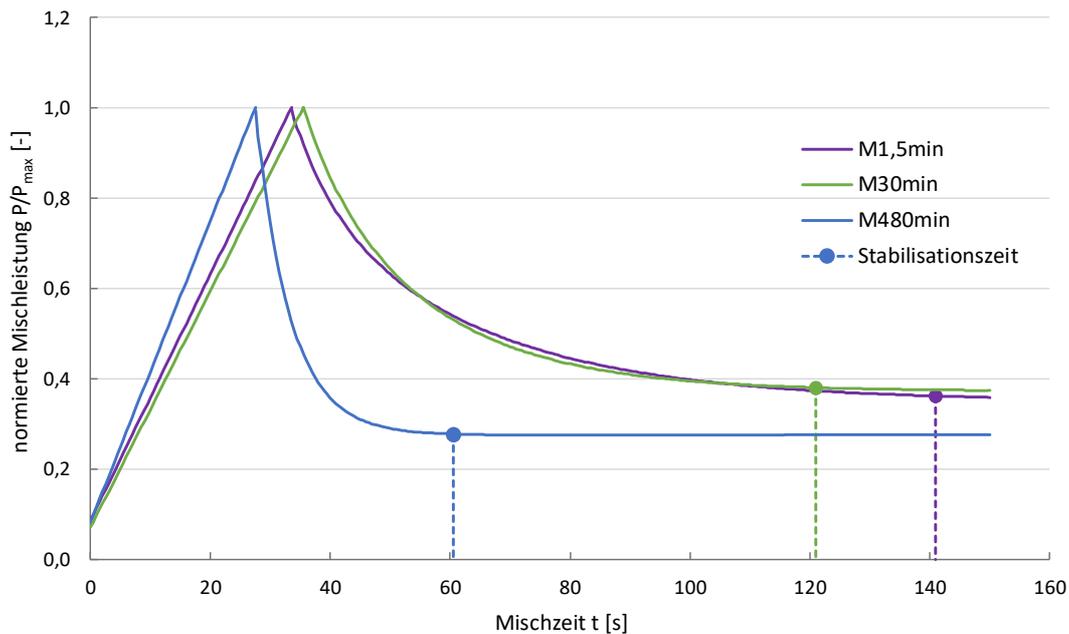


Abbildung 4.1: Approximierte Funktion der normierten Mischleistung P/P_{\max} der 1. Versuchsreihe

In der Abbildung 4.2 sind nun die Stabilisationszeiten t_s sowie die Nettogleistung P nach Erreichen von t_s für alle Mischungen der 1. Versuchsreihe dargestellt. Beide Kurven nehmen bei zunehmender Trockenmischdauer tendenziell ab. Für die Stabilisationszeit ergeben sich für die Mischungen M1,5min bis M15min nahezu dieselben Werte. Erst ab der Mischung M15min ist eine kontinuierliche Abnahme der Stabilisationszeit zu erkennen.

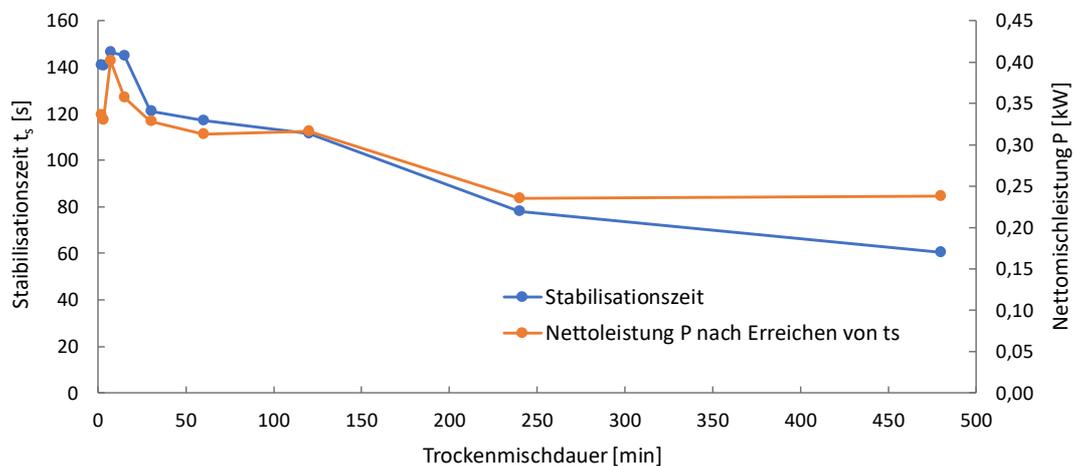


Abbildung 4.2: Stabilisationszeit und Nettogleistung P nach Erreichen von t_s über die Trockenmischdauer der 1. Versuchsreihe

Auffallend bei der Nettomischleistung P nach Erreichen von t_s ist, dass sich für die Mischungen M1,5min und M3min im Vergleich zur Mischung M7min und M15min relativ geringe Leistungen ergeben. Eine kontinuierliche Abnahme der Nettomischleistung erfolgt erst ab der Mischung M7min.

Betrachtet man die Mischendtemperaturen der einzelnen Mischungen, so zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie für die Stabilisationszeit und die Nettomischleistung. Die Temperatur nimmt tendenziell mit zunehmender Trockenmischdauer ab (Abbildung 4.3). Die höchsten Werte wurden bei den Mischungen M15min und M30min mit 35 °C erreicht. Bei der M480min wies die Endtemperatur im Mischer nur noch 30 °C auf.

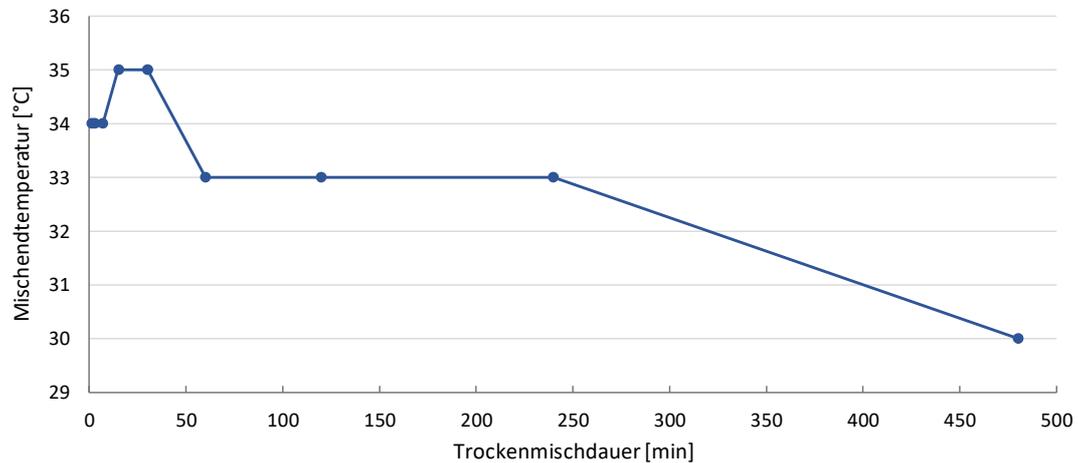


Abbildung 4.3: Mischendtemperatur der Mischungen der 1. Versuchsreihe

In der Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse der Stabilisationszeit, der Nettoleistung P nach Erreichen der Stabilisationszeit t_s und der Mischendtemperatur für die 1. Versuchsreihe nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Ergebnisse aus Mischleistung und Mischtemperatur für die 1. Versuchsreihe

Mischung	Stabilisationszeit t_s [s]	Nettomischleistung P [kW]	Mischendtemperatur [°C]
M1,5min	141,0	0,336	34,0
M3min	140,5	0,330	34,0
M7min	146,5	0,401	34,0
M15min	145,0	0,357	35,0
M30min	121,0	0,328	35,0
M60min	117,0	0,313	33,0
M120min	111,5	0,316	33,0
M240min	78,5	0,235	33,0
M480min	60,5	0,238	30,0

4.1.2 2. Versuchsreihe - Mischleistung und Mischtemperatur

Für die 2. Versuchsreihe ergeben sich für die Mischungen M1,5min, M30min und M480min die in der Abbildung 4.4 approximierten Messverläufe der normierten Mischleistung. Es lässt sich erkennen, dass es eindeutig zu einer Abnahme der Stabilisationszeit bei zunehmender Trockenmischdauer kommt.

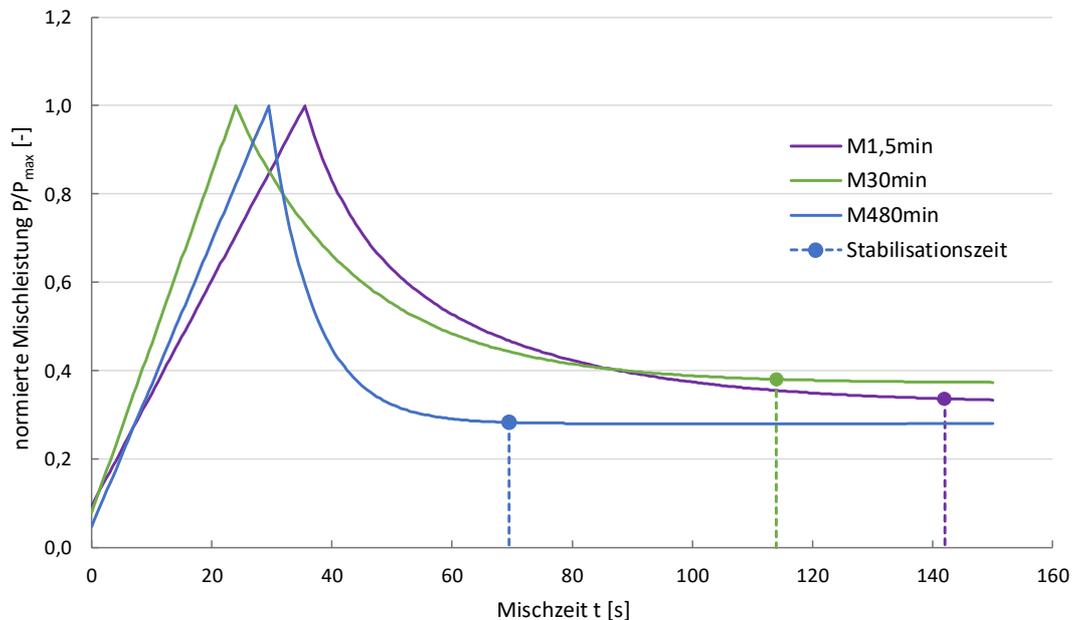


Abbildung 4.4: Approximierte Funktion der normierten Mischleistung P/P_{max} der 2. Versuchsreihe

Die Abbildung 4.5 zeigt die Stabilisationszeit t_s sowie die Nettoleistung P nach Erreichen von t_s , in Abhängigkeit von der Mischdauer der trockenen Ausgangsstoffe. Die Stabilisationszeit sinkt nahezu kontinuierlich. Für die Nettoleistung ergibt sich erst ab der Mischung M15min eine gleichmäßige Abnahme. Die Mischungen M1,5min bis M15min erzielen ähnliche Werte.

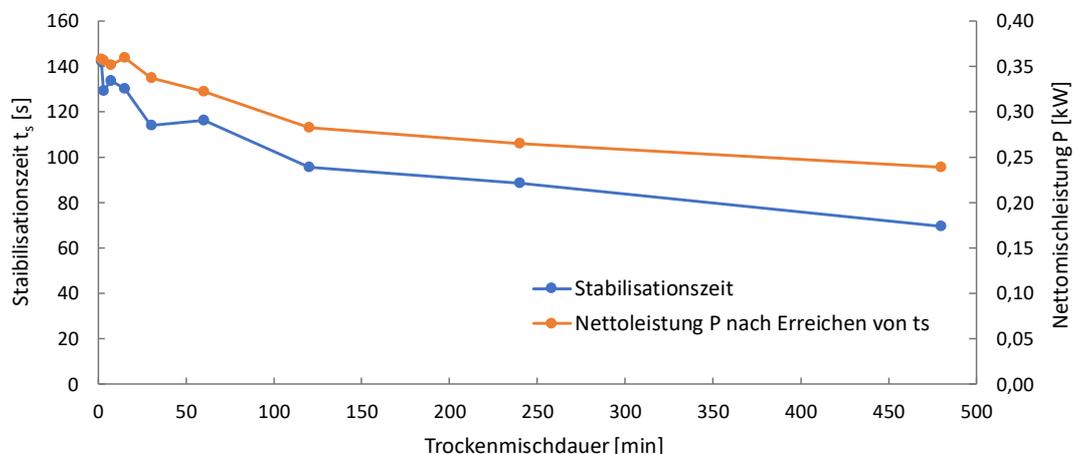


Abbildung 4.5: Stabilisationszeit und Nettoleistung P nach Erreichen von t_s über die Trockenmischdauer der 2. Versuchsreihe

Betrachtet man die Mischendtemperatur über die Trockenmischdauer, so ergibt sich die in der Abbildung 4.6 dargestellte Kurve. Die Temperatur nimmt mit zunehmender Trockenmischdauer des Prämix tendenziell ab.

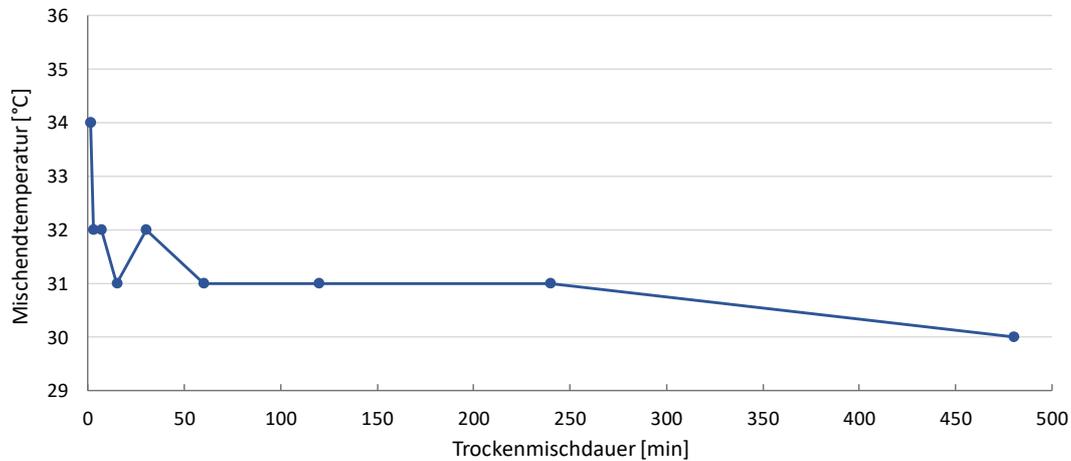


Abbildung 4.6: Mischendtemperatur der Mischungen der 2. Versuchsreihe

Die Tabelle 4.2 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse der Stabilisationszeit, der Nettoleistung P nach Erreichen der Stabilisationszeit t_s und der Mischendtemperatur.

Tabelle 4.2: Ergebnisse aus Mischleistung und Mischtemperatur für die 2. Versuchsreihe

Mischung	Stabilisationszeit t_s [s]	Nettomischleistung P [kW]	Mischendtemperatur [°C]
M1,5min	142,0	0,358	34,0
M3min	129,0	0,356	32,0
M7min	133,5	0,351	32,0
M15min	130,0	0,359	31,0
M30min	114,0	0,337	32,0
M60min	116,0	0,322	31,0
M120min	95,5	0,282	31,0
M240min	88,5	0,265	31,0
M480min	69,5	0,239	30,0

4.1.3 3. Versuchsreihe - Mischleistung und Mischtemperatur

In der Abbildung 4.7 sind die approximierten Kurven der normierten Mischleistung für die Mischungen M1,5min, M30min und M480min der 3. Versuchsreihe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Trockenmischzeit die Kurven früher abflachen und somit

der Zeitpunkt, an dem die Mischung optimal homogenisiert ist (Stabilisationszeitpunkt t_s), früher erreicht wird.

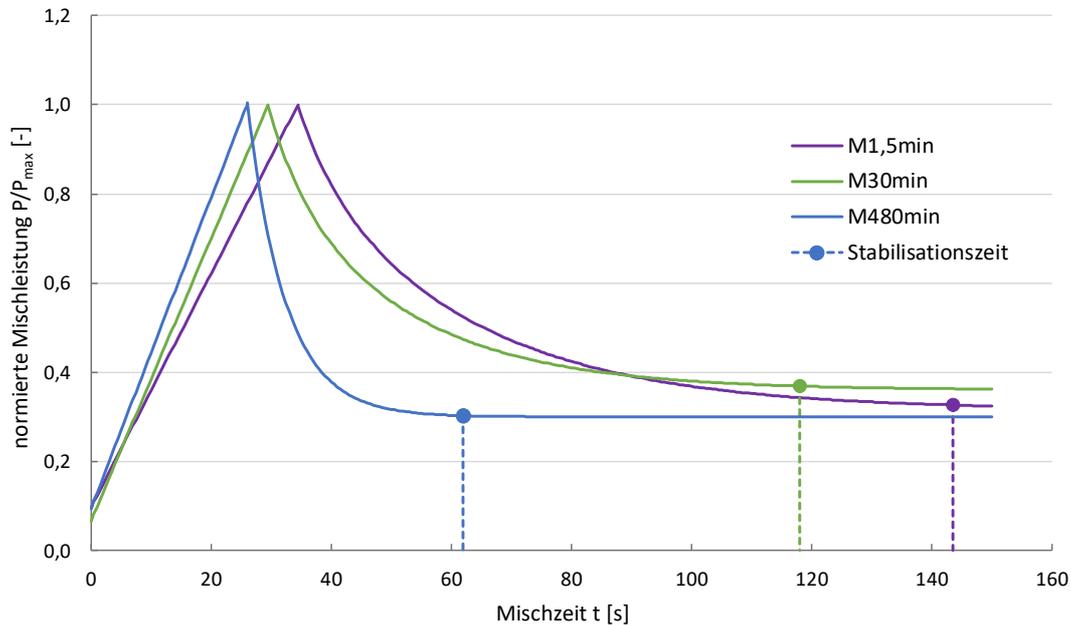


Abbildung 4.7: Approximierte Funktion der normierten Mischleistung P/P_{max} der 3. Versuchsreihe

Die Abbildung 4.5 zeigt die Stabilisationszeit t_s sowie die Nettoleistung P nach Erreichen von t_s in Abhängigkeit von der Trockenmischdauer. Die Kurve der Stabilisationszeit nimmt kontinuierlich ab. Für die Nettoleistung ergibt sich erst ab der Mischung M60min eine gleichmäßige Abnahme. Die Mischung M1,5min bis M120min erzielen dabei relativ ähnliche Werte in einer Spanne von 0,33 bis maximal 0,37 kW.

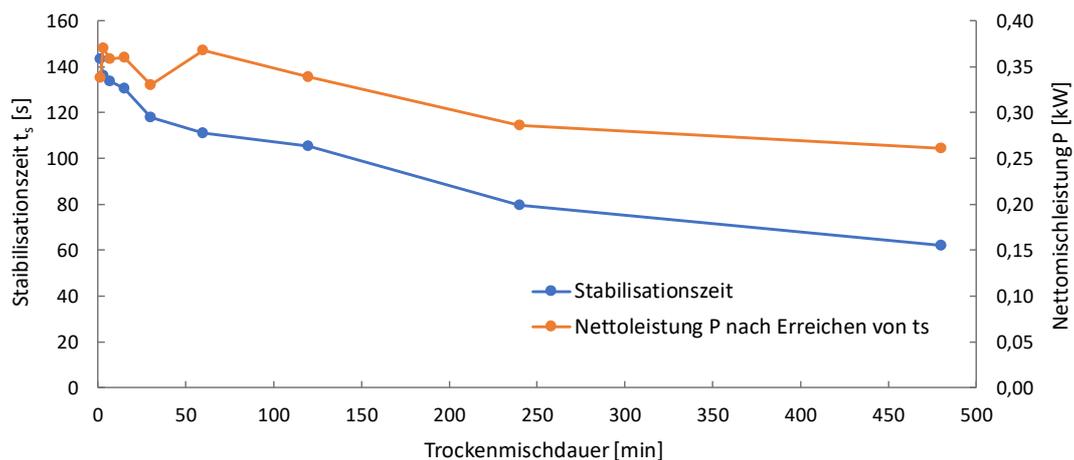


Abbildung 4.8: Stabilisationszeit und Nettoleistung P nach Erreichen von t_s über die Trockenmischdauer der 3. Versuchsreihe

Die Abbildung 4.9 zeigt die Mischendtemperatur über die Trockenmischdauer der 3. Versuchsreihe. Die Kurve nimmt von 35 °C der M1,5min bis zu 30 °C der M480min tendenziell ab.

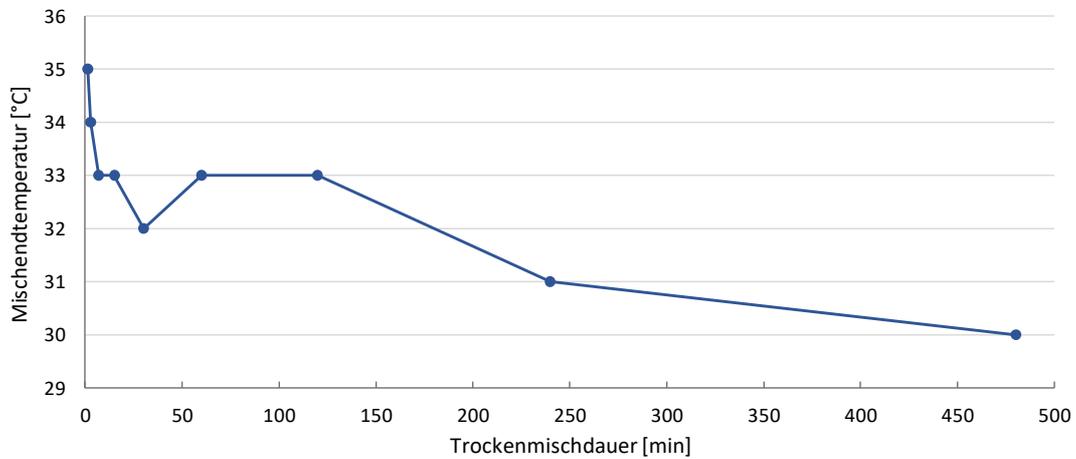


Abbildung 4.9: Mischendtemperatur der Mischungen der 3. Versuchsreihe

In der Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse der Stabilisationszeit, der Nettoleistung P nach Erreichen der Stabilisationszeit t_s und der Mischendtemperatur für die 3. Versuchsreihe zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Ergebnisse aus Mischleistung und Mischtemperatur für die 3. Versuchsreihe

Mischung	Stabilisationszeit t_s [s]	Nettomischleistung P [kW]	Mischendtemperatur [°C]
M1,5min	143,5	0,338	35,0
M3min	136,0	0,370	34,0
M7min	133,5	0,358	33,0
M15min	130,5	0,360	33,0
M30min	118,0	0,330	32,0
M60min	111,0	0,368	33,0
M120min	105,5	0,339	33,0
M240min	79,5	0,286	31,0
M480min	62,0	0,261	30,0

4.2 Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie

Zur Ermittlung der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} , der Viskosität η und der Thixotropie A_{thix} werden die Ergebnisse aus dem Rheometer für die einzelnen Mischungen wie in 3.4.2.1 beschrieben ausgewertet.

4.2.1 1. Versuchsreihe - Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie

Bei der ersten Versuchsreihe, mit einem Alter des trockenen Prämix bis zu 48 Stunden, erhält man zur Ermittlung der dynamischen Fließgrenze und der plastischen Viskosität die in Abbildung 4.10 dargestellten Messverläufe. Bereits hier lässt sich erkennen, dass die Scherspannungen tendenziell mit zunehmender Trockenmischdauer abnehmen.

