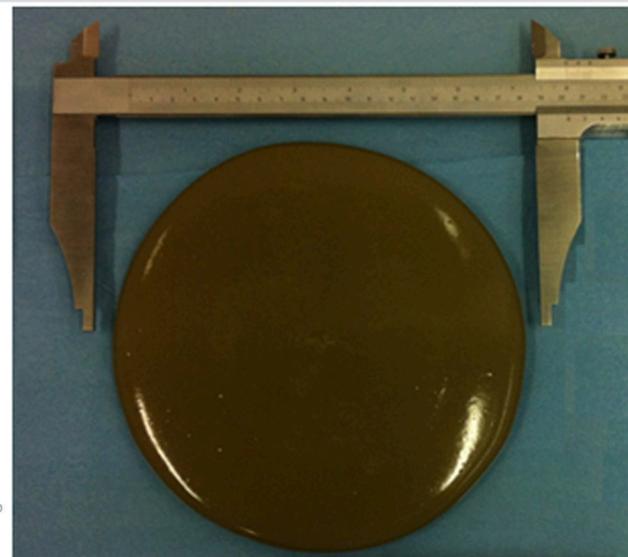
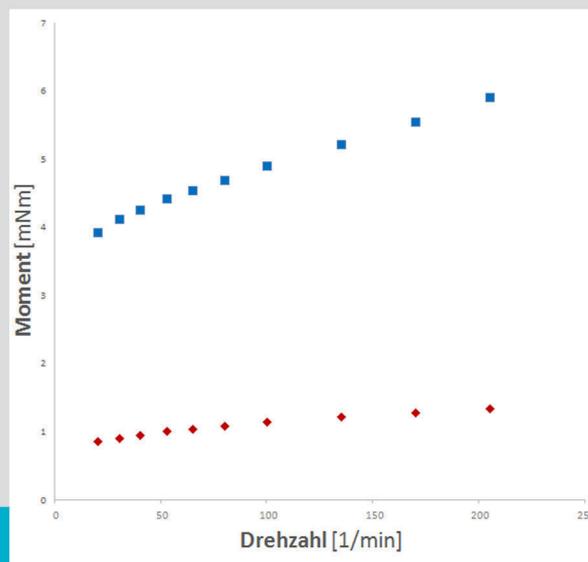


Die Wirkung unterschiedlicher Fließmittel auf die Fließfähigkeit von Wasser/Pulver Gemischen für Ressourcen-optimierten, nachhaltigen Beton



D-6-126/2014

Dženis Borovina, BSc

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie
mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung
Technische Universität Graz

... mojim voljenim roditeljima te porodici Borovina



Dženis Borovina, BSc

Die Wirkung unterschiedlicher Fließmittel auf die Fließfähigkeit von Wasser/Pulver-Gemischen für Ressourcen-optimierten, nachhaltigen Beton

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart
M.Sc. Claudia Nickel

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA

Graz, November 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, November 2014

.....

(Unterschrift)

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Joachim Juhart und Frau M.Sc. Claudia Nickel. Vor allem möchte ich mich für die äußerst nette Zusammenarbeit, sowie das angenehme Arbeitsklima bedanken. Ohne die tatkräftige Unterstützung, Betreuung und fachkundige Begutachtung wäre diese Diplomarbeit in der vorliegenden Form nicht zustande gekommen. Weiters bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dr.phil. Josef Tritthart für die anregenden Gespräche und die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Besonderer Dank gebührt meinen Vater Fehim und meiner Mutter Rabija, durch deren Hilfe mir mein Studium überhaupt ermöglicht wurde. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinem Bruder Dzenan sowie seiner Gattin Adela und meiner geliebten Amira, die mich alle während meiner gesamten Ausbildungszeit hindurch unterstützt haben.

Meine Familie war mir während meines ganzen Studiums immer ein moralischer Ansporn meine Ziele zu verwirklichen und nicht aufzugeben. Aus diesem Grund widme ich ihnen und meinen Großeltern, Munib und Raza diese Arbeit.

Zu guter Letzt möchte ich mich auch bei meinen Studienkollegen und Freunden für die Unterstützung und die schöne Zeit bedanken.

ZAHVALNICA

Ovim putem želim da se zahvalim svim osobama koje su tokom izrade mog Diplomskog rada bile uz mene.

Za akademsku podršku se prije svega zahvaljujem gospodinu Dipl. Ing. Dr. techn. Joachim Juhart i gospođi M.Sc. Claudia Nickel. Zahvaljujem se na prijatnoj suradnji i vrlo korektnoj i dobroj radnoj atmosferi. Bez njihove aktivne podrške i stručnih savjeta ovaj radi ne bi danas bio u ovakvom obliku, u kakvom jeste. Također se zahvaljujem i gospodinu Univ.-Prof. Dr.phil. Josef Tritthart za doprinos ovome radu.

Posebna zahvala pripada mojim roditeljima, ocu Fehimu i majci Rabiji, koji su mi omogućili školovanje.

Također se želim zahvaliti svom bratu Dženanu i njegovoj supruzi Adeli, te prije svega mojoj voljenoj Amiri, koji su me tokom mog školovanja podržavali i bili uz mene.

Moja porodica mi je tokom mog studija bila neizmjerne moralna podrška u ostvarenju mojih ciljeva i ustrajnosti na putu kojim sam krenuo. Iz tog razloga želim njima, a i svom djedu Munibu i nani Razi, posvetiti ovaj Rad.

Na kraju, želim se zahvaliti svojim kolegama i prijateljima na pomoći koju su mi pružili, te lijepo provedenom zajedničkom vremenu.

KURZFASSUNG

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit experimentellen Laboruntersuchungen zur Fließfähigkeit von Wasser/Pulver-Gemischen (Zemente und Gesteinsmehle unterschiedlicher Gesteinsarten und Feinheiten) für die Herstellung von Ressourcen optimiertem, nachhaltigem Beton. Dazu kamen zwei unterschiedliche Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) in verschiedenen Dosierungen zum Einsatz. Die Arbeit ist eine Fortsetzung der schon früher an einzelnen Stoffen getesteten Wirkung von Fließmitteln, durchgeführt mit erweiterten Methoden und Materialien. Ein Ziel der Arbeit war es herauszufinden, welcher systematische Zusammenhang zwischen Kennwerten der Fließfähigkeit und der Mischzusammensetzung (Art des Pulvers, Wassergehalt, Fließmitteltyp etc.) besteht. Die nötigen Experimente wurden zunächst in Anlehnung an das Verfahren von Okamura durchgeführt, wobei in einfacher Weise das Setzfließmaß bestimmt wird, worunter das Ausbreitmaß nach ÖN EN 196-1 „Prüfverfahren für Zement – Bestimmung der Festigkeit“ zu verstehen ist, jedoch ohne dass Verdichtungs-Stöße zur Anwendung kommen. Der Hauptteil der Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des Fließverhaltens solcher Wasser/Pulver-Mischungen mittels Rheometer, da damit keine Einzelpunkt-Eigenschaft erfasst wird (Okamura) sondern wesentlich weitergehende und daher aussagekräftigere Ergebnisse zu erwarten waren. Um eine vergleichbare, konstante Ausgangskonsistenz zu schaffen, wurde zunächst der Wasseranspruch jedes einzelnen Stoffes bestimmt und den weiteren Messungen ein entsprechendes Wasser/Pulver-Verhältnis für jeden Stoff zugrunde gelegt. Mittels Rheometer wurden sodann Fließkurven ermittelt und so Kennwerte wie die Fließgrenze und Viskosität der einzelnen Wasser/Pulver-Gemische in Abhängigkeit unterschiedlich hoher Fließmitteldosierungen bestimmt.

Dabei zeigte sich, dass die Wirkung der Fließmittel nicht nur stark von der Zementart, der Art des Gesteinsmehls (aus Kalkstein, Dolomit bzw. Quarz) und der Feinheit der Pulver abhängt, sondern dass sie - überraschenderweise - auch von der Zusammensetzung des Anmachwassers beeinflusst wird. Generell wirkten die untersuchten Fließmittel auf Gesteinsmehle stärker verflüssigend als auf Zemente. Mit zunehmender Feinheit steigt der Fließmittlebedarf allerdings stoffspezifisch. Auf ein besonders feines Gesteinsmehl und ein zusätzlich untersuchtes Mikrosilika wirken die Fließmittel sogar so, dass die Fließgrenze erhöht wird und sich Agglomerate bilden können. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich die Rheologie von Zementleimen im Gegensatz zu Gesteinsmehl/Wasser-Mischungen zufolge Hydratation des Zementes und weiterer Einflussfaktoren von jener der inerten Stoffe (Gesteinsmehle) unterscheidet, insbesondere sich zeitlich verändert. Anhand der gewonnenen Daten konnte zudem gezeigt werden, welche Korrelation zwischen Setzfließmaß und Fließgrenze (Rheometer) besteht.

Hinsichtlich der praktischen Verwertbarkeit der Ergebnisse und aufbauender Arbeiten ist zu sagen, dass die erhaltenen Erkenntnisse hilfreich sein können, um die Zusammensetzung von Ressourcen optimiertem, nachhaltigem Beton, der in großem Ausmaß inerte Gesteinsmehle unterschiedlicher Feinheit als Zementergänzungsstoffe enthält, zu optimieren.

ABSTRACT

This master thesis deals with experimental laboratory tests regarding the flowability of water/powder mixtures (cement and stone powders of different rock types and fineness) for the production of resource optimized, sustainable concrete. For this purpose two different superplasticisers based on polycarboxylate ether (PCE) at different dosages were used. The work is a continuation of previous tests of the flowability, but carried out with advanced methods and materials. One aim of the presented thesis was to find conclusive and systematic relationships between parameters of the flowability and the composition of the mixtures (type of powder, water contained, type of superplasticiser etc.). First experiments were carried out according to the method of Okamura, which means that a spread flow test was carried out according to ÖN EN 196-1 "Methods of testing cement - Determination of strength" but without applying compaction. The main part of the thesis deals with the investigation of the flow behavior of such water/powder mixtures by means of a rheometer, since not only a single-point property is detected (Okamura) but much more comprehensive and therefore meaningful results can be expected. To provide for a comparable, constant starting consistency, at first the water demand of each powder had to be determined. With the corresponding water/powder ratio of each powder measurements were carried out subsequently. Using the rheometer, flow curves were generated and thus characteristics such as yield point and viscosity of the individual water/powder mixtures were determined depending on different levels of superplasticiser dosages.

It was found that the flowability not only strongly depends on the type of cement, the kind of stone powder (limestone, dolomite, quartz respectively) and the fineness of the powder, but is - surprisingly - also influenced by the composition of the mixing water. In general the liquefying effect of the applied superplasticisers was stronger on stone powder than on cement. With increasing fineness, however, the demand of superplasticisers raises depending on the powder type. In particular the applied superplasticisers on a very fine stone powder and microsilica in a way that causes an increase of the yield strength and causes agglomeration. It should also be noted that the rheology of cement pastes differs from that of inert stone powder/water mixtures due to hydration of cement and additional factors, in particular regarding the effect of time. With the data collected the correlation between slump flow and yield strength (flow limit by rheometer) would be shown.

Regarding practical usefulness and subsequent studies the results of the outlined work can be helpful to optimize the composition of resource efficient, sustainable concrete because this type of concrete consists of a high amount of inert stone powders of different fineness to partly substitute Portland cement clinker.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund der Diplomarbeit	1
1.2	Motivation und Zielsetzung	4
1.3	Strukturierung der Arbeit.....	6
2	Stand der Technik und Wissenschaft	7
2.1	Fließmittel	7
2.1.1	Typen von Fließmitteln	8
2.1.2	Technologische Eigenschaften von PCE- Fließmitteln	9
2.2	Methodenevaluierung	12
2.2.1	Setzfließmaß-Bestimmung nach Okamura.....	12
2.2.2	Methodik Rheometer	17
2.2.2.1	Grundlegende Parameter.....	17
2.2.2.2	Dissertation HAIST	20
2.2.2.3	Dissertation LOWKE.....	27
2.2.2.4	Dissertation SCHACHINGER.....	32
2.2.2.5	Dissertation SCHMIDT	34
2.2.2.6	Untersuchungsmethode nach TRITTHART	40
2.2.2.7	Rheologie von Zementleimen, Mörtel und Frischbeton nach Wallevik	41
2.3	Schlussfolgerungen aus der Literaturlauswertung für die eigene Arbeit	43
3	Methodik und Materialcharakterisierung	45
3.1	Materialien und Ausgangswassergehalt.....	45
3.2	Setzfließmaß-Versuche nach mod. Okamura Verfahren	47
3.2.1	Allgemeines.....	47
3.2.2	Versuchsdurchführung und Erkenntnisse für die rheologischen Untersuchungen.....	48
3.3	Rheometer „Physica MCR 300“	53
3.3.1	Vorversuche	54
3.3.2	Ergebnisse	58
3.3.3	Erkenntnisse für die rheologischen Hauptuntersuchungen.....	63
3.4	Rheologische Untersuchungen	64
3.4.1	Allgemeines.....	64
3.4.2	Wasseranspruch, Ausgangskonsistenz und Lösungsschemie	64
3.4.3	Fließmitteldosierung.....	65
4	Ergebnisse	66
4.1	Pulverförmige Stoffe mit konstanter Ausgangskonsistenz.....	67
4.1.1.1	Ergebnisse aus den Messungen der einzelnen Stoffe	67
4.2	Pulverförmige Stoffe mit nicht konstanten Wasserbedarf.....	74
4.3	Vergleich aller Gemische	79
4.4	Substitution des destillierten Anmachwassers durch eine Porenlösung	84
4.5	Sättigungsdosierung.....	88
5	Diskussion	89
5.1	Korrelation modifiziertes Okamura-Verfahren mit rheologischen Kennwerten 89	89
5.2	Einfluss von FM auf die Viskosität und Fließgrenze	92
6	Schlussfolgerungen	94

7	Ausblick	96
8	Anhang	97
9	Literaturverzeichnis	108

Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1	Anteile der einzelnen Stoffe am Treibhauspotenzial am Beispiel von Normalbeton C25/30.....	1
Bild 1-2	Anteile der CO ₂ Emissionen bei der Zementherstellung.....	2
Bild 1-3	Möglichkeiten für Normalbetone die eine geringere umweltbelastende Wirkung aufweisen	3
Bild 1-4	durch die Optimierung der Packungsdichte und Einsatz von Fließmitteln wird der Wasseranspruch und Wasserfilmdicke der Körner reduziert	4
Bild 1-5	Schema über die zur Anwendung kommenden Methoden in dieser Arbeit.....	5
Bild 2-1	Zementagglomeration unter Einschluss von Wasser ¹³	7
Bild 2-2	Zementkorndispersion unter Freiwerden von Wasser (rechts)	8
Bild 2-3	Darstellung elektrostatischer Abstoßung (links) und sterischer Abstoßung (rechts).....	9
Bild 2-4	Die Form der Kettenglieder ist von der Stärke der Oberflächenladung abhängig.....	10
Bild 2-5	PCE Fließmittel mit hohe Ladungsdichte (links) und PCE Fließmittel mit niedriger Ladungsdichte (rechts). Das Phänomen der Überwachung durch Hydratationsprodukte	11
Bild 2-6	Einfluss von Wasser- und FM-Zugabe auf Fließgrenze und Viskosität	11
Bild 2-7	Konus zur Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und Trichter zur Ermittlung der Auslaufgeschwindigkeit (rechts).....	13
Bild 2-8	Zeigt die Auswirkung von FM auf das relative Setzfließmaß und Fließgeschwindigkeit	14
Bild 2-9	Darstellung der Abhängigkeit des relativen Setzfließmaßes und Fließzeit von der FM-Dosierung SP/P und V_w/V_p	14
Bild 2-10	schematische Auswertung mehrerer Versuchsreihen nach der Okamura Methode zur Ermittlung des β_p – Wertes	15
Bild 2-11	Vergleich zwischen Hägermann-Konus, links und VICAT-Ring, rechts	16
Bild 2-12	Fließkurven verschiedener Fluide γ	18
Bild 2-13	Viskosität als Funktion der Scherrate.....	19
Bild 2-14	Viskosität als Funktion der Zeit t	19
Bild 2-15	Untersuchungsprogramm Haist; vor allem in Abschnitt IV wird der Einfluss von der Dosierung der Fließmittel untersucht	20
Bild 2-16	Kennwerte der untersuchten FM	20
Bild 2-17	Versuchsablauf am Rheometer <i>Haake Mars</i> bei FM-Zugabe	21
Bild 2-18	Mischablauf für Mörtelmischer	22
Bild 2-19	Ergebnisse der Untersuchung eines Zementleims, ermittelt anhand eines Amplitudensweepversuchs.....	22
Bild 2-20	Fließkurve einer Zementleimprobe und Darstellung einer Regressionsfunktion	23
Bild 2-21	Fließkurve von Zementleimproben mit verschiedenen Regressionsfunktionen	24
Bild 2-22	Schubmodul einer Zementleimprobe in Abhängigkeit von der Schubspannung, ermittelt anhand eines Amplitudensweepversuchs	25
Bild 2-23	Schubmodul einer Zementleimprobe in Abhängigkeit von der Messfrequenz, ermittelt anhand eines Frequenzsweepversuchs	25
Bild 2-24	Fließkurven verschiedener Zementleimproben in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit, ermittelt bei hoher Scherbelastung	26
Bild 2-25	Auswirkung der FM-Dosierung auf die Viskosität.....	26
Bild 2-26	Untersuchungsprogramm nach Lowke	27
Bild 2-27	Versuchsablauf zur Bestimmung der statischen Fließgrenze und Darstellung der Ergebnisse anhand des dazugehörigen Spannungsverlaufs... ..	28
Bild 2-28	Verringerung der Viskosität und Fließgrenze (Thixotropie) bei zunehmender Schergeschwindigkeit (Zerstörung der Mikrostruktur)	29
Bild 2-29	Scherspannungsverlauf bei konstanter Scherbelastung	30
Bild 2-30	Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß (Hägermann-Trichter) und Fließgrenze.....	30
Bild 2-31	Ermittlung der Fließgrenze anhand mehrerer konstanter Messvorgänge. Die statische Fließgrenze (schwarze Linie in Abbildung) liegt oberhalb der dynamischen Fließgrenze (graue Linie in Abbildung).	31
Bild 2-32	Geschwindigkeitsprofil für die Messung der Fließkurve von UHFB	32

Bild 2-33	LINKS – Schermomentenverlauf (Scherbspannungsverlauf), RECHTS – Fließkurve einer Zementleimprobe	33
Bild 2-34	Ablaufplan des Mischvorgangs	34
Bild 2-35	Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der FM-Dosierung	35
Bild 2-36	Rampenverlauf des Mess-Geschwindigkeitsprofils.....	35
Bild 2-37	Umrechnungsfaktoren für Fließschubspannung τ und Viskosität η	37
Bild 2-38	Ausbreitmaß und G-Yield einer SCC-Mischung in Abhängigkeit von der Zeit	37
Bild 2-39	Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und G-Yield (Schubspannung τ) bzw. V-Funnel [Fließgeschwindigkeit] und H-Viscosity (Viskosität η)	37
Bild 2-40	G-Yield verschiedener Ladungsdichten; Fließmittel und niedriger (LC), mittlerer (MC) und höher (HC) Ladungsdichte	38
Bild 2-41	Auswertung einer Fließkurve	38
Bild 2-42	Darstellung der Auswirkung einer Wasser und FM Zugabe auf die Rheologie eines Wasser/Pulver-Gemisches	41
Bild 2-43	Die unterschiedlichen Auswirkungen einer FM-Zugabe auf Leim, Mörtel und Frischbeton.....	41
Bild 2-44	Fließkurven eines Zementleims bei unterschiedlichen Scherraten	42
Bild 2-45	Modell nach Bingham zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens einer Suspension anhand einer Fließkurve	43
Bild 3-1	Ermittlung des Setzfließmaßes mittels Hägermann-Konus	48
Bild 3-2	Hobart Mischer	49
Bild 3-3	Auswertung der modifizierten Okamura Versuche zur Bestimmung der Dosierungsmenge für die Untersuchungen am Rheometer. (Fließmittel 144 oben; Fließmittel 108 unten)	52
Bild 3-4	Rotationsrheometer Physica MCR 300	53
Bild 3-5	Rührer für das Rheometer	56
Bild 3-6	Handrührer zum Mischen der Ausgangsstoffe	56
Bild 3-7	Messbehälter für das Rheometer (links) und Mischbehälter für Handrührer (rechts)	58
Bild 3-8	Randausbildung der Suspension im Rheometer-Messbehälter durch Helix- Rührer	59
Bild 3-9	Messablauf nach Schmidt.....	60
Bild 3-10	modifizierter Messablauf nach Schmidt	60
Bild 3-11	Messablauf nach Schachinger	61
Bild 3-12	Stufenverlauf einer Messung am Rheometer.....	62
Bild 3-13	Bereich der in die Auswertung einer Fließkurve herangezogen wird.....	62
Bild 3-14	Bereich mit linearem Fließverhalten ist für die Auswertung der Untersuchungen heranzuziehen.....	63
Bild 4-1	allgemeine Darstellung einer Fließkurve.....	66
Bild 4-2	Darstellung einer Fließkurve für die Auswertung der rheologischen Untersuchungen in dieser Arbeit	66
Bild 4-3	Ermittlung des Setzfließmaßes mit VICAT-Ring.....	67
Bild 4-4	Fließkurven der Wasser/Pulver-Gemische mit konstantem Wasserbedarf und einem Setzfließmaß von 130 mm	68
Bild 4-5	Fließkurven von Zement 67-1006 und FM 144.....	69
Bild 4-6	Fließkurven von Zement 67-1006 und FM 108.....	69
Bild 4-7	Fließkurven von Zement 102 und FM 144.....	70
Bild 4-8	Fließkurven von Zement 102 und FM 108.....	70
Bild 4-9	Fließkurven von Kalksteinmehl 159 und FM 144	71
Bild 4-10	Fließkurven von Kalksteinmehl 159 und FM 108	71
Bild 4-11	Fließkurven von Dolomitmehl 101 und FM 144	72
Bild 4-12	Fließkurven von Dolomitmehl 101 und FM 108	72
Bild 4-13	Fließkurven von Dolomitmehl 31-19 und FM 144.....	73
Bild 4-14	Fließkurven von Dolomitmehl 31-19 und FM 108.....	73
Bild 4-15	Fließkurve von Kalksteinmehl 179 bei Wasseranspruch und FM- Zugabe	74
Bild 4-16	Fließkurve von Quarzmehl 175 bei Wasseranspruch und FM- Zugabe	75
Bild 4-17	Fließkurve von Quarzmehl 9-10 bei Wasseranspruch und FM- Zugabe	76
Bild 4-18	Agglomeration bei FM-Zugabe im Hobart Mischer.....	76
Bild 4-19	Rückgang des Setzfließmaßes infolge FM-Dosierung	77
Bild 4-20	Fließkurve von Mikrosilika bei Wasseranspruch und FM- Zugabe.....	77
Bild 4-21	Ausschnitt der Fließkurve von Mikrosilika. Erhöhung des Moments bei geringer Belastung (144_M1V2-FM 0,05%)	78

Bild 4-22	normierte Auswertung für die Änderung der Fließgrenze in Abhängigkeit der Dosierung der einzelnen pulverförmigen Stoffe.....	79
Bild 4-23	Auswertung der Messdaten für die Änderung der relativen Fließgrenze in Abhängigkeit der Dosierung der einzelnen pulverförmigen Stoffe	80
Bild 4-24	Auswertung für die Änderung der relativen Viskosität in Abhängigkeit der Dosierung der einzelnen pulverförmigen Stoffe.....	83
Bild 4-25	stichprobenartige Untersuchungen des Effekts zweier Probenlösungen bei Kalksteinmehl 4-16	86
Bild 4-26	stichprobenartige Untersuchungen des Effekts einer Probenlösung bei Dolomitsteinmehl 31-19.....	87
Bild 4-27	Fließkurve von Zement 102 bei reinem Wasseranspruch und hoher FM Zugabe (FM 144)	88
Bild 4-28	zweite FM-Zugabe (FM 144); im rechten Bild sind Blutungserscheinungen erkennbar.....	88
Bild 5-1	Korrelation relative Fließgrenze – Mörtelkonus.....	89
Bild 5-2	Korrelation relative Fließgrenze – Mörtelkonus.....	90
Bild 5-3	Korrelation Hägermann Konus und VICAT-Ring.....	90
Bild 5-4	Rheograph für FM 144 und FM 108 bei FM Dosierungen von 0-0,1%	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Wirkstoffe von Fließmitteln und deren Wirkungsweise	8
Tabelle 2-2	Versuchsablauf nach Lowke	28
Tabelle 2-3	Versuchsablauf nach Schmidt	36
Tabelle 2-4	Versuchsablauf nach Tritthart	40
Tabelle 3-1	Eigenschaften der pulverförmigen Stoffe	45
Tabelle 3-2	physikalische Kennwerte der Fließmittel	47
Tabelle 3-3	Ablaufplan für Zement	50
Tabelle 3-4	Ablaufplan für Gesteinsmehle	50
Tabelle 3-5	alle Stoffe aus modifizierten Okamura Versuchen	51
Tabelle 3-6	Versuchsablauf nach Schachinger	54
Tabelle 3-7	Versuchsablauf nach Schmidt	54
Tabelle 3-8	modifizierter Versuchsablauf nach Schmidt	54
Tabelle 3-9	Ablauf ohne FM-Zugabe	55
Tabelle 3-10	Ablauf mit FM-Zugabe	55
Tabelle 3-11	Messablauf für Hauptuntersuchungen	61
Tabelle 3-12	Indizes für die Hauptversuche am Rheometer	64
Tabelle 4-1	Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen für Zement 67-1006 und Zement 102	81
Tabelle 4-2	Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen für Kalksteinmehl 159... ..	82
Tabelle 4-3	Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen für Dolomitsteinmehl 101 und Dolomitsteinmehl 31-19	82
Tabelle 4-4	Zusammensetzung der synthetisierten Porenlösung V2	84

Abkürzungsverzeichnis

TVFA	Technische Versuchs- und Forschungsanstalt
CO₂	Kohlenstoffdioxid
VÖZ	Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie
CaCO₃	Kalk
CaO	Calciumoxid
FM	Fließmittel
PCE	Polycarboxylatether
V_w	Volumen-Wasser
V_p	Volumen-Pulver
Γ_m	relatives Setzfließmaß
R_m	Fließzeit
n_w	Wassergefüllter Porenanteil bzw. Wasseranspruch
S_{p/P}	Fließmitteldosierung bezogen auf Pulvermenge
β_P	Wasserrückhaltemaß; Wasser/Feststoff-Volumenverhältnis für eine Sättigung nach Okamura
E_p	Deformationsfaktor; Maß für Wasserempfindlichkeit eines Stoffes
τ	Schub- bzw. Scherspannung
η	Viskosität
γ[·]	Schergeschwindigkeit
τ_o	Fließgrenze
τ_{0D}	dynamische Fließgrenze
τ_{0S}	statische Fließgrenze
τ_m	maximale Schub- bzw. Scherspannung vor Strukturbruch
UHFB	Ultrahochfester Beton
SVB	Selbstverdichtender Beton
MEV	Misch Energie Verfahren
V_{ws}/V_p	volumetrisches Verhältnis des Wasseranspruches am Sättigungspunkt
n_w	Verhältnis des V-Wassergehaltes zum Gesamtvolumen
DB	Doppelbestimmung
m_p/m_p	Fließmitteldosierung (Wirkstoff ohne Wasser) bezogen auf Pulvermenge
M	Schermoment entspricht relativer Scherspannung
n	Drehzahl entspricht relativer Schergeschwindigkeit
M₀	relative Fließgrenze
rel. η	relative Viskosität

1 Einleitung

1.1 Hintergrund der Diplomarbeit

Die Arbeitsgruppe BetontechPlus des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA (Technische Versuchs- und Forschungsanstalt) für Festigkeits- und Materialprüfung der TU Graz befasst sich mit der Entwicklung von Ressourcen optimiertem, nachhaltigem Beton. Es werden Ökobetone für die Fertigteil- und Transportbetonindustrie entwickelt und auf ihre gleichwertige Leistung gegenüber einem Beton nach Norm untersucht. Dabei kommt der Verarbeitbarkeit (hohe Fließfähigkeit) und der Konsistenzhaltung (Fließfähigkeit mit der Zeit) der Frischbetone eine große Bedeutung zu. Durch den Einsatz von Fließmitteln können diese Eigenschaften positiv beeinflusst werden. Zusätzlich wird bei den zukünftigen „Ökobetonen“ der Wassergehalt reduziert, was den Einsatz von Fließmittel unumgänglich macht, um eine dem Normalbeton vergleichbare Verarbeitbarkeit zu erhalten.

Diese Diplomarbeit liefert einen Beitrag zur Untersuchung von Fließmitteln, um diese dann optimal bei der Entwicklung von Ökobetonen einsetzen zu können. Aufbauend auf einem Bachelor¹- und Masterprojekt², in welchen Voruntersuchungen zur Fließfähigkeit an Zementen und inerten Zusatzstoffen (Gesteinsmehlen) für Ressourcen-optimierten Beton mittels Messungen des Setzfließmaßes durchgeführt wurden, wurden weitere Untersuchungen zum Fließverhalten von Wasser/Pulver-Gemischen im Rahmen dieser Arbeit gemacht. Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt dabei auf die Untersuchungen von einzelnen Stoffen in Kombination mit Fließmitteln am Rheometer.

Die Zementindustrie ist gemäß Nachhaltigkeitsbericht der VÖZ (Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie) größtenteils aufgrund der Klinkerherstellung, für 5% des jährlichen CO₂-Ausstoßes verantwortlich³. Wenn der CO₂-Ausstoß in Zukunft nicht reduziert wird, wird die globale Erderwärmung weiterhin zunehmen und damit das Treibhauspotential (GWP- Global Warming Potential) und für weitreichende, negative Veränderungen sorgen.⁴ Um dies zu verhindern ist es notwendig die Umwelt schädigenden Emissionen zu reduzieren.

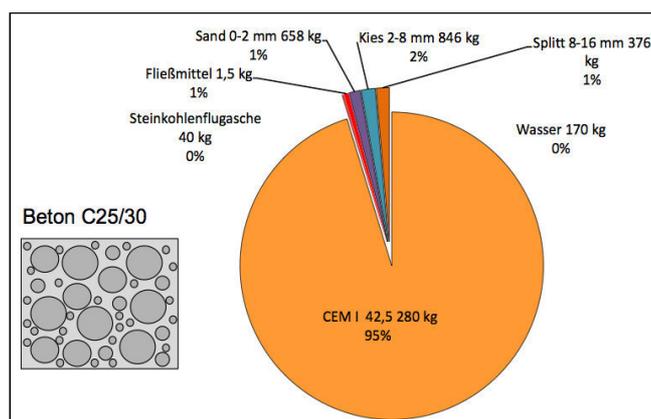


Bild 1-1 Anteile der einzelnen Stoffe am Treibhauspotential am Beispiel von Normalbeton C25/30⁵

¹ Schönauer. 2014: Die Wirkung von Fließmittel (PCEs) auf das Fließvermögen von Stoffgemischen für Ressourcen-effizienten Beton und deren zeitliche Abh.

² Maier. 2014: Untersuchungen zur Wirkung von PCE-Fließmitteln auf stoffe für Ressourcen optimierten Beton.

³ VÖZ. 2010: Nachhaltigkeitsbericht

⁴ IPCC. 2014: Climate Change

⁵ Proske, Graubner und Hainer. 2012: Ökobetone zur Herstellung von Fertigbetonbauteilen, Folie 14

Bild 1-1 gibt eine Auskunft über die Höhe des CO₂-Ausstoßes der einzelnen Bestandteile bei einem Normalbeton. Es ist zu erkennen, dass das Treibhauspotenzial von Normalbetonen aufgrund des großen Zementanteils relativ hoch ist. Für die Zementklinkerherstellung wird Kalk (CaCO₃) gemeinsam mit Ton, Mengel und weiteren Stoffen gebrannt und infolge des Brennvorgangs entweicht das die Atmosphäre belastende Kohlendioxid (CO₂) in großen Massen in die Luft. Die Reaktion bei diesem Prozess ist in folgender Gleichung dargestellt:



In der nachfolgenden Abbildung sind die Anteile der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung angeführt. Bei der Produktion von Zement emittieren demnach 95 % CO₂ rohstoffbedingt aus dem Brennvorgang des Kalksteins und herstellungsbedingt durch elektrischen und thermischen Energieverbrauch .

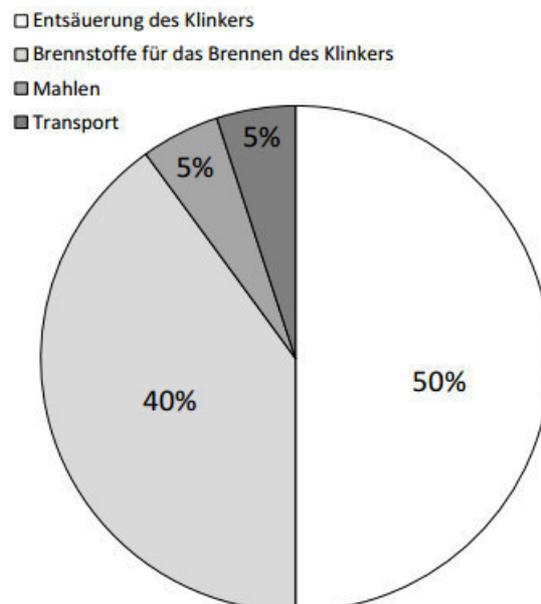


Bild 1-2 Anteile der CO₂ Emissionen bei der Zementherstellung⁶

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das Treibhauspotenzial von Normalbeton bzw. Zement zu reduzieren. Dabei sind folgende Aspekte zu betrachten:⁷

- die nicht erneuerbarer Primärenergie in der Zementproduktion muss verringert werden,
- die Reduktion des Klinkeranteils im Zement durch Erzeugung von Zementen mit reduziertem Klinker/Zement-Faktor,
- der Einsatz von hydraulischen Ersatzbindemittel für Zement,
- die Optimierung der Packungsdichte verbunden mit der Substitution des Zementes durch andere Stoffe.

⁶ Proske, Graubner und Hainer. 2012: Ökobeton zur Herstellung von Fertigbetonbauteilen, Folie 15

⁷ Juhart und Tritthart. 2012: Betontechnologische Methoden zur Klinkerreduktion im Beton, S.1 ff

Im nachfolgenden Bild 1-3 sind die verschiedenen Möglichkeiten nach Proske⁸ schematisch dargestellt, anhand welcher ein Beton mit einer die Umwelt geringer belastenden Wirkung hergestellt werden kann. Es gibt sowohl Herstellungsbedingte-, als auch betontechnologische Aspekte. Die Baukonstruktion bzw. der Bauprozess sind letzten Endes ebenso von großer Bedeutung und nicht außer Acht zu lassen.



Bild 1-3 Möglichkeiten für Normalbetone die eine geringere umweltbelastende Wirkung aufweisen⁸

Die Forschung der Arbeitsgruppe BetontechPlus am Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz beschäftigt sich zurzeit vorwiegend mit der Reduktion des Gehaltes vom Zementklinker im Normalbeton. Die Erhöhung der Packungsdichte des Gemisches aller granularen Ausgangsstoffe einer Betonzusammensetzung und die Substitution des Zementklinkers durch Stoffe mit einer weniger, umweltbelastenden Wirkung stehen dabei im Vordergrund. Bei der Optimierung der Betonzusammensetzung von Zement, Wasser, Gesteinskörnungen und Zusatzstoffen ist der Einsatz von Fließmitteln (FM) ein wesentlicher Bestandteil hinsichtlich der Gewährleistung einer gleichbleibenden Verarbeitbarkeit des Ökobetons. Ein positiver Effekt ist, dass durch den Einsatz von Fließmitteln der Wasseranspruch gesenkt werden kann. Bei der Optimierung der Packungsdichte sinkt der Wasseranspruch eines Gemisches zu dem infolge der physikalischen Füllerwirkung der zugegebenen Zusatzstoffe und es ist somit möglich bei etwa gleich bleibendem Wasser/Bindemittel-Wert den Zementgehalt der Mischzusammensetzung zu reduzieren und Zement durch inerte Zusatzstoffe teilweise zu ersetzen.⁹ Es ist festzuhalten, dass die maximale Reduktion des Wasser- und Zementklinkergehaltes nur durch den Einsatz von Fließmitteln möglich ist. In Bild 1-4 sind die Prinzipien der Wasserreduktion symbolisch dargestellt.¹⁰

⁸ Proske, Graubner und Hainer. 2012: Ökobetone zur Herstellung von Fertigbetonbauteilen, Folie 16

⁹ Juhart. 2014: Ökologisch optimierter Beton: Stoffauswahl und Methoden der Rezepturentwicklung

¹⁰ Juhart und Tritthart. 2012: Betontechnologische Methoden zur Klinkerreduktion im Beton, S.1 f

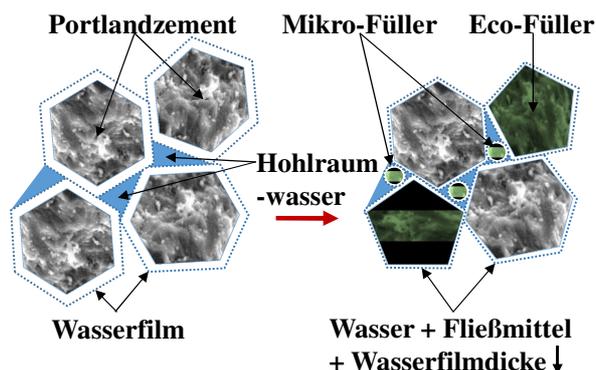


Bild 1-4 durch die Optimierung der Packungsdichte und Einsatz von Fließmitteln wird der Wasseranspruch und Wasserfilmdicke der Körner reduziert⁹

1.2 Motivation und Zielsetzung

Thema dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung der Interaktion verschiedener Fließmittel mit Zement- und Zementergänzungstoffen (siehe Schema in Bild 1-5).

Bei der Entwicklung der Ökobetone für die Fertigteil- und Transportbetonindustrie werden am Institut verschiedene Fließmittel eingesetzt, um die unterschiedlichen Zielsetzungen – zum einen eine hohe Verflüssigungswirkung und zum anderen eine lange Konsistenzhaltung – erreichen zu können. Für die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit kommen zwei Typen von Fließmitteln zur Anwendung. Es handelt sich dabei um ein Fließmittel mit hoher und eines mit niedriger Ladungsdichte, die nach der Methode von Schmidt¹¹ definiert wurden, wie später noch näher erläutert wird (siehe Kapitel 2.1.2). Aufgrund dessen Eigenschaften eignet sich ein Fließmittel mit hoher Ladungsdichte für die Fertigteilbetonindustrie und ein Fließmittel mit geringer Ladungsdichte für die Transportbetonindustrie. Die Hintergründe zu den unterschiedlichen Ladungsdichten mit Wirkungsmechanismen werden im weiteren Verlauf dieser Diplomarbeit näher erläutert.

Für die experimentellen Untersuchungen in dieser Diplomarbeit werden Wasser/Pulver-Gemische mit Korngrößen unter 125 μm (Mehlkorn) eingesetzt. Die zu untersuchenden pulverförmigen Stoffe sind Zement und Zementergänzungstoffe. Bei den Zementergänzungstoffen handelt es sich um verschiedene Gesteinsmehle. Es wird pro Gesteinstyp ein Vertreter eines sehr feinen (mittlerer Durchmesser $d_{50} < 5 \mu\text{m}$) und eines etwa zementfeinen (mittlerer Durchmesser $d_{50} > 5 \mu\text{m}$) Mehles untersucht.

Ziel ist es, eine geeignete Methode am Rheometer des Instituts zu finden, anhand welcher es möglich ist, die Fließmittelwirkung auf die Wasser/Pulver-Gemische zu untersuchen. Hierfür wird im ersten Schritt eine Literaturstudie durchgeführt, um den Stand der Technik erfassen zu können. Dieser aktuelle Stand soll bei der Erarbeitung eines Versuchsablaufs für die Methode am Rheometer eine Grundlage bilden und die Hintergründe der rheologischen Kenngrößen definieren. Der Versuchsablauf wird in Voruntersuchungen variiert, um eine qualitative Aussage über die Eignung treffen zu können (Bild 1-5, rote Markierung).

Weiteres werden im Vorfeld Versuche zur Klärung der Fließmittelwirkung auf die einzelnen Stoffe getätigt. Die Versuche werden nach einer Methode analog zur Vorgangsweise von Okamura¹² durchgeführt. Das bedeutet, dass das Setzfließmaß, von einem hergestellten

¹¹ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement.

¹² Okamura. 1998: A Rational Mix- Design Method for Mortar in Self-Compacting Concrete., S. 1307-1312.

Wasser/Pulver-Gemisch, auf trockener Glasplatte ohne Verdichtungsschläge geprüft wird (Bild 1-5, blaue Markierung).

Die Hauptfrage der Arbeit bezieht sich auf die Untersuchung der Interaktion der pulverförmigen Stoffe in Wasser/Pulver-Gemischen mit sehr niedrigen Wassergehalt und den verschiedenen FM.

Die allgemeine Wirkung von Fließmittel ist bereits bekannt und wird in Kapitel 2 näher erläutert. Es ist davon auszugehen, dass FM auf Zemente und die unterschiedlichen Gesteinsmehle eine unterschiedliche Wirkung aufweisen. Daher ist es für die Rezeptentwicklung der Ökobetone wichtig, die Wirkung der einzelnen Fließmittel auf die unterschiedlichen feinen, pulverförmigen Stoffe zu kennen. Es ist zu klären, wie der Einfluss der Fließmittel auf das rheologische Verhalten der Stoffe in Suspension ist. Anhand der Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen soll die Fließmittelwirkung auf die einzelnen pulverförmigen Stoffe verglichen werden können.

Außerdem ist zu klären, ob es bezüglich der Dosierungsmenge der Fließmittel eine Sättigungsdosierung gibt und ob sich im Vergleich zu den anderen Stoffen Unterschiede ergeben.

