

Diploma Thesis

**The influence of the dry mixing time on the rheological
property of UHPC**

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

DIPLOMARBEIT

**Einfluss der Trockenmischdauer auf die rheologischen
Eigenschaften von UHPC**

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

von

Daniela Santi

Matr.Nr.: 0927359

unter der Anleitung von

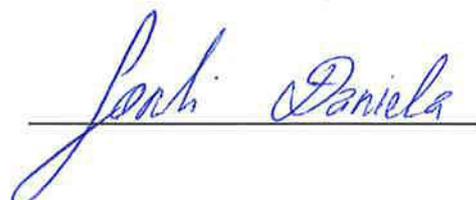
Ao.Univ.-Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Elemer Bölcskey

Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

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

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/206-1, A-1040 Wien

Wien, im Februar 2018



Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Auswirkungen unterschiedlicher Trockenmischdauern auf die rheologischen Eigenschaften von ultrahochfesten Betonen. Die Arbeit ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden die theoretischen Grundlagen des Werkstoffes Beton sowie der Rheologie angeführt. Der zweite Teil umfasst alle experimentellen Versuche sowie deren Auswertungen und Interpretation. Ziel der Arbeit ist es, dass bereits aus der Praxis bekannte Phänomen, dass durch die Verlängerung der Trockenmischdauer es zur Verflüssigung des Frischbetons kommt, mit Hilfe eines Rheometers exakt zu bemessen.

Die Auswertung der Versuchsreihe bestätigt den Einfluss der Trockenmischdauer auf das Fließverhalten. Dieser ist bereits bei kurzen Verlängerungen der Trockenmischzeit erfassbar. Bei weiterer Forschung im Bereich der Rheologie könnten die Konsistenzprüfung von Frischbetonen künftig durch rheologische Messungen sinnvoll ergänzt werden.

Abstract

The present master thesis describes the influence which variable dry mixing appear to the rheological property of ultra high performance concrete. The thesis is built up in two parts. The first part describes the theoretical foundations of concrete and rheology. The second part contains all laboratory experiments, the test evaluation and interpretation. The main objective of the following thesis is to engage the phenomenon, that by prolong the dry mixing time of UHPC, the fresh concrete gets more and more liquid. The phenomenon is already known from the praxis and shall be exactly measured with the viscometer.

The analysis has approved the theory. The influence from a longer dry mixing time of the rheology is already existent by minimal extension of the dry mixing time. Further researches of the rheology could complete the slump test of concrete with the more accurate rheology measure.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir in meinen Studienjahren sowie bei der Erstellung meiner Diplomarbeit tatkräftig zur Seite standen.

Besonderen Dank gilt dabei Herrn Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Elemer Bölcskey für die Möglichkeit meine Diplomarbeit an seinem Institut zu verfassen. Mein Dank gilt ebenso Herrn Ass.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Heinrich Bruckner der mir mit seinem Fachwissen und Ratschlägen sowie Ermutigungen stets zur Seite stand. Mein Dank richtet sich auch an Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer der mich im experimentellen Teil meiner Diplomarbeit permanent Unterstützt hat.

Ich möchte mich außerdem bei allen Freunden und Kollegen für einen unvergesslichen Lebensabschnitt bedanken. Besonders hervorheben möchte ich dabei Thersa Oswald und Christoph Conrad.

Abschließend möchte ich einen besonderen Dank an meine gesamte Familie richten, welche mich während des Studiums stets finanziell und mental unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
Abstract.....	1
Danksagung.....	1
Inhaltsverzeichnis.....	2
1 Einleitung.....	4
2 Grundlagen.....	5
2.1 Literatur Recherche.....	5
2.2 Betonzusammensetzung, Kennzeichnungen und Prüfverfahren	5
2.2.1 Zement.....	6
2.2.2 Gesteinskörnung.....	10
2.2.3 Zusatzstoffe.....	12
2.2.4 Zusatzmittel.....	13
2.2.5 Betonporosität.....	14
2.2.6 Packungsdichte	15
2.2.7 Frischbetonprüfungen	17
2.3 Mischprozesse.....	19
2.3.1 Nationale Normenregelung.....	20
2.3.2 Mischmechanismen.....	21
2.3.3 Mischzustände.....	21
2.3.4 Mischgüte	22
2.3.5 Probenentnahme	23
2.3.6 Mischmaschinen	24
2.4 Rheologie.....	26
2.4.1 Begriffsdefinition.....	26
2.4.2 Viskosität	27
2.4.3 Van-der-Waals-Wechselwirkung.....	28
2.4.4 Scherspannung τ	29
2.4.5 Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$	29
2.4.6 Rheologische Modelle.....	30
2.4.7 Newton'sches Fließverhalten	30
2.4.8 Nicht Newton'sches Fließverhalten	31
2.4.9 Viskosimetrie	34
2.4.10 Viskomat NT	36
3 Vorversuche und Versuchsplanung.....	39
3.1 Ermittlung der optimalen Mischdauer.....	39
3.2 Versuche mit stufen- bzw. rampenförmiger Fahrweise	41
3.3 Quantifizierung der Viskosität	43
3.4 Bestimmung der Profilwahl	46

4	Versuche und Interpretation	48
4.1	Versuchsablauf.....	49
4.2	Doppelringspalt-Messzelle	50
4.3	Gewähltes Scherprofil.....	52
4.4	Messungen im Rheometer.....	54
4.5	Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse	56
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	81
6	Literaturverzeichnis.....	83
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis.....	87
	Formelverzeichnis.....	87

1 Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit thematisiert den Einfluss der Trockenmischdauer auf die rheologischen Eigenschaften von ultrahochfestem Beton.

Dieser Einfluss wurde bis dato bereits in zahlreichen Diplomarbeiten des Institutes für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien, unter der Versuchsleitung vom *Johannes Kirnbauer*, festgestellt.

Identische Betonrezepturen weisen bei unterschiedlichen Trockenmischdauern variierende Konsistenzbereiche auf. Bei der Verlängerung der Trockenmischdauer sind fließfähigere Frischbetonmischungen erreicht worden. Diese wurden bisher mit den genormten Frischbetonprüfungsverfahren, wie beispielsweise dem Ausbreitmaß, Verdichtungsmaß und dem Trichterauslaufversuch gemessen bzw. teilweise sogar mit dem freien Auge festgestellt.

Bei den oben durchgeführten genormten Frischbetonprüfungen handelt es sich um sogenannte „1-Punkt-Messungen“, einmalige Messungen welche im Regelfall direkt nach Beendigung des Mischvorganges durchgeführt werden. Die genormten Prüfverfahren sind zwar wegen ihrer einfachen und raschen Anwendung baustellengerechte Verfahren, ihre Aussage ist jedoch entsprechend eingeeengt. Für exakte Messungen ist es notwendig sich mit der *Rheologie*, der Wissenschaft der Fließkunde, zu beschäftigen.

Die Lebensmittelindustrie, um ein Beispiel zu nennen, verwendet zur Qualitätskontrolle und Sichererstellung immer gleicher Produktqualität seit längerer Zeit bereits Viskosimeter. Mit ihnen kann die Viskosität von Flüssigkeiten exakt gemessen werden. Auch die Veränderung der Viskosität vom Zeitpunkt der Herstellung, der Anlieferung, die Zeitspanne des Pumpens bis hin zum Einbau und Verdichten einer Betonmischung, kann mittels Viskosimeter nachgestellt und erfasst werden.

Ziel der Arbeit ist es, die bereits bekannte Veränderung der rheologischen Eigenschaften, welche zufolge unterschiedlicher Trockenmischdauern resultieren, erstmals quantitativ mittels Viskomat zu erfassen.

Zu Beginn der Arbeit werden die für die nachfolgenden experimentellen Versuche und deren Auswertung benötigten Grundlagen der Betontechnologie im theoretischen Teil erfasst. Danach folgt der praktische Teil, welcher sich in Vorversuche und Versuche gliedert sowie deren Interpretation, Zusammenfassung und Ausblick.

2 Grundlagen

2.1 Literatur Recherche

Zur Ermittlung der Grundlagen zur vorliegenden Arbeit wurden Recherchen in folgenden Bibliotheken bzw. Datenbanken mit den angeführten Suchbegriffen durchgeführt:

TU-Wien, Catalog plus; Schlagworte: Betonbau, Ultrahochfester Beton, Ultra high performance concrete, Granulometrie, Einfluss Granulometrie, Mechanische Verfahrenstechnologie, Mischen, Fluidmechanik, Technische Strömungslehre, Rheologisches Verhalten von Zementleim, Rheologie

TU-Wien, ÖNORMEN Lesesaal: ÖNORM B 4710-1; ÖNORM EN 197-1, ÖNORM EN 12390

Es werden insgesamt 35 Bücher und Zeitschriften für die Arbeit herangezogen.

Weiters wurde mit folgenden Schlagworten im Internet bei folgenden Suchmaschinen nach Literatur gesucht:

Google; Schlagworte: Beton, Einfluss der Granulometrie; Porosität Beton; Van-der-Waals-Kräfte, Mischzustände Verfahrenstechnik, Mischertypen Beton, Mischer, Frischbeton Rheologische Eigenschaften, Brown'sche Molekularbewegung, rheologisches Modell, thixotropes Verhalten Messprofile, Rheologische Messungen an Baustoffen

DuckDuckGo; Schlagworte: Zementherstellung, Viskosität

Es wurden insgesamt 13 relevante Webseiten gefunden, die im weiteren verwendet werden. Die ausgewählte und verwendete Literatur ist im Kapitel 6 zusammengestellt.

2.2 Betonzusammensetzung, Kennzeichnungen und Prüfverfahren

Beton ist einer der ältesten Werkstoffe der Welt, der über die Jahrhunderte immer mehr an Bedeutung gewonnen hat. Betrachtet man zum Beispiel das, vor über 1900 Jahren aus *Opus Caementitium* erbaute, *Pantheon*, dessen Kuppel einen Innendurchmesser von 43,3m aufweist, so wird das Potenzial des Werkstoffes ersichtlich [1]. Der von den Römern verwendete *Opus Caementitium* ist der Vorläufer unseres heutigen Betons. Dieser bestand aus Bruchsteinen, Wasser, Sanden, gelöschtem Kalk und natürlichen Puzzolanen, wie beispielsweise abgekühlter Lava oder Traß.

Schon damals war die chemische Reaktion der Hydratation, des Abbindprozesses, bekannt. Während der Hydratation, welche sowohl in Luftumgebung als auch Unterwasser stattfindet, bilden sich raumbeständige, unlösliche Calciumsilikathydrate aus [2].

Heutzutage ist der Verzicht auf Beton, genauer gesagt Stahlbeton und Spannbeton, im Bauwesen kaum mehr vorstellbar. Aufgrund der leichten Formgebung des Materials bestehen nahezu unbegrenzte Ausführungsmöglichkeiten, zudem kann der Werkstoff durch unterschiedliche Betonrezepturen individuell an vorhandene Umgebungsbedingungen angepasst werden.



Abbildung 2-1: 5-Stoff-System



Abbildung 2-2: Ausgangsstoffe

Der Werkstoff besteht in der Regel aus den in Abbildung 2-1 dargestellten Komponenten. In Abbildung 2-2 sind die eingewogenen Ausgangsstoffe einer für die Arbeit verwendeten Basismischung ultrahochfesten Betons, auch UHPC¹ (engl. „ultra high performance concrete“) genannt zu sehen.

Die nachfolgenden Unterkapitel geben einen kurzen Überblick der zum Einsatz kommenden Komponenten und deren Eigenschaften im Fischbeton und Festbeton.

2.2.1 Zement²

Die drei wesentlichen Rohstoffe aus denen Zement hergestellt wird sind Kalkstein, Ton und Mergel. Für die Herstellung des Bindemittels werden die Rohstoffe aufbereitet und anschließend bei Temperaturen von über 1400°C zu Klinker gebrannt. Der Klinker wird getrennt oder zusammen mit Hüttensand, Silicastaub, Puzzolanen, Kalkstein und/oder Flugasche vermahlen und erhärtet nach Zugabe von Wasser zu Zementstein. Hierbei entsteht, beginnend an der Zementkornoberfläche, eine chemisch-physikalische Reaktion. Dieser Vorgang der Erstarrung wird als Hydratation bezeichnet. Es handelt sich um eine exotherme Reaktion, welche eine in Abhängigkeit vom verwendeten Zement, bis zu 500 J/g hohe Hydrationsenergie in Form von Wärme an die Umgebung abstrahlt.

¹ UHPC Basismischung von Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

² Siehe [41]: Seite 18-27

Die Mahlfineinheit des Zements spielt einen enormen Einfluss auf dessen hydraulischen Eigenschaften. Den je mehr Angriffsfläche (spezifische Oberfläche) dem Hydratationsprozess zur Verfügung steht, desto schneller findet dieser statt. Gemessen wird die Mahlfineinheit des Zementes anhand seiner spezifischen Oberfläche, welche als *Blainewert* definiert ist. Dieser liegt im Regenfall bei Werten zwischen 3000 bis 5000cm²/g und kann als Parameter zur Beeinflussung der Festigkeitsentwicklung von Zementen variiert werden³. Die unterschiedlichen Zementtypen sowie deren Zusammensetzungen sind in der europäischen Zementnorm ÖNORM EN 197-1 [3] angeführt. Diese liefert eine standardisierte Zementbezeichnung. Ein exemplarisches Beispiel, anhand dessen auf die einzelnen Abschnitte der Bezeichnung eingegangen wird, ist in Abbildung 2-3 angeführt.



Abbildung 2-3: genormte Zementbezeichnung⁴

Zement wird in Österreich gemäß der europäischen Zementnorm ÖNORM EN 197-1 [3] in folgende fünf Hauptzementgruppen unterteilt:

- CEM I Portlandzement
- CEM II Portlandkompositzemente
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Kompositzement

Zulässig für die Herstellung von Zementen sind jedoch nur die in Tabelle 2-1 angegebenen Zementtypen CEM I bis CEM III⁵.

Die Bezeichnung der Zementtype erfolgt gemäß den enthaltenden Hauptbestandteilen neben Portlandzementklinker. Diese werden mit den Buchstaben S, D, P, Q, V, W, T, L und M für die Bestandteile Hüttensand, Silikastaub, Puzzolane, Flugasche und Kalkstein bzw. Mischungen angegeben.

³ Siehe [33]: Seite 15

⁴ <http://www.zement.at/zement-2/zement/zementsorten-bezeichnungenormen>, Zugriff am 25.09.2017

⁵ Siehe [3]: Seite 14

Reiner Portlandzementklinker besteht aus Kalziumoxiden CaO , Siliziumoxiden SiO_2 , Eisenoxiden Fe_2O_3 und Aluminiumoxiden Al_2O_3 , welche durch den Sintervorgang zu den ineinander gebetteten Klinkerphasen Trikalziumsilikat C_3S , Dikalziumsilikat C_2S , Trikalziumaluminat C_3A und Kalziumaluminatferrit C_4AF werden.

Wie in Abbildung 2-4 zu sehen sind die maßgebenden Festigkeitskomponenten die beiden silikatischen Klinkerphasen Trikalziumsilikat C_3S und Dikalziumsilikat C_2S , wobei Trikalziumsilikat C_3S eine schnellere Festigkeitsentwicklung besitzt.

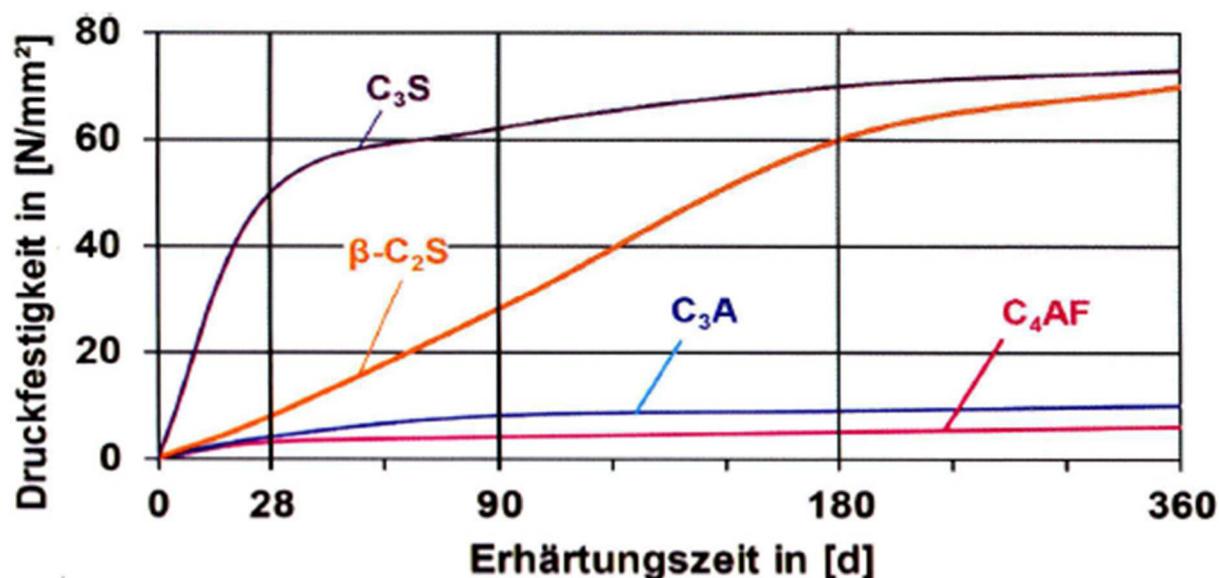


Abbildung 2-4: Festigkeitsentwicklung⁶

Ein weiterer Hauptbestandteil neben Portlandzementklinker ist der häufig als Zuschlagstoff verwendete Hüttensand. Dieser ist ein latent hydraulischer Stoff, der bei der Stahlproduktion anfällt und sich aus Kalziumoxiden CaO , Siliziumoxiden SiO_2 und Aluminiumoxiden Al_2O_3 , sowie Magnesiumoxid MgO zusammensetzt. Da Hüttensand nur extrem langsam von selbst erhärtet, muss ihm zur Beschleunigung ein Anreger, in diesem Fall Kalziumhydroxid, beigemischt werden.

Im Vergleich zu Portlandzementklinker ist die Hydrationswärme bei Hüttensand geringer. Demnach kann die Festigkeitsentwicklung des Zementes durch die Zugabe von Hüttensand bewusst beeinflusst werden.

Ein Beispiel eines ebenfalls zum Einsatz kommenden Hauptbestandteils in Zementen sind Puzzolane. Diese natürlich entstandenen beziehungsweise künstlich erzeugten Puzzolane erhärten nicht ohne Anregerstoff.

⁶ S. Röhling, H. Eifert und M. Jablinski, Betonbau, Band 1: Zusammensetzung - Dauerhaftigkeit - Frischbeton, Fraunhofer IRB Verlag, 2012, Seite 23, Bild 1.2: Festigkeitsentwicklung der Klinkerminerale (nach BOGUE und LERCH)

Auch gebrannter Schiefer, Kalkstein, Silicastaub und oder Flugasche, einem Abfallprodukt von Kohlekraftwerken, kommen als Hauptbestandteil neben Portlandzementklinker zur Zementherstellung zum Einsatz⁷.

Tabelle 2-1: Bestandteile der Zementtypen

Typ	Bezeichnung	Kurzzeichen	Anteil der Zusatzstoffe neben Portlandzementklinker
CEM I	Portlandzement	CEM I	keine
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II /A-S	6 - 20 % Hüttensand
		CEM II B-S	21 - 35 % Hüttensand
	Potlandsilikatstaubzement	CEM II /A-D	6 - 10 % Silicastaub
	Portlandpuzzolanz.	CEM II /A-P	6 - 20 % natürliches Puzolan
		CEM II /B-P	21 - 35 % natürliches Puzolan
		CEM II /A-Q	6 - 20 % künstliches Puzolan
		CEM II /B-Q	21 - 35 % künstliches Puzolan
	Portlandflugaschezement	CEM II /A-V	6 - 20 % kieselsäurereiche Flugasche
		CEM II /B-V	21 - 35 % kieselsäurereiche Flugasche
		CEM II /A-W	6 - 20 % kalkreiche Flugasche
		CEM II /B-W	21 - 35 % kalkreiche Flugasche
	Portlandschieferzement	CEM II /A-T	6 - 20 % gebrannter Schiefer
		CEM II /B-T	21 - 35 % gebrannter Schiefer
	Portlandkalkzement	CEM II /A-L	6 - 20 % Kalkstein
		CEM II /B-L	21 - 35 % Kalkstein
		CEM II /A-LL	6 - 20 % Kalkstein
CEM II /B-LL		21 - 35 % Kalkstein	
Portlandkompositzement	CEM II /A-M	6 - 20 % jeglicher Hauptbestandteile [≥ 2 Hauptbestandteile]	
	CEM II /A-M	21 - 35 % jeglicher Hauptbestandteile [≥ 2 Hauptbestandteile]	
CEM III	Hochofenzement	CEM III /A	36 - 65 % Hüttensand
		CEM III /B	66- 80 % Hüttensand
		CEM III /C	81 - 95 % Hüttensand

Die prozentuellen Masseanteile an beigemengten Zusatzstoffen, die neben Portlandzementklinker in der Zementsorte enthalten sind, werden bei Zementbezeichnung nach ÖNORM EN 197-1 [3] mit den Buchstaben A, B und C angegeben. In jeder Zementsorte dürfen bis zu 5 Masse-% an Nebenbestandteilen enthalten sein. Es handelt sich um Füllmaterialien die die physikalischen Eigenschaften des Zements beeinflussen⁸.

⁷ Siehe [41]: Seite 20- 25

⁸ Siehe [41]: Seite 18-27

Nach den Angaben der Hauptbestandteile sind in der Zementbezeichnung Angaben der Druckfestigkeit definiert. Die Prüfung von Festbeton ist in der ÖNORM EN 12390 [4] definiert. Die erreichten Druckfestigkeitswerte werden in die Druckfestigkeitsklassen 32,5; 42,5 und 52,5 klassifiziert⁹.

Als letzte Komponente der Zementbezeichnung gemäß ÖNORM EN 197-1 [3] sind Angaben betreffend der Frühfestigkeitsklasse angeführt. Die vorhandene Anfangsfestigkeit wird mit dem Buchstaben „N“ für normale oder „R“ für erhöhte unterschieden.

2.2.2 Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung macht bei Beton im Normalfall um die 70% des Volumens aus. Sie kann aus natürlichen oder künstlichen, dichten oder porösen, gebrochenen oder ungebrochenen mineralischen Stoffen bestehen. Zum Teil werden auch rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet.

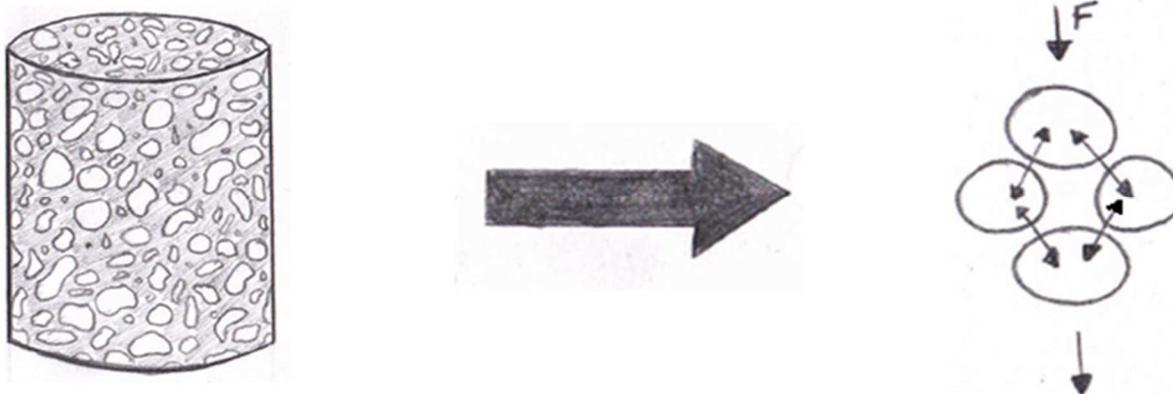


Abbildung 2-5: Betontagverhalten

Wie in der skizzierten Kernbohrung von Abbildung 2-5 dargestellt ist, dient das Korngerüst, dessen Festigkeit im Normalfall höher als die des Zementleimes ist, dazu, den Hauptteil der vorhandenen Druckkräfte im Beton zu tragen bzw. abzuleiten. Der kraftschlüssige Verbund wird durch den Zementleim sichergestellt. Um die Verkittung von Zement und Gesteinskörnung zu garantieren, muss jedoch der Zementleim alle Gesteinskörper vollständig ummanteln. Die Randschichtproblematik sei in der Betrachtung, der Einfachheit halber, jedoch außer Acht gelassen.

Die für natürliche Gesteinskörnung verwendeten Materialien sind sowohl aus umweltfreundlichen Aspekten als auch aus Kostengründen im Regelfall regional vorkommende

⁹ Siehe [5]: Seite 34

Gesteinsarten. Diese können in Österreich beispielsweise Granite, Basalte, Quarzite, Kalksteine oder Sandsteine sein, sofern sie die geometrischen, chemischen und physikalischen Anforderungen für die Verwendung bei Beton erfüllen¹⁰. Dazu zählt unter anderem ein gewisser Verschleiß-, Abrieb-, Frost- und Tauwiderstand¹¹.

Die verwendeten Gesteine werden im Betonwerk, mittels unterschiedlichen Siebgrößen, in mehrere Korngruppen gesiebt. Jede Korngruppe wird anhand ihres Größtkorns D , ihres Kleinstkorn d und dessen Verhältnis D/d angegeben. Das Größtkorn D beschreibt die Sieblochweite, angegeben in Millimeter, in der die Gesteinskörnung einer Mischung gerade noch durchgesiebt werden kann. Das Kleinstkorn d beschreibt jenes Sieb, bei dem die Gesteinskörnung gerade nicht mehr durchfallen kann¹².

Generell gilt, je besser die Korngrößen aufeinander abgestimmt sind, desto dichter wird das Korngerüst. Dadurch minimiert sich der Zementleimanteil und es wird eine bessere Verdichtung des Betongefüges erzielt. Hierzu ist es üblich zwischen drei und fünf verschiedene Korngruppen zu verwenden.

Da die verwendeten Gesteinskörnungen nur in Ausnahmefällen rund sind, wird der sogenannte *shape index*¹³, abgekürzt SI-Index, als Parameter der Kornform angegeben. Dieser beschreibt das Verhältnis Kornlänge zu Kornbreite bzw. Korndicke, gemessen an der dünnsten Stelle des Gesteinskorns. Das Korngefüge sollte idealerweise möglichst gedrungen sein. Dies ist bei einem SI-Index mit dem Wert eins der Fall. Plattenförmige Gesteinskörnungen besitzen im Vergleich zu runden Gesteinskörnungen eine höhere spezifische Kornoberfläche. Im nationalen Anwendungsdokument NAD 6 der ÖNORM B 4710-1¹⁴, wird vorgegeben, dass für alle Expositionsklassen ein maximales Längen-Breiten-Verhältnis von 3:1 einzuhalten ist¹⁵. Ab der Expositionsklasse XC3, also bei jenen Betonen die beispielsweise Frost, Chloriden oder mechanischem Verschleiß ausgesetzt sind, ist der Prozentanteil an nicht gedrungenen Kornformen auf 40% limitiert, denn je mehr ein Gesteinskorn von der runden Gesteinsform abweicht, desto größer ist seine Gesteinskornoberfläche im Verhältnis zum Volumen. Durch die resultierende Erhöhung des Oberflächen-Volumen-Verhältnis, wird zur Gewährleistung einer gleichen Verarbeitbarkeit

¹⁰ Siehe [41]: Seite 44 - 45

¹¹ Siehe [5]: Tabelle NAD1, Seite 26-29

¹² Siehe [35]: Seite 47

¹³ Siehe [35]: Seite 65

¹⁴ Siehe [5]: Seite 48

¹⁵ Siehe [40]: Seite 18

wie bei der Verwendung von ausschließlich kugelförmiger Gesteinskörnung, ein erhöhter Wasser-Zement-Wert benötigt¹⁶.

Zusätzlich ist bekannt, dass auch die Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinskörnung den ausgehärteten Betonkörper beeinflusst. In der Praxis wurde festgestellt, dass bei einer Erhöhung der Gesteinsrauigkeit höhere Biegezug- und Zugbeanspruchung erzielt werden¹⁷.

2.2.3 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe werden während des Mischprozesses beigemischt um sowohl die Frischbetoneigenschaften als auch die Festbetoneigenschaften zu verbessern. Die feingemahlene Stoffe können unter anderem die Plastizität des Frischbetons steigern, was wiederum die Entmischungsneigung des Frischbetons verringert.

Unter der Entmischungsneigung von Frischbeton versteht man das Absetzen der Gesteinskörner vom Zementleim. Die ÖNORM B 4710-1¹⁸ unterteilt Zusatzstoffe in zwei Gruppen.

Dem *Typ I* werden jene Zusatzstoffe zugerechnet, welche nicht an der Zementhydratation mitwirken. Pigmente mit denen Verfärbungen im Festbeton erzielt werden sind ein Beispiel für *Typ I* Zusatzstoffe. Weiters zählt Gesteinsmehl dazu, welches ähnlich wie der Mehlkorngelbalt der Gesteinskörnung, die Verarbeitbarkeit des Frischbetons erleichtert. Zusatzstoffe des *Typs II* sind beispielsweise Flugasche, Silicastaub oder andere hydraulisch wirksame Zusatzstoffe. Sie führen zur Erhöhung der Festigkeit und der Dauerhaftigkeit des Festbetons. Sobald *Typ II* Zusatzstoffe zum Einsatz kommen, muss der sogenannte *k-Wert* berücksichtigt werden, ein Faktor der für die Berechnung des Bindemittelgehaltes *B* benötigt wird¹⁹. Der Wasser-Bindemittel-Wert wird gemäß Formel [2-1] berechnet. Zu beachten ist, dass nur ein genormter Prozentsatz des hydraulisch wirksamen Zusatzstoffes dem Bindemittel zugerechnet wird.

$$\frac{W}{B} = \frac{\text{wirksamer Wassergehalt}}{\text{Zement} + k * \text{Zusatzstoff}} \quad [2-1]$$

Mit: k k-Wert [-]

¹⁶ Siehe [40]: Seite 24

¹⁷ Siehe [41]: Seite 57

¹⁸ Siehe [5]: Seite 50

¹⁹ Siehe [34]: Seite 55-56

Wird beispielsweise Flugasche als Zusatzstoff für eine CEM I Zementsorte ausgewählt, so dürfen lediglich 25% des Zusatzstoffes, also k ist gleich 0,25, dem Bindemittelgehalt angerechnet werden. Bei der Zementwahl von CEM II/A 32,5 dürfen 15% des hydraulisch wirksamen Zusatzstoffes angerechnet werden. Weitere k -Werte sind der ÖNORM B 4710 Teil 1 [5] zu entnehmen.

2.2.4 Zusatzmittel

Zusatzmittel sind pulverförmige oder flüssige Substanzen die bereits in kleinen Mengen die Betoneigenschaften messbar verändern. Je nach Anforderung an den Beton werden unterschiedliche Zusatzmittel beigemischt²⁰:

- BV Betonverflüssiger
- FM Fließmittel
- ST Stabilisierer
- LP Luftporenbilder
- BE Erstarrungsbeschleuniger
- VZ Erstarrungsverzögerer
- DM Betondichtungsmittel
- EH Einpresshilfen

Die genaue Handhabung wird in der ÖNORM B 4710-1 [5] vorgegeben. Beispielsweise wird die maximale Dosis von Zusatzmitteln auf 50g/kg Zement limitiert.

Werden für eine Betonsorte mehrere Zusatzmittel gleichzeitig verwendet, so müssen diese auf ihre gegenseitige Verträglichkeit überprüft werden. Sofern Zusatzmitteldosierungen weniger als 2g/kg Zement ausmachen, dürfen diese direkt im Anmachwasser aufgelöst werden. Flüssige Zusatzmittel die anteilmäßig mehr als 3 l/m³ Beton ausmachen sind in der Berechnung des Wasser-Bindemittel-Wertes einzubeziehen. Letztlich ist zu erwähnen, dass obwohl im Werk hergestellter Beton im Fahrmischer nicht mehr verändert werden darf, es diesbezüglich Ausnahmen gibt. Fließmittel, Betonverflüssiger und/oder Erstarrungsverzögerer dürfen, sofern die vom Hersteller angegebenen Mindestmischzeiten eingehalten werden, auch erst kurz vor dem betonieren in der Fahrmischtrommel beigemischt werden²¹.

²⁰ Siehe [34]: Seite 59

²¹ Siehe [5]: Seite 55

2.2.5 Betonporosität

Das Porensystem [6] eines Betonkörpers ist für die Dauerhaftigkeit des Betons von großer Bedeutung, denn je mehr Poren ein Betonkörper aufweist, desto mehr Schwachstellen besitzt dessen Zementsteinmatrix²².

Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit sind daher Untersuchungen der Mikrostruktur des Zementsteines von großer Bedeutung. Hierzu sind Verteilung, Größe und Entstehung der Poren von Interesse [7].

An der Entstehung des Porensystems sind verschiedene Faktoren beteiligt. Einerseits entstehen Porenräume während des Herstellungs- und Hydratationsvorganges. Andererseits werden diese auch gezielt durch Zugabe von Luftporenbildner *LP* gesteuert.

Die im Zementstein vorliegenden Poren werden nach ihrer Größe gemäß Tabelle 2-2 unterteilt.

Tabelle 2-2: Porensysteme im Zementstein

Porensystem	Größenordnung [μm]
Gelporen	0,001 - 0,01 μm
Kapillarporen	0,01 - 100 μm
Luftporen	10 - 1000 μm
Verdichtungsporen	1000 - 10000 μm

Gelporen

Gelporen sind wassergefüllte Hohlräume, welche bei der Bildung des Hydrats entstehen. Da es sich um wassergefüllte Poren handelt können keine substanzschädigenden Gase durch Gelporen transportiert werden.

Kapillarporen

Für die Dauerhaftigkeit von Beton sind vor allem Kapillarporen maßgebend. Sie entstehen sofern der für den Anmachwasserraum vorgesehene Bereich nicht zur Gänze mit Zementgel ausgefüllt wird. Dies passiert beispielsweise, wenn mehr Wasser zur Verfügung steht als zur Hydratation benötigt wird, der Wasser-Zement-Wert demnach zu hoch dimensioniert ist. Es führt aber auch eine unvollständige Hydratation, im Falle eines zu niedrigen Wasser-Zement-Wertes, zur Bildung von Kapillarporen.

Die unsachgemäße Oberflächennachbehandlung frisch betonierter Bauteile kann dazu führen, dass ein Teil des zur Hydratation benötigten Anmachwassers verdunstet und somit die Bildung von Kapillarporen begünstigt.

²² Siehe [41]: Seite 358-359

Der Volumsanteil von Kapillarporen ist demnach vom Wasser-Zement-Wert und dem vorherrschenden Hydratationsgrad abhängig. Selbst bei einer optimalen Wasser-Zement-Dosierung kommt es aufgrund der Volumsabnahme während des Hydratationsprozesses zu sogenannten Schrumpfporen.