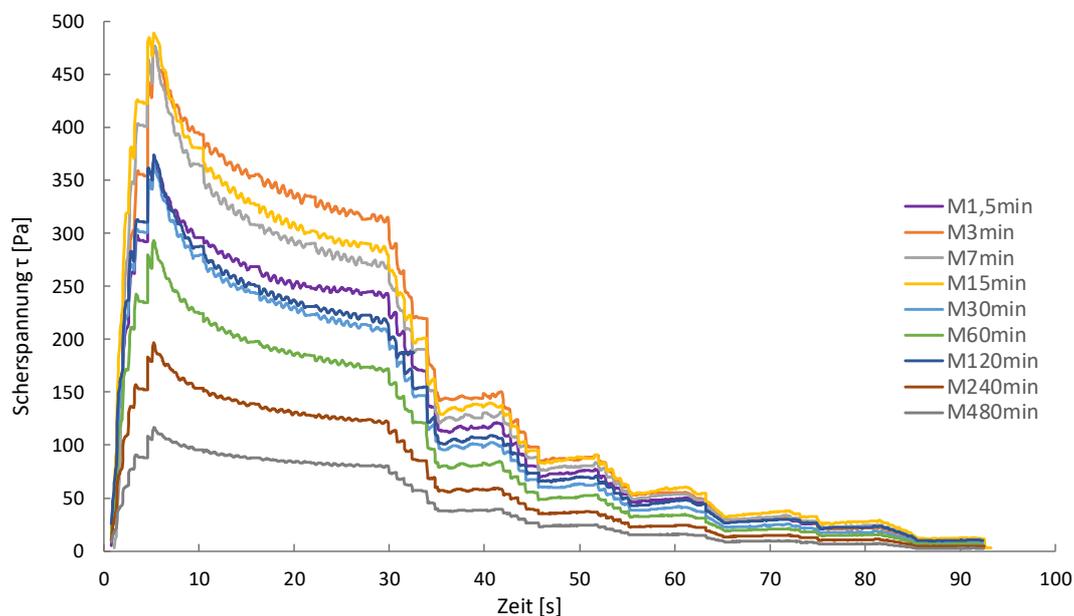


Abbildung 4.10: Messverläufe der 1. Versuchsreihe für das Scherprofil 1

Analog zu der Auswertung in 3.4.2.1, wird die Scherspannung τ gegenüber der Scherrate $\dot{\gamma}$ aufgetragen, um mittels des Bingham-Modells die dynamische Fließgrenze τ_{0D} und die plastische Viskosität η bestimmen zu können (Abbildung 4.11). Was hier besonders auffällt ist, dass die lineare Funktion der Mischung M3min anders als die anderen Mischungen eine viel höhere Steigung im Verhältnis zum Schnittpunkt auf der y-Achse besitzt. Anders ausgedrückt, ergibt sich bei dieser Mischung eine höhere Viskosität im Verhältnis zur dynamischen Fließgrenze.

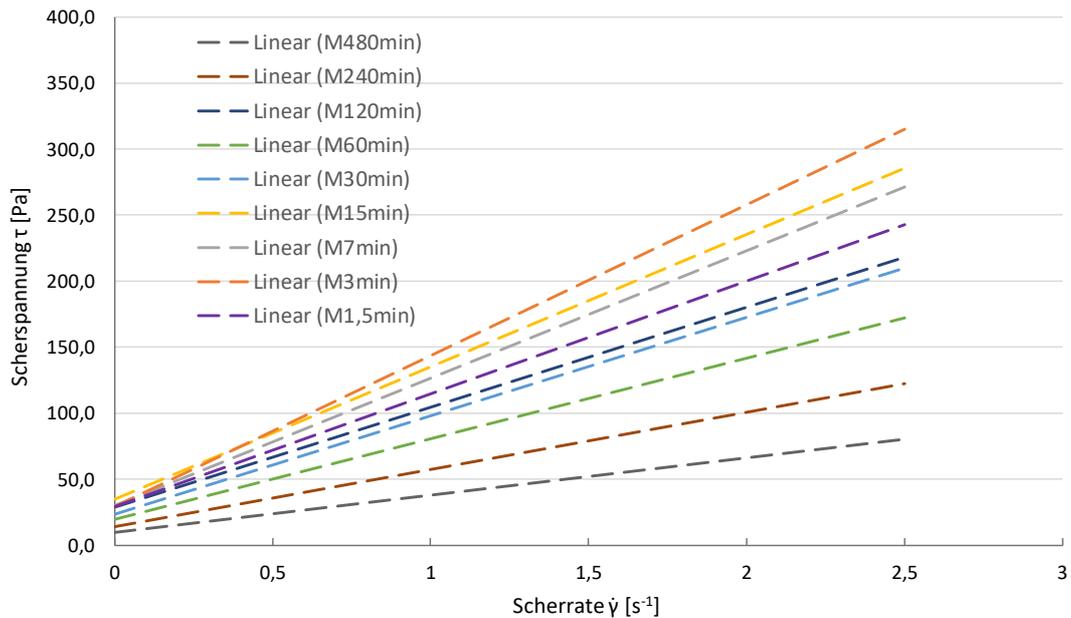


Abbildung 4.11: Fließkurven der 1. Versuchsreihe

Für das Scherprofil 2, welches direkt im Anschluss an das erste Scherprofil folgt, ergeben sich für die erste Versuchsreihe die in Abbildung 4.12 zusammengeführten Messverläufe. Es lässt sich die gleiche Reihenfolge der Scherspannungen wie beim Scherprofil 1 erkennen.

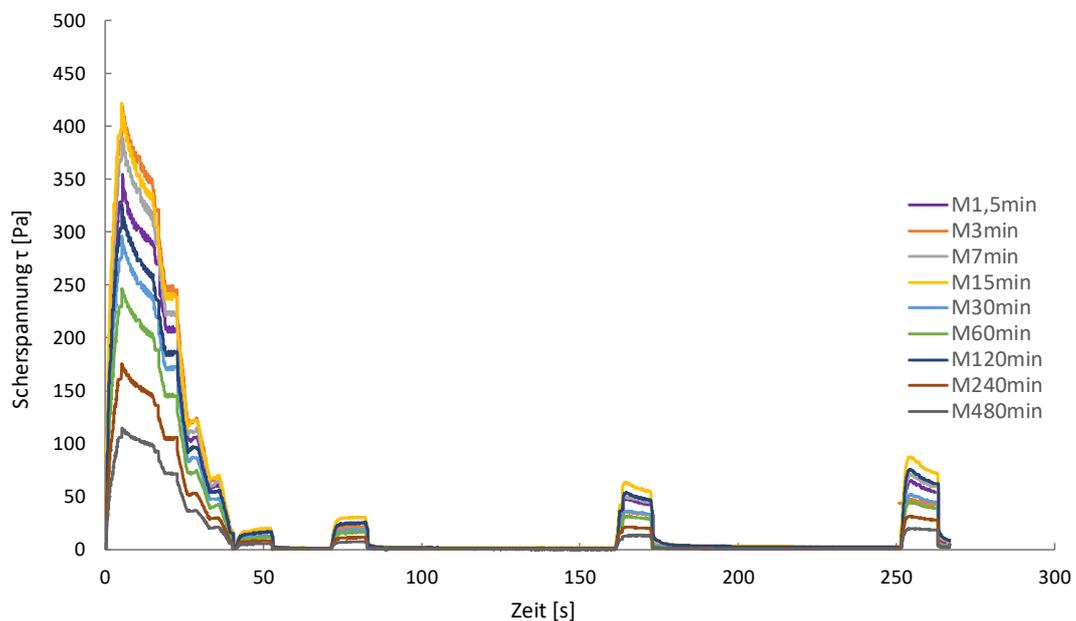


Abbildung 4.12: Messverläufe der 1. Versuchsreihe für das Scherprofil 2

Nach Ermittlung der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} , wird die Thixotropie A_{thix} aus der ersten Ableitung der statischen Fließgrenze $\tau_{0(t)}$ über die Zeit berechnet ($\tau_{0(t)} = A_{thix} \cdot t_p + \tau_{0D}$). Graphisch ist die Bestimmung der Thixotropie in Abbildung 4.13 dargestellt. Auch hier ergibt

sich für die Mischung M3min ein abweichendes Bild. Die Thixotropie (Steigung der Funktion) ist deutlich niedriger im Verhältnis zur dynamischen Fließgrenze (Schnittpunkt mit y-Achse).

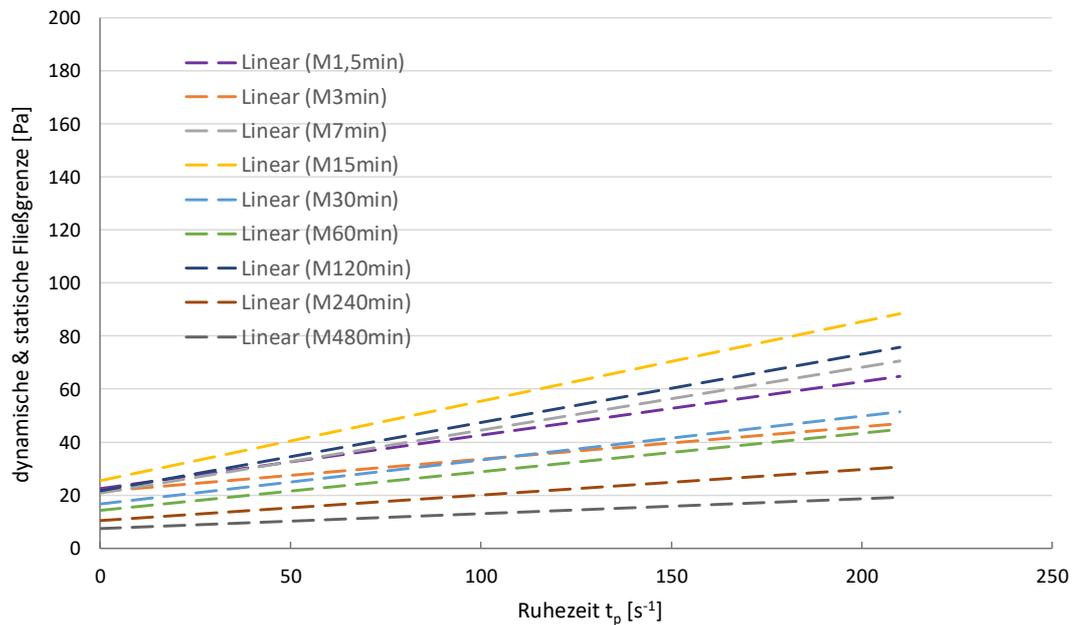


Abbildung 4.13: Bestimmung der Thixotropie für die 1. Versuchsreihe

Nach der vollständigen Auswertung der 1. Versuchsreihe erhält man die in der Tabelle 4.4 zusammengefassten Ergebnisse.

Tabelle 4.4: Ergebnisse Rheometer für die 1. Versuchsreihe

Mischung	dyn. Fließgrenze τ_{0D} [Pa]	Viskosität η [Pa·s]	Thixotropie A_{thix} [-]
M1,5min	29,6	85,3	0,202
M3min	29,2	114,2	0,123
M7min	29,9	96,4	0,240
M15min	34,6	100,4	0,300
M30min	23,5	74,5	0,164
M60min	19,6	60,9	0,145
M120min	28,8	75,8	0,257
M240min	14,0	43,2	0,097
M480min	9,6	28,3	0,056

Um mögliche Verläufe und Tendenzen besser zu veranschaulichen, werden die Ergebnisse im folgendem graphisch dargestellt. In Abbildung 4.14 sind für die einzelnen Mischungen die dynamischen Fließgrenzen zu erkennen.

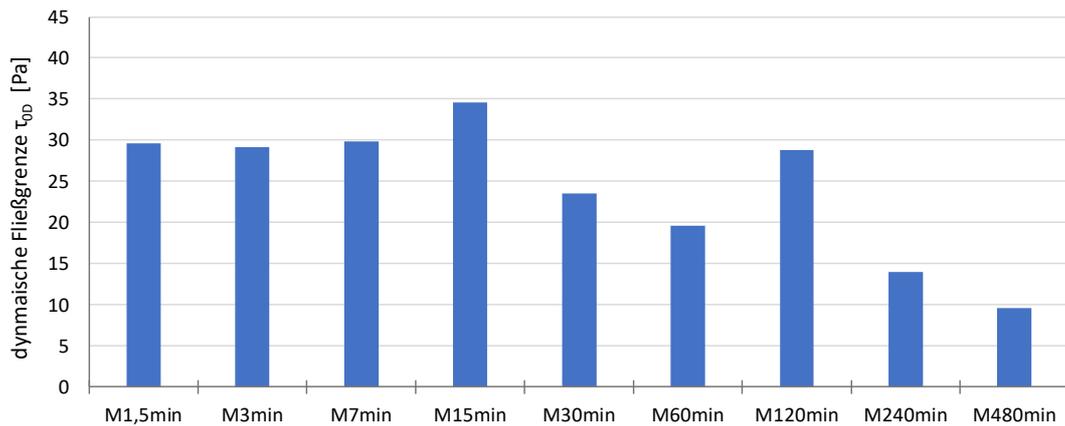


Abbildung 4.14: Dynamische Fließgrenze der Mischungen der 1. Versuchsreihe

Die Annahme, dass die dynamische Fließgrenze mit zunehmender Trockenmischzeit sinkt, lässt sich durch die Ergebnisse nur teilweise bestätigen. Für die Mischungen M1,5min bis M15min erhalten wir sehr ähnliche Ergebnisse. Es scheint, dass die relativ kurze Verlängerung der Trockenmischdauer noch keine wirklichen Änderungen bedingen. Erst ab der Mischung M30min ist eine Abnahme der dynamischen Fließgrenze zu erkennen. Den höchsten Wert erreicht die M15min mit 34,6 Pa. Auffallend ist die Mischung M120min, welche einen deutlich höheren Wert als die M30min und M60min erzielt und dadurch aus dem Muster fällt. Man kann annehmen, dass hier ein Fehler bei der Fließmittelzugabe während des Nassmischens unterlaufen ist und somit diese Mischung eine erhöhte Plastizität aufweist. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der weiteren Frischbetonprüfungen bestätigt (siehe 4.3.1, 4.4.1 und 4.5.1). Ebenfalls für einen Fehler spricht, dass bei allen Prüfverfahren die Ergebnisse der Mischung M120min der 2. und 3. Versuchsreihe keine größeren Abweichungen ergeben.

Betrachtet man die Ergebnisse der Viskosität η in Abbildung 4.15, so zeigt sich ein ähnliches Bild. Jedoch ergibt sich hier eine Abnahme der Viskosität bereits ab der Mischung M3min. Diese Mischung erreicht zugleich den höchsten Wert mit 114,2 Pa·s. Diese hohe Viskosität konnte man bereits in der Abbildung 4.11 erkennen. Aus dem Muster fällt die Mischung mit nur 1,5 Minuten Trockenmischzeit. Sie ist mit 85,4 Pa·s deutlich niedriger als die Mischungen M3min, M7min und M15min. Außerdem ergibt sich auch hier, ähnlich zur dynamischen Fließgrenze, ein erhöhter Wert der M120min.

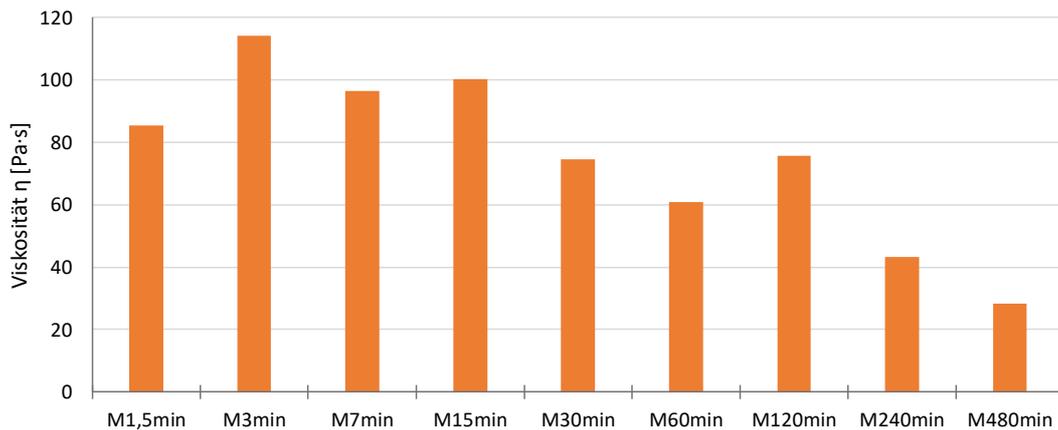


Abbildung 4.15: Viskosität der Mischungen der 1. Versuchsreihe

In Abbildung 4.16 sind die dynamische Fließgrenze und Viskosität über die Trockenmischdauer des Prämix dargestellt. Unter Einbezug des Messfehlers der Mischung M120min, lässt sich vermuten, dass die dynamische Fließgrenze sowie die Viskosität über die Zeit nahezu exponentiell abnehmen. Man kann annehmen, dass eine Verlängerung der Trockenmischdauer über 480 Minuten hinaus, kaum mehr zu verbesserten rheologischen Eigenschaften führt.

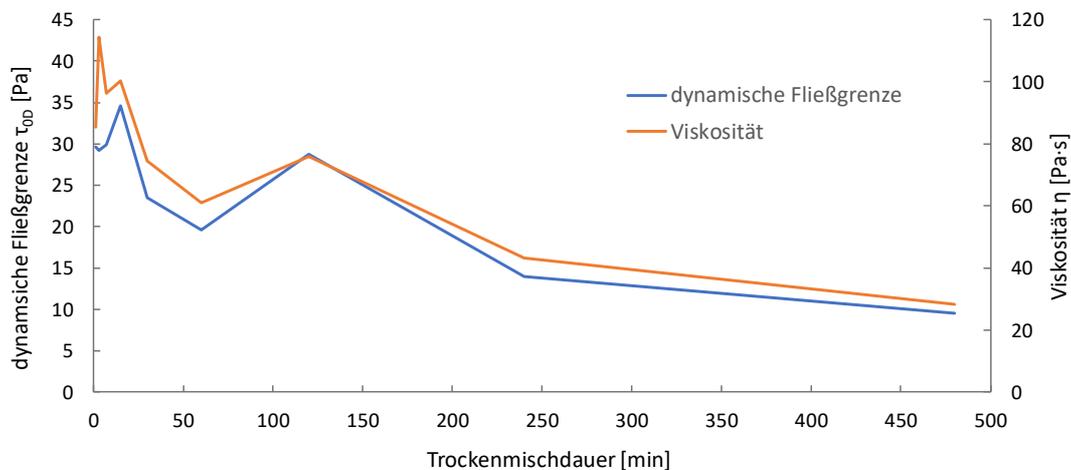


Abbildung 4.16: Dynamische Fließgrenze und Viskosität über die Trockenmischdauer der 1. Versuchsreihe

In Abbildung 4.17 ist die Thixotropie für die einzelnen Mischungen der 1. Versuchsreihe zu erkennen. Je niedriger der Wert, umso langsamer kommt es zu einer Regeneration der Struktur nach einer zuvor aufgetragenen Belastung, wie beispielsweise Rühren. Der Verlauf ist ähnlich zu jenem der dynamischen Fließgrenze in Abbildung 4.14. Jedoch ergibt sich, wie bereits in Abbildung 4.13 zu sehen, für M3min eine außergewöhnlich niedrige Thixotropie.

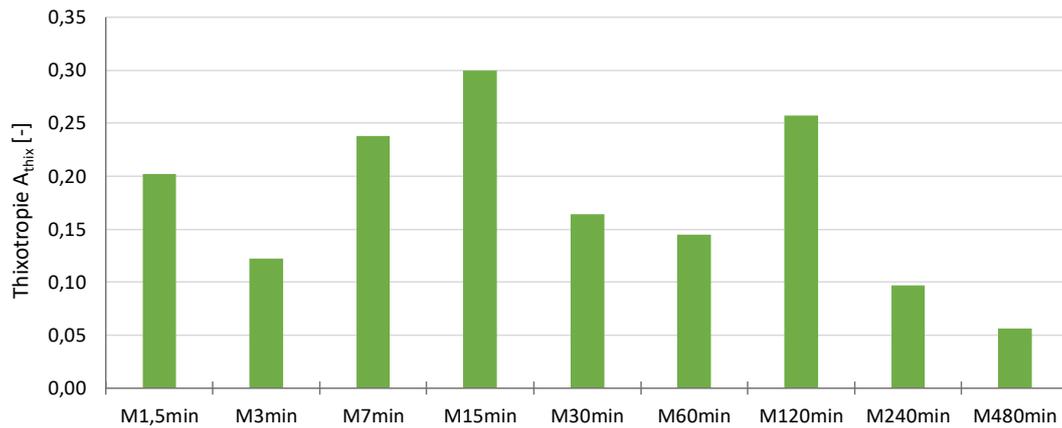


Abbildung 4.17: Thixotropie der Mischungen der 1. Versuchsreihe

4.2.2 2. Versuchsreihe - Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie

Analog zur 1. Versuchsreihe sind in den Abbildungen 4.18 und 4.20 die Messverläufe und in den Abbildungen 4.19 und 4.21 die Auswertung für die 2. Versuchsreihe im Viskomaten dargestellt. Die 2. Versuchsreihe erfolgte für den Prämix in einem Alter von vier Wochen. Es lässt sich erkennen, dass die Mischungen M1,5min bis M15min sehr ähnliche Ergebnisse liefern werden. Für die Mischung M7min und M15min ergeben sich sogar nahezu dieselben Verläufe. Für die Mischungen M30min und M480min hingegen ergibt sich eine regelmäßige Abstufung.