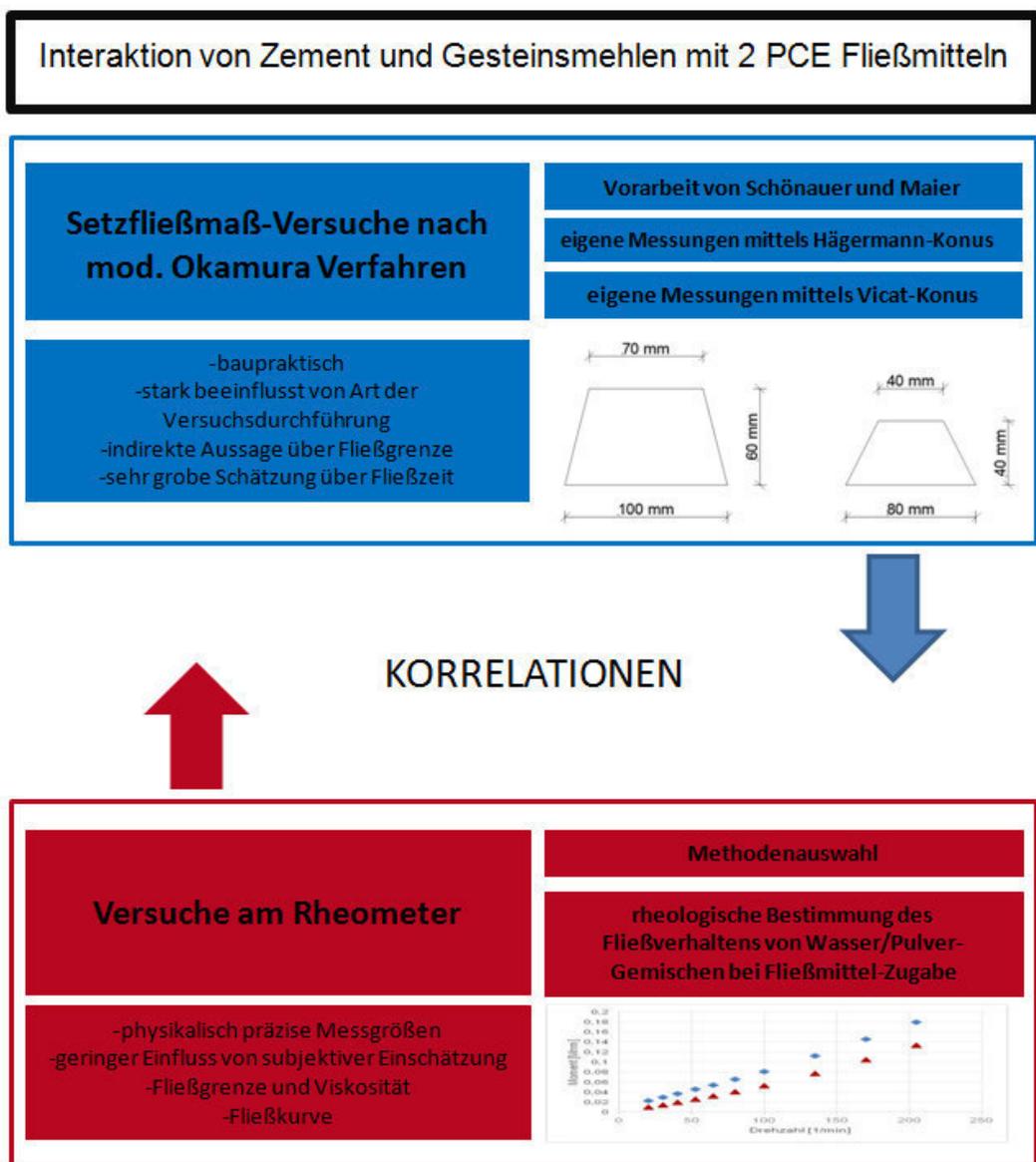


Bild 1-5 Schema über die zur Anwendung kommenden Methoden in dieser Arbeit.

1.3 Strukturierung der Arbeit

Die wesentlichen Aspekte, welche im Zuge dieser Arbeit behandelt werden sind:

- Wirkung der Fließmittel auf die einzelnen Stoffe
- Sättigungsdosierung
- Methodik am Rheometer
- Korrelation der Setzfließmaß-Versuche nach mod. Okamura¹² Methode am Hobart Mischer mit Rheometer

Für die Bearbeitung der angeführten Punkte lässt sich die Strukturierung der Diplomarbeit folgendermaßen zusammenfassen:

Kapitel 2:

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik erhoben. Für ein vertieftes Verständnis ist es notwendig, die Wirkungsprinzipien und die Eigenschaften der Fließmittel zu kennen. Die Erstellung eines geeigneten Versuchsablaufs bzw. einer Methodik am Rheometer steht dabei im Vordergrund. Die Schlussfolgerungen aus der Literatur-Recherche sind Grundlage für den Versuchsablauf am Rheometer.

Kapitel 3:

Es wird ein Überblick über die zu untersuchenden Stoffe und deren Eigenschaften gegeben. Anhand der ermittelten Abläufe aus der Literatur-Recherche werden Voruntersuchungen durchgeführt um den Ablauf für die Hauptuntersuchungen zu definieren. In diesem Abschnitt erfolgt eine Darstellung aller in dieser Arbeit vorkommenden Untersuchungen und Methoden. Es wird darauf eingegangen mit welchem Wasser/Pulver Verhältnis (Ausgangskonsistenz) gearbeitet wird und wie die Untersuchungen am Rheometer durchgeführt werden.

Kapitel 4:

Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen werden in diesem Kapitel ausgewertet. Außerdem wird zusätzlich eine Substitution des Anmachwassers durch eine Porenlösung stichprobenartig untersucht und analysiert.

Kapitel 5:

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Ergebnisse diskutiert und es wird nach Korrelation einzelner Parameter der verschiedenen Untersuchungsmethoden gesucht.

In den Kapiteln 6 und 7 erfolgt ein Resümee der Arbeit und es wird auf zukünftig erforderliche Untersuchungen verwiesen.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die Wirkungsweise der Fließmittel gegeben. Das Grundverständnis der Wirkungsweise dient im weiteren Verlauf unter anderem als Grundlage für die Interpretation der Ergebnisse.

Der nächste Abschnitt wird sich mit den in dieser Arbeit zur Anwendung kommenden Untersuchungsmethoden auseinandersetzen. Deren Funktionsprinzipien werden erläutert. Anhand der Literatur-Recherche wird schließlich ein geeigneter Versuchsablauf für die Rheometer-Methode entwickelt.

2.1 Fließmittel

Fließmittel im Allgemeinen sind Zusatzmittel, die im Beton eine Verflüssigungswirkung haben und zudem eine Konsistenzhaltung bewirken. Sie können den Wasseranspruch im Beton vermindern und erlauben auch über einen bestimmten Zeitraum eine gute Verarbeitbarkeit.

Die unregelmäßigen und feinen Zementpartikel, besitzen verschiedene Ladungsträger. Bei den Ladungsträgern handelt es sich um positive und negative Ionen, welche in Summe ein Kristallgitter bilden. Es kommt über den geladenen Stellen zu einer Agglomeration kleiner Körner. Diese neu entstandenen räumlichen Strukturen haben die Eigenschaft, Wasser einzuschließen. Das eingeschlossene Wasser kann aufgrund der vorherrschenden Umstände keine Wirkung mehr auf die Konsistenz des Betons ausüben (Bild 2-1).¹³

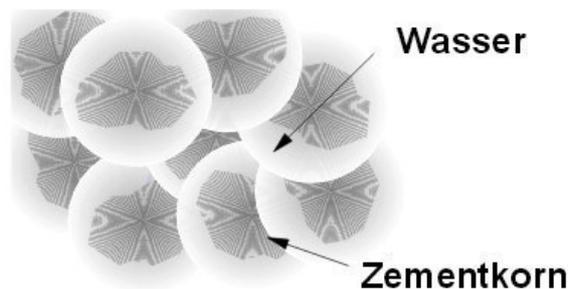


Bild 2-1 Zementagglomeration unter Einschluss von Wasser¹³

Die vorhandene Konsistenz kann somit verbessert werden, indem die agglomerierten Strukturen der Zementteilchen dispergiert werden. Die Spaltung der Agglomeration kann unter anderem durch den Einsatz von Fließmitteln gewährleistet werden. Durch die Adsorption von Fließmitteln auf der Zementoberfläche kommt es zu Prozessen, die das eingeschlossene Wasser befreien. Dieses steht nun der Konsistenzverbesserung zur Verfügung. Aufgrund der Dispergierung (Bild 2-2) und dem damit verbundenen Freiwerden des eingeschlossenen Wassers werden die Viskosität beeinflusst und eine gute Verarbeitbarkeit gewährleistet.¹³ Die Wirkungsweise von Fließmitteln hängt aber von mehreren Effekten ab. Auf die einzelnen Wirkungsweisen wird in nachfolgendem Kapitel näher eingegangen.

¹³ BASF. 2008: Technisches Merkblatt, S.1f

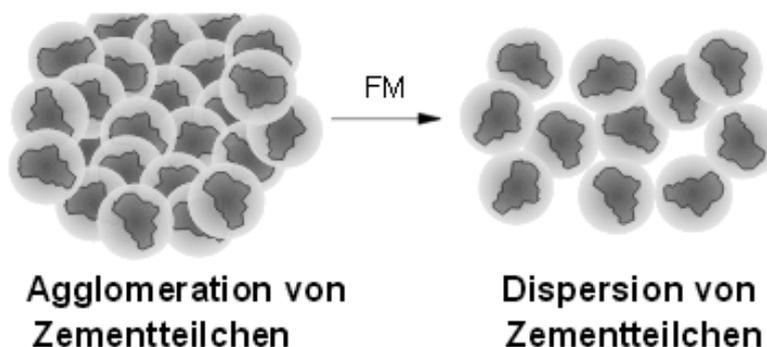


Bild 2-2 Zementkorndispersion unter Freiwerden von Wasser (rechts)¹³

2.1.1 Typen von Fließmitteln

Generell unterscheidet man zwischen pulverförmigen und flüssigen Additiven. Bei den liquiden Fließmitteln handelt es sich um Gemische aus Wasser und einem Wirkstoff (Feststoff).

Es gibt unterschiedliche Wirkstoffe, sowie Wirkungsweisen bei den Fließmitteln (Tabelle 2-1). In dieser Arbeit werden ausschließlich Fließmittel auf PCE- Basis (Polycarboxylatether) verwendet. Diese Fließmittel haben zwei verschiedene Wirkungsweisen; sterische und elektrostatische Abstoßung.

Tabelle 2-1 Wirkstoffe von Fließmitteln und deren Wirkungsweise¹⁴

Nr.	WIRKSTOFF	WIRKUNGSWEISE
1	Ligninsulfonat	Verminderung der Oberflächenspannung
2	Melamnsulfonat, Naphthalinsulfonat	Verminderung der Oberflächenspannung, elektrostatische Abstoßung
3	Polycarboxylatether	im Wesentlichen sterische, zusätzlich elektrostatische Abstoßung

¹⁴ Höveling. 2006: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB), S. 38

2.1.2 Technologische Eigenschaften von PCE- Fließmitteln

Fließmittel auf PCE- Basis sind organische Moleküle, die ein oder mehrere ionische Zentren haben und daher wasserlöslich sind. Es ist zwischen zwei Wirkungsprinzipien zu unterscheiden (Bild 2-2).

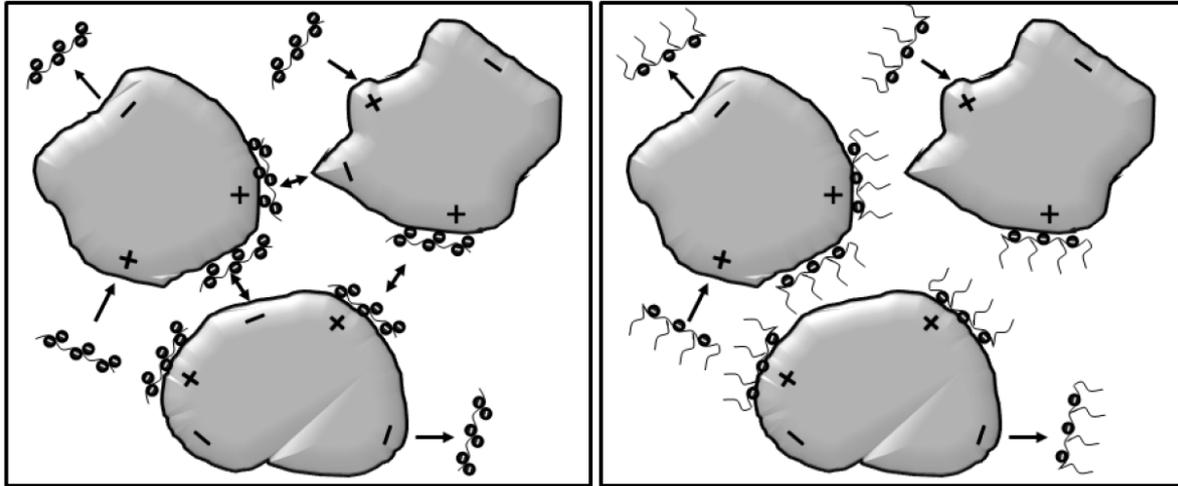


Bild 2-3 Darstellung elektrostatischer Abstoßung (links) und sterischer Abstoßung (rechts)¹⁵

Wie in Bild 2-3 ersichtlich ist, sind die Oberflächen von Zement- inhomogen und weisen dadurch verschiedene elektrische Ladungen auf. Aufgrund der positiven Ladung von Oberflächenteilen der Partikel kommt es zu einer Adsorption der negativen Moleküle.¹⁶

Bei der einen Wirkungsweise, der elektrostatischen Abstoßung, werden so viele Moleküle des FM adsorbiert, dass die Partikeloberfläche geladen wird und, da sich gleichsinnige Ladungen abstoßen, wird die Agglomeration verhindert und die Verflüssigung bewirkt, weil sich jetzt zwischen den Partikeln ein Wasserfilm befindet, der als Gleitfilm wirkt sodass die Partikel gegeneinander leicht verschiebbar sind.

Bei der anderen Wirkungsweise, dem sterischen Prinzip, werden FM-Moleküle mit hohem Molekulargewicht und verzweigten Kohlenwasserstoffketten, die gerade noch wasserlöslich sind adsorbiert. Hier steht aber nicht die elektrostatische Aufladung der Ferststoffpartikel im Vordergrund sondern die mit der Adsorption verbundene Verdrängung von adsorbierten Wassermolekülen von der Oberfläche der Partikel. Dazu kommt es, weil die FM-Moleküle mit dem ionischen Zentrum die Oberfläche berühren und der hydrophobe Rest zufolge seiner verzweigten Struktur die Oberfläche gegen Wasser sozusagen abschirmen. Damit wird die Agglomeration mit Wassereinschlüssen verhindert und die verflüssigende Wirkung erreicht. Der sterische Effekt ist aufgrund der Anzahl der Seitenketten im Gegensatz zur elektrostatischen Wirkung dominanter.^{17 18}

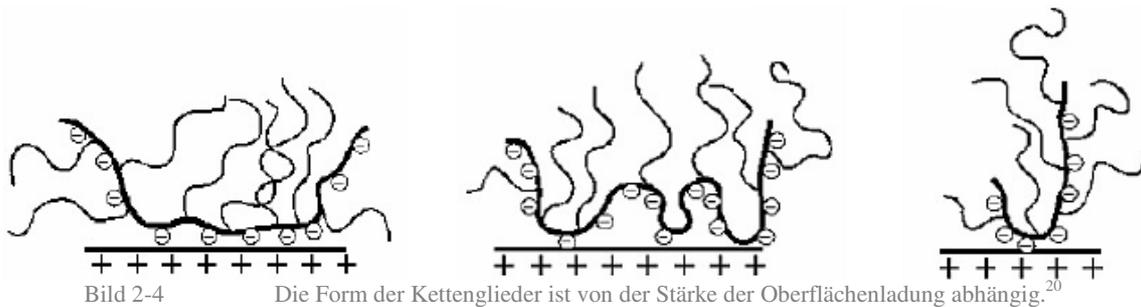
¹⁵ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 45

¹⁶ Höveling. 2006: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB), S. 22, S.38

¹⁷ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 25f

¹⁸ Höveling. 2006: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB), S. 23

Die Wirkung der Fließmittel auf PCE Basis hängt von der Geometrie der Haupt- und Seitenketten ab. In Bild 2-4 sind diverse Anordnungen der Hauptketten dargestellt. Je nach Oberflächenladung gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie die Hauptkette an der Partikeloberfläche adsorbieren kann. Durch die Abbildung ist ersichtlich, dass sowohl die Seiten-, als auch die Hauptkette in die Lösung ragen können und somit beide für die Dispergierung verantwortlich sind. Durch die Variation der Kettenlängen kann der Wirkungsgrad beeinflusst werden und es ergeben sich dadurch verschiedene Endprodukte von Fließmittel. Die Länge der Hauptkette bestimmt dabei die Ladungsdichte des Wirkstoff-Moleküls. Je Länger diese, desto niedriger die Ladung.¹⁹



Die Ladungsdichte spielt bei der Wirkung der Fließmittel eine wesentliche Rolle. Sie ist für die Neigung zur Adsorption an der Oberfläche verantwortlich.

Eine hohe Ladungsdichte bewirkt, dass die Moleküle schnell adsorbiert werden. Es bleiben nur wenige wirkungslose Moleküle in der Lösung (Bild 2-5, links). Aufgrund dieser Umstände verursacht ein Fließmittel mit hoher Ladungsdichte direkt bei der Zugabe eine hohe Fließfähigkeit. Allerdings verlieren diese Fließmittel relativ schnell ihre Wirkung, da sie aufgrund der Hydrationsprodukte überwachsen werden (Bild 2-5, rechts).²¹ Aufgrund dieser Eigenschaften sind FM mit hoher Ladungsdichte optimal für die Fertigteilebetonindustrie geeignet, da sie nach der Zugabe eine hohe Fließfähigkeit bewirken und die Bearbeitungszeiten in der Regel kurz sind (<45min).

Fließmittel mit einer niedrigen Ladungsdichte hingegen adsorbieren werden nur in geringen Mengen adsorbiert und es bleiben viele Moleküle in Lösung, die dann erst im späteren Verlauf ihre Wirkung entfalten können.²¹ Da die Wirkung dieser FM erst nach einer bestimmten Zeit einsetzt und auch länger wirken kann, ohne dass das FM von Mineralneubildungen überwachsen wird, sind Fließmittel mit einer geringen Ladungsdichte für die Konsistenzhaltung über längere Zeit (90min) und dadurch für die Transportbetonindustrie am besten geeignet.

Zusätzlich ist die Zementhydratation temperatur- und zeitabhängig und infolgedessen ist auch die Geschwindigkeit der Adsorption, sowie die Menge an adsorbierbaren Molekülen von diesen beiden Parametern abhängig.²² Ebenso befinden sich Fließmittel nach Wasserzugabe mit unterschiedlichen Ionen in Lösung. Die Adsorption der Fließmittel wird von Sulfaten und Alkalien beeinflusst.²³

¹⁹ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S.53

²⁰ Plank et al. 2006: Neues zur Wechselwirkung zwischen Zementen und Polycarboxylat-Fließmitteln, S. 579-598

²¹ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 141

²² Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 144

²³ Schmidt. 2014.: Zum Einfluss von Fließmitteln auf die frühe Zementhydratation , Folie 38

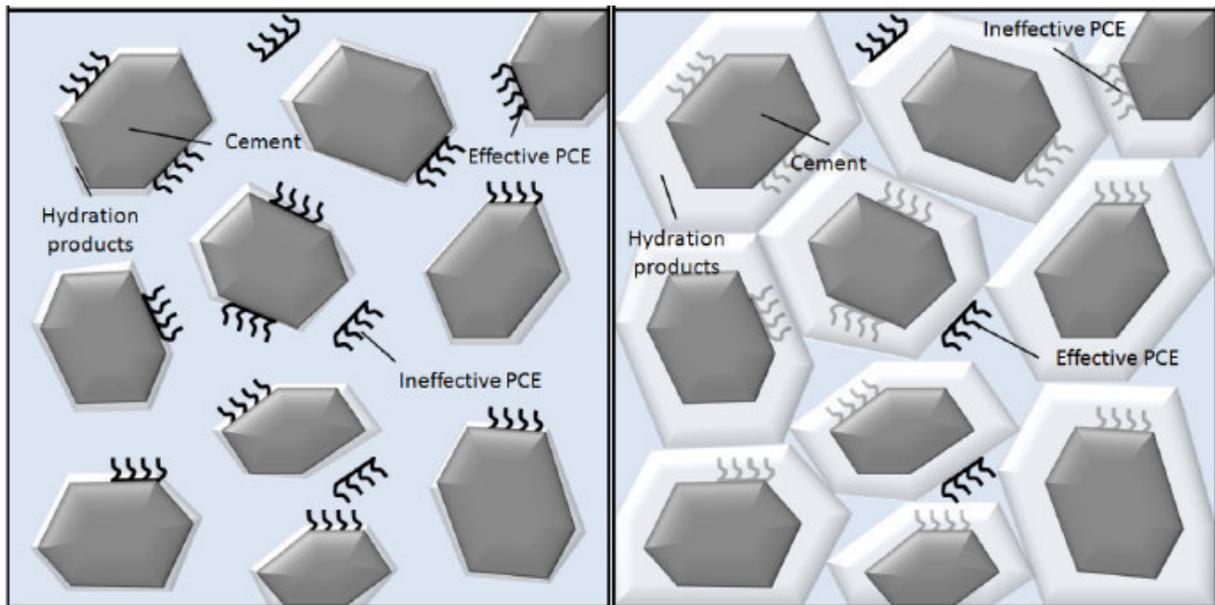


Bild 2-5 PCE Fließmittel mit hoher Ladungsdichte (links) und PCE Fließmittel mit niedriger Ladungsdichte (rechts). Das Phänomen der Überwachung durch Hydratationsprodukte²⁴

In der Praxis bilden die beiden oben genannten Wirkungsprinzipien einzeln oder in Kombination die Grundlage aller am Markt verfügbaren Zusatzmittel.²⁵ Die Art des FM-Wirkstoffes und die Dosierungsmenge erzielen im Frischbeton bzw. Zementleim unterschiedliche Auswirkungen, je nach Beschaffenheit der Zemente und Zusatzstoffpartikel (Zusammensetzung, Oberflächenladung etc.). Aus diesem Grund ist es notwendig die einzelnen pulverförmigen Stoffe mit den verschiedenen Fließmitteln zu untersuchen.

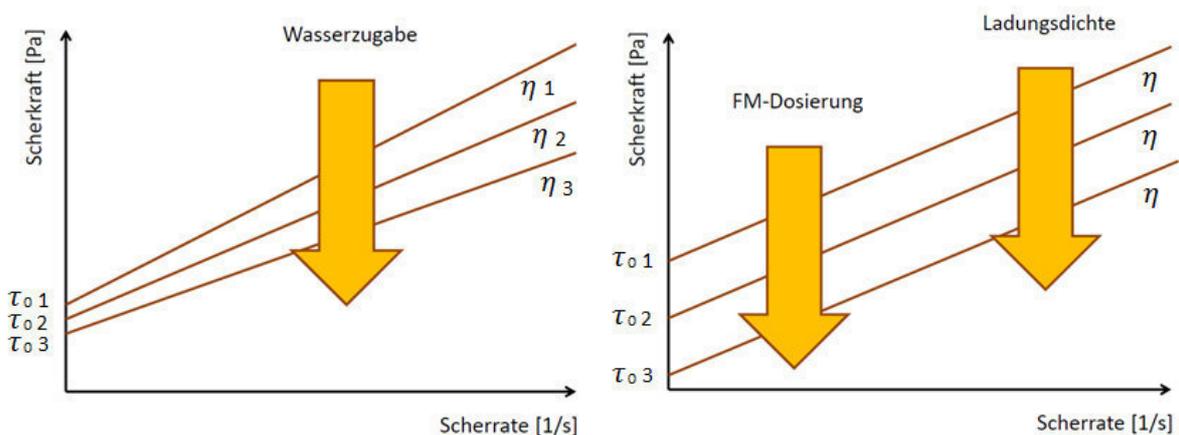


Bild 2-6 Einfluss von Wasser- und FM-Zugabe auf Fließgrenze und Viskosität²⁶

Die Fließgrenze und Viskosität werden vom Wassergehalt und dem Fließmittel unterschiedlich beeinflusst (Bild 2-6). Eine steigende Wassermenge verringert sowohl die Fließgrenze als auch die Viskosität. Infolge einer steigenden FM-Zugabe wird allerdings in

²⁴ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 143

²⁵ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 30

²⁶ Schmidt. 2014.: Zum Einfluss von Fließmitteln auf die frühe Zementhydratation, modifiziert Folie 20 und 22

der Regel laut Schmidt²⁶ nur die Fließgrenze verringert, ohne dass die Viskosität wesentlich beeinflusst wird. Sie wird im Wesentlichen nur vom Wasser-Feststoffverhältnis (Wasser/Pulver-Gemisch) bestimmt.

2.2 Methodenevaluierung

Um die Wirkung der Fließmittel auf die pulverförmigen Stoffe und deren Fließverhalten bestimmen zu können, gilt es geeignete Verfahren zu finden mit deren Hilfe die relevantesten Kennwerte ermittelt werden können. Das Fließverhalten von Zement- und Gesteinsmehlkornleimen kann durch verschiedene Kennwerte beschrieben werden. Ziel der Arbeit ist es, diese Kennwerte zu evaluieren und das Fließverhalten von Zement und Zementergänzungstoffen mit verschiedenen FM-Zugaben zu bestimmen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten um das Fließvermögen zu charakterisieren. In dieser Arbeit kommen zwei Methoden zum Einsatz: zum einen das modifizierte Okamura¹² Verfahren und zum anderen werden rheologische Messungen durchgeführt. Mittels Okamura¹² ist es unter anderem möglich den Wasseranspruch eines Stoffes zu bestimmen. Durch das Verfahren werden in erster Linie das Setzfließmaß und die Fließzeit bestimmt. Die zeitliche Wirkung des Fließverhaltens bzw. dessen Änderung ist dabei ebenso wichtig. Das Fließverhalten von Zement- und Gesteinsmehlkornleimen wird vom Wasseranspruch und der Fließmitteldosierungsmenge beeinflusst.

2.2.1 Setzfließmaß-Bestimmung nach Okamura

▪ Einleitung

Hajime Okamura¹² hat für Selbstverdichtende Betone, die sich durch eine hohe Fließfähigkeit auszeichnen, eine Methode zur Ermittlung der passenden Mischzusammensetzung entwickelt. Das Erreichen einer selbstverdichtenden Konsistenz kann durch die Volumenbeschränkung feiner bzw. grober Gesteinskörnungen, durch das Einhalten eines bestimmten Wasser zu Mehlkornverhältnisses, sowie den Einsatz von Fließmitteln erreicht werden. Die optimale Betonzusammensetzung wird dabei über zwei zusammenhängende Betonuntersuchungen empirisch ermittelt. Bei den Untersuchungen handelt es sich um die Ermittlung eines relativen Setzfließmaßes in Verbindung mit einer Trichterauslaufgeschwindigkeit der zu untersuchenden Suspension. Das relative Setzfließmaßes wird dabei abgeleitet aus dem Ausbreitmaß-Versuch nach Hägermann. Durch diese beiden Kennwerte kann der Anteil von Fließmittel und Wasser in der Betonrezeptur genau festgelegt werden.¹²

▪ Kennwerte

Nach dem Okamura¹² Verfahren wird zunächst das Setzfließmaß einer Suspension ermittelt, woraus das relative Setzfließmaß berechnet wird. Bei der Ermittlung des Setzfließmaßes handelt es sich um einen abgeleiteten Ausbreitmaß-Versuch nach Hägermann.²⁷ Die Zement- bzw. Gesteinsmehlsuspension wird ohne Stoßschläge in einen konischen Behälter (siehe Bild 2-7, links) eingefüllt. Der Konus befindet sich in mitten einer runden Markierung auf einer

²⁷ ÖNORM EN 1015-3. 2007: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).

Glasplatte, die frei von jeglichen Rauigkeiten, welche die Suspension beim Fließvorgang beeinflussen könnten, ist. Nachdem der Konus vollgefüllt ist, wird er nach oben gezogen und die Suspension breitet sich kreisförmig aus. Das Setzfließmaß wird dabei durch zwei rechtwinklig zueinander stehende Messungen der ausgebreiteten Suspension bestimmt. Die Berechnung für das Setzfließmaß ist in Formel 2-1 ersichtlich. Die Zeit, welche die Suspension bis zum Erreichen des Kreißrings ($d=200\text{mm}$) benötigt, fließt in die Berechnung der Fließzeit mit ein. In Formel 2-3 wird die Fließzeit für den Trichter in Bild 2-7 (rechts) dargestellt.

$$dm = \frac{d1 + d2}{2} \quad 2-1$$

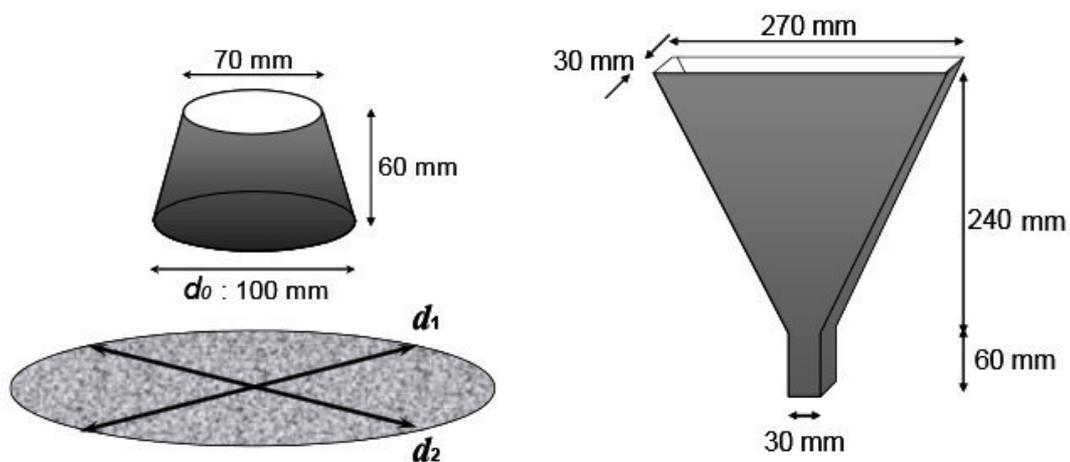


Bild 2-7 Konus zur Bestimmung des Setzfließmaßes (links) und Trichter zur Ermittlung der Auslaufgeschwindigkeit (rechts)²⁸

Das relative Setzfließmaß errechnet sich aus Formel 2-2 und ist ein Verhältnis zwischen dem ursprünglichen Durchmesser und dem nach dem Hebevorgang.

$$\Gamma m = \frac{d1 * d2}{d0} - 1 \quad 2-2$$

d_1 Durchmesser Suspension

d_2 Durchmesser Suspension

d_0 Durchmesser Konus

Die Fließzeit errechnet sich nach folgender Formel:

$$Rm = \frac{10}{t} \quad 2-3$$

t [sec] Zeit bis Suspension durch Trichter läuft

²⁸ Okamura und Ouchi. 2003: Self-compacting Concrete, S7

Das relative Setzfließmaß und die Fließzeit sind wichtige Kennwerte und werden sowohl von der Fließmitteldosierung S_p/P als auch vom Volumenverhältnis des Wasser- und Pulvergehaltes stark beeinflusst. Okamura¹² hat die Abhängigkeit der FM-Dosierung in Bild 2-8 und Bild 2-9 dargestellt. Die Dosierungsmenge kann demnach über das Verhältnis von R_m und Γ_m bestimmt werden.

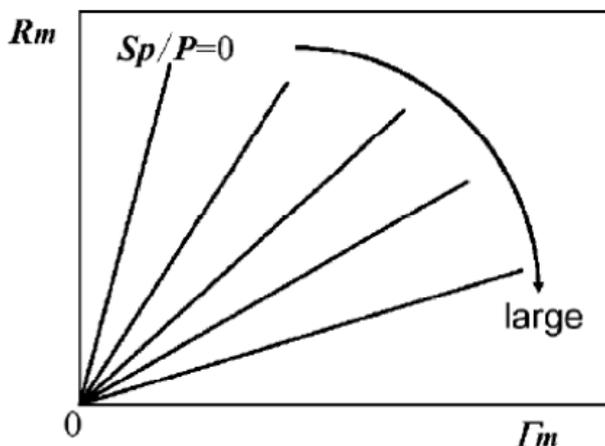


Bild 2-8 Zeigt die Auswirkung von FM auf das relative Setzfließmaß und Fließgeschwindigkeit²⁹

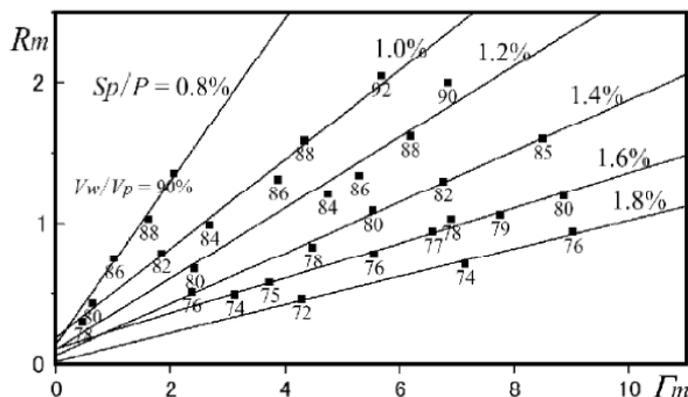


Bild 2-9 Darstellung der Abhängigkeit des relativen Setzfließmaßes und Fließzeit von der FM-Dosierung S_p/P und V_w/V_p ²⁹

²⁹ Okamura und Ouchi. 2003: Self-compacting Concrete, S11

Der Wasseranspruch wird bei der Methodik nach Okamura¹² über den sogenannten β_p – Wert bestimmt. Dieser Kennwert beschreibt das Volumenverhältnis zwischen Wasser und Mehlkorn (V_w/V_p) bei dem das Gemisch noch nicht zu fließen beginnt.³⁰ In Bild 2-10 ist eine Auswertung mehrerer Versuchsreihen mit unterschiedlichen V_w/V_p Verhältnissen dargestellt. Es wird ein linearer Zusammenhang zwischen der relativen Ausbreitfläche und dem Volumenverhältnis von Wasser zu Pulver angenommen. Der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der Koordinatenachse bezeichnet den minimalen Wasseranspruch einer Suspension. Bei diesem Wassergehalt sind alle Hohlräume des Kornhaufenwerks gerade gefüllt und das Gemisch ist gesättigt. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die Wasserempfindlichkeit eines Stoffes gegenüber einer Änderung des Wassergehaltes und wird als E_p gekennzeichnet.³¹

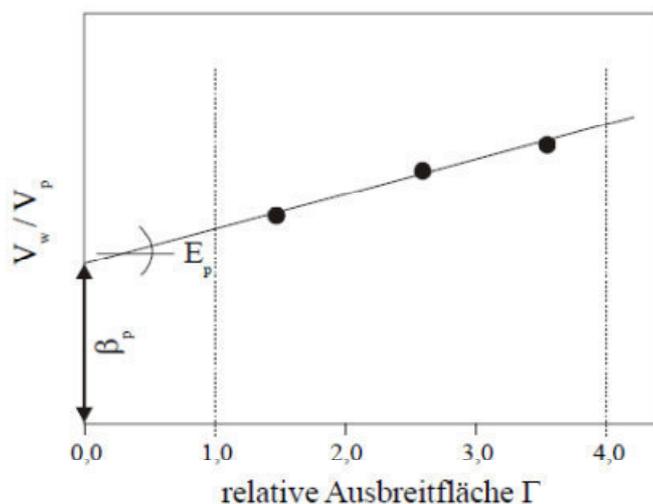


Bild 2-10 schematische Auswertung mehrerer Versuchsreihen nach der Okamura¹² Methode zur Ermittlung des β_p – Wertes³⁰

³⁰ Kordts. 2005: Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitsseigenschaften selbstverdichtender Betone, S. 53

³¹ Kordts. 2005: Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitsseigenschaften selbstverdichtender Betone, S. 52 - nach Okamura

Es ist möglich auch das Setzfließmaß anhand eines VICAT-Rings zu ermitteln. Die Abmessungen unterschieden sich im Vergleich zum Hägermann-Konus²⁷ (siehe Bild 2-11). Durch das kleinere Fassungsvermögen ist es möglich größere Setzfließmaße zu ermitteln.

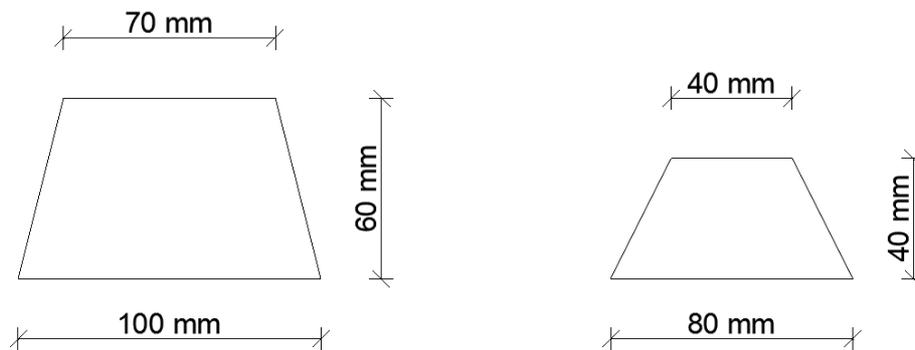


Bild 2-11 Vergleich zwischen Hägermann-Konus, links und VICAT-Ring, rechts

▪ Zusammenfassung und Schlussfolgerung für die eigene Arbeit

Okamura¹² hat an selbstverdichtenden Betonen Untersuchungen durchgeführt und dabei nachgewiesen, dass das Fließvermögen von zwei wesentlichen Faktoren abhängt und diese anhand einer Methodik bestimmt werden können. Durch die Bestimmung des Setzfließmaßes und der Fließzeit können die Auswirkungen unterschiedlicher V_W/V_P und S_P/P ermittelt werden. Die Variation beider Faktoren wirkt sich sowohl auf das relative Setzfließmaß, als auch auf die Fließzeit aus. Okamura hat diese Erkenntnis genutzt und Beziehungen aufgestellt anhand welcher man somit die Konsistenz direkt steuern kann.

Einerseits wird das empirische Verfahren zur Ermittlung des Wasseranspruches in dieser Diplomarbeit genutzt und andererseits wird die Erkenntnis genutzt, dass mit einem bestimmten V_W/V_P die FM-Dosierung untersucht werden kann (Bild 2-9). Anhand eines bestimmten Wasseranspruches (konstantes V_W/V_P) wird über die FM-Dosierung die Konsistenz gesteuert. Bei den Versuchen von Schönauer¹ und Maier² wird Fließmittel in mehreren Etappen zugegeben und der Verlauf der Dosierung wird dabei verfolgt. Die Verflüssigungswirkung kann empirisch über mehrere Messpunkte bestimmt werden. Bei den Untersuchungen am Hobart Mischer handelt es sich in dieser und in den Arbeiten von Schönauer¹ und Maier² um Versuche zur Bestimmung des Setzfließmaßes (Hägermann-Konus und VICAT-Ring) nach dem modifizierten Okamura¹² Verfahren.

2.2.2 Methodik Rheometer

2.2.2.1 Grundlegende Parameter

Das Hauptinstrument bei der Untersuchung des Fließverhaltens der Leimproben bildet in dieser Arbeit das Rheometer. Für die Entwicklung eines Versuchsablaufes werden anfangs verschiedene Literaturen herangezogen. Diesen Erfahrungen und Beschreibungen sollen als Grundlage für die Bearbeitung der Fragestellung herangezogen werden.

In diesem Kapitel werden einleitend die wichtigsten grundlegenden rheologischen Definitionen erläutert. Dies dient als Grundlagenwissen für die weitere Bearbeitung und Verständnis für die im folgenden Auswertung der Literatur-Recherche.

Die allgemeine Definition der Rheologie lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Rheologie ist die Wissenschaft, die sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Materie beschäftigt.³² Dabei können die Verformungs- und Fließeigenschaften eines Fluids anhand eines Rheometers gemessen werden.

Das Rheometer misst das Drehmoment, welches notwendig ist, um die Umdrehungsgeschwindigkeit des Rührers aufrechtzuerhalten. In Abhängigkeit verschiedener Messgrößen ermittelt das Rheometer aus dem gemessenen Widerstand die unterschiedlichen rheologischen Kennwerte. Haist³³ beschreibt die Ermittlung der Kennwerte wie folgt: „Bei der Ermittlung der rheologischen Kennwerte unterscheidet man zwischen Kenngrößen, die direkt aus den Messgrößen berechnet werden können, und Kennwerten, die mit Hilfe von Regressionsverfahren oder anderen mathematischen Modellen aus den Messdaten oder den berechneten Kenngrößen ermittelt werden.“

Zur Beschreibung der Eigenschaften einzelner Fluide werden Fließkurven herangezogen. Eine Fließkurve beschreibt die Schubspannung τ in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$. Die Viskosität ist der Widerstand, den das Fluid der Verformung entgegengesetzt wird und entspricht in der Fließkurve der Steigung der Kurve. Fluide, die eine lineare Proportionalität zwischen der Schubspannung τ und der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ aufweisen, sind sogenannte newtonsche Fluide. In Bild 2-12 sind Fließkurven verschiedener Fluide dargestellt.³⁴

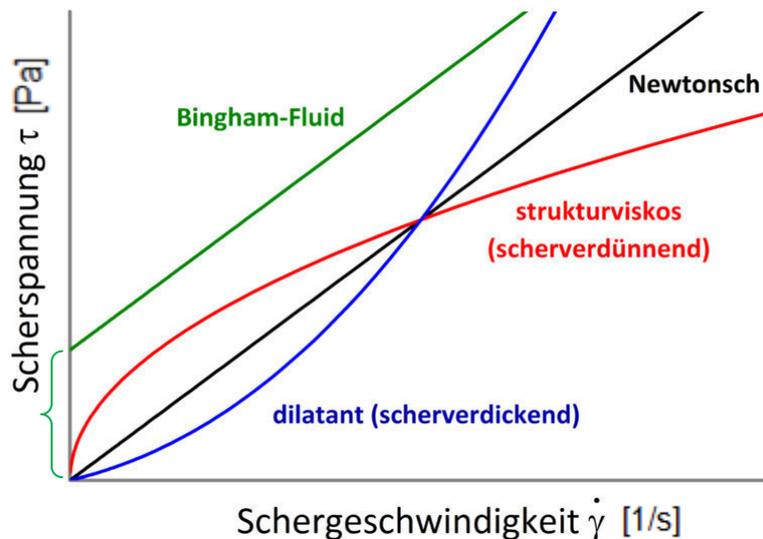
Die Schub- bzw. Scherspannung definiert sich bei newtonschen Fluiden wie folgt:

$$\tau = \eta * \dot{\gamma} \qquad 2-4$$

³² <http://de.wikipedia.org/wiki/Rheologie>. Download 18.07.2014.