Luftporen

Luftporen entstehen einerseits während des Mischvorganges oder andererseits zufolge unvollständiger Verdichtungsarbeit.

Zur Erzielung eines ausreichenden Frost-Tau-Widerstands sind Luftporen von großer Bedeutung, da durch die kapillarsaugende Wirkung der Poren, vor allem der Kapillarporen, Oberflächenwasser in das Innere von Betonkörpern transportiert wird. Gefrieren, aufgrund niedriger Außentemperaturen, die wassergefüllten Poren so benötigen sie, wegen des um circa 9% erhöhten Volumens des Wassers im gefrorenen als im flüssigen Zustand, mehr Platz. Sollte der benötigte Platz in denen sich das Gefüge entspannen kann größer als der Luftporenanteil im Betonkörper sein, so sind Gefügesprengungen zu erwarten²³.

Auch nach einer ordnungsgemäßen Verdichtungsarbeit verbleibt ein gewisser Prozentsatz an Poren, man spricht von *Verdichtungsporen*, im Betonkörper zurück. Diese machen ca. 1 bis 1,5% des Volumskörpers aus.

2.2.6 Packungsdichte

Angaben über die granulometrische Zusammensetzung eines Korngemisches werden über den Parameter der Packungsdichte gemacht. Die Packungsdichte wird über den prozentuellen Anteil des Feststoffvolumens vom Gesamtvolumen einer Partikelschüttung definiert²⁴. Die Berechnung erfolgt gemäß Formel [2-2] :

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

Wobei:

D Packungsdichte [-]

ε Hohlraumgehalt [Vol.-%]

²³ Siehe [41]: Seite 122

²⁴ Siehe [39]: Seite 35

Die direkte Abhängigkeit der Packungsdichte von der Korngrößenverteilung einer Betonmischung zeigt Abbildung 2-6. Zu sehen sind sechs schematische Darstellungen von Zwickelräumen. Von links oben bis rechts unten werden diese vermehrt durch kleinere Körnungen ausgefüllt. Damit kann der Hohlraumgehalt einer Betonmischung deutlich reduziert werden.

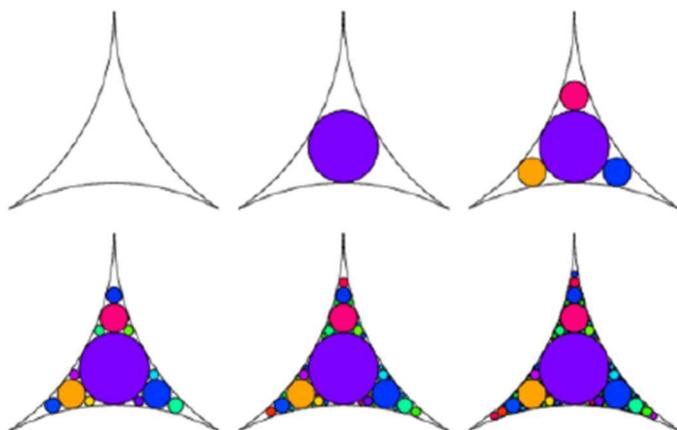


Abbildung 2-6: schematische Darstellung der optimalen Packungsdichte

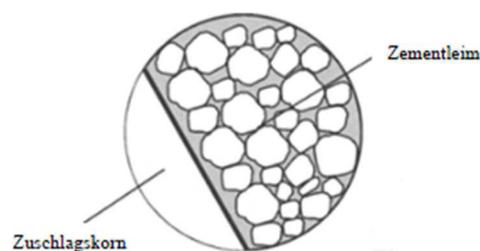


Abbildung 2-7: Wandeffekt im Nachbarbereich größerer Gesteinskörnungen

Zum Erreichen des theoretischen Grenzwertes von D ist gleich eins, müssen die vorhandenen Hohlräume mit immer kleiner werdenden Gesteinskörnungen, den Füllerstoffen, aufgefüllt werden [7]. Zur vereinfachten Modellierung werden rein kugelförmige Partikel betrachtet. Werden jedoch stattdessen gebrochene Gesteinskörnungen verwendet, so benötigt man zur Erzielung einer gleichen Packungsdichte einen höheren Füllstoffgehalt²⁵.

Ein optimales Kornverteilungsverhältnis hat positive Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton, auf die zu erreichende Druckfestigkeit²⁶, sowie auf den *Wandungseffekt*, der die Bildung von Hohlräumen innerhalb der Betonmatrix beschreibt. Der *Wandungseffekt* tritt vermehrt im Bereich von Schalungsflächen und im Nachbarbereich größerer Gesteinskörnungen auf. Wie in Abbildung 2-7 dargestellt, bilden sich Bereiche mit vermehrten Luftporen bzw. wassergefüllten Poren aus. Durch eine optimal abgestimmte Packungsdichte können die Hohlräume gefüllt und der *Wandungseffekt* minimiert bzw. umgangen werden²⁷.

²⁵ Siehe [40]: Seite 19

²⁶ Siehe [10]: Seite 14

²⁷ Siehe [39]: Seite 38

2.2.7 Frischbetonprüfungen

Betonprüfungen gibt es sowohl für Frischbeton als auch für Festbeton. Die Frischbetonprüfungen sind in erster Linie für die Weiterentwicklung der Betontechnologie von großer Bedeutung, währenddessen Festbetonprüfungen für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit herangezogen werden.

Für die vorliegende Arbeit von Interesse sind vorrangig jene der Frischbetonprüfung. Die hier verwendeten Frischbetonprüfungen sind in der ÖNORM EN 12350 [9] geregelt.

Von der Herstellung bis zum Einbringen und Verdichten einer Betonmischung sind hohe Anforderungen einzuhalten. Die Entmischung muss unterbunden werden und das Material, abgesehen vom selbstverdichtenden Betonen, verdichtbar sein. Die wichtigste Kenngröße von Frischbeton ist dessen Konsistenz, die eine Auskunft über die Verarbeitbarkeit bzw. Verdichtbarkeit des Betons liefert.

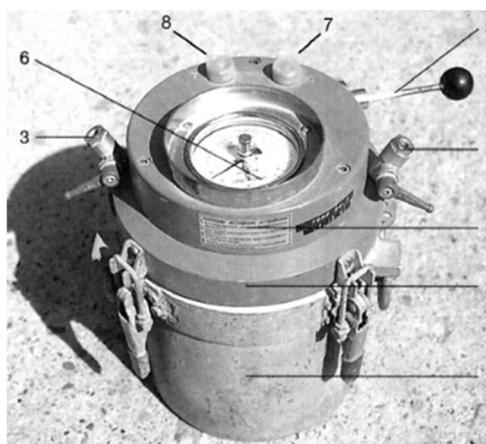


Abbildung 2-8: Luftporentopf²⁸

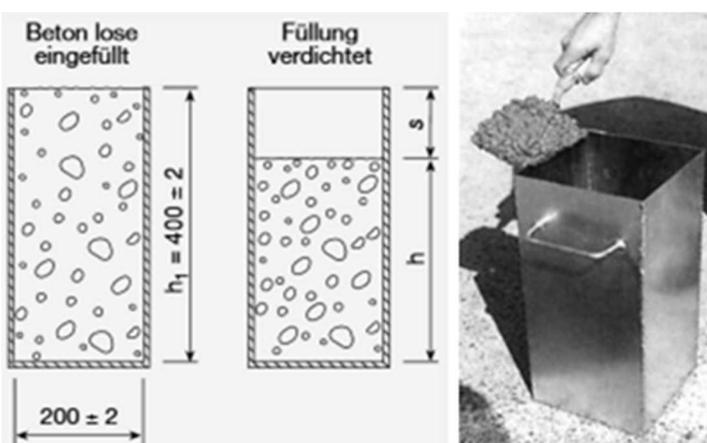


Abbildung 2-9: Bestimmung des Verdichtungsmaßes²⁹

Derzeit werden in Österreich die Konsistenzklassen über das Verdichtungsmaß und das Ausbreitmaß bestimmt. Weitere Frischbetonprüfungen sind der Trichterauslaufversuch und die Bestimmung des Luftporengehaltes.

Im Letzteren wird der Luftporengehalt einer Frischbetonmischung mittels Luftporentopf, siehe Abbildung 2-8, ermittelt. Aus dem vorhandenen Luftporengehalt können Aussagen über die Verdichtbarkeit der Frischbetonmischung getroffen werden³⁰.

²⁸ <http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkb1%C3%A4tter/B4.pdf>, Seite 5, Bild6: Druckausgleichsverfahren (LP-Topf), Zugriff am 30.04.2017

²⁹ <http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkb1%C3%A4tter/B4.pdf>, Seite 4, Bild5: Bestimmen des Verdichtungsmaßes, Zugriff am 30.04.2017

³⁰ <http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkb1%C3%A4tter/B4.pdf>, Seite 5, Zugriff am 30.04.2017

Zur Bestimmung des Verdichtungsmaßes wird ein, wie in Abbildung 2-9 dargestellt, 40cm hoher zylindrischer Behälter, mit einem Durchmesser von 20cm, randvoll mit Frischbeton befüllt und anschließend auf einem Rütteltisch verdichtet.

Sobald der Verdichtungsprozess abgeschlossen ist wird gemäß angeführter Formel [2-3], das Verdichtungsmaß c der Betonprobe bestimmt.

Das Ergebnis wird auf die zweite Kommastelle genau gerundet³¹.

$$c = \frac{h}{(h - s)} \quad [2-3]$$

Hierbei ist h die Höhe des Probekörpers in mm nach der Verdichtungsarbeit. Die Höhendifferenz des unverdichteten Probekörpers zum verdichteten Probekörper wird mit dem Parameter s in mm angegeben.

Mit dem so erhaltenen Verdichtungsmaß c , kann die Verdichtungsstufe laut ÖNORM B 4710-1³², siehe Auszug dieser in Tabelle 2-3 ermittelt werden.

Tabelle 2-3: Verdichtungsmaßklasse

Verdichtungsmaßklasse	Verdichtungsmaß [mm]	Beschreibung
C0	$\geq 1,46$	sehr steif
C1	1,45 - 1,26	steif
C2	1,25 - 1,11	steif plastisch
C3	1,10 - 1,04	-
C4	$\leq 1,04$	-

Zur Bestimmung der Ausbreitmaßklasse benötigt man einen in der Norm festgelegten und in Abbildung 2-10 dargestellten 70cm mal 70cm großen Ausbreittisch, einen kegelförmigen Metalltrichter, sowie Stößel, Kelle und Maßband.

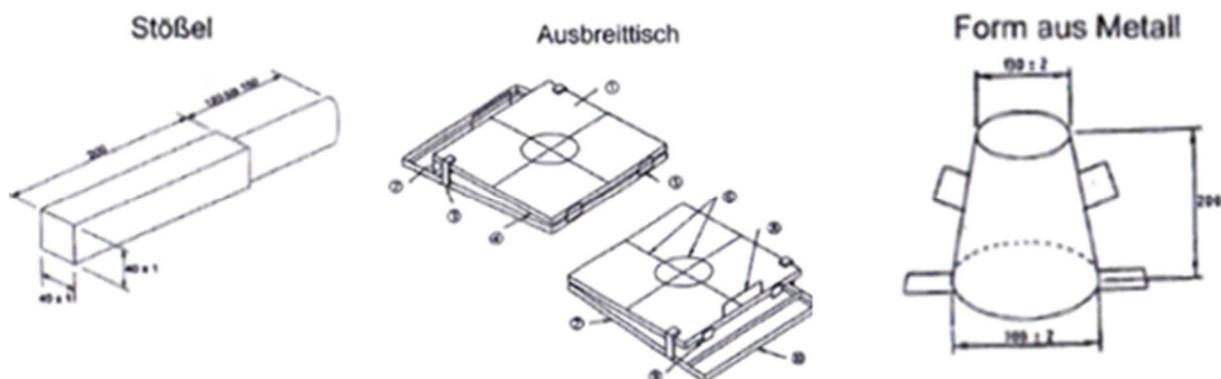


Abbildung 2-10: Prüfgeräte zur Bestimmung des Ausbreitmaßes³³

³¹ Siehe [34]: Seite 66

³² Siehe [5]: Seite 31

³³ Beton Akademie, Österreichische Bautechnik Vereinigung: Betontechnologie 1 (BT1), Ausgabe: November 2016, S160

Zu Beginn des Versuches wird Frischbeton in den auf dem Ausbreittisch stehenden Kegelstumpf zweilagig eingefüllt. Jede Lage mit zehn Schlägen verdichtet und danach der Kegelstumpf vorsichtig entfernt. Anschließend wird der Ausbreittisch fünfzehn Mal, innerhalb von drei bis sechs Sekunden, bis zum Anschlag angehoben und wieder fallen gelassen.

Letztendlich wird aus den zwei Diagonalen des Frischbetonkuchens, welche parallel zum Ausbreittisch gemessen werden, der Mittelwert a gebildet³⁴.

Mit dem Ausbreitmaß a kann gemäß ÖNORM B 4710-1, siehe Auszug dieser in Tabelle 2-4, eine Frischbetoneinteilung erfolgen.

Tabelle 2-4: Ausbreitmaßklassen

Ausbreitmaßklassen	Ausbreitmaß [cm]	Beschreibung
F38	35 - 41	plastisch
F45	42 - 48	weich
F52	49 - 55	sehr weich
F59	56 - 62	fließfähig
F66	63 - 69	sehr fließfähig
F73	70 - 76	extrem fließfähig

Die eben beschriebenen Frischbetonprüfungen sind auf Grund ihrer einfachen und schnellen Versuchsdurchführung für die Durchführung auf der Baustelle von großer Bedeutung.

Allerdings handelt es sich immer nur um 1-Punktmessungen, das bedeutet das die Messungen im Regelfall einmalig und zwar direkt nach der Frischbetonherstellung durchgeführt werden.

2.3 Mischprozesse

Bei der Herstellung von Beton ist das Einhalten exakter Betonrezepturen und Mischzeiten von großer Bedeutung. Durch zahlreiche Versuche ist bekannt, dass sowohl die Mischdauer, gemessen ab jenem Zeitpunkt zu dem keine weitere Stoffbeigabe erfolgt, sowie die chronologische Mischreihenfolge der Komponenten einen erheblichen Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften ausübt³⁵.

³⁴ Siehe [35]: Seite 159-161

³⁵ Siehe [44]: Seite 42

In welchem Ausmaß sich unterschiedliche Trockenmischdauern auf die Frischbetoneigenschaften auswirken wird anhand des Parameters der Viskosität im nachfolgenden Kapitel 4 nachgegangen.

Generell erfolgt die Betonherstellung in mehreren Mischabschnitten.

Zu Beginn werden die Ausgangsstoffe des Zementes trocken vermischt. Nach dem Erreichen eines homogenen Stoffgemenges werden der Trockenmischung Wasser sowie Fließmittel zugegeben und die Komponenten erneut vermischt.

Kirnbauer schreibt in seiner Dissertation [10] über die Veränderungen der Frischbetoneigenschaften welche aus der schrittweisen Fließmitteldosierung resultieren. Probemischungen bei denen anfangs nur ein Teil des Fließmittels zusammen mit dem Wasseranteil der Trockenmischung ergänzt und der restliche Anteil nachträglich unter kürzeren Mischzeiten zugegeben wurde, besaßen verbesserte Verarbeitungseigenschaften³⁶.

2.3.1 Nationale Normenregelung

Richtlinien für den Herstellungsprozess und der Prüfung von Frisch- und Festbeton sind in folgenden österreichischen Normen zu finden:

- ÖNORM B 4710-1 Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsausweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1 für Normal und Schwerbeton) [5]
- ONR 23303: Prüfverfahren Beton [11]
- ÖNORM EN 12350 Prüfung von Frischbeton [9]
- ÖNORM EN 12390 Prüfung von Festbeton [12]

In der ÖNORM B 4710-1 [5] werden beispielsweise Dosiertoleranzen für Betonmengen die über 1m^3 betragen geregelt. Weiters geregelt sind die Dosierungen von Zement, Wasser, Gesteinskörnungen und Zusatzstoffen mit einem Massenanteil größer 5% Zement. Diese dürfen die Toleranzgrenze $\pm 3\%$ der erforderlichen Menge nicht überschreiten. Zusatzstoffe mit einem Massenanteil kleiner 5% Zement, besitzen eine Toleranzgrenze von $\pm 5\%$ der erforderlichen Menge. Auch Anwendungsvoraussetzungen für Fahrmischer sind vorgegeben. Sowie der Verweis Mischgeräte, zur Einhaltung der Mischqualität, nicht über ihr Verfassungsvermögen hinaus zu befüllen³⁷.

Die ONR 23303 [11] gibt unter anderem vor, dass ein Labormischer zur Betonherstellung verwendet werden soll. Idealerweise ein Gegenstrom-Zwangsmischer, da bei diesen Modeltypen Mischbehälter und Mischwerkzeug gegenläufig um ihre Achsen rotieren. Die

³⁶ Siehe [10]: Seite 55

³⁷ Siehe [5]: Seite 98-101

Zielsetzung ist eine vollständige Homogenisierung der Ausgangsstoffe innerhalb der vorgegebenen Verarbeitungszeit, bei maximalem Füllgrad des Mixers und minimalen Masseverlusten [11]. Das Wort *homogen* lässt sich vom griechischen Wort *homogenes*, zu Deutsch „vom gleichen Geschlecht“ ableiten [13]. Das Mischgut soll eine einheitliche Beschaffenheit erreichen. Dazu werden zwei oder mehrere Komponenten durch Platzwechsellvorgänge in einem vorgegebenen Volumenkörper vermischt.

2.3.2 Mischmechanismen

Für Feststoffe gibt es generell zwei Mischmechanismen, dargestellt in Abbildung 2-11, die *konvektive* und die *dispersive* Mischung.

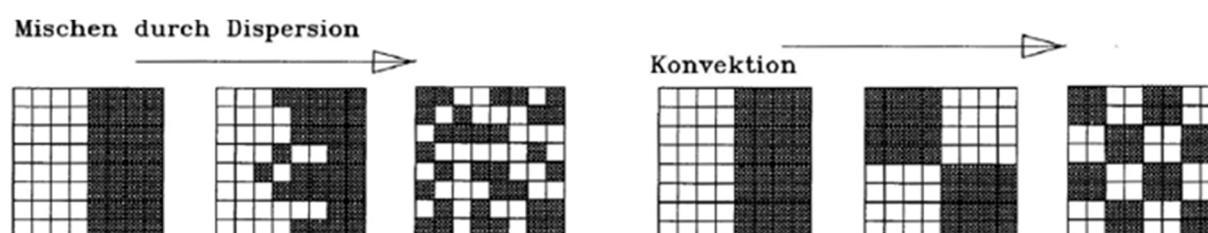


Abbildung 2-11: Mischmechanismen³⁸

Konvektive Mischmechanismen, auch *Makromixing* genannt, beschreiben die relative Bewegung von ganzen Elementgruppen. Die Mischung entsteht durch mehrmaliges Teilen und erneutem Vermengen der Ausgangsstoffe, zu sehen auf der rechten Seite von Abbildung 2-11. Im Gegensatz dazu beschreibt die *dispersive* Mischung, zu sehen auf der linken Seite von Abbildung 2-11, zufällige Bewegungen einzelner Elemente, auch *Mikromixing* genannt. Der Mischmechanismus kann jedoch erst nach Überwinden der Schwerkraft sowie der *Coulomb'schen Reibung* stattfinden.

Für die Betonherstellung werden beide Mechanismen herangezogen, da die Werkzeuge des Betonmischers konvektive Mechanismen auslösen und diese dispersive Mechanismen auf das Mischgut bewirken³⁹.

2.3.3 Mischzustände

In Abbildung 2-12 sind sechs verschiedene Mischzustände zweier, schwarzer und weißer, Ausgangskomponenten abgebildet. Angefangen von Abbildung 2-12a die die Komponenten in ihrer unvermischten Lage darstellt bis hin zur homogenen Zufalls Mischung in Abbildung 2-12f welcher der höchsten zu erreichenden Mischgüte entspricht.

³⁸ Weinekötter R.; Gericke H, Mischen von Feststoffen, Prinzipien, Verfahren, Mischer, Springer, 1995, S.8, Abb.2.1 Mechanismen des Mischens

³⁹ Siehe [36]: Seite 7-8

Die theoretisch idealste Mischung wäre eine schachbrettartige Verteilung der beiden Ausgangskomponenten wie es in Abbildung 2-12b zu sehen ist. Jedoch kann eine solch ideale Anordnung der Komponenten in der Realität nicht durch Mischprozesse erzielt werden. Handelt es sich um Materialien welche zu Agglomerationen neigen, bilden sich Texturen wie man sie zum Beispiel vom Werkstoff Holz kennt (Abbildung 2-12c).

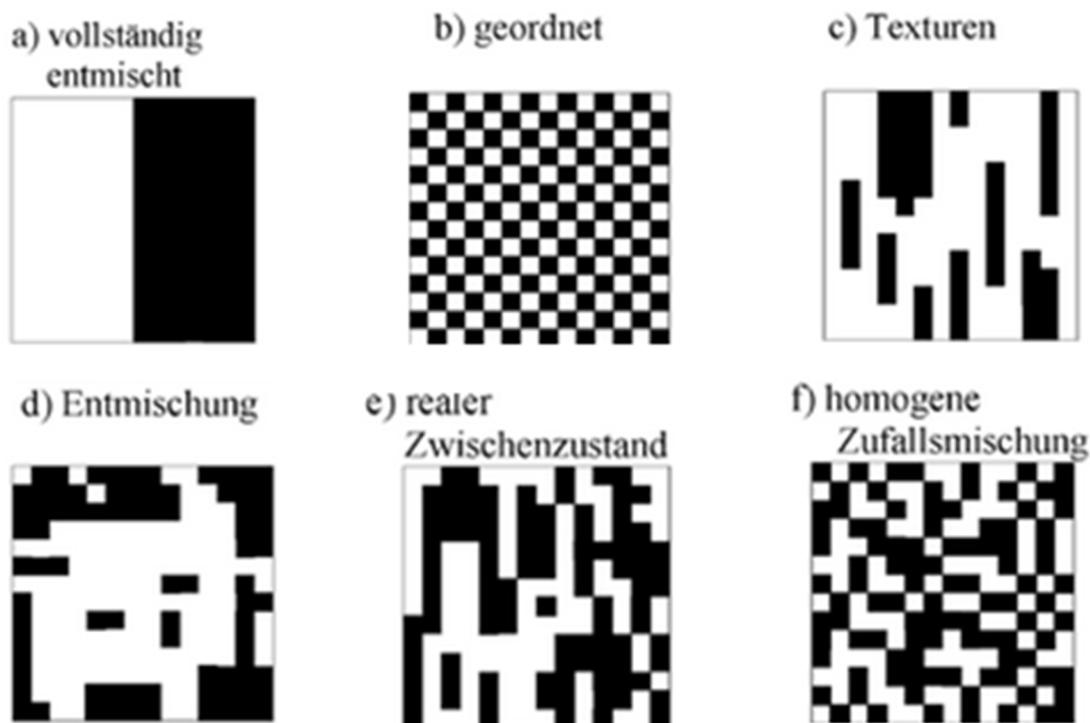


Abbildung 2-12: mögliche Mischzustände⁴⁰

Abbildung 2-12d beschreibt den unerwünschten Vorgang des Betonblutens. Abbildung 2-12e stellt einen Zwischenzustand zwischen dem Mischzustand von Abbildung 2-12d und Abbildung 2-12f dar. Für die Trockenmischung und letztendlich Frischbetonherstellung wird eine gleichmäßige Zufallsmischung, auch stochastische Homogenität genannt, wie sie in Abbildung 2-12f zu sehen ist, angestrebt.

2.3.4 Mischgüte

Die Mischgüte [13] ist ein Maß zur Beschreibung der Homogenität einer Probe und wird gemäß Formel [2-4] über die Varianz angegeben⁴¹.

Als Beispiel können weiße und schwarze Komponenten betrachtet werden, welche miteinander vermischt wurden. Wie gut die beiden Komponenten homogenisiert wurden wird

⁴⁰ M.Kraume, Mischen und Rühren: Grundlagen und moderne Verfahren, WILEY-VCH Verlag, Berlin, 2003, S.15, Bild 1.11: Verschiedene Mischzustände

⁴¹ Siehe [44]: Seite 15

anhand von Stichproben ermittelt. Es gilt, je kleiner die Abweichung einer Stichprobe zu der zu erwarteten Zusammensetzung der Gesamtzusammensetzung ist, desto kleiner ist ihre Varianz und desto qualitativ höhere Mischergebnisse werden erzielt.

Mathematisch gesehen wird die Ist-Konzentration X_k an weißen Komponenten einer Stichprobe i , mit der Soll-Konzentration P an weißen Komponenten der Gesamtkonzentration verglichen.

Da Stichproben sowohl höhere als auch niedrigere Ist-Konzentrationen als Soll-Konzentrationen enthalten können, wird zur Bestimmung der Abweichungen (Streuungsmaße) die quadratische Größe gebildet.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - P)^2}{n} \quad [2-4]$$

Wobei:

n ... Anzahl der Proben

i ... aktuelle Probe

X_i ... vorhandene Konzentration in der i -ten Probe

Man spricht von der theoretischen Varianz, da für die Ermittlung der Mischgüte die gesamte Mischcharge in n gleichgroße Proben unterteilt wird.

Sofern nur stichprobenartig Mengen zur Ermittlung der Mischgüte entnommen werden, wird die *empirische Varianz*, auch Stichprobenvarianz, gemäß Formel [2-5] berechnet⁴².

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{(n-1)} \quad [2-5]$$

Wobei:

μ ... arithmetisches Mittel

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

2.3.5 Probenentnahme ⁴³

Zur Ermittlung der Varianz darf der Einfluss der Probenmenge nicht außer Acht gelassen werden. Je größer eine Stichprobe ist, desto kleiner wird der Wert der Streuung. Daraus

⁴² Siehe [30]: Seite 8

⁴³ Siehe [30]: Seite 10

ist zu schließen, dass die Varianz zur Ermittlung der Mischgüte zwar herangezogen werden kann, jedoch vor jeder Mischgüteanalyse eine sinnvolle Probengröße festgelegt werden sollte.

Generell gibt es direkte und indirekte Auswertungsmethoden.

Bei der direkten Auswertung können beispielsweise die in der Probe enthaltenen Teilchen gezählt oder bei unterschiedlich großen Ausgangsstoffen eine Trennung mittels Sieb vorgenommen werden. Wenn möglich kann eine der beiden Komponenten chemisch gelöst bzw. thermisch zersetzt werden.

Bei der indirekten Probenauswertung kommt es z.B. zum Einsatz radioaktiver Markierungen oder Färbungen.

2.3.6 Mischmaschinen

Im Regelfall werden für die Betonherstellung entweder Freifallmischer oder Zwangsmischer eingesetzt.

Die Mischbehälter von Freifallmischem rotieren horizontal um ihre eigene Achse. Die Homogenisierung erfolgt hierbei durch das Anheben des Mischguts mittels der horizontal eingebauten Mischwerkzeuge, die dieses nach Überwindung der Schwerkraft wieder fallen lassen. Bei höheren Drehzahlen können aus der Rutschbewegung auch Wurfbewegungen entstehen die gegebenenfalls zu unerwünschten Mischgutbeschädigungen führen.

Zwangsmischer bestehen aus starren oder gelenkig gelagerten Mischbehältern. Die Mischwerkzeuge sind je nach Modell, vertikal-, horizontal oder schräg eingebaut. Man spricht vom Zwangsmischen da die Durchmischung des Mischgutes durch die drehenden Werkzeuge zwangsweise geschieht [15].

Durch etwaige Materialquetschungen zwischen dem Mischbehälter und dem Werkzeug kann es bei Zwangsmischem zu höheren Mehlkorngelaten kommen.

Zwei Beispiele für vertikal angebrachte Mischwerkzeuge sind der Ringtrog- und der Planetenmischer. Je nach Führung des Mischwerkzeuges, ring- oder planetenförmig, unterscheiden sich diese beiden Mischer⁴⁴. Hierbei ist anzumerken, dass der Planetenmischer durch seine komplexere Mischbewegung eine höhere Mischgüte erreicht. Beide Typen sind starr gelagert. Die Homogenisierung erfolgt lediglich durch die Mischwerkzeuge, daher kann nur eine zweidimensionale Mischung erfolgen.

⁴⁴ Siehe [41]: Seite 228-229

Tellermischer besitzen auch vertikale Mischwerkzeuge, jedoch ist ihr Mischbehälter gelenkig gelagert und dreht sich um seine eigene Achse. Mischwerkzeug und Behälter können gegenläufig rotiert werden.

Bei zusätzlicher Neigung des Mischbehälters, wie beim sogenannten Schrägtellermischer, erfolgt eine dreidimensionale Mischung⁴⁵.

Für die Hauptversuche der Arbeit wurde der Intensivmischer R02 der Firma *Eirich*, zu sehen in Abbildung 2-13, verwendet. Bei diesem Intensivmischer liegt im Gegensatz zu Konkurrenzprodukten der Wirbler nicht am Mischbehälter an.

Durch den sich um seine eigene Achse drehenden, geneigten Mischbehälter wird das Mischgut gemäß den Haftreibungskräften entlang des Mischbehälters nach oben, im Uhrzeigersinn, transportiert. Sobald die Komponente der Schwerkraft größer als die der Haftreibungskraft wird, fällt das Material auf den gegen den Uhrzeigersinn rotierenden Wirbler. Erst durch die Trennung des Bodenkontaktes von Wirbler und Mischbehälter ist es möglich den Wirbler mit Geschwindigkeiten von bis zu 40m/s rotieren zu lassen. Die Geschwindigkeit kann vom Nutzer individuell gesteuert werden. Durch die Erhöhung der Drehgeschwindigkeit können mögliche Klumpenbildungen im Zement unterbunden und somit eine höhere Mischgüte erzielt werden.

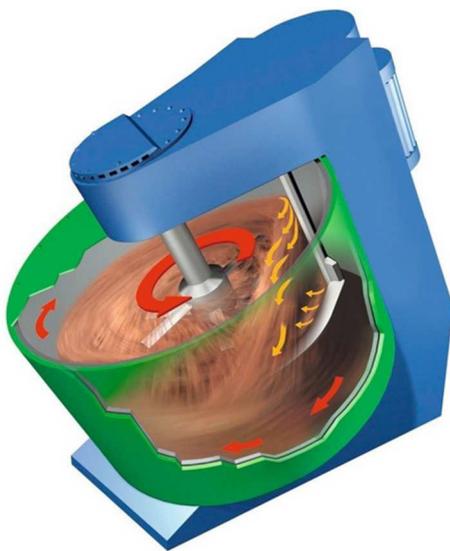


Abbildung 2-13: Intensivmischer R02 der Firma *EIRICH*⁴⁶



Abbildung 2-14: *Horbart* Mischer der TU Wien

Auch der in anderen Mixern nicht zu unterschätzende Anteil an Reibungskräften und dem daraus resultierenden Werkzeugverschleiß des Wirblers, wird durch den fehlenden

⁴⁵ Siehe [30]: Seite 21-115

⁴⁶ http://www.bft-international.com/de/artikel/bft_2011-01_Eine_ganz_andere_Mischtechnik_1050200.html

Bodenkontakt minimiert. Zusätzlich besitzt der Intensivmischer einen in Abbildung 2-13 rechts am Mischtopf montierten Wand-Boden-Abstreifer. Dieser fungiert als zusätzliche Umlenkraft. Durch die eben beschriebenen Ausführungskomponenten schafft es der Intensivmischer der Firma *Eirich* schon innerhalb einer Drehung des Mischbehälters um seine eigene Achse, das gesamte Mischgut in Bewegung zu versetzen. Als Ergebnis erhält man eine wirkungsvolle Mischgutzirkulation, die vor allem für anspruchsvolle Betone wie *UHPC* eine enorme Qualitätssteigerung ermöglicht [16].

Da jedoch für die Vorversuche lediglich Untersuchungen am Viskomaten durchgeführt werden sollen und der zu füllende Messtopf ein Fassungsvermögen von 370ml besitzt, wird im Rahmen der Vorversuche der *Hobart* Mischer (Abbildung 2-14) verwendet. Im Gegensatz zum Intensivmischer, welcher Mischungen von drei bis fünf Litern herstellen kann, können im *Hobart* Mischer bereits ein Liter Mischungen hergestellt werden.

2.4 Rheologie

2.4.1 Begriffsdefinition

Das Wort *Rheologie* wird aus dem altgriechischen Wort *rhein* abgeleitet und bedeutet übersetzt fließen bzw. strömen. Die Rheologie beschreibt das Fließverhalten von Materie. Analysiert werden die Fließeigenschaften und das Deformationsverhalten von Festkörpern und Flüssigkeiten, welche unter Scherbeanspruchung stehen⁴⁷.

Die ersten wissenschaftlichen Ansätze zu diesem Themengebiet wurden im siebzehnten Jahrhundert von den Herren *Evangelista Toricelli*, *Robert Hooke* und *Isaac Newton* aufgestellt. Im neunzehnten Jahrhundert betrieben weitere namhafte Wissenschaftler wie beispielsweise *Claude Louis Marie Henrie Navier*, *Robert Brown*, *Claude Barré de Saint-Vernant* und *Georges Gabriel Stokes* diesbezüglich Forschungen.

Der Begriff Rheologie wurde jedoch erst im Jahre 1929 durch *Eugene Cook Bingham* geprägt⁴⁸. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Rheologie als eigenständige Wissenschaft angesehen⁴⁹.

Generell unterscheidet man zwischen zwei rheologischen Betrachtungsebenen, der Mikro- und der Makrorheologie⁵⁰. Die Unterscheidung der beiden Betrachtungsebenen wird in Abbildung 2-15 für den Werkstoff Beton erläutert.

⁴⁷ Siehe [42]: Seite 19

⁴⁸ Siehe [42]: Seite 365-378

⁴⁹ Siehe [42]: Seite 19

⁵⁰ Siehe [38]: Seite 7-8

Die übliche Variante zur Beurteilung von Frischbeton ist die der mikrorheologische Betrachtung, siehe Abbildung 2-15. Dabei werden die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile detailliert untersucht und deren Beitrag zum Fließverhalten des Gesamtsystems beschrieben. Beim makrorheologischen Ansatz, dargestellt rechts in Abbildung 2-15, wird das gesamte Kontinuum untersucht. Diese Ansatzweise ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn genügend Anforderungen und Beschränkungen an die verwendeten Komponenten eingehalten werden.