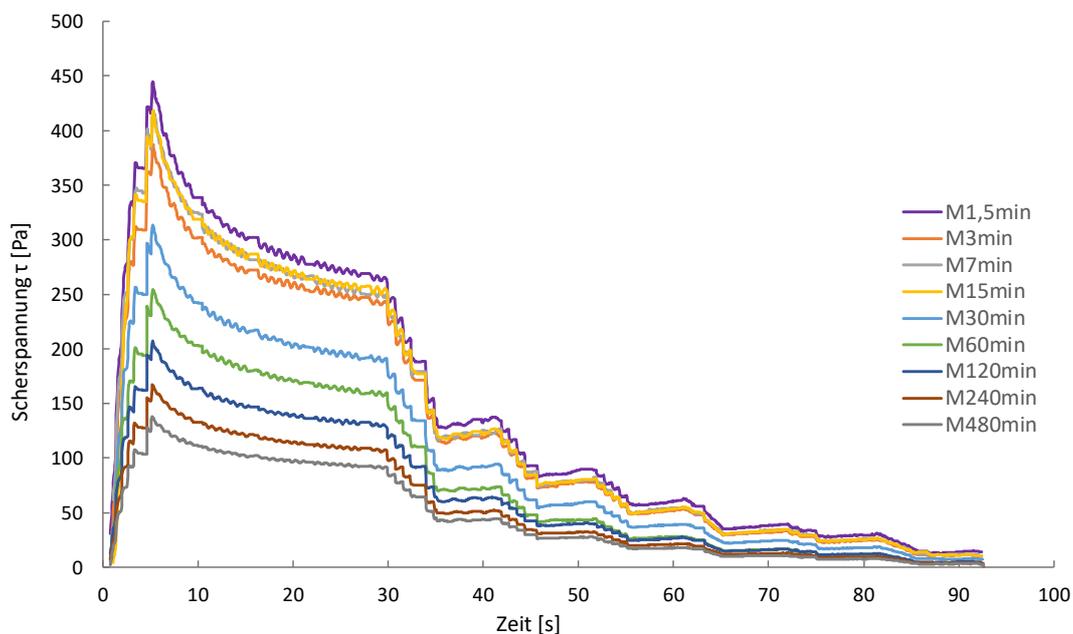


Abbildung 4.18: Messverläufe der 2. Versuchsreihe für das Scherprofil 1

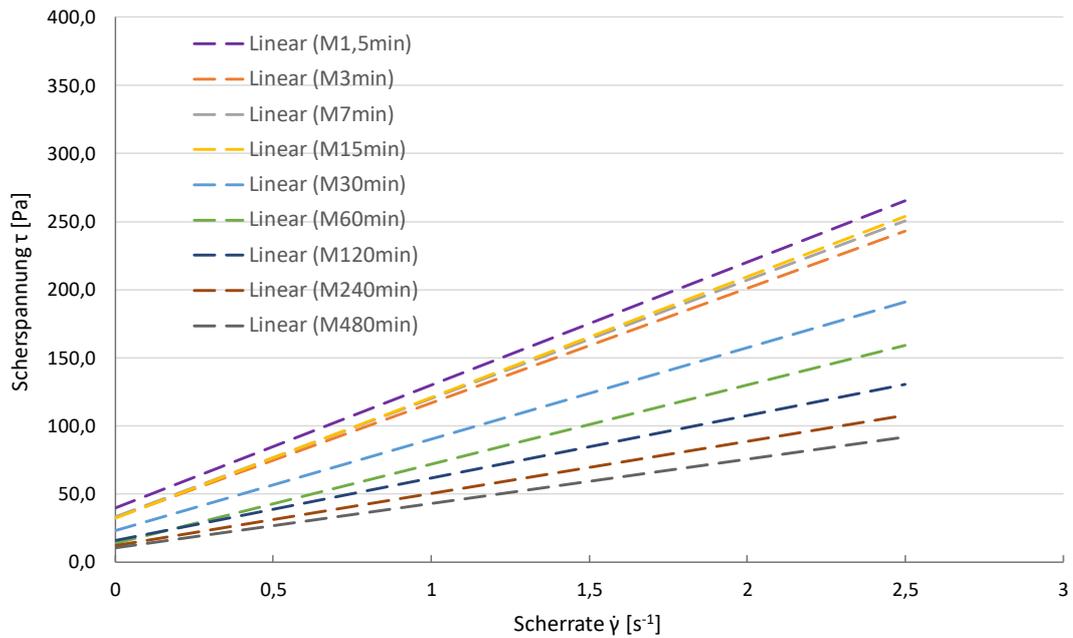


Abbildung 4.19: Fließkurven der 2. Versuchsreihe

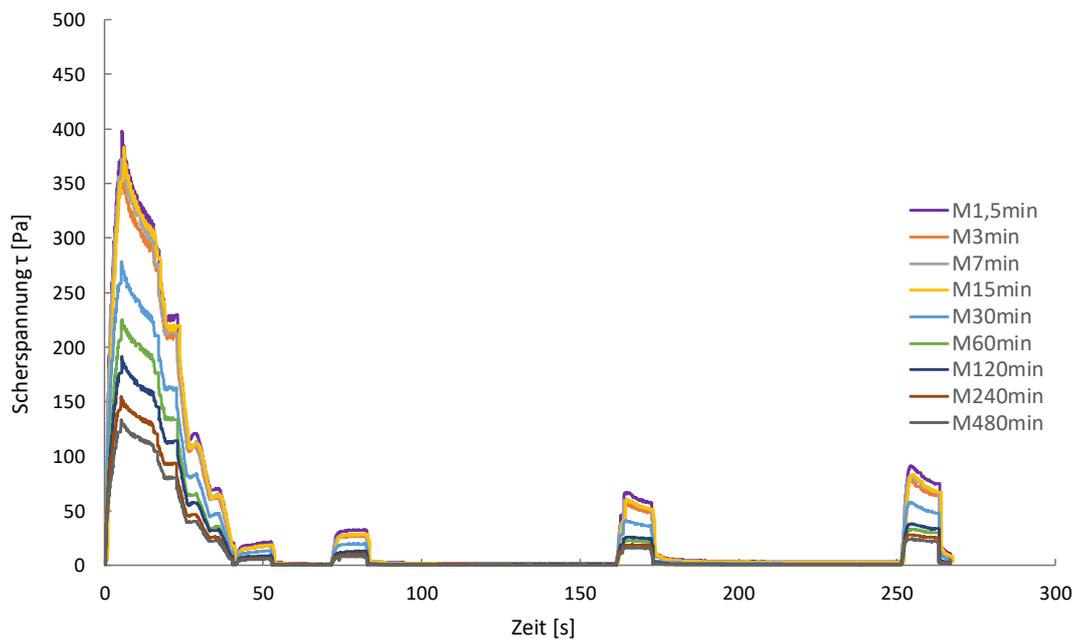


Abbildung 4.20: Messverläufe der 2. Versuchsreihe für das Scherprofil 2

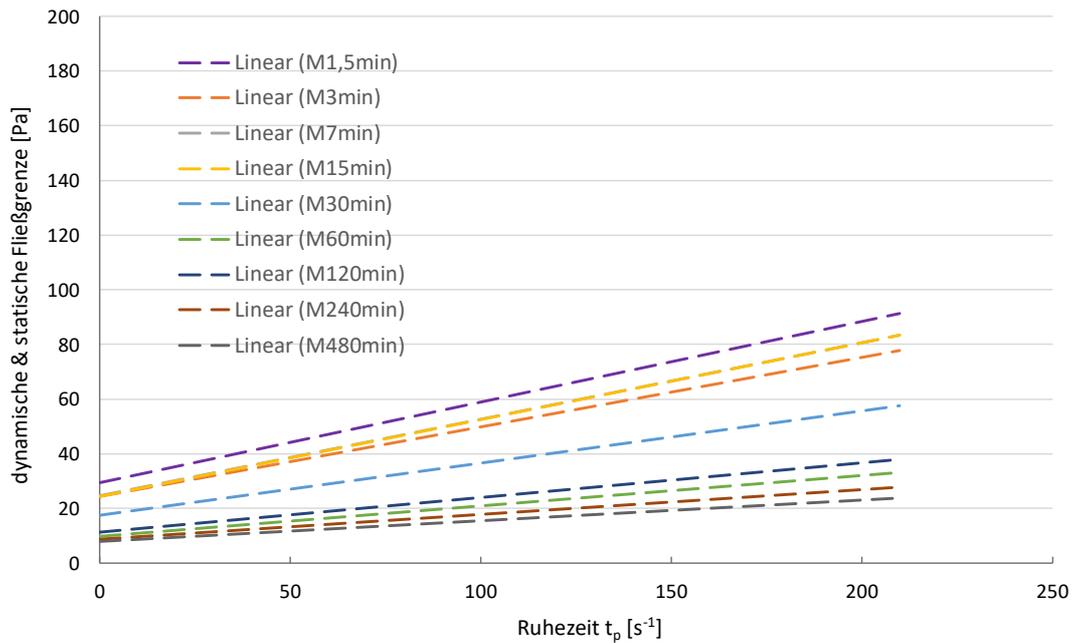


Abbildung 4.21: Bestimmung der Thixotropie für die 2. Versuchsreihe

In der Tabelle 4.5 sind die, nach erfolgreicher Auswertung resultierenden Ergebnisse der dynamischen Fließgrenze, der Viskosität und der Thixotropie zusammengefasst.

Tabelle 4.5: Ergebnisse Rheometer für die 2. Versuchsreihe

Mischung	dyn. Fließgrenze τ_{0D} [Pa]	Viskosität η [Pa·s]	Thixotropie A_{thix} [-]
M1,5min	39,8	90,3	0,295
M3min	32,6	84,2	0,254
M7min	33,5	86,9	0,280
M15min	32,4	88,6	0,281
M30min	23,1	67,1	0,192
M60min	13,4	58,3	0,112
M120min	15,5	45,9	0,126
M240min	12,0	38,2	0,090
M480min	10,2	32,6	0,077

Betrachtet man die dynamische Fließgrenze graphisch, so lässt sich bei der 2. Versuchsmischung ein eindeutig abnehmender Verlauf erkennen (Abbildung 4.22). Die dynamische Fließgrenze nimmt mit der Länge der Trockenmischdauer ab. Auffallend ist, dass die Mischungen M3min, M7min und M15min nahezu die gleichen Werte erreichen. Die

kurze Verlängerung der Mischdauer von maximal 8 Minuten scheint kaum Einfluss auf die Ergebnisse der dynamischen Fließgrenze zu nehmen.

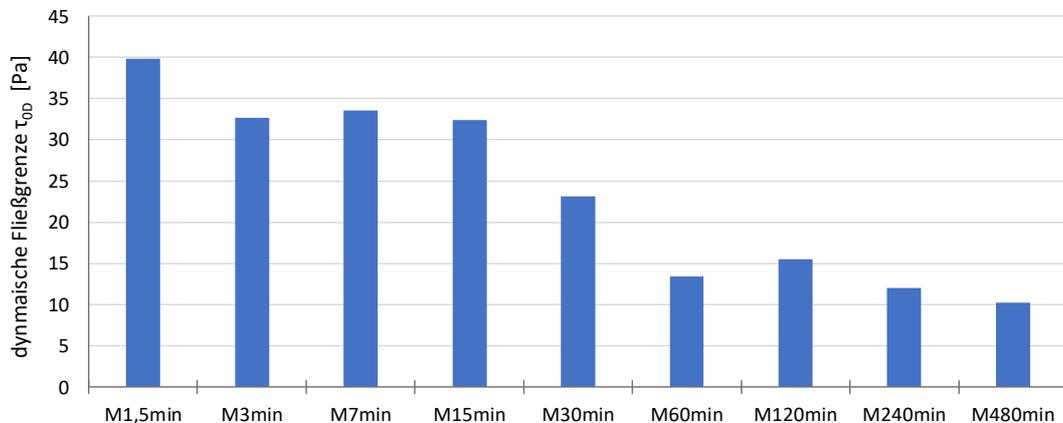


Abbildung 4.22: Dynamische Fließgrenze der Mischungen der 2. Versuchsreihe

Stellt man die Viskosität graphisch dar, so lassen sich auch hier keine größeren Abweichungen bei den kürzeren Mischzeiten erkennen (Abbildung 4.23). Ab der Mischung M30min fällt die Viskosität ab. In Abbildung 4.24 sind die dynamische Fließgrenze und die Viskosität über die Trockenmischdauer dargestellt. Auch hier lässt sich wie bereits in der 1. Versuchsreihe (siehe 4.2.1) ein exponentieller Verlauf vermuten. Auffällig bei der dynamischen Fließgrenze ist, dass der Wert der Mischung M60min deutlich niedriger liegt als jener der Mischung M120min.

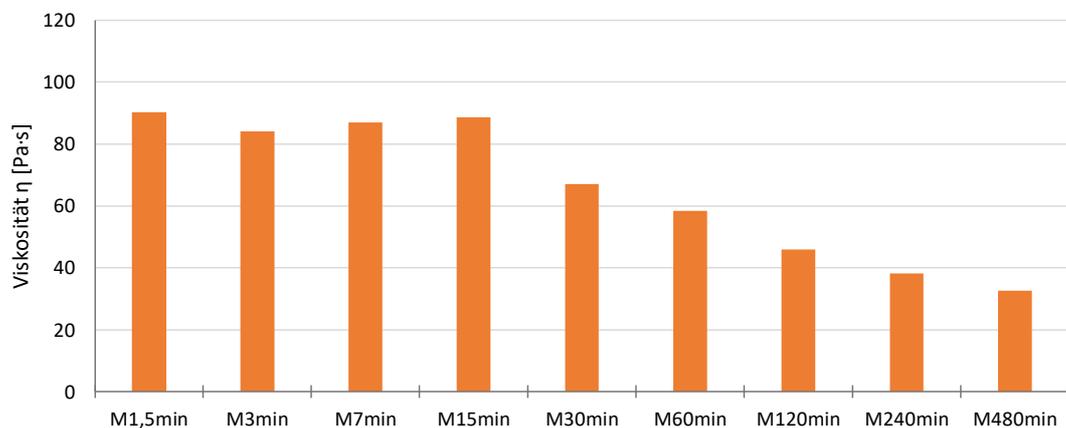


Abbildung 4.23: Viskosität der Mischungen der 2. Versuchsreihe

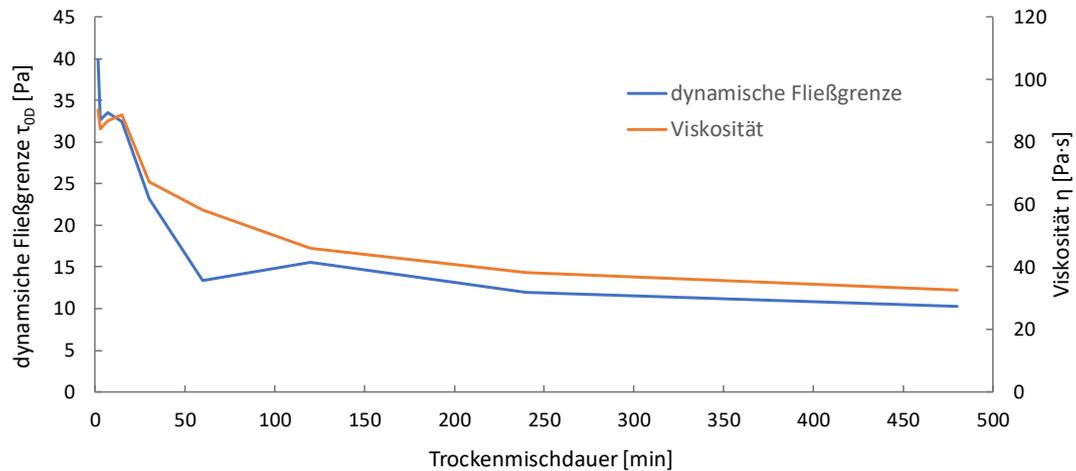


Abbildung 4.24: Dynamische Fließgrenze und Viskosität über die Trockenmischdauer der 2. Versuchsreihe

Für die Thixotropie in Abbildung 4.25 ergibt sich ein ähnlicher Verlauf wie jener der dynamischen Fließgrenze (siehe Abbildung 4.22).

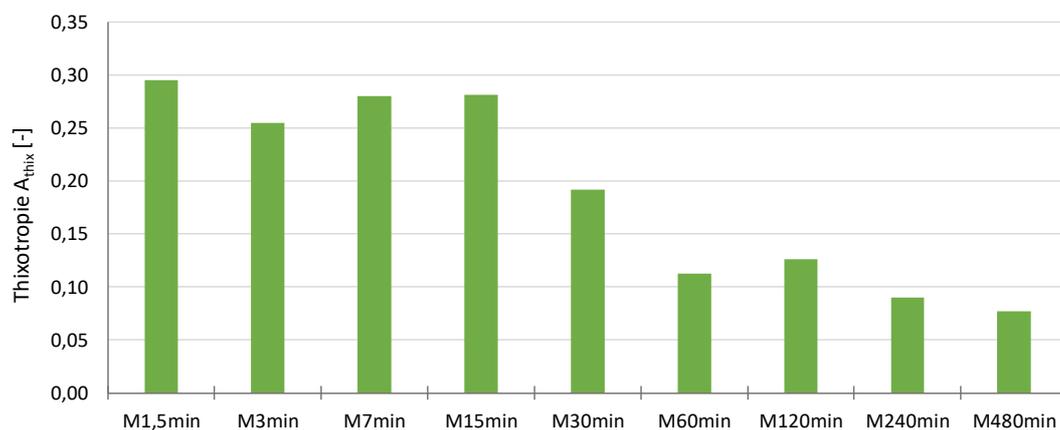


Abbildung 4.25: Thixotropie der Mischungen der 2. Versuchsreihe

4.2.3 3. Versuchsreihe - Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie

In den Abbildungen 4.26 und 4.28 sind die Messverläufe und in den Abbildungen 4.27 und 4.29 die Auswertung für die 3. Versuchsreihe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Mischungen M1,5min und M3min mit Abstand über den Mischungen M7min bis M120min liegen. Für M7min bis M120min ergeben sich ähnliche Verläufe. Die Mischung M7min erreicht dabei etwas niedrigere Werte als die Mischung M15min. Hervorstechend sind außerdem die Verläufe der Mischung M240min und M480min, welche mit größerem Abstand unter den restlichen Ergebnissen liegen.

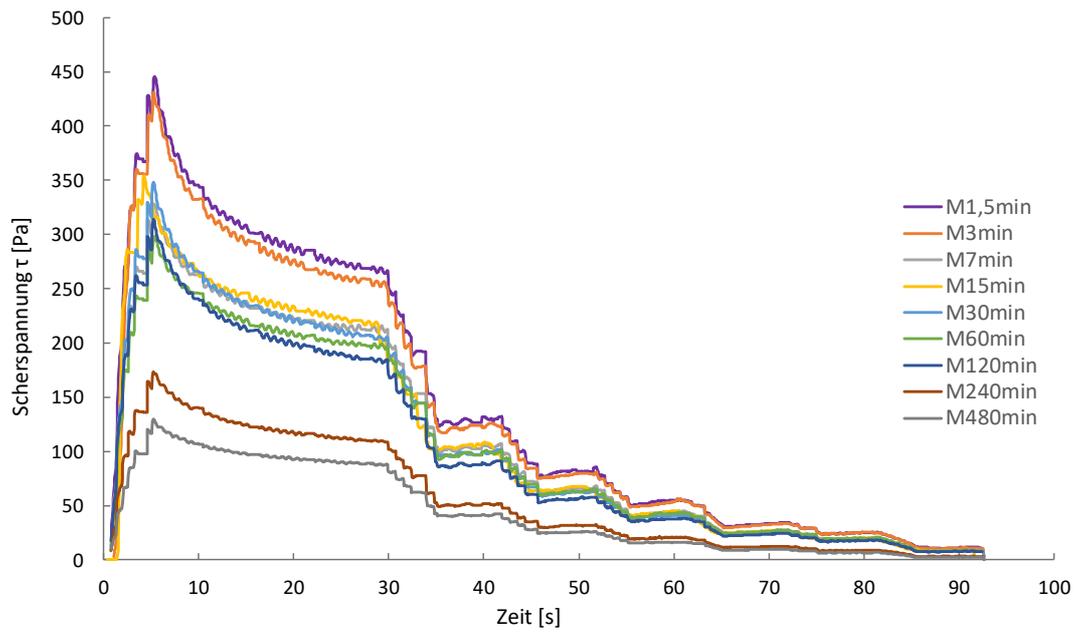


Abbildung 4.26: Messverläufe der 3. Versuchsreihe für das Scherprofil 1

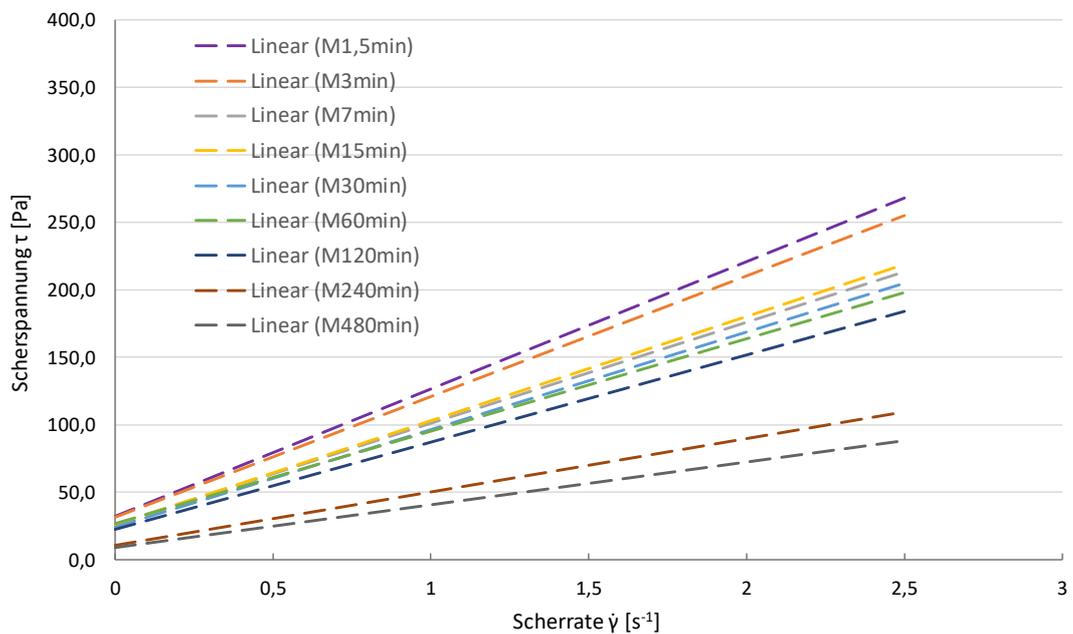


Abbildung 4.27: Fließkurven der 3. Versuchsreihe

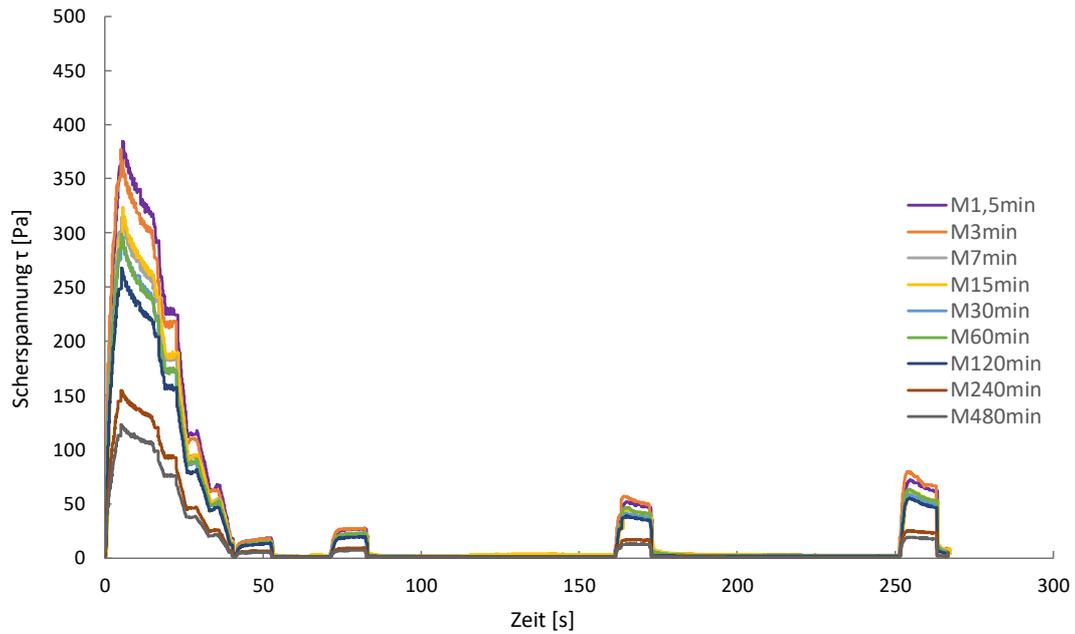


Abbildung 4.28: Messverläufe der 3. Versuchsreihe für das Scherprofil 2

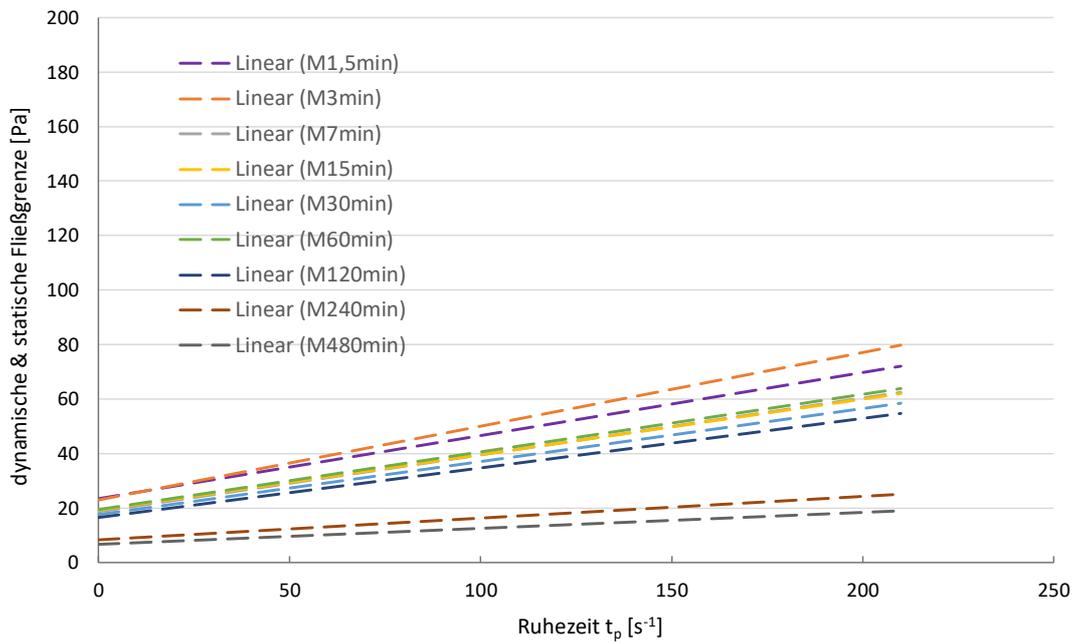


Abbildung 4.29: Bestimmung der Thixotropie für die 3. Versuchsreihe

Die Ergebnisse der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} , Viskosität η und Thixotropie A_{thix} für die 3. Versuchsreihe sind in der Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Tabelle 4.6: Ergebnisse Rheometer für die 3. Versuchsreihe

Mischung	dyn. Fließgrenze τ_{0D} [Pa]	Viskosität η [Pa·s]	Thixotropie A_{thix} [-]
M1,5min	32,4	94,1	0,232
M3min	31,7	89,4	0,270
M7min	26,6	74,7	0,208
M15min	25,9	77,1	0,203
M30min	24,3	72,3	0,194
M60min	27,2	68,3	0,211
M120min	22,5	64,7	0,181
M240min	11,1	39,4	0,080
M480min	9,1	31,6	0,057

In der Abbildung 4.30 sind die Ergebnisse der dynamischen Fließgrenze graphisch dargestellt. Man kann eindeutig eine Abnahme der Werte mit zunehmender Trockenmischdauer erkennen. Das Maximum wird bei der M1,5min mit 32,4 Pa erreicht. Die Fließgrenze nimmt dann bis zu einem Wert von 9,1 Pa der M480min ab. Auffallend ist die Mischung M60min, welche einen höheren Wert als die M7min, M15min und M30min erzielt und somit aus dem Muster fällt.