³³ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 72

³⁴ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 33 ff

Bild 2-12 Fließkurven verschiedener Fluide $\dot{\gamma}$ ³⁵

Im Gegensatz zu den newtonschen Fluiden weisen nicht-newtonsche Fluide einen Anfangswiderstand auf. Der Anfangswiderstand, der dem Fließen entgegengesetzt wird, bezeichnet man als Fließgrenze τ_0 . Ein Schwellenwert der Scherspannung τ_0 muss überwunden werden, ehe es zu einem Fließvorgang kommt. Zementgebundene Systeme weisen ein nicht-newtonsches Fließverhalten auf. Fluide, bei denen nach Überschreiten der Fließgrenze τ_0 eine Proportionalität zwischen Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ gegeben ist, bezeichnet man als Bingham-Fluide.³⁴

Die Schub- bzw. Scherspannung definiert sich bei nicht-newtonschen Fluiden wie folgt:

$$\tau = \tau_0 + \eta * \dot{\gamma} \quad 2-5$$

Die Viskosität eines Fluids ist eine Funktion der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ und eine Ableitung der Gleichung 2-4 und definiert sich bei newtonschen Fluiden wie folgt:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad 2-6$$

³⁵ http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid#mediaviewer/Datei:Scherspannung_Nichtnewtonscher_Fluid_linear.png. Download 18.07.2014.

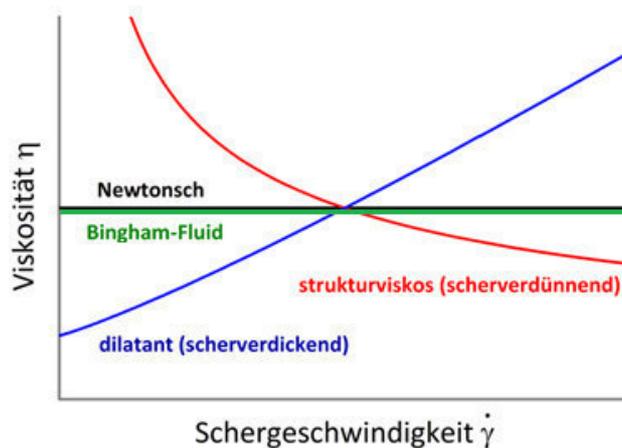


Bild 2-13 Viskosität als Funktion der Scherrate³⁶

Das Fließverhalten kann dilatant bzw. scherverdickend oder strukturviskos bzw. scherverdünnend sein. Bei einem dilatanten Fließverhalten steigt die Viskosität mit zunehmender Scherrate. Strukturviskose Fluide weisen hingegen ein gegensätzliches Verhalten auf.³⁷ Die Viskosität eines Fluids kann ebenso eine Funktion der Zeit t sein. Eine Änderung der Viskosität η bei konstanter Scherspannung τ über die Dauer der Scherbelastung kann je nach Art des Fluides entweder ein rheopexes bzw. thixotropes Fließverhalten bewirken.³⁷ Die Verringerung der Viskosität bzw. Scherspannung über eine bestimmte Dauer t (Scherphase) bezeichnet man als Thixotropie. Es handelt sich dabei um einen reversiblen Prozess, welcher von der Mikrostruktur der Suspension und der Scherbelastung abhängig ist. Bei einem rheopexen Verhalten, nehmen Viskosität und Scherspannung zu.³⁸

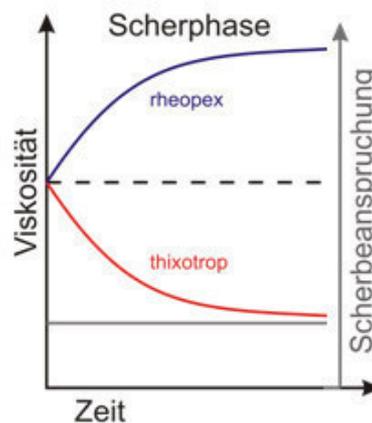


Bild 2-14 Viskosität als Funktion der Zeit t ³⁹

³⁶ modifiziert nach http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid#mediaviewer/Datei:Viskosit%C3%A4t_Nichtnewtonscher_Fluid_linear.png. Download 18.07.2014.

³⁷ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 77

³⁸ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 88

³⁹ modifiziert nach http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid#mediaviewer/Datei:Thixotropie_und_Rheopexie.svg. Download 18.07.2014.

2.2.2.2 Dissertation HAIST

In der Arbeit „Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen“ hat Haist unter anderem auch rheologische Untersuchungen durchgeführt. Unter anderem war ein Ziel der Arbeit von Haist⁴⁰, das Verformungsverhalten frischer Zementsuspensionen in Abhängigkeit von verschiedenen Fließmitteln zu charakterisieren. Die durchgeführte Untersuchung setzt sich aus verschiedenen Untersuchungsabschnitten (I–IV) zusammen. Für die vorliegende Arbeit ist Abschnitt IV von Relevanz, da dort die Fließmittelwirkung in der Zementsuspension untersucht wird. Ein Ziel des Untersuchungsabschnittes IV war die Ermittlung des Einflusses verschiedener Fließmittelarten und deren Dosierungen auf die untersuchten Kenngrößen bzw. des Einflusses des Sulfatgehalts im Zement. In diesem Abschnitt wurden Fließmittel mit elektrostatischer Wirkungsweise (Fließmittel 1) und ein weiteres Produkt mit elektrostatisch-sterischer Wirkungsweise (Fließmittel 2) eingesetzt. Bild 2-15 gibt Auskunft über den kompletten Untersuchungsablauf.⁴¹

Abschn.	Untersuchung	Zement		Mikrozement, Zumahl-/Zusatzstoff, Sulfat		Fließmittel		Phasengehalt ϕ		π	Σ		
		Art	n	Art	Dosierung ¹⁾	Art	Dosierung ⁴⁾	[-]	n				
		[-]		[-]	[Vol.-%]	[-]	[M.-%]						
0	Voruntersuchungen zum Einfluss der Messmimik und zur Art der Ausgangsstoffe										110		
	Wiederholungsversuche										16		
I	Einfluss der Zementart und des Phasengehalts	alle	10					0,42	1	10	23		
		Z121, Z131	2					0,36-0,44	4	8			
		Z211	1					0,40-0,46	3	3			
		Z221	1					0,40-0,44	2	2			
II	Einfluss der Packungsdichte der Partikel	Z121/Z131 ²⁾	3					0,42	1	3	22		
		Z211/Z221 ²⁾	3					0,42	1	3			
		Z121, Z131	2	Mikrozement	25, 50, 75 ³⁾ , 100 ³⁾	4		0,36; 0,40	2	16			
III	Einfluss von Zumahl- und Zusatzstoffen	Z221	1	Kalksteinmehl	5 – 25	5		0,42	1	5	17		
		Z221	1	Hüttsand	5 – 25	5		0,42	1	5			
		Z121	1	Flugasche	10 – 40	4		0,42	1	4			
		Z121	1	Mikrosilika	5 – 15	3		0,42	1	3			
		Z121	1					0,42	1	3			
IV	Einfluss des Sulfatgehalts und der Art und Dosierung von Zusatzmitteln	Z621	1	Gips/Anhydrit	2,0 – 4,0 ⁵⁾	5		0,40	1	5	13		
		Z621	1	Gips/Anhydrit	2,5 – 4,0 ⁵⁾	4	Naphthalin	0-0,40	1	0,44; 0,46		2	2
		Z121	1				Naphthalin	0-0,40	1	0,44; 0,46		2	2
		Z121	1				PCE	0-0,40	1	0,44; 0,46		2	2
Gesamtanzahl der Versuche (ohne Vorversuche):											75		

- 1) volumetrischer Anteil am Feststoffvolumen
- 2) Mischungen aus den genannten Zementen; Mischungsverhältnis (Volumenanteile): 3/1, 1/1, 1/3
- 3) nur bei reduziertem Phasengehalt messbar
- 4) schrittweise Zugabe (6 Stufen)
- 5) Gesamt SO₃-Gehalt in M.-% vom Zementgewicht unter Berücksichtigung des SO₃-Gehalts des reinen Klinkers (einschließlich Chromatreduzierer)

Bild 2-15 Untersuchungsprogramm Haist; vor allem in Abschnitt IV wird der Einfluss von der Dosierung der Fließmittel untersucht⁴²

In Bild 2-16 sind die untersuchten Fließmittel angeführt. Es handelt sich dabei wie schon erwähnt um zwei verschiedene Wirkstoffarten.

Produkt	Dimension	Fließmittel 1	Fließmittel 2
Dichte	[g/cm ³]	1,19	1,07
Feststoffgehalt	[M.-%]	38,7	30,8
Wirkstoffbasis	-	Naphthalin-Sulphonat	Polycarboxylatether (PCE)

Bild 2-16 Kennwerte der untersuchten FM⁴³

⁴⁰ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen,
⁴¹ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 51
⁴² Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 52

▪ Methode

Die Untersuchungen der Verformungseigenschaften von Zement- und Mehlkornleimen wurden dabei an zwei verschiedenen Rheometern (*Haake Rheostress 600* und *Haake Mars*) durchgeführt. An den Rheometern wurden oszillatorische und rotatorische Messungen durchgeführt. Bei den rotatorischen Messungen wurde das Drehmoment konstant gehalten, bei den oszillierenden Messungen variierte es hingegen.⁴⁴ Bild 2-17 gibt eine Auskunft über das Messprofil am Rheometer für Versuche mit Fließmittelzugabe.

Seg.	Typ	Dauer [s]	weitere Einstellungen
0	Lift	10	Rotor in optimale Position drehen, Probe in Messposition verfahren; Winkel und Messzeit zurücksetzen
1	Osz-Zeit	30	$\tau = 0,487 \text{ Pa}$, $f = 1,0 \text{ Hz}$
2	Osz-AS	90	$\tau = 0,487 \div 485 \text{ Pa}$, \log , $f = 1,0 \text{ Hz}$
3	Osz-FS	30	$\tau = 3 \text{ Pa}$, $f = 0,5 \div 10 \text{ Hz}$, \log
4	Rot-Ramp	30	$\dot{\gamma} = 0 \div 300 \text{ s}^{-1}$
5	Rot-Zeit	60	$\dot{\gamma} = 300 \text{ s}^{-1}$
6	Zugabe 1	-	Zugabe von 2/7 der Fließmittelmenge
	Rot-Ramp	30	$\dot{\gamma} = 0 \div 300 \text{ s}^{-1}$
7	Rot-Zeit	420	$\dot{\gamma} = 300 \text{ s}^{-1}$
8	Rot-RL	30	$\tau = 0 \text{ Pa}$
9	Osz-As	90	$\tau = 0,487 \div 485 \text{ Pa}$, $f = 1 \text{ Hz}$
10	Zugabe 2	-	Zugabe von 1/7 der Fließmittelmenge
	Rot-Zeit	420	$\dot{\gamma} = 300 \text{ s}^{-1}$
11	Rot-RL	30	$\tau = 0 \text{ Pa}$
12	Osz-As	90	$\tau = 0,487 \div 485 \text{ Pa}$, $f = 1 \text{ Hz}$
...	3 Wiederholungen der Segmente 10-12		
22	Zugabe 6	-	Zugabe von 1/7 der Fließmittelmenge
	Rot-Zeit	5000	$\dot{\gamma} = 300 \text{ s}^{-1}$
23	Osz-As	90	$\tau = 0,487 \div 485 \text{ Pa}$, $f = 1 \text{ Hz}$

Bild 2-17 Versuchsablauf am Rheometer *Haake Mars* bei FM-Zugabe⁴⁵

Es ist zwischen zwei verschiedenen Versuchsabschnitten zu unterscheiden, nämlich vor und nach der Rheometer-Messung. Die einzelnen Zementleimproben wurden vor der eigentlichen rheologischen Messung entsprechend Bild 2-18 mit einem Mörtelmischer hergestellt. Mit den rheologischen Messungen wurde 13 min nach Zugabe des Anmachwassers zu den Ausgangsstoffen begonnen.⁴⁶

⁴³ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 57

⁴⁴ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 60

⁴⁵ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 71

⁴⁶ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 58 ff

Vorgang und zugegebener Stoff	Mischintensität	Dauer
Homogenisierung der trockenen Ausgangsstoffe	Stufe 1	60 s
Zugabe von Wasser und Mischen (Start der Zeitmessung)	Stufe 1	60 s
Ruhephase (manuelle Rückführung von Anbackungen in das Mischgut)	-	90 s
Zugabe von Fließmittel (falls vorgesehen) und Mischen	Stufe 2	60 s
Ruhephase (manuelle Rückführung von Anbackungen in das Mischgut)	-	30 s
Mischen	Stufe 2	120 s

Bild 2-18 Mischablauf für Mörtelmischer⁴⁷

▪ **Kenwerte**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der oszillierenden Messungen mittels Amplitudensweepversuch dargestellt. Der Amplitudensweepversuch (Ablauf Bild 2-17) wurde anhand der Messsegmente 2 und 16 mit dem *Haake Mars* Rheometer durchgeführt. In Bild 2-19 ist der komplexe Schubmodul in Abhängigkeit von der Schubspannung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Zementleime bei geringen Schubspannungen von der Belastung unabhängige, hohe Steifigkeiten aufweisen. Die Werte liegen hier zwischen ca. 8.000 und 100.000 Pa. Diesen Schwellenwert bezeichnet man als unterkritischer Strukturmodul. Weiters ist zu erkennen, dass ab einer bestimmten Schubspannung die untersuchten Zementleime einen starken Abfall des Schubmoduls aufweisen. Dieser Schwellenwert wird als Strukturgrenze bezeichnet. Die grafische Darstellung zeigt, dass für höhere Spannungen der Schubmodul einen Wert zwischen 1 und 100 Pa erreicht. Diesen Schwellenwert bezeichnet Haist als überkritischer Strukturmodul.⁴⁸

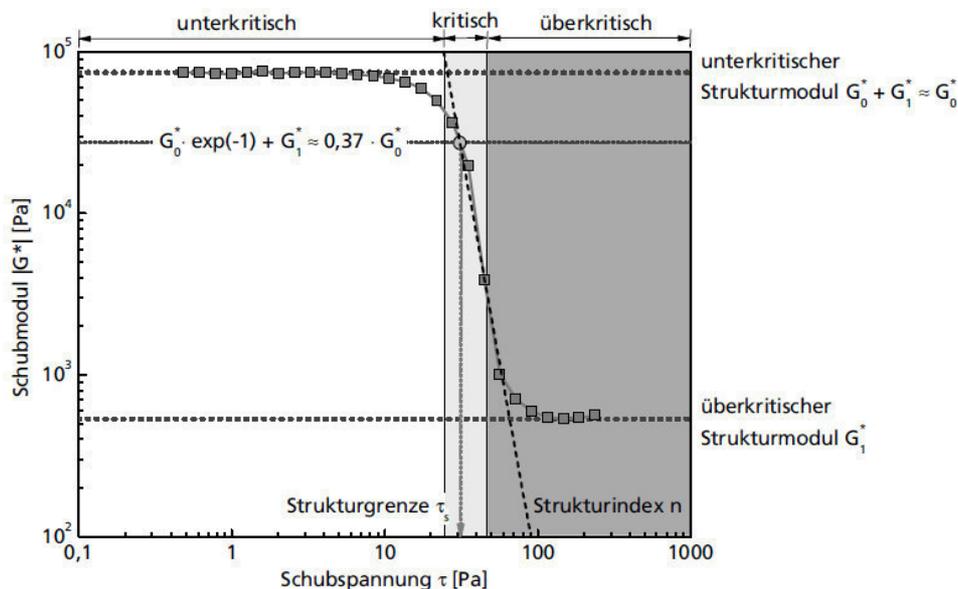


Bild 2-19 Ergebnisse der Untersuchung eines Zementleims, ermittelt anhand eines Amplitudensweepversuchs⁴⁹

⁴⁷ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 59

⁴⁸ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S.72

⁴⁹ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 73

Mittels einer rotatorischen Messung wurde die Fließkurve einer Zementleimprobe in Bild 2-20 ermittelt. Durch eine Vorscherung soll sichergestellt werden, dass das Messergebnis von einer vorangegangenen Strukturbildung unbeeinflusst bleibt. Es ist allerdings zu erkennen, dass die Fließkurve trotz Vorscherung ein dilatantes Fließverhalten aufweist. Der Autor charakterisiert dieses Verhalten für Zementleime als Regelfall. Das bedeutet, dass diese Erkenntnis bei der Wahl einer geeigneten Regressionsfunktion berücksichtigt werden muss.⁵⁰ Das Verformungsverhalten von Zementsuspensionen ist außerdem eine Funktion des Belastungsgrades und der Belastungsgeschwindigkeit.⁵¹

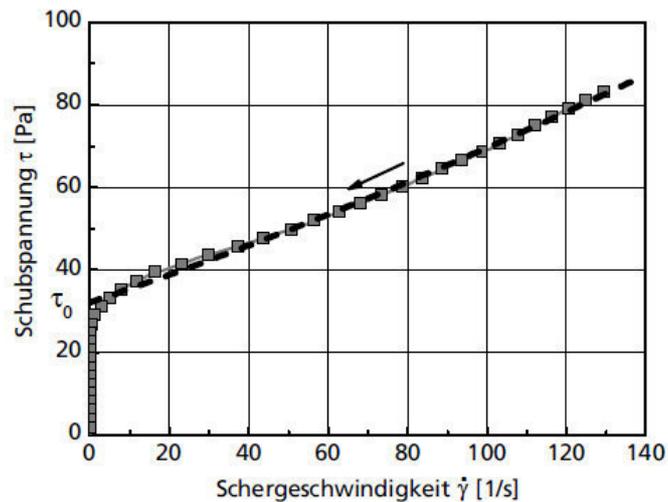


Bild 2-20 Fließkurve einer Zementleimprobe und Darstellung einer Regressionsfunktion⁵²

Aufgrund des teilweise dilatanten Fließverhaltens der Suspensionen erfolgt die rheologische Modellierung der Fließkurven anhand des modifizierten Bingham-Modells. Die Modellierung mittels der modifizierten Bingham-Methode erlaubt sowohl eine strukturviskose als auch eine dilatante Beschreibung. Diese rheologische Modellierung ist für Proben bei hohen Scherbelastungen bzw. Schergeschwindigkeiten ausgerichtet. Das Modell eignet sich jedoch nicht für die Beschreibung des Übergangsbereichs zwischen dem Ruhezustand und dem Fließvorgang.

Bei der modifizierten Bingham-Methode handelt es sich um eine Polynomfunktion 2. Grades. Diese ist im Vergleich zum linearen Modell um ein Glied zweiter Ordnung erweitert.⁵³ Die modifizierte Bingham-Fließkurve wird lt. folgender Gleichung beschrieben:⁵⁴

$$\tau = \tau_0 + \mu_1 * \dot{\gamma} + \mu_2 * \dot{\gamma}^2 \quad 2-7$$

⁵⁰ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 76

⁵¹ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 75

⁵² Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 77

⁵³ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 41

⁵⁴ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, Tab. 2-1 S. 38

In der nachfolgenden Abbildung sind weitere Möglichkeiten dargestellt, anhand welcher sich Fließkurven beschreiben lassen.

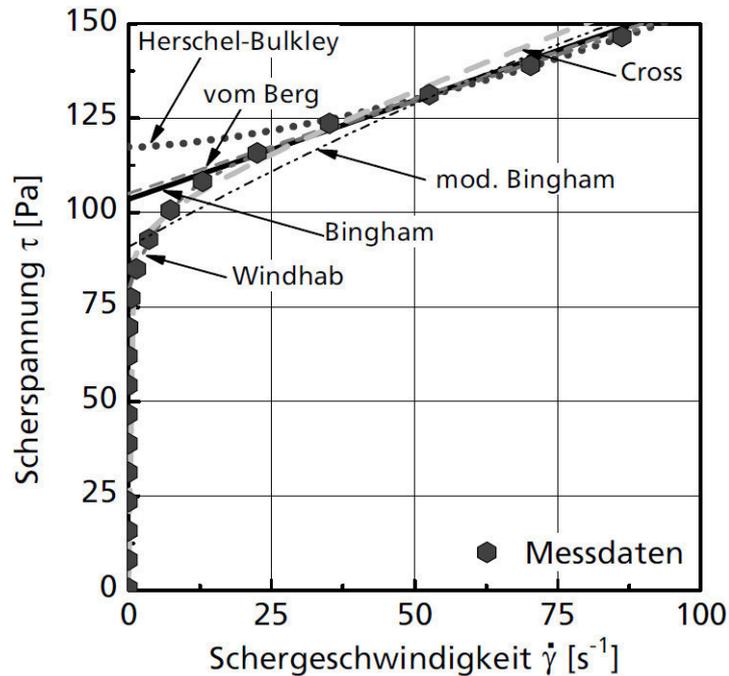


Bild 2-21 Fließkurve von Zementleimproben mit verschiedenen Regressionsfunktionen⁵⁵

Es ist zu erkennen, dass bei geringen Scherbelastungen die Viskosität einen hyperbolischen Anstieg verzeichnet, welcher einen gewissen Grenzwert anstrebt. Mit zunehmender Belastung fällt diese jedoch stark ab.⁵⁶

▪ Schlussfolgerung und Ergebnisse

Das Fließverhalten von Zement- und Mehlkornleimen muss als nicht-newtonsch eingestuft werden. Bei einer geringen Scherbelastung verzeichnen die Leime ein hohes Schubmodul, jedoch verringert sich dieses mit steigender Belastung. Der Abfall des Schubmodules ist auf eine zunehmende Zerstörung der inneren Struktur der Leime zurückzuführen. Der Einfluss der Scherung auf das Agglomerationsverhalten von Zementpartikeln wurde somit nachgewiesen.⁵⁷

⁵⁵ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 40

⁵⁶ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 102

⁵⁷ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 92

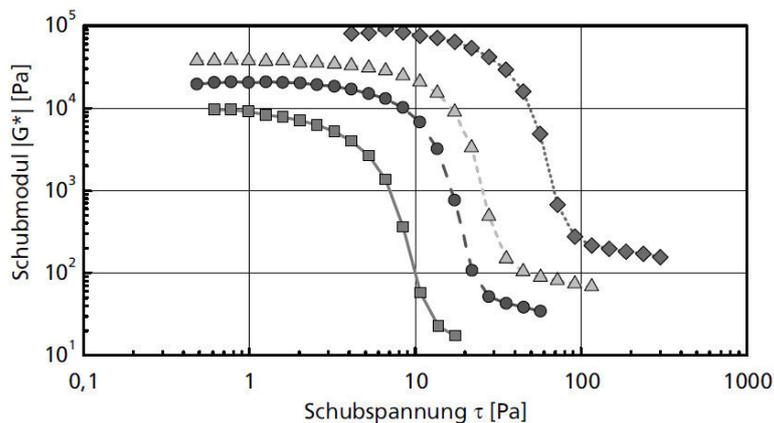


Bild 2-22 Schubmodul einer Zementleimprobe in Abhängigkeit von der Schubspannung, ermittelt anhand eines Amplitudensweepversuchs⁵⁸

Das Fließverhalten von Zement- und Mehlkornleimen ist, wie bereits erwähnt, auch von der Geschwindigkeit der Scherbelastung abhängig. Bild 2-23 veranschaulicht dies anhand mehrerer Messergebnisse bei einer unterkritischen Belastung. Bei konstanter Belastung ist ein Anstieg des Schubmodules zu verzeichnen.

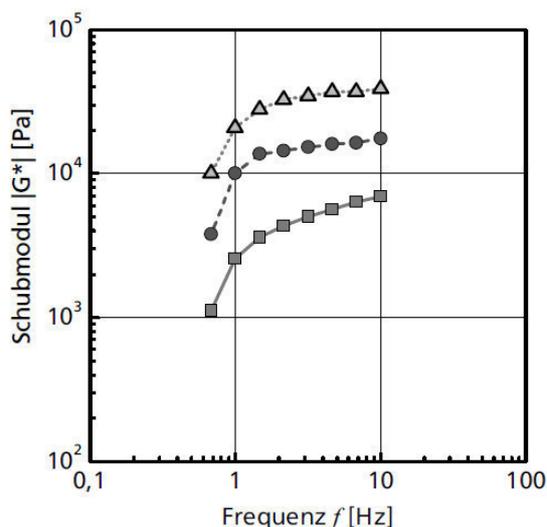


Bild 2-23 Schubmodul einer Zementleimprobe in Abhängigkeit von der Messfrequenz, ermittelt anhand eines Frequenzsweepversuchs⁵⁹

Bild 2-24 veranschaulicht das Fließverhalten von Zementleimen bei hohen – überkritischen – Scherbelastungen. Durch die Wahl eines geeigneten Regressionsmodells (lineares Bingham-Modell bzw. nicht lineares modifiziertes Bingham-Modell) kann eine Auswertung der Messergebnisse erfolgen. Bei sehr hohen Scherbelastungen verzeichnen die Fließkurven einen nicht linearen Anstieg der Schubspannung. Es ist daher notwendig, diese Dilatanz bei der Bewertung der Messergebnisse zu berücksichtigen. Die Wahl eines ungeeigneten Rechenmodells kann sich deutlich auf gewisse Parameter, wie die Fließgrenze, auswirken.⁶⁰

⁵⁸ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 93

⁵⁹ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 97

⁶⁰ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 101 ff

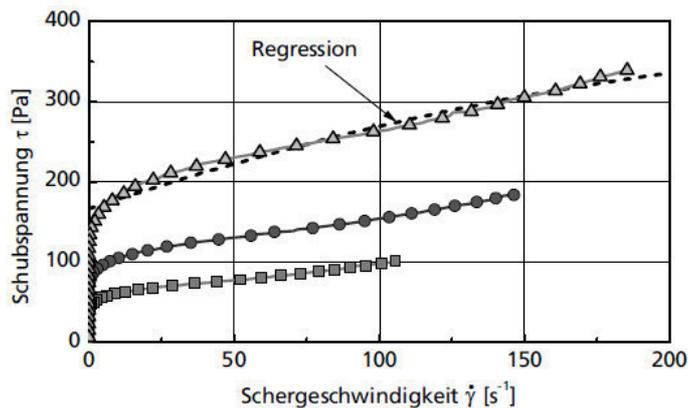


Bild 2-24 Fließkurven verschiedener Zementleimproben in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit, ermittelt bei hoher Scherbelastung⁶¹

In der nachfolgenden Abbildung ist die Fließmittelwirkung auf einen Zementleim dargestellt. Die Viskosität verzeichnet schon bei sehr kleinen Zugaben eine starke Reduzierung des Ausgangswertes. Durch eine weitere Dosierung ist kaum noch eine Änderung zu verzeichnen. Beide Fließkurven verdeutlichen, dass eine zusätzliche Erhöhung der Dosierungsmenge keine Änderung bewirkt.

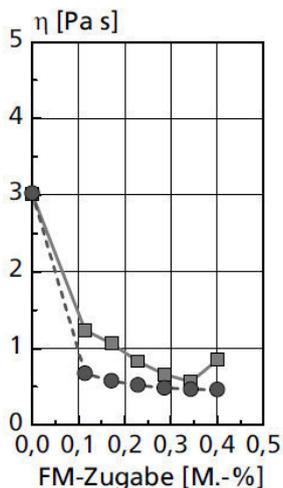


Bild 2-25 Auswirkung der FM-Dosierung auf die Viskosität⁶²

Die Beschreibung des realen Fließverhaltens von Zement- und Mehlkornleimen hängt stark von der Wahl der Regressionsfunktion ab. Die Kenntnis der grundlegenden rheologischen Verhaltensmechanismen von Fluiden ist daher notwendig.

⁶¹ Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 101

⁶² Haist. 2009: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, S. 123

2.2.2.3 Dissertation LOWKE

Selbstverdichtende Betone zeichnen sich durch eine enorm hohe Fließfähigkeit und eine gute Konsistenz aus. Die Fließgrenze spielt dabei eine wesentliche Rolle. In der Arbeit „Sedimentationsverhalten und Robustheit selbstverdichtender Betone“ hat Lowke zur Beantwortung seiner Forschungsfragen unter anderem rheologische Untersuchungen an Frischbetonen durchgeführt. Er ist einer Methodik nachgegangen, anhand welcher man die Fließgrenze bestimmen kann.

▪ Methode

In der nachfolgenden Abbildung ist das Untersuchungsprogramm von Lowke⁶³ dargestellt. Anhand des Ausbreitfließmaßes im Hägermann-Trichter wird die dynamische Fließgrenze bestimmt. Die Ermittlung der statischen Fließgrenzen erfolgt anhand eines Rotationsrheometers unter Verwendung einer Kugelgeometrie (Radius von 10 mm).⁶⁴

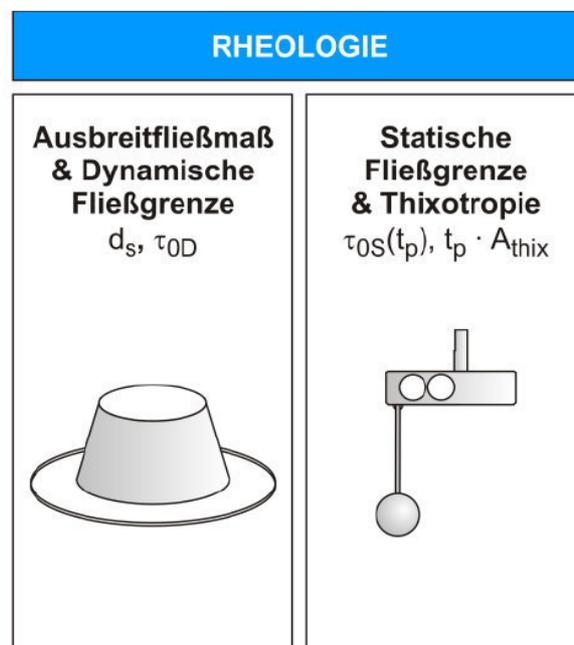


Bild 2-26 Untersuchungsprogramm nach Lowke⁶⁴

Der Messablauf zur Bestimmung der statischen Fließgrenze für das Rotationsrheometer ist in Bild 2-27 dargestellt. Dieser Messablauf wurde im Zeitraum zwischen 10 und 13 min nach der Wasserzugabe gestartet. Bevor die eigentliche rheologische Messung erfolgt wird die Suspension, ähnlich zu der Methode von Haist⁴⁰, einer hohen Scherbelastung unterzogen, um eine Dispergierung sicherzustellen und die Fließgrenze auf ein Minimum zu reduzieren.⁶⁶

⁶³ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone,

⁶⁴ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 113

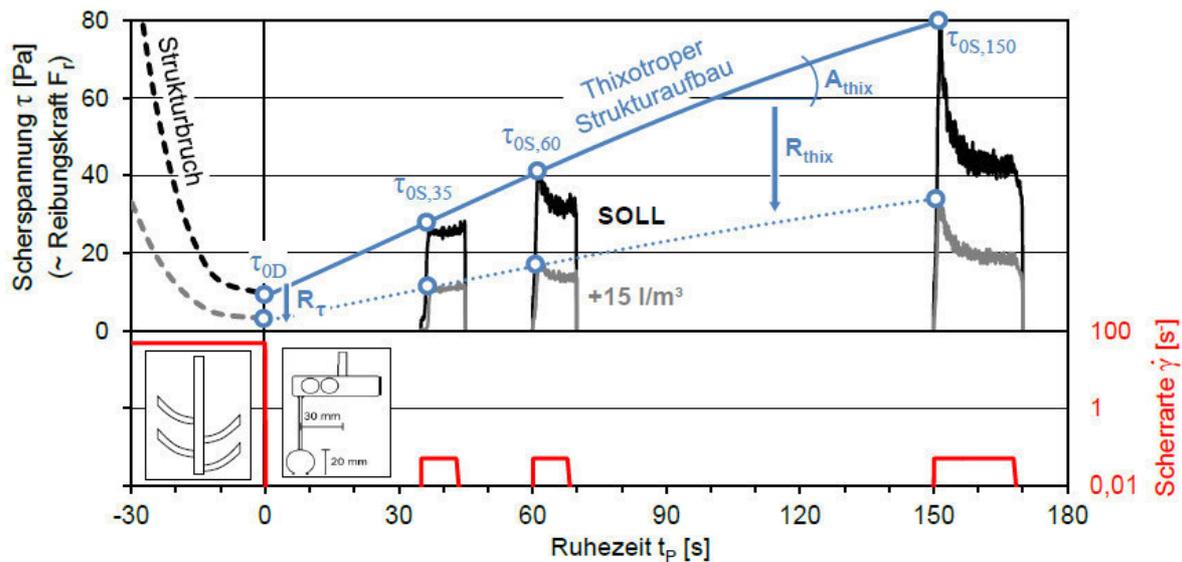


Bild 2-27 Versuchsablauf zur Bestimmung der statischen Fließgrenze und Darstellung der Ergebnisse anhand des dazugehörigen Spannungsverlaufs⁶⁵.

Tabelle 2-2 zeigt zusammenfassend den genauen Ablauf der sich aus insgesamt 3 unterschiedlich andauernden, konstanten Messungen zusammensetzt. Vor dem Startpunkt wurden die Stoffe mit einem Mischer vorgemischt (Zeitpunkt -30 – 0s). Bei Sekunde 35, 60 und 150 wurde jeweils mit dem Kugelrheometer die Scherspannung ermittelt. Aus der linearen aller drei Punkte kann dann die statische Fließgrenze bestimmt werden. Anhand des Versuchsablaufs ist der Autor in der Lage, den thixotropen Strukturaufbau in Abhängigkeit von der Ruhephasendauer t_p zu bestimmen. Die dynamische Fließgrenze τ_{0D} kann zum Zeitpunkt $t=0s$ ermittelt werden. Die statische Fließgrenze τ_{0S} wird mittels der Messungen zu den Zeitpunkten $t=35s$, $t=60s$ und $t=150s$ ermittelt. Die Messungen wurden mehrmals wiederholt, um einer etwaigen Streuung der Messwerte vorzubeugen.⁶⁶ Die Grundprinzipien dieses Messablaufes werden nun im weiteren Verlauf näher erläutert.

Tabelle 2-2 Versuchsablauf nach Lowke⁶⁵

PUNKT	DAUER [s]	VON - BIS	SCHERRATE [s ⁻¹]	BEZEICHNUNG	
1	30	00:00 - 00:30	-	Anrühren d. Ausgangsstoffe	vor der Messung
2	10	00:30 - 00:40	0,25	Messung	rheologische Messung
3	10	00:40 - 00:50	-	Pause	
4	15	00:50 - 01:05	0,25	Messung	
5	90	01:05 - 02:35	-	Pause	
6	20	02:35 - 02:55	0,25	Messung	

⁶⁵ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 114

⁶⁶ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 113 f

Die rheologischen Parameter Viskosität und Fließgrenze sind bei zementartigen Suspensionen von der Dauer und Höhe der Scherbelastung abhängig. Die Verringerung dieser beiden Parameter bezeichnet man als Thixotropie. Lowke⁶³ setzt die Kenntnisse von Haist⁴⁰, der den Einfluss der Scherung auf das Agglomerationsverhalten von Zementpartikeln experimentell nachgewiesen hat, voraus. In Abhängigkeit von der Scherbelastung sowie Zeit ändert sich die Mikrostruktur der Zementsuspension. Mit einer zunehmenden Scherbelastung sowie der Scherrate kommt es zu einer Reduzierung der Partikelagglomeration, die eine Zerstörung der Mikrostruktur mit sich bringt. In Bild 2-28 ist die Verringerung der Viskosität und der Fließgrenze bei zunehmender Schergeschwindigkeit dargestellt. Die Viskosität und Fließgrenze sind dabei eine Funktion der Zeit.⁶⁷

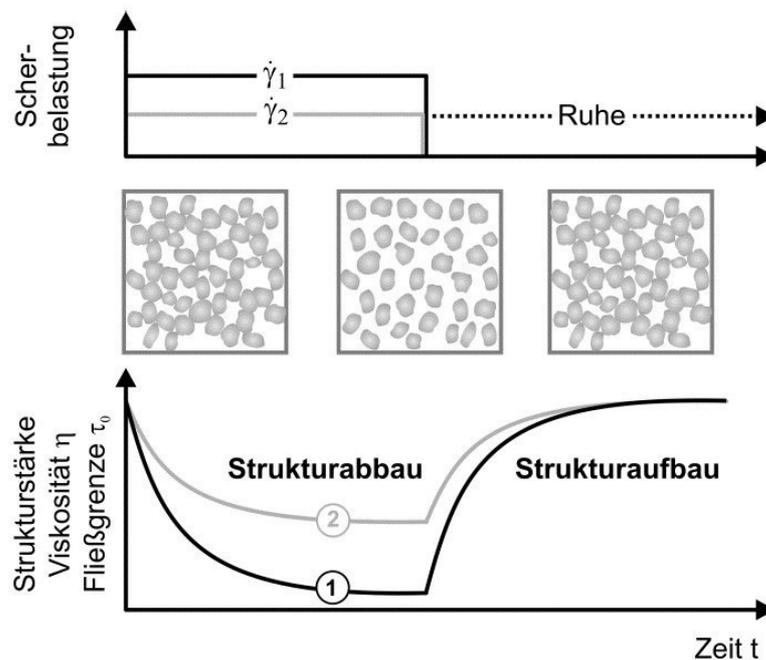


Bild 88: Thixotropie und Mikrostruktur

Bild 2-28 Verringerung der Viskosität und Fließgrenze (Thixotropie) bei zunehmender Schergeschwindigkeit (Zerstörung der Mikrostruktur)⁶⁸

Bei konstanter Schergeschwindigkeit stellt sich nach einer gewissen Zeit bzw. nach einer gewissen Verformung ein Strukturbruch in der Zementsuspension ein. Die Scherspannung nimmt zunächst quasi-linear zu, bis eine maximale Scherspannung τ_m erreicht wird. Der Scherspannungsverlauf nimmt ab diesem Zeitpunkt ab, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen strukturaufbauenden und abbauenden Vorgängen erreicht wird. Es ist zu erkennen, dass Dauer und Höhe der Scherbelastung ausschlaggebend sind.⁶⁹

⁶⁷ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 88

⁶⁸ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 88

⁶⁹ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 90

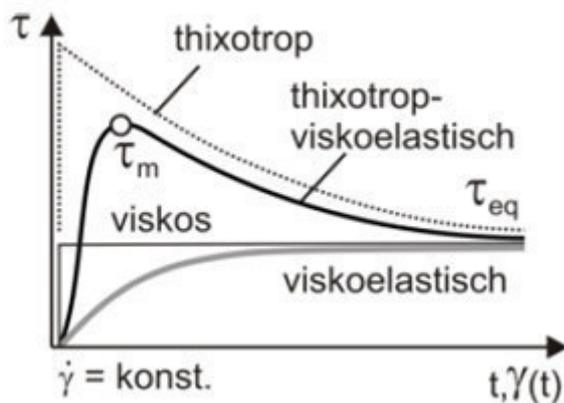


Bild 2-29 Scherspannungverlauf bei konstanter Scherbelastung⁶⁹

▪ **Kennwerte**

Die Beschreibung des Fließverhaltens von zementbasierten Suspensionen und selbstverdichtenden Betonen gestaltet sich schwierig, da dieses von einer Vielzahl an rheologischen Eigenschaften abhängt. Der Autor ist der Meinung, dass eine Anwendung der linearen Bingham-Methode bei selbstverdichtenden Betonen und Mörtel geeignet ist. Es muss allerdings eine ausreichend lange Scherbelastung gewährleistet sein. Die Bewertung des Fließverhaltens eignet sich allerdings nur für eine kurze Zeitdauer.⁷⁰ Die Fließgrenze einer Suspension bestimmt deren Fließfähigkeit, welche bei einer abnehmenden Fließgrenze zunimmt.

Bild 2-30 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze. Die plastische Viskosität hingegen bestimmt die Fließgeschwindigkeit, welche mit abnehmender Viskosität steigt.⁷¹

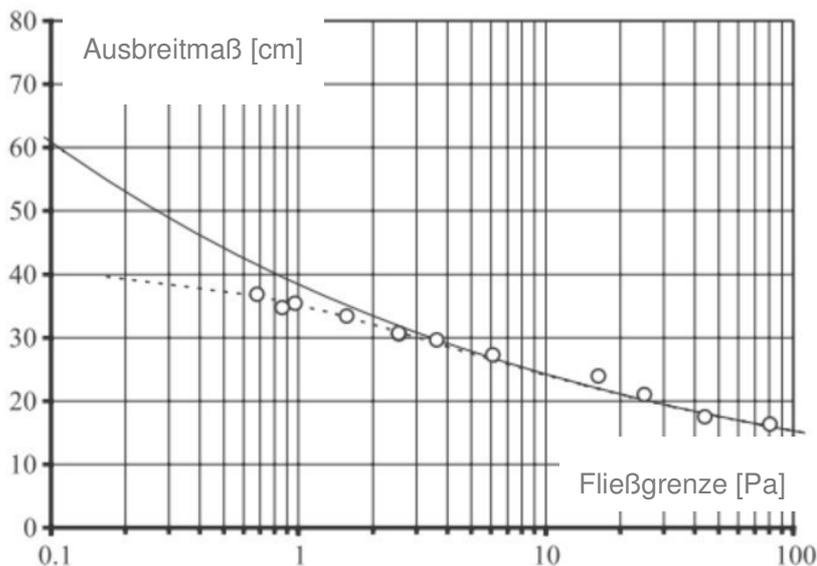


Bild 2-30 Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß (Hägermann-Trichter) und Fließgrenze⁷¹

⁷⁰ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 78

⁷¹ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 79

Bild 2-31 veranschaulicht einen Messablauf, der den Strukturaufbau einer Zementsuspension wiedergibt. Vor der eigentlichen Messung wird die Suspension einer hohen Scherbelastung unterworfen, um eine ausreichende Dispergierung zu gewährleisten. Die eigentliche Messung erfolgt bei geringen, konstanten Scherbelastungen mit Ruhepausen zwischen den einzelnen Messpunkten. Es ist notwendig, dass eine ausreichende Messdauer gegeben ist, damit es zu einer vollkommenen Zerstörung der Agglomeration der Leimpartikel kommen kann. Die Messpausen, die dem Aufbau der Ruhestruktur dienen, sind für den weiteren Messverlauf ausschlaggebend. Es handelt sich dabei um unterschiedliche Ruhezeiten. Die statische Fließgrenze kann somit in Abhängigkeit von der gewählten Scherbelastung und deren Dauer sowie der Ruhezeiten ermittelt werden.⁷²

Wird nun ein solcher Messvorgang mehrmals vorgenommen, ist es möglich, die Fließgrenze anhand eines passenden Regressionsmodells zu ermitteln (Bild 2-31). Die statische Fließgrenze (schwarze Linie - Bild 2-31) liegt oberhalb der dynamischen Fließgrenze (graue Linie - Bild 2-31). Der Grund dafür ist, dass die statische Fließgrenze zuerst die gesamte Ruhestruktur überwinden muss. Bei der dynamischen Fließgrenze ist hingegen die Ruhestruktur bereits zerstört. Die statische Fließgrenze ist die Messung der maximalen Scherspannungen bei verschiedenen Scherraten, die dynamische Fließgrenze hingegen eine Messung der Gleichgewichtsscherspannungen bei verschiedenen Scherraten.⁷³

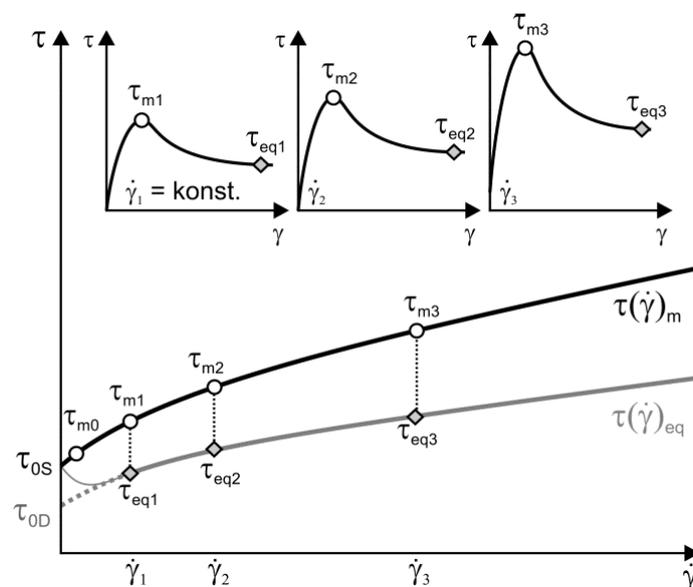


Bild 2-31 Ermittlung der Fließgrenze anhand mehrerer konstanter Messvorgänge. Die statische Fließgrenze (schwarze Linie in Abbildung) liegt oberhalb der dynamischen Fließgrenze (graue Linie in Abbildung).⁷³

▪ Schlussfolgerung und Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung müssen folgende Parameter bei der Ermittlung der Fließgrenze berücksichtigt werden:

- ausreichende Scherbelastung
- Messung des Gleichgewichtszustandes (an mehreren Punkten)
- Wahl eines geeigneten Fließmodells

⁷² Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 91 f

⁷³ Lowke. 2013: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone, S. 90 f

2.2.2.4 Dissertation SCHACHINGER

Schachinger hat in der Arbeit „Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität“ die Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit verschiedener Parametern untersucht. Im Zuge der Arbeit wurden rheologische Untersuchungen durchgeführt, bei denen anhand eines Rotationsrheometer die Fließeigenschaften von UHFB bestimmt wurden.