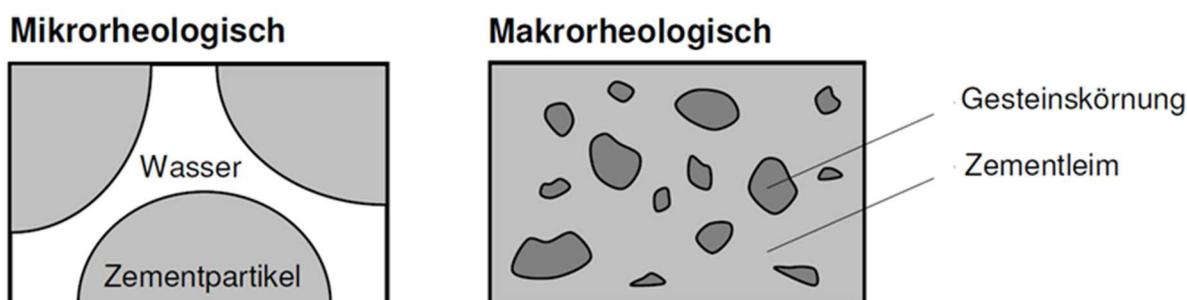


Abbildung 2-15: strukturphysikalische Betrachtung am Beispiel des Werkstoffes Beton⁵¹

Sollten Kontinuumstörungen vorliegen, werden diese im makrorheologischen Ansatz nicht detailliert betrachtet und können erhebliche Qualitätseinbußen des Frischbetons zur Folge haben⁵².

Die nachfolgenden Kapitel behandeln die grundlegenden Begriffe der Rheologie, welche für den experimentellen Teil der Diplomarbeit benötigt werden.

2.4.2 Viskosität

Die charakteristische Stoffgröße der Rheologie ist die Viskosität η eines Fluides. Sie ist ein Maß für dessen Zähflüssigkeit. Je dickflüssiger ein Stoff ist, desto höhere Viskositätswerte erreicht er. Umgekehrt deuten niedrige Viskositätswerte auf dünnflüssige Fluide hin. Dieser stoffspezifische Faktor beschreibt demnach die aufnehmbare innere Reibung der Fluidschichten [17] und wird durch die Division der Scherspannung τ durch die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ermittelt, angegeben in der Formel [2-7].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{mit } \tau = \frac{F}{A} \quad \text{und } \dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad \left[\text{Einheiten: } \frac{\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}{\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)/\text{m}} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \text{Pa} \cdot \text{s} \right] \quad [2-7]$$

⁵¹ M. Beitzel: Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften, KIT Scientific Publishing, 2014, Seite 7, Bild 2.1: Strukturphysikalische Betrachtung auf einer mikrorheologischen Ebene (links) und einer makrorheologischen Ebene (rechts) am Beispiel des Werkstoffes Beton

⁵² Siehe [38]: Seite 7-8

2.4.3 Van-der-Waals-Wechselwirkung

Im neunzehnten Jahrhundert entdeckte der niederländische Physiker *Johannes Diderik van der Waals* die schwachen Anziehungskräfte zwischen Atomen und/oder Molekülen von Kleinstteilchen. Die zwischenmolekularen Bindungskräfte benannte er als *Van-der-Waals-Wechselwirkung*. Dabei handelt es sich um Wechselwirkungen zwischen freibeweglichen Elektronen eines Stoffes und anderen unpolaren Molekülen, welche eine Verzahnung bzw. Verkittung der Fluide bewirkt. Die zwischenmolekularen Bindungskräfte haben jedoch nur eine geringe Reichweite. Ihre Anziehungskraft fällt mit der sechsten Potenz des Abstandes ab [18].

In Abbildung 2-16 wird ersichtlich, dass die *Van-der-Waals-Wechselwirkungen* zudem stark von der Umgebungstemperatur abhängen.

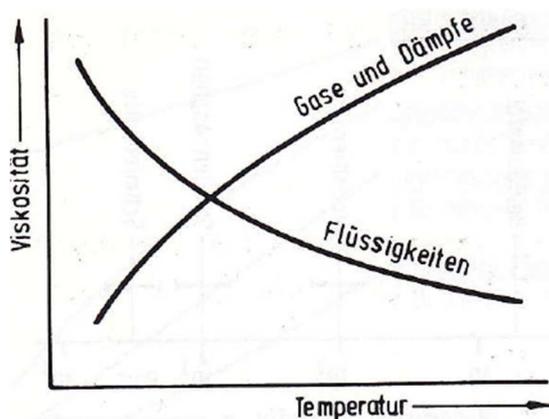


Abbildung 2-16: Viskosität-Temperatur-Diagramm⁵³

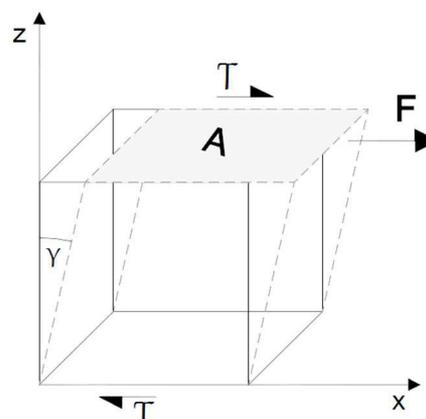


Abbildung 2-17: Scherverformung

Bei steigender Temperatur kommt es in Folge der *Brown'schen Molekularbewegung* zur Zunahme der kinematischen Energie.

Jene heftige Bewegung hebt die vergleichsweise schwächere *Van-der-Waals-Wechselwirkung* auf [19]. Umgekehrt verhält sich dies bei Gasen und Dämpfen, deren Viskosität mit zunehmender Umgebungstemperatur, aufgrund der steigenden Strömungswiderstände der Teilchen, ansteigt. Der Einfluss unterschiedlicher Druckverhältnisse ist vernachlässigbar klein⁵⁴.

⁵³ H. Sigloch, Technische Fluidmechanik, Sechste, neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008., S.22, Bild 1-12. Prinzipielles Viskositätsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur T bei konstantem Druck, (Viskosität-Temperatur-Diagramm, sog. VT-Blatt), hier kinematische Viskosität $\nu=f(T)$.

⁵⁴ Siehe [32]: Seite 22

2.4.4 Scherspannung τ

Die Scherspannung τ beschreibt jenen Widerstand eines flüssigen Körpers, den er einer angreifenden Kraft entgegensetzt, siehe dazu Abbildung 2-17. Durch Division der Kraft durch die Fläche erhält man die vorhandene Scherspannung τ , siehe Formel [2-7].

2.4.5 Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ⁵⁵

Die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$, auch als Geschwindigkeitsgefälle oder Scherrate bekannt, wird in Folge einer Scherspannung ausgelöst. Zum besseren Verständnis werden die Abbildung 2-18 und die Abbildung 2-19 herangezogen.

Abbildung 2-18 zeigt eine in Ruhe befindliche Flüssigkeit deren Oberfläche durch die Kraft F_r in Bewegung versetzt wird. Dabei kommt es zu einem Auseinanderreißen der Fluidteilchen, dessen Deformationsausmaß von der inneren Reibung des Fluides abhängt. Sobald die zwischen der obersten und der angrenzenden Schicht wirkende molekulare Anziehungskraft überwunden ist, beginnt auch diese sich in Richtung der Kraft zu verschieben. Innerhalb des Fluides entsteht eine Impulsübertragung, die sich kettenartig in die Tiefe ausbreitet. Dargestellt in Abbildung 2-19. Aufgrund der Reibung verliert diese Impulsübertragung jedoch mit zunehmender Tiefe an Geschwindigkeit. Man spricht auch von der Ausbildung eines Geschwindigkeitsprofils. An der Fluidoberfläche und an dessen Untergrund herrschen unterschiedliche Geschwindigkeiten vor.

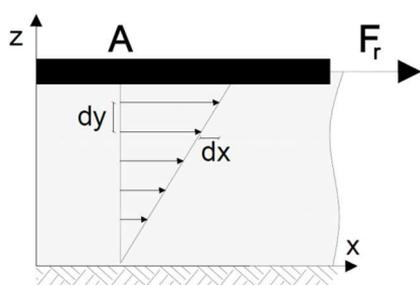


Abbildung 2-18: Geschwindigkeitsgefälle

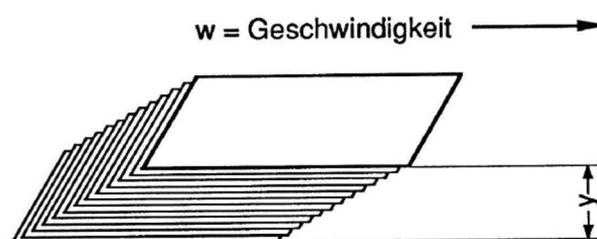


Abbildung 2-19: Schergeschwindigkeit⁵⁶

Idealerweise, vor allem bei geringen Schichtdicken, bildet sich ein lineares Geschwindigkeitsgefälle aus. Je dicker die Schichtstärke des Fluides ist, desto unterschiedlicher verlaufen die sich einstellenden, unter anderem auch nichtlinearen, Geschwindigkeitsprofile⁵⁷.

⁵⁵ Siehe [32]: Seite 17-18

⁵⁶ H.-P. Wilke, R. Buhse und K. Groß, Mischer, Verfahrenstechnische Grundlagen und apparative Anwendungen, 1. Ausgabe, Essen: Vulkan-Verlag, 1991. S12, Abb.3 Definition der Schubspannung

⁵⁷ Siehe [38]: Seite 8-9 und [32]: Seite 16-17

2.4.6 Rheologische Modelle

Wie bereits erwähnt ist die Viskosität ein stoffspezifischer Parameter. Unterschiedliche Materialien reagieren unterschiedlich auf von außen einwirkende Belastungen.

Die drei idealisierten Grundmodelle sind wie folgt [20]:

Ideale Elastizität

So bezeichnete Fluide reagieren auf eine einwirkende Spannung σ ohne zeitliche Verzögerung mit der Deformation ε . Es handelt sich um eine begrenzte und proportional zur Einwirkung reagierende, reversible Verformung. Bei Entlastung deformiert sich der ideal-elastische Körper wieder in seine Ausgangslage zurück. Für Berechnungen wird das *Hooke'sche Gesetz* angewendet.

Ideale Viskosität

So bezeichnete Fluide besitzen keine Fließgrenze. Auf eine einwirkende Spannung σ reagieren die Fluide mit einer zeitverzögerten irreversiblen Deformation ε , deren Deformationsgeschwindigkeit proportional zur einwirkenden Spannung σ verläuft. Das Verhalten tritt bei idealen Flüssigkeiten, den nach ihrem Entdecker benannten *Newton'schen Fluiden*, zu.

Ideale Plastizität

Ideal-plastische Fluide reagieren erst nach Überschreitung ihrer charakteristischen Fließgrenze mit einer irreversiblen Deformation ε . Vor Erreichen der Fließgrenze verhält sich das Fluid wie ein Festkörper. Die spezifischere Unterteilung folgt in den nachstehenden Kapiteln.

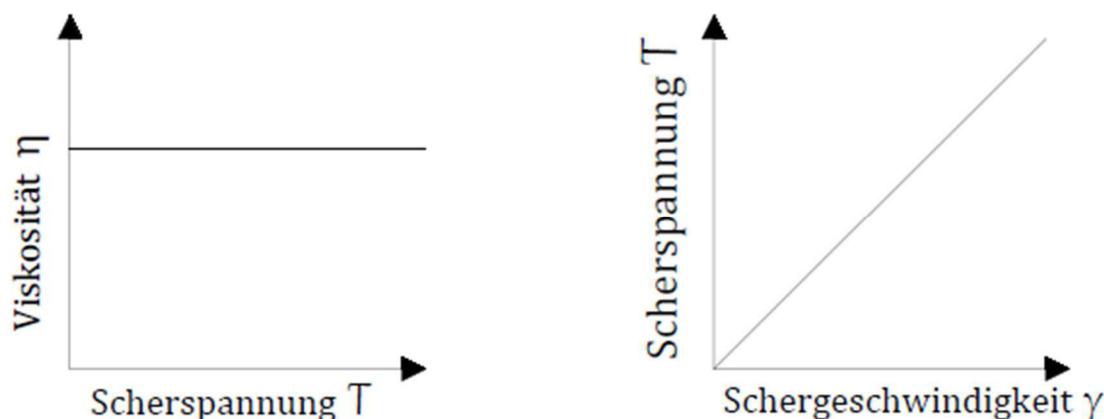
Zu erwähnen ist, dass sich die Rheologie streng genommen nicht mit *Newton'schen Fluiden* beschäftigt. Zur Vollständigkeit der Diplomarbeit werden diese jedoch ebenfalls beschrieben⁵⁸.

2.4.7 Newton'sches Fließverhalten⁵⁹

Der englische Naturwissenschaftler *Isaac Newton* beschäftigte sich mit der wissenschaftlichen Erforschung des Verhaltens von Fluiden.

⁵⁸ Siehe [32]: Seite 17

⁵⁹ Siehe [32]: Seite 17-18

Abbildung 2-20: Zusammenhänge bei newton'schem Fließverhalten⁶⁰

Dabei beschrieb er Stoffe, deren Scherspannung τ sich proportional zur Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ verhalten, als newtonsche Fluide, zu sehen im τ - $\dot{\gamma}$ -Diagramm in Abbildung 2-20. Das η - τ -Diagramm verrät, dass trotz steigender Scherspannung die Viskosität Newton'scher Flüssigkeiten konstant bleibt. Beispiele für Newton'sche Fluide sind Wasser, Luft und Öle und Erdgas. Sie werden durch die Bewegungsgleichung von Navier-Stokes beschrieben.

2.4.8 Nicht Newton'sches Fließverhalten^{61 62}

Nicht Newton'sche Flüssigkeiten sind jene Flüssigkeiten deren Viskosität sich nicht proportional zur Schergeschwindigkeit verändert. Ihr τ - $\dot{\gamma}$ -Verhältnis ist nicht konstant bzw. in Ausnahmefällen sogar zeitabhängig. Es kann wie folgt unterteilt werden [21]:

Dilatantes Fließverhalten

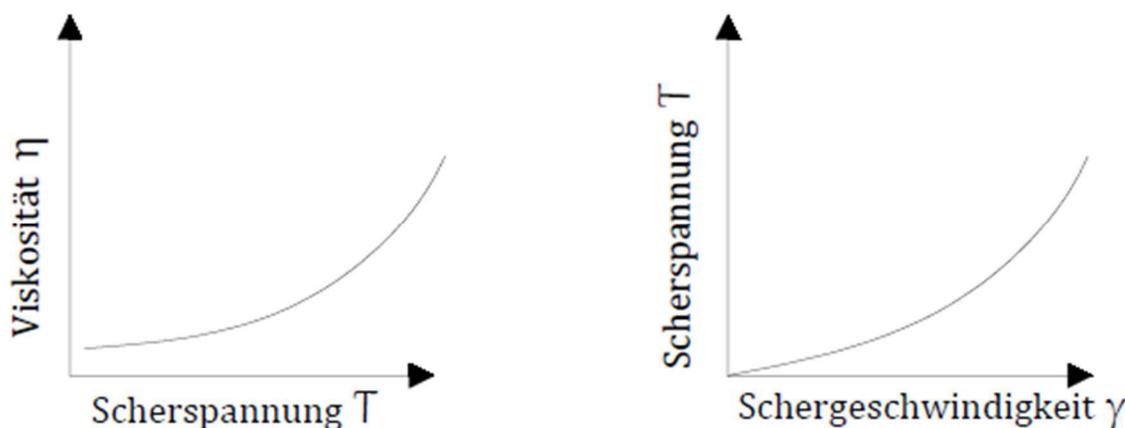


Abbildung 2-21: Zusammenhänge bei dilatantem Fließverhalten

⁶⁰ Skizze nachgezeichnet aus [30]: Seite 13

⁶¹ Skizzen nachgezeichnet aus [30]: Seite 13-16

⁶² Siehe [30]: Seite 13-16

Jene Fluide zeigen bei steigender Schergeschwindigkeit ein sich versteifendes Fließverhalten, siehe Abbildung 2-21. Beispiele für dilatantes Fließverhalten findet man bei Stärkesuspensionen oder nassem Sand⁶³.

Pseudoplastisches Fließverhalten

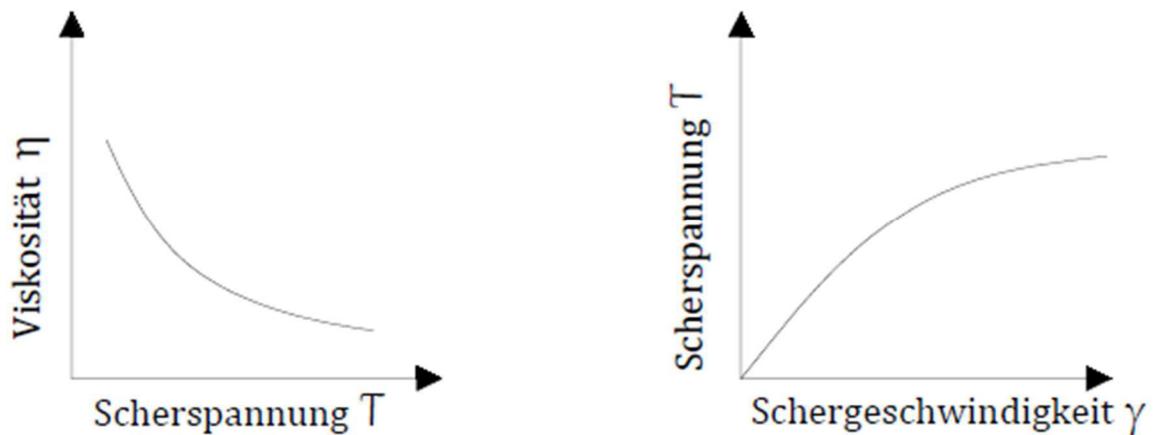


Abbildung 2-22: Zusammenhänge bei pseudoplastischen Fließverhalten

Pseudoplastisches Fließverhalten, auch als Strukturviskosität bezeichnet, reagiert bei steigenden Schergeschwindigkeiten konträr zum Fließverhalten dilatanter Fluide. Ihre Viskosität fällt bei steigender Schergeschwindigkeit und baut sich bei deren Entlastung wieder auf, siehe dazu Abbildung 2-22. Anwendungsbeispiele findet man bei Polymer-schmelzen und Polymerlösungen⁶⁴ oder Kunstharzfarben⁶⁵.

Plastisches Fließverhalten (Bingham-Körper bzw. Casson-Körper)

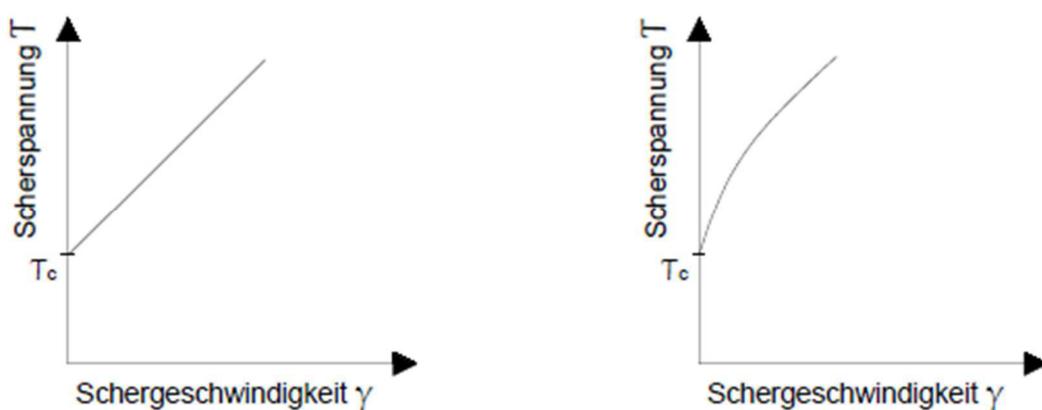


Abbildung 2-23: Zusammenhänge für Bingham- und Casson-Körper

⁶³ Siehe [32]: Seite 19

⁶⁴ Siehe [32]: Seite 19

⁶⁵ Siehe [43]: Seite 201

Sowohl *Bingham*- als auch *Casson*-Körper besitzen ein plastisches Fließverhalten. Bis zum Erreichen der stoffspezifischen Fließgrenze können sie als Festkörper, nach Überschreiten der Fließgrenze als Flüssigkeit betrachtet werden.

Dabei steigt bei *Bingham*-Körpern die Schergeschwindigkeit proportional zur Viskosität. Es wird ein ideal-plastisches Verhalten, wie auf der linken Seite von Abbildung 2-23 zu sehen ist, erreicht. Die mathematische Gleichung von *Bingham*-Körpern ist in Formel [2-8] dargestellt⁶⁶.

$$\tau = \tau_c + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad [2-8]$$

Mit: τ_c ... kritische Scherspannung bzw. Fließgrenze

η_B ... Viskosität *Binghamscher Körper*

$\dot{\gamma}$... Schergeschwindigkeit

Casson-Körper besitzen, wie in Abbildung 2-23 zu sehen ist, diese Proportionalität nicht. Der für die vorliegende Arbeit relevante Baustoff Beton zählt neben Zementleim, Putz und Mörtel als *Bingham*-Körper⁶⁷. Beispiele für *Casson*'sche Körper sind diverse Schmierfette und Schokoladenmousse [21].

Thixotropes Fließverhalten

Substanzen die sich ähnlich wie pseudoplastische Substanzen mit steigender Schergeschwindigkeit verdünnen, jedoch unter zusätzlicher Beachtung des Zeitfaktors, werden als thixotrope Substanzen betitelt. Die vorhandene Mikrostruktur reagiert auf die einwirkende Scherbelastung mit einem zeitlich verzögerten Strukturbruch, welcher zur Abnahme der Viskosität führt.

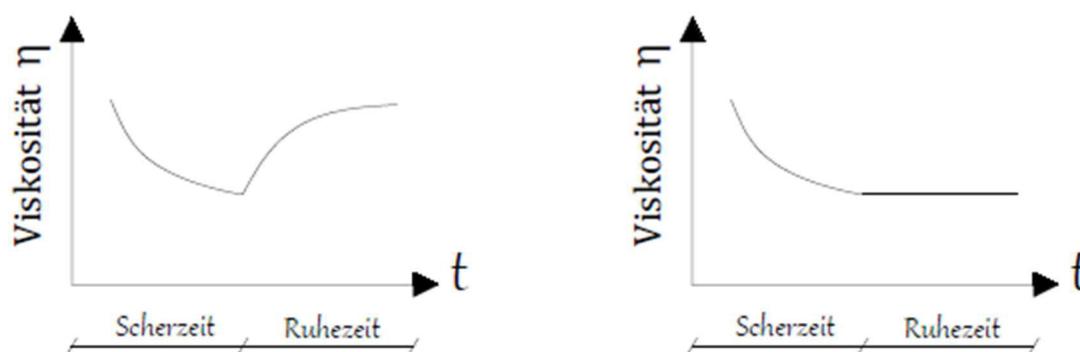


Abbildung 2-24: Zusammenhang bei thixotropen Fließverhalten (links: reversibel, rechts: irreversibel)

⁶⁶ Siehe [43]: Seite 202

⁶⁷ Siehe [45]: Seite 23

Nimmt die Scherbelastung wieder ab, kann es gemäß der *brownschen Molekularbewegung* wieder zum Strukturaufbau kommen. Ist dies der Fall spricht man vom reversiblen thixotropen Fließverhalten.

Bleibt die Viskosität nach der Entlastung der Scherbelastung konstant, so spricht man von irreversiblen thixotropen Fließverhalten⁶⁸. Beide Fließverhalten sind in Abbildung 2-24 dargestellt.

Beispiele für reversible thixotrope Fluide sind Tonsuspensionen, Honig oder Sirupe, ein Beispiel für irreversible thixotrope Fluide ist Joghurt⁶⁹.

Rheopexes Fließverhalten

Rheopexes Fließverhalten findet man bei jenen Substanzen, deren Viskosität bei steigender Schergeschwindigkeit ansteigt und nach Regenerationsphase, wie in Abbildung 2-25, wieder zum ursprünglichen Viskositätswert zurückkehrt. Ein bekanntes Beispiel im Bauwesen sind Bentonitsuspensionen. Sie werden zur Schlitzwandherstellung, eine Methode der Baugrubensicherung, verwendet [22].

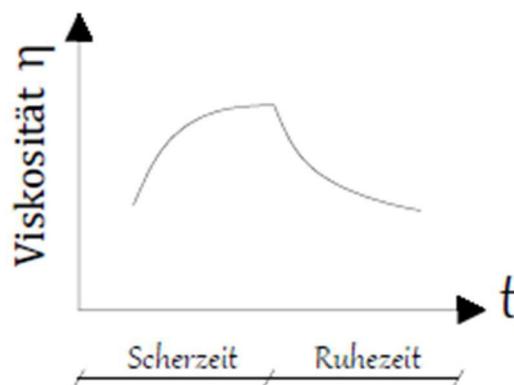


Abbildung 2-25: rheopexes Fließverhalten

2.4.9 Viskosimetrie

Unter dem Begriff der Viskosimetrie fasst man jene Messmethoden zusammen, die zur Bestimmung der Viskosität von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen dienen⁷⁰. Vor allem bei industriell erzeugten Gütern wird die Viskosität als Indikator der Qualitätskontrolle eingesetzt.

Für die vorliegende Diplomarbeit werden lediglich Viskosimeter betrachtet die zur Messung der Zähigkeit von Flüssigkeiten dienen. Je nach Bauart erfolgt die Messung entweder

⁶⁸ Siehe [46]: Seite 9

⁶⁹ Siehe [30]: Seite 15-16

⁷⁰ Siehe [17]: Seite 235

durch sich in den Fluiden bewegende Messkörper oder indem Fluide in Bewegung versetzt werden. Nachfolgend werden für beide Messarten einige Messverfahren erläutert [23] [24]:

Viskosimeter mit bewegten Flüssigkeiten

Hierzu zählt beispielsweise der Viskositätsmessbecher, welcher zugleich der älteste Viskosimeter ist. Das zu untersuchende Fluid wird entweder durch die Schwerkraft bzw. unter Anwesenheit von Druck durch genormte Kapillare geleitet. Da der Fluidwiderstand der Kapillaren bekannt ist, kann mittels der benötigten Abfließgeschwindigkeit die Viskosität berechnet werden.

Viskosimeter mit beweglichen Messelementen

Bei Fall- bzw. Rollviskosimetern wird eine genormte Kugel unter Einwirkung der Schwerkraft durch das Fluid geschickt. Aus der gemessenen Sink- bzw. Rollgeschwindigkeit wird mittels Strömungsgleichung nach *Stokes* die Viskosität errechnet.

Zu den Messelementen mit rotierender Bewegung gehört unter anderem der Rotationsviskosimeter welcher wieder in zwei Bauarten geteilt wird.

Jene Bauart, bei der das zur Einhaltung einer definierten Winkelgeschwindigkeit sich einstellende Drehmoment gemessen wird bzw. die umgekehrte Bauweise⁷¹. Der unbekannte Parameter hängt in beiden Fällen stets von der Viskosität des Prüfgutes ab.

Für beide Untergruppen gibt es variierende Bauarten.

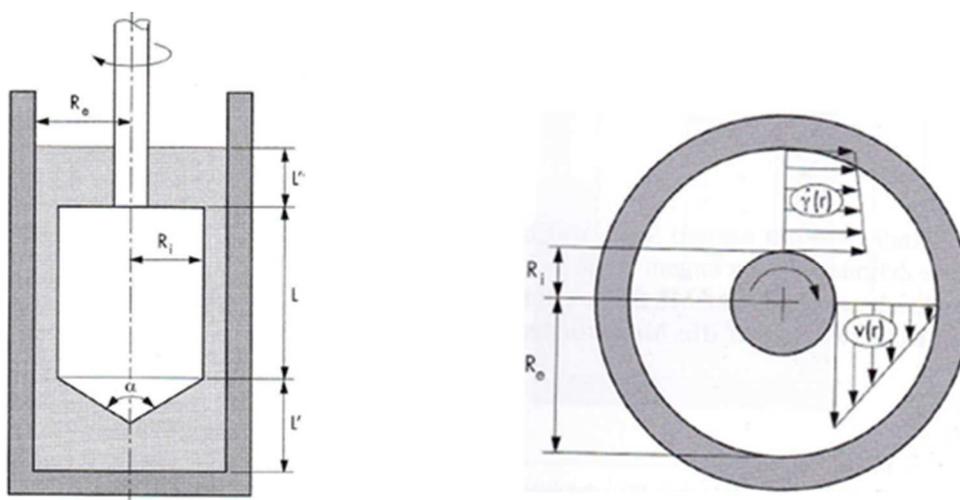


Abbildung 2-26: Searle-Rotationsviskosimeter⁷²

⁷¹ Siehe [17]: Seite 235-236

⁷² T. Mezger, Das Rheologie Handbuch, für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern, 3. überarbeitete Auflage, Hannover: Vincentz Network GmbH und Co.KG, 2010, Seite 238, Abbildung 10.1: Konzentrisches oder

Das Koaxialviskosimeter besteht aus zwei koaxialen Zylindern. Die zu untersuchende Flüssigkeit befindet sich im Scherspalt zwischen den beiden Zylindern. Wird nun einer der beiden Zylinder in Bewegung versetzt wiederfährt der Flüssigkeit eine Scherbeanspruchung. Bei Bewegung des inneren Zylinders spricht man von *SEARLE-Rotationsviskosimetern*, zu sehen in Abbildung 2-26. Der Nachteil dieser Betriebsart ist, dass Flüssigkeiten mit geringer Viskosität bei hohen Drehzahlen, aufgrund der Zentrifugalkraft, aus dem Messkörper entgleiten können.

Dieser Effekt wird als *Taylor-Wirbler* bezeichnet⁷³. Bei *COUETTE-Rotationsviskosimetern* wird hingegen der äußere Zylinder angetrieben und der innere festgehalten.

2.4.10 Viskomat NT

Zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften wird in den nachstehenden Versuchen der Rotationsviskosimeter *Viskomat NT* [24] der Firma *Schleibinger*, dargestellt in Abbildung 2-27, verwendet. Das circa 20 kg schwere, vollautomatische Rheometer dient zur Konsistenzbeurteilung von Zementleim, Zementmörtel, Betonmörtel und Putzen, die eine Korngröße von zwei Millimeter nicht überschreiten.

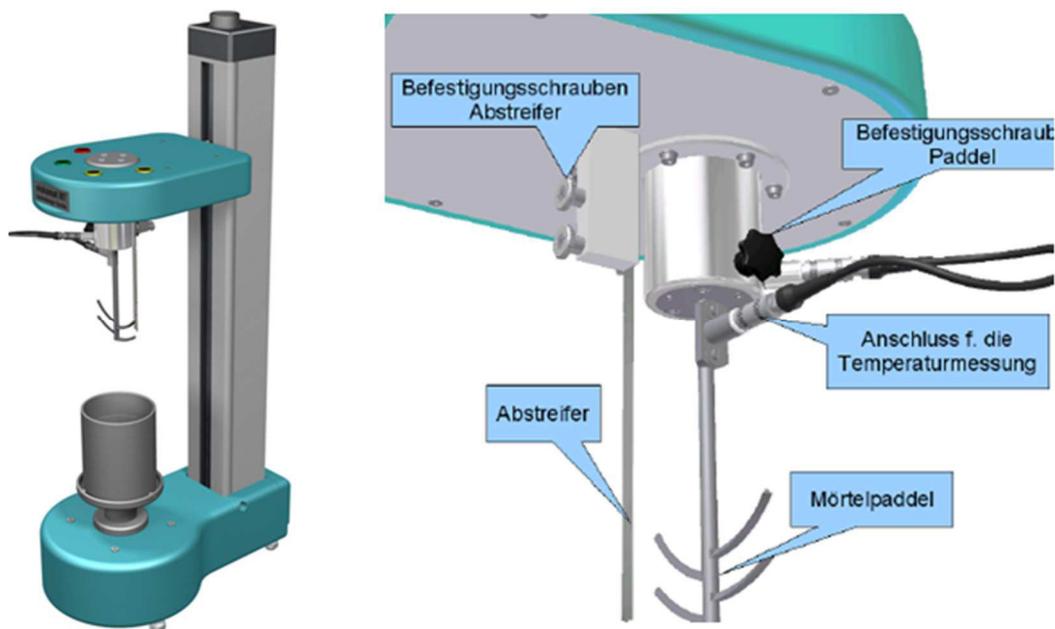


Abbildung 2-27: Viskomat NT ^{74 75}

koaxiales Zylinder-Messsystem und Seite 240, Abbildung 10.2: Querschnitt eines konzentrischen Zylinder-Messsystems mit einem weiten Scherspalt

⁷³ Siehe [42]: Seite 239

⁷⁴ <http://www.rheologysolutions.com/wp-content/uploads/2011/09/viskomat.png>, Zugriff am 01.02.2017

⁷⁵ www.schleibinger.com/cmsimple/?download=vntsw.pdf, Seite 15, Abbildung 9: Befestigung des Paddels, Zugriff am 01.02.2017

Das Prüfgut befindet sich in dem auf einen Aluminiumsockel einzurastenden Messtopf, welcher durch den integrierten Kryostat temperiert wird.

An der hinteren Seite des Aluminiumsockels befindet sich eine Führungsschiene, die das Mischwerkzeug zu Versuchsbeginn und Versuchsende automatisch auf und ab führt. Der Messtopf, welcher für die ersten beiden Aufsätze von Abbildung 2-28 zum Einsatz kommt, fasst eine Prüfgutmenge von 370 ml. Beide Aufsätze sind mit einem Drehmoment- und einem Temperatursensor ausgestattet. Bei der Formgebung der Geometrie wurde darauf geachtet, dass es während der Versuchsdauer zu keiner Entmischung der Suspension kommt. Dies bringt jedoch einen großen Nachteil mit sich.

Im Gegensatz zum rechts in Abbildung 2-28 dargestellten Modell der Doppelringspalt-Messzelle können keine absoluten Werte, sondern nur relative Viskositätswerte und relative Fließgrenzen ermittelt werden [26].

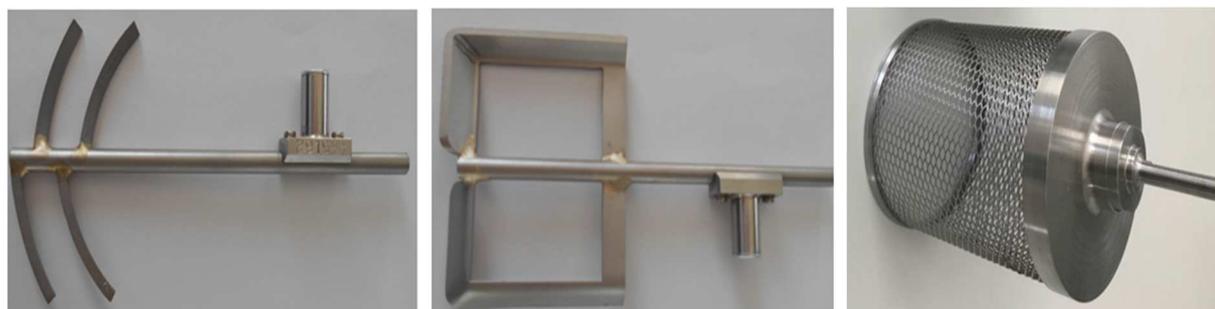


Abbildung 2-28: Mörtelpaddel (links), modifiziertes Leimpaddel (Mitte) und Doppelringspalt-Messzelle (rechts)

Die dazu benötigten rheometrische Zustandsgleichung sind in Tabelle 2-5 zusammengefasst [26].