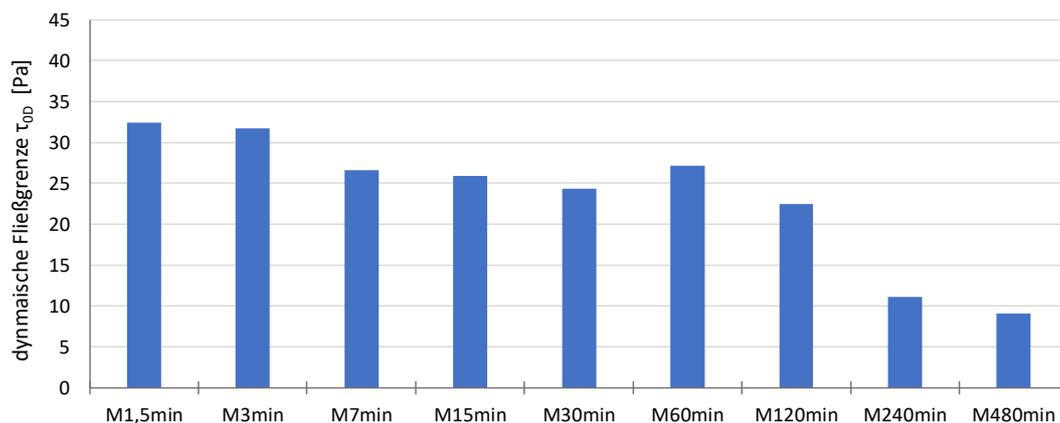


Abbildung 4.30: Dynamische Fließgrenze der Mischungen der 3. Versuchsreihe

Betrachtet man die Ergebnisse der Viskosität η in Abbildung 4.31, so zeigt sich hier eine kontinuierliche Abnahme mit Zunahme der Trockenmischzeit. Lediglich die Mischung M7min

mit 74,7 Pa·s ist etwas geringer als die Mischung M15min mit 77,1 Pa·s. Auffallend ist außerdem der große Sprung zwischen M120min und M240min von 64,7 Pa·s auf 39,4 Pa·s.

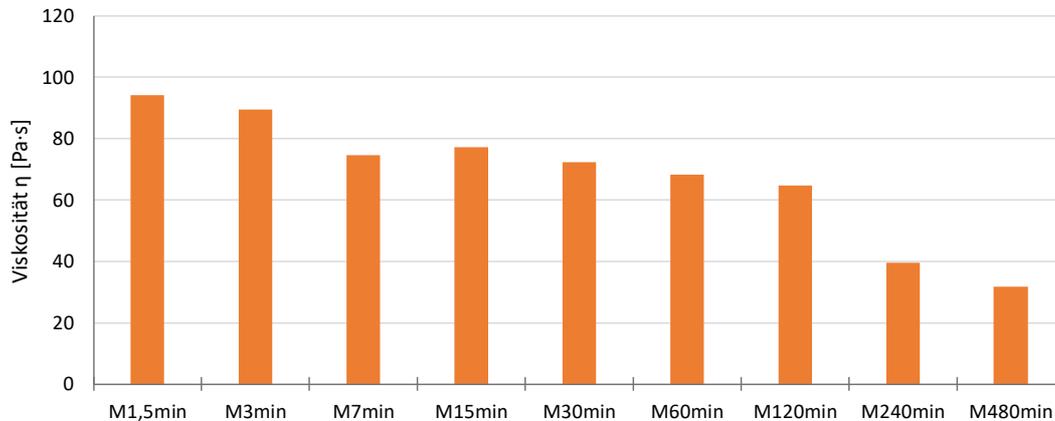


Abbildung 4.31: Viskosität der Mischungen der 3. Versuchsreihe

In Abbildung 4.32 sind die dynamische Fließgrenze und Viskosität über die Trockenmischdauer des Prämix dargestellt. Man kann für beide Kurvenverläufe, wie bereits für die 1. und die 2. Versuchsreihe (siehe Abbildungen 4.16 und 4.24), eine exponentielle Abnahme vermuten. Somit würde eine Verlängerung der Trockenmischdauer über 480 Minuten hinaus, kaum mehr zu verbesserten rheologischen Eigenschaften führen.

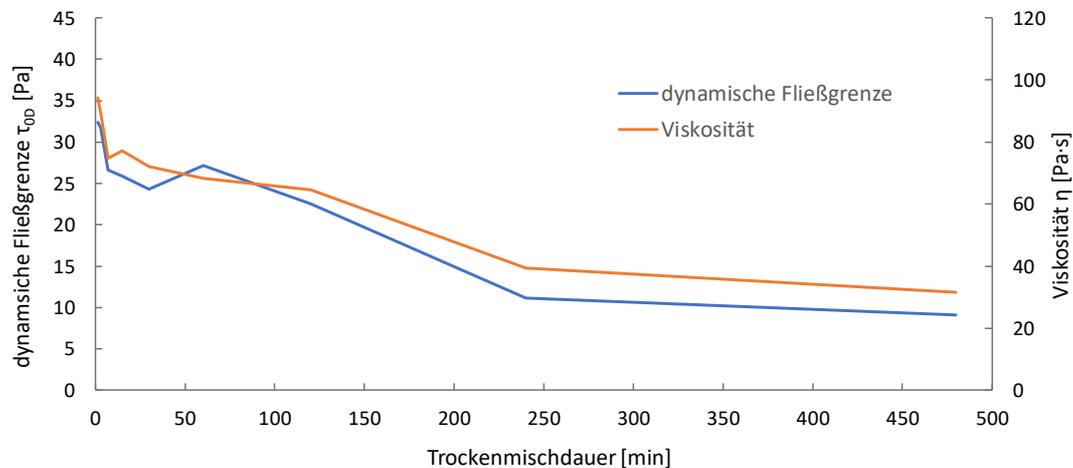


Abbildung 4.32: Dynamische Fließgrenze und Viskosität über die Trockenmischdauer der 3. Versuchsreihe

Für die Werte der Thixotropie in Abbildung 4.33 ergibt sich wiederum ein ähnlicher Verlauf zur dynamischen Fließgrenze (siehe Abbildung 4.30). Auffallend ist die Mischung M1,5min welche mit 0,232 einen weit geringen Wert als die M3min mit 0,270 erzielt.

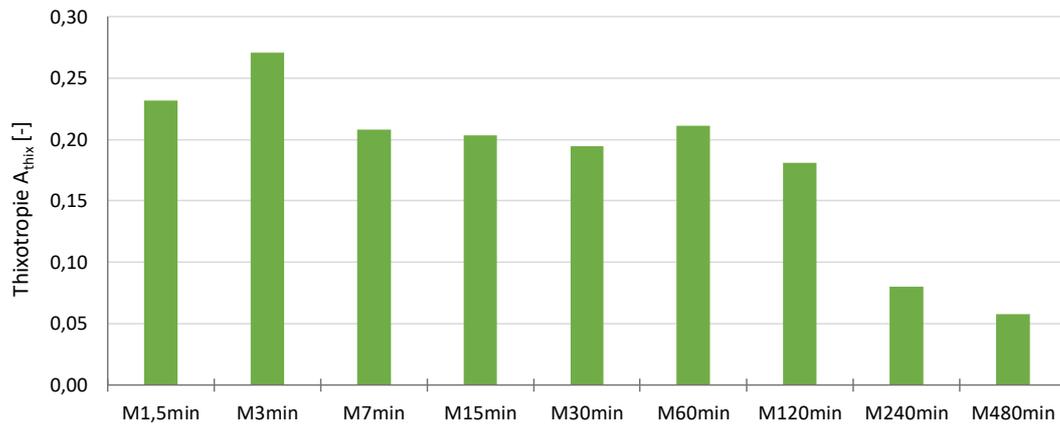


Abbildung 4.33: Thixotropie der Mischungen der 3. Versuchsreihe

4.3 Ausbreitfließmaß

4.3.1 1. Versuchsreihe - Ausbreitfließmaß

In der Abbildung 4.34 sind die Ergebnisse des Ausbreitfließmaßes für die 1. Versuchsreihe graphisch dargestellt. Abgesehen von der Mischung M120min ist ein signifikanter Anstieg des Ausbreitfließmaßes erkennbar. Bei Frischbeton aus Prämix mit einer Trockenmischzeit von 90 Sekunden wurde ein Durchmesser des Zementkuchens von 20,0 cm gemessen. Der Durchmesser bei der M480min betrug 27,5 cm. Das ergibt eine Vergrößerung des Betonkuchens um fast 40 %.

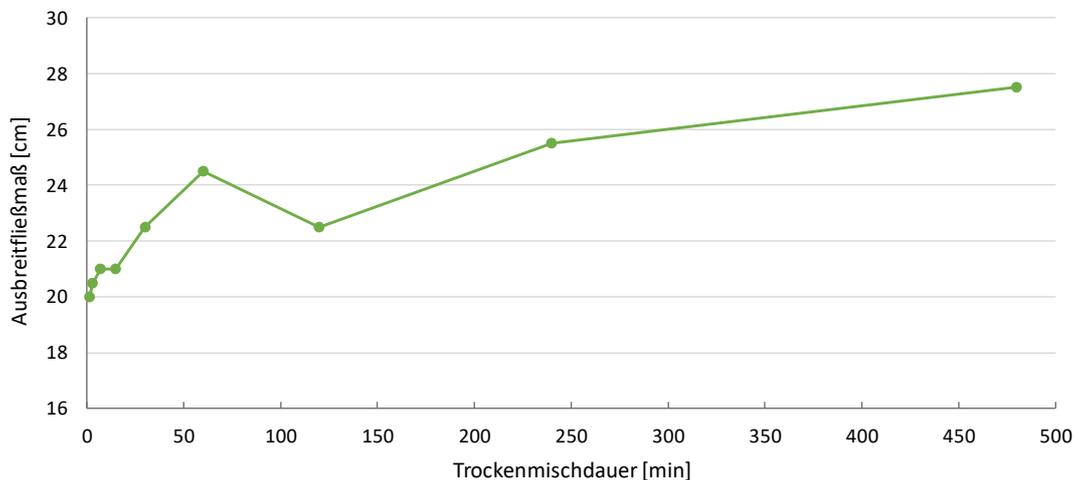


Abbildung 4.34: Ausbreitfließmaß der Mischungen der 1. Versuchsreihe

4.3.2 2. Versuchsreihe - Ausbreitfließmaß

Für die 2. Versuchsreihe ergeben sich ähnliche Ergebnisse. Ausgehend von einem Durchmesser von 20,5 cm der M1,5min zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg bis zum Wert der M480min von 27,0 cm (Abbildung 4.35).

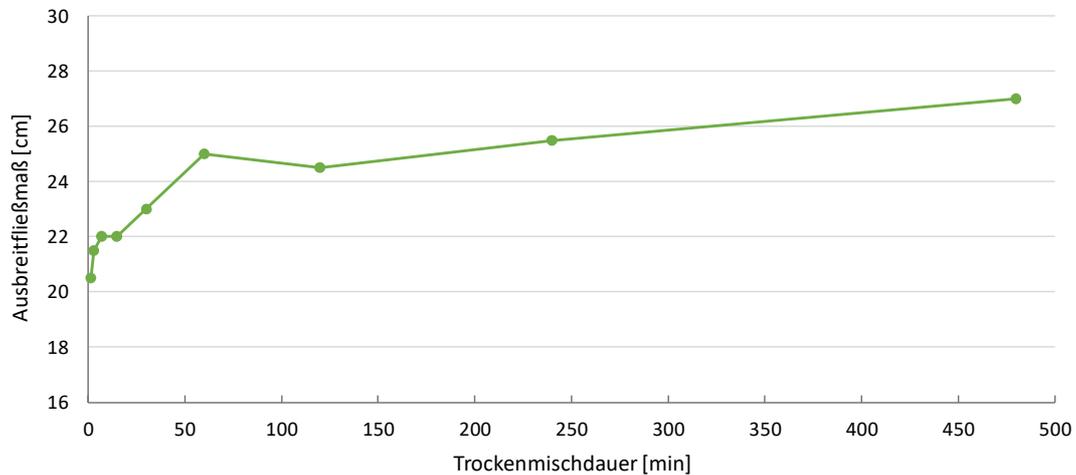


Abbildung 4.35: Ausbreitfließmaß der Mischungen der 2. Versuchsreihe

4.3.3 3. Versuchsreihe - Ausbreitfließmaß

Betrachtet man die Ergebnisse der 3. Versuchsreihe, so ergibt sich ausgehend von der M1,5min mit 21,5 cm ebenfalls ein Anstieg des Ausbreitfließmaßes über die Trockenmischdauer (Abbildung 4.36). Das Maximum wird bei der Mischung M480min mit einem Wert von 28,0 cm erreicht. Dies bedeutet eine Vergrößerung des Durchmessers des Betonkuchens um etwa 30 %.

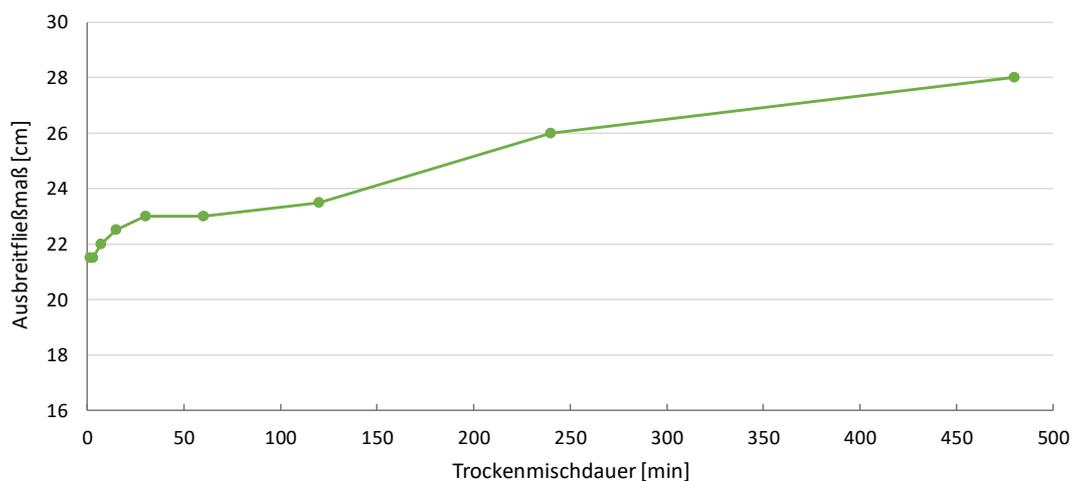


Abbildung 4.36: Ausbreitfließmaß der Mischungen der 3. Versuchsreihe

4.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse - Ausbreitfließmaß

In der Tabelle 4.7 sind die Ergebnisse der drei Versuchsreihen zu den Zeitpunkten von 48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen zusammengefasst.

Tabelle 4.7: Gegenüberstellung des Ausbreitfließmaßes der Versuchsreihen

Mischung	Ausbreitfließmaß [cm]		
	1. Versuchsreihe	2. Versuchsreihe	3. Versuchsreihe
M1,5min	20,0	20,5	21,5
M3min	20,5	21,5	21,5
M7min	21,0	22,0	22,0
M15min	21,0	22,0	22,5
M30min	22,5	23,0	23,0
M60min	24,5	25,0	23,0
M120min	22,5	24,5	23,5
M240min	25,5	25,5	26,0
M480min	27,5	27,0	28,0

Der Vergleich der drei Versuchsreihen erfolgt in 4.6.3.

4.4 Trichterauslaufzeit

4.4.1 1. Versuchsreihe - Trichterauslaufzeit

In der Abbildung 4.37 sind die Versuchsergebnisse des Trichterauslaufzeit-Versuchs graphisch dargestellt. Es zeigt sich eindeutig eine Abnahme der Trichterauslaufzeit, mit zunehmender Mischdauer des trockenen Prämix. Jedoch werden für die Mischungen M1,5min, M7min und M15min nahezu dieselben Werte erzielt. Auffallend ist außerdem, dass die Mischung M3min mit einer Dauer von 69 Sekunden das Maximum erreicht und somit weit über der Mischung M1,5min, mit nur 50 Sekunden, liegt.

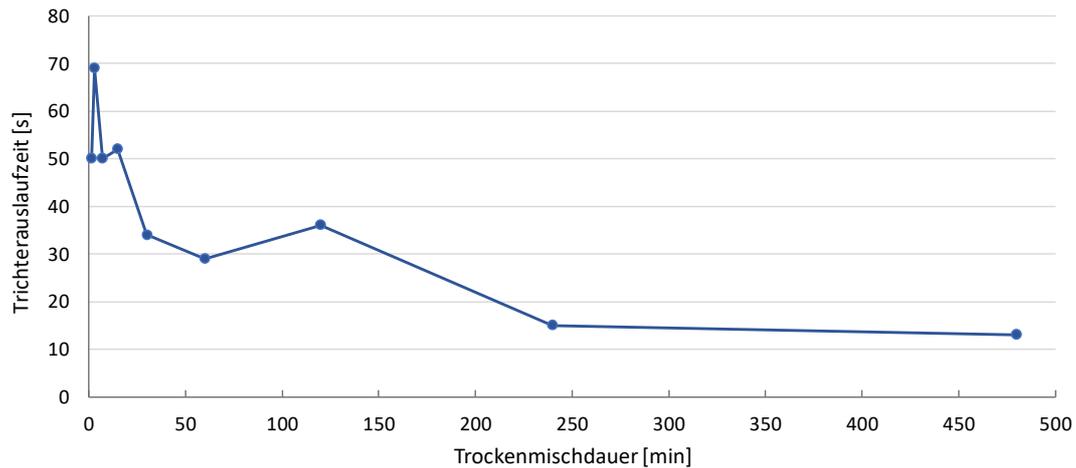


Abbildung 4.37: Trichterauslaufzeit der Mischungen der 1. Versuchsreihe

4.4.2 2. Versuchsreihe - Trichterauslaufzeit

Wie in der Abbildung 4.38 erkennbar, nimmt auch bei der 2. Versuchsreihe die Trichterauslaufzeit mit zunehmender Trockenmischdauer ab. Man kann vermuten, dass es sich bei dem Verlauf um eine exponentielle Abnahme handelt. Lediglich bei den kürzeren Mischzeiten erhalten wir sehr ähnliche Ergebnisse. Es ist anzunehmen, dass die relativ kurze Verlängerung der Trockenmischdauer noch keine wirklichen Änderungen bewirkt.

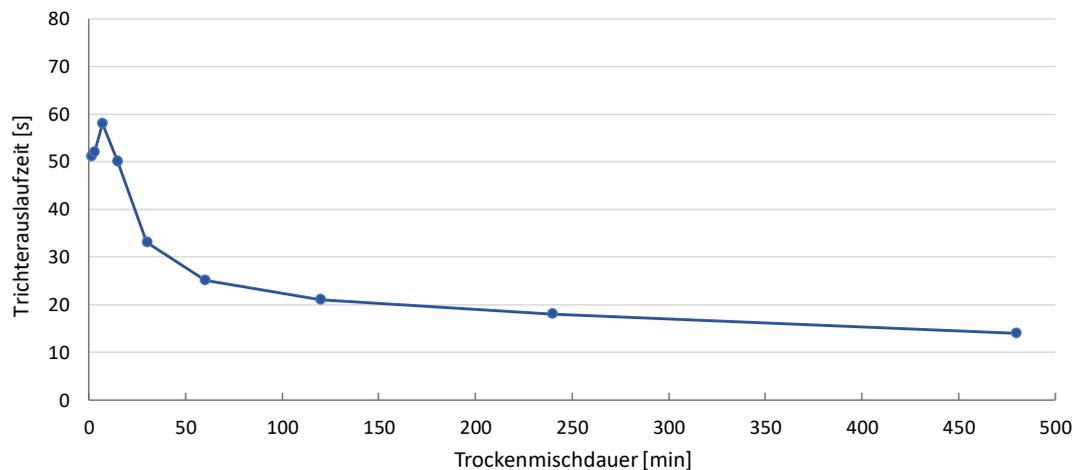


Abbildung 4.38: Trichterauslaufzeit der Mischungen der 2. Versuchsreihe

4.4.3 3. Versuchsreihe - Trichterauslaufzeit

Auch für die 3. Versuchsreihe ergibt sich mit Zunahme der Trockenmischdauer des Prämix, eine Abnahme der Trichterauslaufzeit (Abbildung 4.39). Auffallend ist die Mischung M60min, welche mit einer Auslaufzeit von 44 Sekunden höher als die Ergebnisse der Mischungen M7min bis M30min liegt.

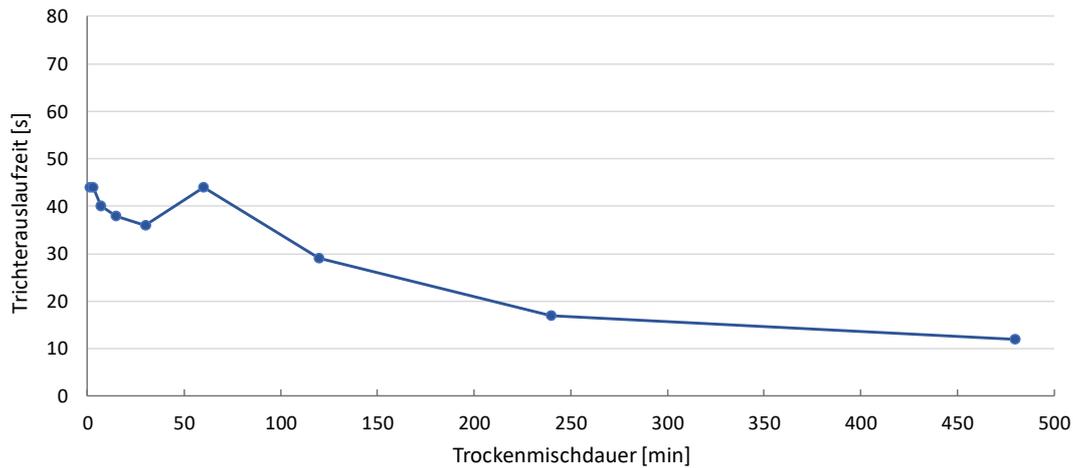


Abbildung 4.39: Trichterauslaufzeit der Mischungen der 3. Versuchsreihe

4.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse - Trichterauslaufzeit

Nachfolgend sind in der Tabelle 4.8 die Ergebnisse der Trichterauslaufzeit für die drei Versuchsreihen dargestellt.

Tabelle 4.8: Gegenüberstellung der Trichterauslaufzeit der Versuchsreihen

Mischung	Trichterauslaufzeit [s]		
	1. Versuchsreihe	2. Versuchsreihe	3. Versuchsreihe
M1,5min	50	51	44
M3min	69	52	44
M7min	50	58	40
M15min	52	50	38
M30min	34	33	36
M60min	29	25	44
M120min	36	21	29
M240min	15	18	17
M480min	13	14	12

In 4.6.4 werden die drei Versuchsreihen untereinander verglichen.

4.5 Luftgehalt und Frischbetondichte

4.5.1 1. Versuchsreihe - Luftgehalt und Frischbetondichte

In den Abbildungen 4.40 und 4.41 sind die Versuchsergebnisse des Luftporentopfes für die 1. Versuchsreihe dargestellt. Zum einen der Luftporengehalt und zum anderen die Rohdichte

des Frischbetons. Betrachtet man den Luftporengehalt, so zeigt sich, dass dieser mit zunehmender Trockenmischdauer des trockenen Prämix tendenziell abnimmt. Auffallend ist die Mischung M120min, welche mit 4,3 V.-% deutlich höher als die M60min liegt. Außerdem erzielen die Mischungen mit den Mischzeiten von 1,5 min bis 15 min ähnliche Ergebnisse. Eine signifikante Abnahme des Luftporengehalts ist erst ab der Mischung M15min zu erkennen.

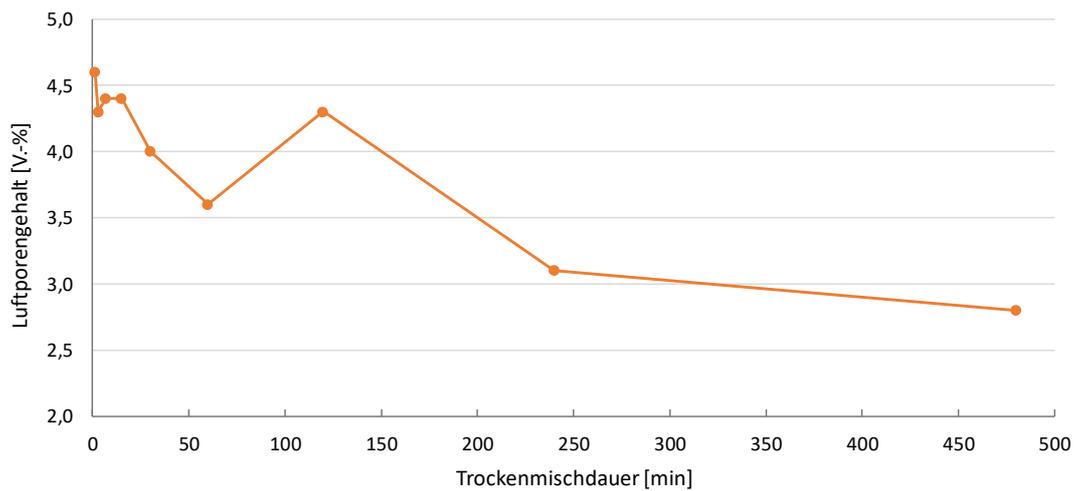


Abbildung 4.40: Luftporengehalt der Mischungen der 1. Versuchsreihe

In der graphischen Auswertung der Frischbetonrohddichte ist eine begrenzte Zunahme der Rohddichte mit der Trockenmischdauer zu vermuten. Lediglich die Mischung M240min erreicht abweichende Werte und liegt mit 2312 kg/m^3 etwas unter der Mischung M120min.