▪ Methode

Für die Herstellung eines ultrahochfesten Betons ist eine selbstverdichtende Konsistenz vorauszusetzen. Die Fließgrenze muss dabei so niedrig wie möglich sein, damit das Eigengewicht des UHFB ausreichend ist, um einen Fließvorgang zu bewirken. Eine niedrige Fließgrenze ist somit eine technologische Voraussetzung für UHFB. Die Viskosität ist ein Maß für die innere Reibung einer Suspension und maßgeblich für die Fließgeschwindigkeit sowie für Entlüftungsvorgänge im Beton verantwortlich. Die Viskosität prägt somit die Festigkeit eines UHFB. Eine niedrige Viskosität erlaubt eine gute Entlüftung des Betons.⁷⁴ Für die rheologische Untersuchung der Zementleime wurde das Rheometer Viskomat NT der Fa. Schleibinger eingesetzt. Untersuchungsgegenstand war ein faserfreier Frischbeton, welcher in einem separaten Mischer hergestellt wurde. Bei dem Mischer handelt es sich um einen Gegenstrom-Intensivmischer der Fa. Eirich (R02 VAC bzw. R08 VAC).⁷⁵ In Bild 2-32 ist das Messprofil, welches aus 4 Geschwindigkeitsstufen besteht, dargestellt. Die rheologischen Messungen erfolgten 15 min nach Wasserzugabe.⁷⁶

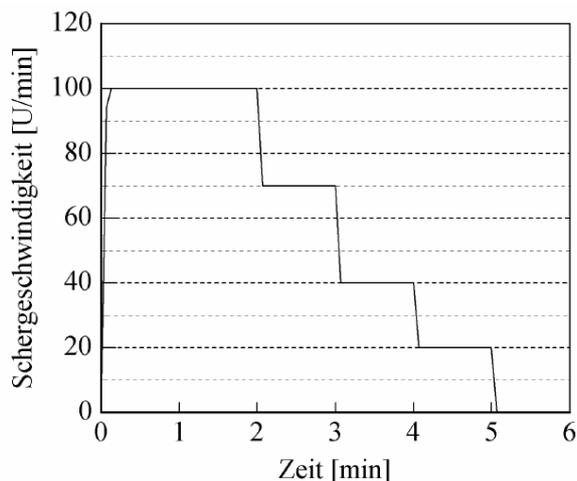


Bild 2-32 Geschwindigkeitsprofil für die Messung der Fließkurve von UHFB⁷⁷

⁷⁴ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 61

⁷⁵ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 56

⁷⁶ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 62

⁷⁷ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 62

▪ Kennwerte

Die Fließkurve wurde anhand von Messungen des Gleichgewichtszustandes der Suspension ermittelt. Die Steigung der Fließkurve entspricht der Viskosität des Probenleims. Aus den einzeln ermittelten Messwerten lässt sich in Summe eine lineare Geradengleichung aufstellen, welche die Fließkurve beschreibt. Dem Fließverhalten der Zementsuspension wurde dabei ein lineares Fließverhalten nach Bingham zugrunde gelegt. Bei den ermittelten Parametern handelt es sich um relative Werte. Die Geradengleichung zur Beschreibung der Fließkurve ist in Bild 2-33 (rechts, oben) ersichtlich.⁷⁸

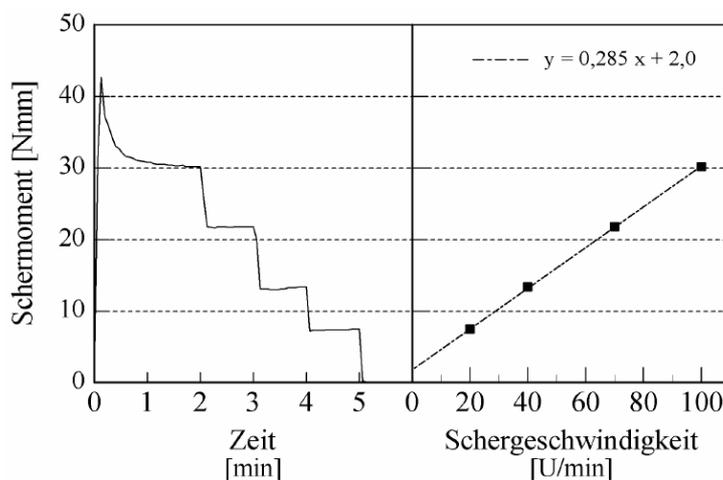


Bild 2-33 LINKS – Schermomentenverlauf (Scherbspannungsverlauf), RECHTS – Fließkurve einer Zementleimprobe⁷⁹

▪ Schlussfolgerung und Ergebnisse

Das Fließverhalten eines Zementleims charakterisiert sich durch die Fließgrenze und die Viskosität. Die Fließgrenze entspricht der Kraft, welche aufgebracht werden muss, um die Suspension in Bewegung zu versetzen. Die Viskosität ist ein Kennwert, der die innere Reibung einer Suspension charakterisiert.⁸⁰ Um die beiden Parameter korrekt bestimmen zu können, ist es notwendig, ein realitätsnahes Berechnungsmodell zu wählen.

⁷⁸ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 62 ff

⁷⁹ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 63

⁸⁰ Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 63

2.2.2.5 Dissertation SCHMIDT

In der Arbeit „Design Concepts for the Robustness Improvement of Self-Compacting Concrete“ hat Schmidt im Zuge der Bearbeitung seiner Thematik rheologische Untersuchungen an Frischbetonen durchgeführt. Es wurden dabei Fließmittel mit unterschiedlichen Ladungsdichten untersucht, da die Hypothese aufgestellt wurde, dass sich die Wirkung der Fließmittel signifikant durch eine unterschiedliche Ladungsdichte unterscheidet. Es wurden Untersuchungen durchgeführt, die diese Annahme stützen sollten. Die zu untersuchenden Fließmittel wurden dabei in drei Kategorien unterteilt; hohe (HC), mittlere (MC) und niedrige (LC) Ladungsdichte.

▪ Methode

Vor der rheologischen Messung wurden die Leimproben so gut wie möglich vermengt. Bild 2-34 gibt Auskunft über diesen Ablauf.

Step	Time span	Duration	Operation
1	0 – 0.5 min	30 s	Dry mixing
2	0.5 – 1.0 min	30 s	Addition of 2/3 of the total water
3	1.0 – 1.5 min	30 s	Mixing
4	1.5 – 2.0 min	30 s	Addition of remaining part of water + PCE
5	2.0 – 4.0 min	120 s	Mixing
6	4.0 – 8.0 min	480 s	Resting phase
7	In parallel		Mix control by slump flow measurement
8	8.0 – 10.0 min	120 s	Mixing
9	10.0 – 18.0 min	960 s	Resting phase
10	18.0 – 20.0 min	120 s	Mixing

Bild 2-34 Ablaufplan des Mischvorgangs⁸¹

Das Fließmittel wurde zunächst dem Anmachwasser beigemischt und dieses im späteren Verlauf mit dem Pulver angerührt. Bei den FM-Zugaben handelt es sich um Dosierungen an der Sättigungsdosierung, da ansonsten keine erkennbaren Effekte auftreten würden. Bild 2-35 veranschaulicht, wie sich das Ausbreitmaß eines Zementleims bei verschiedenen Dosierungsmengen verhält. Die Grafik veranschaulicht, dass sich bezüglich der Fließmittelzugabe eine Sättigungsdosierung einstellt und wie sich die unterschiedlichen Dosierungszugaben verhalten.⁸²

⁸¹ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 70

⁸² Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 97 f

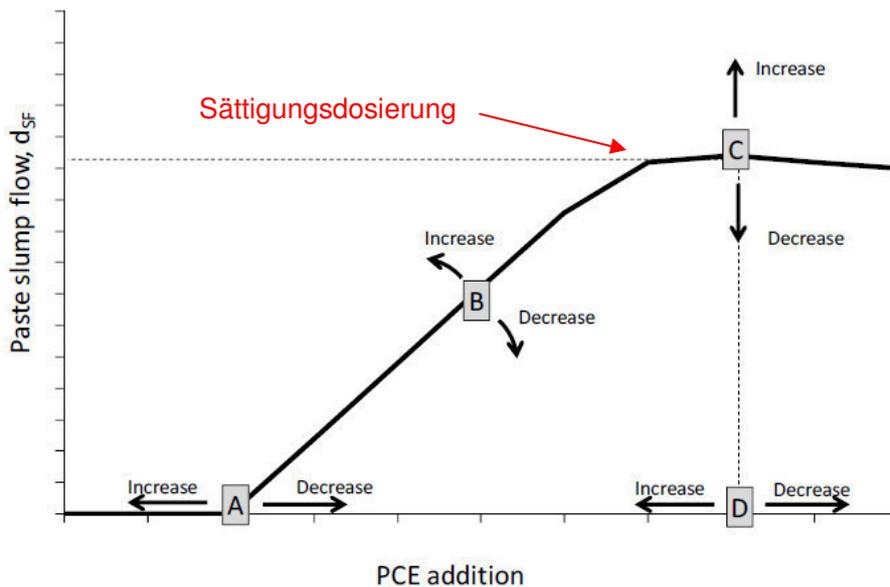


Bild 2-35 Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der FM-Dosierung⁸³

Bild 2-36 veranschaulicht das eigentliche Messprofil am Rheometer. Es handelt sich um einen Rampenverlauf mit einer abnehmenden Geschwindigkeit. Im Vergleich zu den Messprofilen der bisher vorgestellten Arbeiten, sind die Geschwindigkeiten sehr niedrig und die Dauer der Belastung kurz.

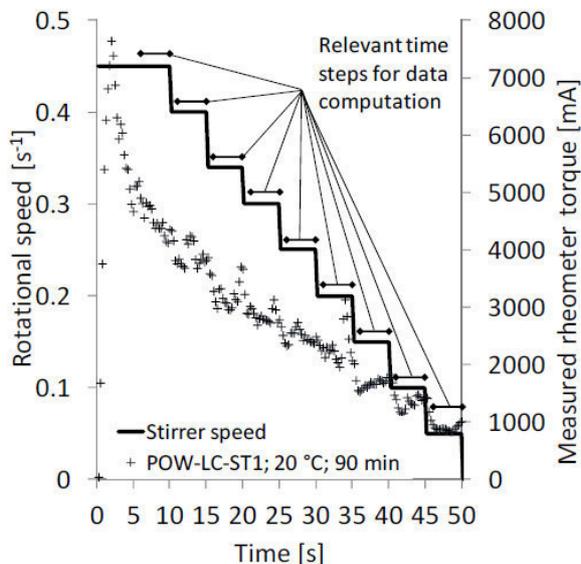


Bild 2-36 Rampenverlauf des Mess-Geschwindigkeitsprofils⁸⁴

Die Untersuchung der SCC-Leime wurde an einem Beton Rheometer (CONTEC Rheometer-4SCC) durchgeführt, wodurch auch Mischungen mit größeren Körnern untersucht werden konnten.⁸⁵ Der Versuchsablauf setzte sich aus vier Messpunkten zusammen und dauert

⁸³ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 98

⁸⁴ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 129

⁸⁵ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 80

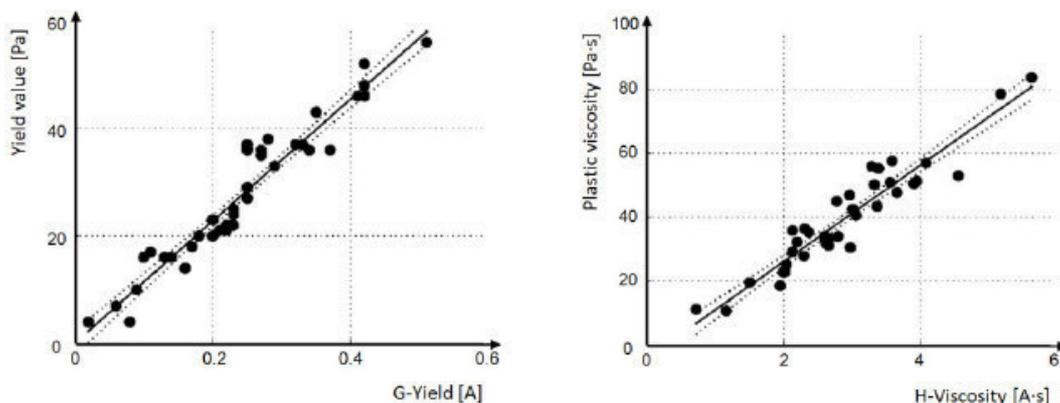
insgesamt 90 min. Der Zementleim wurde nach Punkt B einer erneuten Durchmischung ausgesetzt. In Tabelle 2-3 ist der gesamte Versuchsablauf zusammengefasst.⁸⁶

Tabelle 2-3 Versuchsablauf nach Schmidt⁸⁶

PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ZEITPUNKT
GESCHW. [1/s]	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	0 min
DAUER [s]	10	5	5	5	5	5	5	5	5	
PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ZEITPUNKT
GESCHW. [1/s]	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	30 min
DAUER [s]	10	5	5	5	5	5	5	5	5	
MÖRTELMISCHER										
PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ZEITPUNKT
GESCHW. [1/s]	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	60 min
DAUER [s]	10	5	5	5	5	5	5	5	5	
PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ZEITPUNKT
GESCHW. [1/s]	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	90 min
DAUER [s]	10	5	5	5	5	5	5	5	5	

▪ Kennwerte

Der Nachteil der Untersuchungsmethode am Beton Rheometer ist, dass nur geräteabhängige Größen ermittelbar sind. Bei den ermittelten Parametern handelt es sich um keine physikalischen Kenngrößen wie Schubspannung τ und Viskosität η .⁸⁷ Das Beton Rheometer misst, bei verschiedenen Drehzahlen, den elektrischen Strom in mA und gibt diese als Scherwert (G-Yield) an. Dieser Parameter ist als eine geräteabhängige Analogie zur Schubspannung τ anzusehen. Dasselbe gilt auch für die Viskosität η , welche eine Analogie zur H-Viscosity darstellt. Eine Umrechnungsmöglichkeit ist in Bild 2-37 ersichtlich.⁸⁸



⁸⁶ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 129

⁸⁷ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 129

⁸⁸ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 81

Bild 2-37 Umrechnungsfaktoren für Fließschubspannung τ und Viskosität η ⁸⁹

Schmidt¹¹ hat verschiedene Parameter (Fließgrenze, relative Viskosität und Ausbreitmaß) ermittelt und dargestellt. In Bild 2-38 werden beispielsweise das Ausbreitmaß sowie das G-Yield über den Untersuchungszeitraum miteinander verglichen und deren Fließkurven dargestellt. Bei der Leimprobe handelt es sich um eine Mischzusammensetzung mit niedriger Ladungsdichte. Die Untersuchungen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 20°C durchgeführt.

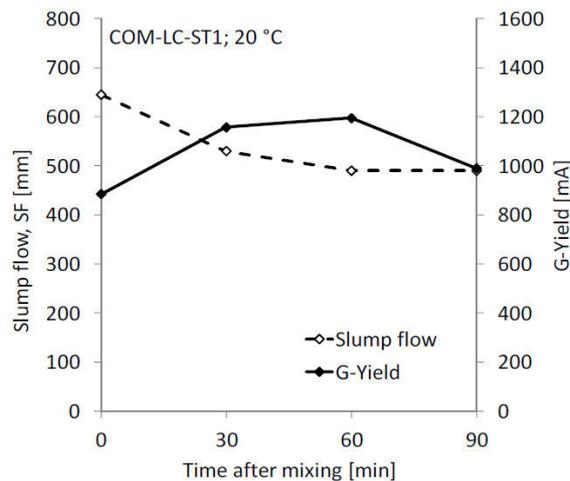


Bild 2-38 Ausbreitmaß und G-Yield einer SCC-Mischung in Abhängigkeit von der Zeit⁹⁰

In Bild 2-39 wird das Ausbreitmaß als eine Funktion der Scherspannung τ bzw. G-Yield dargestellt. Die Viskosität η bzw. H-Viscosity hingegen beeinflusst die Fließgeschwindigkeit eines SCC.

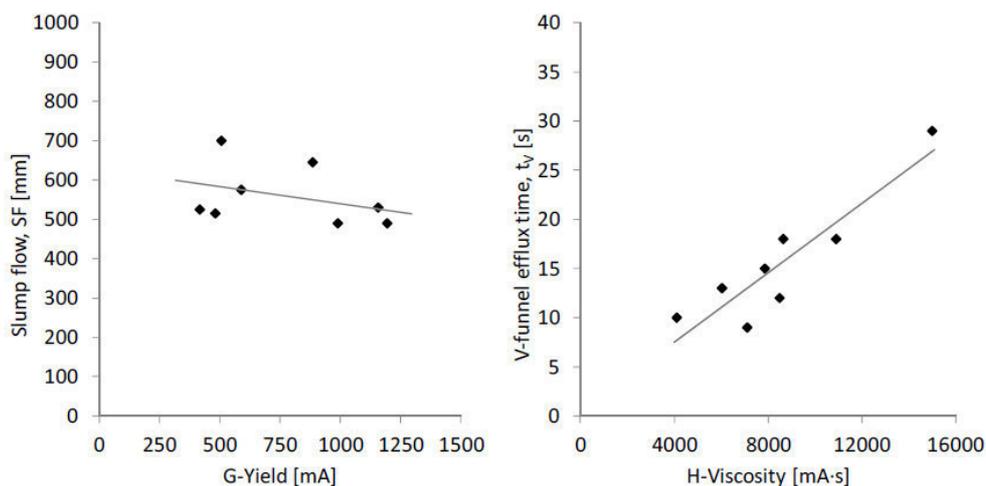


Bild 2-39 Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und G-Yield (Schubspannung τ) bzw. V-Funnel [Fließgeschwindigkeit] und H-Viscosity (Viskosität η)⁹¹

⁸⁹ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 91

⁹⁰ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 131

⁹¹ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 132

Bild 2-40 verdeutlicht die Auswirkung der Ladungsdichte auf das G-Yield. Es ist zu erkennen, dass das FM mit der höchsten Ladungsdichte die besten Ergebnisse erzielt. Für die Fließfähigkeit eines SCC ist ein geringer Anfangswiderstand anzustreben.

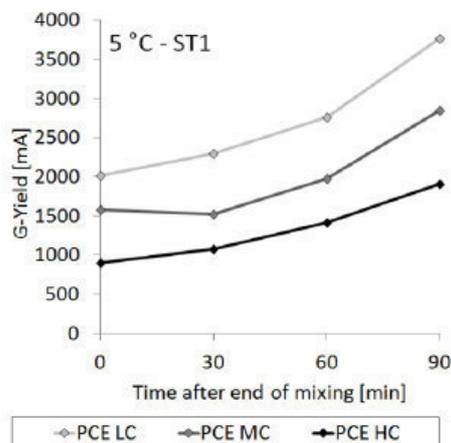


Bild 2-40 G-Yield verschiedener Ladungsdichten; Fließmittel und niedriger (LC), mittlerer (MC) und hoher (HC) Ladungsdichte.⁹¹

In Bild 2-41 ist die Auswertung einer Fließkurve dargestellt. Bei der Regressionensfunktion handelt es sich um eine lineares Bingham- Modell. Fließgrenze und Viskosität werden im Diagramm als relative Werte angegeben. Es ist zu erkennen, dass es je Belastungsgrad mehrere Messpunkte dargestellt werden.

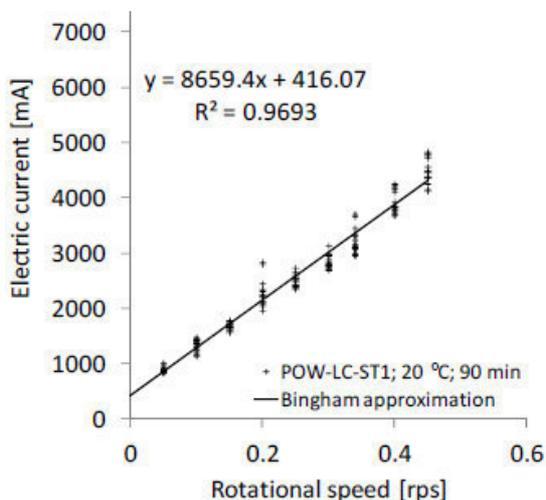


Bild 2-41 Auswertung einer Fließkurve⁸⁴

▪ **Schlussfolgerung und Ergebnisse**

Der Hauptunterschied im Effekt bei PCE-FM ist deren Ladungsdichte. Durch die unterschiedlichen Ladungsdichten kommt es zu verschiedenen Effekten: eine hohe Ladungsdichte hat eine starke Fließfähigkeit, aber diese dauert nur kurzfristig an; bei niedrigen Ladungsdichten kommt es zu einer geringen Verflüssigungswirkung, die aber längerfristig wirkt. In Bild 2-40 ist der Wirkungsunterschied ersichtlich. Der Autor hat eine ausreichende Sättigungsdosierung vorausgesetzt. Die Forschungsfrage in dieser Arbeit hinsichtlich einer Sättigungsdosierung kann unter anderem auch aus dieser Erkenntnis beantwortet werden.⁹²

⁹² Schmidt, 2014: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 141

2.2.2.6 Untersuchungsmethode nach TRITTHART⁹³

Tritthart hat verschiedene Zementleime rheologischen Untersuchungen unterzogen und dabei deren Fließverhalten, mit und ohne FM-Zugabe, analysiert. Es wurden zwei Zemente mit unterschiedlichen Mahlfeinheiten in Kombination mit einem Fließmittel untersucht.

▪ Methode

Die Untersuchungen wurden an einem Rheometer, von der Firma Anton Paar - Physica MCR 300, durchgeführt. Die Zementleime wurden vor der rheologischen Messung per Hand angerührt. Das Fließmittel wurde bereits dem Anmachwasser zugegeben und so mit dem Zement vermengt. Vor der eigentlichen rheologischen Messung wurde die Zementleimprobe einer hohen Scherbelastung ausgesetzt um eine ausreichende Dispergierung zu gewährleisten. Tabelle 2-4 veranschaulicht den gesamten Versuchsablauf.

Tabelle 2-4 Versuchsablauf nach Tritthart

PUNKT	DAUER [min]	VON - BIS [min]	DREHZAHL [U/min]	BEZEICHNUNG	
1	1	00:00 - 01:00	-	manuell anrühren in Prüfgefäß	vor rheologischer Messung
2	3	01:00 - 04:00	-	einbauen	
3	5	04:00 - 09:00	250	Dispergierung	rheologische Messung
4	150	09:00	150	konstante Messung	

▪ Kennwerte

Die Schubspannung infolge des Widerstands des Zementleimes, sowie die Viskosität der Suspension wurden untereinander verglichen.

▪ Schlussfolgerung und Ergebnisse

Die Viskosität der Zementleime wurde infolge der FM-Zugabe verringert. Zementleime ohne FM-Dosierung weisen eine wesentlich höhere Viskosität auf. Die FM-Dosierungen wirken sich unterschiedlich aus. Eine Verdopplung der ersten FM-Zugabe bewirkt zwar eine weitere Verringerung der Viskosität, diese ist aber nicht so ausgeprägt wie bei der ersten Zugabe. Der Zement mit der höheren Mahlfeinheit weist eine geringere Viskosität auf.

⁹³ Tritthart, 2012: interne Untersuchung am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung TU Graz.

2.2.2.7 Rheologie von Zementleimen, Mörtel und Frischbeton nach Wallevik

Wallevik⁹⁴ zeigt, dass die rheologischen Parameter Fließgrenze und Viskosität anhand eines Rheographen veranschaulicht werden können. Der Rheograph zeigt in systematischer Weise die kombinierte Wirkung von verschiedenen Änderungen der Mischzusammensetzung (Wasser, Fließmittel, Silika) auf das rheologische Verhalten einer Suspension.⁹⁵ Die einzelnen Additive haben verschiedene Auswirkungen auf das Fließverhalten (Bild 2-42). Der Einsatz von Fließmittel wirkt sich im Wesentlichen nur auf die Fließgrenze aus und verändert die Viskosität von Frischbeton nicht. Sie wird nur durch die Zugabe von Wasser beeinflusst.⁹⁶

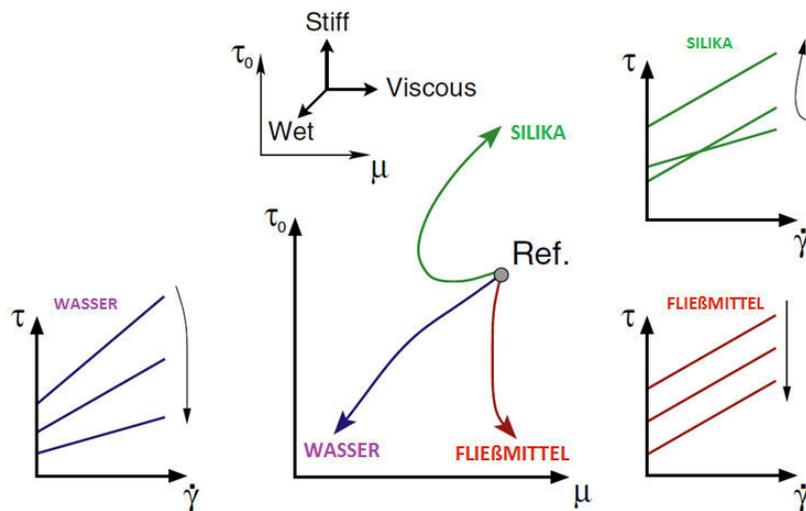


Bild 2-42 Darstellung der Auswirkung einer Wasser und FM Zugabe auf die Rheologie eines Wasser/Pulver-Gemisches⁹⁷

Die Auswirkung von Fließmitteln auf die Viskosität ist bei Frischbeton und Zementleimen unterschiedlich. Obwohl sich die Viskosität im Frischbeton durch die Zugabe von Fließmitteln nicht ändert, ist das bei Zementleimen nicht der Fall (Bild 2-43).⁹⁸

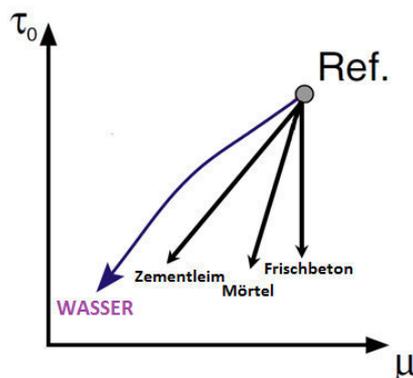


Bild 2-43 Die unterschiedlichen Auswirkungen einer FM-Zugabe auf Leim, Mörtel und Frischbeton.⁹⁸

⁹⁴ Wallevik. 2011: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes

⁹⁵ Wallevik. 2011: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, S.1279

⁹⁶ Wallevik. 2009: Introduction to Rheology of Fresh Concrete, S. 3-1 f

⁹⁷ Wallevik. 1983: Description of Fresh Concrete Properties by use of Two-Point Workability Test Instrument.

⁹⁸ Wallevik. 2009: Introduction to Rheology of Fresh Concrete, S. 3-21

Der Bereich der Scherrate ist für die Bestimmung des Fließverhaltens von Suspensionen von wesentlicher Bedeutung. In Abhängigkeit der Suspensionen (Leim, Mörtel, Beton) sind bei rheologischen Messungen unterschiedliche Scherraten anzuwenden. Das Fließverhalten (zeigt sich durch Fließkurve) ändert sich in Abhängigkeit der Scherrate (Bild 2-44). Die verschiedenen Suspensionen erfahren in der praktischen Anwendung unterschiedliche Scherraten. Der Scherratenbereich von Frischbeton ist im Vergleich zu Leimen wesentlich geringer.⁹⁹

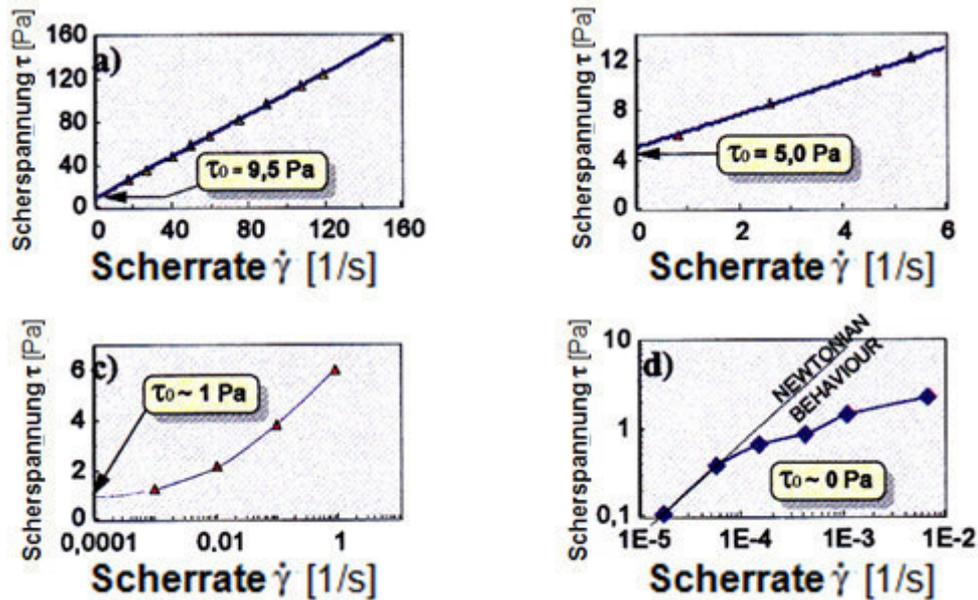


Bild 2-44 Fließkurven eines Zementleims bei unterschiedlichen Scherraten¹⁰⁰

⁹⁹ Wallevik. 2009: Introduction to Rheology of Fresh Concrete, S. 3-13 f

¹⁰⁰ Wallevik. 2009: Introduction to Rheology of Fresh Concrete, S. 3-15

2.3 Schlussfolgerungen aus der Literaturlauswertung für die eigene Arbeit

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Diplomarbeit ist es eine geeignete Methodik für das Rheometer zu finden, um das rheologische Verhalten ausgewählter Stoffe beschreiben zu können. Zur Erstellung dieser Methodik wurde infolgedessen eine Literatur-Recherche durchgeführt. Anhand dieser Recherche wird im Folgenden ein Ablauf ermittelt, der dann im Labor am Rheometer zur Anwendung kommt.

Vorweg müssen die Kennwerte, die das rheologische Verhalten der zu untersuchenden Zement- und Gesteismehlkornleime beschreiben, festgelegt werden. In Abhängigkeit dieser Kennwerte ist es erst möglich einen Ablauf zu definieren. Aus der Literatur-Recherche geht hervor, dass die Kennwerte Fließgrenze und Viskosität von Relevanz und für die Bearbeitung der Forschungsfragen ausreichend sind. In Bild 2-45 sind die die beiden Parameter dargestellt.

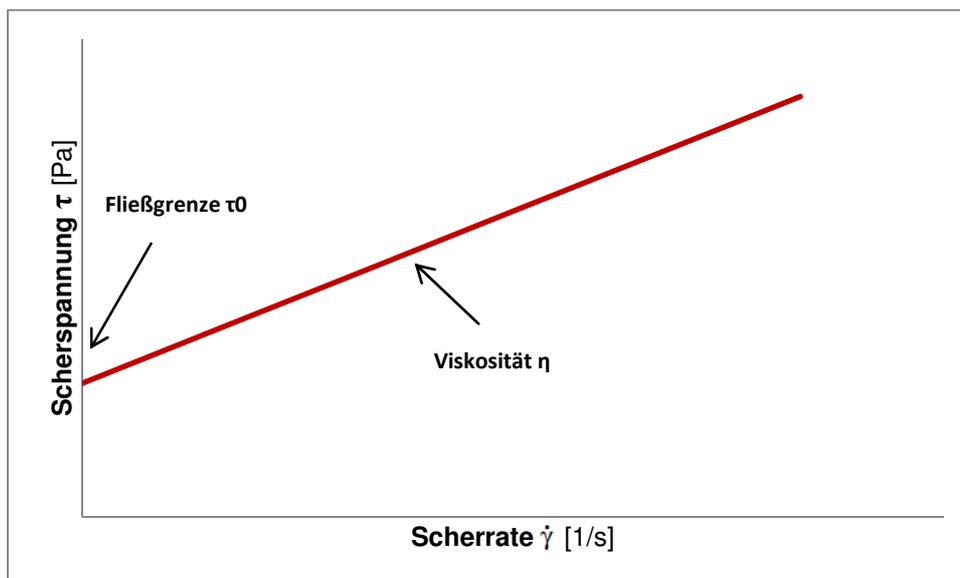


Bild 2-45 Modell nach Bingham zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens einer Suspension anhand einer Fließkurve

Für die experimentelle Bestimmung können die Abläufe aus der Literatur-Recherche adaptiert bzw. modifiziert werden, um daraus die genannten Kennwerte ermitteln zu können. Im ersten Schritt ist es notwendig die Randbedingungen für die Erstellung eines geeigneten Versuchsablaufs zu definieren. Nach entsprechender Literatur-Recherche konnte festgestellt werden, dass es unterschiedliche Versuchsabläufe gibt. Die Autoren haben die Versuchsproben sowohl geringen (Schmidt¹⁰¹), als auch hohen Belastungen (Schachinger¹⁰²) ausgesetzt. Die Höhe der Belastung ist demnach eine Randbedingung die bei der Erstellung des Versuchsablaufes von großer Bedeutung ist.

Die Dauer der Belastung, welcher die Proben ausgesetzt werden, variiert ebenfalls. Schmidt¹⁰¹ hat im Gegensatz zu Schachinger¹⁰² nur kurz andauernde Belastungen. Die Dauer der Belastung ist demnach eine weitere Randbedingung.

Die Literatur-Recherche hat ebenso gezeigt, dass die Wahl eines geeigneten Fließmodells wesentlich ist. Die realitätsnahe Beschreibung der Fließkurve ist von Art des Stoffes, sowie den ersten beiden genannten Randbedingungen abhängig. Bei der Auswertung der Messdaten ist auf die Wahl eines geeigneten Regressionsmodells zu achten. Aus der Recherche geht

¹⁰¹ Schmidt. 2014.: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 129

¹⁰² Schachinger. 2007: Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität, S. 62f

hervor, dass eine lineare Annahme bei zementgebundene Systemen nach dem Bingham Modell und somit für diese Diplomarbeit ausreichend genau ist.

Die vorgestellten Versuchsabläufe unterteilen sich in zwei wesentliche Abschnitte; vor und nach der rheologischen Messung. In allen Fällen wurde die Ausgangsstoffe (Pulver + Anmachwasser) extern angerührt und nicht im Rheometer selbst. Im Unterschied dazu wird in den Vorversuchen dieser Diplomarbeit erstmals geprüft, ob eine interne Mischung im Rheometer möglich ist, da diese einen geringeren Zeit- und Materialaufwand beinhalten würden. Zusammenfassend ist auf folgenden Parameter zu achten:

- Belastung
- Belastungsdauer
- Wahl eines geeigneten Fließmodells

3 Methodik und Materialcharakterisierung

In diesem Abschnitt wird das Konzept der Methodik für die im Rahmen der Diplomarbeit umgesetzten experimentellen Untersuchungen zusammenfassend dargestellt. Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildet dabei das Rheometer.

Für das Charakterisieren des Fließverhaltens von Pulver-Wasser Gemischen bei Fließmittelzugabe werden in dieser Arbeit zwei verschiedene Methoden angewendet. Zum einen wird ein modifiziertes Verfahren nach Okamura¹² angewandt und zum anderen werden rheologische Messung mit dem Rheometer Physica MCR 300 getätigt. Im Vorfeld wurden bereits Untersuchungen zum Fließverhalten von den Studenten Schönauer¹ und Maier² mittels des modifizierten Verfahrens nach Okamura¹² durchgeführt. Deren Ergebnisse werden als Datengrundlage für die Rheometer-Messungen verwendet und ebenfalls in diesem Kapitel präsentiert.

Im Folgenden werden kurz die modifizierten Okamura¹² Versuche und die Vorversuche zu der Methodenentwicklung am Rheometer dargestellt.

3.1 Materialien und Ausgangswassergehalt

Untersuchungsgegenstand ist die Interaktion von insgesamt 9 pulverförmigen Stoffen und 2 Fließmitteln. Die pulverförmigen Stoffe setzen sich aus 2 Zementen und 7 Gesteinsmehlen (Kalk-, Quarz- und Dolomitsteinmehle) zusammen. In Tabelle 3-1 sind einige physikalische Kennwerte der pulverförmigen Stoffe zusammenfassend dargestellt. Für die Untersuchungen wird bei den pulverförmigen Stoffen jeweils ein Vertreter von feiner und grober Körnung verwendet, deren Einteilung über den mittleren Korndurchmesser d_{50} erfolgte. Die Ausgangsstoffe werden in einem Raum bei einer Temperatur von 21°C sowie konstanter Luftfeuchtigkeit gelagert. Alle im Versuch benötigten Geräte wurden ebenso auf 21 °C temperiert.

Tabelle 3-1 Eigenschaften der pulverförmigen Stoffe

Nr.	BEZEICHNUNG	DICHTE [g/cm ³]	d ₅₀ [μm]	V _{ws} /V _p MEV	n _w MEV	V _w /V _p OKAMURA d=130 mm	n _w OKAMURA d=130 mm	E _p	BLAINE WERT [g/cm ²]
P1	Zement 67-1006	3,14	7,5	0,92	0,48	1,23	0,55	0,0037	5110
P2	Zement 102	3,06	12,0	0,80	0,44	1,16	0,54	0,0041	4600
P3	Kalksteinmehl 159	2,7	8,3	0,59	0,37	1,02	0,50	0,0026	-
P4	Kalksteinmehl 179	2,73	2,2	0,61	0,38	0,59	0,37	0,0006	>9000
P5	Quarzmehl 175	2,6	3,5	0,92	0,48	0,98	0,49	-	12700
P6	Quarzmehl 9-10	2,65	13,6	0,85	0,46	1,23	0,55	0,0008	4640
P7	Dolomitmehl 101	2,90	3,3	0,85	0,46	1,12	0,53	0,0015	8300
P8	Dolomitmehl 31-19	2,86	20,7	0,61	0,38	0,72	0,42	0,0021	3000
P9	Mikrosilika 166	2,26	< 2μm*	1,28	0,56	1,05	0,51	-	-

* Theoretische Werte etwa 0,2 μm. Praktisch liegt das Material immer in größeren Agglomeraten vor.

Tabelle 3-1 der pulverförmigen Stoffe beinhaltet verschiedene Kennwerte für den Wasseranspruch eines Stoffes.

Alle Untersuchungen am Rheometer in dieser Arbeit wurden an Wasser/Pulver-Gemischen mit einem sehr niedrigen Wassergehalt durchgeführt. Zunächst wurde angestrebt Wasser/Pulver-Gemische herzustellen, deren Wassergehalt dem Wasseranspruch am Sättigungspunkt eines Gemisches entspricht (V_{WS}). Durch diesen Wasseranspruch ist eine äußerst geringe Fließfähigkeit vorhanden, da die Gemische grade so viel Wasser enthalten, dass die interpartikularen Zwischenräume mit Wasser gefüllt sind. Dieser Wasseranspruch kann als volumetrisches Verhältnis von V_{WS}/V_P (V_P – Volumen der pulverförmigen Bestandteile) ausgegeben werden. Alternativ kann die Ausgabe als Verhältnis des V-Wassergehaltes zum Gesamtvolumen n_w erfolgen:

$$n_w = \frac{V_{WS}}{V_{WS} + V_P} \quad 3-1$$

Die Werte V_{WS}/V_P und n_w können mit unterschiedlichen Verfahren ermittelt werden.¹⁰³ In dieser Arbeit wurden Werte des Wassergehaltes am Wasseranspruch der Gemische verwendet, die mit dem sogenannten Mischenergieverfahren (MEV)¹⁰³ ermittelt wurden. Damit konnten Versuche mit Wasser/Pulver-Gemischen und verschiedenen FM-Gehalten nach der mod. Okamura-Methode¹² durchgeführt werden. Leider stellte sich heraus das entsprechende Wasser/Pulver-Gemische zu steif waren, als das sie mit dem verwendeten Rheometer gemessen werden könnten.