Tabelle 2-5: Korrelationen der Messdaten

von Firma Schleibinger vorgegebene Korrelation der Messdaten			
Drehmoment	[Nmm]	≈	τ
Geschwindigkeit	N [1/min]	≈	γ
Steigung der Fließkurve	h [Nmm x min]	≈	η
Achsabschnitt der Fließkurve:	g [Nmm]	≈	τ_0

Aus der Formel [2-8] sowie Tabelle 2-5 lässt sich Formel [2-9] bilden:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \approx \frac{T}{1/min} \quad \text{mit } \tau = T \quad \text{und} \quad \gamma = \frac{1}{min} \quad [2-9]$$

Mit: η Viskosität

τ T [Drehmoment]

$\dot{\gamma}$ 1/min [Umdrehungen/Min]

Die Formeln zur Bestimmung der dynamischen Fließgrenze $\tau_{0,d}$ und der plastischen Viskosität η , welche beim Einsatz der Doppelringspalt-Messzelle ermittelt werden, sind im Kapitel 4 angeführt.

Sobald das Mischgut in den Messtopf eingebracht und das individuell festlegbare Prüfprofil im *Viskomat* eingegeben ist, kann die Versuchsdurchführung per Knopfdruck gestartet werden. Durch die Eingabe der Schergeschwindigkeit über die Versuchszeit wird die daraus resultierende Scherspannung elektronisch erfasst und auf dem externen PC gespeichert.

3 Vorversuche und Versuchsplanung

Da die Bestimmung der Viskosität ultrahochfester Betone mittels Viskomat noch nicht Stand der Technik ist und unter den bis dato veröffentlichten Arbeiten, Publikationen und/oder Dissertationen stark variierende Vorgehensweisen zu entnehmen sind, wurden im Rahmen der Vorversuche zahlreiche, stark voneinander abweichende Experimente durchgeführt. Es wurden Versuche mit allen drei Messaufsätzen des *Schleibinger Viskomat* bei unterschiedlichen Fahrweisen, Umdrehungsgeschwindigkeiten und Zeitspannen aufgenommen. Bis zur Festlegung aller im Viskomat einzugebenden Parameter, welche auch der Start der eigentlichen Versuchsreihe darstellt, wurden die Vorversuche ohne Bedacht an die zu prüfenden unterschiedlichen Trockenmischdauern, mit der UHPC Basic Mischung⁷⁶ durchgeführt. Diese wurden zur Ressourcenschonung im *Horbart* Mischer homogenisiert.

Die ersten Versuche im Viskomat wurden mit dem modifizierten Leimpaddel durchgeführt. Jedoch wurde der Aufsatz schnell durch das Mörtelpaddel und dem mitgelieferten Randabstreifer ausgetauscht. Mit jenem Aufsatz wurden sowohl Kurzzeit- als auch Langzeitmessungen, bei unterschiedlichen Umdrehungsgeschwindigkeiten durchgeführt.

3.1 Ermittlung der optimalen Mischdauer

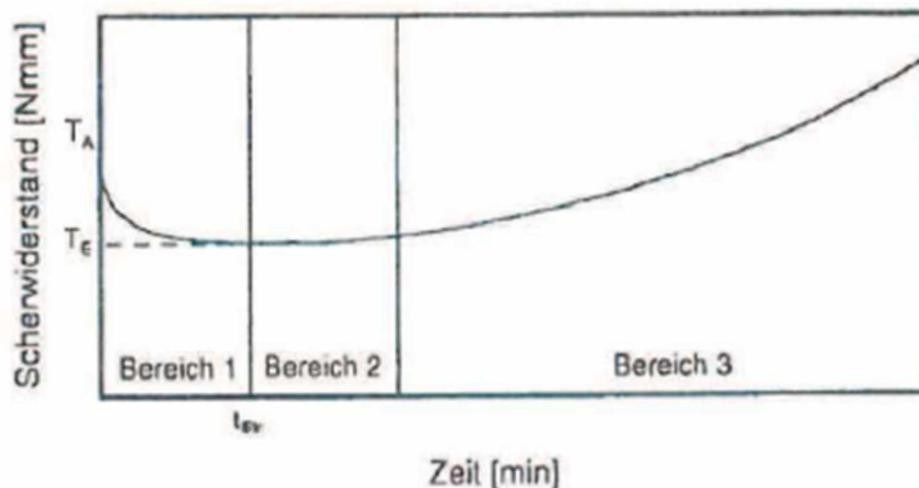
Zementgebundene Suspensionen, wie der für die vorliegende Arbeit verwendete ultrahochfeste Beton, wiederfahren im Zuge der Zementhydratation Strukturveränderungen⁷⁷. Durch Langzeitversuche ist bekannt, dass selbst bei konstant einwirkender Scherbelastung, der Prozess des Ansteifens, in Abhängigkeit der Zeit, immer weiter fortschreitet⁷⁸. Dies ist in Abbildung 3-1, die den Scherwiderstand einer zementgebundenen Suspension bei langer Versuchsdauer zeigt, erkennbar. Es kommt trotz einwirkender Scherbelastung zum Anstieg des Scherwiderstandes. Der Versuch lässt sich in drei Bereiche unterteilt. Im ersten Bereich wiederfährt das Mischgut, welches über seine Fließgrenze belastet wird, den sogenannten Strukturbruch⁷⁹. Es kommt zur Zerstörung der zufolge der Hydratation bereits aufgebauten Makrostruktur und somit zum Abfall des Scherwiderstandes.

⁷⁶ UHPC Basismischung von Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

⁷⁷ Siehe [46]: Seite 8-12

⁷⁸ Siehe [45]: Seite 28-31

⁷⁹ Siehe [46]: Seite 9

Abbildung 3-1: Scherwiderstand bei langer Versuchsdauer⁸⁰

Diese Zerstörung ist erstrebenswert, da es bei Messungen die vor dem Erreichen des Strukturbruches aufgezeichnet werden, zu Fehlinterpretationen der Messwerte kommen kann⁸¹. Im zweiten Bereich stellt sich ausgehend vom Maximalwert des Strukturbruches ein Gleichgewichtszustand τ_G ein. Man spricht auch vom sogenannten *overshoot*.

Der im dritten Bereich erkennbare Anstieg des Scherwiderstandes ist der Zementhydratation zuzurechnen. Daher kommt es bei längeren Versuchsdauern zu unerwünschten Überlagerungen des Strukturaufbaues zufolge des thixotropen Verhaltens mit dem Anstieg des Scherwiderstandes zufolge der Hydratation. Diese Überlagerung führt oft zu Überschätzungen und somit zu Fehlinterpretationen der Messergebnisse.

Die Firma *Schleiblinger* [26] empfiehlt Fließkurven stets im konstanten zweiten Bereich, nach Erreichen des *Strukturbruches* und vor dem Ansteifen des Mischgutes auszuwerten. In diesem Bereich gilt das Fließverhalten als konstant.

Im Rahmen der Vorversuche wird die optimale Versuchsdauer, in der die Überlagerung zufolge Zementhydratation als vernachlässigbar klein betrachtet werden kann, für die UHPC Basismischung⁸² ermittelt. Der Versuchsaufbau erfolgte wie folgt.

Die Mischung wird im Intensivmischer der Firma *Eirich* hergestellt und 9,5 Minuten nach Wasserzugabe für 62 Minuten im Viskomat geprüft. Als Aufsatz wird das Mörtelpaddel inclusive eines Randabstreifers eingebaut. Eine Stunde lang wirken konstant 150 Umdrehungen je Sekunde auf das Mischgut ein. Die Be- und Entlastung erfolgte innerhalb von einer Minute, siehe dazu Abbildung 3-2.

⁸⁰ S.Ratzinger, Rheologisches Verhalten von Zementleimen, Diplomarbeit, TU Wien, 2012, S28, Abbildung 3-10: Scherwiderstand infolge konstant Belastung

⁸¹ Siehe [38]: Seite 16

⁸² UHPC Basismischung von Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer mit W/B-Wert = 0,28

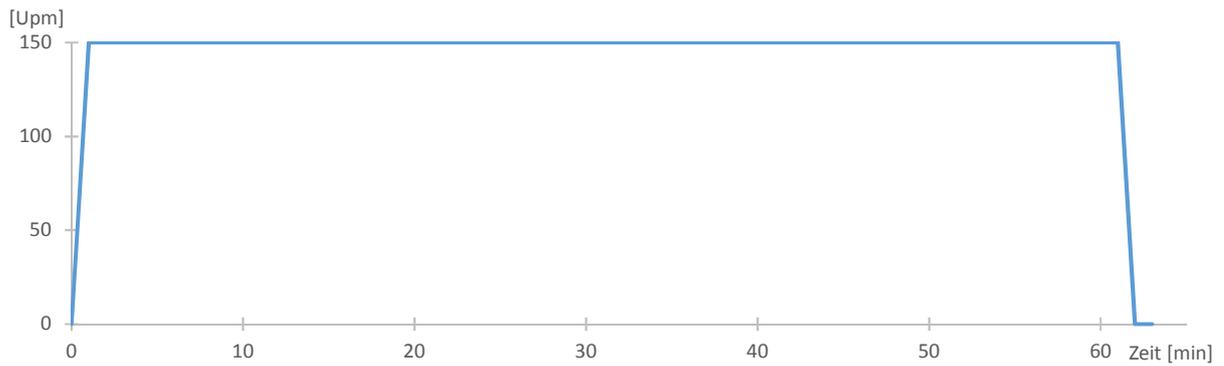


Abbildung 3-2: Prüfprofil (Viskomat)

In Abbildung 3-3 ist der Langzeitversuch als Drehmoment-Zeit-Diagramm ausgewertet. Obwohl der Versuch lediglich 62 Minuten andauert, sind die drei zuvor beschriebenen Bereiche bereits ersichtlich.

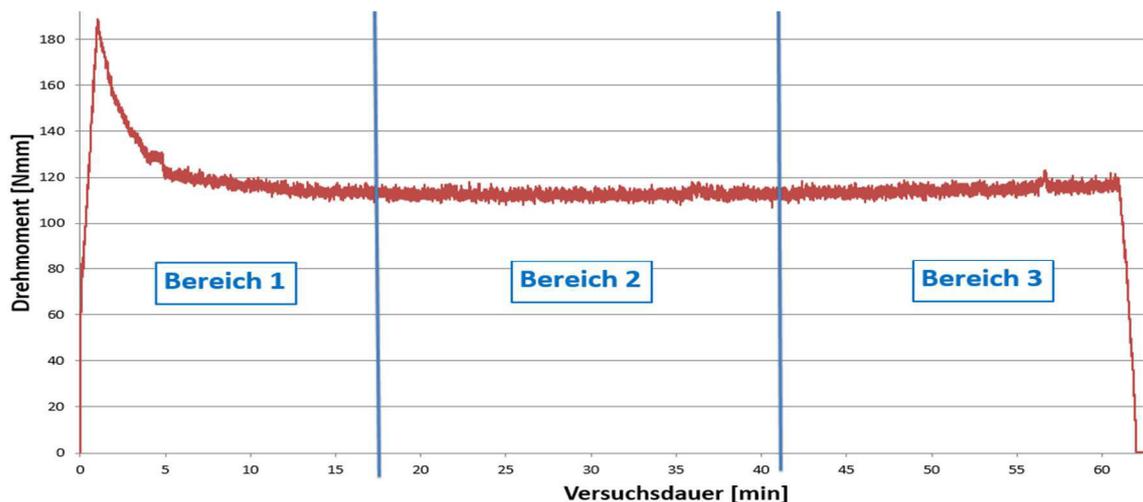


Abbildung 3-3: Drehmoment über Versuchsdauer

Die von der Theorie bekannten Reaktionen zementöser Suspensionen können durch den Versuch bestätigt werden. Die optimale Versuchsdauer für das verwendete Mischgut liegt zwischen 20 und 40 Minuten.

3.2 Versuche mit stufen- bzw. rampenförmiger Fahrweise

Je nachdem welches Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil vom Nutzer eingegeben wird, können stufen- oder rampenförmige Messprofile konstruiert werden. Bei der Wahl der Rampenneigung ist darauf zu achten keine zu abrupten Rampen oder Sprünge der Umdrehung oder Schergeschwindigkeit zu fahren, da es bei zu schnellen Auf- und Abwärtsrampen aus dem bereits herrschendem Gleichgewichtszustand heraus, zu Über- bzw. Unterschätzungen der resultierenden Systemantwort kommt.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Langzeitversuch mit dem in Abbildung 3-4 dargestellten Rampenprofil durchgeführt. Die Belastung wurde stets drei Minuten konstant gehalten und innerhalb von einer Minute auf und abgebaut. Lediglich die Umdrehungen je Minute schwanken von 50 auf bis zu 150 Umdrehungen je Minute.

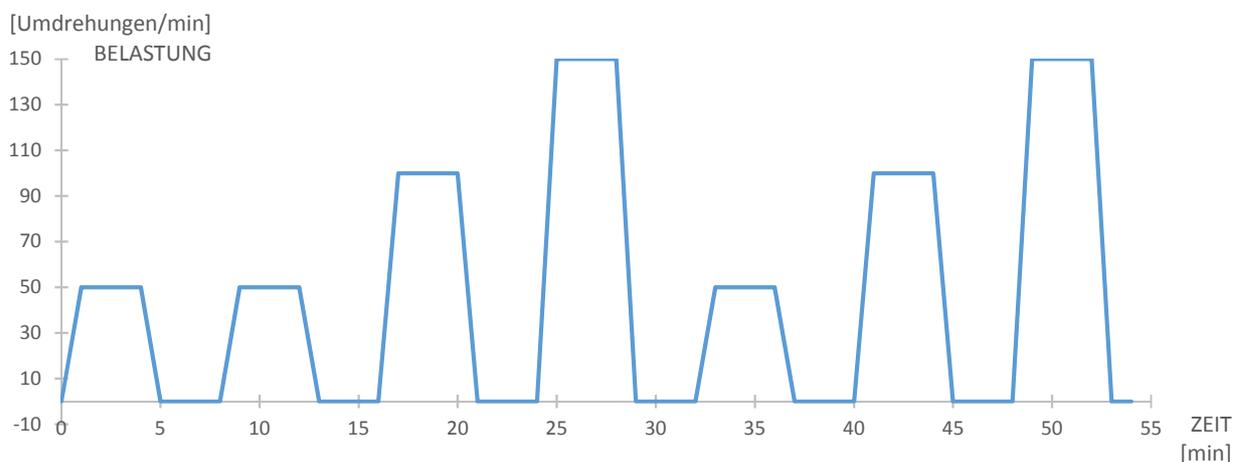


Abbildung 3-4: zeitlicher Verlauf der Belastung bzw. Entlastung

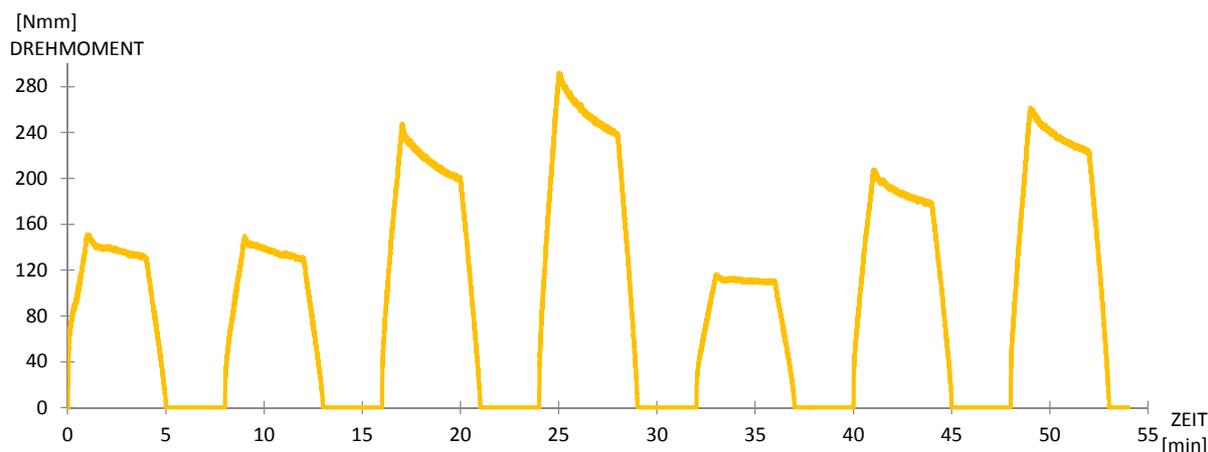


Abbildung 3-5: Auswertung Drehmoment über die Zeit

Bei Betrachtung des Drehmoment-Zeit-Diagrammes in Abbildung 3-5 ist erkennbar, dass zu Beginn des drei Minütigen Belastungsplateaus deutlich höhere Scherspannungen erreicht werden als am Ende des Belastungsplateaus. Dies ist daher zu begründen, dass sich innerhalb der ein minütigen Ruhephasen die *brownschen Molekularkräfte* erneut aufbauen und einen Anstieg der Viskosität bewirken [27]. Bei konstant bleibender Scherspannung stellt sich der zuvor beschriebene Gleichgewichtszustand ein. Gleiches gilt für den vorliegenden Versuch. Würde bei jedem Belastungsplateau eine exponentielle Trendlinie gezeichnet werden, so würden sich diese bei einem Gleichgewichtszustand von ca. 120 Nmm schneiden.

3.3 Quantifizierung der Viskosität

Der nachfolgende Versuch soll eine Quantifizierung der dynamischen Viskosität ermöglichen. In mehrere Quellen wurde das in Abbildung 3-6 angegebene Rampenprofil verwendet⁸³.

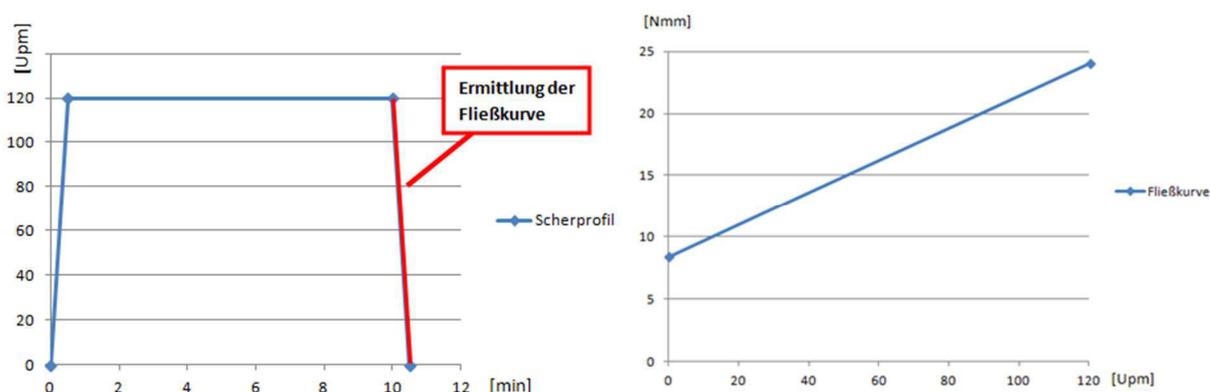


Abbildung 3-6: rampenförmiges Profil

Das Mischgut wird zehn Minuten lang mit 120 Umdrehungen je Minute belastet, danach erfolgt die Bestimmung der Fließeigenschaften, d.h. der relativen Viskosität und der relativen Fließgrenze, durch Auswertung des Entlastungspfades. Siehe dazu den rot markierten Bereich des Schergeschwindigkeits-Zeit-Diagramm in Abbildung 3-6.

Jener Bereich ist auf der rechten Seite von Abbildung 3-6 als Scherspannungs-Schergeschwindigkeits-Diagramm, der Fließkurve, ausgewertet. Unter Anwendung des *Bingham-Modells* lassen sich anschließend die Fließeigenschaften berechnen.

Für den nachfolgenden Versuch wurde das Scherprofil in Anlehnung an Abbildung 3-6 jedoch unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten optimalen Versuchsdauer festgelegt. Die grafische Darstellung ist Abbildung 3-7 zu entnehmen. 18 Minuten nach Wasserzugabe erfolgte die Versuchsmessung im Viskomat. Als Messaufsatz wurde das Mörtelpaddel inklusive dem Randabstreifer verwendet. Die Prüfzeit wurde mit 30 Minuten, wovon bei ein Drittel der Messzeit die Umdrehungsgeschwindigkeit konstant auf 200 Umdrehungen je Minute gehalten wurde festgelegt. Die An- und Abrampung dauerte ebenfalls jeweils ein Drittel der Versuchszeit.

⁸³ Siehe [47]: E.Schwab, S. Uebachs: Einfluss der Granulometrie der feinen Gesteinskörnung auf die rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Mörtel, sowie S. Uebachs: a particle distance for self-compacting mortars and concretes

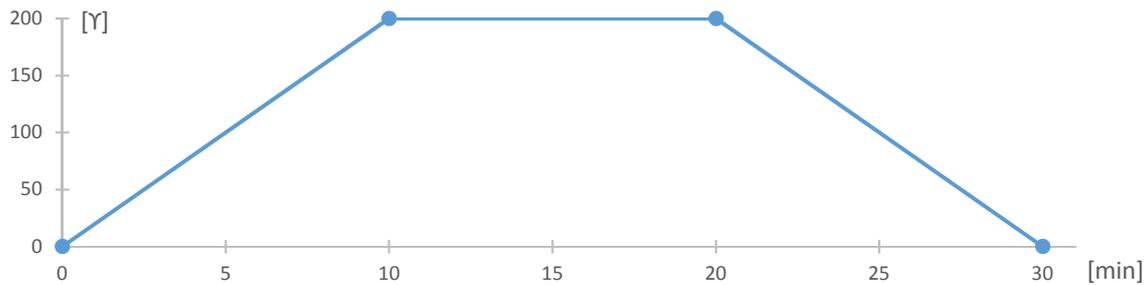


Abbildung 3-7: Prüfprofil (Viskomat)

Die Auswertung der Fließkurve erfolgt entlang des Entlastungspfades.

Als gleichzeitige Kontrolle der Reproduzierbarkeit der Versuche, wurde der Versuch unter identen Versuchsbedingungen, Rezepturen, Mischzeiten und Fahrprofil im Viskomat ein zweites Mal durchgeführt. Die Verläufe beider Scherspannungen über die Prüfzeit sind in Abbildung 3-8 angeführt.

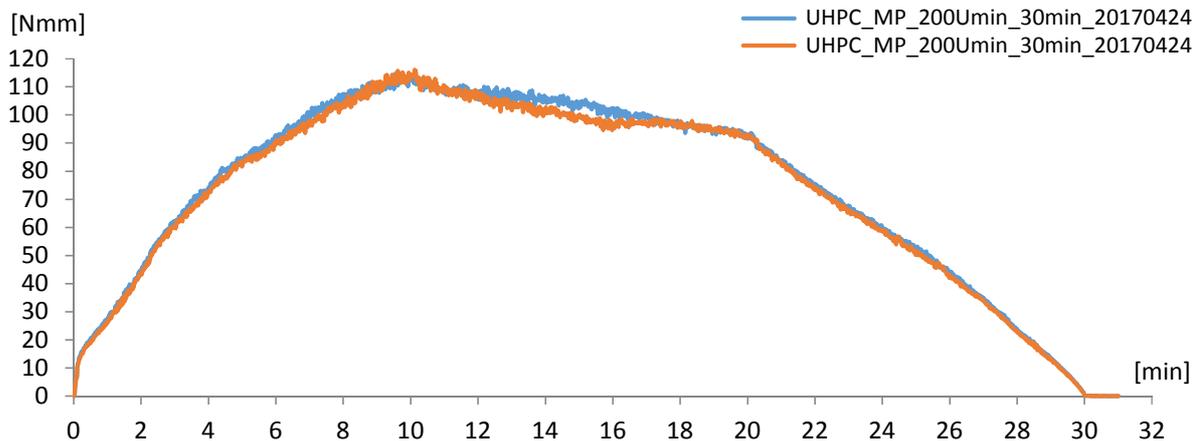


Abbildung 3-8: Scherspannung-Prüfzeit-Diagramm

Sowohl im Bereich des Belastungs- als auch des Entlastungsastes sind keine Abweichungen in der Auswertung erkennbar. Lediglich in den Minuten 12 bis 18 kommt es zu geringen Abweichungen. Durch die minimalen Abweichungen welche zudem nicht über die gesamte Versuchsdauer anhalten, ist eine Reproduzierbarkeit der Versuche gegeben. Dies bedeutet gleichzeitig, dass ein Vergleich unterschiedlicher Trockenmischdauern, bei sonst gleichen Beeinflussungsfaktoren, zulässig ist.

Die Auswertung der Fließkurve erfolgt lediglich an einem der Versuche. Es wird die Scherspannung τ über die Schwergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ aufgetragen, siehe dazu Abbildung 3-9.

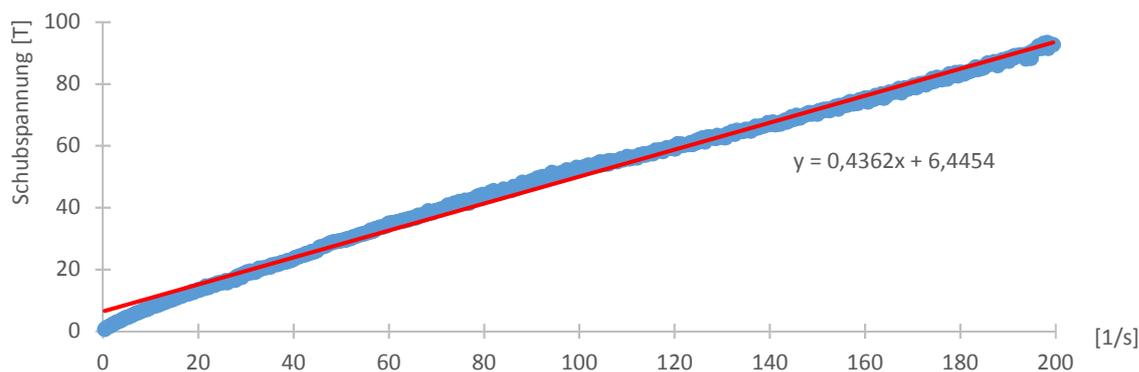
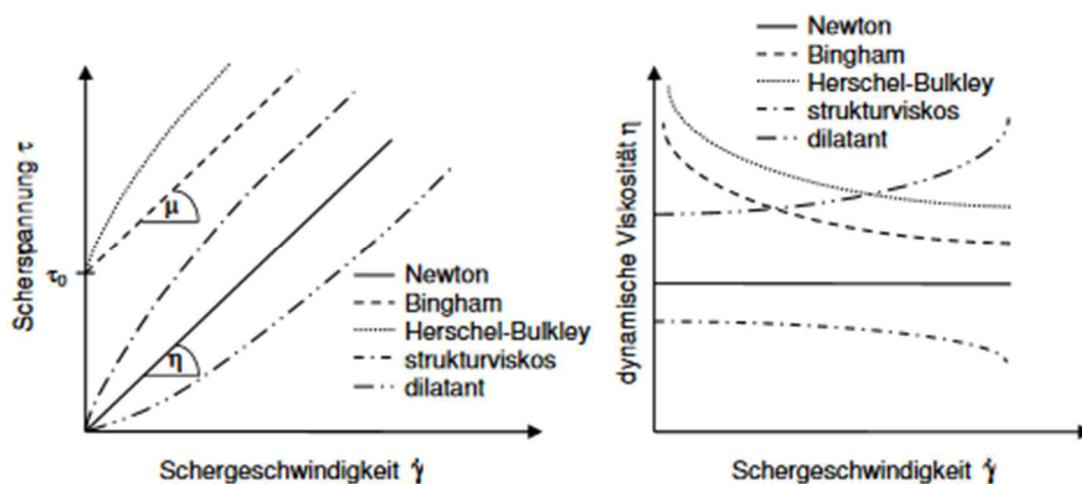


Abbildung 3-9: Schergeschwindigkeit

Blau dargestellt sind die einzelnen Messwerte. Die rote Linie ist eine in die Messwerte gelegte lineare Trendlinie, welche durch die in Abbildung 3-9 angegebene y-Funktion mathematisch dargestellt werden kann. Die Funktion ist gleichzusetzen mit Formel [2-8] des Unterkapitels 2.4.8:

$$y = 6,4454 + x \cdot 0,4362 \approx \tau = \tau_c + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad [3-1]$$

Abbildung 3-10: Fließ- (links) und Viskositätsfunktion (rechts) verschiedener Stoffe⁸⁴

Vergleicht man die ermittelte Fließkurve des Versuches mit qualitativen Fließkurven der Abbildung 3-10, so wird die ursprüngliche Annahme eines Bingham-Fluids bestätigt.

Als nächsten Schritt wurde, die dynamische Viskosität, welche gemäß Formel [2-7] berechnet wird, über die Schwergeschwindigkeit aufgetragen. Die Auswertung erfolgt über die Zeitspanne vom Start der Messung bis zum Ende des konstant gehaltenen Belastungsplateaus in Prüfminute 20.

⁸⁴ Siehe [38]: Seite 11, Bild 2.3: Qualitativer Verlauf bedeutender Fließ- (links) und Viskositätsfunktionen (rechts) für unterschiedliches rheologisches Stoffverhalten

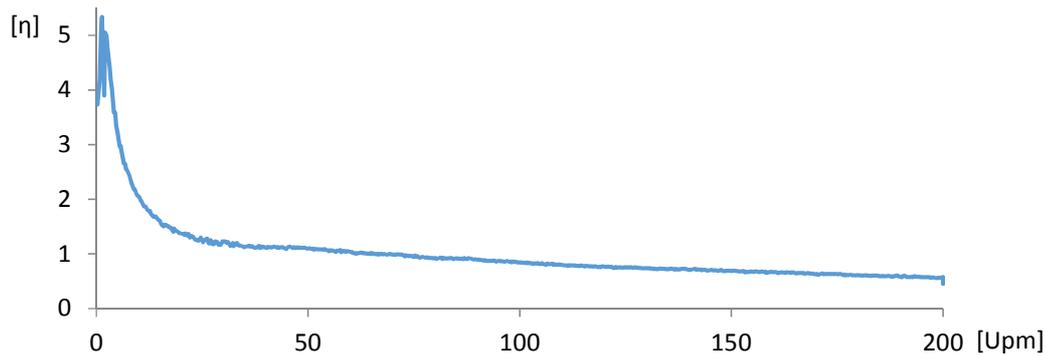


Abbildung 3-11: Viskositätsfunktion

Wie in Abbildung 3-11 ersichtlich, verhält sich die verwendete Suspension als Bingham-Körper. Jedoch ist die dynamische Viskosität neben der Belastungsgeschichte auch von Temperatur und Druckspannungen abhängig. Die zu erwarteten rheologischen Einflüsse unterschiedlicher Trockenmischdauern können nur qualitativ bestimmt werden.

3.4 Bestimmung der Profilwahl ⁸⁵

Die unterschiedlichen Profile im Rahmen der Vorversuche wurden nicht nur zur Bestimmung der optimalen Profilwahl, sondern ebenfalls zum kennen lernen des sensiblen Prüfgerätes benötigt. Einige Versuche mussten ungewollt abgebrochen werden. Unter anderem, weil sich der Aufsatz des Randabstreifers gelöst hat und die Versuchsauswertung nicht mehr Aussagekräftig war. Weitere Probleme gab es bei den Versuchen mit höheren Umdrehungen. Im Eingabeprofil wird vor Versuchsbeginn das Abstellmoment festgelegt. Es gab jedoch Versuchsreihen bei denen der Viskomat längst vor Erreichen des Abstellmomentes den Versuch unterbrochen hat.

Aus den eben angeführten Problematiken sowie dem Fakt das beim Einsatz des Mörtelpaddels keine exakte Fließgrenze und Viskosität ermittelbar sind, werden die Hauptversuche mit der Doppeltringspalt-Messzelle durchgeführt.

Das dafür verwendete Schwerprofil wurde in Anlehnung an die Dissertation von Oliver Jürgen Mazanec [28] gewählt. Es handelt sich anders als bei den Vorversuchen um ein Kurzzeitversuch mit einer Dauer von 90 Sekunden bei denen die maximale Umdrehung je Minute unter 4,5 ausmacht, zu sehen in Abbildung 3-12.

⁸⁵ Siehe [27]: Seite 27-28

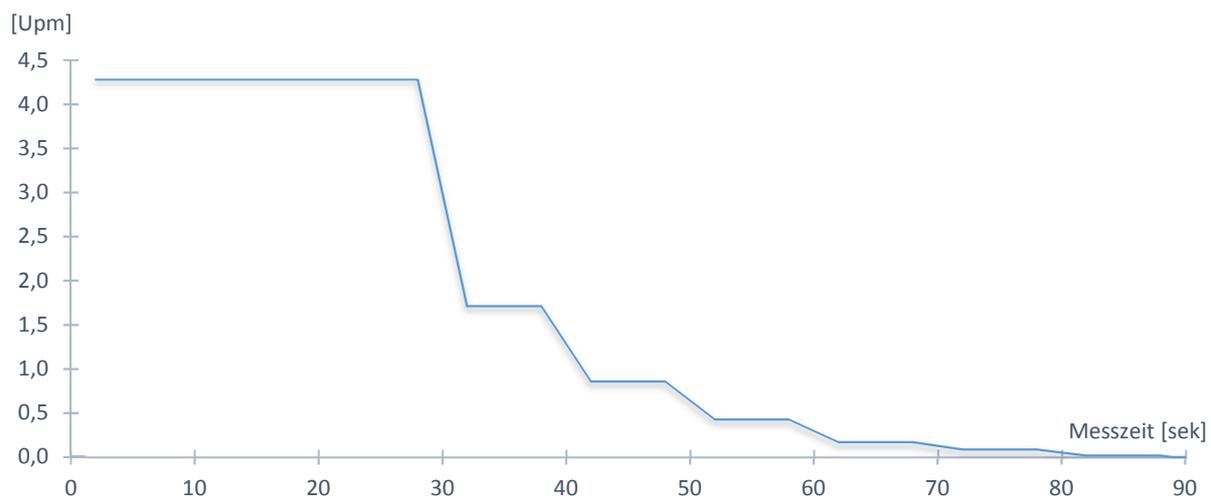


Abbildung 3-12: gewähltes Messprofil

Die Theorie hinter der Doppellingspalt-Messzelle sowie dessen Formelapparatur sind im nachfolgendem Kapitel 4 beschrieben.

4 Versuche und Interpretation

Alle UHPC Basismischungen⁸⁶ der Hauptversuche wurden mit dem Intensivmischer R02 der Firma *Eirich* homogenisiert. Das verwendete Model ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Die anschließenden rheologischen Messungen im *Schleibinger* Viskomat NT erfolgten mit einer Doppelringspalt-Messzelle, siehe Abbildung 4-2.