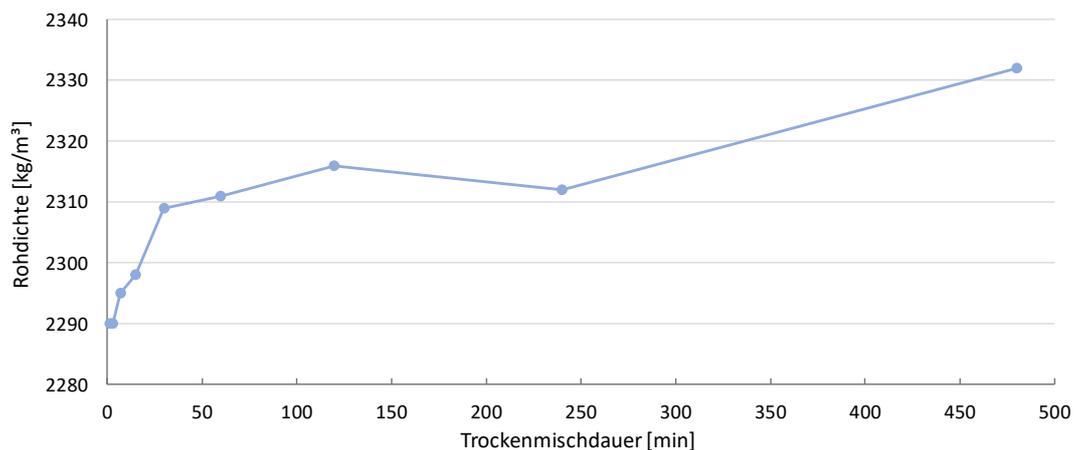


Abbildung 4.41: Frischbetonrohddichte der Mischungen der 1. Versuchsreihe

4.5.2 2. Versuchsreihe - Luftgehalt und Frischbetondichte

Auch bei der 2. Versuchsreihe nimmt der Luftporengehalt mit der Trockenmischdauer ab (Abbildung 4.42). Dieser nimmt von 4,3 V.-% der M1,5min bis zu 3,0 V.-% der M480min ab. Auffallend ist der vergleichsweise niedrige Luftporengehalt der Mischung M3min.

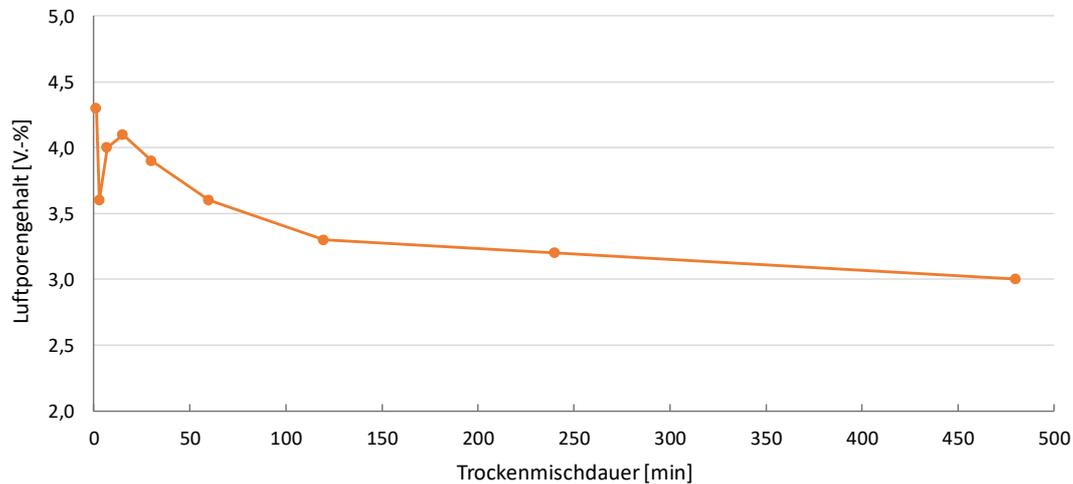


Abbildung 4.42: Luftporengehalt der Mischungen der 2. Versuchsreihe

Wie in Abbildung 4.43 zu erkennen erhalten wir für die Mischungen M1,5min bis M60min sehr ähnliche Ergebnisse der Rohdichte. Ein Anstieg ist erst ab der Mischung M120min zu erkennen. Das Maximum wird mit 2328 kg/m³ bei der M480min erreicht.

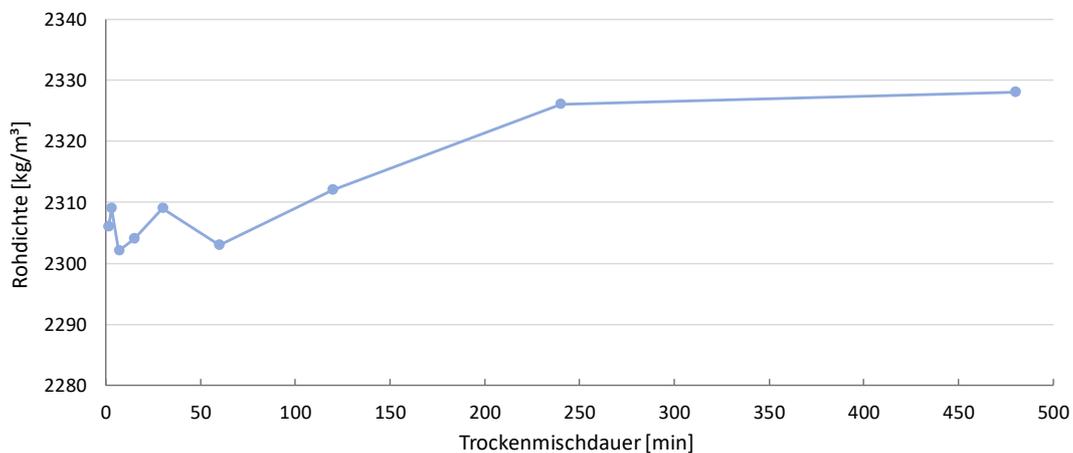


Abbildung 4.43: Frischbetonrohichte der Mischungen der 2. Versuchsreihe

4.5.3 3. Versuchsreihe - Luftgehalt und Frischbetondichte

Betrachtet man die Ergebnisse der 3. Versuchsreihe in den Abbildungen 4.44 und 4.45, so zeigt sich auch hier tendenziell eine Abnahme des Luftporengehalts und eine Zunahme der Rohdichte mit zunehmender Trockenmischdauer. Auffallend ist die Mischung M1,5min mit

nur einem vergleichsweise geringem Luftporengehalt von 3,7 V.-%. Der höchste Wert mit 4,4 V.-% wird somit von der Mischung M3min erreicht.

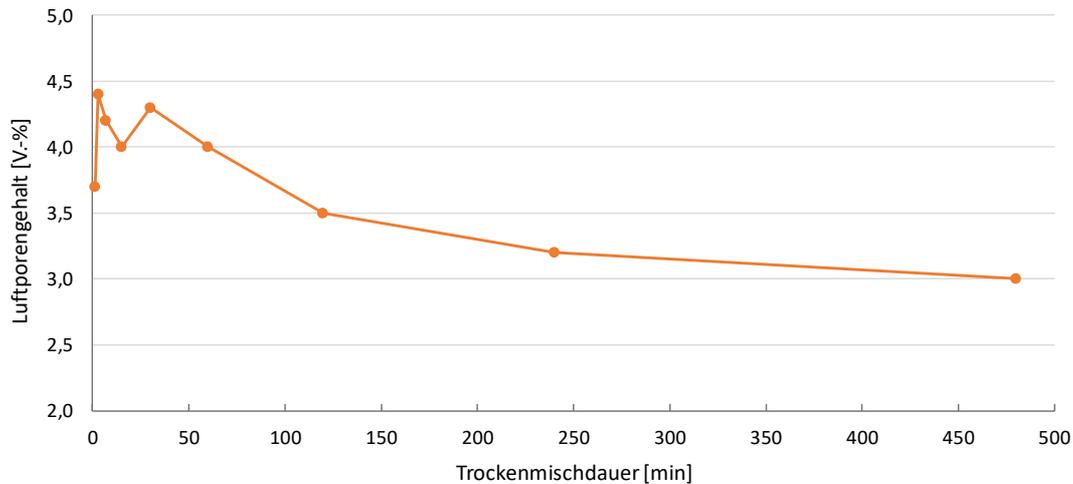


Abbildung 4.44: Luftporengehalt der Mischungen der 3. Versuchsreihe

Für die Rohdichte, dargestellt in der Abbildung 4.45, ergibt sich für die Mischungen M1,5min bis M60min ein ungeordnetes Bild. Eine Zunahme der Rohdichte ist erst ab der Mischung M30min mit einem Ergebnis von 2295 kg/m^3 zu vernehmen. Auffallend ist zudem, dass die Mischungen M1,5min, M3min und M15min alle den Wert von 2307 kg/m^3 erreichen und somit über dem Ergebnis der M30min liegen.

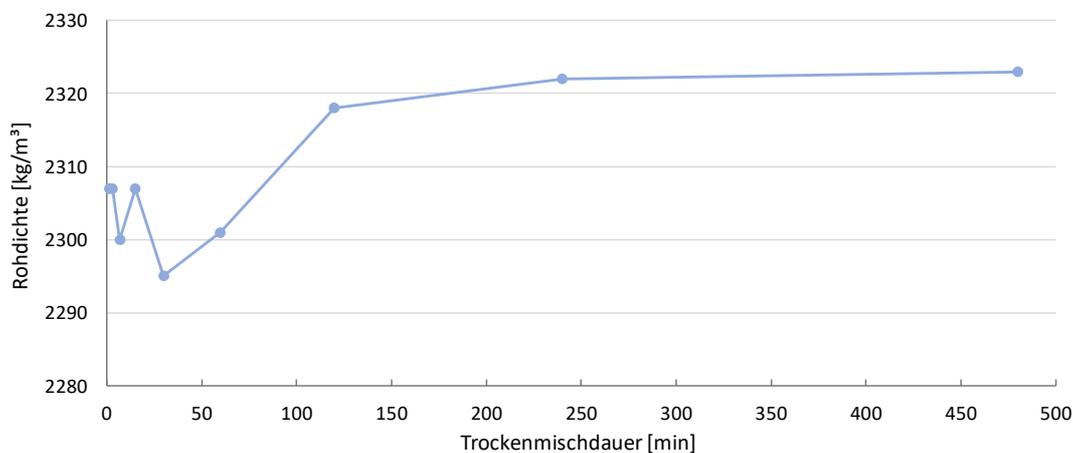


Abbildung 4.45: Frischbetonrohichte der Mischungen der 3. Versuchsreihe

4.5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse - Luftgehalt und Frischbetondichte

In den Tabellen 4.9 und 4.10 sind die Ergebnisse des Luftporengehalts sowie der Frischbetonrohichte für drei Versuchsreihen zu den Zeitpunkten von 48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen zusammengefasst.

Tabelle 4.9: Gegenüberstellung des Luftporengehalts der Versuchsreihen

Mischung	Luftporengehalt [V.-%]		
	1. Versuchsreihe	2. Versuchsreihe	3. Versuchsreihe
M1,5min	4,6	4,3	3,7
M3min	4,3	3,6	4,4
M7min	4,4	4,0	4,2
M15min	4,4	4,1	4,0
M30min	4,0	3,9	4,3
M60min	3,6	3,6	4,0
M120min	4,3	3,3	3,5
M240min	3,1	3,2	3,2
M480min	2,8	3,0	3,0

Tabelle 4.10: Gegenüberstellung der Frischbetonrohddichte der Versuchsreihen

Mischung	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		
	1. Versuchsreihe	2. Versuchsreihe	3. Versuchsreihe
M1,5min	2290	2306	2307
M3min	2290	2309	2307
M7min	2295	2302	2300
M15min	2298	2304	2307
M30min	2309	2309	2295
M60min	2311	2303	2301
M120min	2316	2312	2318
M240min	2312	2326	2322
M480min	2332	2328	2323

4.6 Vergleich der Versuchsreihen

Um mögliche Veränderungen, einhergehend mit der Dauer der Lagerung des trockenen Prämix zu erkennen, werden die drei Versuchsreihen mit dem Alter von 48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen untereinander verglichen. Anschließend werden die Ergebnisse des Vergleichs im Absatz 4.6.6 zusammengefasst und interpretiert

Der in 4.2.1 beschriebene Fehler beim Nassmischen der M120min der 1. Versuchreihe, wird zugunsten eines korrekten Vergleichs in den folgenden Grafiken berücksichtigt. Unter

Annahme eines exponentiellen Verlaufes der Ergebniskurven wird als Ergebnis der 1. Versuchsreihe für die Mischung M120min das Mittel aus der Mischung M60min und M240min angenommen.

4.6.1 Mischleistung und Mischtemperatur

Die Abbildung 4.46 zeigt die Stabilisationszeit t_s für die Mischungen der drei Versuchsreihen. Im Durchschnitt ergibt sich, dass die Stabilisationszeit der 1. Versuchsreihe 116,3 s beträgt (für M120min wird dabei wie in 4.6 beschrieben, der korrigierte Wert verwendet). Die 2. und 3. Versuchsreihe kommen hingegen auf eine durchschnittliche Zeit von 113,1 und 113,3 s. Diese Differenz von etwa 3 s resultiert aus den erhöhten Stabilisationszeiten der 1. Versuchsreihe der Mischung M3min bis M15min. Auffallend sind die Ergebnisse der Mischung M240min und M480min, welche bei der 2. Versuchsreihe etwa 10 s über jener der 1. Versuchsreihe liegen.

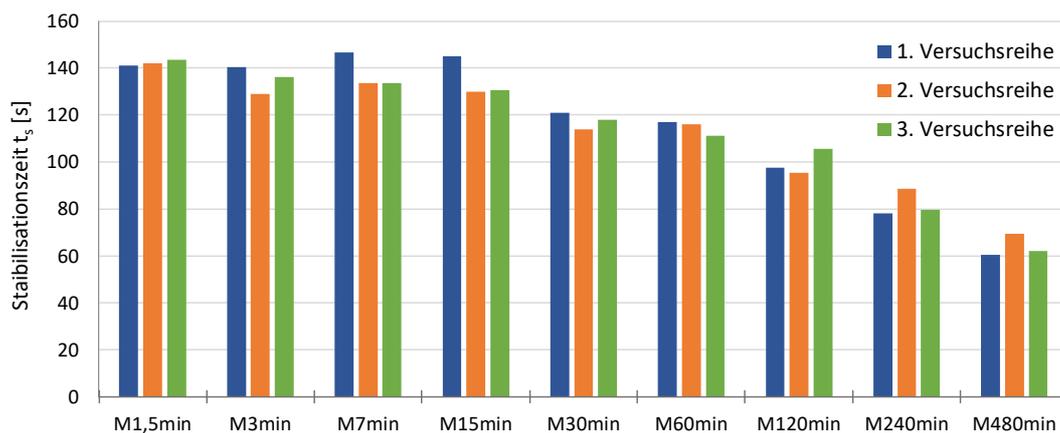


Abbildung 4.46: Stabilisationszeit t_s über die Trockenmischdauer der drei Versuchsreihen

Die Stabilisationszeit t_s zeigt auf, bei welchem frühestmöglichen Zeitpunkt optimale Betoneigenschaften erreicht sind (siehe 2.2.4). Um eine allgemeine Aussage für UHPC treffen zu können, werden die Ergebnisse der Versuchsreihen in Abbildung 4.47 aus Gründen der Übersicht gemittelt dargestellt. Man erkennt eine exponentielle Abnahme der Stabilisationszeit bei zunehmender Mischzeit der trockenen Ausgangsmaterialien. Lediglich die Mischung M3min ergibt im Durchschnitt um 2,6 s geringere Zeiten als die M7min.

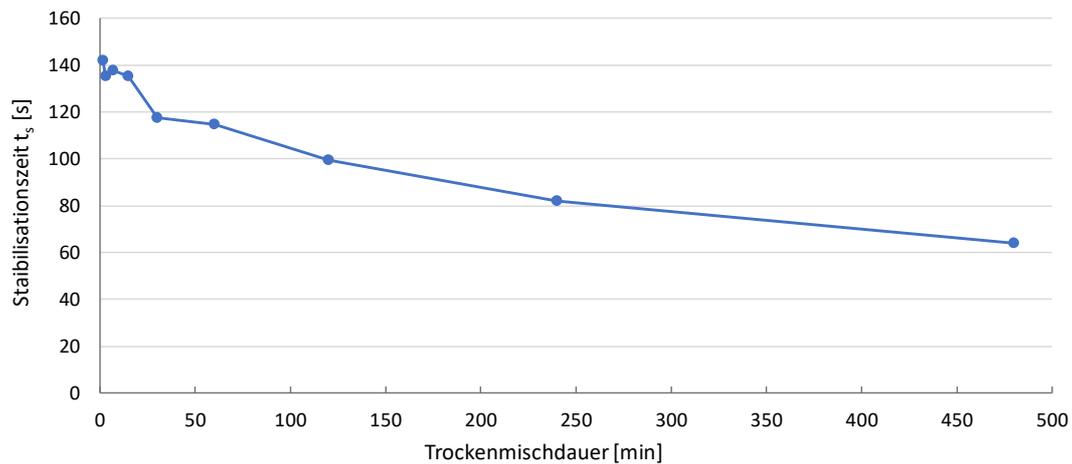


Abbildung 4.47: Stabilisationszeit t_s über die Trockenmischdauer der Versuchsreihen

Laut *Mazanec* ist die Stabilisationszeit t_s von der relativen Feststoffkonzentration ϕ/ϕ_{\max} und der Adsorptionsgeschwindigkeit der Fließmittelpolymeren abhängig [3]. Mit zunehmendem Verhältnis von ϕ/ϕ_{\max} ist ein Anstieg von t_s festzustellen. Da mit zunehmender Trockenmischdauer die Packungsdichte bzw. die relative Feststoffkonzentration der Mischung erhöht wird, ist anzunehmen, dass die Adsorptionsgeschwindigkeit der Fließmittelpolymeren verantwortlich für die Abnahme der Stabilisationszeit ist. Die Adsorptionsgeschwindigkeit ist beim Mischprozess vorwiegend von dem Transportprozess der Fließmittelpolymeren bei der Flüssigkeitsverteilung abhängig. Mit zunehmender Homogenisierung der feinen Ausgangsmaterialien des UHPC werden interpartikuläre Zwischenräume verkleinert und somit sind die Transportwege kürzer [3].

In Abbildung 4.48 ist die Nettoleistung P des Mixers kurz nach Erreichen der Stabilisationszeit t_s dargestellt. Für die Mischungen M1,5min bis M30min ergeben sich sehr ähnliche Ergebnisse für die drei Versuchsreihen. Lediglich bei der Mischung M7min fällt die Nettomischleistung der 1. Versuchsreihe mit 0,401 kW etwas höher aus. Hervorstechend sind die Nettomischleistungen für die 3. Versuchsreihe bei den Mischungen M60min bis M480min. Diese liegen in diesem Bereich im Durchschnitt etwa 18 % über jenen der 1. und 13 % über jenen der 2. Versuchsreihe. Daraus resultiert, dass der Durchschnitt aller Trockenmischdauern der 3. Versuchsreihe mit 0,334 kW über der 1. und 2. Versuchsreihe mit 0,312 und 0,319 kW liegt.

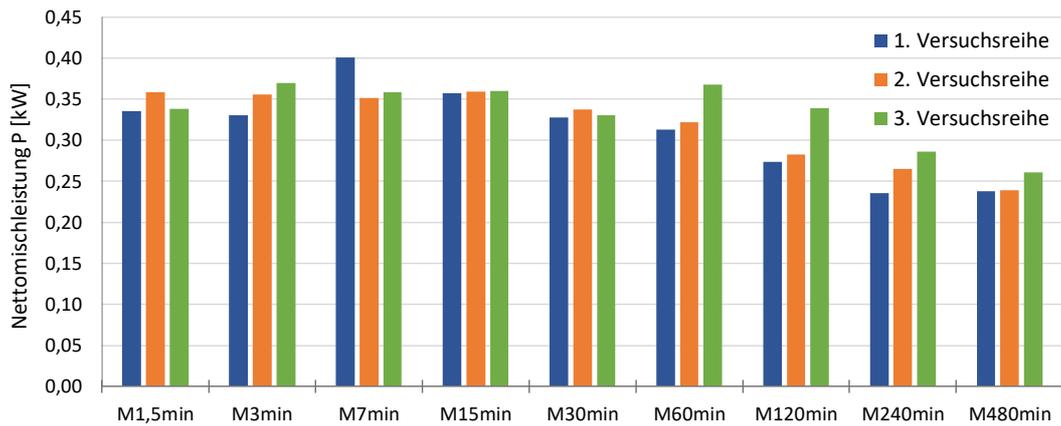


Abbildung 4.48: Nettomischleistung P nach Erreichen von t_s über die Trockenmischdauer für die drei Versuchsreihen

Die Mischendtemperatur der einzelnen Mischungen der drei Versuchsreihen ist in der Abbildung 4.49 zu erkennen. Im Durchschnitt ergibt die Mischendtemperatur der 1. Versuchsreihe $33,4\text{ }^\circ\text{C}$, der 2. Versuchsreihe $31,6\text{ }^\circ\text{C}$ und der 3. Versuchsreihe $32,7\text{ }^\circ\text{C}$. Dieser hohe Mittelwert der 1. Versuchsreihe resultiert vor allem aus den Ergebnissen der Mischung M15min, M30min und M240min. Auffallend ist, dass die Werte der 2. Versuchsreihe nahezu stets geringer als jene der anderen beiden ist. Anzumerken ist, dass die Temperaturdifferenz zwischen den maximal und minimal gemessenen Werten nur etwa $3\text{ }^\circ\text{C}$ beträgt.

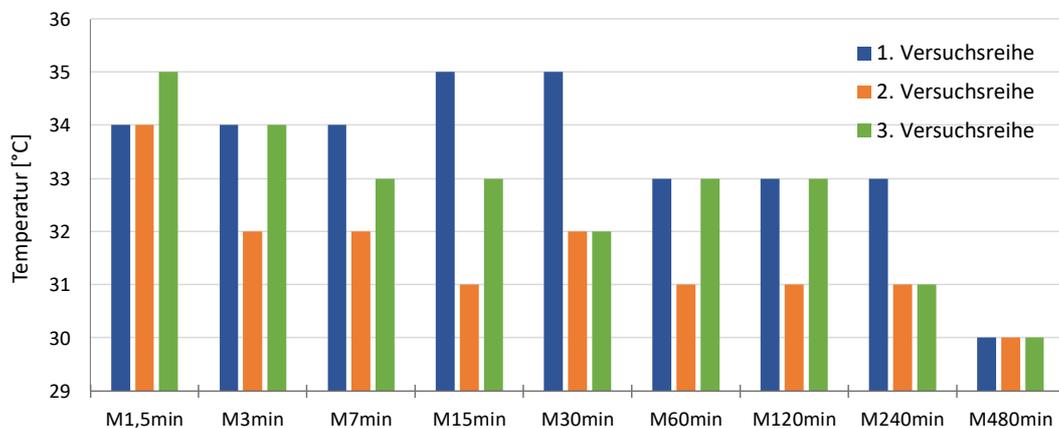


Abbildung 4.49: Mischendtemperatur der Mischungen der drei Versuchsreihen

4.6.2 Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie

In der Abbildung 4.50 ist die dynamische Fließgrenze τ_{0D} der Mischungen der Versuchsreihen dargestellt. Nimmt man den Mittelwert der Ergebnisse, so ergibt sich für die 1. Versuchsreihe eine mittlere dynamische Fließgrenze von $23,0\text{ Pa}$. Die 2. und 3. Versuchsreihe kommen auf einen durchschnittlichen Wert von $23,6$ und $23,4\text{ Pa}$. Die

2. Versuchsreihe erreicht bei den Mischungen M1,5min bis M15min vergleichsweise hohe Ergebnisse, wohingegen die 3. Versuchsreihe eine hohe dynamische Fließgrenze für die Mischung M60min und M120min erzielt.