Zudem zeigte es sich, dass einige Gesteinsmehle (Quarzmehle und Kalksteinmehl 179) sowie Mikrosilika mit dem Wassergehalt, des dem Sättigungswassergehalt entspricht, so steif waren, dass sie weder angerührt, noch gemessen werden konnten. Deshalb wurde festgelegt, die Stoffe in der Regel mit einem etwas höheren Wassergehalt für die Untersuchungen mit unterschiedlichen FM-Dosierungen im Rheometer anzumischen.

Es wurde zunächst bestimmt, welches Wasser/Pulver Verhältnis erforderlich ist, um ein Setzfließmaß von 130 mm mit dem Hägermann-Konus ohne Verdichtungsschläge auf trockener Glasplatte zu erzielen. Dieser Wert V_W/V_P Okamura ($d=130\text{mm}$) wurde als Wassergehalt des Ausgangsgemisches der Rheometer Versuche festgelegt.

Für einige Stoffe musste aber ein höheres V_W/V_P – Verhältnis gewählt werden, um sie überhaupt im Rheometer rühren zu können (siehe Kapitel 4.2)

In dieser Diplomarbeit werden zwei Fließmittel mit unterschiedlichen Ladungsdichten (siehe Kapitel 2.1.2) untersucht. Die Studenten Schönauer¹ und Maier² haben bereits im Vorhinein dieser Arbeit die Wirkung unterschiedlicher Fließmittel am Hobart Mischer untersucht. Die Eigenschaften der untersuchten Fließmittel ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

¹⁰³ David. 2014: Evaluierung von Methoden zur Messung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs pulverförmiger Stoffe für ressourceneffizienten Beton

Tabelle 3-2 physikalische Kennwerte der Fließmittel

Nr.	BEZEICHNUNG	DICHTE [g/cm ³]	FESTSTOFF- GEHALT [%]	LADUNGS- DICHTHE	KONSISTENZ- ERHALTUNG	VERFLÜSSIGUNGS- WIRKUNG	WIRKSTOFF
F1	Fließmittel 144	1,06	28	hoch	kurz	stark, kurzfristig andauernd	Polycarboxylatether
F2	Fließmittel 108	1,08	29	niedrig	lange	schwach, langfristig andauernd	Polycarboxylatether

3.2 Setzfließmaß-Versuche nach mod. Okamura Verfahren

3.2.1 Allgemeines

Schönauer¹ und Maier² haben die Wirkung unterschiedlicher Fließmittel auf ausgewählte pulverförmige Stoffe für Ressourcen optimierten Beton getestet. Zunächst wird ein kurzer Überblick sowie die Hintergründe über deren Untersuchungsprogramm gegeben. In Schönauer¹ und Maier² kann der detaillierte Ablauf und die Ergebnisse nachgelesen werden. Anhand eines modifizierten Verfahrens nach Okamura¹² wurde die Wirkung unterschiedlicher Fließmittel auf die pulverförmigen Stoffe von Ressourcen optimierten Beton untersucht. Die Fließmittel werden in der Fertigteile- und Transportbetonindustrie eingesetzt. Durch die Abweichung der jeweils benötigten Verarbeitungszeiten der Industrien werden die Fließmittel-Eigenschaften und somit auch die Untersuchungen von Schönauer¹ und Maier² zeitlich abgestimmt. Es gibt Langzeitversuche, die eine Dauer von 90 min haben und Kurzzeitversuche die sich über eine Dauer von 30 min erstrecken. In diesen beiden Zeiträumen soll die Wirkung der Fließmittel bestimmt werden. Die allgemeine Wirkung der Fließmittel ist bereits bekannt, jedoch sollen etwaige Wechselwirkungen beobachtet bzw. die Wirkung gezielt auf einzelne Stoffe hin untersucht werden. Die zeitliche Wirkung der Fließmittel, sowie die Verflüssigung in Abhängigkeit der Dosierungsmenge stehen dabei im Vordergrund. Anhand der Methodik nach Schmidt¹¹ ist es möglich die Ladungsdichte der Fließmittel zu bestimmen. Die untersuchten Fließmittel werden anhand dieser Methode charakterisiert und unterteilt.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen von Schönauer¹ und Maier² bzw. die Ergänzungen aus dieser Arbeit bilden gemeinsam die Grundlage für die weiteren Untersuchungen am Rheometer.

3.2.2 Versuchsdurchführung und Erkenntnisse für die rheologischen Untersuchungen

Das modifizierte Okamura¹² Verfahren ist eine Messung des Setzfließmaßes nach einem bestimmten vorgegebenen Ablauf. Das Setzfließmaß wird mit Hilfe eines Mörtel Konus ermittelt.



Bild 3-1 Ermittlung des Setzfließmaßes mittels Hägermann-Konus

Generell unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Abläufen. Aufgrund der Reaktionsfähigkeit von Zement benötigt man einen eigenen Ablauf für diesen Stoff und einen separaten Ablauf für Gesteinsmehle. Alle Untersuchungen werden nach diesen beiden Vorgaben abgehandelt. Die Abläufe sind in Tabelle 3-3 und in Tabelle 3-4 ersichtlich und werden im weiteren Verlauf näher behandelt.

In Punkt 1 erfolgt die Zugabe des Anmachwassers. Das Mischen der Ausgangsstoffe erfolgt dabei im Hobart Mischer (Bild 3-2). Bei allen Untersuchungen wird angestrebt mit einem Wasseranspruch am Sättigungspunkt zu arbeiten. Der Wasseranspruch wird dabei für jeden pulverförmigen Stoff nach Okamura¹² ermittelt (Gleichung 3-2). Die Ausgangsstoffe werden mit herkömmlichem Anmachwasser und dabei auf zwei verschiedenen Rührstufen miteinander vermengt. Nach der ersten Rührstufe erfolgt eine Pause, die dazu dient, den Rührstab und die Behälterwand von etwaigen Rückständen zu säubern und um somit eine gute Homogenisierung zu gewährleisten. Am Ende des ersten Punktes erfolgt eine Kontrollierung des Setzfließmaßes. Der angenommene Wasseranspruch soll die Sättigungsdosierung bestätigen und ein Setzfließmaß von $d=100\text{mm}$ ergeben.

$$nw = \frac{V_w}{V_k + V_w} = \frac{\frac{m_w}{\rho_w}}{\frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_w}{\rho_w}} \quad 3-2$$

nw	<i>Wasseranspruch = Wassergefüllter Porenanteil</i>
V_w	<i>Volumen des Wasserbedarfs bei Sättigung in dichtester Lagerung [cm³]</i>
V_k	<i>Volumen des eingewogenen Kornfeststoffes [cm³]</i>
m_w	<i>Masse des Wasserbedarfs bei Sättigung in dichtester Lagerung [g]</i>
m_k	<i>Masse des eingewogenen Kornfeststoffes [g]</i>
ρ_k	<i>Kornrohddichte [g/cm³]</i>
ρ_w	<i>Dichte des Wassers [g/cm³]</i>



Bild 3-2 Hobart Mischer

In Punkt 2 erfolgt die Fließmittelzugabe nach einer Pause. Diese Ruhephase dient zur Bildung von Reaktionsprodukten. Die Zugabe des Fließmittels erfolgt somit 10 min nach der Wasserzugabe. Aufgrund der weicheren Konsistenz infolge der FM- Zugabe wird nur mehr mit einer Rührstufe gemischt. Die Pause zwischen den Rührstufen dient wiederum der Säuberung des Rührstabes. Nach 15 min erfolgt die erste Messung des Setzfließmaßes. Nach der Messung wird die Suspension wieder zurück in den Mischbehälter gegeben. Eine erneute Messung nach 28 Minuten beginnt um die zeitliche Wirkung des FM beobachten zu können.

Punkt 4 und 5 sind ident zu Punkt 3. Die Verflüssigungswirkung wird mit der Messung des Setzfließmaßes nach Zugabe des Fließmittels ersichtlich. Der gesamte Versuchsablauf hingegen verschafft einen Überblick über die zeitliche Wirkung des Fließmittels.

Der Ablauf bei den Gesteinsmehlen unterscheidet sich durch eine zweite zusätzliche FM-Zugabe. Da es zu keiner Reaktion in der Suspension kommt, kann eine zweite höhere Dosierung vorgenommen werden, damit man einer etwaigen Sättigung nachgehen kann.

Tabelle 3-3 Ablaufplan für Zement

PUNKT	VON - BIS	DAUER [s]	RÜHRSTUFE	BEZEICHNUNG
1	00:00 - 01:30	90	I	mischen der Ausgangsstoffe
	01:30 - 02:30	60	II	mischen
	02:30 - 03:30	60		Pause
	03:30 - 04:30	60	I	mischen
	05:00			Setzfließmaß ermitteln
2	10:00 - 12:00	120	I	FM Zugabe
	12:00 - 13:00	60		Pause
	13:00 - 14:00	60	I	mischen
	15:00			Setzfließmaß ermitteln
3	25:00 - 26:00	60	I	mischen
	26:00 - 27:00	60	II	mischen
	bis 28:00			Setzfließmaß ermitteln
4	42:00 - 43:00	60	I	mischen
	43:00 - 44:00	60	II	mischen
	45:00			Setzfließmaß ermitteln
5	87:00 - 88:00	60	I	mischen
	88:00 - 89:00	60	II	mischen
	90:00			Setzfließmaß ermitteln

Tabelle 3-4 Ablaufplan für Gesteinsmehle

PUNKT	VON - BIS	DAUER [s]	RÜHRSTUFE	BEZEICHNUNG
1	00:00 - 02:00	120	I	mischen der Ausgangsstoffe
	02:00 - 03:00	60		Pause
	03:00 - 04:00	60	I	mischen
	05:00			Setzfließmaß ermitteln
2	10:00 - 12:00	120	I	erste FM Zugabe
	12:00 - 13:00	60		Pause
	13:00 - 14:00	60	II	mischen
	15:00			Setzfließmaß ermitteln
3	25:00 - 26:00	60	I	zweite FM Zugabe
	26:00 - 27:00	60	II	mischen
	bis 28:00			Setzfließmaß ermitteln
4	87:00 - 88:00	60	I	mischen
	88:00 - 89:00	60	II	mischen
	90:00			Setzfließmaß ermitteln

In der nachfolgenden Tabelle sind alle pulverförmigen Stoffe und die ausgewählten Fließmittel aus den Versuchen von Schönauer¹ und Maier² zusammenfassend dargestellt. Schönauer¹ und Maier² haben nur einen Teil, der in dieser Arbeit vorkommenden pulverförmigen Stoffe, untersucht. Die restlichen Stoffe welche für diese Arbeit von Relevanz sind wurden im Zuge dieser Diplomarbeit ergänzt.

Tabelle 3-5 alle Stoffe aus modifizierten Okamura¹² Versuchen

Fließmittel 144		Fließmittel 108	
BEZEICHNUNG	STUDENT	BEZEICHNUNG	STUDENT
Zement 67-1006	MAIER	Zement 67-1006	SCHÖNAUER
Zement 102	BOROVINA	Zement 102	BOROVINA
Kalksteinmehl 159	MAIER	Kalksteinmehl 159	SCHÖNAUER
Kalksteinmehl 179	MAIER	Kalksteinmehl 179	BOROVINA
Quarzmehl 175	BOROVINA	Quarzmehl 175	BOROVINA
Quarzmehl 9-10	MAIER	Quarzmehl 9-10	SCHÖNAUER
Dolomitmehl 101	MAIER	Dolomitmehl 101	SCHÖNAUER
Dolomitmehl 31-19	MAIER	Dolomitmehl 31-19	SCHÖNAUER
Mikrosilika 166	BOROVINA	Mikrosilika 166	BOROVINA

Mit Ergebnissen aus den modifizierten Okamura¹² Versuchen können Beziehungen aufgestellt werden, anhand welcher es möglich ist die Verflüssigungswirkung über die Dosierungsmenge gezielt zu steuern. In Bild 3-3 ist die Auswertung der Versuche dargestellt. Anhand dieser Auswertung werden die Dosierungsmengen der Fließmittel für die Hauptversuche am Rheometer bestimmt. Das Setzfließmaß der dargestellten Gemische steigert sich kontinuierlich in Folge der FM-Dosierung. Bei den meisten Gemischen (außer Kalksteinmehl 159) ist daher kein Anzeichen einer Sättigungsdosierung ersichtlich. Bei Erreichen der Sättigungsdosierung ist kein weiterer Anstieg des Setzfließmaßes möglich. Um die Sättigungsdosierung für die Gemische zu bestimmen wird daher die zweite FM-Zugabe bei den rheologischen Untersuchungen über der höchsten Dosierungen des jeweiligen Stoffes ausgewählt.

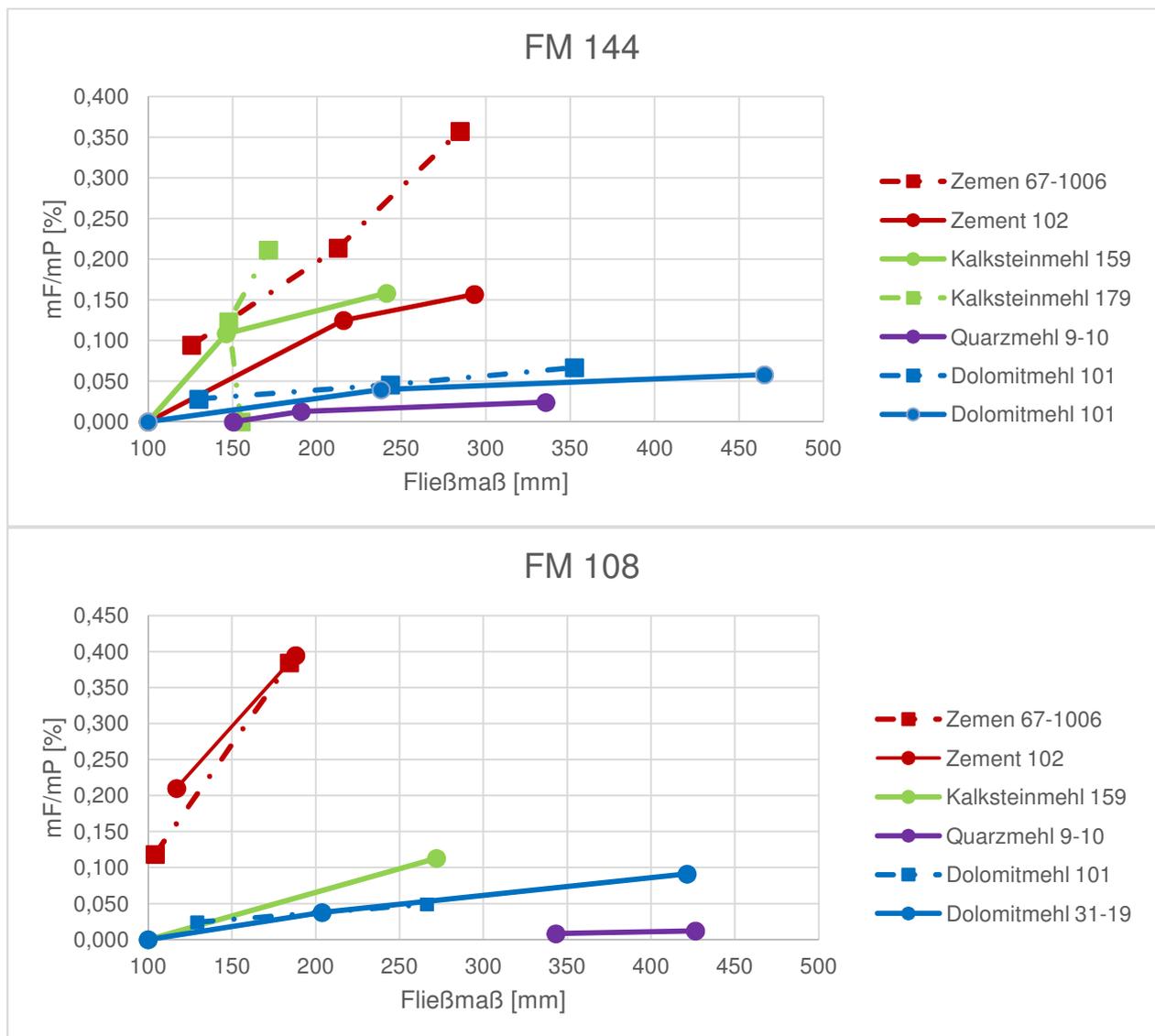


Bild 3-3 Auswertung der modifizierten Okamura¹² Versuche zur Bestimmung der Dosierungsmenge für die Untersuchungen am Rheometer. (Fließmittel 144 oben; Fließmittel 108 unten)

Das Untersuchungsprogramm sowie die gesamte Auswertung aller Versuche nach dem modifizierten Okamura¹² Verfahren ist den Arbeiten von Schönauer¹ und Maier² zu entnehmen. Basierend auf den Versuchen von Schönauer¹ und Maier² und den Erkenntnissen aus dieser Arbeit (Bild 3-3) werden mittels der Methode nach Schmidt¹¹ zwei Fließmittel mit unterschiedlichen Ladungsdichten bestimmt und für die weiteren Untersuchungen festgelegt: ein Fließmittel mit hoher Ladungsdichte für die Fertigteilindustrie und ein Fließmittel mit niedriger Ladungsdichte für die Transportbetonindustrie.

Die Methodik von Schmidt¹¹ ist auf die Untersuchungen von Schönauer¹ und Maier² übertragbar, da es sich bei beiden Methoden um idente Rahmenbedingungen handelt. Hauptkriterien sind dabei die Dosierungsmenge und die Wirkung der Fließmittel. Anhand der Ergebnisse aus Bild 3-3 konnten die Fließmittel untereinander verglichen werden und es wurde festgestellt, dass das Fließmittel 108 im Vergleich zu Fließmittel 144 für das gleiche Setzfließmaß eine deutlich höhere Dosierung benötigt. FM 144 hat bereits bei geringer Dosierung eine starke Wirkung jedoch nimmt diese mit der Zeit ab. Nach Schmidt¹¹ handelt es sich daher um ein Fließmittel mit hoher Ladungsdichte. Aus den Versuchen von Schönauer¹ und Maier² geht hervor, dass das FM 108 seine Wirkung erst mit der Zeit entfaltet. Schmidt¹¹ charakterisiert dieses Verhalten als niedrige Ladungsdichte.

3.3 Rheometer „Physica MCR 300“

Durch das Einfließen bereits vorhandener Arbeiten und Ergebnisse zur Thematik (Kapitel 2.2.2), konnten Parameter, die angesichts der Zieldefinition zu berücksichtigen sind, erfasst und bewertet werden. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der rheologischen Untersuchung folgender Parameter:

- Fließgrenze
- Viskosität

Wie in Kapitel 2.3 schon erläutert wurde, sollen anhand der oben angeführten Parameter die Wirkung der Fließmittel auf die Wasser/Pulver-Gemische erfasst werden. Die vorangegangenen Erkenntnisse durch das modifizierte Verfahren nach Okamura¹² dienen als richtungweisende Parameter für die experimentellen Untersuchungen am Rheometer. In dieser Diplomarbeit wird als Messgerät ein Rheometer der Firma Anton Paar verwendet. Es handelt sich dabei um das Physica MCR 300. Das Rheometer in nachfolgenden Bild dargestellt.



Bild 3-4 Rotationsrheometer Physica MCR 300

3.3.1 Vorversuche

Anhand der Literatur-Recherche werden ein Messablauf und ein genereller Ablauf definiert und Voruntersuchungen unterzogen. Ziel ist es anhand der Vorversuche die Abläufe für die Hauptversuche festzulegen.

Die in den Vorversuchen zur Anwendung kommenden Messabläufe sind in Tabelle 3-6, Tabelle 3-7 und Tabelle 3-8 dargestellt. Bei dem Ablauf in Tabelle 3-8 handelt es sich um eine modifizierte Methodik nach Schmidt¹⁰⁵. Der bestehende Ablauf wurde um einen zusätzlichen Punkt erweitert. Vor der eigentlichen Messung wird eine Vorscherung eingebaut. Der Einfluss der Vorscherung soll anhand des erweiterten Punktes beurteilt werden können. Die abnehmenden Drehzahlen werden beibehalten, damit eine bessere Mischwirkung gewährleistet wird. Die Messung des Widerstands erfolgt jeweils am Ende einer Geschwindigkeitsstufe.

Tabelle 3-6 Versuchsablauf nach Schachinger¹⁰²

PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	gesamt [s]
DREHZAHL [1/min]	100	80	65	52,5	40	30	20	300 s
DAUER [s]	120	30	30	30	30	30	30	

Tabelle 3-7 Versuchsablauf nach Schmidt¹⁰⁴

PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	gesamt [s]
DREHZAHL [1/min]	27	24	21	18	15	12	9	6	3	50 s
DAUER [s]	10	5	5	5	5	5	5	5	5	

Tabelle 3-8 modifizierter Versuchsablauf nach Schmidt¹⁰⁵

PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	gesamt [s]
DREHZAHL [1/min]	270	27	24	21	18	15	12	9	6	3	170 s
DAUER [s]	120	10	5	5	5	5	5	5	5	5	

Anhand der bereits im Vorhinein getätigten Versuche am Hobart Mischer (Studenten Schönauer¹ und Maier² wird entschieden die Vorversuche an 3 verschiedenen Pulvern vorzunehmen. Es handelt sich dabei um das Quarzmehl 9-10, das Kalksteinmehl 4-16 und Zement 67-1006. Die Messabläufe werden an diesen Gesteins- bzw. Zementleimen durchgeführt und auf ihre Wirksamkeit hin überprüft. Als Auswahlkriterien für den Ablauf

¹⁰⁴ Schmidt. 2014: Design Concepts for the Robustness Improvement, S. 129

¹⁰⁵ Mod. nach Schmidt S. 129

werden mehrere Aspekte festgelegt. Der wichtigste Aspekt dabei ist, dass der Ablauf so modifiziert werden soll, dass er mit dem Ablauf nach dem Okamura¹² Verfahren zeitlich vergleichbar ist. Für die Forschungsfrage steht die Interaktion der Fließmittel mit den pulverförmigen Stoffen dabei im Vordergrund.

Die FM-Zugabe findet bei beiden Verfahren zum gleichen Zeitpunkt (10 min nach Mischung der Ausgangsstoffe) statt. Die rheologische Messung findet ebenso zum selben Zeitpunkt statt wie die Messung des Setzfließmaßes. Eventuelle Korrelation beider Versuchsmethoden können dadurch nachverfolgt werden. In Tabelle 3-9 (Ablauf ohne FM-Zugabe) und Tabelle 3-10 (Ablauf mit FM-Zugabe) sind zwei Versuchsabläufe dargestellt.

Die jeweiligen Wasseransprüche der einzelnen pulverförmigen Stoffe sollen ein zufriedenstellendes Ergebnis bezüglich der Konsistenz für das Rheometer liefern, um eine fehlerfreie Messung zu gewährleisten. Bei dem Rheometer handelt es sich um ein sehr empfindliches Messgerät und deshalb dürfen die Suspensionen keine zu steife Konsistenz aufweisen. Die Mischzeit mit dem externen Rührer wird mit 4 Minuten definiert um eine möglichst gute Homogenisierung aller Ausgangsstoffe zu gewährleisten. Bei einer notwendigen externen Mischung ist eine Einbauzeit von 3 Minuten vorgesehen.

Tabelle 3-9 Ablauf ohne FM-Zugabe

PUNKT	VON - BIS	DAUER [min]	BEZEICHNUNG
1	00:00 - 04:00	4	<i>Hand-Rührer mischen</i>
2	04:00 - 07:00	3	<i>einbauen</i>
3	07:00 - 09:00	2	<i>Homogenisierung</i>
4	09:00	-	<i>Rheometer Messung</i>

Der Ablauf in Tabelle 3-10 dient zur Klärung der FM-Wirkung. Die FM-Zugabe erfolgt wie bei den Versuchen am Hobart Mischer 10 min nach Zugabe des Anmachwassers.

Tabelle 3-10 Ablauf mit FM-Zugabe

PUNKT	VON - BIS	DAUER [min]	BEZEICHNUNG
1	00:00 - 04:00	4	<i>Hand-Rührer mischen</i>
2	04:00 - 10:00	6	<i>Pause</i>
3	10:00 - 12:00	2	<i>Hand-Rührer mischen</i>
4	12:00 - 15:00	3	<i>einbauen</i>
5	15:00 - 17:00	2	<i>Homogenisierung</i>
6	17:00	-	<i>Rheometer-Messung</i>

Der Zeitpunkt der Fließmittelzugabe ist ein wesentlicher Aspekt bei der Erstellung der Methodik am Rheometer. Die Literatur-Recherche hat gezeigt, dass das Fließmittel dem Anmachwasser zugegeben werden kann. Dies ist jedoch nicht sinnvoll, wie zum einem die Arbeit von Herrn Maier gezeigt hat und zum anderen wurde auch durch die Arbeit von Schmidt¹ gezeigt, dass bei einer frühen FM-Zugabe die FM-Moleküle von Mineralneubildungen überwachsen werden und so nicht mehr für eine Konsistenzverbesserung zur Verfügung stehen. Es ist zu klären ob es möglich ist das

Fließmittel während der Messung im Rheometer zu dosieren, oder ob aus Gründen der nicht gut geeigneten Homogenisierung es doch besser ist, dass FM extern zuzugeben und dann erst ins Rheometer einzubauen. Die Frage ob die FM-Dosierung im Rheometer oder in einem externen Behälter erfolgen soll, sollte während den Voruntersuchungen geklärt werden.

Sowohl während der Messung bei reinem Wasseranspruch, als auch bei Messungen mit FM-Zugabe muss eine ausreichende Dispergierung der Suspensionen gewährleistet sein. Nicht nur während des Mischvorgangs ist auf dies zu achten, sondern auch während der Messung soll der Einfluss der Agglomeration auf die Rheologie der zu prüfenden Suspensionen möglichst gering sein. Die Implementation einer Vorscherung im eigenen Messablauf wird daher eingebaut. Etwaige Agglomerationen sollen auf ein Minimum reduziert werden um zu verhindern, dass diese die Messergebnisse verfälschen könnten.

Im Rahmen der Voruntersuchungen werden für das Rheometer verschiedene Rührer getestet. Es wird angestrebt einen Rührer zu verwenden, welcher außer der Messwirkung eine zusätzliche Rührwirkung aufweist. Diese Fragestellung zielt ebenfalls auf die Beantwortung der Frage ab, ob eine externe Mischung notwendig ist, oder ob die Mischung der Ausgangsstoffe eventuell im Messbehälter durch den Rührer selbst erfolgen kann. Die beiden Rührer, welche bei den Untersuchungen zur Anwendung kommen, wurden selbst am Institut hergestellt. Es handelt sich dabei um einen Helix- und einen Schnecken-Rührer (Bild 3-5).

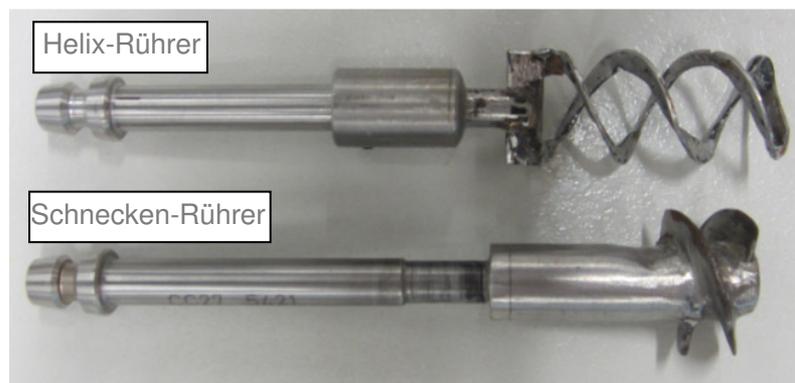


Bild 3-5 Rührer für das Rheometer

Für die externen Mischungen wird für das Anrühren der Ausgangsstoffe ein handelsüblicher 3-Stufen Rührer wie in Bild 3-6 verwendet.



Bild 3-6 Handrührer zum Mischen der Ausgangsstoffe

Das Fassungsvermögen des Messbehälters im Rheometer beträgt 20 cm³. Die effektive Einwaage der Ausgangsstoffe muss in Abhängigkeit dieses zur Verfügung stehenden Volumens durch eine Stoffraumrechnung ermittelt werden. Die Berechnung der Einwaage wird im nachfolgenden erläutert.

Vor der Versuchsdurchführung wird zuerst das Volumen für den Mischbehälter festgelegt. In Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden Volumen wird die einzuwiegende Menge der einzelnen Bestandteile (Pulver und Wasser) ermittelt. Das gesamte Volumen für das Anrühren setzt sich aus den einzelnen Bestandteilen aller Ausgangsstoffe (Pulver + Wasser) zusammen.

$$V_{ges} = \frac{m_P}{\rho_P} + \frac{m_W}{\rho_W} \quad 3-3$$

Es wird zunächst von einer fiktiven Einwaage des pulverförmigen Stoffes ausgegangen. In Abhängigkeit vom Wasseranspruche des Stoffes kann die Einwaage für das Wasser errechnet werden. Diese beiden Stoffe nehmen ein bestimmtes Volumen ein. Dieses Volumen muss auf das zur Verfügung stehenden Volumen des Mess- bzw. Mischbehälters skaliert werden. Der Skalierungsfaktor für die Umrechnung auf ein konkretes Volumen errechnet sich nach folgender Gleichung:

$$x^* = \frac{m^*}{V_{ges}} \quad 3-4$$

Die effektive Einwaage eines Stoffes ist von der Größe des Mischbehälters bzw. dem zur Verfügung stehenden Volumen abhängig und errechnet sich nach folgender Gleichung:

$$m^* = V_{Mischbehälter} * x^* \quad 3-5$$

Für den Fall eines externen Anrührens werden die in Ausgangsstoffe in einem größeren Mischbehälter angerührt. Aufgrund des größeren zur Verfügung stehenden Volumens ist eine zusätzliche Rückrechnung für die Einwaage in den Messbehälter notwendig. Das Mengenverhältnis der Ausgangsstoffe zueinander muss nach dem Abfüllen in den Messbehälter gleich bleiben. In der nachfolgenden Abbildung sind der Messbehälter des Rheometers, sowie ein Mischbehälter für ein externes Mischen dargestellt.



Bild 3-7 Messbehälter für das Rheometer (links) und Mischbehälter für Handrührer (rechts)

3.3.2 Ergebnisse

Die Voruntersuchungen ergaben, dass sowohl der Helix-, als auch der Schnecken-Rührer aufgrund der jeweiligen Geometrie und des geringen Fassungsvermögens des Behälter vom Rheometer für eine Rührfunktion nicht geeignet sind. Dies wird vor allem darauf zurückgeführt, dass die Rührer nicht in der Lage sind die Ausgangsstoffe zu homogenisieren. In den Hauptuntersuchungen wurde vom Helix-Rührer abgewichen, da es zu einer Randausbildung der Suspension im Messbehälter des Rheometers kommt und sich die Masse im Rührer verklebt (Bild 3-8) und die Messung somit fehlerhaft ist. Somit wurde für die Hauptversuche mit dem Schnecken-Rührer gearbeitet und zusätzlichen werden vor der Messung im Rheometer alle Ausgangsstoffe in einem externen Mischbehälter angerührt.

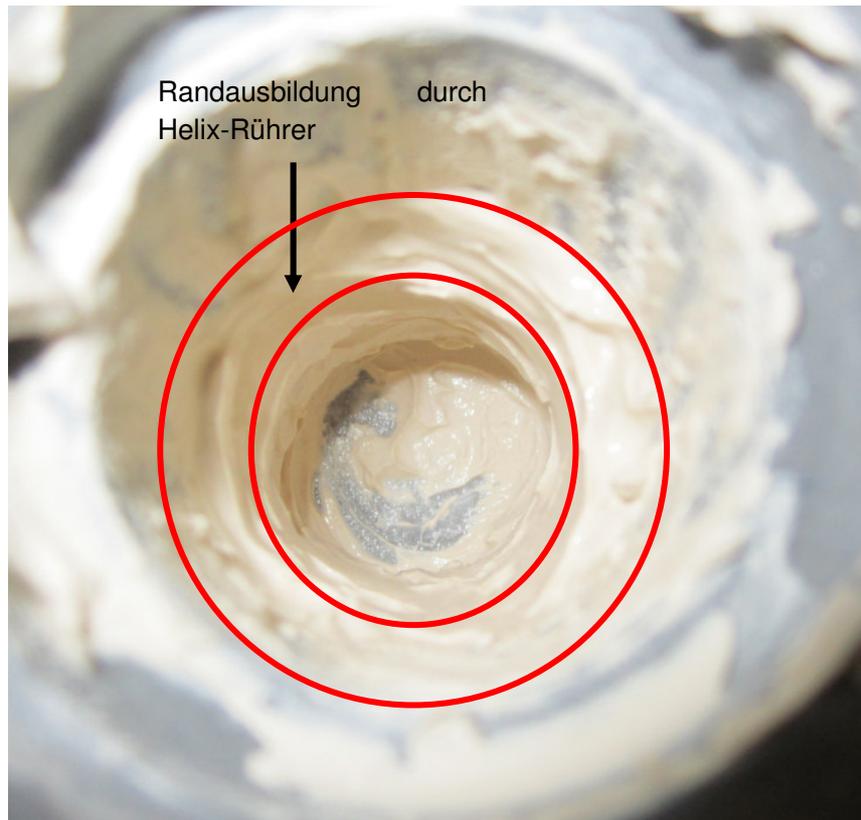


Bild 3-8 Randausbildung der Suspension im Rheometer-Messbehälter durch Helix-Rührer

Die ersten Voruntersuchungen am Rheometer wurden an Wasser/Pulver-Gemischen am Sättigungspunkt des Wasseranspruchs durchgeführt. Die damit verbundene äußerst geringe Fließfähigkeit der Gemische zeigte sich jedoch als zu steif, als das sie mit dem verwendeten Rheometer gemessen werden konnte. Deshalb wurden die weiteren Untersuchungen an einem definierten Punkt (Setzfließmaß von 130mm) nahe dem Sättigungswasseranspruch fortgesetzt (siehe Kapitel 3.1).

Die Fließmittelzugabe muss extern während des Mischens der Ausgangsstoffe getätigt werden, da die Voruntersuchungen gezeigt haben, dass eine Zugabe des Fließmittels während der Messung im Rheometer nicht zur Gänze in der ganzen Suspension homogen verteilt wird.

Bei der Wahl eines geeigneten Messablaufs wurden drei verschiedene Stoffe an drei verschiedenen Abläufen untersucht. der Versuche von Schönauer¹ und Maier² wurde das Quarzmehl 16900 als problematisch eingestuft. Diese Erkenntnis konnte auch in den Vorversuchen bestätigt werden. Da ein Messablauf gefunden werden sollte, der für alle Stoffe verwendet werden kann wurden die Vorversuche mit dem Quarzmehl 9-10 durchgeführt. Dies geschah in der Annahme, dass wenn ein Messablauf auch für dieses Material funktioniert, wird dieser auch für weniger problematische Stoffe genutzt werden können.

In Bild 3-9 ist die Auswertung des Messablaufs nach Schmidt¹⁰⁴ dargestellt. Die Fließkurve weist eine große Streuung auf und entspricht keiner bekannten Regressionsfunktion. Aufgrund der großen Streuung ist dieser Ablauf für die Stoffe in dieser Arbeit nicht anwendbar.

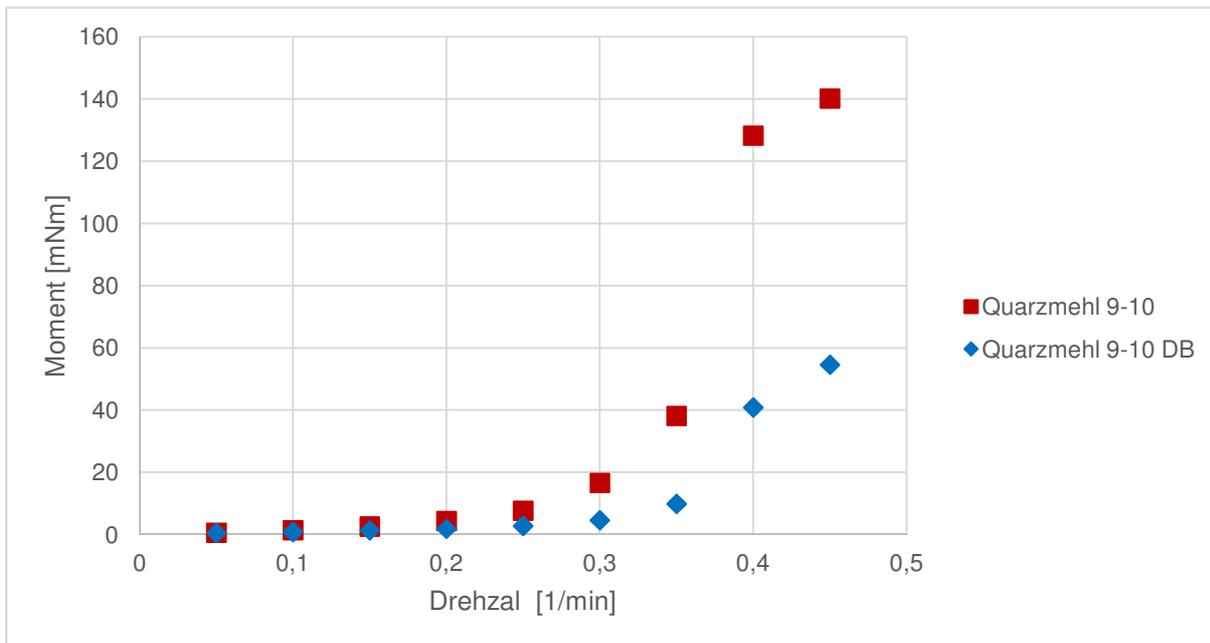


Bild 3-9 Messablauf nach Schmidt¹⁰⁴

Der modifizierte Messablauf nach Schmidt¹⁰⁵ mit der implementierten Vorscherung zeigt deutlich bessere Resultate. Die Daten der Messreihe und die daraus entstehende Fließkurve sind im Vergleich zu einem Ablauf ohne Vorscherung präziser ausgeprägt. Die Vorscherung wirkt sich positiv auf die nachkommende Messung aus und ist bei der Erstellung einer Methodik am Rheometer zu implementieren. Die Messwerte liefern im Vergleich zu einem Ablauf ohne Vorscherung zufriedenstellendere Ergebnisse, die Streuung ist aber dennoch immer zu hoch.

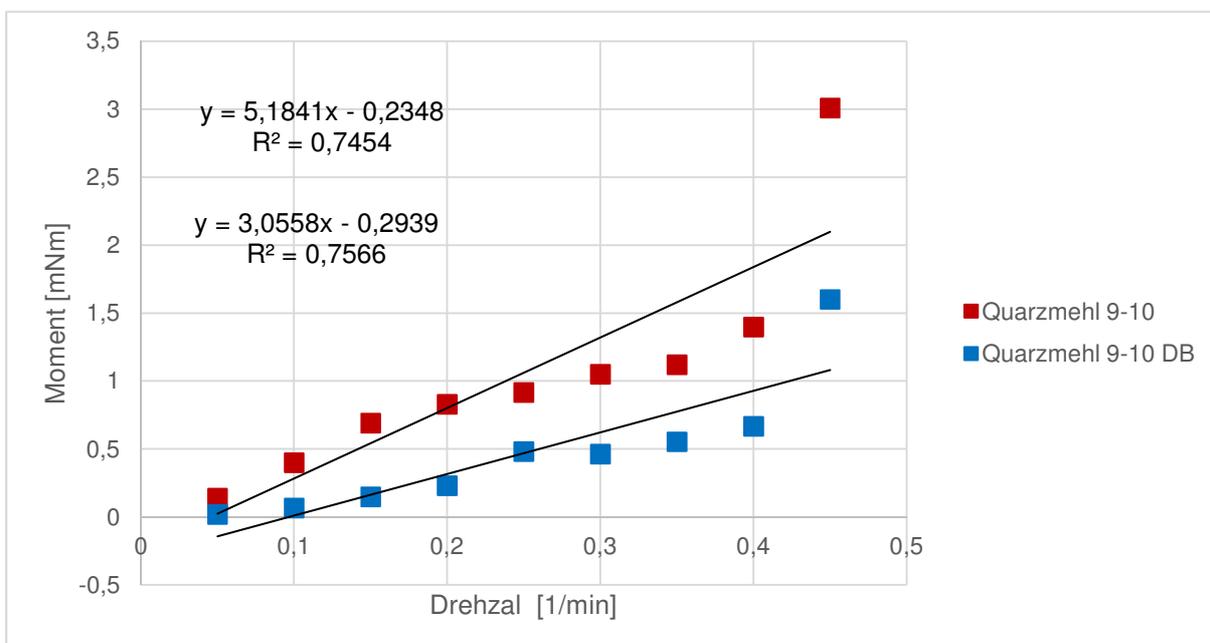


Bild 3-10 modifizierter Messablauf nach Schmidt¹¹

Aufgrund der oben angeführten Erkenntnisse schied diese beiden Messablauf (mit und ohne Vorscherung) für weitere Voruntersuchungen aus.

Die besten Ergebnisse der Vorversuche wurden mit dem Messablauf nach Schachinger¹⁰² erzielt. Aufgrund der hohen Drehzahlen streut die Fließkurve nur in geringem Maß und es wird eine bessere Homogenisierung des Materials während der Messung gewährleistet. Der Ablauf erlaubt es Viskosität und Fließgrenze einer Suspension zu bestimmen.