Abbildung 4-1: Intensivmischer



Abbildung 4-2: Viskomat mit Doppelringspalt-Messzelle

Um den Einfluss unterschiedlicher Trockenmischdauern auf das rheologische Verhalten von UHPC beurteilen zu können wurde darauf geachtet die Versuche stets unter denselben Bedingungen durchzuführen. Verfälschende Einflüsse, wie sie beispielsweise durch unterschiedlichen Mischrezepturen, Mischintensitäten, Mischtemperaturen, Einbauzeitspannen, Scherhistorien oder Messprofile entstehen sollen, möglichst vermieden werden.

Tabelle 4-1: gewählte Trockenmischdauern

Serie	Trockenmischdauer	Versuchsbezeichnung
1	90 sek = 1,5 min	M90sek
2	3 min	M3min
3	7 min	M7min
4	15 min	M15min
5	30 min	M30min
6	60 min	M60min
7	120 min	M120min
8	240 min	M240min
9	480 min	M480min

⁸⁶ UHPC Basismischung von Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

Daher werden die unterschiedlichen UHPC Basismischungen⁸⁷, auch Premix genannt, aus derselben Zementcharge (19.06.2017) hergestellt. Für die Versuche soll lediglich der Parameter der Trockenmischdauer variieren. Untersucht werden die in Tabelle 4-1 angeführten neun verschiedenen Trockenmischdauern.

4.1 Versuchsablauf

Der Premix wurden Anfang Juli 2017 eingewogen und für jede Serie unterschiedlich lange homogenisiert.

Kurz nach der Herstellung des Premix wurde der Viskomat der TU Wien, im Zuge einer anderen Forschungsarbeit, defekt. Der Start der Versuchsreihen verzögerte sich daher durch eine lange Reparaturdauer. Am 29. und 30. August wurden die neun Serien des Versuches schließlich hergestellt. Dazu wurde der Premix sowie der benötigte Wasser- und Fließmittelanteil für jeweils drei Liter Frischbetonmischungen eingewogen. Vor der Zugabe des Wassers und des Fließmittels wurde der Trockenanteil erneut für 20 Sekunden aufgemischt. Bei der Zugabe der Flüssigkeiten wurde darauf geachtet, diese innerhalb von 30 Sekunden konstant dem Trockenanteil beizumengen. Anschließend folgt eine zweiminütige Homogenisierung. Alle folgenden Angaben des Frischbetonalters beziehen sich auf den Zeitpunkt direkt nach Beendigung der Wasserzugabe.



Abbildung 4-3: LP-Topf



Abbildung 4-4: Auslauftrichter



Abbildung 4-5: Ausbreitmaßgefäß

Für die rheologischen Messungen wurden je Serie ca. 500ml der Frischbetonsuspension benötigt. Die restlichen 2,5-Liter wurden zunächst zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften gemäß ÖNORM EN 12350 [9] verwendet. Je Serie wurde die Rohdichte, der

⁸⁷ UHPC Basismischung von Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer

Luftgehalt, die Trichterauslaufzeit sowie das Ausbreitmaß bestimmt, siehe dazu die verwendeten Apparaturen in Abbildung 4-3, Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5.

Im Anschluss wurde die Suspension in die Schalung der genormten Prismenkörper, siehe Abbildung 4-6, für die Festbetonprüfung gefüllt.



Abbildung 4-6: Prismenschalung



Abbildung 4-7: Biegezugprüfung



Abbildung 4-8: Druckfestigkeitsprüfung

Die Festbetonprüfungen erfolgte gemäß ÖNORM EN 12390 Teil 3 [29] und Teil 5 [4]. Je Trockenmischzeit wurden neun Prismen zur Prüfung der Biegezugfestigkeit, siehe Abbildung 4-7, und Druckfestigkeit, siehe Abbildung 4-8, im Betonalter von 24 Stunden, sieben Tagen und 28 Tagen befüllt.

4.2 Doppelringspalt-Messzelle ^{88 89}

Die von der Firma *Schleibinger* entwickelte Doppelringspalt-Messzelle liefert, im Gegensatz zu den im Rahmen der Vorversuche verwendeten Aufsätzen, dem modifizierten Leimpaddel und dem Mörtelpaddel, absolute rheologische Messwerte. Dies liegt an der Geometrie der Doppelringspalt-Messzelle. Sie wurde mit dem Ziel ein definiertes Scherfeld zu erhalten entwickelt. Aufgebrachte Beanspruchungen können physikalisch definiert werden und somit geräteunabhängige absolute Messgrößen liefern. Die Messzelle selbst, grafisch dargestellt in Abbildung 4-9, besteht aus einem feinen Gitterzylinder welcher starr am Viskomaten eingespannt wird. Durch die Wahl eines Gitterprofils anstatt

⁸⁸ Siehe [28]: Seite 82-85

⁸⁹ Siehe [48]

vollwandiger Elemente werden ungewollte Wandgleitungen entlang der Elementoberfläche umgangen. Daher kann man von einer *Fluid-in-Fluid-Scherung* ausgehen. Der dazugehörige Messtopf, zu sehen rechts in Abbildung 4-9, besitzt einen 1,3mm breiten Ringspalt sowie eine zentrisch angebrachte Überlaufkante. Der Messtopf wird in den sich rotierenden Übertopf eingebaut.

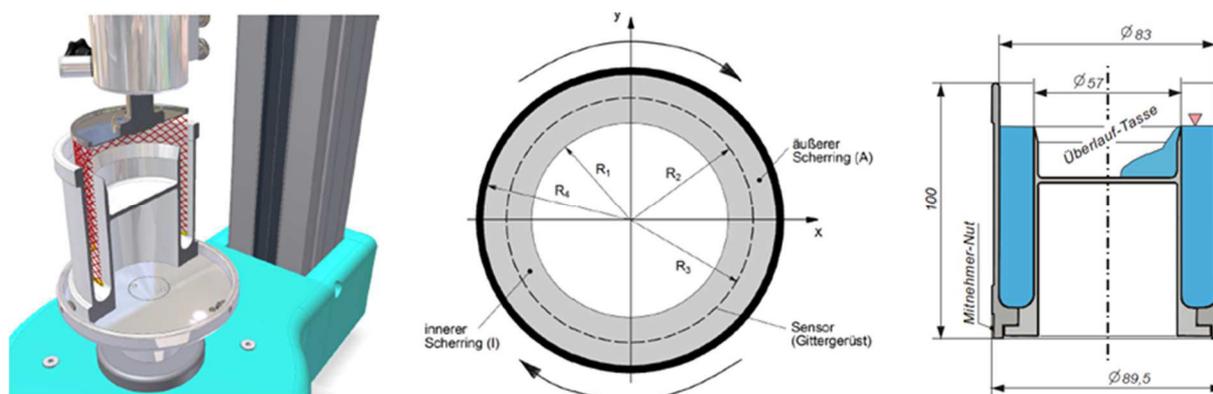


Abbildung 4-9: Geometrie der Doppelringspalt-Messzelle^{90 91}

Die Abmessungen der Doppelringspalt-Messzelle, des zugehörigen Messtopfs und die vom Hersteller mitgelieferten Umrechnungs- und Kalibrierungsfaktoren sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Abmessungen und Parameter der Doppelringspalt-Messzelle

$\varnothing_{\text{Topf, außen}}$	=	83,0 mm
$\varnothing_{\text{Gitterzylinder}}$	=	71,2 mm
$\varnothing_{\text{Gitterzylinder}}$	=	57,0 mm
b_{Spalt}	=	13,0 mm
h_{Spalt}	=	64,8 mm
c_s	=	0,584 [-]
c_k	=	0,967 [-]
N	=	Upm

Das mathematisch erfassbare Fließfeld lieferte über die unten angeführten Formeln exakte Messwerte der dynamischen Fließgrenze $\tau_{0,d}$ sowie der plastischen Viskosität η .

⁹⁰ O. Mazanec, Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen, Dissertation, Technische Universität München, 2013, S.84, Abbildung 5.9: Doppelringspalt-Messzelle im Rotationsrheometer (Schleibinger, Typ Viskomat NT) (links) und Querschnitt durch die Ringräume der Messzelle (rechts)

⁹¹ R. Vogel, Eine Messzelle für Spezialmörtel, Vortrag zum 16.Regensburger Baustoffkolloquium; http://www.schleibinger.com/cmsimple/?download=Eine_Messzelle_fuer_Spezialmoertel.pdf; S5, Abb.4: Schnitt durch das Ringspalt-Gefäß 7 der Messzelle (mit Fluid-Füllung) für den Viskomaten NT

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ kann gemäß Formel [4-1] direkt bzw. vereinfacht durch Verwendung des Umrechnungsfaktors c_s berechnet werden.

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{2} \cdot \left[\frac{1 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1} + \frac{1 + \left(\frac{R_4}{R_3}\right)^2}{\left(\frac{R_4}{R_3}\right)^2 - 1} \right] \approx c_s \cdot N \approx 0,584 \cdot U/\text{min} \quad [4-1]$$

Die Scherspannung τ wird vereinfacht, da die Abmessungen der Messzelle bekannt sind, durch Multiplikation des Widerstandsdrehmomentes T mit einem Kalibrierfaktor von 0,967 berechnet, siehe dazu Formel [4-2]:

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

Unter Annahme des *Bingham-Modells* können die Werte der Schergeschwindigkeit und Scherspannung in Formel [4-3] eingesetzt werden.

$$\tau = \tau_{0,dyn} + \eta_{plastisch} \cdot \dot{\gamma} \quad [4-3]$$

4.3 Gewähltes Scherprofil

Die Versuche im *Schleibinger Viskomaten NT* werden mit Hilfe der Doppelringspalt-Messzelle durchgeführt. Das zum Einsatzkommende Scherratenprofil wurde in Anlehnung an die Arbeit von *Oliver Mazanec*⁹² ausgewählt. Es handelt sich um ein 90 Sekunden andauerndes stufenförmiges Messprofil, graphisch dargestellt in Abbildung 4-10.

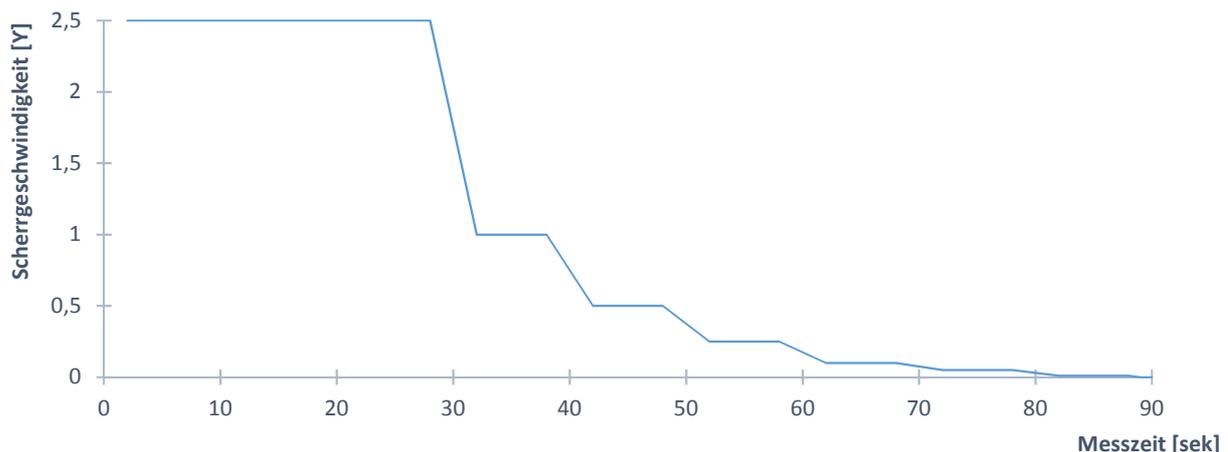


Abbildung 4-10: Scherratenprofil

Durch die kurze Prüfdauer soll der Strukturaufbau des Hydrationsprozesses während der Messzeit vermieden werden.

⁹² O. Mazanec, Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen, Dissertation, Technische Universität München, 2013

Zusätzlich wird das Mischgut in den ersten 30 Sekunden konstant mit einer Schergeschwindigkeit von $2,5\text{m}^2/\text{s}$ beansprucht. Bereits gebildete Strukturen der Hydratation werden innerhalb dieser Zeitspanne der Vorscherrung wieder aufgebrochen, dadurch sollen unverfälschte rheologische Messerwerte erreicht werden. Die eigentliche rheologische Auswertung erfolgt daher erst ab Sekunde 30. Ab hier wird ein stufenförmiges Messprofil gefahren, welches aus sechs jeweils für zehn Sekunden konstant gehaltenen Stufen besteht.

Die Stufen sind bei den Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ ist 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 und 0,01. Durch die im Kapitel 4.2 angegebene Formel [4-1] wird die dazugehörige Anzahl der Umdrehungen je Minute berechnet, siehe dazu die Zusammenstellung in Tabelle 4-3.

Mit den Umdrehungen je Minute über die Messzeit kann das Messprofil im *Schleibinger* Viskomaten manuell generiert werden.

Tabelle 4-3: gewähltes Scherprofil

Scherrate $\dot{\gamma}$	=	$c_s \cdot U$ /min	U/min	Zeit [sek]
0	=	$c_s \cdot U$ /min	0	0 sek
2,5	=	$c_s \cdot U$ /min	4,281	2 sek
2,5	=	$c_s \cdot U$ /min	4,281	28 sek
1	=	$c_s \cdot U$ /min	1,712	32 sek
1	=	$c_s \cdot U$ /min	1,712	38 sek
0,5	=	$c_s \cdot U$ /min	0,856	42 sek
0,5	=	$c_s \cdot U$ /min	0,856	48 sek
0,25	=	$c_s \cdot U$ /min	0,428	52 sek
0,25	=	$c_s \cdot U$ /min	0,428	58 sek
0,1	=	$c_s \cdot U$ /min	0,171	62 sek
0,1	=	$c_s \cdot U$ /min	0,171	68 sek
0,05	=	$c_s \cdot U$ /min	0,086	72 sek
0,05	=	$c_s \cdot U$ /min	0,086	78 sek
0,01	=	$c_s \cdot U$ /min	0,017	82 sek
0,01	=	$c_s \cdot U$ /min	0,017	88 sek
0	=	$c_s \cdot U$ /min	0,000	89 sek
0	=	$c_s \cdot U$ /min	0,000	90 sek

Die Versuchsauswertung von *Oliver Mazanec* [28] ist in Abbildung 4-11 dargestellt. Im linken Diagramm von Abbildung 4-11 wurde die aufgezeichnete Scherspannung τ über die Messzeit, in Sekunden aufgetragen, die durch das oben angeführte Schergeschwindigkeitsprofil entsteht.

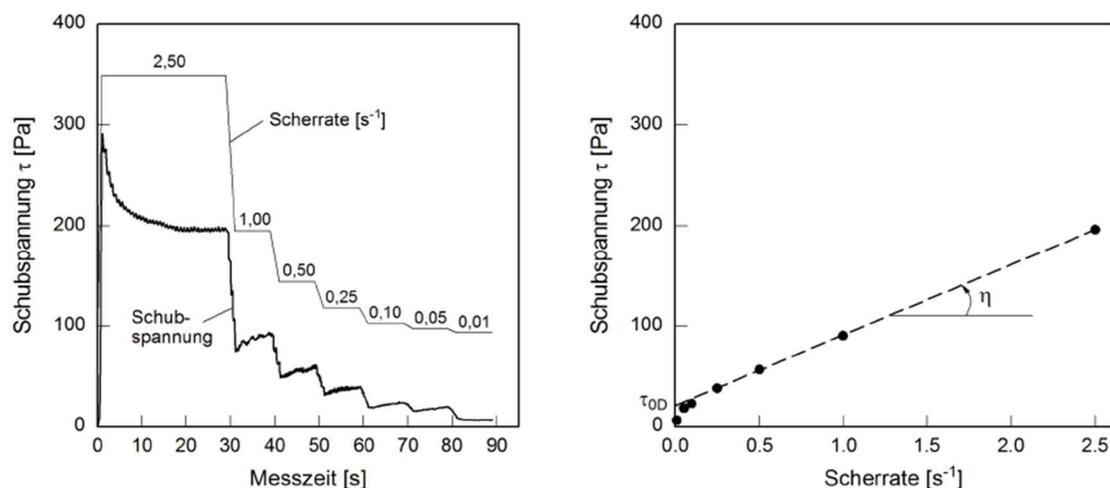


Abbildung 4-11: Messprofil und Scherspannung (links) sowie Fließkurve (rechts)⁹³

Die Aufzeichnung der Fließkurve, dargestellt im rechten Diagramm der Abbildung 4-11, erfolgt ab Prüfminute 30. Die so erhaltene Fließkurve ist eine Gerade die ihren Schnittpunkt mit der y-Achse nicht im Ursprung hat. Dies entspricht dem Fließverhalten nach *Bingham*. Durch die bekannte Bingham Gleichung können die rheologischen Messwerte berechnet werden.

4.4 Messungen im Rheometer

Der ca. 500ml gefüllte Messbehälter wurde umgehend nach Fertigstellung der Suspension zu dem ein Stockwerk höher liegendem Versuchslabor im dem sich der Viskomat befindet gebracht. Für erste Messung wurde der Messtopf mit ca. der Hälfte der Suspension befüllt. Direkt im Messtopf, vor Beginn des Prüflaufes, wurde noch die Temperatur des Mischgutes mit dem in Abbildung 4-12 dargestellten Messgerät aufgenommen. Der Start der Messung im Rheometer erfolgt im Betonalter von sieben Minuten. Das 90 Sekunden gefahrene Schergeschwindigkeitsprofil wird noch detailliert beschrieben. Direkt nach dem Ausbau wurde erneut die Temperatur gemessen, da im Gegensatz zum Mörtelpaddel und dem modifizierten Leimpaddel, die Doppelringspalt-Messzelle keinen integrierten Temperatursensor besitzt.

Nach dem Einbau des Mischgutes im Messtopf des Viskomat wurde, wie bereits bei der ersten Messung, die Temperatur des Mischgutes festgehalten. Der Start der zweiten Versuchsreihe erfolgte, außer für den Premix mit der Trockendauer von 15 Minuten, jeweils

⁹³ O. Mazanec, Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen, Dissertation, Technische Universität München, 2013, S.85, Abbildung 5.10: Exemplarische Darstellung der aufgezeichneten Schubspannung τ in Abhängigkeit der Scherrate $\dot{\gamma}$ für eine repräsentative UHPC-Probe (links) und Fließkurve mit Regression nach dem Bingham-Modell (rechts)



Abbildung 4-12: Einstechthermometer



Abbildung 4-13: Aufnahme Rheometer



Abbildung 4-14: Akkubohrer mit Mischwerkzeug

im Betonalter von 22 Minuten. In Tabelle 4-4 sind die verschiedenen Prüferien festgehalten. Die Tabelle gliedert sich nach den Trockenmischdauern. Angegeben sind die Versuchsbezeichnungen, die gemessenen Temperaturen vor und nach der Prüfung im Viskomat sowie die jeweiligen Zeitangaben in Bezug auf den Zeitpunkt t_0 , nach Wasserzugabe.

Tabelle 4-4: Aufstellung der Prüferie

Trockenmischdauer	Versuchsbezeichnung	Temp. vor Viskometer	Start	Temp. nach Viskometer	Start Akkubohrer
90sek	M90s_001	33,5°C	7min	25,0°C	18min
	M90s_002	31,5°C	22min	25,0°C	
3min	M3min_001	32,7°C	7min	25,0°C	18min
	M3min_002	25,9°C	22min	24,9°C	
7min	M7min_001	30,3°C	7min	24,8°C	18min
	M7min_002	31,3°C	22min	24,7°C	
15min	M15min_001	29,9°C	7min	24,9°C	18min
	M15min_004	27,2°C	30min	24,7°C	
30min	M30min_001	32,5°C	7min	24,9°C	18min
	M30min_002	32,5°C	22min	25,1°C	
60min	M60min_001	31,6°C	7min	24,9°C	18min
	M60min_002	32,2°C	22min	24,7°C	
120min	M120min_001	31,5°C	7min	25,1°C	18min
	M120min_002	26,9°C	22min	24,9°C	
240min	M240min_001	30,8°C	7min	25,0°C	18min
	M240min_002	30,4°C	22min	24,9°C	
480min	M480min_001	29,4°C	7min	24,8°C	18min
	M480min_002	28,0°C	22min	24,9°C	

Beim Versuch *M15min_002* schaltete sich der Antriebsmotor des Viskomaten aus. Bis zum erneuten Hochfahren des Computers und der Eingabe des Prüfprofils sind acht Minuten vergangen. Daher startete die zweite Prüfsérie unter den Prüfnamen *M15min_004* erst 30 Minuten nach Wasserzugabe. Durch die verlängerte Hydratationszeit ist der Versuch *M15min_002* zwar der Vollständigkeit halber angeführt, wird jedoch in der Auswertung nicht gewertet.

4.5 Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Auswertung und gleichzeitige Interpretation erfolgt in drei Teilen:

- Messwerte der Frischbetonprüfung
- Messwerte der Festbetonprüfung
- Messung im Viskomaten

Auswertung der Frischbetonmessungen

In Tabelle 4-5 ist zu jeder Trockenmischdauer die Temperatur zum Start sowie nach Beendigung der Homogenisierung im Intensivmischer festgehalten. Weiters sind die Rohdichte, der Luftporengehalt, die Trichterauslaufzeit und das Ausbreitmaß zur jeweiligen Trockenmischdauer der Aufstellung zu entnehmen.

Tabelle 4-5: Aufstellung der Frischbeton Messwerte

Trockenmischdauer	Temp [Start]	Temp [Ende]	Rohdichte ρ	Luftporengehalt	Trichterauslaufzeit	Ausbreitmaß a
M1,5min	29 °C	37 °C	2267 kg/m ³	4,7 %	49 sek	22,5 cm
M3min	27 °C	38 °C	2298 kg/m ³	4,6 %	42 sek	22,0 cm
M7min	27 °C	37 °C	2296 kg/m ³	4,2 %	38 sek	21,5 cm
M15min	27 °C	37 °C	2298 kg/m ³	3,7 %	31 sek	22,5 cm
M30min	29 °C	37 °C	2296 kg/m ³	4,1 %	35 sek	23,0 cm
M60min	29 °C	37 °C	2303 kg/m ³	4,0 %	26 sek	23,5 cm
M120min	28 °C	37 °C	2301 kg/m ³	3,5 %	24 sek	24,0 cm
M240min	29 °C	34 °C	2320 kg/m ³	3,2 %	14 sek	27,5 cm
M480min	29 °C	34 °C	2309 kg/m ³	3,4 %	15 sek	28,0 cm

Jeder Prämix wurden unter denselben Temperaturen gelagert, daher sind auch die Temperaturen vor dem Herstellen des Frischbetons ident. Sie entspricht 28°C mit einer Schwankungsbreite von $\pm 1^\circ\text{C}$. Bei den fertigen Frischbetonmischungen wurden jedoch unterschiedliche Temperaturen verzeichnet. Die Trockenmischdauern von 90 Sekunden bis 120 Minuten besaßen nach dem Homogenisieren 37°C bis 38°C. Die zwei Serien der deutlich längeren Trockenmischdauern, *M240min* und *M480min*, besaßen eine Endtemperatur von 34°C. Die deutlich reduzierten Endtemperaturen resultieren wahrscheinlich aus

den hochwertigeren Mischgütern. Je länger die Festpartikel homogenisiert werden desto niedriger ist die Verzahnung der gegeneinander reibenden Gesteinskörnungen. Aus der reduzierten Reibung folgt eine Reduktion der Wärme. Bis zur Mischdauer von 120 Minuten scheint jedoch keine Verbesserung der Mischgüte erreichbar.

Die Änderung der Rohdichte bei variierenden Trockenmischdauern ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Die geringste Rohdichte ist bei der Trockenmischdauer von 1,5 Minuten gemessen worden, die höchste Rohdichte bei der Trockenmischdauer von 240 Minuten.

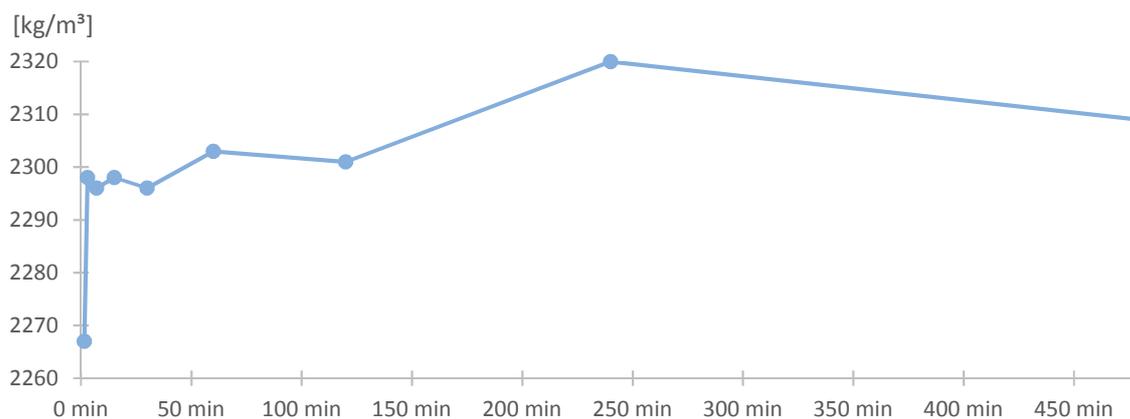


Abbildung 4-15: Rohdichte

Die Differenz zwischen minimaler und maximaler Rohdichte beträgt jedoch lediglich $53\text{kg}/\text{m}^3$. Da die Rohdichte bei $M480\text{min}$ wieder auf $2309\text{kg}/\text{m}^3$ gesunken ist kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Verlängerung der Trockenmischdauer und einer dadurch resultierenden Erhöhung der Rohdichte getroffen werden. Es fehlt eventuell eine weitere Prüfserie welche den Abstieg der Rohdichte nach 480 Minuten bestätigt bzw. den abfallenden Messwert dieser Versuchsreihe als Messfehler deklariert.

Der Luftporengehalt aller Mischungen liegt zwischen 3,2% und 4,7%. Abgesehen von jenem Versuch mit der Trockenmischdauer von 15 Minuten, kommt es bis

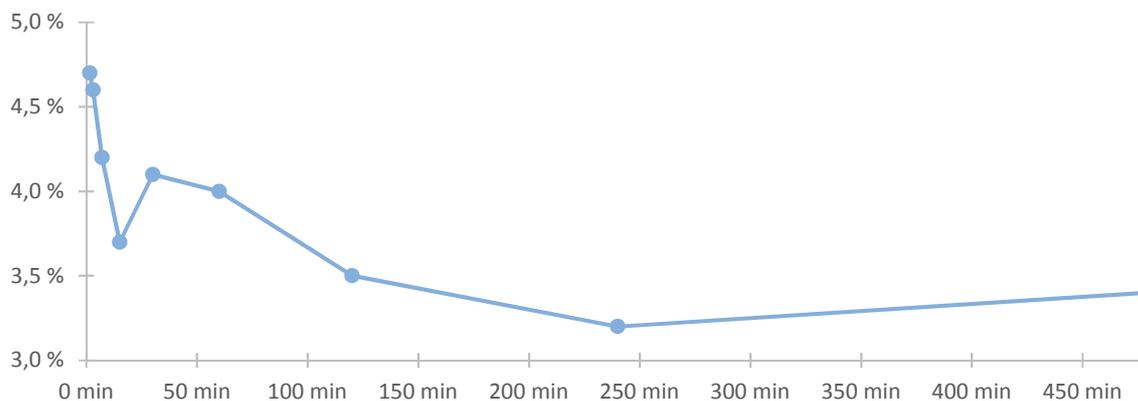


Abbildung 4-16: Luftporengehalt

zur Trockenmischdauer von 240 Minuten zu einer Abnahme des Luftporengehaltes, siehe dazu Abbildung 4-16. Die erneute Verdopplung der Trockenmischzeit auf 480 Minuten zeigt einen Wiederanstieg des Luftporengehaltes von 0,2%. Dies macht einen Anstieg von über 1/8 des maximal variierenden Luftporengehaltes von 1,5%.

Die grafische Auswertung der Trichterauslaufzeit über die Trockenmischdauer erfolgt in Abbildung 4-17.

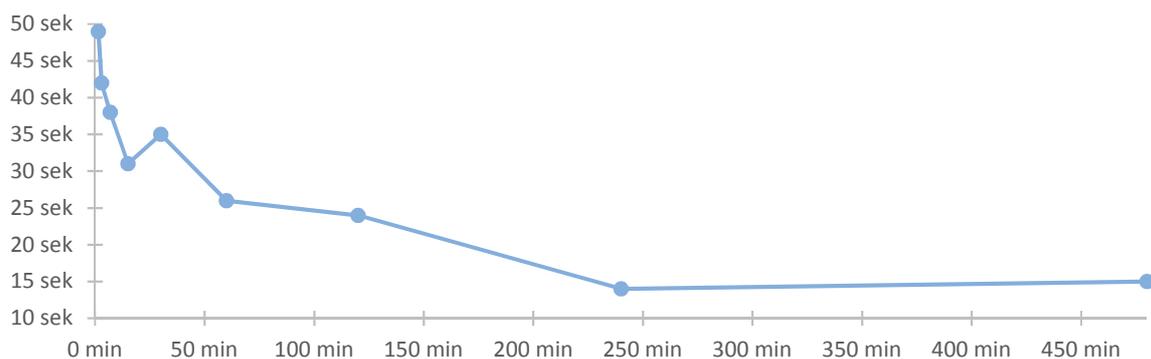


Abbildung 4-17: Trichterauslaufzeit

Der Diagrammverlauf ähnelt stark jenem Diagrammverlauf des Luftporengehaltes in Abbildung 4-16. Jedoch ist der prozentuelle Wiederanstieg der Trichterauslaufzeit bei der Trockenmischdauer von 240 Minuten auf 480 Minuten geringer als die Werte der selben Trockenmischdauern der Luftporenmessungen. Die Differenz zwischen M_{240min} und M_{480min} beträgt lediglich eine Sekunde, eine in Bezug auf die gesamte Messung betrachtete minimale Verlängerung der Trichterauslaufzeit. Man kann daher trotz der Verdopplung der Trockenmischzeit von einer konstanten Auslaufzeit ausgehen.

Die Trichterauslaufzeit M_{30min} dauerte signifikant länger als jene der Versuche M_{15min} und M_{60min} . Aufgrund mangelnder Vergleichsserien wird der erreichte Wert als Ausreißer in der sonst konstant verringerten Trichterauslaufzeit gedeutet.

In Abbildung 4-18 ist das Ausbreitmaß über die variierenden Trockenmischdauern dargestellt.

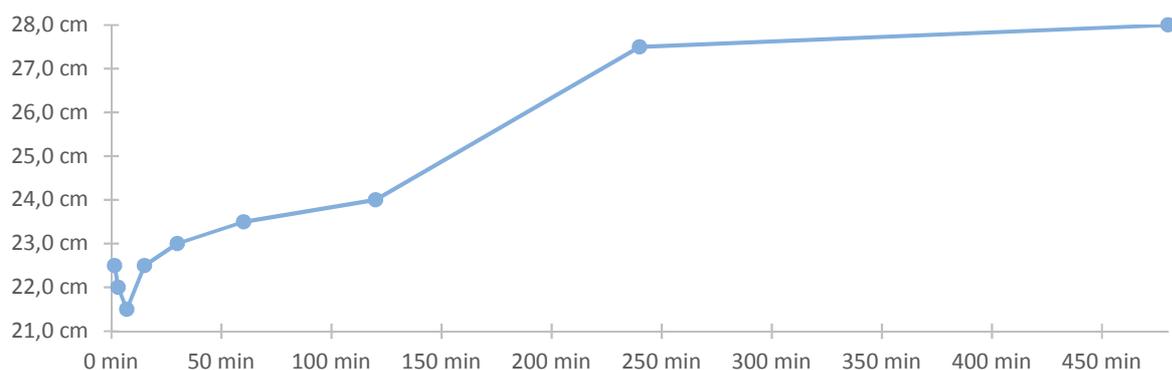


Abbildung 4-18: Ausbreitmaß

Abgesehen von den Anfangsschwankungen zwischen $M1,5min$ bis $M15min$ ist ein signifikanter Anstieg des Ausbreitmaßes erkennbar. Bei der Trockenmischzeiten von 90 Sekunden besaß der Zementkuchen einen Durchmesser von 22,5cm. Bei der Trockenmischdauer von 480 Minuten besaß der Zementkuchen einen Durchmesser von 28cm. Die Verlängerung der Trockenmischdauer von 90 Sekunden auf 480 Minuten bedingt daher eine Vergrößerung des Betonkuchendurchmessers von fast 25%.

Eine direkte Gegenüberstellung der Trichterauslaufzeit und dem Ausbreitmaß über die variierenden Trockenmischdauern, ausgewertet von links mit dem niedrigsten Mischdauer aufsteigen, erfolgt in Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20.

Die Grafik in Abbildung 4-19 wurde anhand der geprüften Messwerte erstellt.

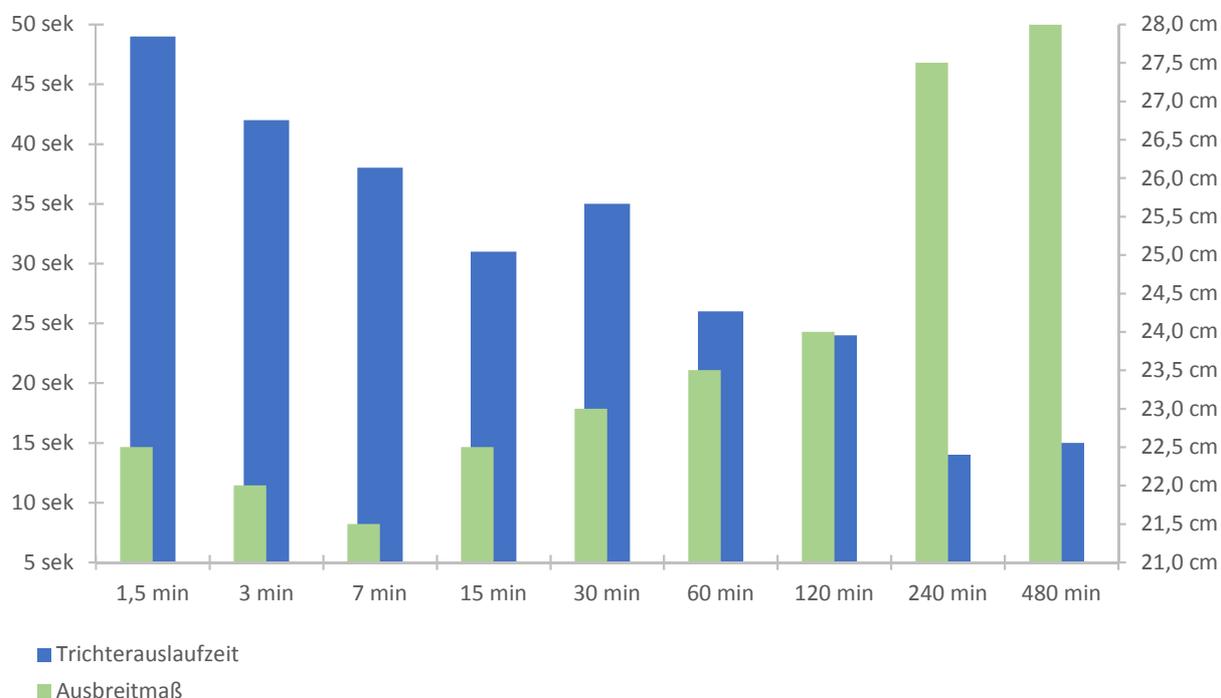


Abbildung 4-19: Gegenüberstellung Trichterauslaufzeit zu Ausbreitmaß

Die Grafik in Abbildung 4-20 zeigt die prozentuelle Verteilung der Messwerte. Jeweils der Maximalwert der Trichterauslaufzeit und der Maximalwert des Ausbreitmaßes sind als 100 Prozent visualisiert worden. Die restlichen erreichten Messwerte wurden als prozentueller Anteil des Maximalwertes dargestellt.