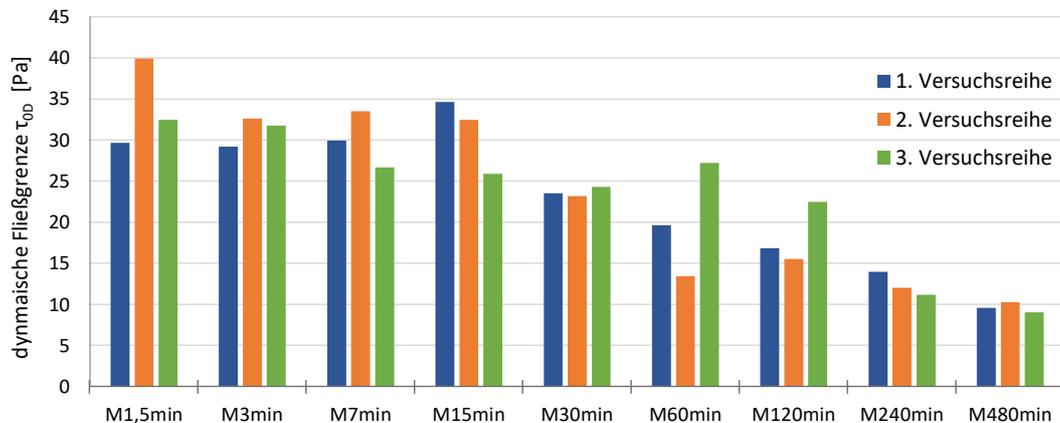


Abbildung 4.50: Dynamische Fließgrenze der Mischungen der drei Versuchsreihen

Die Abbildung 4.43 zeigt die Viskosität η der drei Versuchsreihen. Es ergeben sich sehr ähnliche Ergebnisse für die Versuchsreihen. Im Durchschnitt ergibt die Viskosität der 1. Versuchsreihe 72,8 Pa·s, der 2. Versuchsreihe 65,8 Pa·s und der 3. Versuchsreihe 68,0 Pa·s. Dieses Resultat beruht auf der erhöhten Viskosität der 1. Versuchsreihe für die Mischungen M3min bis M15min. Auffallend ist zudem der hohe Wert der 3. Versuchsreihe der M120min.

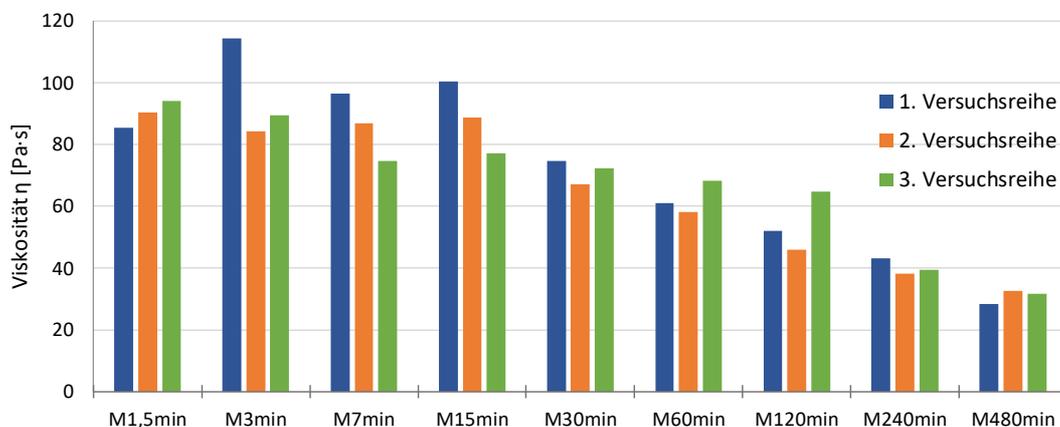


Abbildung 4.51: Viskosität der Mischungen der drei Versuchsreihen

Vergleicht man die Thixotropie der Versuchsreihen in Abbildung 4.52, so ergibt sich ein sehr ähnliches Bild zur dynamischen Fließgrenze (siehe Abbildung 4.50). Lediglich die Thixotropie der Mischung M3min der 1. Versuchsreihe fällt weitaus geringer aus. Da die Thixotropie mit der dynamischen Fließgrenze nahezu übereinstimmt, kann man annehmen, dass es sich bei diesem Wert um einen Messfehler handelt. Der Mittelwert für die Thixotropie der 1. Versuchsreihe ergibt etwa 0,17. Die 2. und 3. Versuchsreihe kommen auf einen

durchschnittlichen Wert von etwa 0,19 und 0,18. Dabei wurde für die Mischung M3min der 1. Versuchsreihe das Mittel aus der Mischung M1,5min und M7min angenommen.

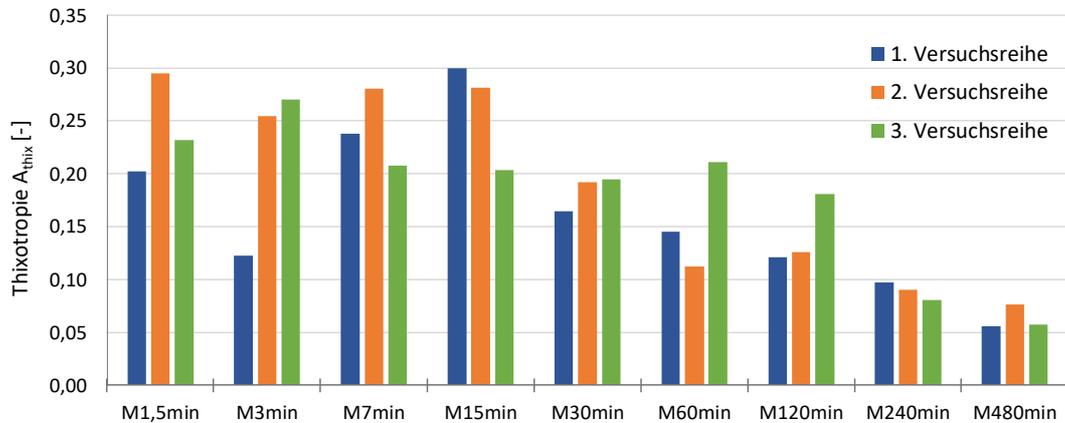


Abbildung 4.52: Thixotropie der Mischungen der drei Versuchsreihen

4.6.3 Ausbreitfließmaß

Betrachtet man die Werte des Ausbreitfließmaßes der drei Versuchsreihen, so zeigt sich, dass die 1. Versuchsreihe bei fast allen Mischungen geringere Werte als jene der 2. und 3. Versuchsreihe erzielt (Abbildung 4.53). Ermittelt man den Durchschnitt des Ausbreitfließmaßes für die einzelnen Mischungen, so ergibt sich für die 1. Versuchsreihe etwa 23,1 cm, wohingegen wir für die 2. und 3. Versuchsreihe einen Mittelwert von circa 23,4 cm erhalten.

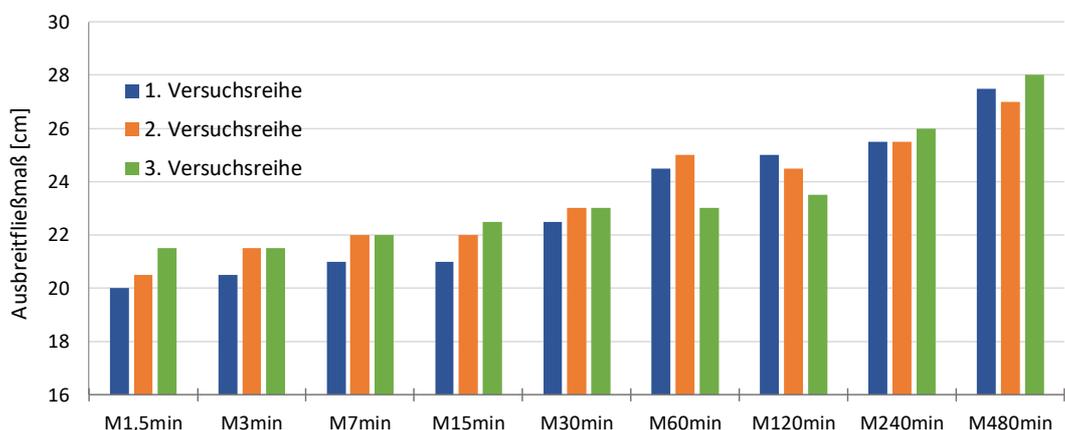


Abbildung 4.53: Ausbreitfließmaß der Mischungen der drei Versuchsreihen

4.6.4 Trichterauslaufzeit

In Abbildung 4.54 sind die Ergebnisse der Trichterauslaufzeit der Versuchsreihen graphisch zusammengefasst. Der Mittelwert für die Trichterauslaufzeit der 1. Versuchsreihe ergibt

37,1 s. Die 2. und 3. Versuchsreihe kommen auf eine durchschnittliche Zeit von 35,8 und 33,8 s. Man kann also annehmen, dass mit zunehmenden Alter des trockenen Prämix, die Trichterauslaufzeit tendenziell abnimmt. Ein kontinuierlicher Verlauf ist jedoch nicht erkennbar, da sich ab der Mischdauer von 30 Minuten erhöhte Werte der 3. Versuchsreihe und geringere Werte der 1. Versuchsreihe zeigen.

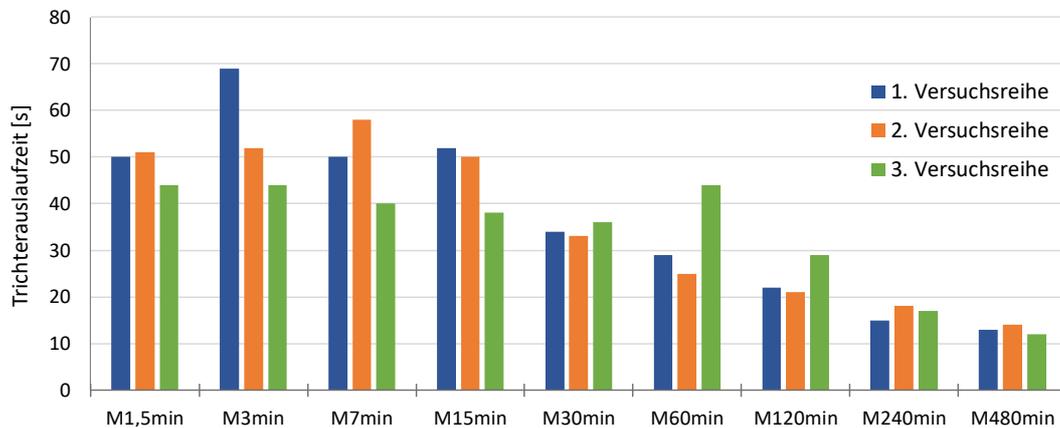


Abbildung 4.54: Trichterauslaufzeit der Mischungen der drei Versuchsreihen

4.6.5 Luftgehalt und Frischbetondichte

Betrachtet man die Werte des Luftporengehalts der drei Versuchsreihen graphisch, so zeigt sich keine auffällige Tendenz (Abbildung 4.55). Hervorstechend ist, dass sich für die 2. Versuchsreihe bei der M3min und für die 3. Versuchsreihe bei der M1,5min ein eher niedriger Wert ergibt. Im Durchschnitt erreicht der Luftporengehalt der 1. Versuchsreihe 3,8 V.-%, der 2. Versuchsreihe 3,7 V.-% und der 3. Versuchsreihe 3,8 V.-%.

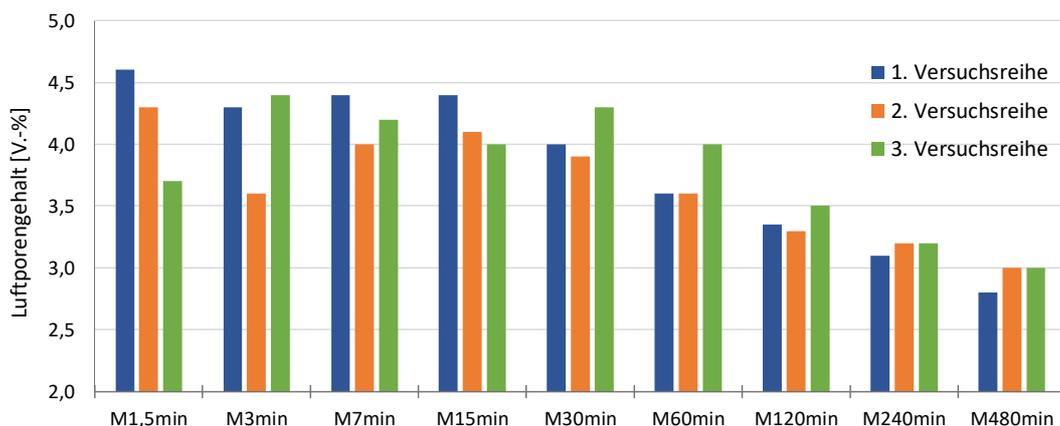


Abbildung 4.55: Luftporengehalt der Mischungen der drei Versuchsreihen

In der Abbildung 4.56 sind zum Vergleich die Frischbetonrohddichten für die einzelnen Versuchsreihen dargestellt. Der Mittelwert für die Ergebnisse beträgt für die

1. Versuchsreihe 2305 kg/m³, die 2. Versuchsreihe 2311 kg/m³ und die 3. Versuchsreihe 2309 kg/m³. Es ist nicht wirklich eine Abhängigkeit der Frischbetonrohddichte vom Alter des Prämix zu erkennen. Außergewöhnlich ist, dass die Ergebnisse der 2. und 3. Versuchsreihe bei der M1,5min und M3min besonders hoch ausfallen.

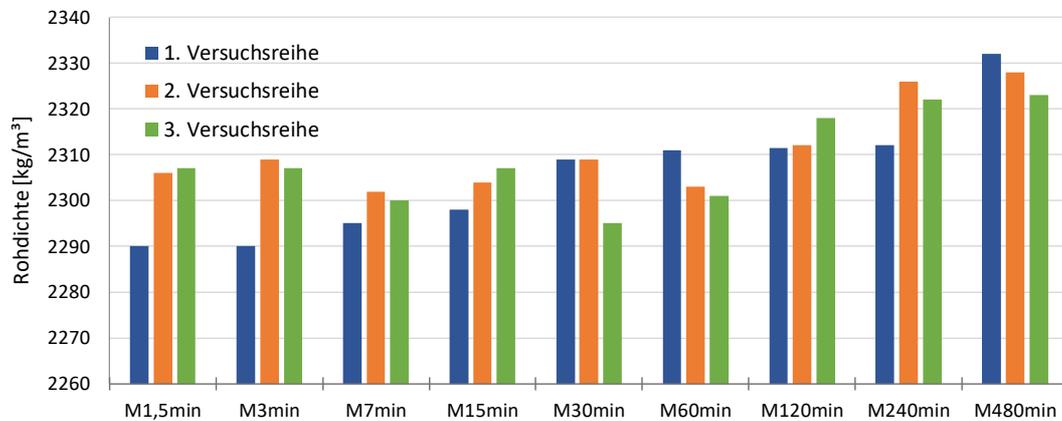


Abbildung 4.56: Frischbetonrohddichte der Mischungen der drei Versuchsreihen

4.6.6 Zusammenfassung des Vergleichs

Um eine klare Aussage bezüglich der Veränderung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons mit dem Alter des Prämix treffen zu können, werden im Folgenden die bereits genannten Mittelwerte der einzelnen Prüfverfahren nochmals zusammengefasst.

Neben der Trichterauslaufzeit ist die ermittelte Nettomischleistung P , kurz nach Erreichen der Stabilisationszeit, sowie die Mischendtemperatur ein Maß für die Viskosität η des Betons (siehe 3.4.1.2). Die Thixotropie gibt darüber hinaus die zeitliche Veränderung der Viskosität wieder (siehe 2.3.3.2, Zeitabhängiges Fließverhalten). In der Abbildung 4.57 sind die Mittelwerte dieser Ergebniswerte zusammen mit jenen der Viskosität, ermittelt aus dem Rheometerversuch, in Abhängigkeit vom Alter des Prämix dargestellt. Man erhält aufgrund der drei durchgeführten Versuchsreihen im Alter des Prämix von 48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen jeweils drei Mittelwerte. Im Sinne einer einheitlichen Übersicht wird hier die Abweichung der Mittelwerte der drei Versuchsreihen dargestellt. Die 1. Versuchsreihe gilt hierfür als Basis.

Man kann erkennen, dass die Werte der Nettomischleistung P mit der Dauer der Lagerung des trockenen Prämix zunehmen. Wohingegen die Werte der Trichterauslaufzeit mit dem Alter des Prämix abnehmen. Für die ermittelte Viskosität aus dem Rheometerversuch sowie die Mischendtemperatur beim Nassmischen lässt sich wiederum zunächst eine Abnahme

und dann eine Zunahme der Ergebniswerte erkennen. Die maximale Abweichung ergibt sich dabei bei der gemessenen Viskosität von etwa 9,7% für ein Alter von 28 Tagen bzw. 4 Wochen. Die Thixotropie nimmt zunächst um circa 10,6% zu und nimmt dann wieder bis zu einer etwa 6,1 %igen Abweichung von der 1. Versuchsreihe ab.

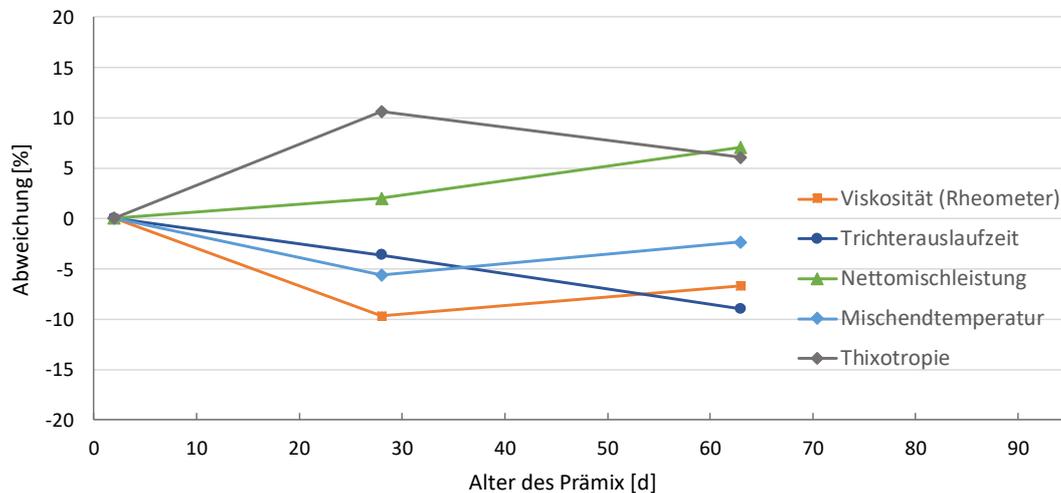


Abbildung 4.57: Abweichung der Ergebnisse für die Viskosität in Abhängigkeit des Alters des Prämix. Berücksichtigt man, dass alle Ergebniswerte ein Maß für die Viskosität sind, so lässt sich keine einheitliche Tendenz der Viskosität ausmachen. Es ist zu vermuten, dass es durch die luftdichte und trockene Lagerung des Prämix über einer Dauer von 63 Tagen bzw. 9 Wochen zu nur sehr geringen und nicht nachweisbaren Veränderungen der Viskosität kommt und die hier vorkommenden geringen Abweichungen der Werte aus Ungenauigkeiten im Versuch- und Messablauf der drei unterschiedlichen Versuchsreihen resultieren.

In der Abbildung 4.58 ist die Abweichung der dynamische Fließgrenze τ_{0D} aus dem Rheometerversuch, sowie des Ausbreitfließmaßes, in Abhängigkeit vom Alter der Prämix, dargestellt. Das Ausbreitfließmaß beschreibt ebenfalls die dynamische Fließgrenze einer Mischung. Wobei zu beachten ist, dass eine Zunahme des Ausbreitfließmaßes einer Abnahme der dynamischen Fließgrenze entspricht. In Abbildung 4.58 zeigt sich eine Zunahme des Ausbreitfließmaßes um etwa 1,7 % für die 2. und 3. Versuchsreihe. Dem gegenüber steht eine Zunahme der dynamischen Fließgrenze, ermittelt aus dem Versuch des Rheometers, von circa 2,9 % bzw. 2,0%. Da sich die zwei Ergebnisse widersprechen und die Abweichungen sehr gering sind, kann man auch hier davon ausgehen, dass sich die dynamische Fließgrenze mit dem Alter des Prämix nicht verändert. Dies lässt sich erneut durch die luftdichte und trockene Lagerung des trockenen Gemisches erklären.

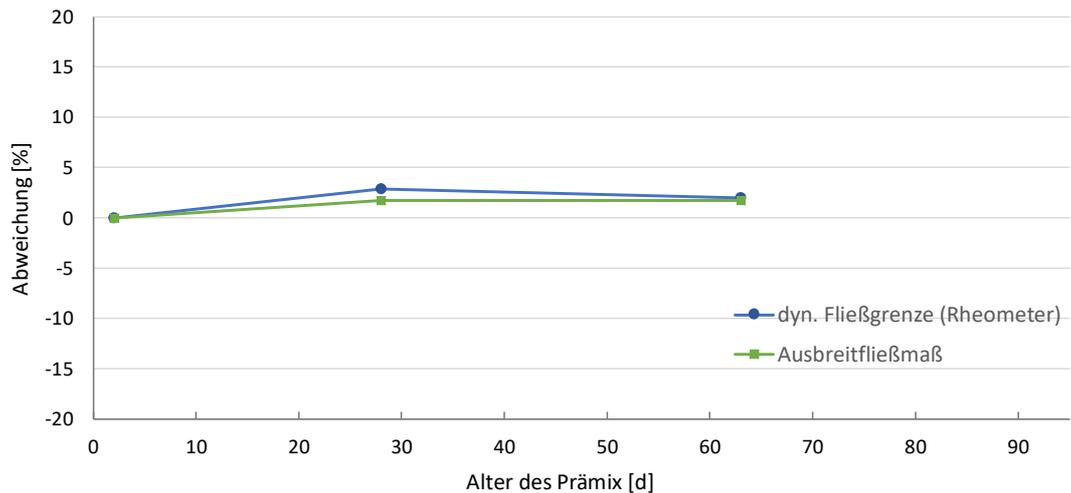


Abbildung 4.58: Abweichung der Ergebnisse für die dynamische Fließgrenze in Abhängigkeit des Alters des Prämix

Die Abbildung 4.59 zeigt die Abweichung des Luftgehaltes sowie der Frischbetonrohddichte mit Zunahme des Alters des Gemisches aus den trockenen Ausgangsmaterialien. Die Rohddichte weicht bei der 2. Versuchsreihe nur 0,24 % und bei der 3. Versuchsreihe 0,15 % von den Ergebnissen der ersten 1. Versuchsreihe ab. Der Luftporengehalt nimmt mit der 2. Versuchsreihe um etwa 4,5% ab und steigt dann wieder bis zu einer Abweichung von circa 0,7 % von der 1. Versuchsreihe. Die zunehmende Rohddichte steht im Zusammenhang mit dem abnehmenden Luftgehalt. Durch die niedrigere Porosität des Betons nimmt die Rohddichte ab.

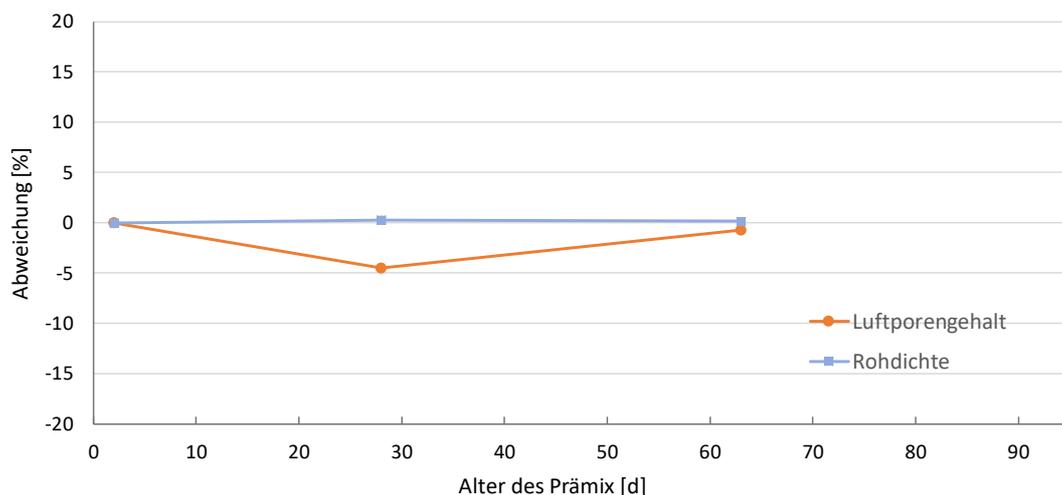


Abbildung 4.59: Abweichung der Ergebnisse für den Luftgehalt und die Frischbetonrohddichte abhängig vom Alter des Prämix

Auch hier zeigt sich eine sehr geringe Veränderung mit der Dauer der Lagerung des Prämix. Man kann davon ausgehen, dass der Luftgehalt sowie die Frischbetonrohddichte unabhängig

vom Alter des Prämix sind. Die geringen Abweichungen zwischen den drei Versuchsreihen resultieren höchstwahrscheinlich aus Messungenauigkeiten.

Zusammenfassend kann man also davon ausgehen, dass sich die rheologischen Eigenschaften von Ultrahochfesten Beton bei entsprechender trockener und luftdichter Lagerung des trockenen Prämix über einen Zeitraum von bis zu neun Wochen nicht nachweisbar verändern.