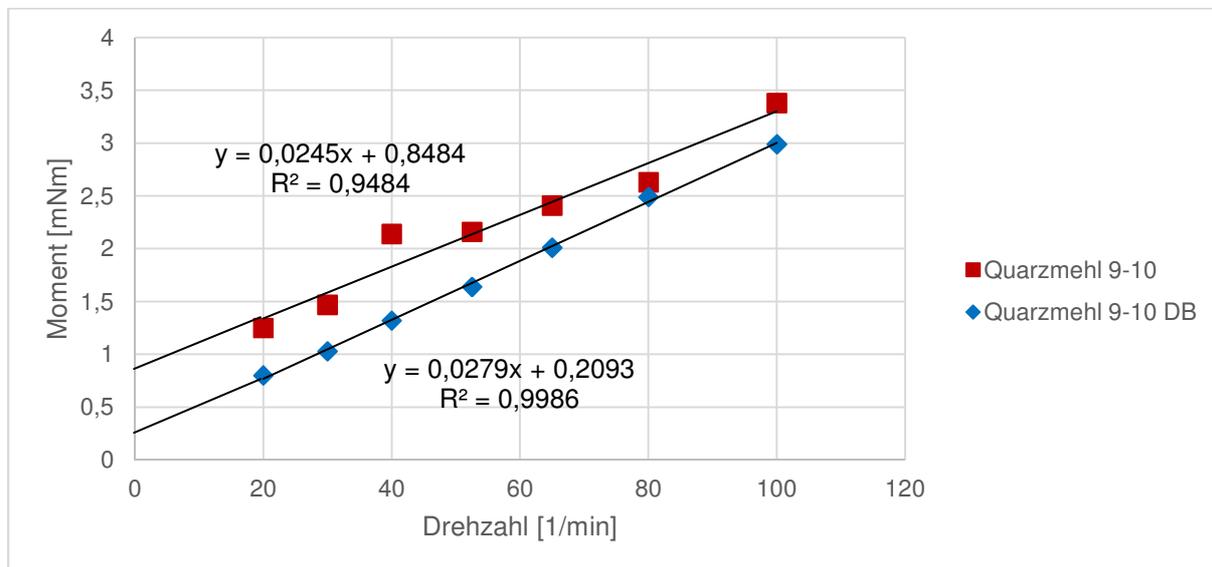


Bild 3-11 Messablauf nach Schachinger¹⁰²

Die restlichen Untersuchungen wurden nur mehr am Ablauf von Schachinger¹⁰² weiterverfolgt. Der Messablauf nach Schachinger¹⁰² wurde im weiteren Verlauf der Versuche um 4 Punkte erweitert und so für die Hauptuntersuchungen modifiziert. Die maximale Drehzahl beträgt nun 240 [1/min] für 120 Sekunden und wird im neuen Ablauf als Vorscherung definiert. Diese wird bei der Auswertung der Messdaten nicht berücksichtigt. Die eigentliche Messung aller Versuche startet somit nach 120 Sekunden. Außerdem werden für eine genauere Beschreibung der Fließkurve pro Sekunde ein Messpunkt gesetzt (Tabelle 3-11).

Tabelle 3-11 Messablauf für Hauptuntersuchungen

PUNKT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	GESAMT [min]
DREHZAHL [1/min]	240	205	170	135	100	80	65	52,5	40	30	20	
DAUER [s]	120	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Δ n	35			20			12,5		10			

Im Rahmen der Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass eine kürzere Belastungsdauer nicht sinnvoll ist. Schmidt¹⁰⁴ setzt die Leimproben einer Belastung von 5 Sekunden aus, Schachinger¹⁰² hingegen 30 Sekunden. Für die Auswertung der Hauptversuche wird die Belastungsdauer von Schachinger¹⁰² beibehalten. Aufgrund des Stufenverlaufs wird nicht der ganze Messdatenbereich für die Auswertung der Daten herangezogen. In der nachfolgenden Abbildung ist ein gesamtes Messprofil in der Grafik (Bild 3-12) dargestellt. Dabei ist

ersichtlich das sich in den ersten 220 Sekunden keine konstanten Stufe ausbildet, nach Feys¹⁰⁶ deutet das daraufhin das das Material nicht homogen verteilt ist. Aus diesem Grund werden nur die letzten 2/3 einer Belastungsstufe ausgewertet, da sich ab diesem Zeitpunkt ein konstantes Moment einstellt und das dies der eigentliche Widerstand ist, welche die Suspension der Drehung entgegensetzt (siehe Bild 3-12 und Bild 3-13).

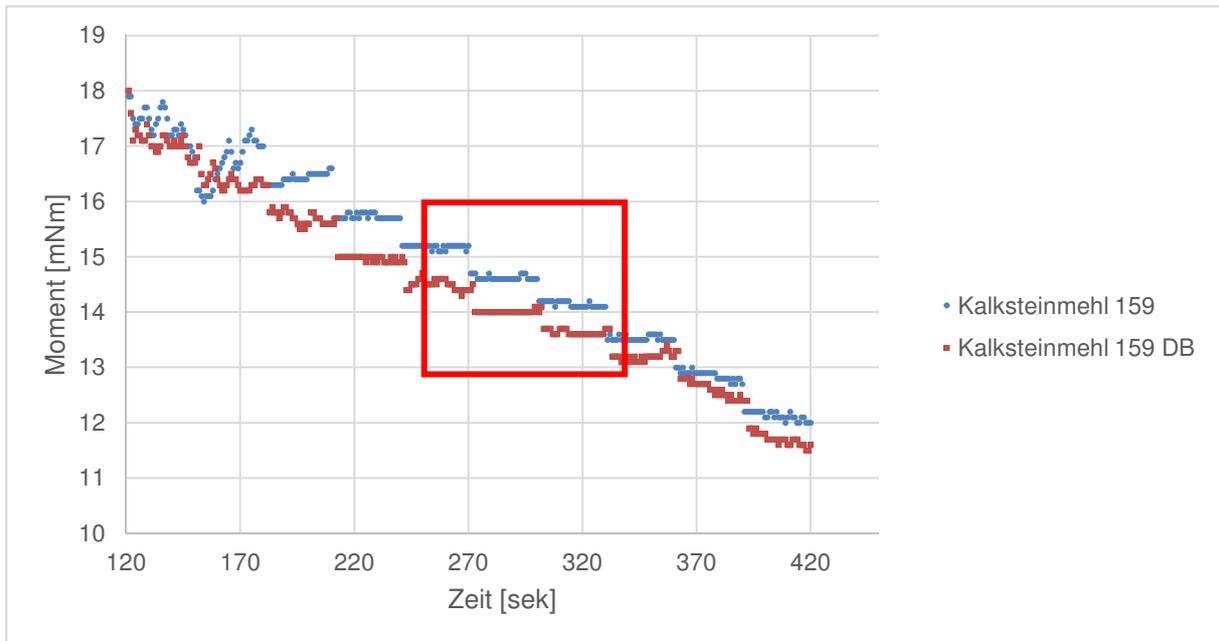


Bild 3-12 Stufenverlauf einer Messung am Rheometer

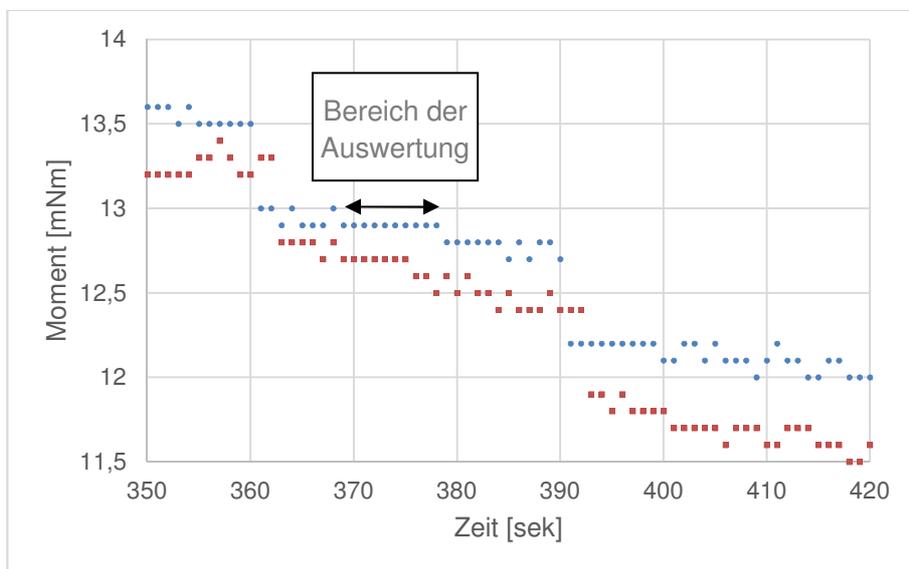


Bild 3-13 Bereich der in die Auswertung einer Fließkurve herangezogen wird

¹⁰⁶ Feys. 2014: Sieben Schritte zur Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit rheologischer Messungen an zementgebundenen Baustoffen, S. 58 – 64.

3.3.3 Erkenntnisse für die rheologischen Hauptuntersuchungen

Anhand der Bestimmung des Setzfließmaßes mit dem Hägermann-Konus konnte mit Hilfe der Analyse von Schmidt¹¹ das Fließmittel 144 als das FM mit der hohen Ladungsdichte und das Fließmittel 108 als das FM mit der niedrigen Ladungsdichte definiert werden. Die FM-Dosierungen für die Untersuchungen am Rheometer werden anhand der Versuche nach der modifizierten Okamura-Methode¹² definiert. Mittels der Auswertung der modifizierten Okamura¹² Versuche wird die Dosierungsmenge für die Versuche am Rheometer ermittelt, wobei die Dosierungsmengen nur Richtwerte bilden.

Für die Hauptversuche wurde der Ablauf nach Schachinger¹⁰² ausgewählt und für eine bessere Dispergierung um 4 Belastungsstufen erweitert. Zur möglichst genauen Ermittlung der Fließkurve ist es notwendig eine ausreichende Anzahl an Rotationsgeschwindigkeitsstufen zu wählen. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei zu geringen Belastungen eine fehlerfreie Messung aufgrund auftretender Agglomeration nicht gewährleistet werden kann und dass zu hohe Rotationsgeschwindigkeiten die Struktur der Suspension zerstören (Bild 3-14). Bei einem linearen Bingham Modell ist zur Verringerung von Ungenauigkeit der Messdaten Ablauf mit zumindest 5 Datenpunkten zu definieren. Für die Auswertung der Messdaten sind nur Bereiche mit einem bereits eingestellten Gleichgewichtszustand heranzuziehen. Eine ausreichend lange Vorscherphase bei höchster Rotationsgeschwindigkeit ist im Ablauf zu implementieren, um das Eintreten des Gleichgewichts sicherzustellen.¹⁰⁷

Mit Hilfe der Auswertung der modifizierten Okamura¹² Versuche bzw. der rheologischen Untersuchungen soll auf etwaige Korrelationen beider Verfahren geschlossen werden.

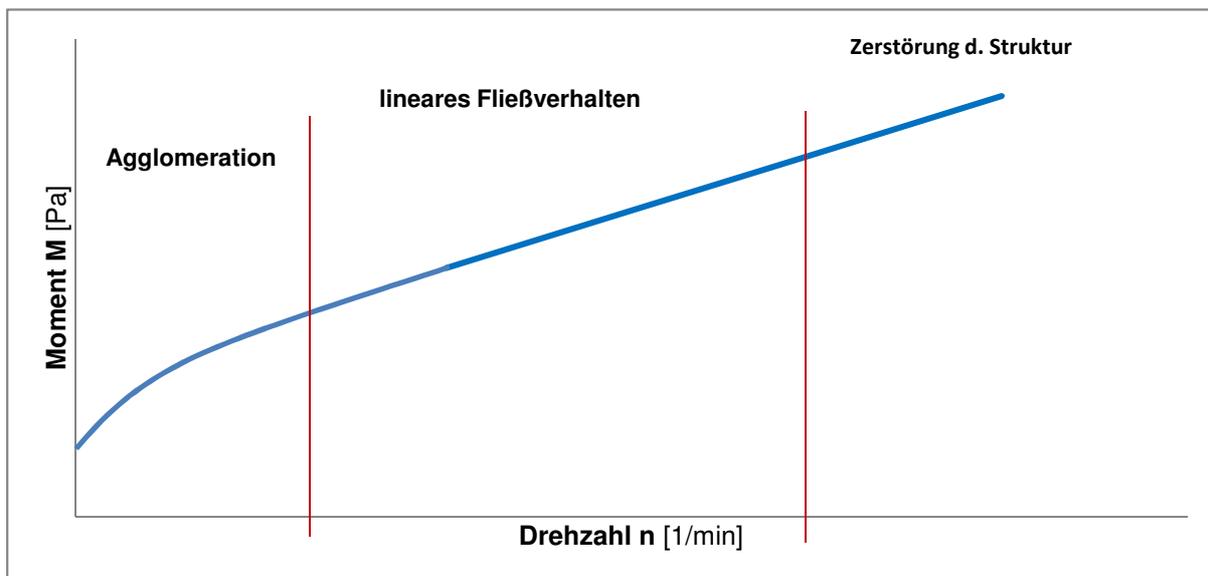


Bild 3-14 Bereich mit linearem Fließverhalten ist für die Auswertung der Untersuchungen heranzuziehen.

¹⁰⁷ Feys, 2014: Sieben Schritte zur Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit rheologischer Messungen an zementgebundenen Baustoffen, S. 58 – 64.

3.4 Rheologische Untersuchungen

In diesem Abschnitt wird das Konzept für die Hauptuntersuchungen am Rheometer dargestellt. Im Hinblick zur Ermittlung der rheologischen Parameter (Fließgrenze, Viskosität) werden die Rahmenbedingungen für die experimentellen Untersuchungen festgelegt.

3.4.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit werden eigens eingeführte Indizes verwendet. Im Sinne einer einheitlichen und klaren Darstellung sind in Tabelle 3-12 die Indizes, welche in dieser Arbeit verwendet worden sind beschrieben.

Tabelle 3-12 Indizes für die Hauptversuche am Rheometer

Wasseranspruch nw	Fließmittel 144		Fließmittel 108	
	erste FM Zugabe	zweite FM Zugabe	erste FM Zugabe	zweite FM Zugabe
M1V1	M1V2	M1V3	M2V1	M2V2
M1V1-DB	M1V1-DB	M1V3-DB	M2V1-DB	M2V2-DB

M Mischung

V Versuch

DB Doppelbestimmung

3.4.2 Wasseranspruch, Ausgangskonsistenz und Lösungsschemie

Die Versuche an den verschiedenen Wasser/Pulver-Gemischen sollen möglichst nahe am Sättigungswasseranspruch erfolgen, da eine Vergleichbarkeit der Gemische untereinander Voraussetzung zur Bestimmung der FM-Wirkung ist. Die Untersuchungen werden an einem definierten Punkt über der Sättigungsgrenze des Wasseranspruchs der einzelnen Stoffe getätigt um eine fehlerfreie Messung zu gewährleisten und um etwaigen Korrelationen zwischen Ausbreitmaß und Rheometer Messung nachgehen zu können.

Als Vergleichskriterium wurde dabei ein Setzfließmaß von 130mm festgelegt, da angestrebt wird eine bestimmte Ausgangsfließgrenze für alle pulverförmigen Stoffe am Rheometer zu gewährleisten. Aufgrund der Erfahrung anhand der modifizierten Versuche nach Okamura¹² ist bekannt, dass einige Stoffe das festgelegte Setzfließmaß von 130mm überschreiten werden, da es infolge des Anrührens durch den Mischer nicht möglich ist mit einem geringeren Wasseranspruch zu arbeiten. Eine zu steife Konsistenz ruft sowohl bei der Mischapparatur als auch beim Rheometer Probleme hervor. Stoffe mit einer zu steifen Konsistenz werden in einem separaten Kapitel (Kapitel 4.2) abgehandelt. Der Wasseranspruch der einzelnen pulverförmigen Stoffe wird anhand der Okamura¹² Methode, durch drei Messungen unterschiedlicher V_W/V_P Verhältnisse, empirisch ermittelt.

Für die Versuche wird in der Regel destilliertes Wasser eingesetzt um etwaigen chemischen Wechselwirkungen mit der Lösungsschemie entgegenzuwirken. Stichprobenartig werden auch einzelne Versuche mit einer der Porenlösung von Beton ähnlichen Zusammensetzung (alkalisches Milieu) durchgeführt.

3.4.3 Fließmitteldosierung

Die Dosierungsmengen für die Fließmittelzugaben in den Hauptversuchen können nicht zur Gänze anhand der Auswertung aus Bild 3-3 von Schönauer¹ und Maier² bestimmt werden, da die Versuche nach dem modifizierten Okamura¹² Verfahren und die rheologischen Messungen mit unterschiedlichen Wasseransprüchen (da Rheometer aufgrund der steifen Konsistenz anhand des Wasseranspruches nach MEV nicht fehlerfreie Messungen liefert) durchgeführt wurden. Die Dosierungsmengen aus der Auswertung bilden lediglich Richtwerte.

Die Fließmitteldosierungen werden entsprechend der einzelnen Stoffe festgelegt. Grundlegend werden pro Stoff zwei Dosierungen getätigt; eine geringe und hohe Dosierung zur Bestimmung der Sättigungsdosierung.

$$D = \frac{mF}{mP} [\%] \quad 3-6$$

mF *Masse von Fließmittel (nur Wirkstoff)*

mP *Masse von Pulver*

In der Stoffraumrechnung wird ein konstantes V_W/V_P Verhältnis vor und nach der Zugabe des Fließmittels berücksichtigt. Wasser und Feststoff des Fließmittels werden daher in der Stoffraumrechnung dementsprechend berücksichtigt.

Es wird angestrebt nur die Wirkung der FM-Moleküle zu untersuchen, dass enthaltene Wasser des Fließmittels wird aus diesem Grund bei der Ermittlung der FM-Dosierung nicht einbezogen (siehe Gleichung 3-6).

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, der in dieser Arbeit getätigten Untersuchungen zusammenfassend, aufbereitet. Die Auswertung des experimentell ermittelten Datensatzes fokussiert sich dabei auf die rheologischen Parameter Fließgrenze und Viskosität.

Die Ergebnisse für die „Fließgrenze“ und „Viskosität“ sind aus den gemessenen Momenten und Drehzahlen nur als Relativwerte abzulesen. Die Drehzahlen können als relative Scherraten und die Momente bei Drehzahl „0“ als „relative Fließgrenze M_0 “ bezeichnet werden (Gleichung 4-1).

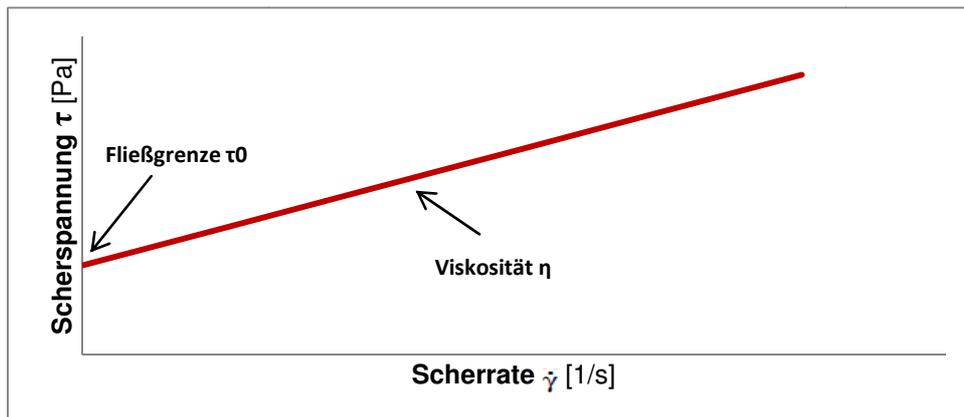


Bild 4-1 allgemeine Darstellung einer Fließkurve

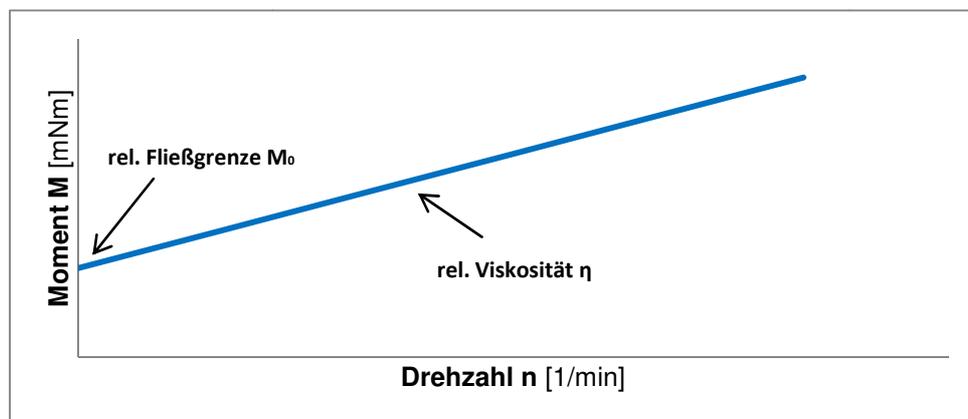


Bild 4-2 Darstellung einer Fließkurve für die Auswertung der rheologischen Untersuchungen in dieser Arbeit

$$M = rel.\eta * n + M_0 \quad 4-1$$

- M Moment M - entspricht relativer Scherspannung
 η relative Viskosität
 n Drehzahl n - entspricht relativer Schergeschwindigkeit / Scherrate
 M_0 relative Fließgrenze

Es handelt sich um Geräte-spezifische und von Geometrie des Rührers bzw. Messbehälters und Füllvolumen abhängige Größen, die nicht direkt in eine Scherspannung und Schergeschwindigkeit umgerechnet werden können, diesen Größen aber proportional sind.

Für eine Vergleichbarkeit der Stoffe untereinander wurde bei allen Stoffen von einer gleichen Anfangskonsistenz (130mm) ausgegangen. Bei den Stoffen, die auf geringe Schwankungen in der Wasserzugabe mit einem stark voneinander abweichenden Fließverhalten (Setzfließmaße > 130mm) reagierten, war es nicht möglich reproduzierbare Anfangskonsistenzen zu erhalten. Da dadurch die Vergleichbarkeit untereinander nicht gegeben ist, werden diese Stoffe in einem gesonderten Kapitel genauer auf ihre rheologischen Eigenschaften hin beschrieben und untersucht.

4.1 Pulverförmige Stoffe mit konstanter Ausgangskonsistenz

In dem folgenden Kapitel werden die Auswertungen aller Wasser/Pulver-Gemische dargestellt, die eine gleiche Ausgangskonsistenz (130mm) aufweisen. Es handelt sich dabei um Zement 67-1006, Zement 102, Kalksteinmehl 159, Dolomitmehl 101 und Dolomitmehl 31-19.

4.1.1.1 Ergebnisse aus den Messungen der einzelnen Stoffe

Für ein vertieftes Verständnis werden in diesem Abschnitt die einzelnen Auswertungen der Wasser/Pulver-Gemische dargestellt.

In den jeweiligen Diagrammen ist das Volums bezogene V_w/V_w bzw. das Massen bezogene Verhältnis m_w/m_p der Gemische dargestellt.

Anhand der Diagramme kann die Reduzierung der Fließgrenze in Bezug auf die relative Ausgangsfließgrenze (Angabe in %) abgelesen werden.

Die FM-Dosierungen sind ebenfalls angeführt. Zu jeder FM-Dosierung wurde angestrebt anhand einer parallelen Messung das Setzfließmaß mit dem VICAT-Ring zu ermitteln. Die konstante Ausgangskonsistenz jedes Wasser/Pulver Gemisches entspricht einen Mini-Setzfließmaß von etwa 100 mm.



Bild 4-3 Ermittlung des Setzfließmaßes mit VICAT-Ring

In Bild 4-4 sind die „relative Scherspannung“, angegeben als Moment in Abhängigkeit der relativen Scherrate/Schergeschwindigkeit, angegeben als Drehzahl aller Wasser/Pulver-Gemische mit einem Setzfließmaß von ~ 130 mm (Hägermann-Konus) dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die relativen Fließgrenzen aller Stoffe einen Wert von etwa 4 mNm annehmen. Das zeigt, dass das Einstellen aller Wasser/Pulver mit derselben Ausgangskonsistenz geglückt ist, indem für jeden Stoff sein Wasseranspruch für ein Setzfließmaß von 130 mm (geprüft mit dem Hägermann Konus, ohne Verdichtungsstöße) vorab ermittelt wurde.

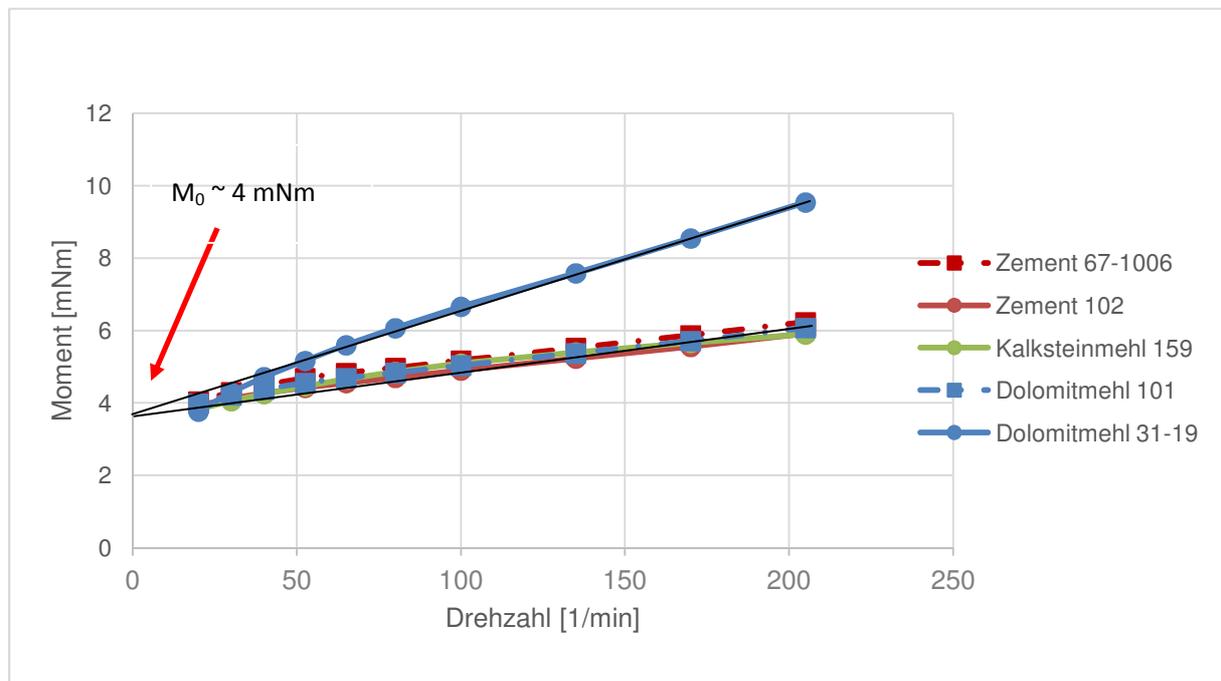


Bild 4-4 Fließkurven der Wasser/Pulver-Gemische mit konstantem Wasserbedarf und einem Setzfließmaß von 130 mm

Im Weiteren folgen nun die Auswertungen der einzelnen Gemische. Die Fließkurven bilden gemittelte Werte aus doppelt getätigten Messungen der jeweiligen Mischungen.