Beide Grafiken, Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20, verdeutlichen den Zusammenhang welcher durch Verlängerung der Trockenmischdauer resultiert.

Wenn nicht ganz kontinuierlich aber dennoch feststellbar, sinkt durch die Verlängerung der Trockenmischdauer die Trichterauslaufzeit. Im Gegensatz dazu verhält sich das Ausbreitmaß, welches bei der Verlängerung der Trockenmischdauer ansteigt.

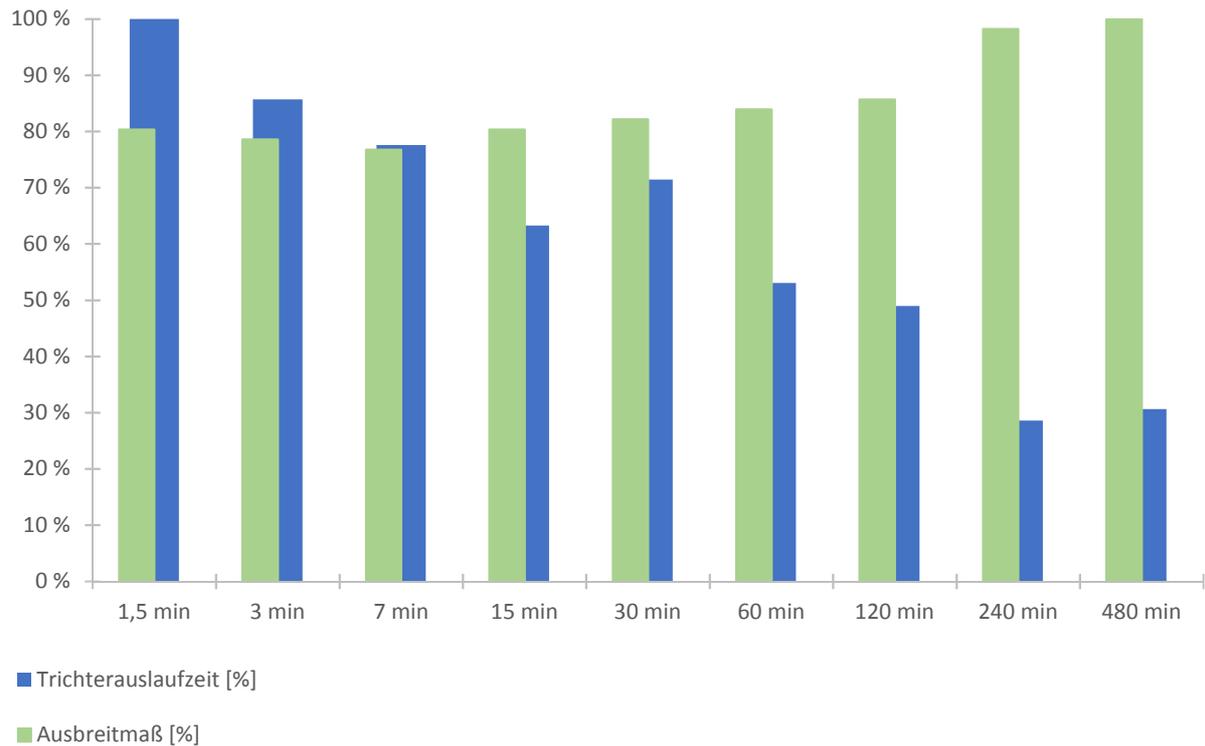


Abbildung 4-20: Gegenüberstellung der prozentuellen Trichterauslaufzeit und Ausbreitmaß

Vergleicht man alle Frischbetonprüfungen miteinander, so kommt man auf folgendes Resümee. Die Annahme des Einflusses von unterschiedlichen Trockenmischdauern auf die rheologischen Eigenschaften wurde bestätigt.

Die bis auf die Trockenmischdauer ident hergestellten Suspensionen weisen signifikante Unterschiede auf. Eine Verflüssigung des Mischgutes kann schon durch eine vergleichsweise geringe Verlängerung der sonst üblichen Mischdauer von 90 Sekunden erzielt werden. Die Annahme, je länger die Trockenmischdauer gewählt wird, desto flüssigere Suspensionen werden erzielt, besitzt jedoch asymptotische Grenzwerte bzw. einen Sattelpunkt, ab dem es wieder zum Anstieg der Viskosität kommt.

Unter Betrachtung der Frischbetonmessungen scheint die Trockenmischdauer von 240 Minuten als jene Trockenmischdauer mit den niedrigsten Viskositätswerten.

Auswertung der Festbetonprüfungen

Als Festbetonprüfungen wurde die Biegezug- und die Druckfestigkeit 24 Stunden, sieben Tage und 28 Tage nach dem betonieren geprüft. Die ermittelten Festigkeiten sind in Tabelle 4-6 und Tabelle 4-8 festgehalten.

Tabelle 4-6: Biegezugfestigkeiten

Biegezugfestigkeit [N/mm ²]									
	M1,5min	M3min	M7min	M15min	M30min	M60min	M120min	M240min	M480min
24 h	8,34	9,8	9,13	8,93	8,44	8,59	9,17	7,15	6,5
7 Tage	11,47	10,8	11,69	11,19	11,11	10,41	13,67	12,48	10,73
28 Tage	14,14	11,99	13,19	13,54	13,07	13,85	14,54	14,37	13,85

In Abbildung 4-21 sind die drei Druckfestigkeitswerte der 24 Stunden, 7 Tage sowie 28 Tage Festigkeiten je Trockenmischdauer dargestellt.

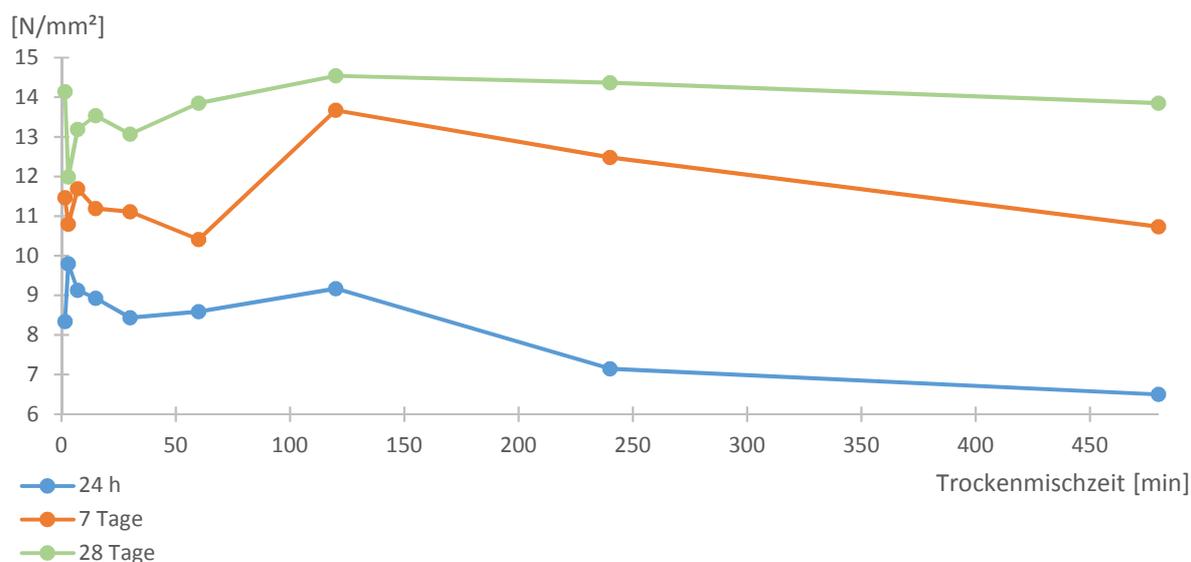


Abbildung 4-21: Biegezugfestigkeit

Sowohl bei den 7-Tage-Biegezugfestigkeiten als auch bei den 28-Tage-Biegezugfestigkeiten wurde die höchste Festigkeit mit einer Trockenmischdauer von 120 Minuten erzielt. Bei den Biegezugfestigkeitswerten im Betonalter von 24 Stunden erreicht die Trockenmischung *M3min* die höchste Festigkeit. Es zeigt sich bei den 24-Stunden-Biegezugfestigkeiten ebenfalls, dass eine Trockenmischdauer von 120 Minuten der Maximalwert ergibt, da die Biegezugfestigkeiten der beiden Trockenmischdauern *M240min* und *M480min* deutlich niedriger sind. Bei geforderten zeitnahen Frühfestigkeiten ist die Erhöhung der Trockenmischdauer kontraproduktiv. Vergleicht man jedoch die betragsmäßigen Schwankungen zwischen den minimalen und maximalen Biegezugfestigkeiten der unterschiedlichen Trockenmischdauern, so liegen diese bei den 24 Stunden und 7 Tage Festigkeiten bei ca. 3,3N/mm². Die Bandbreite der 28-Tage-Festigkeitswerte ist mit einer Schwankung von 2,55 N/mm² am geringsten. Für die 7-Tage-Biegezugfestigkeiten wurde die Schwankung zwischen minimaler und maximaler Festigkeit bei den Trockenmischdauern *M60min* und *M120min* gemessen, zwei relativ ähnlichen Mischdauern.

In Abbildung 4-22 erfolgte die Auswertung der Biegezugfestigkeiten als Balkendiagramm, welche je Trockenmischdauer geblockt, nach 24 Stunden, 7 Tagen und 28 Tagen dargestellt sind.

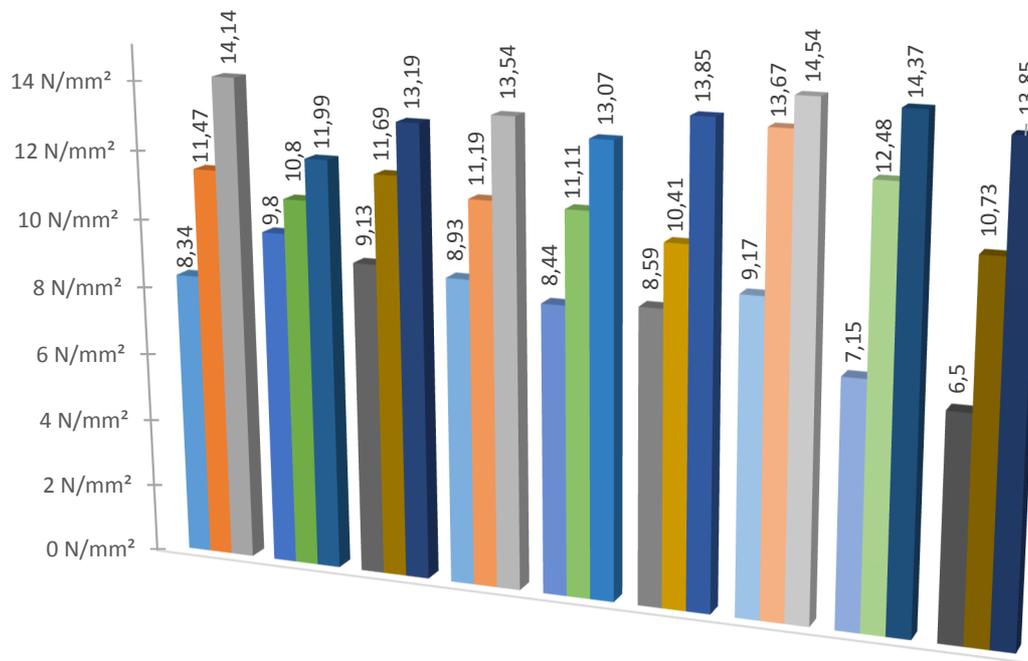


Abbildung 4-22: geblockte Darstellung der Biegezugfestigkeit

In Abbildung 4-23 sind die Messwerte erneut geblockt je Trockenmischdauer dargestellt. Die Grafik zeigt die Biegezugfestigkeiten als Prozentwerte vom Maximalwert des jeweils erreichten Betonalters. Für das Betonalter von 24-Stunden wurde beispielsweise die maximale Biegezugfestigkeit bei der Trockenmischdauer von drei Minuten erreicht, daher wurde der gemessene Wert als 100 Prozent gesetzt. Vom Maximalwert ausgehend wurden die restlichen 24-Stunden-Biegezugfestigkeiten anteilmäßig berechnet.

Analog dazu wurden die Prozentsätze der 7-Tage- und 28-Tage-Druckfestigkeit berechnet. Beide Grafiken, Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23, visualisieren die gemessenen Ergebnisse. Im Bereich der Frühfestigkeitsentwicklung, der 24-Stunden-Biegezugfestigkeitswerte, erreichten die zwei längsten Trockenmischdauern die niedrigsten Festigkeitswerte. Eine extreme Verlängerung der Trockenmischdauer wirkt sich negativ auf die Frühfestigkeitsentwicklung aus. Die Endfestigkeitswerte, der 28-Tage-Biegezugfestigkeit, weisen jedoch eine geringere Streuung auf. Daraus resultiert, dass die Beeinflussung unterschiedlicher Trockenmischdauern auf die Biegezugfestigkeit von UHPC nur in der Frühfestigkeitsentwicklung eine Rolle spielt und sich nach dem Erhärten der Suspension nicht negativ auf die erreichbaren Festigkeitswerte auswirkt.

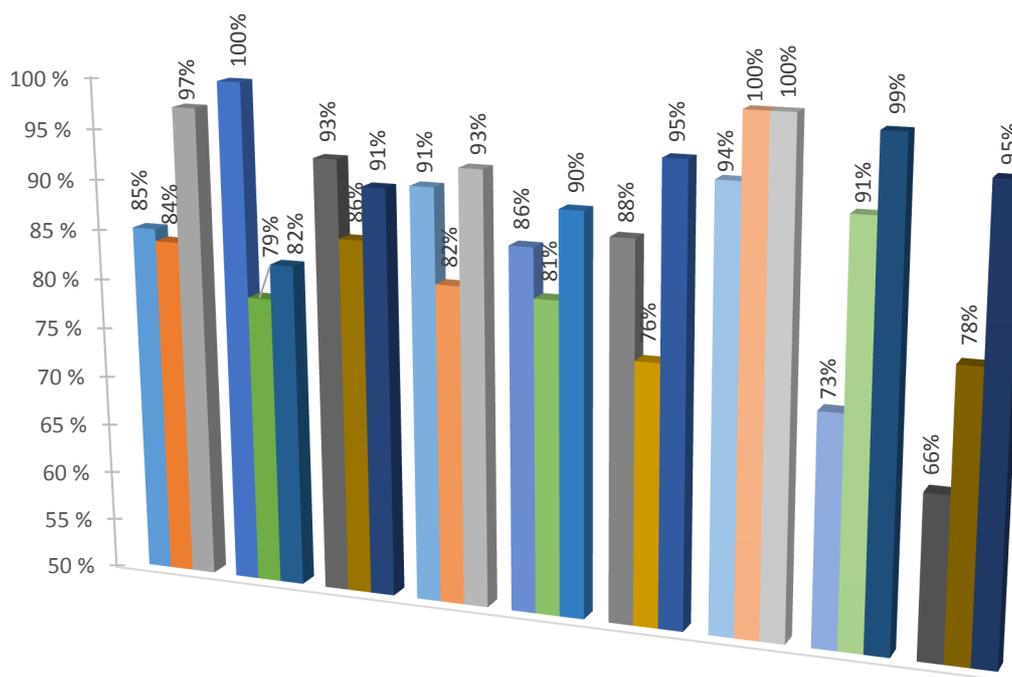


Abbildung 4-23: geblockte Darstellung der prozentuellen Biegezugfestigkeit

In Abbildung 4-25 wurden, analog zur Biegezugfestigkeit in Abbildung 4-22, die drei Druckfestigkeitswerte 24 Stunden, 7 Tage sowie 28 Tage nach der Herstellung geblockt für die unterschiedlichen Trockenmischdauern dargestellt. Anzumerken ist, dass die 28-Tage-Druckfestigkeiten jeweils doppelt gemessen und die Werte mathematisch gemittelt wurden. Dazu ist die Druckfestigkeit an beiden Prismenhälften, die durch die Prüfung der Biegezugfestigkeit entstehen, ermittelt worden. Die Auswertung ist Tabelle 4-7 zu entnehmen.

Vergleicht man den Unterschied, linke und rechte Prismenhälfte, angegeben in den ersten drei Spalten von Tabelle 4-7, so wurden unerwartet große Streuungen gemessen.

In der vierten Zeile ist der Mittelwert je Prismenhälfte angegeben. Die Differenz je Prismenseite, zwischen maximal und minimal gemessener Druckfestigkeit ist der fünften Zeile von Tabelle 4-7 angegeben. Diese schwankt von minimalen $0,58 \text{ N/mm}^2$ bis zu $21,11 \text{ N/mm}^2$.

In der untersten Zeile ist der Mittelwert der linken und rechten Messwerte gebildet worden. Die so erhaltene gemittelte 28-Tage-Druckfestigkeit wird für die nachfolgenden Diagramme und Auswertungen herangezogen.

Tabelle 4-7: Auswertung der Druckfestigkeiten der rechten & linken Prismenhälfte

Prisma	M1,5min		M3min		M7min		M15min		M30min	
	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links
1	158,8	157,7	163,1	145,0	158,5	148,0	153,6	137,8	149,4	157,7
2	158,3	156,4	145,7	164,2	137,3	139,2	155,2	153,1	157,9	149,8
3	157,3	153,3	165,3	156,6	143,5	146,0	155,4	156,8	152,5	155,9
MW	158,1	155,8	158,0	155,3	146,4	144,4	154,8	149,2	153,3	154,5
Δ	0,58	4,40	19,55	19,25	21,24	8,71	1,82	19,09	8,57	7,85
MW _{ges}	156,97		156,64		145,40		151,99		153,86	
Prisma	M60min		M120min		M240min		M480min			
	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links		
1	138,9	150,6	149,0	152,2	145,7	136,4	141,5	145,5		
2	146,5	150,1	154,1	148,2	141,0	144,2	162,6	153,1		
3	141,4	144,3	147,6	164,5	132,7	143,3	146,9	142,5		
MW	142,2	148,3	150,2	154,9	139,8	141,3	150,3	147,0		
Δ	7,58	6,35	6,53	16,30	13,01	7,75	21,11	10,59		
MW _{ges}	145,29		152,58		140,54		148,67			

Die Werte der Druckfestigkeit 24 Stunden, sieben Tage sowie 28 Tage nach Herstellung der Prismen sind Tabelle 4-8 zu entnehmen.

Tabelle 4-8: Druckfestigkeit

Druckfestigkeit [N/mm ²]									
	M1,5min	M3min	M7min	M15min	M30min	M60min	M120min	M240min	M480min
24 h	65,77	70,55	65,6	69,63	64,68	61,31	69,34	47,14	43,98
7 Tage	124,14	130,79	125,51	121,96	124,22	121,3	136,36	121,05	127,42
28 Tage	156,97	156,64	145,4	151,99	153,86	145,29	152,58	140,54	148,67

Die grafische Auswertung erfolgte auf drei Darstellungsweisen in Abbildung 4-24, Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26.

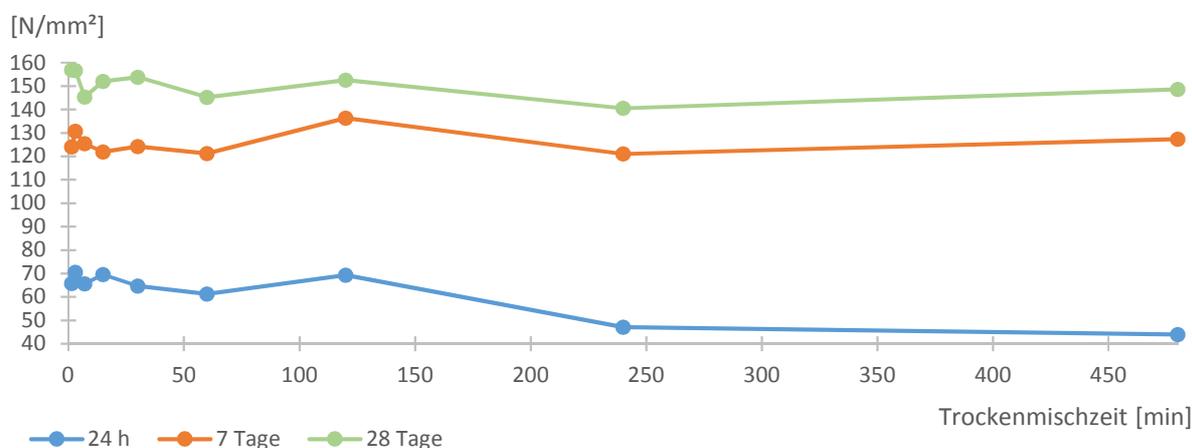


Abbildung 4-24: Druckfestigkeit

In Abbildung 4-24 ist zu erkennen, dass abgesehen von den Trockenmischdauern unter 30 Minuten, die Veränderungen der Druckfestigkeit je Trockenmischdauer bei den drei Altersstufen parallel verlaufen. Die Schwankungsbreite der Messwerte je Betonalter ist bei der 24-Stunden-Druckfestigkeit am größten, ca. doppelt so hoch wie die der andern zwei Betonalter.

Abbildung 4-25 zeigt jeweils die drei Druckfestigkeitswerte 24 Stunden, 7 Tage sowie 28 Tage nach der Herstellung als geblocktes Balkendiagramm. Die drei Betonalter wurden erneut je Trockenmischdauern, aufsteigend von links mit der kürzesten Trockenmischdauer, dargestellt.

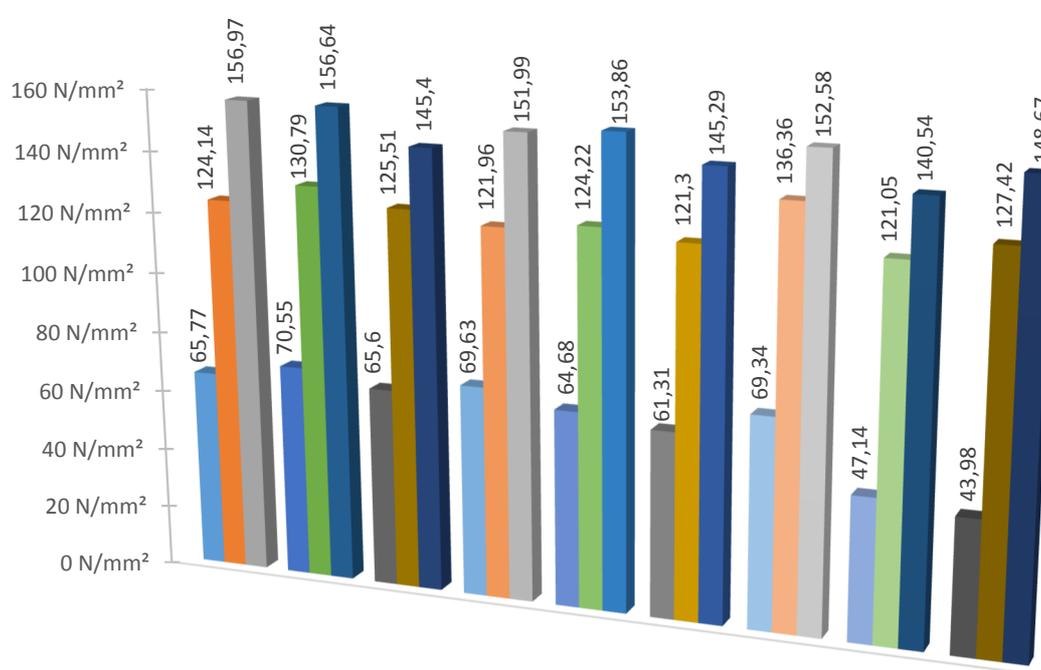


Abbildung 4-25: geblockte Darstellung der Druckfestigkeiten

Die Grafik von Abbildung 4-26 gleicht jener von Abbildung 4-25, sie zeigt jedoch die geprüften Messwerte als Prozentwerte vom Maximalwert des jeweiligen Betonalters. Für das Betonalter von 24-Stunden wurde die maximale Druckfestigkeit bei der Trockenmischdauer von drei Minuten erreicht. Der erreichte Wert von $156,97 \text{ N/mm}^2$ sind in Abbildung 4-26 als 100 Prozent dargestellt. Von diesem Wert ausgehend wurden die restlichen 24-Stunden-Druckfestigkeiten prozentuell berechnet. Analog dazu wurden auch die Prozente der 7-Tage- und 28-Tage-Druckfestigkeit ermittelt.

Durch die Darstellung der prozentuellen Messwerte können eventuelle Einflüsse welche zufolge der Verlängerung des Parameters der Trockenmischdauer resultieren sehr gut dargestellt werden.

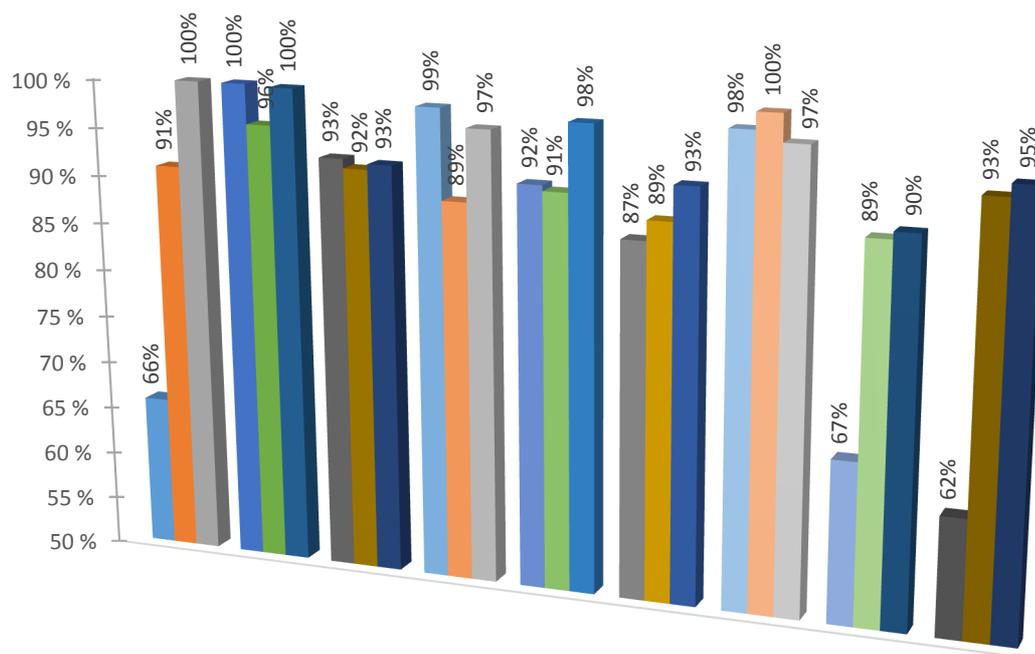


Abbildung 4-26: geblockte Darstellung der prozentuellen Druckfestigkeiten

Betrachtet man die Frühfestigkeitsentwicklung, der Druckfestigkeiten nach 24 Stunden, so ist diese bei der kürzesten Trockenmischdauer, der *M90sek* Messung, und bei den zwei längsten Trockenmischdauern, *M240min* und *M480min*, am schlechtesten. Bereits durch Verdopplung der Trockenmischzeit von 90 Sekunden auf 3 Minuten wurden die maximal erreichten Frühfestigkeitswerte verzeichnet.

Ident zu den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit gleichen sich die Schwankungen der 24-Stunden-Druckfestigkeiten über die Zeit aus. Im Betonalter von 28 Tagen wurden für die unterschiedlichen Trockenmischdauern Druckfestigkeitsabweichungen von ca. zehn Prozent gemessen. Wobei die niedrigsten Messwerte nicht bei den längsten Mischdauern verzeichnet wurden. Durch Variation der Trockenmischdauer werden daher kaum nennenswerte Verbesserungen oder Verschlechterungen der Enddruckfestigkeit erzielt.

Auswertung der rheologischen Messungen

Der Versuch gliedert sich in zwei Messungen je Trockenmischdauer. Der ersten Messungen erfolgten jeweils bei einem Frischbetonalter von sieben Minuten, die zweiten Messungen bei einem Frischbetonalter von 22 Minuten, wobei vor der zweiten Messung die beginnende Hydratation durch aufmischen der Suspension aufgebrochen wurde.

Zunächst werden sämtliche Trockenmischdauern des ersten Versuches, betitelt als erste Messung, analysiert. In Abbildung 4-27 wurde die Scherspannung der 90 Sekunden andauernden Trockenmischdauer über die Prüfzeit im Viskomaten aufgetragen. Die sieben gefahrenen Scherraten sprünge sind auch in der Auswertung ersichtlich.

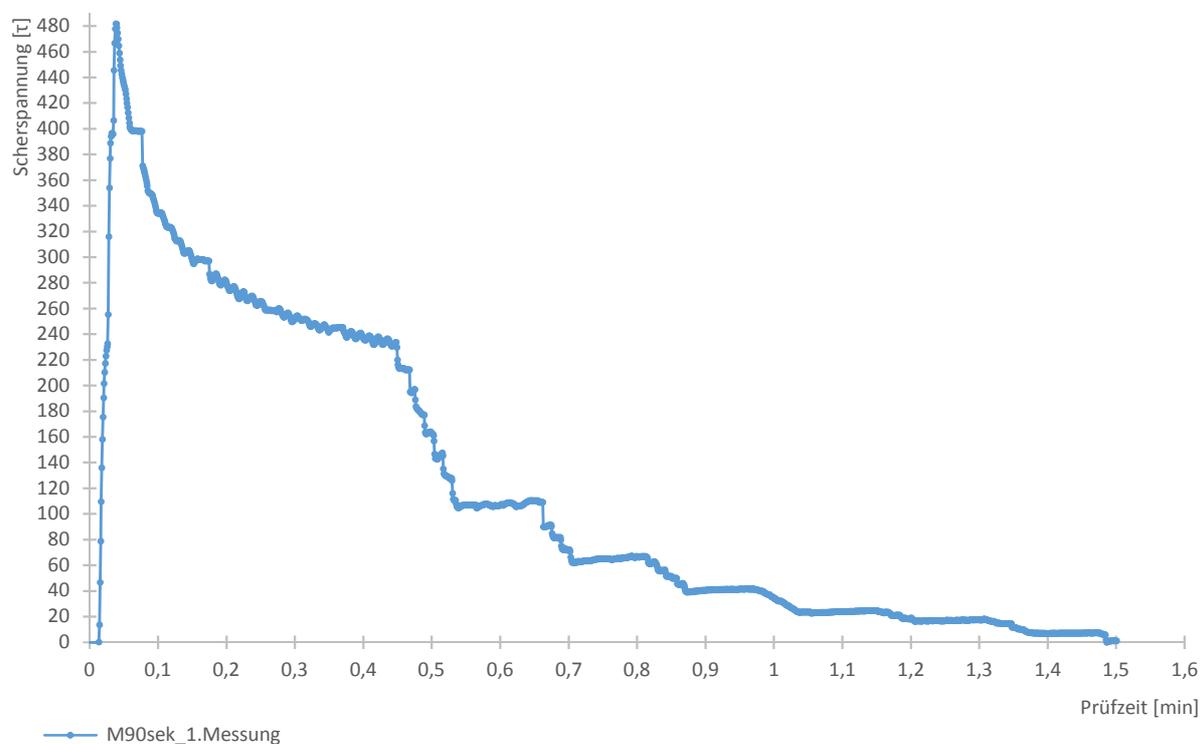


Abbildung 4-27: Scherspannung-Zeit-Diagramm für M90sek_1.Messung

Nach jeder sprunghaften Minimierung der Schergeschwindigkeit kommt es zu einem minimalen Anstieg der Scherspannung. Diese sind sowohl sichtbar als auch im anschließenden Diagramm von Abbildung 4-29 durch die mit positiven Vorzeichen behafteten Exponentialfunktionen mathematisch belegt. Der Anstieg bekräftigt das thixotrope Verhalten der zu untersuchenden Suspension.

Mit den Messwerten des Scherspannungs-Zeit-Diagrammes, ausgewertet ab der 30ten Prüfsekunde, kann die Fließkurve ermittelt werden. Diese wurde auf der rechten Seite von Abbildung 4-28 für den Versuch M90min der ersten Messung generiert.

Bedingt durch die Abtastrate des Viskomats ist die Auswertung der Fließkurve, von der Scherrate 2,5 bis 0, jedoch nur in schlechter Auflösung und der daraus resultierenden Sprünge dargestellt.

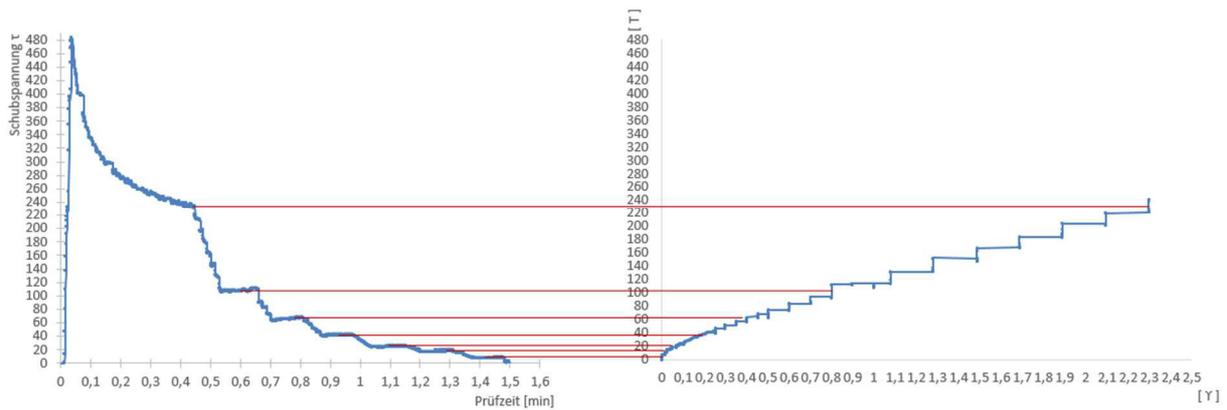


Abbildung 4-28: Auswertung Messergebnisse

Demzufolge müssen zuerst die aufgezeichneten Messwerte des Scherspannungs-Zeit-Diagramm, zu sehen links in Abbildung 4-28, geglättet werden. Die Glättung erfolgt je Scherratenplateau. Dazu wird je Plateau, über die gesamte konstant gefahrene Messdauer, eine Exponentialfunktion gelegt. In Abbildung 4-29 wurde dies für die erste Messung der *M90sek* Mischung ausgewertet.