4.7 Zusammenhänge und Interpretation

Um mögliche Zusammenhänge und Unstimmigkeiten zu erkennen, werden im Folgenden die Ergebnisse ausgesuchter Frischbetonprüfungen verglichen. Der besseren Übersicht halber und um mögliche Messungenauigkeiten auszugleichen werden die Ergebnisse der drei Versuchsreihen gemittelt dargestellt. So erhält man für jedes Prüfverfahren eine gemittelte Kurve. Im Anschluss werden die Ergebnisse im Absatz 4.7.8 zusammenfassend interpretiert.

4.7.1 Ausbreitfließmaß und Luftgehalt

In der Abbildung 4.60 wird der Zusammenhang des Luftporengehalts mit dem Ausbreitfließmaß der einzelnen Frischbetonmischungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die beiden Kurven sich gegensätzlich verhalten. Ein geringerer Luftgehalt bedeutet ein höheres Ausbreitfließmaß. Dies ist außergewöhnlich, da üblicherweise mit einem erhöhten Luftgehalt, ein erhöhtes Ausbreitfließmaß des UHPC einhergeht [28] [29]. Normalerweise verhält sich die Luft wie eine Art Schmiermittel, das die innere Reibung der Masse herabsetzt. Man kann annehmen, dass es aufgrund der längeren Trockenmischdauer zu einer verbesserten Fließfähigkeit kommt und diese dem Schmiereffekt des Luftgehalt entgegenwirken und ihn überwiegen. Diese verbesserten rheologischen Eigenschaften mit zunehmender Trockenmischdauer werden im Kapitel 4.7.8 im Detail erläutert.

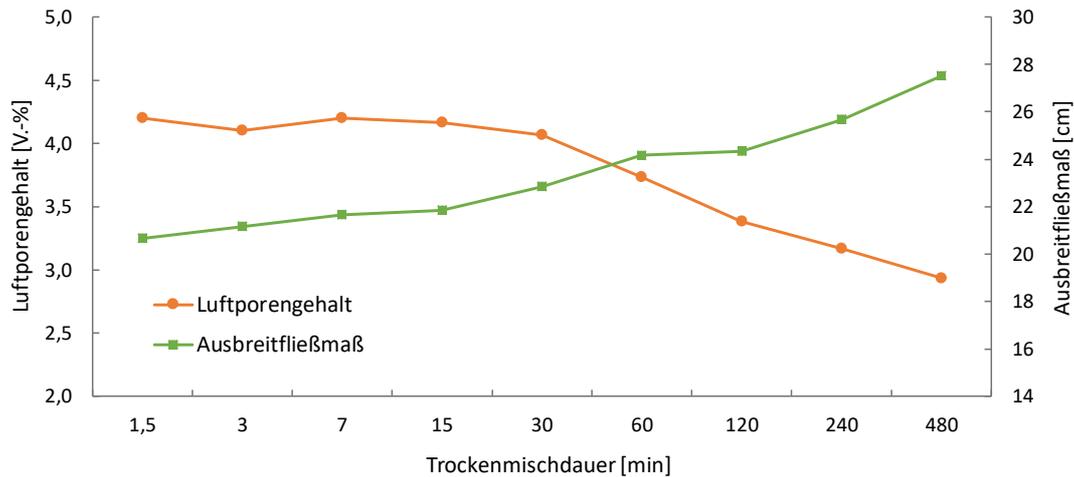


Abbildung 4.60: Vergleich Luftporengehalt und Ausbreitfließmaß der Mischungen

4.7.2 Frischbetonrohddichte und Luftgehalt

In der Abbildung 4.61 wird der Luftgehalt mit der Frischbetonrohddichte der durchgeführten Mischungen verglichen. Es zeigt sich, dass die zwei Kurven nahezu gegensinnig kongruent sind. Bei Abnahme des Luftporengehalt nimmt die Frischbetonrohddichte zu. Grund dafür ist die erhöhte Packungsdichte der Mischung bei einem geringeren Luftporengehalt. Da es sich hier um vergleichsweise geringe Abweichungen der Ergebnisse mit zunehmender Trockenmischdauer handelt, kann man davon ausgehen, dass der inkongruente Bereich der Mischungen M1,5min bis M3min aus Messungenauigkeiten resultiert.

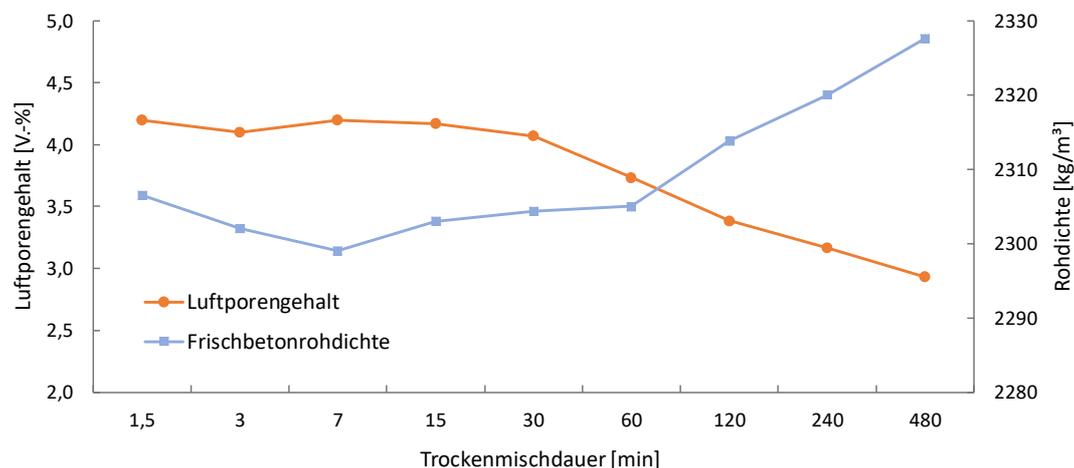


Abbildung 4.61: Vergleich Luftporengehalt und Frischbetonrohddichte der Mischungen

Die Abbildung 4.62 zeigt den Luftporengehalt und die Frischbetondichte über die Trockenmischdauer (die Achse der Rohddichte ist umgekehrt gewählt). Es ist tendenziell eine exponentielle Abnahme beider Kurven zu erkennen. Grund für die Abnahme ist, dass mit

zunehmender Trockenmischdauer die trockenen Ausgangsmaterialien besser homogenisiert werden, wodurch das Verhältnis von aktueller Feststoffkonzentration ϕ zur maximal möglichen Feststoffkonzentration ϕ_{\max} erhöht wird und somit eine höhere Packungsdichte mit kleineren Hohlräumen vorliegt. Da sich außerdem mit zunehmender Mischzeit die Mischgüte einem Maximum nähert (siehe 2.2.4, Abbildung 2.13), ergibt sich ein exponentieller Verlauf beider Kurven. Auffallend ist, dass sich für die Werte der Mischungen M1,5min bis M30min sehr ähnliche Werte ergeben. Man kann annehmen, dass die relativ kurze Verlängerung der Trockenmischdauer noch keine wirklichen Änderungen bedingen oder dass aufgrund der geringen Varianz der Werte in diesem Bereich, durch Messungenauigkeiten kein einheitlicher Verlauf ersichtlich ist.

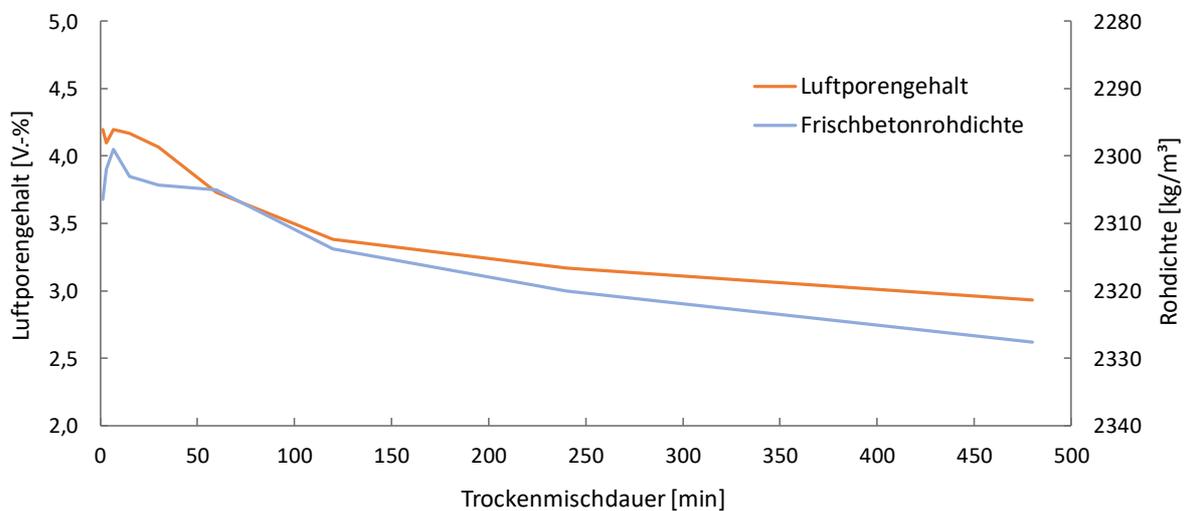


Abbildung 4.62: Luftporengehalt und Frischbetonrohddichte über die Trockenmischdauer

4.7.3 Mischendtemperatur und Nettomischleistung

Vergleicht man die Mischendtemperatur und die Nettomischleistung P nach Erreichen der Stabilisationszeit, so ergeben sich für die einzelnen Frischbetonmischungen die in Abbildung 4.63 dargestellten Kurvenverläufe. Es ist zu erwarten, dass die beiden Kurven zueinander kongruent sind, da mit zunehmender Homogenisierung die Verzahnung zwischen den reibenden Gesteinskörnungen abnimmt und somit die nötige Leistung des Mixers als auch die Temperatur der Mischung aufgrund geringerer Reibung sinkt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kurven zwar tendenziell beide gleich verlaufen, aber nicht kongruent zueinander sind. Der Grund für die geringen qualitativen Abweichungen könnte sein, dass die

Nettomischleistung direkt nach Erreichen der Stabilisationszeit ermittelt wurde und die Temperatur hingegen erst am Mischende.

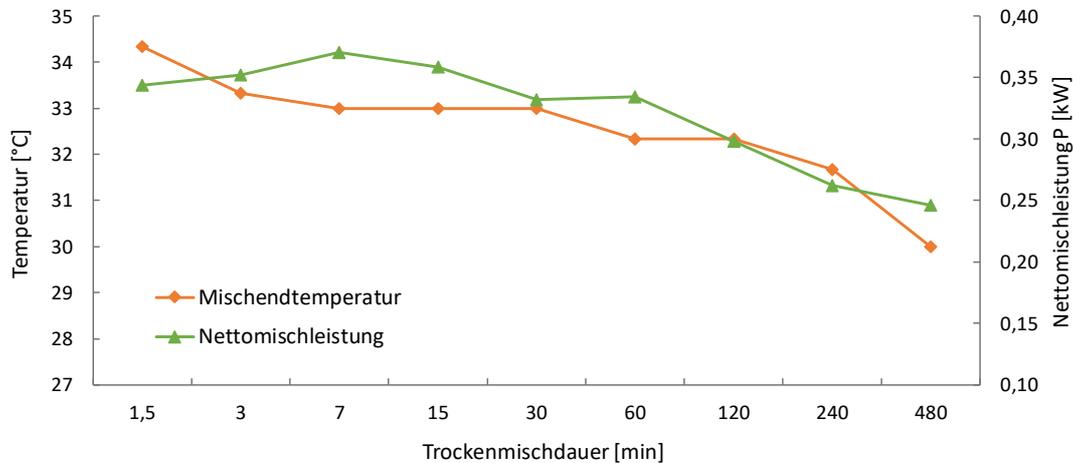


Abbildung 4.63: Vergleich Mischendtemperatur und Nettomischleistung der Mischungen

4.7.4 Dynamische Fließgrenze und Ausbreitfließmaß

Die Abbildung 4.64 zeigt den Vergleich der dynamischen Fließgrenze, welche im Rheometer ermittelt wurde, mit dem Ausbreitfließmaß. Man kann erkennen, dass die beiden Kurvenverläufe gegenseitig kongruent sind. Die Erklärung dafür ist, dass das Ausbreitfließmaß selbst ein Maß für die dynamische Fließgrenze einer Mischung ist. Ein hohes Ausbreitfließmaß beschreibt eine niedrige dynamische Fließgrenze.

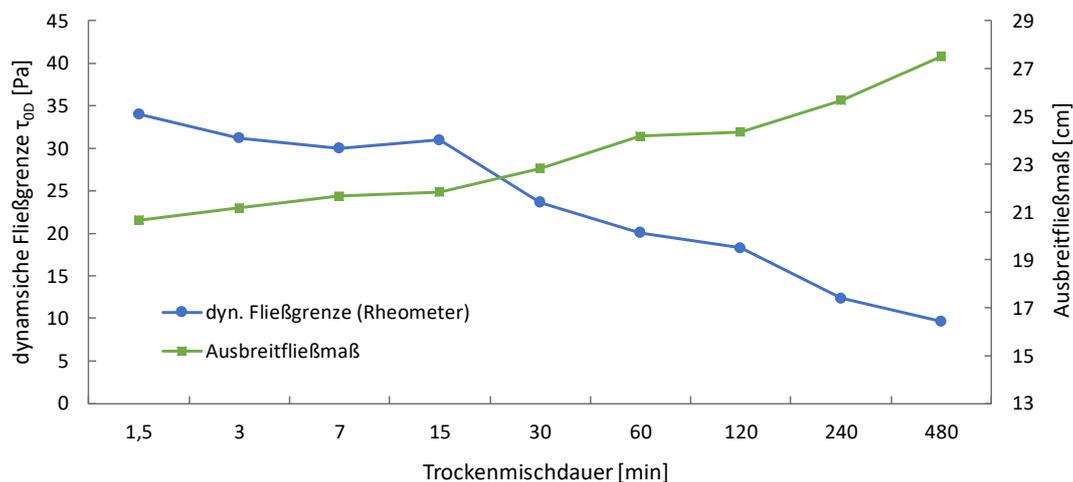


Abbildung 4.64: Vergleich dynamische Fließgrenze und Ausbreitfließmaß der Mischungen

4.7.5 Viskosität, Trichterauslaufzeit und Nettomischleistung

Die Trichterauslaufzeit beschreibt, wie das Ausbreitfließmaß, ebenfalls eine rheologische Eigenschaft von Beton. Sie ist ein Maß für die Höhe der Viskosität einer Mischung. In

Abbildung 4.65 ist die Trichterauslaufzeit sowie die ermittelte Viskosität, aus dem Rheometerversuch, dargestellt. Aus genanntem Grund ergibt sich der qualitativ gleichwertige Verlauf beider Kurven. Zusätzlich ist der Verlauf der Nettomischleistung P beim Nassmischen dargestellt. Da die Viskosität den Widerstand gegen Scherung eines Fluids beschreibt (siehe 2.3.2), ist auch die ermittelte Nettomischleistung nach Erreichen der Stabilisationszeit ein Maß für die Viskosität. Es zeigt sich, dass die Nettomischleistung nahezu analog zu den Kurven der Trichterauslaufzeit und der ermittelten Viskosität verläuft. Lediglich der Wert für die Mischung M3min fällt qualitativ geringer aus, so dass eine Abnahme der Kurve erst ab der Mischung M7min erkennbar ist.

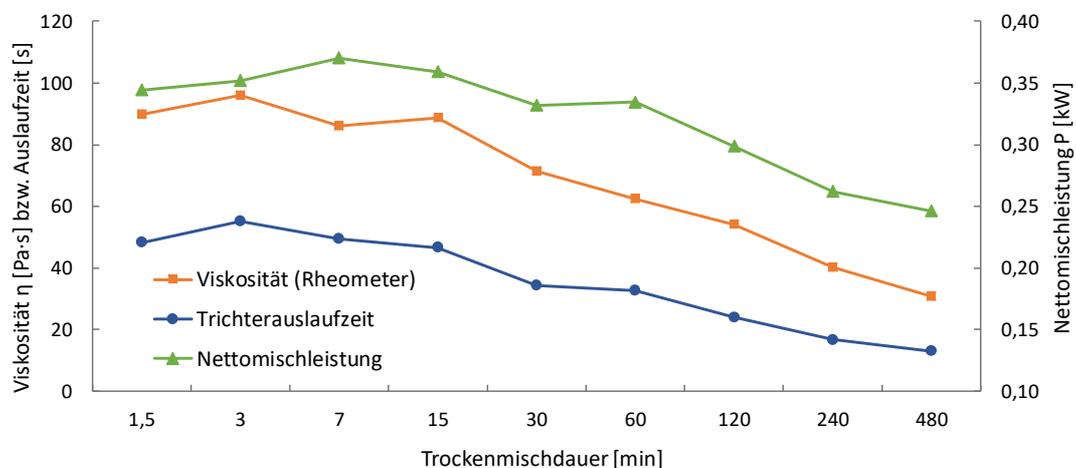


Abbildung 4.65: Vergleich Viskosität, Trichterauslaufzeit und Nettomischleistung der Mischungen

4.7.6 Viskosität und Thixotropie

In der Abbildung 4.66 ist der Zusammenhang zwischen der Thixotropie und der Viskosität dargestellt. Dabei wurde bei der Bildung der Mittelwerte der in 4.6.2 erkannte Messfehler für die Mischung M3min der 1. Versuchsreihe beachtet und wie in 4.7.3 beschrieben korrigiert. Interessant ist, dass die Messwerte der Viskosität qualitativ mit jenen der Thixotropie übereinstimmen. Somit existiert ein Zusammenhang zwischen der zeitlichen Zunahme der Viskosität nach Beendigung einer Scherbelastung und der eigentlichen Viskosität. Es zeigt sich also, dass die Viskosität sich umso schneller regeneriert, je höher die Viskosität der Frischbetonmischung ist.

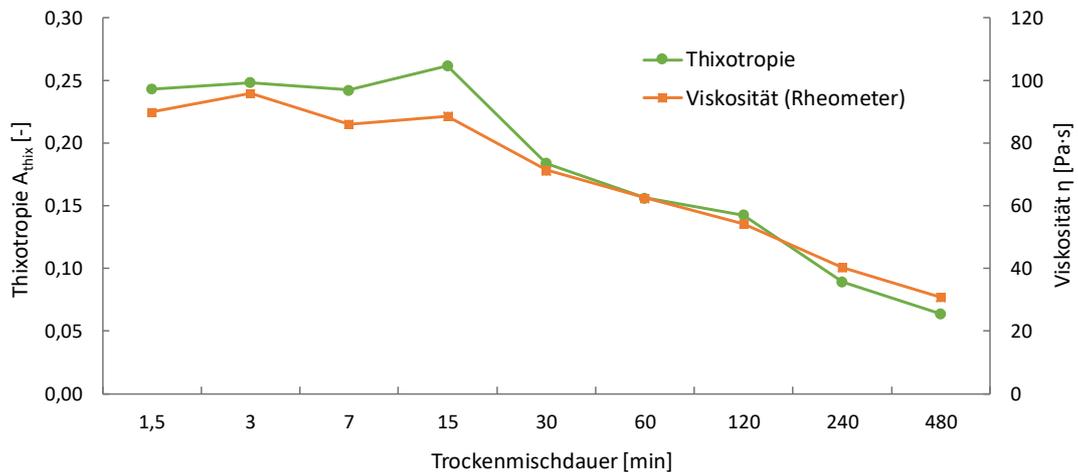


Abbildung 4.66: Vergleich Viskosität und Thixotropie der Mischungen

4.7.7 Dynamische Fließgrenze und Viskosität

Vergleicht man die beiden im Rheometerversuch ermittelten rheologischen Größen, so ergeben sich die in Abbildung 4.67 dargestellten Verläufe. Es lässt sich eindeutig erkennen, dass die Kurve der dynamischen Fließgrenze τ_{0D} und der Viskosität η zueinander kongruent sind. Lediglich für die geringe Trockenmischdauer bis 3 Minuten, steigt die Kurve der Viskosität zunächst an, während die dynamische Fließgrenze abnimmt. Der Zusammenhang zwischen dynamischer Fließgrenze und der Viskosität lässt sich dadurch erklären, dass beide rheologischen Größen von den Wechselwirkungen der vorliegenden Feinstoffsuspension abhängen und sich somit qualitativ sehr ähnliche Verläufe der Ergebniskurven ergeben.

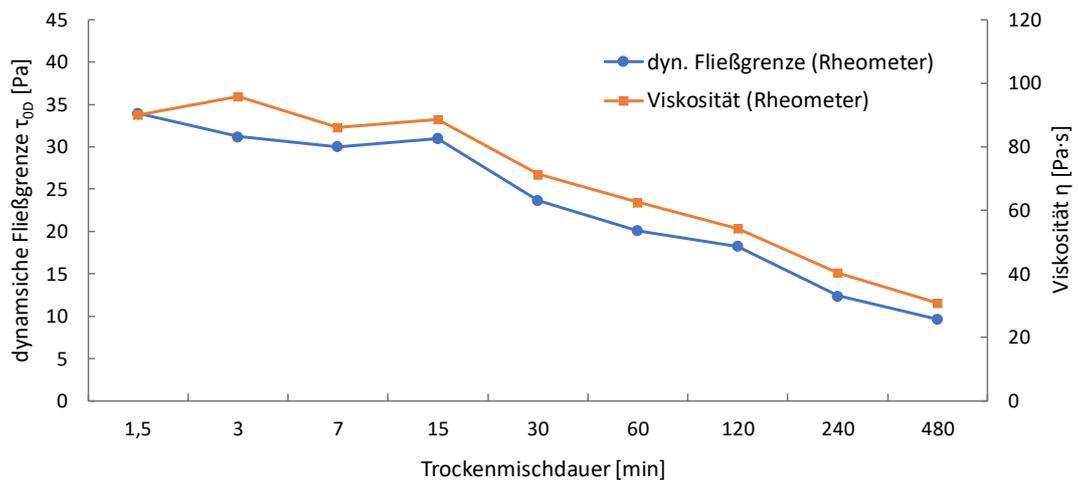


Abbildung 4.67: Vergleich dynamische Fließgrenze und Viskosität der Mischungen

4.7.8 Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse

Betrachtet man den Verlauf der Ergebnisse der einzelnen Frischbetonprüfungen über die Trockenmischdauer in den Abbildungen 4.68 und 4.69, so zeigt sich für die Kurven der Ergebnisse, welche ein Maß für die dynamische Fließgrenze sind, und jene die ein Maß für die Viskosität sind, tendenziell eine exponentielle Abnahme mit zunehmender Trockenmischdauer (die Achse des Ausbreitfließmaßes wurde umgekehrt gewählt, da die dynamische Fließgrenze mit Zunahme des Ausbreitfließmaßes abnimmt). Laut *Mazanec* lässt sich die Fließfähigkeit von Beton bzw. die Fließgrenze und die Viskosität über das Verhältnis von aktueller Feststoffkonzentration ϕ und maximal möglicher Feststoffkonzentration ϕ_{\max} berechnen (siehe 2.3.5) [3]. Da durch die zunehmende Trockenmischdauer die trockenen Ausgangsmaterialien besser homogenisiert werden und somit das Verhältnis von ϕ und ϕ_{\max} erhöht wird, müsste es aufgrund der dadurch vermehrten Kontaktwechselwirkungen (siehe 2.3.4.2) zu einer Abnahme der Fließfähigkeit kommen. Da das Resultat der Versuchsreihen eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften bei der erhöhten Packungsdichte ist, muss es somit einen Grund geben, der den Kontaktwechselwirkungen entgegenwirkt.