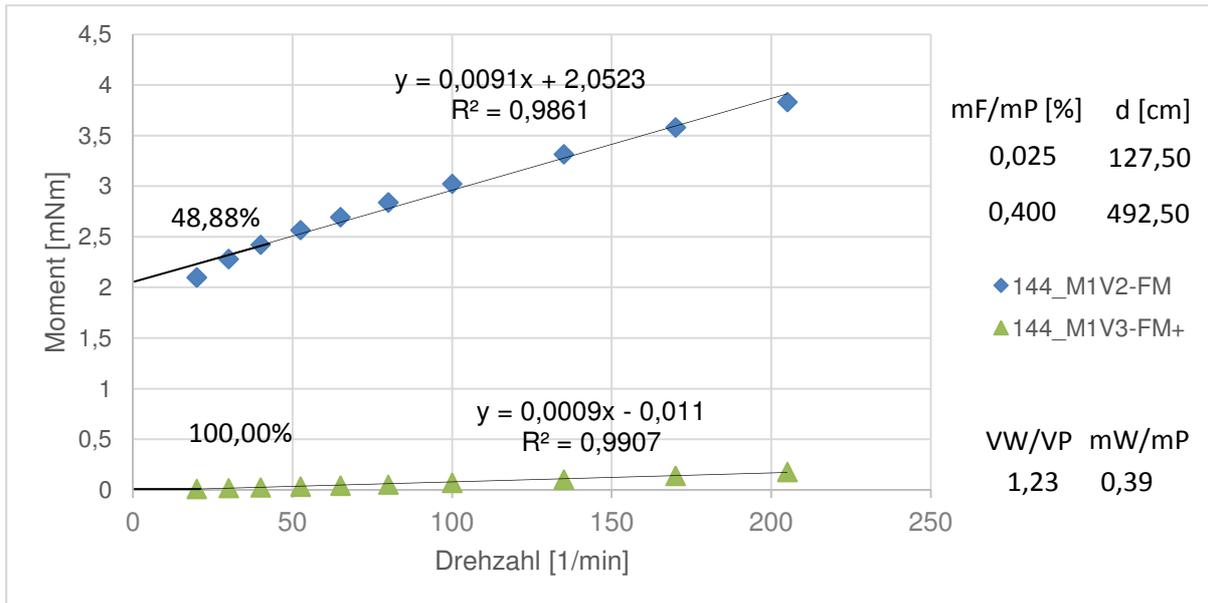


Bild 4-5 Fließkurven von Zement 67-1006 und FM 144

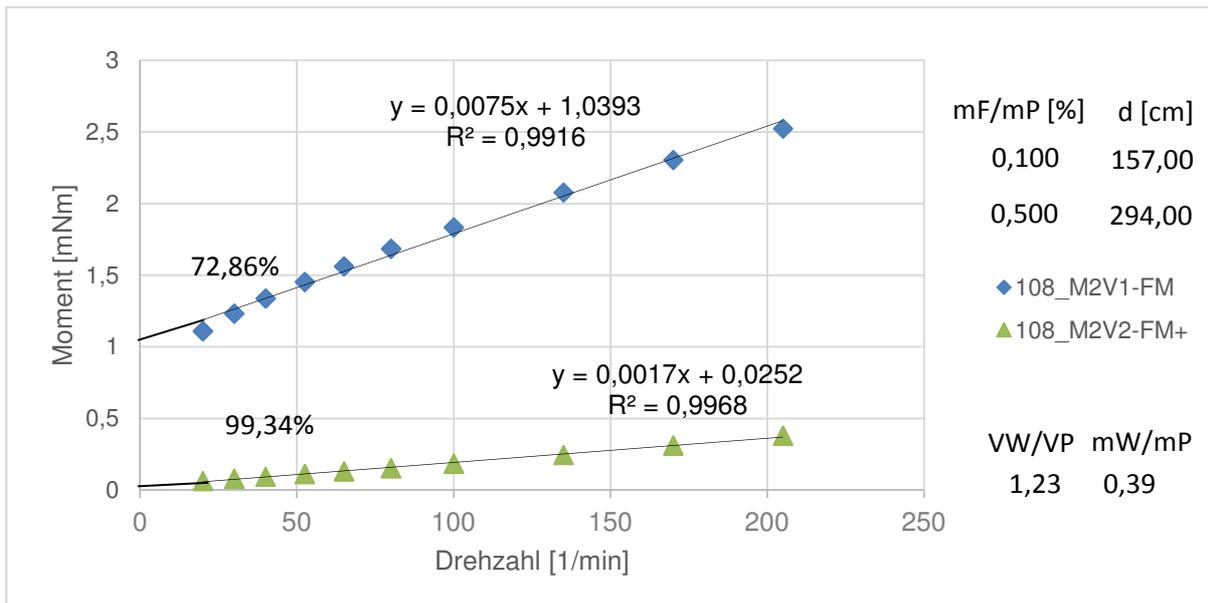


Bild 4-6 Fließkurven von Zement 67-1006 und FM 108

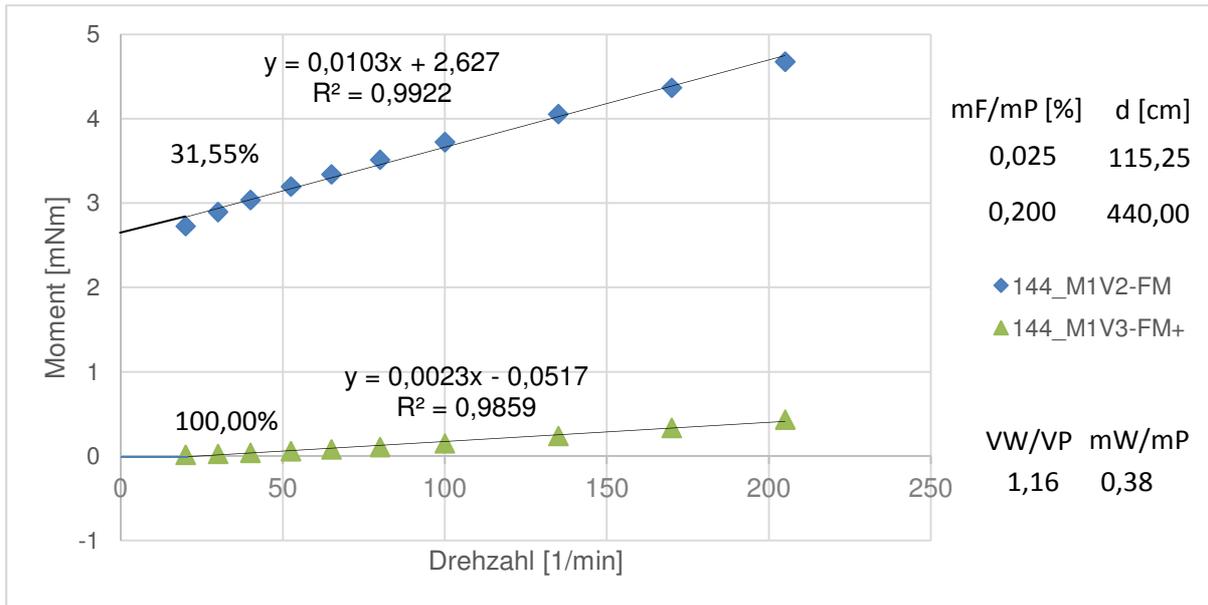


Bild 4-7 Fließkurven von Zement 102 und FM 144

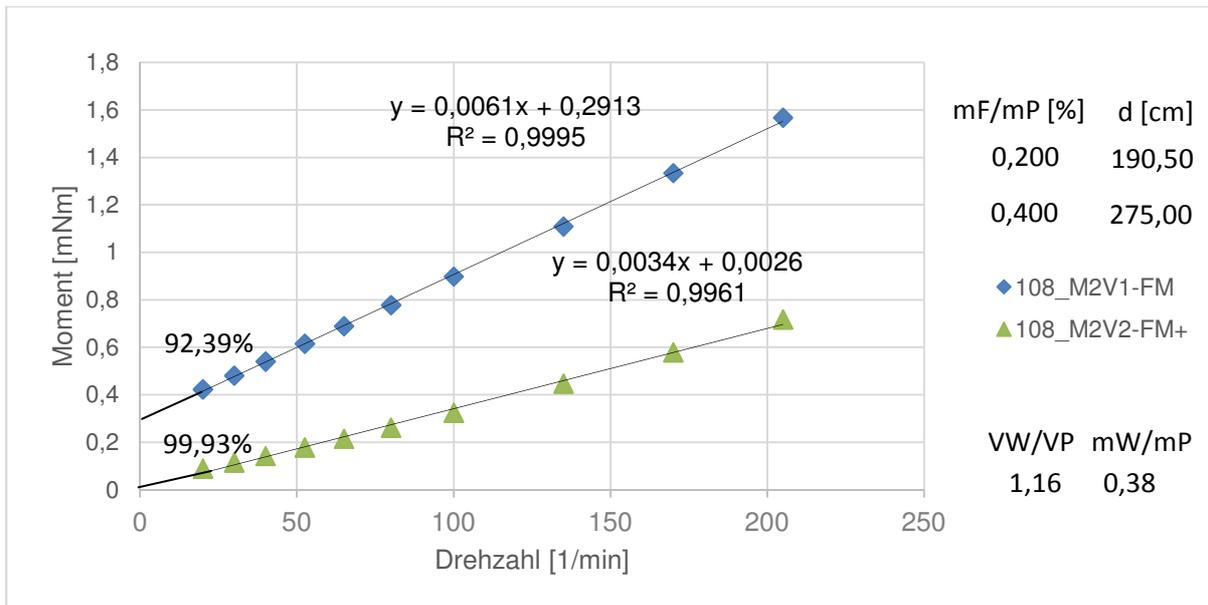


Bild 4-8 Fließkurven von Zement 102 und FM 108

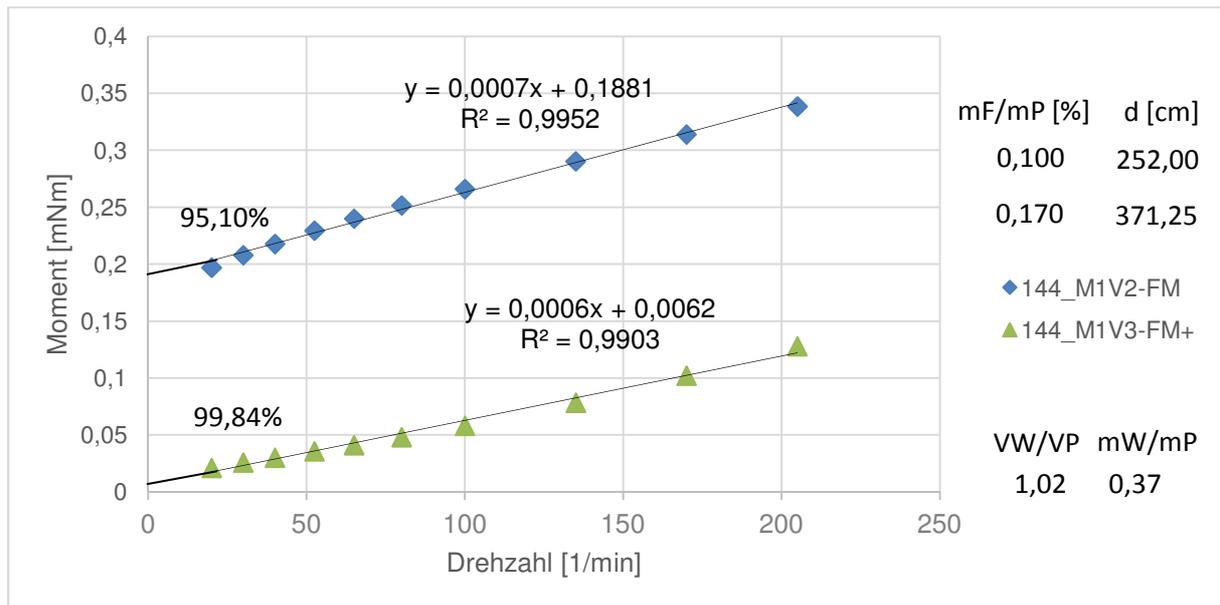


Bild 4-9 Fließkurven von Kalksteinmehl 159 und FM 144

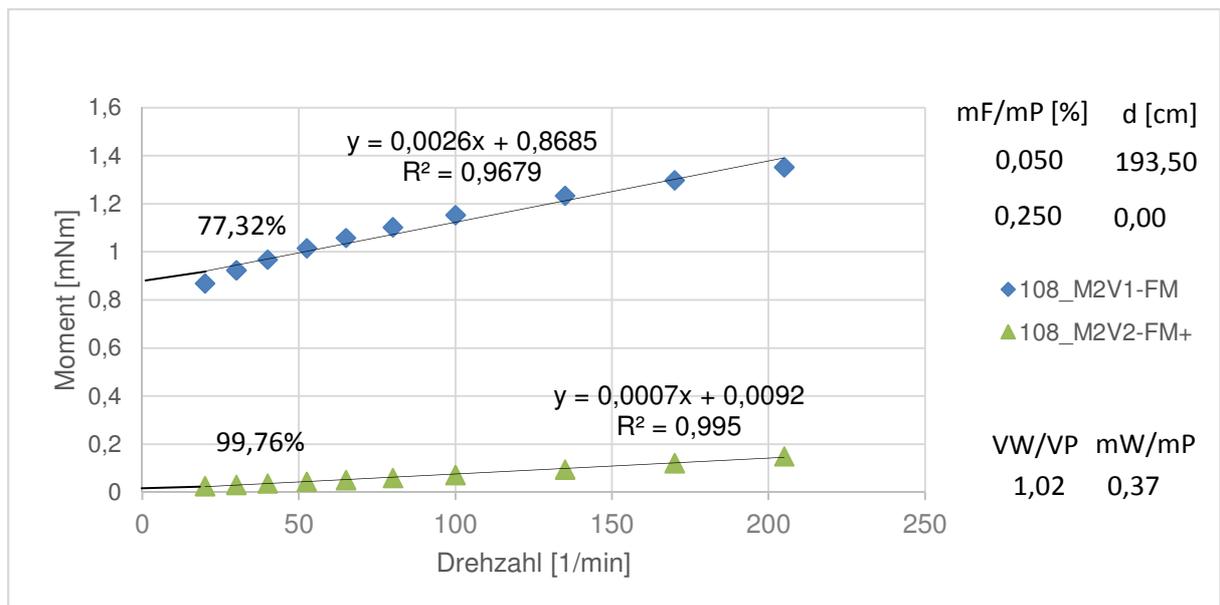


Bild 4-10 Fließkurven von Kalksteinmehl 159 und FM 108

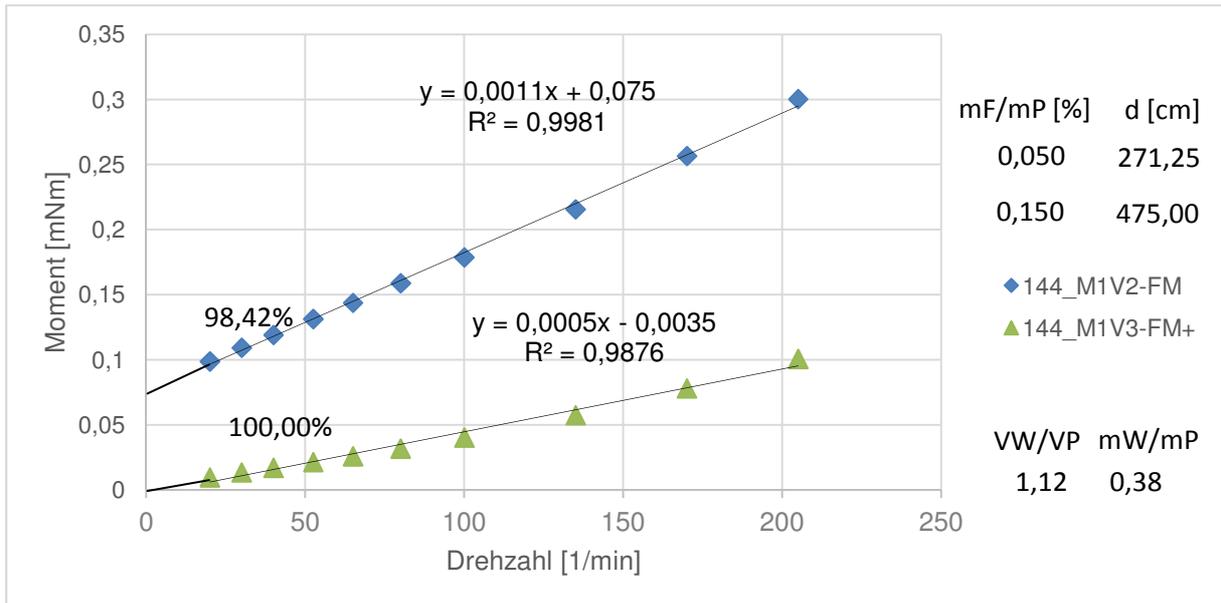


Bild 4-11 Fließkurven von Dolomitmehl 101 und FM 144

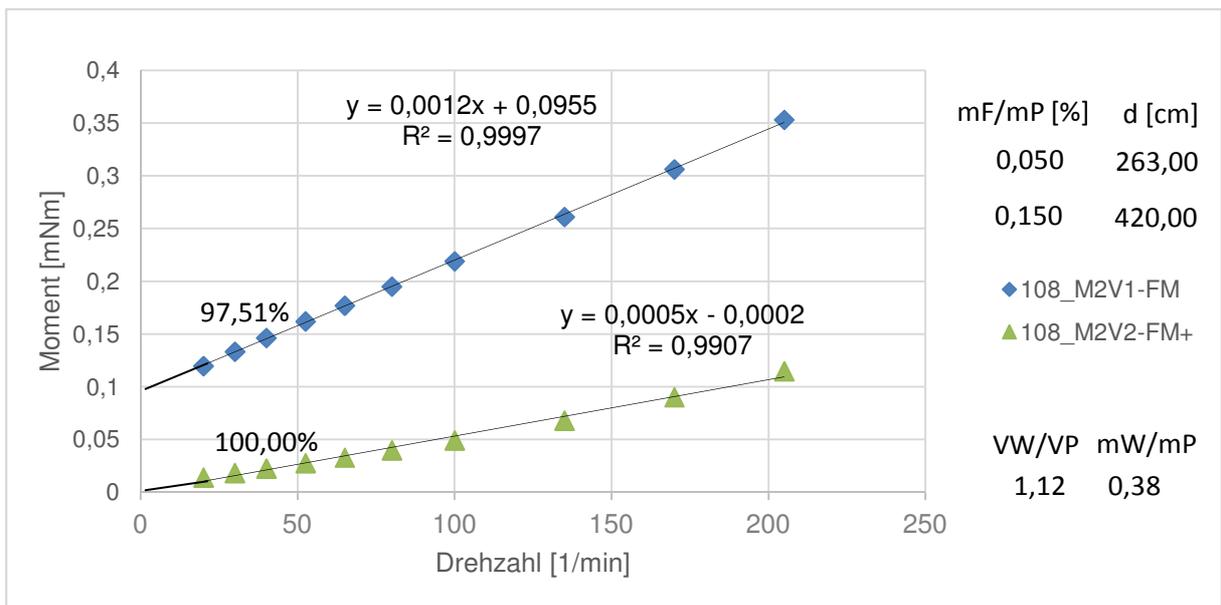


Bild 4-12 Fließkurven von Dolomitmehl 101 und FM 108

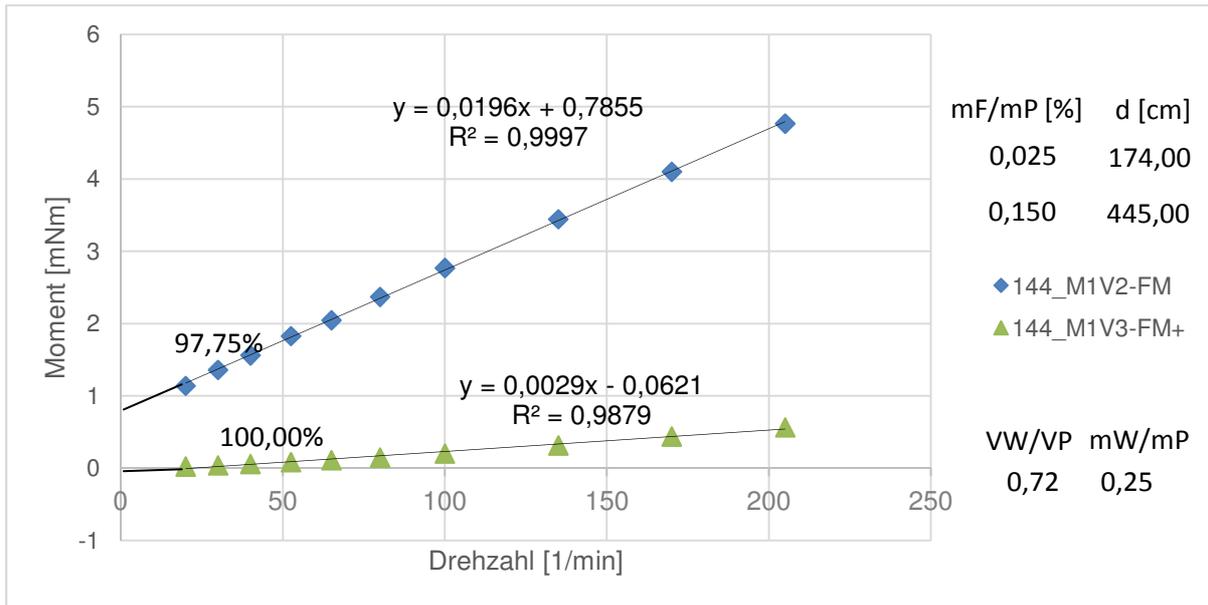


Bild 4-13 Fließkurven von Dolomitmehl 31-19 und FM 144

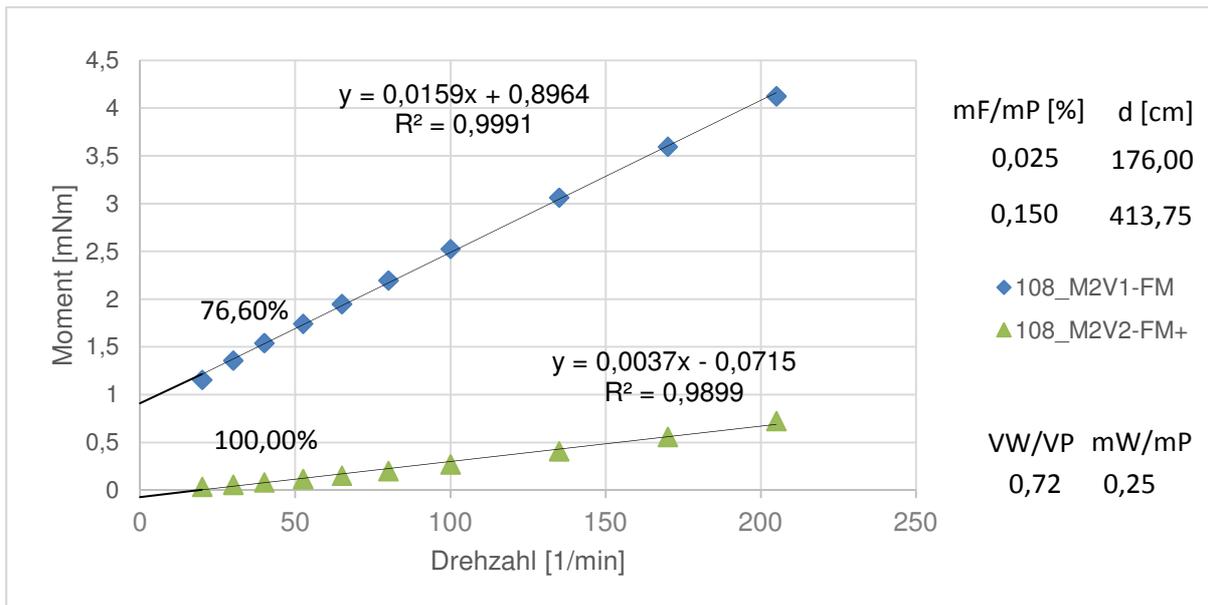


Bild 4-14 Fließkurven von Dolomitmehl 31-19 und FM 108

4.2 Pulverförmige Stoffe mit nicht konstanten Wasserbedarf

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der pulverförmigen Stoffe mit einem besonderen Fließverhalten dargestellt. Ein erhöhter Wasseranspruch, sowie die Fließmittelzugabe beeinflussen das Fließverhalten der Stoffe.

Das Kalksteinmehl 179, sowie die beiden Quarzmehle und Mikrosilika gehören zu den Stoffen mit besonderem Fließverhalten. Die ersten drei haben einen sehr hohen Wasseranspruch. Bei Mikrosilika kommt es infolge FM-Dosierung zu keiner Dispergierung.

- **Kalksteinmehl 179**

Die Untersuchungen am Rheometer waren, aufgrund der Eigenschaften des Pulvers, nur mit einem relativ hohen Wasseranspruch ($n_w=0,37$) durchführbar. Durch den hohen Wasseranspruch ist die Fließfähigkeit (geringe Fließgrenze) bereits ohne die Zugabe von FM auf einem Maximum. Die Fließgrenze wird durch die FM- Zugabe (FM 144 und FM 144) nicht weiter beeinflusst.

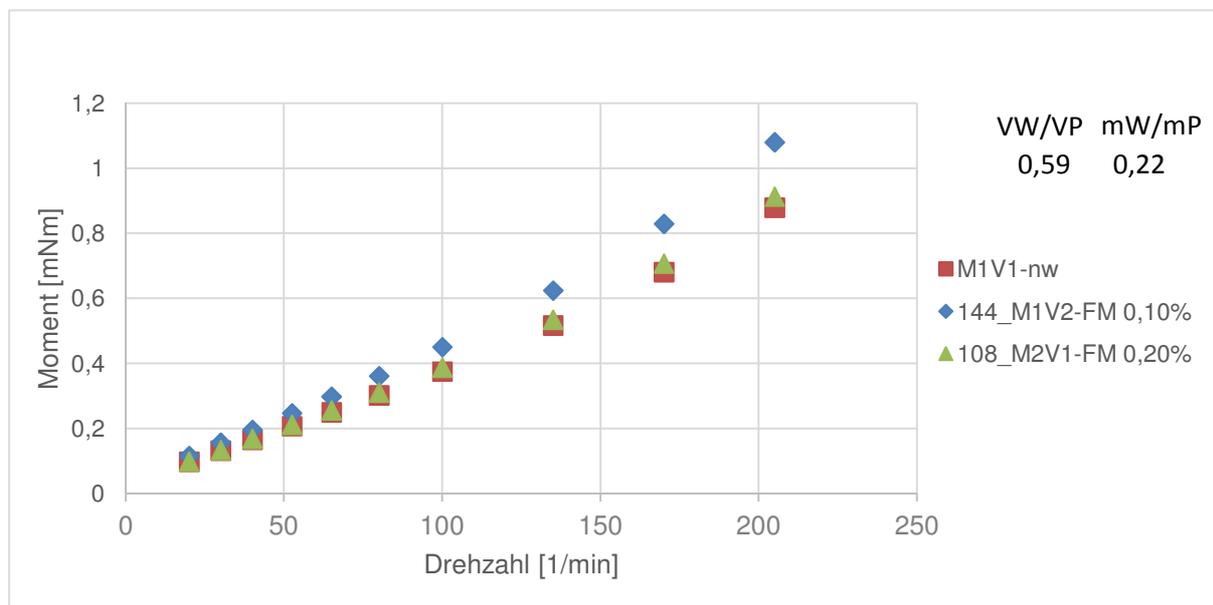


Bild 4-15 Fließkurve von Kalksteinmehl 179 bei Wasseranspruch und FM- Zugabe

- **Quarzmehl 175**

Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit ist zu erkennen, dass Quarzmehl 175 ein scherverdickendes Verhalten aufweist (Bild 4-16); mit zunehmender Drehzahl steigt der Widerstand (Viskosität). Dieses Fließverhalten ist, unabhängig von der FM-Zugabe, konstant. Es ist zu bemerken, dass man für die Untersuchungen in dieser Diplomarbeit mit einem sehr hohen Wasseranspruch ($n_w=0,495$) arbeiten muss, um eine Messung im Rheometer überhaupt zu ermöglichen. Aufgrund des hohen Wasserbedarfs ist bereits das Setzfließmaß ohne eine FM-Zugabe sehr groß (~ 420mm). Die Fließgrenze von Quarzmehl 175 ist somit sehr gering ($M_0=0$) und die Zugabe des FM beeinflusst diese nicht mehr stark. Aufgrund der bereits ohnehin hohen Fließfähigkeit hat das Fließmittel keine signifikante Wirkung und es ist folglich kein messbarer Bereich zu erkennen.

Die Darstellung in Bild 4-16 veranschaulicht, dass das Moment von der Drehgeschwindigkeit maßgeblich beeinflusst wird. Obwohl die Gemische eine idente Fließgrenze aufweisen, gibt es jedoch bei hohen Drehzahlen keine Übereinstimmung der einzelnen Fließkurven. Bei gleicher FM-Dosierung ist ein geringer Unterschied zwischen FM 144 und FM 108 bemerkbar.

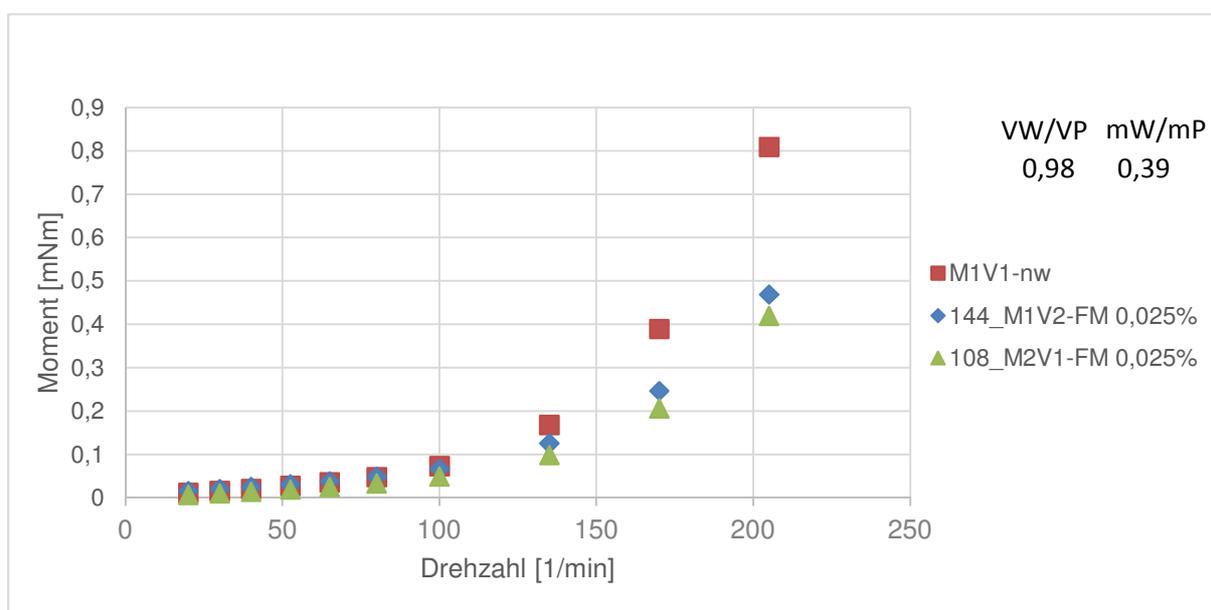


Bild 4-16 Fließkurve von Quarzmehl 175 bei Wasseranspruch und FM- Zugabe

- **Quarzmehl 9-10**

Dieses Gesteinsmehl hat im Gegensatz zum Quarzmehl 175 ein lineares Fließverhalten. Durch den hohen Wasseranspruch ($n_w=0,48$) des pulverförmigen Stoffes haben die Fließmittel keinen signifikanten Unterschied in der Wirkung. Die Ausgangsfließgrenze ist bei reinem Wasseranspruch ($M_0=0$) gering. Die maximale Fließgrenze ist aufgrund des hohen Wasseranteils und der damit verbunden niedrigen Fließgrenze erreicht. Die dargestellten Fließkurven haben trotz Fließmittelzugabe nahezu idente Fließgrenzen. Viskosität und Fließgrenze sind vor und nach FM Zugabe ident.

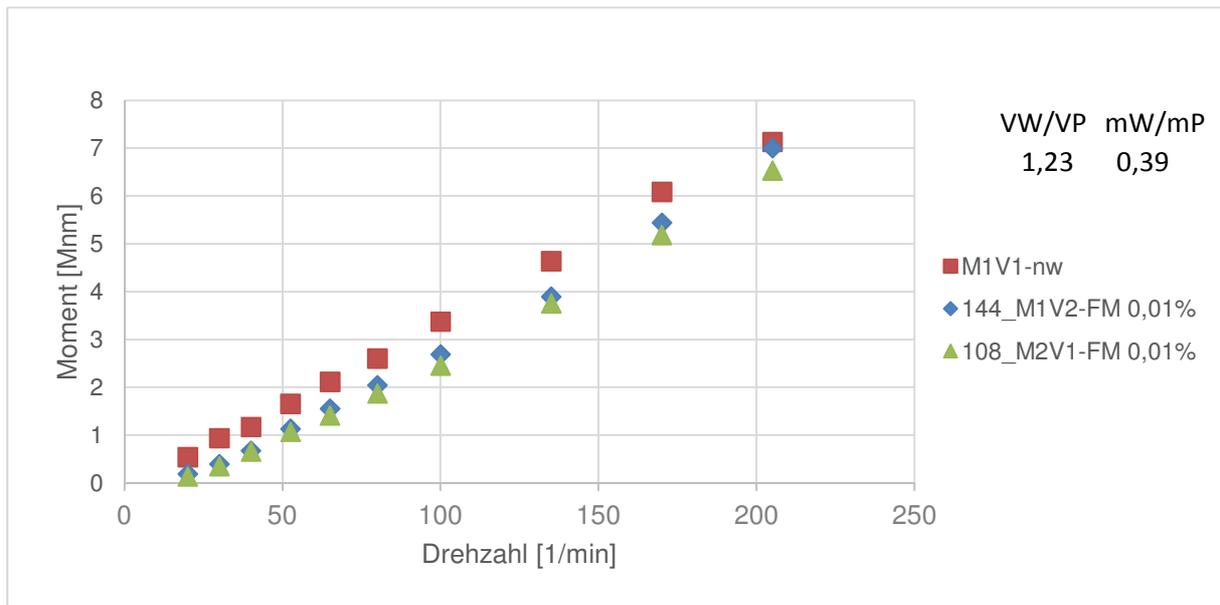


Bild 4-17 Fließkurve von Quarzmehl 9-10 bei Wasseranspruch und FM- Zugabe

▪ Mikrosilika

Die Untersuchungen am Rheometer und nach dem Okamura¹² Verfahren haben gezeigt, dass im Gegensatz zu den anderen pulverförmigen Stoffen Mikrosilika infolge einer Fließmitteldosierung ein besonderes Fließverhalten aufweist. Bei diesem Stoff haben alle untersuchten Fließmittel keine dispergierende Wirkung. Die Fließmittel fördern bereits bei geringen Zugabemengen eine Agglomeratbildung (Bild 4-18) die eine Verklumpung der Suspension zur Folge hat. Bei zu hohen FM- Dosierungen ist eine Messung nicht mehr möglich, da die Agglomerate am Rührstab haften bleiben und sich nur mit Mühe vom Rührstab trennen lassen. Eine überproportionale FM-Dosierung zeigt ebenso keine Verflüssigungswirkung.

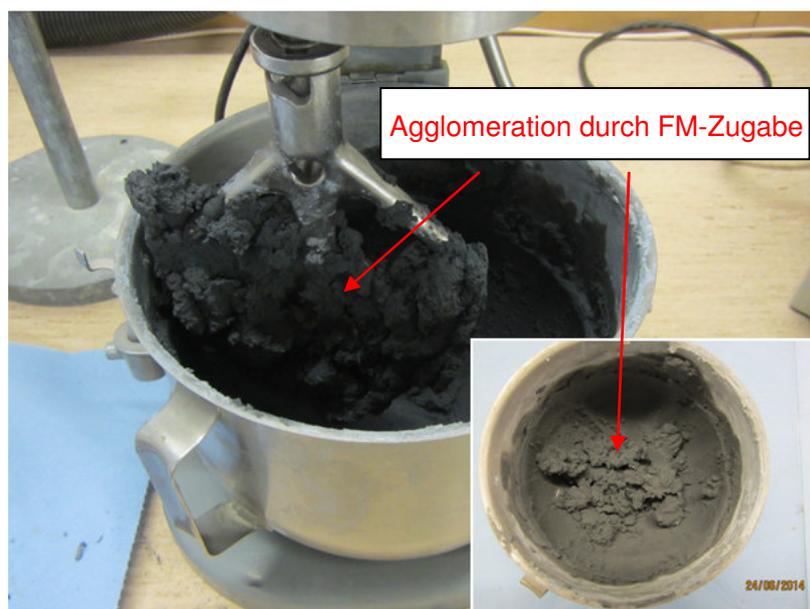


Bild 4-18 Agglomeration bei FM-Zugabe im Hobart Mischer

Durch die Zugabe von Fließmittel ist ein Rückgang (190mm auf 100mm) des Setzfließmaßes (Bild 4-19) zu vermerken. Der Rückgang des Setzfließmaßes spiegelt sich in der Erhöhung der Fließgrenze wieder.

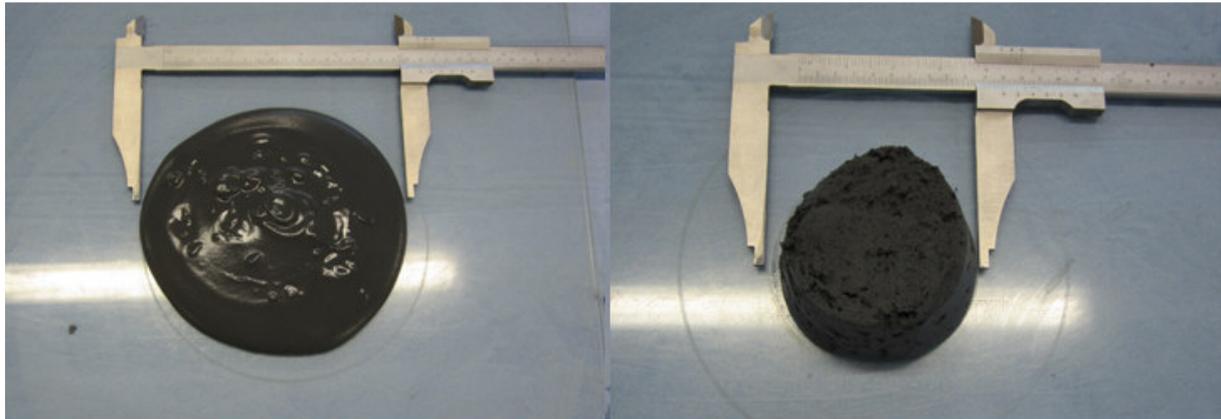


Bild 4-19 Rückgang des Setzfließmaßes infolge FM-Dosierung

Anhand der Fließkurve in Bild 4-20 wird das Materialverhalten von Mikrosilika veranschaulicht. Durch die FM-Zugabe ändert sich das eigentliche Fließverhalten. In dem Bereich geringer Drehzahlen (20-50 1/min) kommt es zu einer Erhöhung des Drehmoments, was dem eigentlichen Verlauf der Fließkurve (mit geringerer Rotationsgeschwindigkeit Abnahme des Drehmoments) widerspricht.

Es ist zu beobachten, dass die beiden eingesetzten Fließmittel (FM 144 hohe Ladungsdichte und FM 108 niedrige Ladungsdichte) bei gleicher Dosierung (0,05%) eine unterschiedlich stark ausgeprägte Erhöhung des Scherwiderstands haben. Die Untersuchungen am Rheometer in dieser Arbeit zeigen, dass es infolge der FM-Zugabe (FM 108 – niedrige Ladungsdichte) zu einer deutlichen Erhöhung des Scherwiderstands kommt.

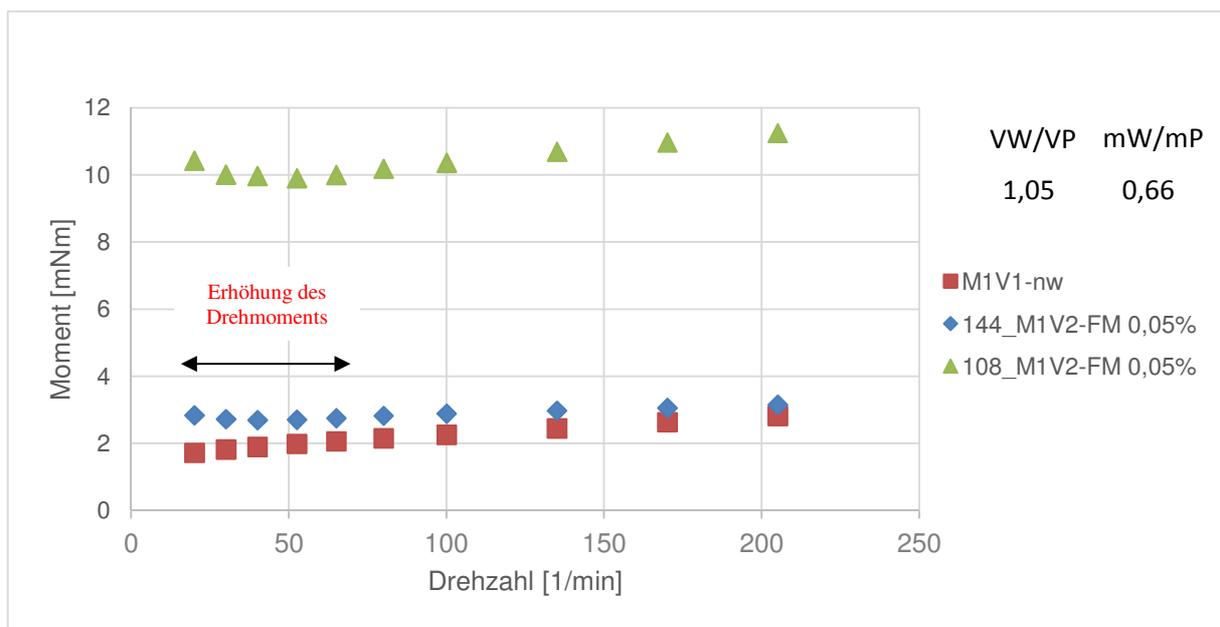


Bild 4-20 Fließkurve von Mikrosilika bei Wasseranspruch und FM- Zugabe

In Bild 4-21 ist die Änderung der Struktureigenschaft im Kurvenverlauf der Fließkurve ersichtlich. Bei Drehzahlen unter 50 [1/min] kommt es zu einem Strukturaufbau in der Suspension, welcher mit abnehmenden Geschwindigkeiten zunimmt. Bei hohen Drehzahlen wird die Struktur zerstört. Für die Berechnung der Fließgrenze kann das lineare Bingham Modell beibehalten und dieser Bereich vernachlässigt werden.¹⁰⁸

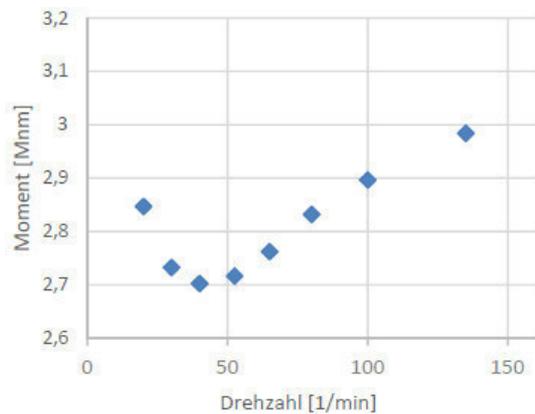


Bild 4-21 Ausschnitt der Fließkurve von Mikrosilika. Erhöhung des Moments bei geringer Belastung (144_M1V2-FM 0,05%)

¹⁰⁸ Feys. 2014: Sieben Schritte zur Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit rheologischer Messungen an zementgebundenen Baustoffen, S. 58 – 64.

4.3 Vergleich aller Gemische

In der nachfolgenden Abbildung ist die Auswertung aller Wasser/Pulver-Gemische dargestellt, die eine gleiche Ausgangskonsistenz (130mm) aufweisen. Bei den Daten, die konkret als Punkte dargestellt sind, handelt es sich um Werte aus den Messungen. Um Vergleiche zu den „separaten“ Stoffen aufzuzeigen wurden 3 Pfeile zusätzlich händisch eingetragen. Diese sollen den Verlauf der im Kapitel beschriebenen Stoffe mit nicht konstanter, vergleichbarer Ausgangskonsistenz widerspiegeln. Das sind qualitative Werte, die aus der Erfahrung durch den Umgang mit dem jeweiligen Stoff und den Ergebnissen der Versuche mit einer Ausgangskonsistenz mit höheren Fließmaß (>130mm) bzw. den mod. Okamura Versuchen abgeschätzt wurden.

In Abhängigkeit von der FM-Dosierung (m_F/m_P) erreichen die Stoffe unterschiedliche relative Fließgrenzen M_0 . Eine Sättigungsdosierung ist mit einer relativen Fließgrenze von $M_0=0mNm$ erreicht. In diesem Bereich ist bei den Stoffen eine Sedimentation zu beobachten. Die Sättigungsdosierung konnte bei den meisten Stoffen ermittelt werden.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Daten zwecks einer besseren Vergleichbarkeit als normierte Werte dargestellt.

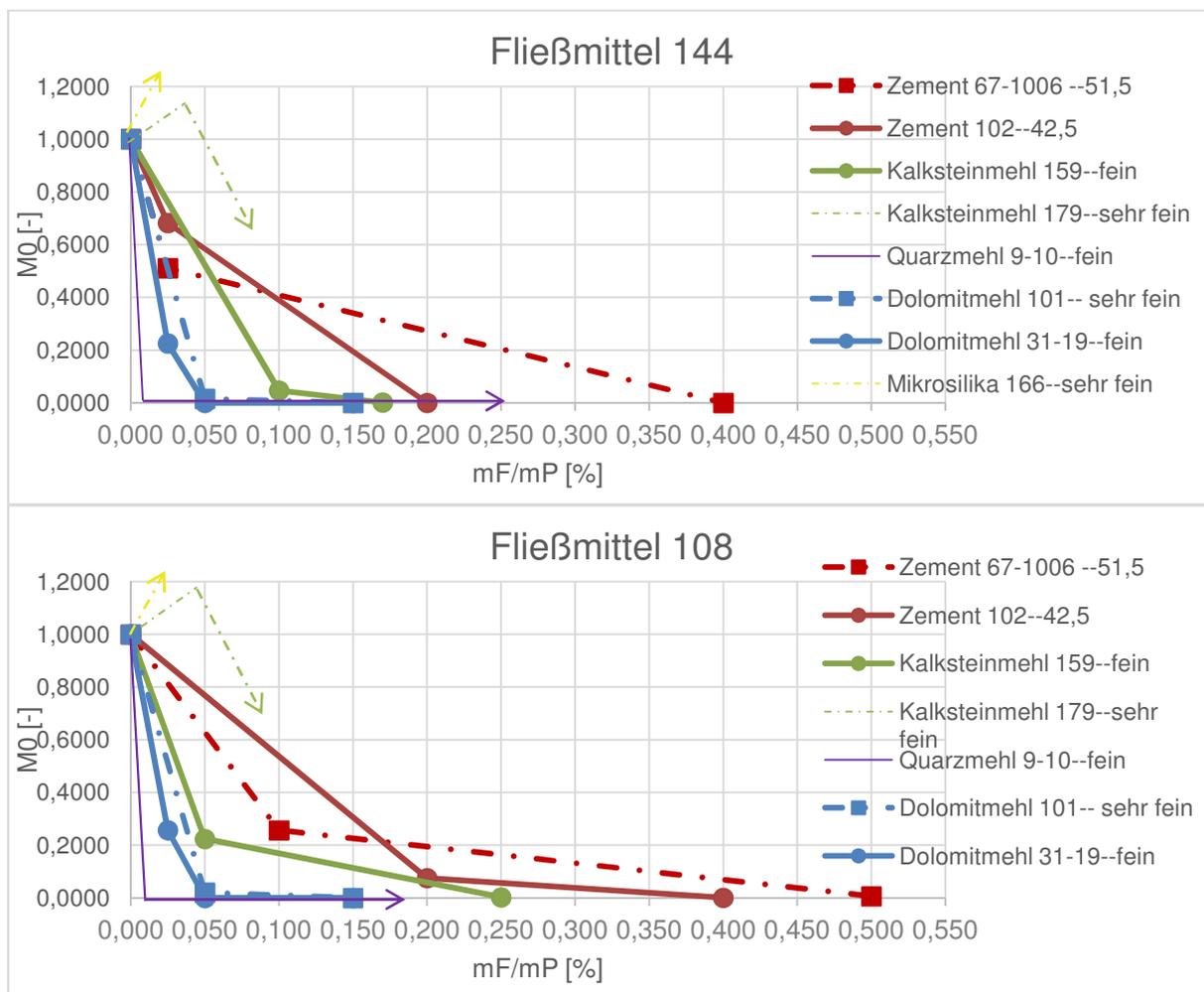


Bild 4-22 normierte Auswertung für die Änderung der Fließgrenze in Abhängigkeit der Dosierung der einzelnen pulverförmigen Stoffe

In der nachfolgenden Abbildung sind die jeweiligen Ausgangskonsistenzen der einzelnen Wasser/Pulver Gemische dargestellt. Wie bereits erläutert wurde ist der Wasseranspruch für ein Setzfließmaß von 130 mm (geprüft mit dem Hägermann Konus, ohne Verdichtungsstöße) vorab ermittelt worden. Die relativen Fließgrenzen der Wasser/Pulver Gemische betragen in etwa 4 mNm.

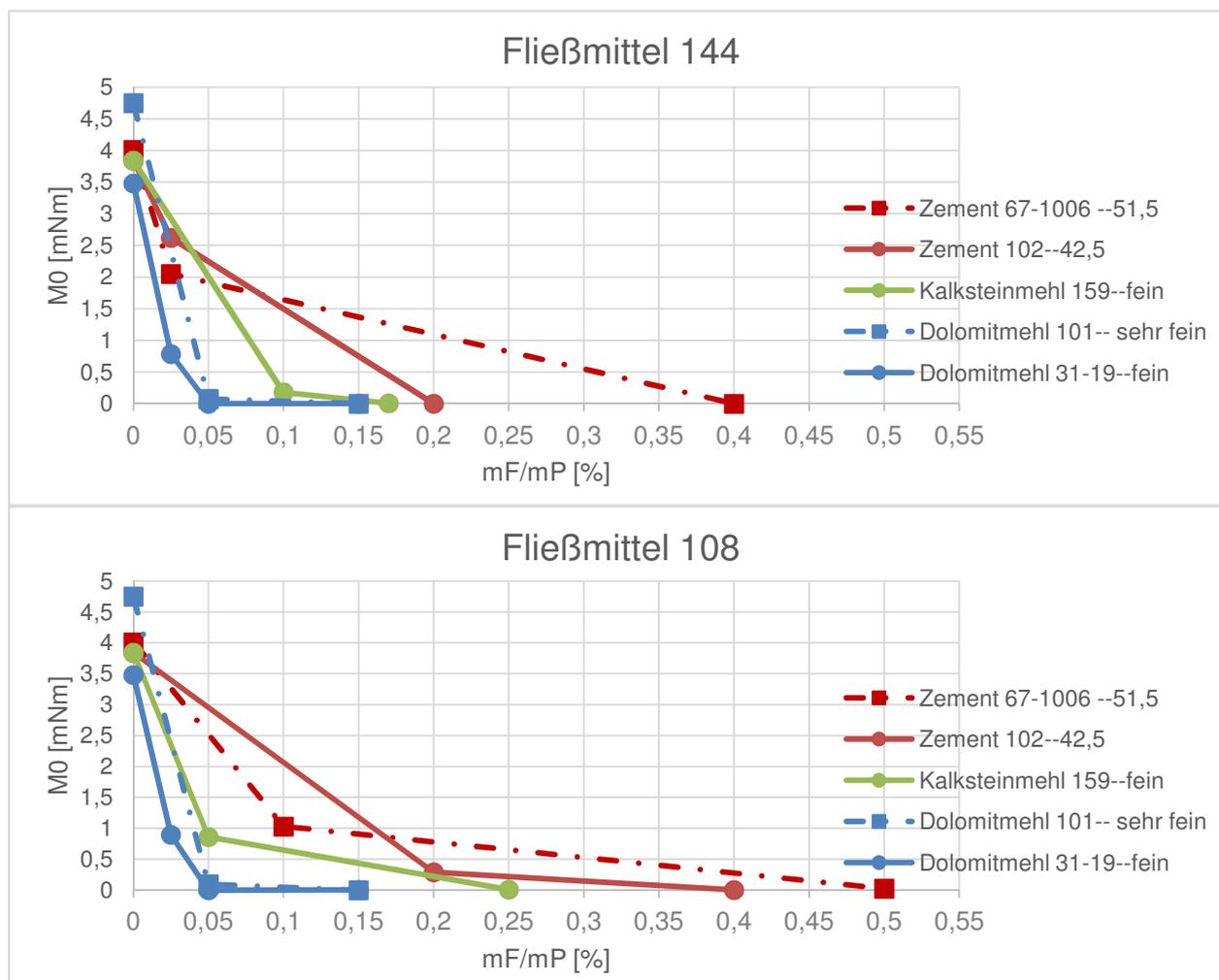


Bild 4-23 Auswertung der Messdaten für die Änderung der relativen Fließgrenze in Abhängigkeit der Dosierung der einzelnen pulverförmigen Stoffe

Anhand der vorhandenen Daten (Bild 4-24) ist bei den Dolomitsteinmehlen zu erkennen, dass das sehr feine Mehl 101 im Gegensatz zum Feinen 31-19 für die gleiche Verflüssigungswirkung eine geringfügig höhere FM-Dosierung benötigt. Der Verlauf der Fließkurven ist ab einer an sich geringen Dosierung von 0,05% bereits nahezu ident. Dolomitsteinmehle bedürfen weniger FM als Kalksteinmehl 159 für die Reduktion der relativen Fließgrenze. Zwischen den beiden unterschiedlichen Fließmitteln (FM 144 und FM 108) ist bei den Dolomitsteinmehlen in der Wirkung kein signifikanter Unterschied zu erkennen.

Schönauer¹ und Maier² verzeichnen ebenso, dass das mit zunehmender Feinheit der FM-Bedarf steigt. Für ein großes Setzfließmaß bzw. geringe Fließgrenze benötigt das sehr feine Gesteinsmehl (Quarzmehl 175) eine höhere FM-Dosierung. Die Wirkung ist im Vergleich zur Dosierungsmenge allerdings nicht stark ausgeprägt. Das feine Quarzmehl (9-10) zeigt im Gegensatz zum sehr feinen Mehl bereits bei geringeren FM-Dosierungen eine höhere

Verflüssigungswirkung. Die Kurve von Quarzmehl 9-10 konnten durch das Rheometer nicht gemessen werden (siehe Kapitel 3.4.2). Sie wurden im Nachhinein als Schätzwerte wie oben beschrieben händisch eingefügt.

Bei den Gesteinsmehlen scheint die Wirkung der FM auf die Reduktion der relativen Fließgrenze mit zunehmender Feinheit geringer zu werden. Diese Aussage ist auf die untersuchten nicht zutreffend.

Es ist generell zu beobachten, dass Gesteinsmehle wesentlich weniger FM bedürfen, als die beiden Zemente. Die Reduktion der relativen Fließgrenze ist bei den Gesteinsmehlen stärker ausgeprägt.

In den nachfolgenden Tabellen sind die den Diagrammen fehlenden Werte für mehrere Dosierungen dargestellt. Die Zwischenwerte der Dosierungen wurden aus drei (Wasseranspruch, erste FM Zugabe, zweite FM Zugabe) zur Verfügung stehenden Messwerten durch lineare Interpolation ermittelt (Bild 4-22). Der Zweck der Darstellung und Interpolation ist es, die einzelnen Dosierungen unter den pulverförmigen Stoffen vergleichbar zu machen. Bei gleicher Dosierung können die unterschiedlichen Wirkungen so veranschaulicht werden.