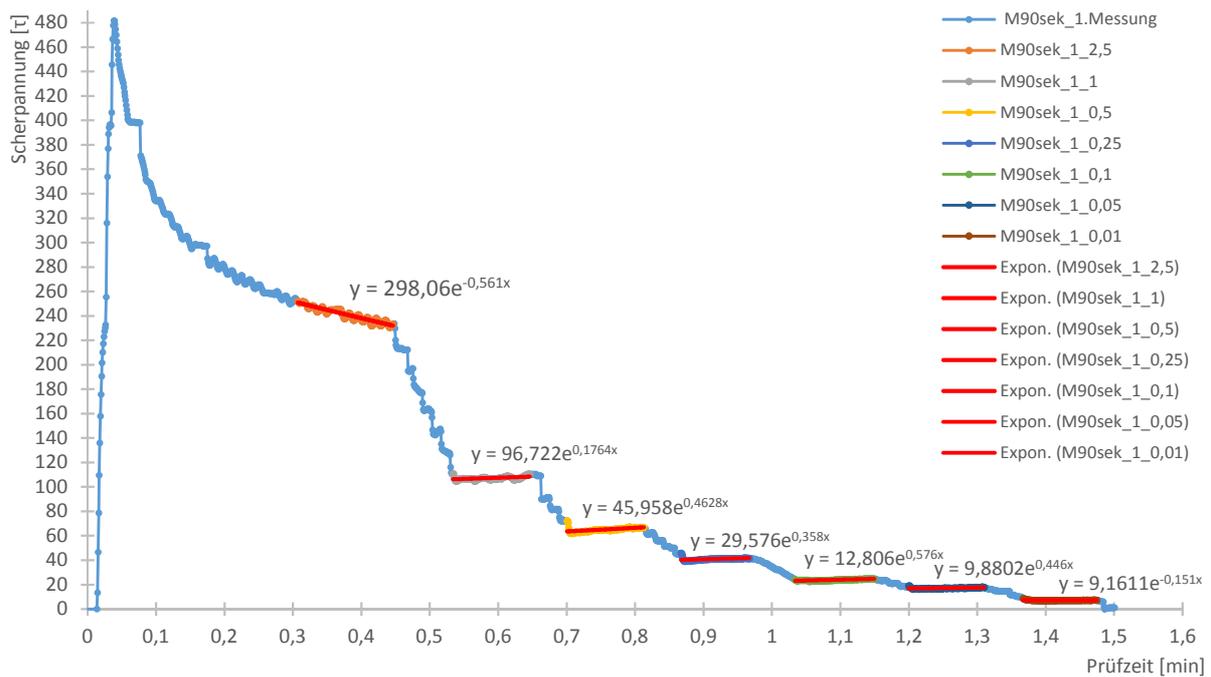


Abbildung 4-29: M90sek incl. Exponentialfunktionen

Lediglich bei der ersten Stufe, der Schergeschwindigkeit mit dem Wert 2,5, wird die Exponentialfunktion nur über das letzte Drittel der konstant gehaltenen Schergeschwindigkeitsplateaus gebildet. Die so erhaltene Exponentialfunktion schmiegt sich im Endbereich des Plateaus exakter an die tatsächlichen Messwerte als die Exponentialfunktion welche das gesamte Schergeschwindigkeitsplateau einbezieht.

Aus den sieben verschiedenen Exponentialfunktionen wird jeweils der Mittelwert gebildet und die berechneten Mittelwerte in die Fließkurve projiziert.

Dies wurde in Abbildung 4-30 wieder für die erste Messung der Trockenmischdauer von 90 Sekunden durchgeführt. Bis zum Wert mit der Schergeschwindigkeit von 0,25 liegen die projizierten Mittelwerte stets auf einer Geraden, die Scherspannungen und Schergeschwindigkeiten verhalten sich innerhalb dieses Abschnittes linear. Die restlichen projizierten Mittelwerte liegen nicht mehr auf der Gerade. Über die erhaltene Gerade wird anschließend eine Trendlinie bis zum Berührungspunkt der y-Achse verlängert und die mathematische Geradengleichung, siehe Formel [4-4], angeschrieben. Die so erhaltene Funktion gibt sowohl Auskunft über die dynamische Fließgrenze als auch die plastische Viskosität der ersten *M90sek* Mischung.

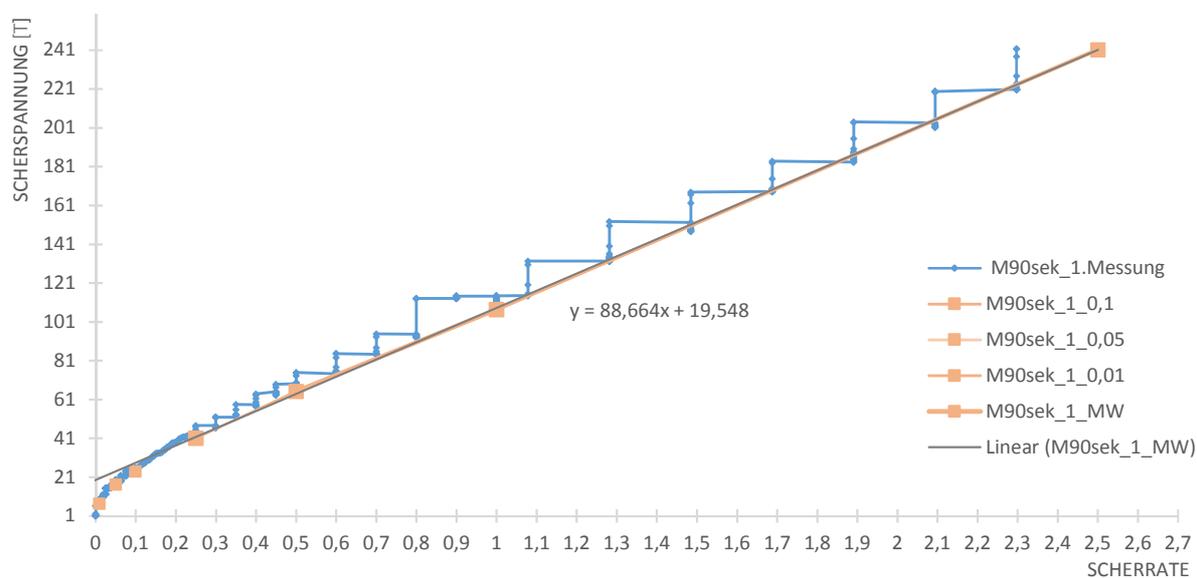


Abbildung 4-30: Fließkurve incl. Mittelwerte der Exponentialfunktionen für M90sek_1.Messung

$$y = 19,548 + 88,664 \cdot x \approx \tau = \tau_{0,dyn} + \eta_{plastisch} \cdot \dot{\gamma} \quad [4-4]$$

Analog zum Versuch *M90sek* der ersten Messung wurden für alle verwendeten Trockenmischdauern in der ersten und zweiten Messung die Scherspannungs-Zeit-Diagramme erstellt, siehe Abbildung 4-31 und Abbildung 4-33, abschnittsweise Exponentialfunktionen in die Plateaus gelegt und mit dessen Mittelwerten die zugehörigen Fließkurven geglättet. Da nur die Exponentialfunktionen der Schergeschwindigkeitsstufen von 2,5 bis 0,25 auf einer Gerade liegen sind in Tabelle 4-9 nur diese festgehalten.

In Abbildung 4-32 und Abbildung 4-34 sind die geglätteten Rohdaten der Fließkurven von der ersten und zweiten Messung getrennt dargestellt.

Tabelle 4-9: Aufstellung der Exponentialfunktionen gebildet aus τ -t-Diagramm

1. Messung	Y	90sek	3min	7min	15min	30min
	2,5	$298,06 \cdot \exp(-0,561 \cdot x)$	$295,56 \cdot \exp(-0,577 \cdot x)$	$297,68 \cdot \exp(-0,589 \cdot x)$	$260,66 \cdot \exp(-0,554 \cdot x)$	$235,49 \cdot \exp(-0,561 \cdot x)$
	1	$96,722 \cdot \exp(0,1764 \cdot x)$	$83,833 \cdot \exp(0,3947 \cdot x)$	$86,459 \cdot \exp(0,3263 \cdot x)$	$83,306 \cdot \exp(0,2012 \cdot x)$	$76,152 \cdot \exp(0,1683 \cdot x)$
	0,5	$45,958 \cdot \exp(0,4628 \cdot x)$	$65,85 \cdot \exp(-0,034 \cdot x)$	$47,965 \cdot \exp(0,3679 \cdot x)$	$40,699 \cdot \exp(0,4406 \cdot x)$	$35,02 \cdot \exp(0,4887 \cdot x)$
	0,25	$29,576 \cdot \exp(0,358 \cdot x)$	$24,404 \cdot \exp(0,54594 \cdot x)$	$29,187 \cdot \exp(0,3308 \cdot x)$	$29,833 \cdot \exp(0,1934 \cdot x)$	$19,973 \cdot \exp(0,5099 \cdot x)$
	Y	60min	120min	240min	480min	
	2,5	$231,79 \cdot \exp(-0,528 \cdot x)$	$219,2 \cdot \exp(-0,553 \cdot x)$	$100,44 \cdot \exp(-0,465 \cdot x)$	$93,423 \cdot \exp(-0,484 \cdot x)$	
	1	$67,425 \cdot \exp(0,3666 \cdot x)$	$63,976 \cdot \exp(0,3436 \cdot x)$	$31,907 \cdot \exp(0,2149 \cdot x)$	$28,911 \cdot \exp(0,2494 \cdot x)$	
	0,5	$38,95 \cdot \exp(0,3501 \cdot x)$	$38,703 \cdot \exp(0,2761 \cdot x)$	$19,103 \cdot \exp(0,1505 \cdot x)$	$17,019 \cdot \exp(0,2123 \cdot x)$	
	0,25	$20,568 \cdot \exp(0,4764 \cdot x)$	$21,689 \cdot \exp(0,3638 \cdot x)$	$11,045 \cdot \exp(0,18 \cdot x)$	$10,657 \cdot \exp(0,1447 \cdot x)$	
2. Messung	Y	90sek	3min	7min	15min	30min
	2,5	$142,57 \cdot \exp(-0,083 \cdot x)$	$166,21 \cdot \exp(-0,352 \cdot x)$	$151,01 \cdot \exp(-0,335 \cdot x)$	$226,51 \cdot \exp(-0,472 \cdot x)$	$131,8 \cdot \exp(-0,277 \cdot x)$
	1	$57,573 \cdot \exp(0,2478 \cdot x)$	$56,84 \cdot \exp(-0,324 \cdot x)$	$58,319 \cdot \exp(0,134 \cdot x)$	$86,185 \cdot \exp(0,0647 \cdot x)$	$45,454 \cdot \exp(0,3375 \cdot x)$
	0,5	$35,191 \cdot \exp(0,2048 \cdot x)$	$46,315 \cdot \exp(-0,102 \cdot x)$	$28,946 \cdot \exp(0,4008 \cdot x)$	$45,245 \cdot \exp(0,2639 \cdot x)$	$29,283 \cdot \exp(0,2094 \cdot x)$
	0,25	$27,114 \cdot \exp(-0,045 \cdot x)$	$18,554 \cdot \exp(0,4293 \cdot x)$	$19,646 \cdot \exp(0,2671 \cdot x)$	$28,498 \cdot \exp(0,2381 \cdot x)$	$13,852 \cdot \exp(0,4844 \cdot x)$
	Y	60min	120min	240min	480min	
	2,5	$136,86 \cdot \exp(-0,335 \cdot x)$	$126,63 \cdot \exp(-0,296 \cdot x)$	$60,506 \cdot \exp(-0,266 \cdot x)$	$50,387 \cdot \exp(-0,269 \cdot x)$	
	1	$50,089 \cdot \exp(0,2079 \cdot x)$	$44,882 \cdot \exp(0,3135 \cdot x)$	$22,625 \cdot \exp(0,1859 \cdot x)$	$18,464 \cdot \exp(0,2236 \cdot x)$	
	0,5	$26,919 \cdot \exp(0,3385 \cdot x)$	$28,162 \cdot \exp(0,2498 \cdot x)$	$14,532 \cdot \exp(0,0749 \cdot x)$	$12,21 \cdot \exp(0,0704 \cdot x)$	
	0,25	$18,649 \cdot \exp(0,1968 \cdot x)$	$15,209 \cdot \exp(0,3983 \cdot x)$	$7,1541 \cdot \exp(0,301 \cdot x)$	$5,8798 \cdot \exp(0,3215 \cdot x)$	

die ersten Messungen aller neun verschiedenen Trockenmischdauern sind in Abbildung 4-31 zusammengefasst dargestellt.

Die Annahme, je länger die Trockenmischzeit desto niedrigere Scherspannungen treten auf, trifft jedoch nicht bei jeder Erhöhung der Trockenmischdauer zu. Der höchste Spannungspfad wurde in Versuch *M90sek* erreicht. Minimal drunter liegt der Spannungspfad der siebenminütigen Trockenmischdauer, gefolgt von der dreiminütigen Trockenmischdauer. Es scheint, dass die doch relativ kurze Verlängerung der Mischdauer noch keine Änderung im Spannungsverlauf bedingen. Auch in der Auswertung der Viskosität, siehe Tabelle 4-10, liegt die Viskosität von *M7min* mit dem Wert η ist gleich 88,13 Pa·s zwischen den Werten von *M90sek* und *M3min*, bei denen η ist gleich 88,66 Pa·s und 88,13 Pa·s beträgt.

Der Spannungspfad der fünfzehnminütigen Trockenmischdauer liegt jedoch schon deutlich unter den kürzer gewählten Trockenmischdauern *M90sek*, *M3min* und *M7min*. Der Sprung nach nochmalige Verdopplung der Trockenmischdauer auf 30 Minuten gleicht jenem Sprung von *M90sek* auf *M15min*. Die Lastpfade *M30min* und *M60min* verlaufen wieder ident. Für die restlichen Trockenmischdauern liefert jede Verlängerung der Trockenmischdauer auch flüssiger werdende Substanzen. Wobei die Viskositätsabnahme bei Mischungen von über 240 Minuten auf 480 Minuten sehr gering ausfällt.

Es wirkt so als wäre die minimale Viskosität des Mischgutes bei einem Wert von $\eta \approx 30 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ erreicht. Die Verlängerung der Trockenmischdauer von 90 Sekunden auf 480 Minuten bedingt eine signifikante Abnahme der Viskosität um fast 2/3 ihres Wertes, siehe dazu die Viskositäten η in Tabelle 4-10.

Tabelle 4-10: Aufstellung der Trendlinien gebildet aus τ - γ -Diagramm der 1en Messungen

TM-Zeit	lineare Trendlinie	$T_{0,d}$	$\eta_{\text{Plastisch}}$
1,5min	$y=88,664*x+19,548$	19,55	88,66
3min	$y=87,472*x+19,102$	19,10	87,47
7min	$y=88,134*x+17,924$	17,92	88,13
15min	$y=77,932*x+16,67$	16,67	77,93
30min	$y=70,355*x+14,582$	14,58	70,36
60min	$y=70,072*x+14,641$	14,64	70,07
120min	$y=65,494*x+14,007$	14,01	65,49
240min	$y=31,61*x+5,1602$	5,16	31,61
480min	$y=29,11*x+4,951$	4,95	29,11

Tabelle 4-11: Aufstellung der Trendlinien gebildet aus τ - γ -Diagramm der 2en Messungen

TM-Zeit	lineare Trendlinie	$T_{0,d}$	$\eta_{\text{Plastisch}}$
1,5min	$y=49,297*x+15,608$	15,61	49,30
3min	$y=52,054*x+14,868$	14,87	52,05
7min	$y=47,563*x+14,598$	14,60	47,56
15min	$y=67,987*x+20,242$	20,24	67,99
30min	$y=42,786*x+12,076$	12,08	42,79
60min	$y=43,922*x+11,382$	11,38	43,92
120min	$y=40,05*x+13,466$	13,47	40,05
240min	$y=19,954*x+4,9993$	5,00	19,95
480min	$y=16,565*x+4,2448$	4,24	16,57

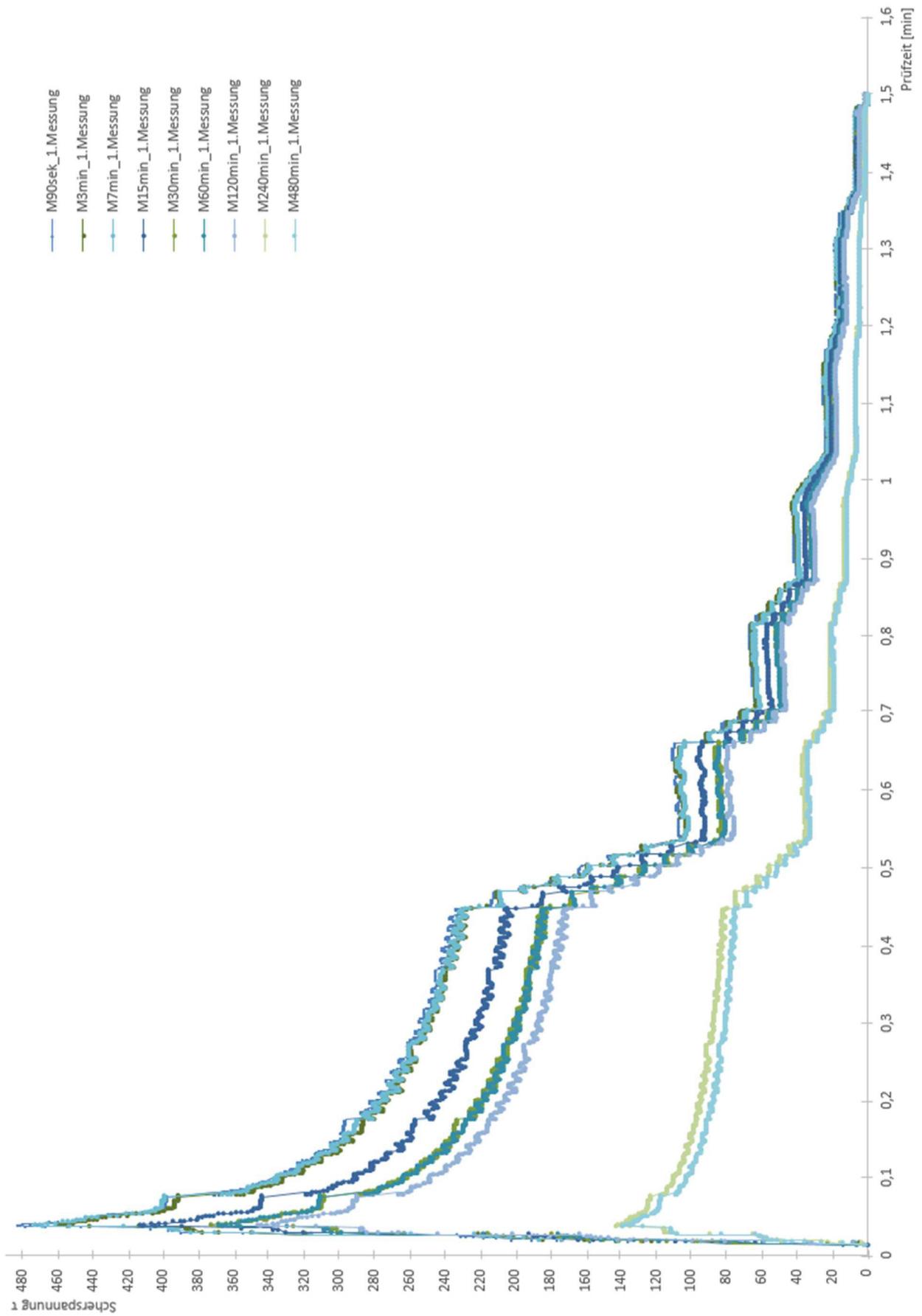


Abbildung 4-31: Diagramm aller Trockenmischdauern der ersten Messung

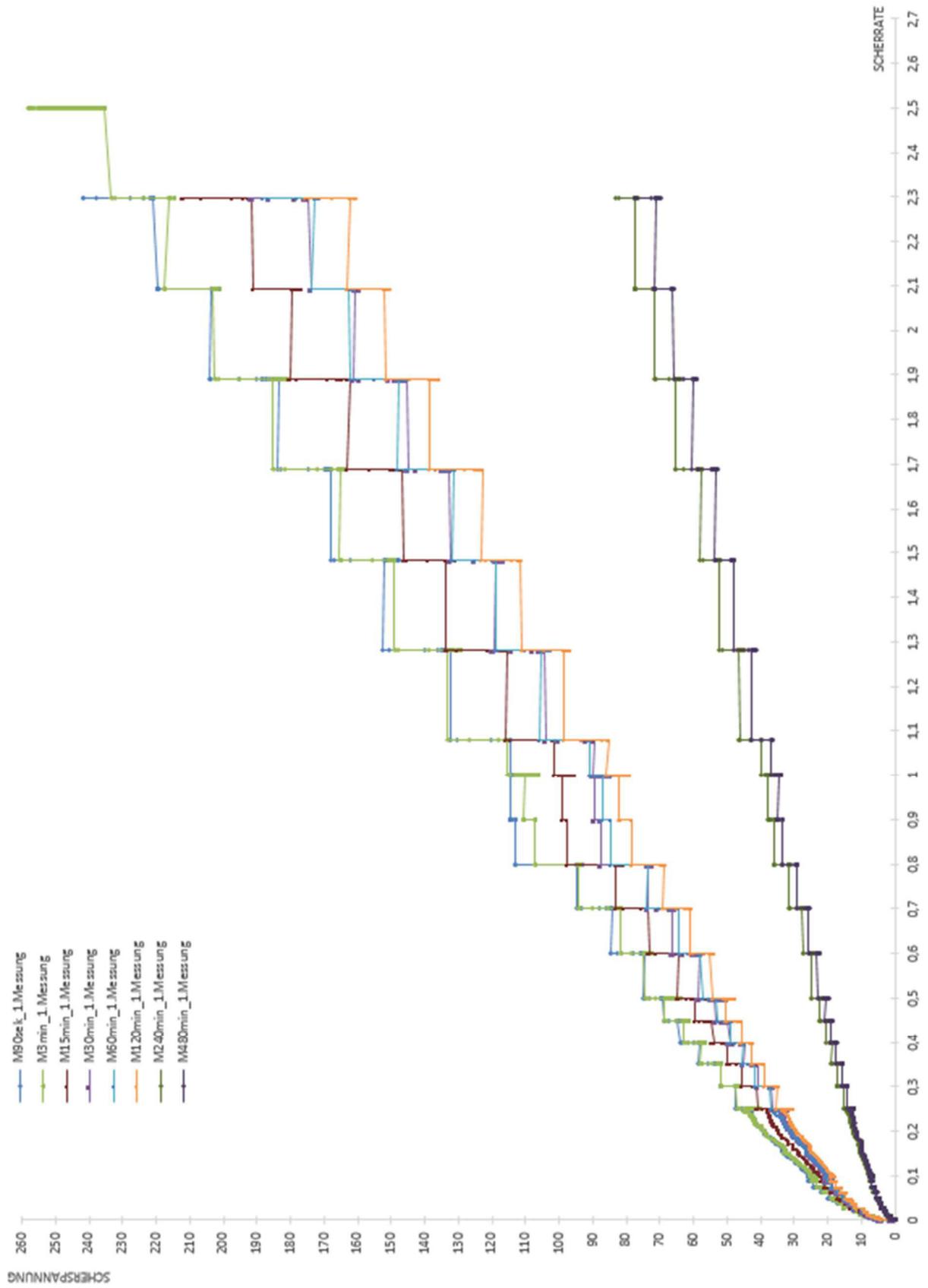


Abbildung 4-32: Fließdiagramm aller Trockenmischdauern der ersten Messung

In Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34 sind die Diagramme der zweiten Messung grafisch dargestellt. *M15min* liefert den höchsten Scherspannungspfad und die größte Viskosität. Es handelt sich um jene Mischung die durch Versagen der Messtechnik auch die längste Hydratationszeit der zweiten Messung aufweist. Sie kann daher nicht für die Messanalyse gewertet werden und ist nur der Vollständigkeit halber angeführt und in den Diagrammen dargestellt. Von den vergleichbaren Versuchen liefert *M3min* die höchste und *M480min* die niedrigste Viskosität. Die Viskositäten und Ergebnisse der Spannungspfade von *M90sek* und *M7min* sowie *M60min* und *M30min* sind wieder ähnlich wie bei der ersten Messung. Zwar sind die Viskositäten insgesamt in der zweiten Messung niedriger, sprich flüssiger als jene der ersten Messung, sie verhalten sich jedoch ähnlich zum ersten Versuch.

Der Viskositätsvergleich zwischen maximaler zu minimaler Viskosität, in diesem Versuch *M3min* zu *M480min* beträgt wieder rund 2/3 der maximal erreichten Viskosität, siehe η in Tabelle 4-11.

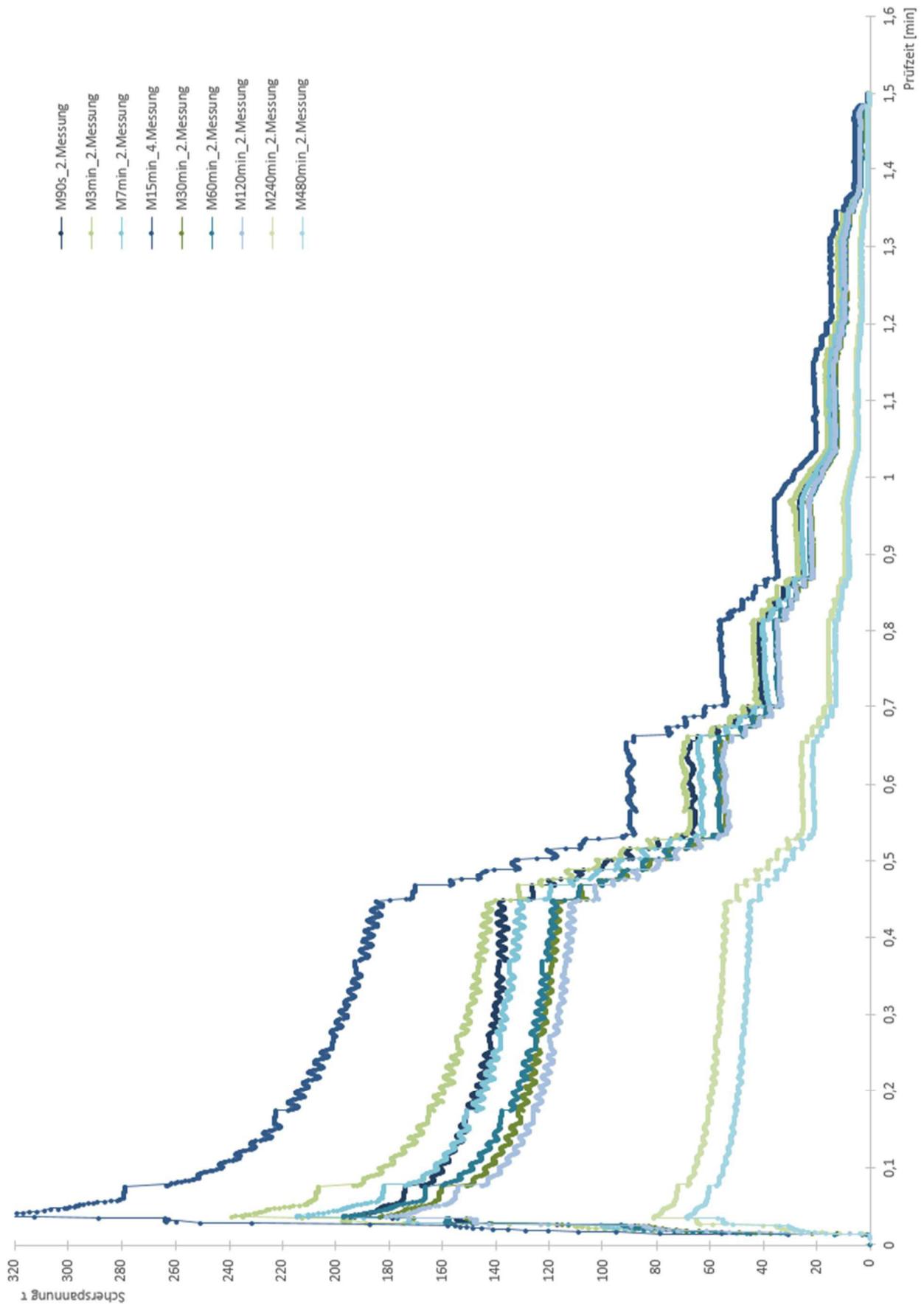


Abbildung 4-33: Diagramm aller Trockenmischdauern der zweiten Messung

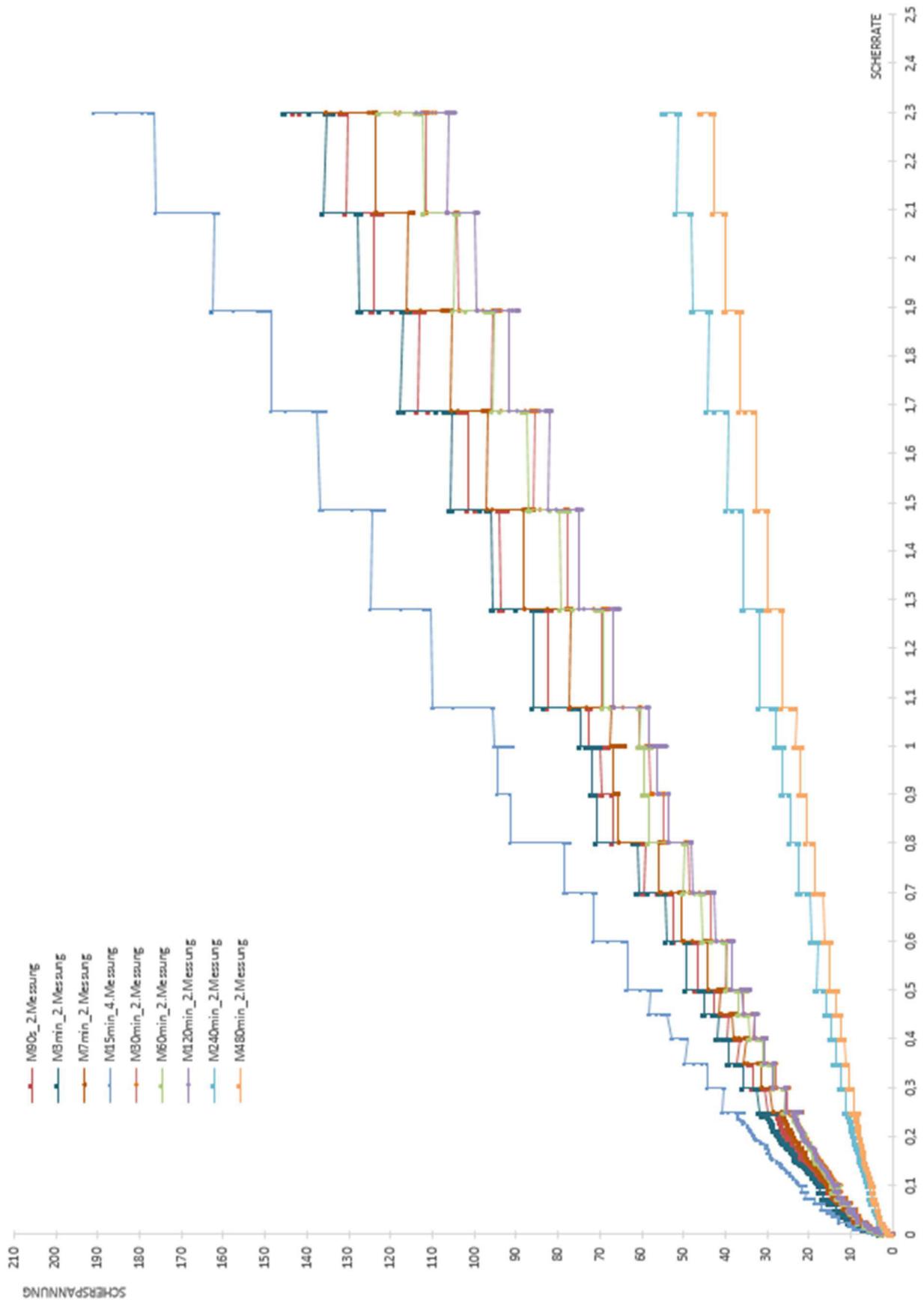


Abbildung 4-34: Fließdiagramm aller Trockenmischdauern der zweiten Messung

Um den direkten Vergleich der ersten und zweiten Messungen besser zu veranschaulichen wurden für die Trockenmischung *M90sek* und *M480min* jeweils beide Messungen in einem Diagramm einzeln dargestellt, siehe dazu Abbildung 4-35 und Abbildung 4-36.