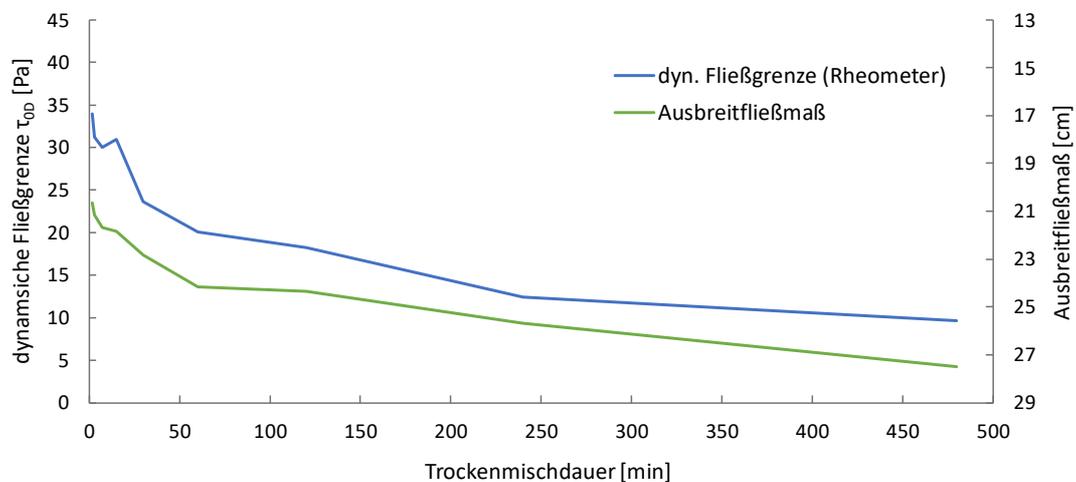


Abbildung 4.68: Dynamische Fließgrenze und Ausbreitfließmaß über die Trockenmischdauer

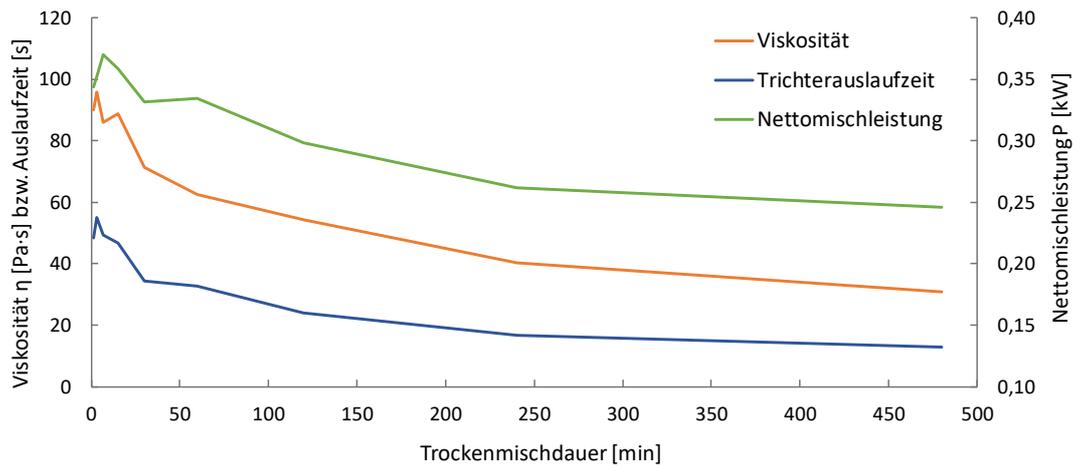


Abbildung 4.69: Viskosität, Trichterauslaufzeit und Nettomischleistung über die Trockenmischdauer

In [19] wird davon gesprochen, dass das Mikrosilika zum einen zwar die Packungsdichte erhöht, aber zum anderen, aufgrund der nahezu runden Partikel, wie ein Schmiermittel zwischen den größeren Zementpartikeln wirkt und somit die rheologischen Eigenschaften des Betons verbessert. Man kann davon ausgehen, dass dies der Grund für die verbesserten Fließeigenschaften der Mischungen mit den längeren Trockenmischzeiten ist. Bei einer höheren Mischzeit werden die trockenen Ausgangsmaterialien besser homogenisiert und somit die Partikel des Mikrosilikas nahezu optimal verteilt. Der exponentielle Verlauf ergibt sich wiederum dadurch, dass mit zunehmender Mischzeit zwar die Mischgüte verbessert wird, diese sich aber exponentiell einem Maximum annähert (siehe 2.2.4, Abbildung 2.13).

In den Abbildungen 4.64 und 4.65 ist zu erkennen, dass man für den Bereich bis zu einer Trockenmischdauer von 15 Minuten sehr ähnliche Ergebnisse für die rheologischen Größen erhält. Es scheint, dass die kurze Verlängerung der Mischzeit noch keine wirklichen Änderungen bewirkt. Man kann aber auch vermuten, dass aufgrund der geringen Varianz der Ergebniswerte, in diesem Bereich durch Messungenauigkeiten kein einheitlicher Verlauf erkennbar ist. Somit ist eine exponentielle Abnahme in diesem Bereich annehmbar, konnte aber nicht direkt erwiesen werden.

Zusammenfassend kann man somit festhalten, dass die rheologischen Eigenschaften von Ultrahochfestem Beton mit einer längeren Mischzeit der trockenen Ausgangsmaterialien tendenziell verbessert werden. Ab einer Mischzeit von über vier Stunden zeigt sich jedoch kaum mehr eine Zunahme der Fließfähigkeit, da die Mischgüte sich einem Maximum nähert. Für den Bereich der Trockenmischzeit unter 15 Minuten kann man ebenfalls eine

exponentielle Abnahme vermuten, jedoch sind weitere Untersuchungen notwendig, um diese Annahme zu bestätigen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Ultrahochfester Beton zeichnet sich durch seine hohe Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Grund hierfür sind sehr niedrige W/B-Werte und eine optimierte Packungsdichte der Feinstoffe. Der sehr niedrige W/B-Wert und der daraus resultierende sehr hohe Fließmittelbedarf führt jedoch dazu, dass der Beton erschwerte Verarbeitungseigenschaften aufweist. Mit Verarbeitungseigenschaften sind hier unter anderem das Fließ- und Entlüftungsverhalten, der Sedimentationswiderstand sowie der Schalungsdruck gemeint. Um die rheologischen Eigenschaften des UHPC besser zu verstehen und planbar machen zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der Dauer des trockenen Mischens sowie die Auswirkungen des Alters des trockenen Gemisches auf die Frischbetoneigenschaften untersucht.

Um die Auswirkungen der Mischdauer der trockenen Ausgangsmaterialien untersuchen zu können, wurden zunächst mit einem Intensivmischer Prämixe mit neun unterschiedlichen Mischzeiten hergestellt (90 s, 3 min, 7 min, 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 240 min, 480 min). Es wurde das folgende bewehrte Rezept für die UHPC-Mischungen gewählt:

Tabelle 5.1: Mischungsentwurf für 1 m³ Beton

Bestandteil	Bezeichnung	Gewicht [kg]
Zement	CEM I 52,5 N	689,11
Quarzsand	H32	927,50
Mikrosilika	Grade 940-U	172,28
Quarzmehl	QM 10000	344,56
Fließmittel	MasterGlenium ACE 430	34,46
Konsistenzhalter	MasterSure 911	13,78
Entlüfter	MasterFinish DF 370	1
Wasser		160,27

Nach der Herstellung des Trockengemisches erfolgte die Herstellung des Frischbetons mit einem weiteren Intensivmischer. Dabei wurde die eingebrachte Leistung des Mixers aufgezeichnet, um zum einen Erkenntnisse darüber zu erhalten, ob die Mischung die Stabilisationszeit t_s erreicht hat und um zum anderen mittels der Nettoleistung P , nach Erreichen der Stabilisationszeit, Aussagen über die Viskosität des Gemisches treffen zu

können. Die Stabilisationszeit t_s beschreibt dabei den Mischzeitpunkt an dem die bestmöglichen Fließeigenschaften erreicht sind. Zusätzlich wurde die Mischtemperatur am Mischende bestimmt. Da mit zunehmender Homogenisierung und geringerer Viskosität des Gemisches die Temperatur aufgrund geringerer Leistung und Reibung abnimmt, erhält man weitere Informationen über die rheologischen Eigenschaften des Betons.

Im Anschluss an den Mischprozess wurden folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Bestimmung von Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie im Rheometer
- Messen des Ausbreitfließmaßes mittels Setztrichter
- Bestimmung der Trichterauslaufzeit mittels V-Trichter
- Ermittlung des Luftgehalts sowie der Frischbetonrohichte mittels Luftporentopf.

Um letztlich auch Aussagen bezüglich des Einflusses der Dauer der Lagerung des Prämix auf die rheologischen Eigenschaften treffen zu können, wurde der Versuchsablauf zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten des Alters des Prämix durchgeführt. Somit erfolgte eine Versuchsreihe im Alter von 48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen.

Die gewonnen Erkenntnisse aus diesen Versuchsreihen können zusammenfassend wie folgt angegeben werden:

- Für alle Mischungen wurde die Stabilisationszeit t_s erreicht, so dass bestmögliche Fließeigenschaften vorlagen. Bei zunehmender Mischzeit der trockenen Ausgangsmaterialien zeigt sich zudem eine exponentielle Abnahme der Stabilisationszeit. Grund dafür ist die steigende Adsorptionsgeschwindigkeit der Fließmittelpolymere während des Nassmischens, da mit zunehmender Trockenmischdauer, die interpartikulären Zwischenräume verkleinert und dadurch die Transportwege der Fließmittelpolymere kürzer werden.
- Man kann annehmen, dass sich die rheologischen Eigenschaften von Ultrahochfestem Beton bei entsprechender trockener und luftdichter Lagerung des Prämix über einen Zeitraum von bis zu neun Wochen nicht verändern. Grund für diese Annahme ist, dass sich die Ergebniswerte für die rheologischen Größen einerseits zum Teil widersprechen und andererseits die Abweichungen zwischen den Versuchsreihen, mit dem Alter von 48 Stunden, 4 Wochen und 9 Wochen, sehr gering

sind. Über den Zeitraum von 9 Wochen hinaus könnte es jedoch zu einer schlagartigen Änderung der Verarbeitungseigenschaften kommen.

- Der Luftporengehalt nimmt mit erhöhter Mischzeit der trockenen Ausgangsmaterialien exponentiell ab. Die Abnahme resultiert aus der höheren Packungsdichte bei zunehmender Homogenisierung. Der exponentielle Verlauf lässt sich dadurch erklären, dass sich mit zunehmender Mischzeit die Mischgüte einem Maximum nähert. Da der Luftporengehalt im Zusammenhang mit der Frischbetonrohddichte steht, ergab sich für dessen Verlauf ein exponentielles Wachstum.
- Alle Ergebnisse, die ein Maß für die dynamische Fließgrenze, die Viskosität und die Thixotropie darstellen, zeigten ebenfalls eine exponentielle Abnahme mit zunehmender Trockenmischdauer (für das Ausbreitfließmaß ein exponentielles Wachstum, da es mit verbesserten Fließeigenschaften zunimmt). Als Grund für die verbesserten rheologischen Eigenschaften kann der Schmiermitteleffekt der runden Partikel des Mikrosilikas angenommen werden. Bei einer höheren Mischzeit der trockenen Ausgangsmaterialien wird das Mikrosilika nahezu optimal zwischen den größeren Zementpartikeln verteilt.
- Für den Bereich bis zu einer Trockenmischzeit von 15 Minuten erhielt man sehr ähnliche Ergebnisse für die rheologischen Größen. Es scheint, dass die kurze Verlängerung der Mischdauer noch keine wirklichen Änderungen bewirkt. Andererseits kann man auch vermuten, dass aufgrund der geringen Varianz der Ergebniswerte, durch Messungenauigkeiten in diesem Bereich, kein einheitlicher Verlauf dargestellt werden kann.

5.2 Ausblick

Um detailliertere Aussagen über die Auswirkungen des Trockenmischens auf die rheologischen Eigenschaften von UHPC treffen zu können, wäre es sinnvoll in zukünftigen Arbeiten eine genauere Untersuchung des Bereichs bis zu einer Trockenmischdauer von 15 Minuten durchzuführen. Es lässt sich zwar eine exponentielle Abnahme vermuten, aber sie konnte nicht nachgewiesen werden.

Da dem UHPC üblicherweise Fasern zugegeben werden, um die Zug- und Biegezugfestigkeit sowie die Duktilität zu erhöhen, wäre es zusätzlich interessant auch eine Beurteilung des rheologischen Verhaltens in Abhängigkeit der Trockenmischdauer unter Beimischung von Fasern zu analysieren.

Es hat sich gezeigt, dass sich die rheologischen Eigenschaften des trockenen Prämix, bei der Aufbewahrung in Plastikkübeln und einer Lagerung von bis zu neun Wochen, nicht verändern. Da jedoch der Vertrieb bzw. die Lagerung eines hergestellten Prämix ebenfalls in Säcken realistisch ist, wäre diesbezüglich eine weitere Analyse sinnvoll. Da sich die Eigenschaften des Prämix bei einer Lagerung über neun Wochen stark verändern könnten, wären weitere Versuchsreihen mit dem Alter des Prämix über 9 Wochen nötig. Ziel wäre es, dann im Vertrieb eine „Mindesthaltbarkeitsdatum“ des Prämix anzugeben, das die rheologischen Eigenschaften des Ultrahochfesten Betons bis zu diesem Tag gewährleistet. Bei Verwendung des Prämix über die Haltbarkeitsfrist hinaus wären dann Eignungsversuche notwendig.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Betontechnologie in den letzten Jahrzehnten bemerkenswerte Fortschritte erzielte. Die stetige Entwicklung des Ultrahochfesten Betons eröffnet dabei neue Möglichkeiten im konstruktiven Bereich als auch in Architektur und Design. Mit fortschreitender Entwicklung wird UHPC in vielen Bereichen herkömmliche Baustoffe ersetzen. Um dabei die hervorragenden Eigenschaften des UHPC vollständig ausnutzen zu können, sind noch weitere Kenntnisse zur Herstellung und Verarbeitung notwendig. Nach einer Standardisierung und Vereinheitlichung des Herstellverfahrens, der konstruktiven Bemessung und des Einbaus steht der Zukunft des Ultrahochfesten Betons dann nichts mehr im Wege.

6 Abstract

Ultra high performance concrete is characterized by its high compressive strength and durability. This is due to a very low water/binder ratio (w/b), which ensures an optimized packing density of the fine particles. The improved properties of the concrete make it possible to create lighter and more delicate constructions. However, the very low w/b ratio results in a reduced workability of the UHPC. In order to better understand and plan the rheological properties of UHPC, this thesis investigates the influence of the duration of the dry mixing and the effects of the age of the dry mixture on the fresh concrete properties.

To investigate the effects of the mixing time of the dry ingredients, nine premixes with mixing times from 90 seconds to 8 hours were prepared with an intensive mixer. Afterwards, the premixes were processed to fresh concrete by adding the liquids. In order to determine the rheological properties, various tests of the fresh concrete were carried out. Finally, to be able to make statements regarding the influence of the duration of the storage of the premix on the rheological properties, this test procedure was carried out on the premix aged 48 hours, 4 weeks and 9 weeks.

The experimental results proved that with a longer dry mixing time the rheological measurements, like the yield stress and the viscosity, decrease exponentially. As a reason for the improved rheological properties, the „lubricant effect“ of the round particles of the microsilica can be assumed. With a higher mixing time of the dry ingredients, the microsilica is distributed almost optimally between the larger cement particles. The exponential trend can be explained by the fact that the mixing quality approaches a maximum with increased mixing. For the section up to a dry mixing time of 15 minutes, very similar results were obtained. It seems that the short extra time of mixing does not cause any relevant changes. On the other hand, it can be assumed that due to the low variance of the result values, due to measuring inaccuracies in this section, no trend can be proved. Further investigations for this section would be necessary.

The comparison of the test results of the three experimental series of the premix, respectively aged 48 hours, 4 weeks and 9 weeks, showed that the rheological properties changed negligibly. It can be assumed that the workability of the fresh concrete did not change because of the hermetic and dry storage of the premix.

7 Literatur

- [1] D. Bosold, A. Grünewald und I. B. GmbH, „Beton.org, Was ist Beton?,“ [Online]. Available: www.beton.org. [Zugriff am 26 Februar 2018].
- [2] K. Safranek, U. Schneider, H. Harand und H. Bruckner, Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone, Wien: TU Wien, Institut 206, 2008.
- [3] O. Mazanec, Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen, München: Technische Universität München, 2012.
- [4] G. König, K. Holschemacher und F. Dehn, Ultrahochfester Beton, Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2003.
- [5] E. Fehling, M. Schmidt, T. Teichmann, Bunje K., R. Bornemann und B. Middendorf, Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC), Kassel: kassel university press GmbH, 2005.
- [6] M. Schmidt und E. Fehling, „Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application Europe,“ ACI Special publication, 2005.
- [7] H. Russell und B. Graybeal, „Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community,“ Office of Infrastructure Research & Development, Glenview, 2013.
- [8] U. Schneider, Wiener Baustofflehre Blättter - Bindemittel, Wien: TU Wien Institut 206 - 1, 2011.
- [9] U. Schneider und J. Horvath, Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen, Wien: TU - Vienna, Institut 206, 2003.
- [10] J. Kirnbauer, Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete, Dissertation, Wien: TU Wien, 2013.
- [11] U. Schneider, Wiener Baustofflehre Blätter - Frischbeton, Wien: TU Wien, Institut 206 - 1, 2011.

-
- [12] F. Dehn, „Ultrahochfester Beton,“ *Arconis*, pp. 60-64.
- [13] J. Horvath, Entwicklung von hochfestem Blähgasbeton, Diplomarbeit, Wien: TU Wien, 1998.
- [14] Betonakademie, Österreichische Bautechnik Vereinigung, Betontechnologie (BT1), Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, Güteverband Transportbeton, 2017.
- [15] M. Lins, Verhalten von Ultrahochfesten Betonen (UHPC) unter Brandbeanspruchung, Diplomarbeit, Wien: TU Wien, 2004.
- [16] M. Biscopig, „Frischbeton, Eigenschaften und Prüfungen,“ März 2013. [Online]. Available: www.beton.org. [Zugriff am 17 Oktober 2017].
- [17] K. Ebeling, W. Knopp und R. Pickhardt, Beton - Herstellung nach Norm, Köln: Verlag Bau + Technik, 2002.
- [18] S. Abbas, M. L. Nehdi und M. A. Saleem, „Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges,“ *International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.10*, pp. 271-295, September 2016.
- [19] U. Schneider, J. Horvath, G. König und F. Dehn, „Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC),“ *Arconis Spezial 2*, pp. 38-45.
- [20] A. Pfeiler, Auswirkungen der Nachbehandlung bei höheren Temperaturen auf die Druckfestigkeit von Reactive Powder Concrete, Wien: TU Wien, 2000.
- [21] K. Bulowski, Frühschwindverhalten von ultrahochfesten Betonen, Diplomarbeit, Wien: TU Wien, 2016.
- [22] T. Stengel, Lowke D., Mazanec O., P. Schießl und C. Gehlen, „UHPC mit alternativen Zusatzstoffen - Rheologie und Faserverbund,“ *Beton- und Stahlbetonbau, Bd. 106, Nr. 1*, pp. 31-38, 2011.
- [23] D. Küchlin und O. Hersel, Betontechnische Daten, Heidelberg: Heidelberg Cement AG, 2017.
- [24] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher und S. Fröhlich, „Ultrahochfester Beton UHPC,“ in *Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung - Brandschutz*,

- Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2013, pp. 118-239.
- [25] M. Hinzen, „Textilbeton - Ein innovativer Baustoff,“ Gesellschaft Deutscher Chemiker, 2011.
- [26] A. Seiler, K. Kasten und M. Seidel, „Aufbereitung und betrieblicher Transport von UHPC,“ in *Betonwerk und Fertigteil-Technik, Bd.70*, Bauverlag, 2004, pp. 14-20.
- [27] M. Schmidt und E. Fehling, Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 2, Kassel: kassel university press GmbH, 2003.
- [28] M. Berger, Einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften ultrahochfester Betone, Diplomarbeit, Wien: TU Wien, 2008.
- [29] L. Rossbacher, Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften vakuumgemischter ultrahochfester Betone, Diplomarbeit, Wien: TU Wien, 2010.
- [30] U. Schneider, Wiener Baustofflehre Blätter - Festbeton, Wien: TU Wien, Institut 206-1, 2011.
- [31] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher und S. Fröhlich, Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples, First Edition, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2014.
- [32] W. Herzog, „Ultrahochfester Beton: Wild-Brücke in Kärnten mit UHPC,“ 25 Nov 2015. [Online]. Available: Verband Österreichischer Beton- und Fertigteilwerke, www.voeb.com. [Zugriff am 24 Okt 2017].
- [33] G. Leitner, „"Wilder" Erfolg zum Jubiläum,“ 28 Sep 2010. [Online]. Available: www.meinbezirk.at. [Zugriff am 24 Okt 2017].
- [34] R. Weinekötter und H. Gericke, Mischen von Feststoffen, Prinzipien, Verfahren, Mischer, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.
- [35] M. Stieß, Mechanische Verfahrenstechnik 1, 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.

-
- [36] C. Baumert, Rheometrische Mischprozessführung, Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer zur Herstellung von Hochleistungsbeton mit definierten rheologischen Eigenschaften, Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [37] C. Baumert und H. Garrecht, „Mischen von Hochleistungsbetonen,“ *Beton- und Stahlbetonbau* 105, Heft 6, pp. 371-378, 2010.
- [38] M. Zogg, Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik, Stuttgart: B. G. Teubner, 1993.
- [39] D. Chopin, F. de Larrard und B. Cazaciu, „Why do HPC and SCC require a longer mixing time?,“ *Cement and Concrete Research* 34, pp. 2237-2243, Feb 2004.
- [40] H.-P. Wilke, R. Buhse und K. Groß, Mischer: Verfahrenstechnische Grundlagen und apparative Anwendungen, Essen: Vulkan-Verlag, 1991.
- [41] H. G. Jodl, Studienblätter zur Vorlesung, Bauverfahrenstechnik, Wien: TU Wien, Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, 2013.
- [42] Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG, „Eirich, Mischtechnik,“ 2014. [Online]. Available: www.eirich.de. [Zugriff am 27 Okt 2017].
- [43] H. Barnes, J. Hutton und K. Walters, Rheology Series, Vol. 3, An Introduction to Rheology, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989.
- [44] K. Wesche und W. vom Berg, „Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton,“ *Fachwissen Bau*, pp. 21-40, Jan 1973.
- [45] O. Blask, Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen, Siegen: Universität-Gesamthochschule Siegen, 2002.
- [46] M. Beitzel, Massivbau Baustofftechnologie Materialprüfung, Heft 71, Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2009.
- [47] D. Lowke, T. Kränkel, C. Gehlen und P. Schießl, „Effect of Cement on Superplasticizer Adsorption, Yield Stress, Thixotropy and Segregation Resistance,“ in *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*, Montreal, Springer, 2010, pp. 91-101.

- [48] B. Weigl, Trennkräfte zwischen Mikroorganismen, Partikeln und Oberflächen, Dissertation, München: Technische Universität München, 2004.
- [49] C. Ferraris und F. de Larrard, Testing and Modelling of fresh concrete rheology, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology NIST, 1998.
- [50] M. Schmidt und E. Fehling, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 13, Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen, Kassel: kassel university press GmbH, 2009.
- [51] Lafarge Zementwerke GmbH, „LAFARGE, DER CONTRAGRESS CEM I 52,5 N,“ [Online]. Available: www.lafarge.at. [Zugriff am 6 Jänner 2018].
- [52] Quarzwerke Österreich GmbH, „Quarzwerke Österreich, Stoffdaten Quarzsand Haltern H 31 bis H 35,“ [Online]. Available: www.quarzwerke.at. [Zugriff am 6 Jänner 2018].
- [53] Elkem AS, „Elkem Microsilica, Material Characteristics,“ [Online]. Available: www.elkem.com. [Zugriff am 7 Jänner 2018].
- [54] Elkem AS, „Elkem Microsilica Concrete, Guidance for the Specification of Silica Fume,“ November 2005. [Online]. Available: www.elkem.com. [Zugriff am 7 Jänner 2018].
- [55] Amberger Kaolinwerke, „Quarzwerke Österreich, Datenblätter, Quarzmehl 10000,“ [Online]. Available: www.quarzwerke.at. [Zugriff am 11 Jänner 2018].
- [56] BASF Performance Products GmbH, „Technisches Datenblatt, MasterGlenium ACE 430,“ [Online]. Available: www.master-builders-solutions.basf.com. [Zugriff am 7 Jänner 2018].
- [57] BASF Performance Products GmbH, „Technisches Datenblatt, MasterSure 911,“ [Online]. Available: www.master-builders-solutions.basf.com. [Zugriff am 7 Jänner 2018].
- [58] BASF Performance Products GmbH, „Technisches Datenblatt, MasterFinish DF 370,“ [Online]. Available: www.master-builders-solutions.basf.com. [Zugriff am 7 Jänner 2018].
- [59] S. Härig, D. Klausen und R. Hoscheid, Technologie der Baustoffe, 14. Auflage,

Heidelberg: C. F. Müller Verlag, 2003.

- [60] Schleibinger Geräte Taubert u. Greim GmbH, „Schleibinger Testing Systems, Viskomat NT - Rheometer f. Mörtel und Leim,“ [Online]. Available: www.schleibinger.com. [Zugriff am 16 Nov 2017].
- [61] Schleibinger Geräte Taubert u. Greim GmbH, Handbuch, Schleibinger Viskomat NT und Viskomat XL, Buchbach: Schleibinger Geräte, 2016.
- [62] R. Vogel, „Eine Messzelle für Spezialmörtel,“ R.Vogel-Forschung, Weimar, 2007.
- [63] Schleibinger Geräte Taubert u. Greim GmbH, „Schleibinger Testing Systems, Die Korbzelle,“ [Online]. Available: www.schleibinger.com. [Zugriff am 17 Nov 2017].
- [64] RWTH Aachen University, „Kompetenzzentrum Textilbeton, Beton, Frischbetonprüfungen; Konsistenz,“ [Online]. Available: www.textilbeton-aachen.de. [Zugriff am 18 Februar 2018].
- [65] P. Richard und M. Cheyrezy, „Composition of reactive powder concretes,“ *Cement and Concrete Research*, Vol.25, no.7, pp. 1501-1511, Oktober 1995.