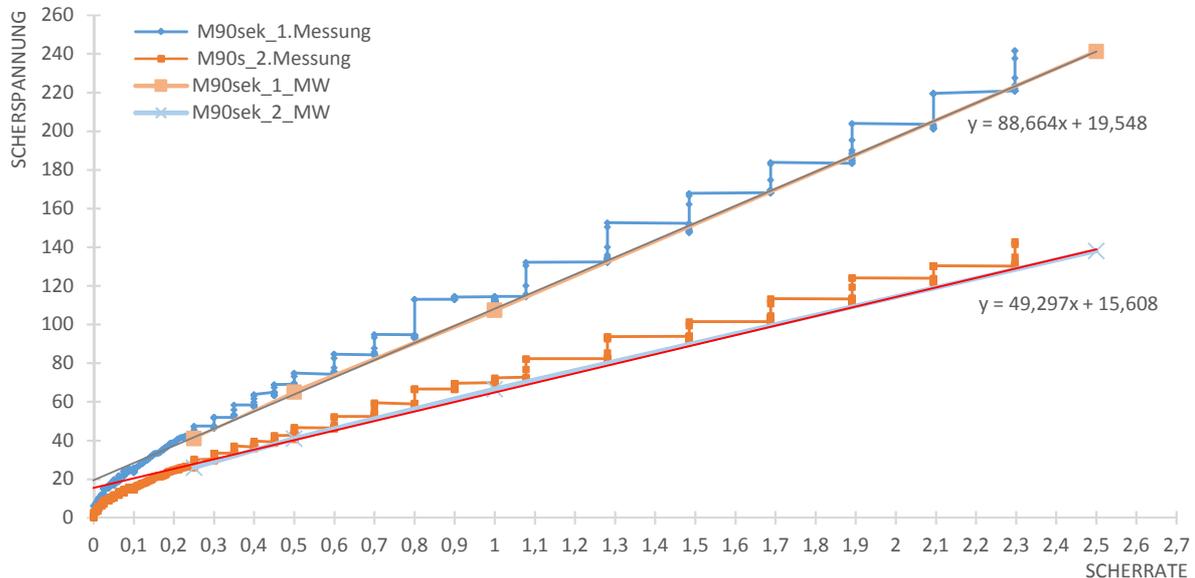


Abbildung 4-35: Vergleich erste und zweite Mischung von M90sek

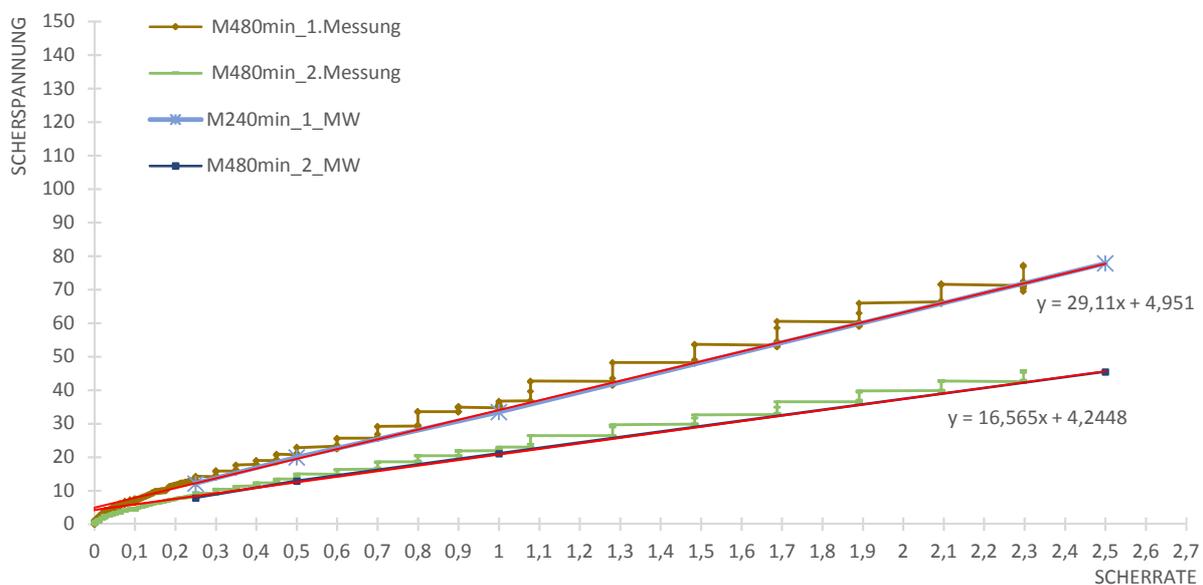


Abbildung 4-36: Vergleich erste und zweite Mischung von M240min

Bei beiden Trockenmischdauern liegen die Fließkurven des ersten Versuches stets über jenen des zweiten Versuches. Dies bedeutet, dass die Viskosität der ersten Messung stets höher ist als in jener der zweiten Messung. Die zweite Messreihe war demnach trotz 15 Minuten verspäteter Prüfzeit flüssiger, als jene Mischung die direkt nach dem Herstel-

lungsprozess in einem Betonalter von sieben Minuten geprüft wurde. Die einminütige Mischung der Suspension mit der Bohrmaschine, 18 Minuten nach Wasserzugabe, war anscheinend zu lange gewählt.

In einer erneuten Prüferie, wäre es ratsam beide Mischungen vor dem Versuchsbeginn gleich lang mit der Bohrmaschine aufzurühren.

In Abbildung 4-37 sind die berechneten Viskositätswerte von Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11 blockweise, jeweils die erste und zweite Messung jeder Trockenmischdauer, dargestellt. Die Darstellung erfolgte aufsteigend von der geringsten Trockenmischdauer auf der linken Seite beginnend.

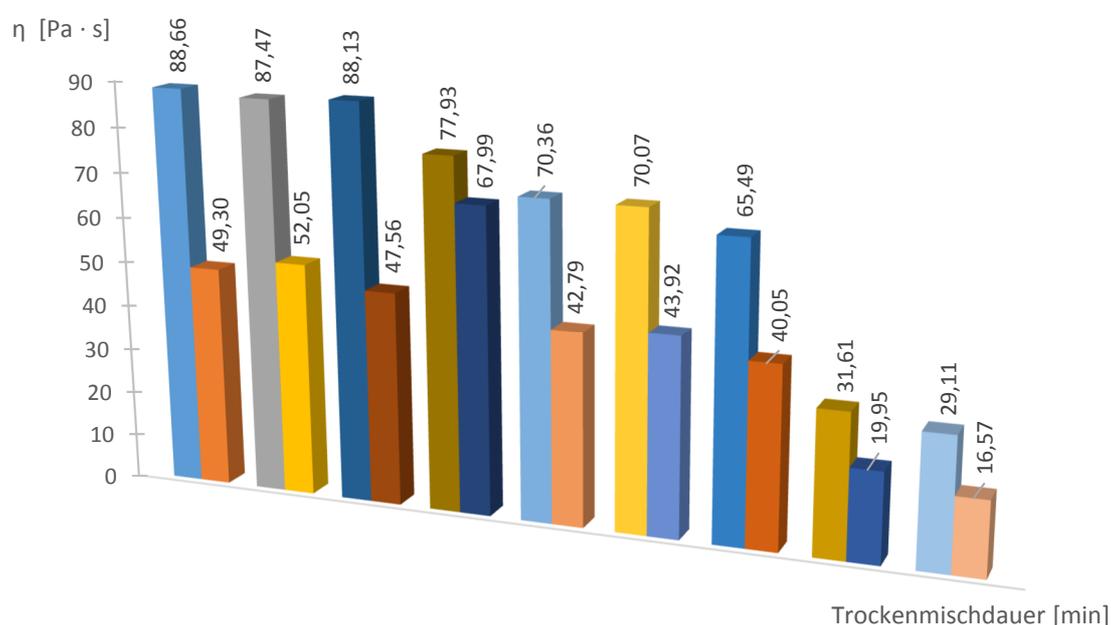


Abbildung 4-37: blockweise Darstellung der Viskositäten

Bei der zweiten Messung der Serie *M15min*, wurde nach dem erneuten aufmischen der Suspension bis zum Versuchsstart eine acht Minütige Ruhephase gewählt. Das ist eine ähnlich lange Zeitspanne wie bei allen Versuchen der ersten Messung vom Ende der Mischzeit im Intensivmischer bis zum Beginn der Versuchsmessung im Rheometer. Dies wirkt sich auch auf die Viskosität der Mischung aus, welche annähernd an den Wert der ersten *M15min* Mischung kommt.

In Abbildung 4-38 ist die Auswertung der Viskositäten als Prozentsätze des maximal erreichten Wertes je Messung dargestellt. Der Versuchsausreißer *M15min* der zweiten Messung wird nur der Vollständigkeit halber dargestellt. Als Maximalwert der zweiten Messung wurde *M3min*, der zweithöchste Wert, gewählt.

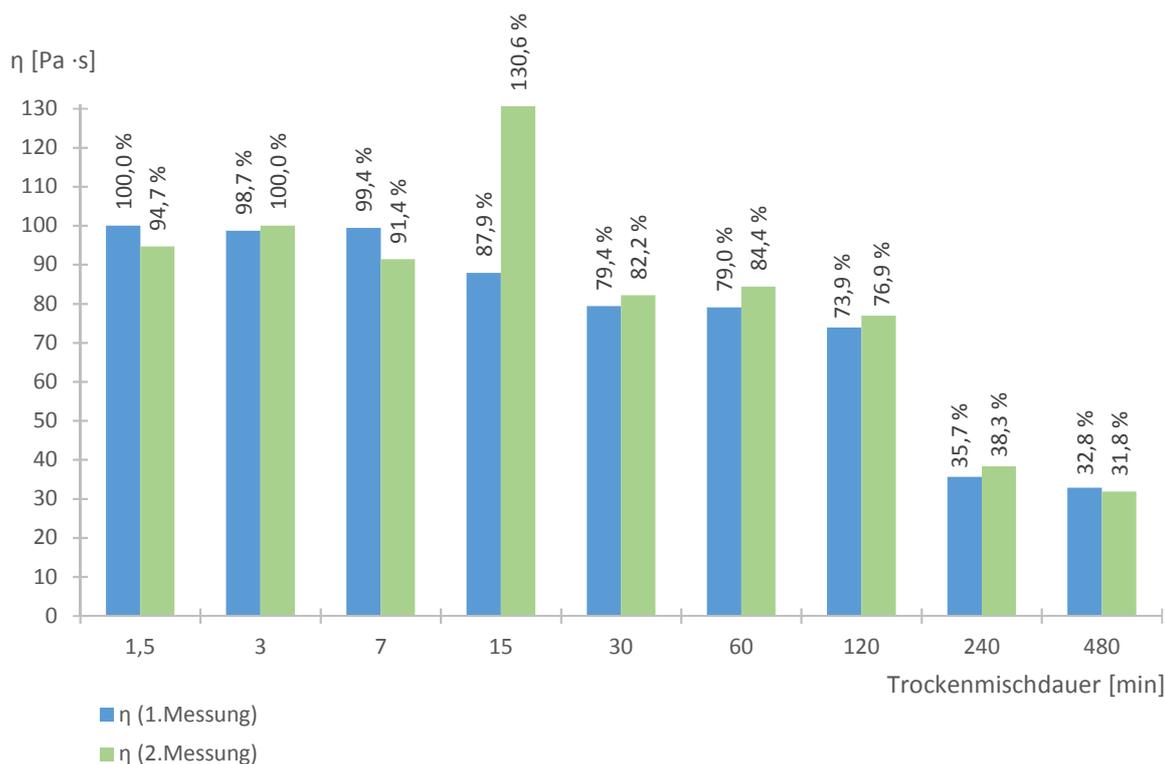


Abbildung 4-38: prozentuelle Darstellung der Viskositäten

Wird die Viskosität der zweiten Messung *M15min* nicht gewertet, so verhalten sich die Viskositäten beider Messungen je Trockenmischdauer sehr ähnlich.

In beiden Versuchsreihen beträgt die Viskosität der beiden letzten Trockenmischdauern nur noch 1/3 der maximal erreichten Viskosität. Da die Abstände der Trockenmischdauern nicht kontinuierlich, sondern jeweils durch Verdopplung der vorherigen Trockenmischdauer gewählt wurden, ist es schwer Angaben über das rheologische Verhalten innerhalb des langen Sprungs der Trockenmischdauer *M120min* und *M240min* zu treffen. Innerhalb der noch recht regelmäßigen Sprünge von *M90sek* bis *M60min* nimmt die Viskosität jedoch nahezu konstant ab.

In Abbildung 4-39 wurden die gemessenen Viskositäten, blau dargestellt jene der ersten Messung, grün jene der zweiten Messung, zusammen mit den geprüften Ausbreitmaßen, und der Trichterauslaufzeit über die verwendeten Trockenmischdauern gelegt.

Betrachtet man das Verhältnis der Viskositätswerte mit den Trichterauslaufzeiten so passen die qualitativen Änderungen der Trockenmischdauern nicht überein. Denn obwohl die Viskosität bis zur Probe *M7min* relativ konstant sind, nimmt die Trichterauslaufzeit rapide ab. Der Anstieg der Viskosität bei der zweiten *M15min* Messung wird wegen der verspäteten Startzeit nicht gewertet. Die verlängerte Auslaufzeit der *M30min* Probe kann auch bei Betrachtung der Viskositäten nicht aufgeklärt werden. Der Wiederanstieg der Trichterauslaufzeit in *M480min* könnte, da auch die Viskosität der zweiten Messung von

M240min auf *M480min* abnimmt, doch kein Messfehler sein. Jedoch fehlen statistische Vergleichswerte.

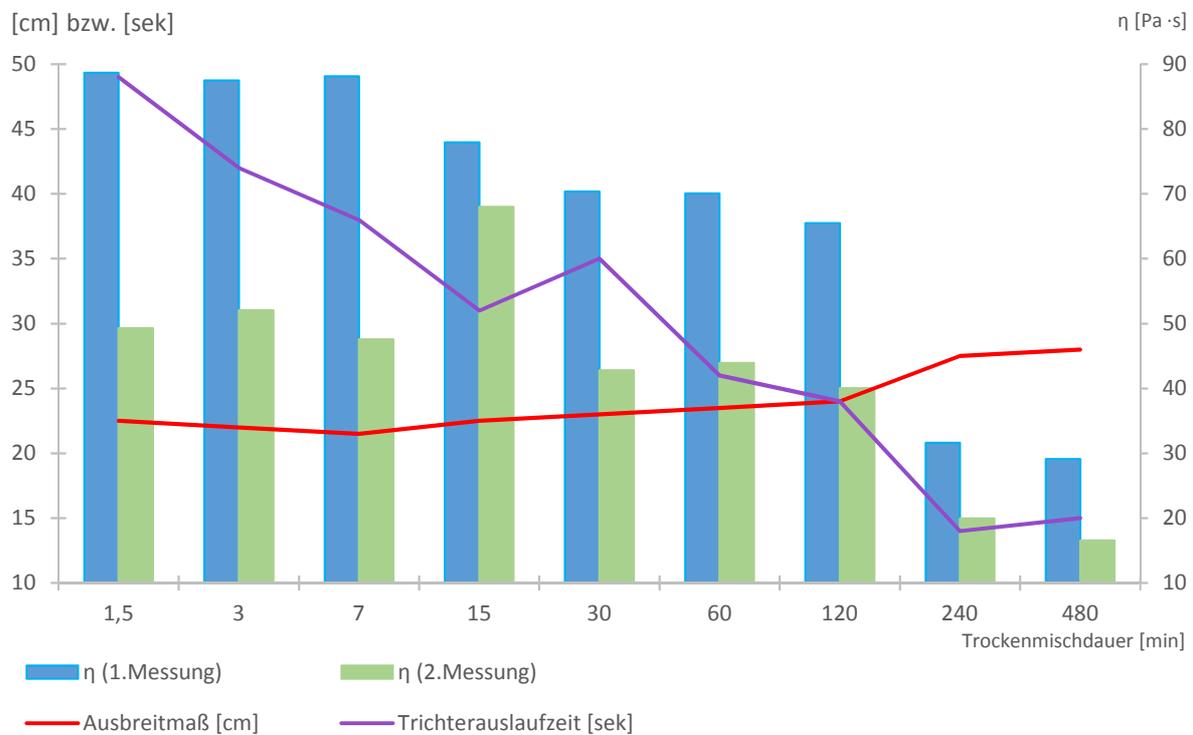


Abbildung 4-39: Gegenüberstellung: Viskositäten, Ausbreitmaß und Trichterauslaufzeit über die Trockenmischdauern

Interessant ist, dass die qualitativen Messwerte des Ausbreitmaßes mit den qualitativen An- und Abstiegen der Viskosität übereinstimmen. Sowohl die Werte der Viskosität als auch die des Ausbreitmaßes sind von *M90min* bis *M7min* als konstant anzusehen. Unter Auslassung des zweiten Viskositätswertes von *M15min*, sinkt die Viskosität geringfügig im Bereich *M15min* bis *M120min*. Die Werte des Ausbreitmaßes nehmen bei den selben Trockenmischdauern gering zu. Bei den letzten zwei Trockenmischdauern passen die Werte der Viskosität und Ausbreitmaß erneut qualitativ überein.

Jedoch zeigt sich, dass die Erhöhung der Trockenmischdauer zur Verflüssigung der Suspension Grenzwerte besitzt. Zwischen der Mischung *M240min* und der erneuten verdoppelten Zeitspanne der Mischung *M480min* sinkt die Viskosität nur noch geringfügig.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Diplomarbeit war es den Einfluss einer verlängerten Trockenmischdauer auf die rheologischen Eigenschaften von UHPC festzustellen.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden neun verschiedene Trockenmischdauern untersucht. Einerseits die bis dato übliche Trockenmischdauer von lediglich 90 Sekunden, sowie Trockenmischdauern von drei, sieben und 15 Minuten. Ab Mischminute 15 bis Mischminute 480 wurden die Intervalle jeweils durch eine Verdopplung der Mischdauer festgelegt.

Die durchgeführten Versuchsreihen der neun Trockenmischdauern wurden zudem bei zwei verschiedenen Betonalter durchgeführt. Einmal sieben Minuten nach Wasserzugabe und nach Reinigung des Viskomaten erneut 22 Minuten nach Wasserzugabe.

Für beide Betonalter konnte bewiesen werden, dass Veränderungen der Trockenmischdauer Auswirkungen auf die Rheologie des Frischbetons brachten. Die Verflüssigung bei steigender Trockenmischdauer wurde einerseits mit den gängigen Frischbetonprüfverfahren festgehalten und andererseits mit Hilfe des *Schleibinger Viskomat NT* bei Verwendung der Doppelringspalt-Messzelle quantitativ berechnet.

Je länger die Trockenmischdauer gewählt wurde, desto flüssiger wurde die Suspension.

Die Änderungen im rheologischen Verhalten wurde bereits bei recht kurzen Verlängerungen der Trockenmischdauer über die üblichen 90 Sekunden belegt.

Zudem wurden die 28-Tage-Biegezug- und die 28-Tage-Druckfestigkeiten gemessen. Es gab keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen den verlängerten Trockenmischdauern und einer Festigkeitsabnahme des Festbetons. Lediglich die Frühfestigkeitsentwicklung wird durch Verlängerung der Trockenmischzeit negativ beeinflusst.

Ob und welche asymptotische Viskositätswerte der geprüfte UHPC maximal annehmen kann, konnte anhand der Versuchsreihe nicht bestimmt werden. Dazu müssten ergänzend noch längere Trockenmischdauern ausgewertet werden. Dazu ist jedoch festzuhalten, dass eine weitere Verlängerung der Trockenmischdauer über die in der Arbeit betrachteten 480 Minuten keines Falls praxisorientiert ist, sondern lediglich zum besseren Verständnis des Werkstoffes dient.

Da die Versuchsauswertung wie gewünscht möglich war, gilt es auf die Arbeit aufzubauen. In weiteren Versuchsreihen ist es empfehlenswert die noch recht großen Sprünge der ausgewerteten Trockenmischdauern durch Wahl einer enger angelegten Versuchsreihe zu untersuchen.

Wie von Herrn Kirnbauer erfahren widmen zurzeit bereits drei weitere Studienkollegen ihrer Diplomarbeit der vorliegenden Thematik.

Einer der Kollegen knüpft direkt an der Versuchsdurchführung dieser Arbeit an. Sowohl die Wahl der Trockenmischdauern als auch das Prüfprofil im Viskomat und die Wahl des Mischaufsatzes werden zum Erhalt von statistischen Vergleichswerten ident gelassen. Lediglich die Herstellung der Premix erfolgt statt im Intensivmischer der Firma *Eirich*, im Ressourcen sparenden *Horbart* Mischer.

Die anderen zwei Kollegen, welche die Diplomarbeit gemeinsam verfassen, haben sich dazu entschieden statt zwei aneinander folgenden Messungen im Viskomat, eine einzelne jedoch unter längerer Messzeit durchzuführen. Innerhalb ihrer Arbeit wird ebenfalls der Einfluss der Premixalterung untersucht. Denn anders als üblich wurde die Versuchsreihe für meine Arbeit erst zwei Monate nach Herstellung des Premix durchgeführt. Durch Auswertung mehrere Prüfserien mit jeweils frisch hergestellten Premix und den noch aus meiner Arbeit vorhandene Premix, wollen die beiden herausfinden ob die lange Zeitspanne zwischen der Premix Herstellung und der Versuchsdurchführung einen Einfluss auf dessen rheologischen Eigenschaften hat. In der Arbeit wird zusätzlich die Partikelgrößenverteilung der Suspensionen analysiert.

Die vorliegende Arbeit legte gewissermaßen einen Grundstein für die weiteren Forschungen zu diesem Themengebiet. Von der Gerätebedienung des *Schleibinger* Viskomaten, der Wahl des für UHPC geeigneten Messaufsatzes bis hin zu Überlegung der chronologischen Versuchsdurchführung konnte anhand der Vor- und Hauptversuche dieser Arbeit viel für die nachfolgenden Versuchsdurchführungen gelernt werden. Nur durch weitere Versuche, Diplomarbeiten und/oder Dissertationen zu diesem Themengebiet können zur Frischbetonqualitätskontrolle die bis dato üblichen Frischbetonmessungen mit rheologischen Messungen im Viskomat ergänzt werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] V. W. GmbH, „Baustoffwissen,“ [Online]. Available: <http://www.baustoffwissen.de/wissen-baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe/beton/baustoff-beton-geschichte/>. [Zugriff am 26. 10. 2016].
- [2] D. Bosold und R. Pickhardt, „Beton,“ [Online]. Available: http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerklbl%C3%A4tter/A_Was_ist_Beton_2016.pdf. [Zugriff am 26. 10. 2016].
- [3] ÖNORM EN 197-1, Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, 2011.
- [4] ÖNORM EN 12390-5: Prüfung von Festbeton, Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, 2009.
- [5] ÖNORM 4710-1, Beton - Teil1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, 2007.
- [6] S. Röhling, „Betonbau, Band 2: Hydratation - junger Beton - Festbeton,“ Fraunhofer IRB Verlag, pp. 62,70,71.
- [7] P. Grübl, H. Weigler und K. Sieghart, „Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2.Auflage,“ Berlin, Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 2001, p. 304.
- [8] T. Teichmann, „Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Dissertation,“ Kassel University Press GmbH, 2007, p. 29.
- [9] ÖNORM 12350: Prüfung von Frischbeton, Teil 1 bis 12, 2009+2010.
- [10] J. Kirnbauer, Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete, Dissertation, TU Wien, 2013.
- [11] ONR 23303, Prüfverfahren Beton (PVB): Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, 2010.
- [12] ÖNORM EN 12390 Prüfung von Festbeton, 2012.
- [13] Bibliographisches Institut GmbH, „Duden,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.duden.de/rechtschreibung/homogen>. [Zugriff am 2017 01. 28.].
- [14] M. Stieß, „Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1, 3.Auflage,“ Springer, 2009, pp. 333-335.
- [15] S. Sylvio, „Möglichkeiten der Materialflußoptimierung an Betonmischanlagen, Dissatation, TU Brandenburg,“ 1999, p. 24.
- [16] Bauverlag BV GmbH, „Betonwerk und Fertigungstechnik International,“ 2016. [Online]. Available: http://www.bft-international.com/de/artikel/bft_2011-01_Eine_ganz_andere_Mischtechnik_1050200.html. [Zugriff am 14. 11. 2016].
- [17] W. Bohl, „Technische Strömungslehre, 7. überarbeitete Auflage,“ Vogel-Buchverlag Würzburg, 1986, p. 17.
- [18] CHEMIE.DE Information Service GmbH, „CHEMIE.DE,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/Van-der-Waals-Kr%C3%A4fte.html>. [Zugriff am 28. 01. 2017].
- [19] M. Koops, „Biologie-Lexikon,“ 2016. [Online]. Available: http://www.biologielexikon.de/lexikon/brownsche_molekularbewegung.php. [Zugriff am 15. 01. 2017].
- [20] Wikipedia, „rheologisches Modell,“ 2017. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Rheologisches_Modell. [Zugriff am 15. 01. 2017].

-
- [21] Wiley Information Services GmbH, „Chemgapedia,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/reaktionstechnik/viskositatet/viskositatet.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/reaktionstechnik/viskositatet/rheologie/rheologie2.vscml.html>. [Zugriff am 17. 01. 2017].
- [22] D. Adam, „Grundbau und Bodenmechanik, 2.Auflage, Kapitel 13. Tiefgründungen,“ TU Wien, 2010, p. 38.
- [23] C. Maul, „Technische Universität Braunschweig,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.pci.tu-bs.de/medien/viskosimetrie.pdf>. [Zugriff am 29. 01. 2017].
- [24] S. Gersing, „sgersing.de,“ 2004. [Online]. Available: <http://www.sgersing.de/pdf/SFT052.pdf>. [Zugriff am 28. 01. 2017].
- [25] Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH, „Schleibinger,“ [Online]. Available: http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:Viskomat_NT_-_Rheometer_f_Moertel_und_Leim. [Zugriff am 29. 01. 2017].
- [26] Teubert und Greim GmbH, „Handbuch: Schleibinger Viskomat NT und Viskomat XL, Kapittel 12. Rheologische Grundlagen,“ 2016, pp. 67-70.
- [27] D. Sarmiento, Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau, Dissertation, Bochum: Ruhr-Universität, 2011.
- [28] O. Mazanec, „Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen; Dissertation,“ Technische Universität München, 2013, pp. 84-88.
- [29] ÖNORM EN 12390-3 Prüfung von Festbeton, Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (konsolidierte Fassung), 2012.
- [30] H.-P. Wilke, R. Buhse und K. Groß, Mischer, Verfahrenstechnische Grundlagen und apparative Anwendungen, 1.Ausgabe, Essen: Vulkan-Verlag, 1991.
- [31] M. Kraume, Mischen und Rühren, Grundlagen und moderne Verfahren, Berlin: WILEY-VCH Verlag, 2003.
- [32] H. Sigloch, Technische Fluidmechanik, Sechste, neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [33] Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H., „Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie,“ [Online]. Available: http://www.zement.at/downloads/zement_broschuere_web.pdf. [Zugriff am 4. 12. 2016].
- [34] U. Schneider, WienerBaustofflehre Blätter, Frischbeton, Bd. 18. Auflage, TU Wien, 2009, p. 59.
- [35] Beton Akademie, Betontechnologie 1 (BT1), Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2013.
- [36] R. Weinekötter und H. Gericke, Mischen von Feststoffen, Prinzipien, Verfahren, Mischer, Springer, 1995.
- [37] M.-L. Toms, „Sachstandsbericht zu ultrahochfesten Betonen und Feuerbetonen unter besonderer Berücksichtigung der Festigkeitssteigerungen, Diplomarbeit,“ TU Wien, 2013, p. 18.
- [38] M. Beitzel, Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2014.
- [39] A. Stangl, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra-Hochleistungsbeton, Diplomarbeit, TU Wien, 2011.
- [40] C. Geisenhanslücke, Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen, Dissertation, Kassel University Press GmbH, 2008.

- [41] S. Röhling, H. Eifert und M. Jablinski, Betonbau, Band 1: Zusammensetzung - Dauerhaftigkeit - Frischbeton, Fraunhofer IRB Verlag, 2012.
- [42] T. Mezger, Das Rheologie Handbuch, für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern, 3. überarbeitete Auflage, Hannover: Vincentz Network GmbH und Co.KG, 2010.
- [43] M. Zogg, Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik, 3., überarbeitete Auflage, B.G. Teubner Stuttgart, 1993.
- [44] K. Safranek, Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone, Diplomarbeit, TU Wien, 2007.
- [45] S. Ratzinger, Rheologisches Verhalten von Zementleimen, Diplomarbeit, TU Wien, 2012, p. 23.
- [46] C. Heese, Simulation des rheologischen Verhaltens von zementgebundenen Feinkornsystemen, Dissertation, Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2013.
- [47] M. Greim, W. Kusterle und O. Teubert, Rheologische Messungen an Baustoffen 2017, Tagungsband zum 26. Workshop und Kolloquium, 21. u 22. Februaran der OTH Regensburg, tredition GmbH, 2017.
- [48] R. Vogel, „Schleibinger,“ [Online]. Available: http://www.schleibinger.com/cmsimple/?download=Eine_Messzelle_fuer_Spezialmoertel.pdf. [Zugriff am 15 Oktober 2017].
- [49] ÖNORM EN 197-1, Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, 2011.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: 5-Stoff-System	6
Abbildung 2-2: Ausgangsstoffe.....	6
Abbildung 2-3: genormte Zementbezeichnung.....	7
Abbildung 2-4: Festigkeitsentwicklung.....	8
Abbildung 2-5: Betontragverhalten	10
Abbildung 2-6: schematische Darstellung der optimalen Packungsdichte.....	16
Abbildung 2-7: Wandeffekt im Nachbarbereich größerer Gesteinskörnungen.....	16
Abbildung 2-8: Luftporentopf.....	17
Abbildung 2-9: Bestimmung des Verdichtungsmaßes	17
Abbildung 2-10: Prüfgeräte zur Bestimmung des Ausbreitmaßes	18
Abbildung 2-11: Mischmechanismen	21
Abbildung 2-12: mögliche Mischzustände	22
Abbildung 2-13: Intensivmischer R02 der Firma <i>EIRICH</i>	25
Abbildung 2-14: <i>Horbart</i> Mischer der TU Wien	25
Abbildung 2-15: strukturphysikalische Betrachtung am Beispiel des Werkstoffes Beton	27
Abbildung 2-16: Viskosität-Temperatur-Diagramm.....	28
Abbildung 2-17: Scherverformung.....	28
Abbildung 2-18: Geschwindigkeitisgefälle	29
Abbildung 2-19: Schergeschwindigkeit.....	29
Abbildung 2-20: Zusammenhänge bei newton`schem Fließverhalten.....	31
Abbildung 2-21: Zusammenhänge bei dilatantem Fließverhalten.....	31
Abbildung 2-22: Zusammenhänge bei pseudoplastischen Fließverhalten.....	32
Abbildung 2-23: Zusammenhänge für Bingham- und Casson-Körper.....	32
Abbildung 2-24: Zusammenhang bei thixotropen Fließverhalten (links: reversibel, rechts: irreversibel)	33

Abbildung 2-25: rheopexes Fließverhalten	34
Abbildung 2-26: Searle-Rotationsviskosimeter	35
Abbildung 2-27: Viskomat NT	36
Abbildung 2-28: Mörtelpaddel (links), modifiziertes Leimpaddel (Mitte) und Doppelringspalt-Messzelle (rechts).....	37
Abbildung 3-1: Scherwiderstand bei langer Versuchsdauer	40
Abbildung 3-2: Prüfprofil (Viskomat)	41
Abbildung 3-3: Drehmoment über Versuchsdauer.....	41
Abbildung 3-4: zeitlicher Verlauf der Belastung bzw. Entlastung.....	42
Abbildung 3-5: Auswertung Drehmoment über die Zeit.....	42
Abbildung 3-6: rampenförmiges Profil.....	43
Abbildung 3-7: Prüfprofil (Viskomat)	44
Abbildung 3-8: Scherspannung-Prüfzeit-Diagramm.....	44
Abbildung 3-9: Schergeschwindigkeit.....	45
Abbildung 3-10: Fließ- (links) und Viskositätsfunktion (rechts) verschiedener Stoffe.....	45
Abbildung 3-11: Viskositätsfunktion.....	46
Abbildung 3-12: gewähltes Messprofil	47
Abbildung 4-1: Intensivmischer	48
Abbildung 4-2: Viskomat mit Doppelringspalt-Messzelle	48
Abbildung 4-3: LP-Topf.....	49
Abbildung 4-4: Auslauftrichter.....	49
Abbildung 4-5: Ausbreitmaßgefäß	49
Abbildung 4-6: Prismenschalung	50
Abbildung 4-7: Biegezugprüfung.....	50
Abbildung 4-8: Druckfestigkeitsprüfung.....	50
Abbildung 4-9: Geometrie der Doppelringspalt-Messzelle	51
Abbildung 4-10: Scherratenprofil.....	52
Abbildung 4-11: Messprofil und Scherspannung (links) sowie Fließkurve (rechts)	54
Abbildung 4-12: Einstech-thermometer	55
Abbildung 4-13: Aufnahme Rheometer	55
Abbildung 4-14: Akkubohrer mit Mischwerkzeug.....	55
Abbildung 4-15: Rohdichte	57
Abbildung 4-16: Luftporengehalt.....	57
Abbildung 4-17: Trichterauslaufzeit.....	58
Abbildung 4-18: Ausbreitmaß.....	58
Abbildung 4-19: Gegenüberstellung Trichterauslaufzeit zu Ausbreitmaß.....	59
Abbildung 4-20: Gegenüberstellung der prozentuellen Trichterauslaufzeit und Ausbreitmaß	60
Abbildung 4-21: Biegezugfestigkeit.....	61
Abbildung 4-22: geblockte Darstellung der Biegezugfestigkeit	62
Abbildung 4-23: geblockte Darstellung der prozentuellen Biegezugfestigkeit	63
Abbildung 4-24: Druckfestigkeit	64
Abbildung 4-25: geblockte Darstellung der Druckfestigkeiten	65
Abbildung 4-26: geblockte Darstellung der prozentuellen Druckfestigkeiten	66
Abbildung 4-27: Scherspannung-Zeit-Diagramm für M90sek_1.Messung	67
Abbildung 4-28: Auswertung Messergebnisse.....	68
Abbildung 4-29: M90sek incl. Exponentialfunktionen.....	68
Abbildung 4-30: Fließkurve incl. Mittelwerte der Exponentialfunktionen für M90sek_1.Messung.....	69
Abbildung 4-31: Diagramm aller Trockenmischdauern der ersten Messung	72
Abbildung 4-32: Fließdiagramm aller Trockenmischdauern der ersten Messung	73
Abbildung 4-33: Diagramm aller Trockenmischdauern der zweiten Messung	75
Abbildung 4-34: Fließdiagramm aller Trockenmischdauern der zweiten Messung	76
Abbildung 4-35: Vergleich erste und zweite Mischung von M90sek	77
Abbildung 4-36: Vergleich erste und zweite Mischung von M240min.....	77

Abbildung 4-37: blockweise Darstellung der Viskositäten	78
Abbildung 4-38: prozentuelle Darstellung der Viskositäten	79
Abbildung 4-39: Gegenüberstellung: Viskositäten, Ausbreitmaß und Trichterauslaufzeit über die Trockenmischdauern.....	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bestandteile der Zementtypen.....	9
Tabelle 2-2: Porensysteme im Zementstein	14
Tabelle 2-3: Verdichtungsmaßklasse	18
Tabelle 2-4: Ausbreitmaßklassen.....	19
Tabelle 2-5: Korrelationen der Messdaten.....	37
Tabelle 4-1: gewählte Trockenmischdauern.....	48
Tabelle 4-2: Abmessungen und Parameter der Doppelringspalt-Messzelle	51
Tabelle 4-3: gewähltes Scherprofil	53
Tabelle 4-4: Aufstellung der Prüfserie	55
Tabelle 4-5: Aufstellung der Firschbeton Messwerte.....	56
Tabelle 4-6: Biegezugfestigkeiten	61
Tabelle 4-7: Auswertung der Druckfestigkeiten der rechten & linken Prismenhälfte	64
Tabelle 4-8: Druckfestigkeit	64
Tabelle 4-9: Aufstellung der Exponentialfunktionen gebildet aus τ -t-Diagramm	70
Tabelle 4-10: Aufstellung der Trendlinien gebildet aus τ - γ -Diagramm der 1en Messungen.....	71
Tabelle 4-11: Aufstellung der Trendlinien gebildet aus τ - γ -Diagramm der 2en Messungen.....	71

Formelverzeichnis

[2-1]	12
[2-2]	15
[2-3]	18
[2-4]	23
[2-5]	23
[2-6]	23
[2-7]	27
[2-8]	33
[2-9]	37
[3-1]	45
[4-1]	52
[4-2]	52
[4-3]	52
[4-4]	69