Tabelle 4-1 Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen für Zement 67-1006 und Zement 102

Zement 67-1006						Zement 102					
m_f/m_p [%]	M_0 [mNm]	normiert M_0	rel. η [Pa s]	normiert rel. η	M_0 / rel. η	m_f/m_p [%]	M_0 [mNm]	normiert M_0	rel. η [Pa s]	normiert rel. η	M_0 / rel. η
Fließmittel 144 - hohe Ladungsdichte						Fließmittel 144 - hohe Ladungsdichte					
0,000	4,0149	1,0000	0,01100	1,0000	365,0	0,000	3,8400	1,0000	0,0103	1,0000	372,82
0,025	2,0500	0,5106	0,00910	0,8273	225,3	0,025	2,6200	0,6823	0,0103	1,0000	254,37
0,050	1,9144	0,4768	0,00851	0,7732	225,1	0,050	2,2209	0,5784	0,0091	0,8850	243,65
0,100	1,6420	0,4090	0,00741	0,6736	221,6	0,100	1,4723	0,3834	0,0068	0,6631	215,57
0,150	1,3697	0,3412	0,00632	0,5741	216,9	0,150	0,7238	0,1885	0,0045	0,4413	159,25
0,170	1,2608	0,3140	0,00588	0,5343	214,5	0,170	0,4244	0,1105	0,0036	0,3525	116,87
0,200	1,0974	0,2733	0,00522	0,4745	210,2	0,200	0,0000	0,0000	0,0023	0,2194	0,00
0,400	0,0000	0,0000	0,00090	0,0818	0,0						
Fließmittel 108 - niedrige Ladungsdichte						Fließmittel 108 - niedrige Ladungsdichte					
0,000	4,0100	1,0000	0,01110	1,0000	361,3	0,000	3,8400	1,0000	0,0103	1,0000	372,82
0,025	3,2650	0,8142	0,01020	0,9189	320,1	0,025	3,3963	0,8844	0,0098	0,9490	347,44
0,050	2,5200	0,6284	0,00930	0,8378	271,0	0,050	2,9525	0,7689	0,0081	0,7888	363,38
0,100	1,0300	0,2569	0,00750	0,6757	137,3	0,100	2,0650	0,5378	0,0075	0,7233	277,18
0,150	0,9044	0,2255	0,00683	0,6149	132,5	0,150	1,1775	0,3066	0,0068	0,6578	173,80
0,170	0,8542	0,2130	0,00654	0,5887	130,7	0,170	0,8225	0,2142	0,0065	0,6316	126,44
0,200	0,7788	0,1942	0,00610	0,5495	127,7	0,200	0,2900	0,0755	0,0061	0,5922	47,54
0,250	0,6532	0,1629	0,00538	0,4842	121,5	0,250	0,2182	0,0568	0,0054	0,5267	40,21
0,400	0,2763	0,0689	0,00320	0,2883	86,3	0,400	0,0026	0,0007	0,0034	0,3301	0,76
0,500	0,0251	0,0062	0,00175	0,1577	14,3						

Tabelle 4-2 Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen für Kalksteinmehl 159

Kalksteinmehl 159					
m_f/m_p [%]	M_0 [mNm]	normiert M_0	rel. η [Pa s]	normiert rel. η	M_0 / rel. η
Fließmittel 144 - hohe Ladungsdichte					
0,000	3,8400	1,0000	0,0109	1,0000	352,29
0,025	2,9250	0,7617	0,0084	0,7661	350,30
0,050	2,0100	0,5234	0,0058	0,5321	346,55
0,100	0,1800	0,0469	0,0007	0,0606	272,73
0,150	0,0550	0,0143	0,0006	0,0541	93,14
0,170	0,0062	0,0016	0,0006	0,0516	11,03
Fließmittel 108 - niedrige Ladungsdichte					
0,000	3,8400	1,0000	0,0109	1,0000	352,29
0,025	2,3500	0,6120	0,0068	0,6193	348,15
0,050	0,8600	0,2240	0,0026	0,2408	327,62
0,100	0,6473	0,1686	0,0022	0,1972	301,07
0,150	0,4346	0,1132	0,0017	0,1537	259,46
0,170	0,3495	0,0910	0,0015	0,1362	235,37
0,200	0,2219	0,0578	0,0012	0,1101	184,92
0,250	0,0092	0,0024	0,0007	0,0665	12,69

Tabelle 4-3 Ergebnisse aus den rheologischen Untersuchungen für Dolomitsteinmehl 101 und Dolomitsteinmehl 31-19

Dolomitmehl 101						Dolomitmehl 31-19					
m_f/m_p [%]	M_0 [mNm]	normiert M_0	rel. η [Pa s]	normiert rel. η	M_0 / rel. η	m_f/m_p [%]	M_0 [mNm]	normiert M_0	rel. η [Pa s]	normiert rel. η	M_0 / rel. η
Fließmittel 144 - hohe Ladungsdichte						Fließmittel 144 - hohe Ladungsdichte					
0,000	4,7509	1,0000	0,0286	1,0000	166,12	0,000	3,4845	1,0000	0,0302	1,0000	115,38
0,025	2,4125	0,5078	0,0149	0,5192	162,46	0,025	0,7855	0,2254	0,0196	0,6490	40,08
0,050	0,0750	0,0158	0,0011	0,0385	68,18	0,050	0,0000	0,0000	0,0034	0,1126	0,00
0,100	0,0375	0,0079	0,0008	0,0280	46,88	0,100	0,0000	0,0000	0,0032	0,1060	0,00
0,150	0,0000	0,0000	0,0005	0,0175	0,00	0,150	0,0000	0,0000	0,0029	0,0947	0,00
Fließmittel 108 - niedrige Ladungsdichte						Fließmittel 108 - niedrige Ladungsdichte					
0,000	4,7500	1,0000	0,0286	1,0000	166,08	0,000	3,4845	1,0000	0,0302	1,0000	115,38
0,025	2,4225	0,5100	0,0149	0,5210	162,58	0,025	0,8965	0,2573	0,0159	0,5265	56,38
0,050	0,0950	0,0200	0,0012	0,0420	79,17	0,050	0,0000	0,0000	0,0060	0,1987	0,00
0,100	0,0475	0,0100	0,0009	0,0315	52,78	0,100	0,0000	0,0000	0,0048	0,1589	0,00
0,150	0,0000	0,0000	0,0006	0,0192	0,00	0,150	0,0000	0,0000	0,0037	0,1212	0,01

In den Versuchen am Rheometer wurde festgestellt, dass sich die relative Viskosität infolge der FM-Zugabe ändert. Die Fließmittel wirken bei den Stoffgruppen unterschiedlich. Es ist zu erkennen dass sich die Viskosität bei den beiden Zementen nur in geringem Ausmaß ändert. Die Dolomitsteinmehle und das Kalkmehl verzeichnen im Vergleich zu den beiden Zementen und dem Kalksteinmehl 159 eine wesentlich höhere Änderung der Viskosität durch FM-Zugabe, wobei FM 144 (hohe Ladungsdichte) die Viskosität stärker ändert als FM 108.

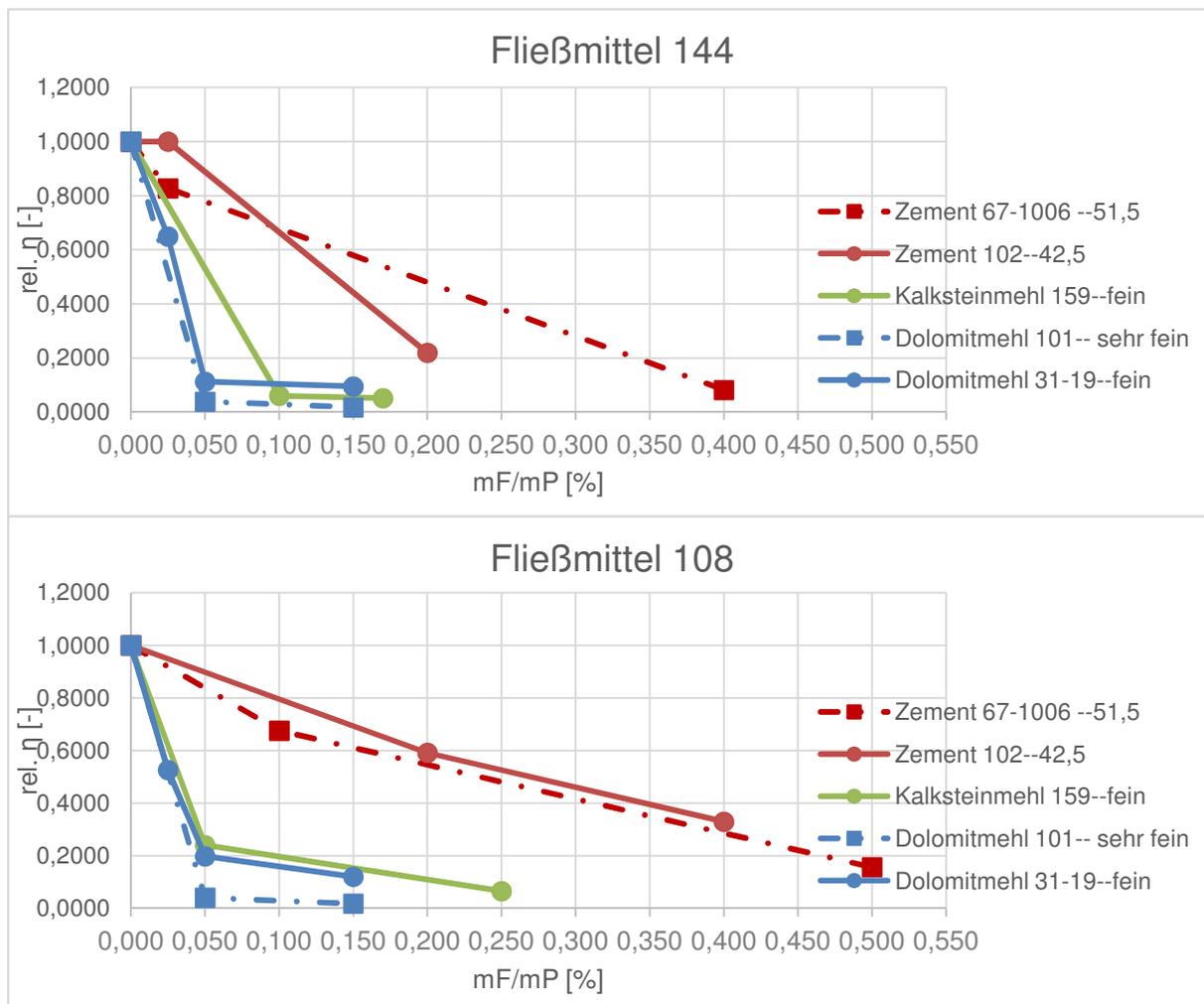


Bild 4-24 Auswertung für die Änderung der relativen Viskosität in Abhängigkeit der Dosierung der einzelnen pulverförmigen Stoffe

4.4 Substitution des destillierten Anmachwassers durch eine Porenlösung

Die Gesteinsmehle sind in einem Gemisch mit Wasser und Zement in einem basischen Milieu. Der pH-Wert einer Zementsuspension beträgt etwa pH 13. Durch den alleinigen Einsatz von destilliertem Wasser ist diese Rahmenbedingung allerdings nicht gegeben. Um den Effekt zu untersuchen, wurden im Zuge dieser Arbeit stichprobenartige Untersuchungen an 3 Gesteinsmehlen (Kalksteinmehl 4-16, Quarzmehl 9-10 und Dolomitsteinmehl 31-19) vorgenommen, die in zwei unterschiedlich hergestellten Porenlösungen suspendiert wurden. Es handelt sich dabei um eine abfiltrierte Zementlösung V1 und eine synthetisch hergestellte Porenlösung V2.

Variante 1 ist eine vereinfachte Porenlösung, die durch das Filtrieren von einer Suspension aus Wasser und Zement 67-1006, mit einem w/b-Wert von 0,5 hergestellt wurde. Der pH Wert dieser Lösung beträgt pH 12,5 und die Leitfähigkeit 17,52 mS/cm.

Variante 2 ist eine synthetisierte Porenlösung mit einem pH Wert von pH 13,5. Hauptbestandteil der ursprünglichen Ausgangslösung sind Natrium und Kalium. Aus diesem Grund wurde die Porenlösung V2 mit NaOH und KOH nachgebildet. Die Leitfähigkeit von Porenlösung V2 beträgt 108,1 mS/cm. Die genaue Zusammensetzung der Porenlösung ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 4-4 Zusammensetzung der synthetisierten Porenlösung V2

Nr.	BEZEICHNUNG	g/Mol	BEMERKUNG
1	Na	22,9898	in Porenlösung enthalten
2	K	39,0983	
1	Na	22,9898	Na zu NaOH 1,73977764
	O	15,9994	
	H	1,00794	
	NaOH	39,99714	
2	K	39,0983	K zu KOH 1,43498925
	O	15,994	
	H	1,00794	
	KOH	56,10564	
Einwaage für synthetisch hergestellte Porenlösung			
4,6 g Na/L		8,00297715 g NaOH/L	
4,45 g K/L		20,7355946 g KOH/L	

Die rheologischen Messungen wurden bei gleichem Wasseranspruch mit den Porenlösungen V1 und V2 stichprobenartig wiederholt.

Durch die Ergebnisse der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich bei den Untersuchungen von Gesteinsmehlen in destilliertem Wasser und den Porenlösungen deutliche Unterschiede ergeben. Durch die beiden Porenlösungen kommt es zu einer Erhöhung der relativen Fließgrenze. Die Tendenz einer Agglomeration durch die Substitution des destillierten Wassers konnte bei allen gemessenen Stoffen (Kalksteinmehl 4-16, Dolomitsteinmehl 31-19) festgestellt werden. Die Messung konnte bei Quarzmehl 9-10 aufgrund der zu steifen und durch das Rheometer nicht messbaren Konsistenz nicht erfasst werden.

Die Gemische aus Kalksteinmehl 4-16 und den Porenlösungen V1-V2 zeigen bei einer Messung ohne FM-Zugabe (Bild 4-25, oben) eine Erhöhung der relativen Fließgrenze.

Die Fließkurven mit FM-Zugabe (Bild 4-25, unten) zeigen, dass die synthetisierte Porenlösung V2 im Vergleich zu der vereinfachten Porenlösung V1 und destillierten Wasser eine deutlich höhere Fließgrenze aufweist.

Bei gleicher FM-Dosierung kommt es in der synthetisierten Porenlösung V2 zu einer mäßig verringerten Fließgrenze, während in der vereinfachten Porenlösung V1 die Fließgrenze wie in dest. Wasser ist.

Für eine gleichwertige relative Fließgrenze ($M_0 \sim 0$) benötigt das Wasser/Pulver-Gemisch in der Porenlösung V2 ($M_0 \sim 3$) einen höheren FM-Bedarf.

Außerdem werden das Fließverhalten und die Viskosität der Suspension durch die FM-Zugabe beeinflusst, was durch den unregelmäßigen Kurvenverlauf der Fließkurve mit synthetisierter Porenlösung ersichtlich ist.

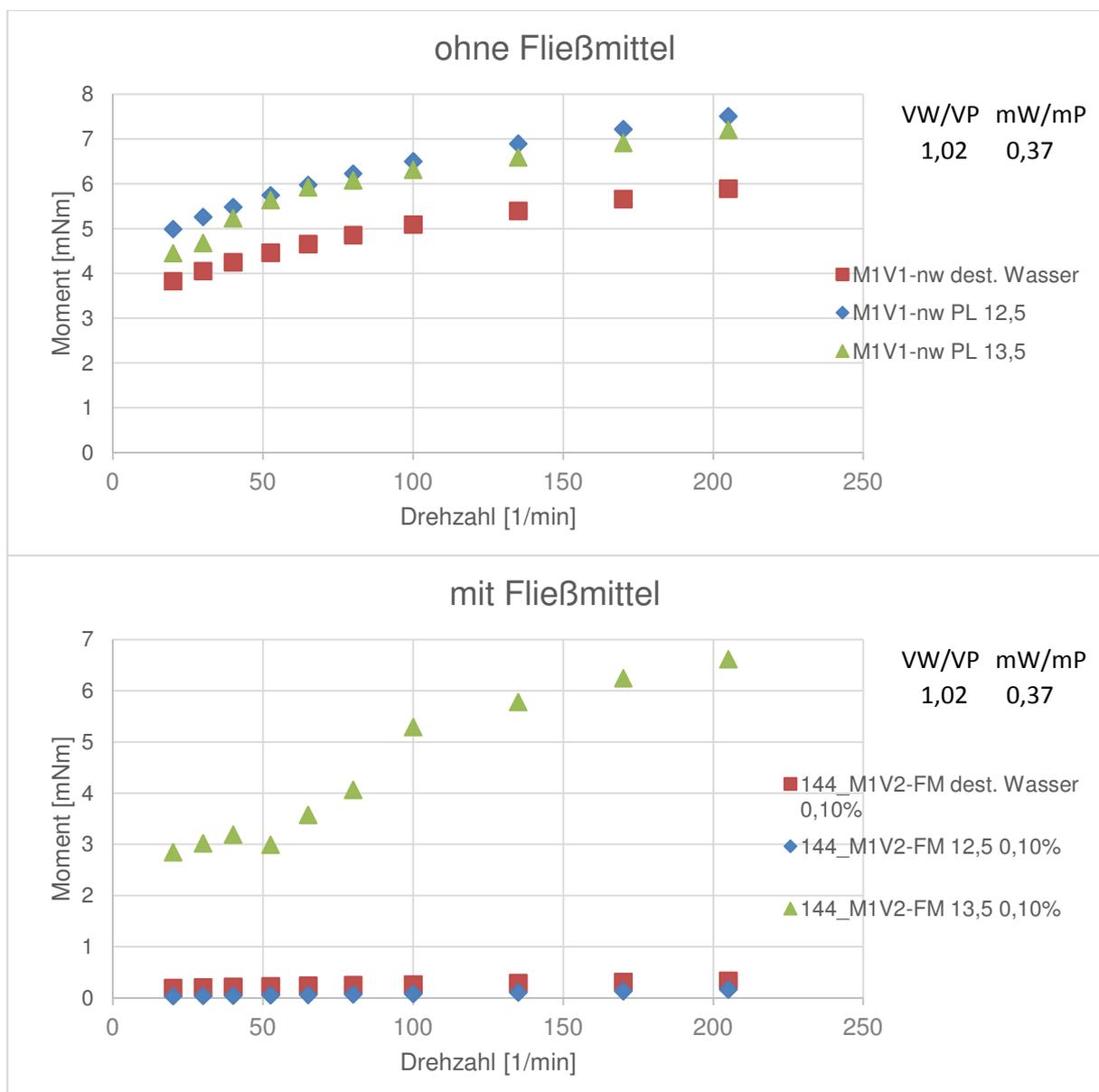


Bild 4-25 stichprobenartige Untersuchungen des Effekts zweier Porenlösungen bei Kalksteinmehl 4-16

Durch die Substitution des destillierten Wassers (ohne FM Zugabe) erhöht sich beim Dolomitsteinmehl 31-19 die relative Fließgrenze nur bedingt (Bild 4-26). In Porenlösung V1 steigt sie etwas, während sie in Porenlösung V2 deutlich sinkt. Die Wirkung der Fließmittel ist scheinbar bei allen Varianten (dest. Wasser, V1, V2) so, dass etwa gleiche relative Fließgrenzen auftreten. Hier sind weitere Versuche erforderlich, um eindeutige Ergebnisse zu erhalten. Durch die synthetisierte Porenlösung ändert sich auch bei diesem Stoff Fließverhalten und die Viskosität.

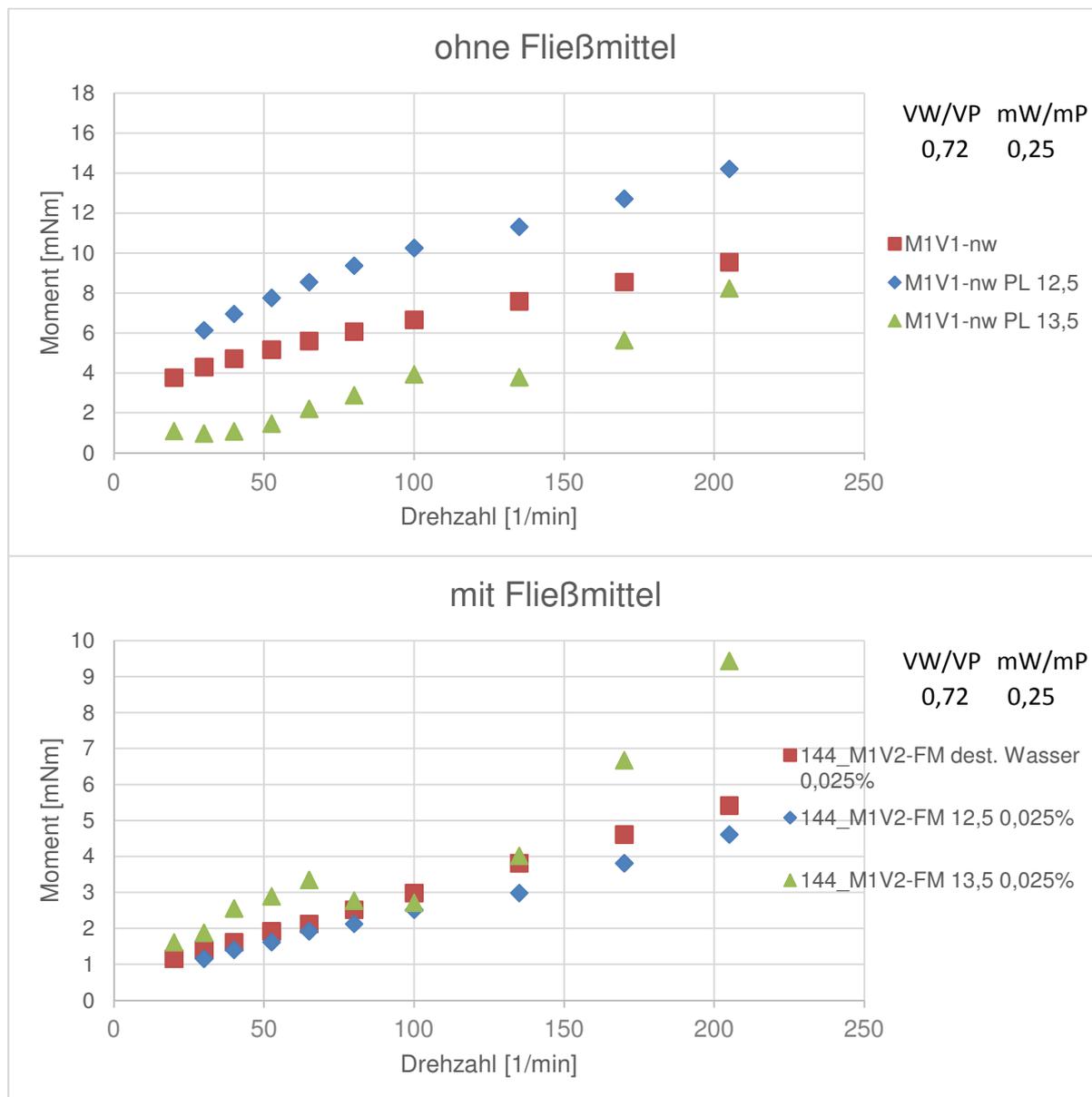


Bild 4-26 stichprobenartige Untersuchungen des Effekts einer Probenlösung bei Dolomitsteinmehl 31-19

Zusammenfassend konnte durch die stichprobenartigen Untersuchungen eine Reihe von Effekten (Erhöhung der relativen Fließgrenze, Änderung des Fließverhaltens), die erst durch weitere systematische Untersuchungen charakterisiert werden können.

4.5 Sättigungsdosierung

Die Sättigungsdosierung bezüglich der FM-Zugabe konnte bei einzelnen Gemischen nachgewiesen werden. Ab einer relativen Fließgrenze $M_0 < 0,01$ mNm (Bild 4-27) kann von einer Sättigung gesprochen werden, da ab dieser Fließgrenze bei jedem Gemisch eine Sedimentation erkennbar war und sich bei der Messung des Setzfließmaßes (mit VICAT-Ring) Blutungserscheinungen zeigten (Bild 4-28).

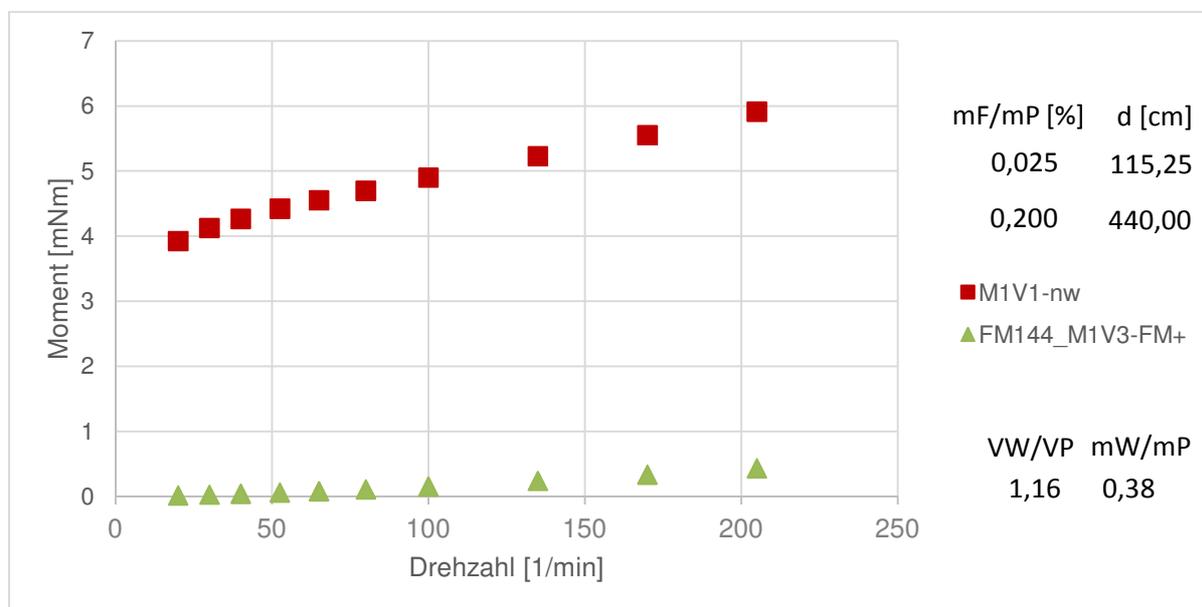


Bild 4-27 Fließkurve von Zement 102 bei reinem Wasseranspruch und hoher FM Zugabe (FM 144)



Bild 4-28 zweite FM-Zugabe (FM 144); im rechten Bild sind Blutungserscheinungen erkennbar

Die Sättigung ist bei den beiden Dolomitsteinmehlen, unabhängig von der Korngröße, früher erreicht, als bei Zementen. Kalksteinmehl 159 liegt zwischen den beiden Stoffkategorien. Bei Mikrosilika konnte bei allen Versuchen keine dispergierende Wirkung der Fließmittel festgestellt werden. Ab einer zu großen Dosierung kann aufgrund der zu steifen Konsistenz keine Messung am Rheometer vollzogen werden.

Laut Fließmittelhersteller liegt die maximale FM-Dosierung für das FM 144 bei 1,0 % und für das FM bei 1,5% bezogen auf das Bindemittelgewicht. Die in dieser Arbeit ermittelte Sättigungsdosierung beträgt für Zement 67-1006 1,39% und für Zement 102 1,67%, wobei bei Zement 102 noch keine Sedimentation erkennbar war und zusätzliche Dosierungen möglich gewesen wären.

5 Diskussion

Die Hauptfrage der Arbeit bezieht sich auf die Untersuchung der Interaktion der Wasser/Pulver-Gemische mit den verschiedenen FM abhängig von deren Feinheit bzw. mittleren Korngröße und deren mineralogischer Zusammensetzung. Für die Rezepturentwicklung der Ökobetone ist es wichtig, die Wirkung der einzelnen Fließmittel auf die unterschiedlichen feinen, pulverförmigen Stoffe zu kennen.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden insgesamt 9 pulverförmige Stoffe (2 Zemente unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Feinheit, jeweils 2 Gesteinsmehle der Gesteinsarten Kalkstein, Dolomit und Quarz unterschiedlicher Feinheit und 1 Mikrosilika) und 2 Fließmittel (FM 144 – hohe Ladungsdichte, FM 108 – niedrige Ladungsdichte) mit Hilfe eines Rotationsrheometers untersucht.

Ziel der Arbeit war es eine geeignete Methode am Rheometer zu finden, anhand welcher es möglich ist das Fließverhalten der Gemische beschreiben zu können. Für die Untersuchungen am Rheometer wurde ein modifizierter Ablauf nach Schachinger¹⁰² genutzt. Es sollte nach Korrelationen gesucht werden, die es erlauben das modifizierte Okamura¹² Verfahren, welche bis dato für die Untersuchung von Fließmittelwirkungen herangezogen worden ist, zu ersetzen. Für die Schlussfolgerungen und Diskussion in diesem Kapitel werden ebenso Ergebnisse von Schönauer¹ und Maier² herangezogen.

5.1 Korrelation modifiziertes Okamura-Verfahren mit rheologischen Kennwerten

In Bild 5-1 ist die gefundene Korrelationsfunktion des Setzfließmaßes und der relativen Fließgrenze, für unterschiedliche Ausgangskonsistenzen, also unterschiedliche Wasser/Pulver-Verhältnisse, ersichtlich.

Der breite Messbereich, von geringer bis hoher Fließfähigkeit, erlaubt keine zuversichtliche Aussage über die Korrelation. In den Randbereichen (Setzfließmaß <100mm und >200mm) können die Ergebnisse, aufgrund der nicht einwandfrei messbaren Konsistenz im Rheometer, verfälscht werden.

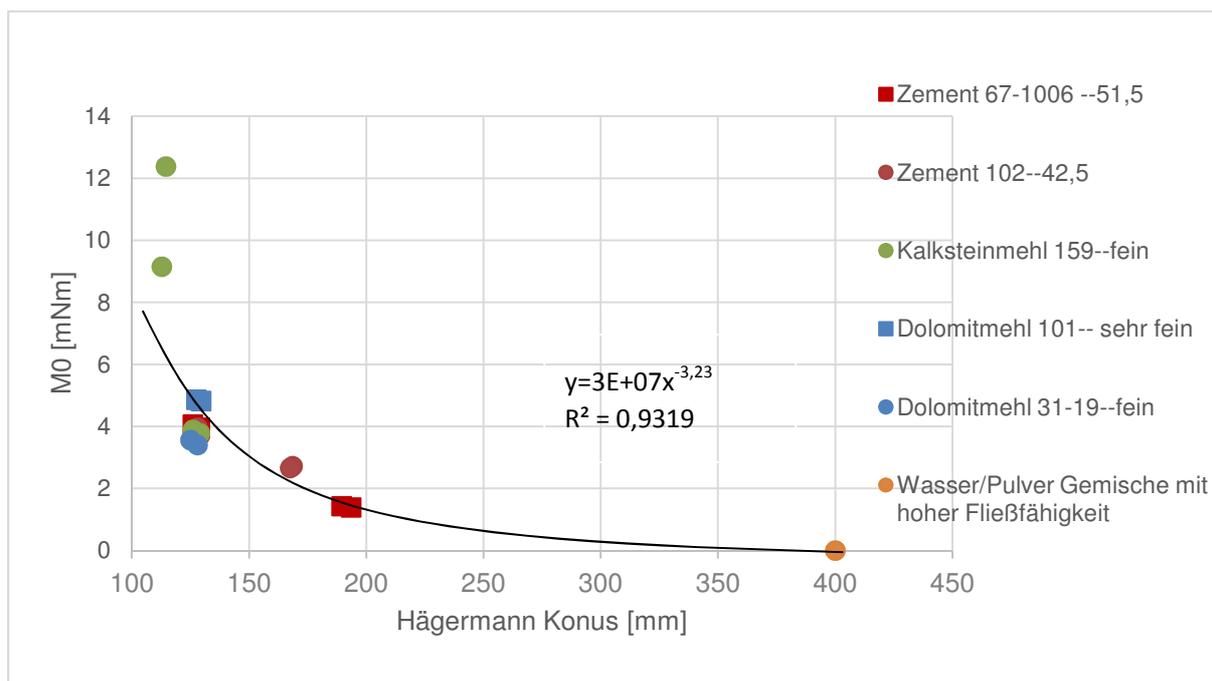


Bild 5-1 Korrelation relative Fließgrenze – Mörtelkonus

Bild 5-2 veranschaulicht den Messereich, der für das Aufstellen eine Korrelation anzuwenden ist. Es besteht hier, aufgrund der für das Rheometer einwandfrei messbaren Konsistenz, ein linearer Zusammenhang zwischen Setzfließmaß und relativer Fließgrenze. Die Untersuchungen zeigen, dass ein Setzfließmaß von 130 mm einer relativen Fließgrenze von etwa 4 mNm am verwendeten Gerät entspricht.

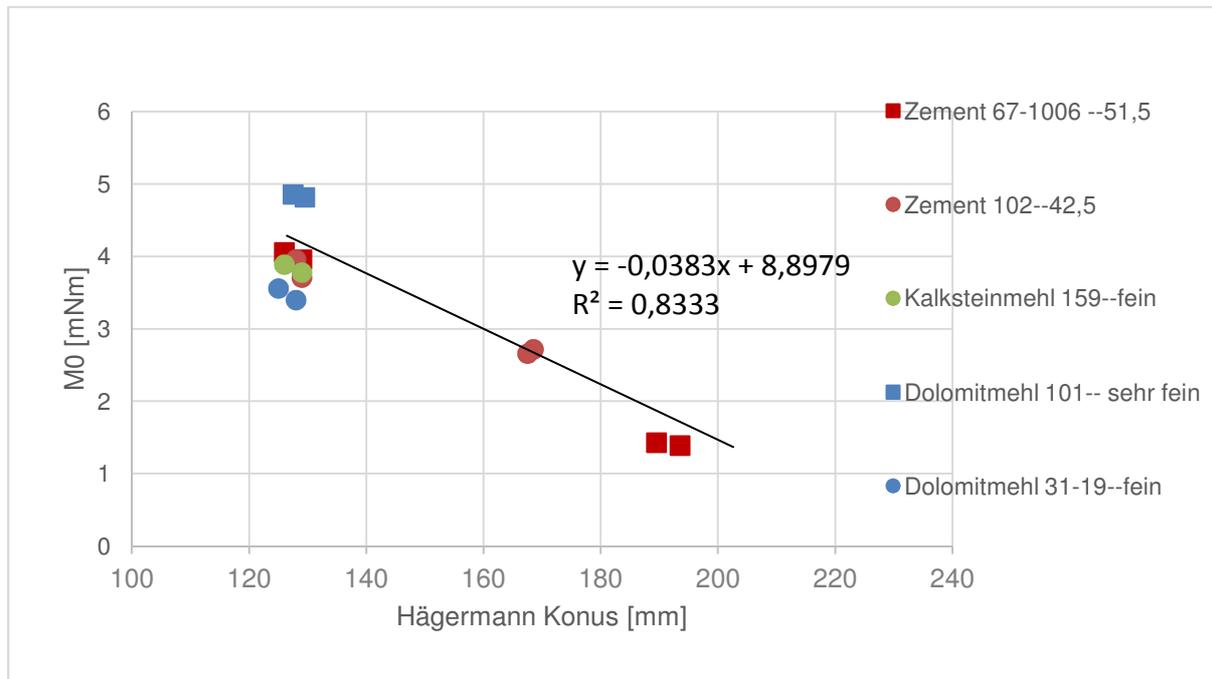


Bild 5-2 Korrelation relative Fließgrenze – Mörtelkonus

Es konnten Korrelation zwischen Mörtelkonus nach ÖNORM EN 1015-3²⁷ bzw. ÖNORM EN 196-1 (Verwendung des Hägermann-Konus) und dem ermittelten Setzfließmaß anhand des VICAT-Rings (Verwendung des VICAT-Rings nach ÖNORM EN 196-3) hergestellt werden. Durch die Untersuchungen unterschiedlicher Setzfließmaße und der Ermittlung der dazugehörigen relativen Fließgrenzen konnten folgende Beziehungen erstellt werden:

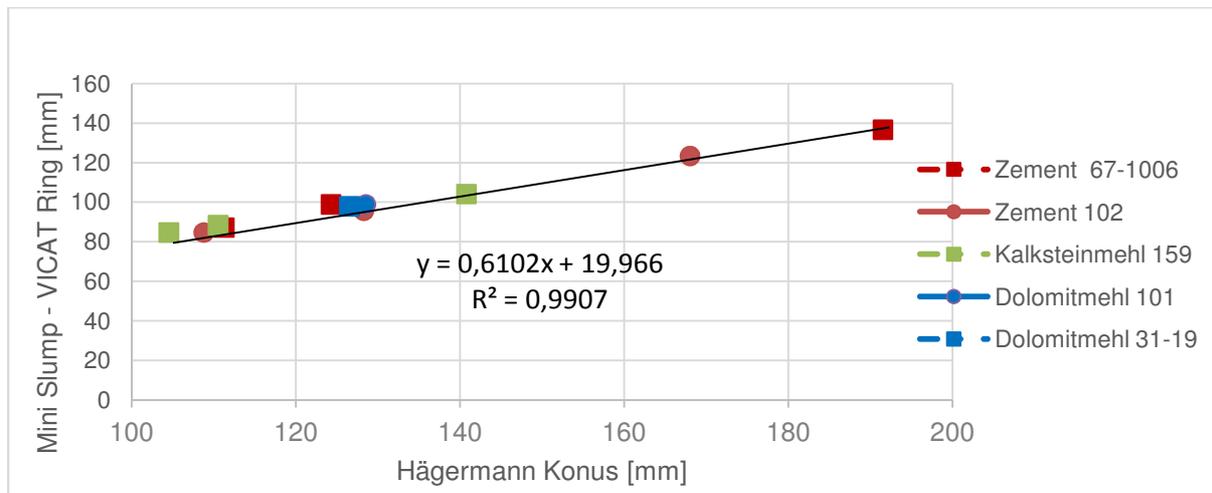


Bild 5-3 Korrelation Hägermann Konus und VICAT-Ring

Die Literatur-Recherche (siehe Bild 2-30) bestätigt, dass Setzfließmaß und Fließgrenze miteinander korrelieren¹⁰⁹. Durch die Messung am Rheometer erhält man zur Fließgrenze zusätzlich die Viskosität als Kennwert, was bei dem modifizierten Okamura¹² Verfahren nicht der Fall ist.

¹⁰⁹ Schmidt. 2014.: Zum Einfluss von Fließmitteln auf die frühe Zementhydratation, Folie 23

5.2 Einfluss von FM auf die Viskosität und Fließgrenze

Nach Schmidt¹¹, Haist⁴⁰ und Wallevik⁹⁴ ändert sich bei Zementleimen die Viskosität infolge einer FM-Zugabe. Die Untersuchungen in dieser Arbeit, zeigen dass dieser Effekt ebenso bei den Gesteinsmehlen zu verzeichnen ist. Durch die FM-Zugabe kommt es zu einer Änderung der relativen Fließgrenze, aber auch der Viskosität. In den Rheographen (Bild 5-4) ist die Fließmittel abhängige Änderung der Viskosität ersichtlich. Bei dieser Abbildung handelt es sich zwecks besserer Vergleichbarkeit um eine normierte Darstellung. Die beiden Zemente verzeichnen im Vergleich zu den restlichen Stoffen eine geringfügigere Änderung der Viskosität mit zunehmender FM-Dosierung. Die Fließmittel (FM 144 und FM 108) haben auf die Zemente und Dolomitmehl 31-19 einen Unterschied in der Wirkung. Kalk- und Dolomitsteinmehl 101 weisen bei beiden Fließmitteln (FM 144 und FM108) ein identisches Verhalten auf.

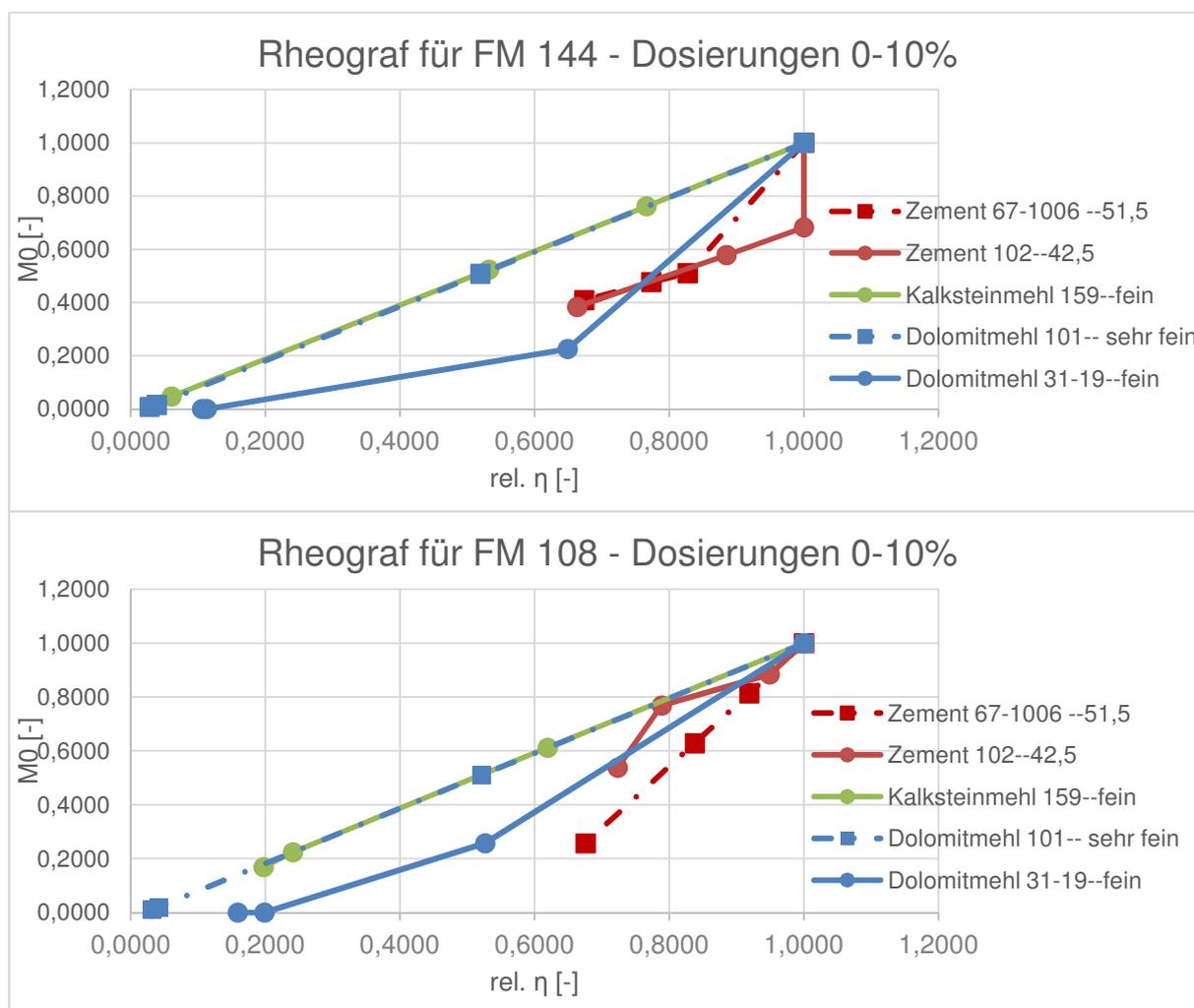


Bild 5-4 Rheograph für FM 144 und FM 108 bei FM Dosierungen von 0-0,1%

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse in den vorangegangenen Abschnitten ist zu sagen, dass pulverförmige Stoffe, bis auf die beiden Zemente, in der Regel stoffunabhängig mit zunehmender Feinheit einen höheren FM-Bedarf aufweisen.

Die Adsorption und die damit verbundene FM-Wirkung werden bei PCE Fließmitteln im Wesentlichen von der Feinheit und mineralogischen Zusammensetzung bestimmt.¹¹⁰ Die spezifische Oberfläche der Feststoffpartikel (Blaine Wert) ist im Vergleich zu den groben Stoffen größer (siehe Tabelle 3-1). Aufgrund der größeren Partikel-Oberfläche kommt es zu einer höheren Adsorption der FM-Moleküle, was eine höhere Dosierung mit sich bringt.

Die Untersuchungen zeigen ebenso, dass Gesteinsmehle wesentlich weniger FM bedürfen als die beiden Zemente. Im Vergleich zu den Gesteinsmehlen (Kalksteinmehl 159, Dolomitmehl 101 und Dolomitmehl 31-19) wird bei Zementen mehr Fließmittel benötigt und der Effekt ist im Vergleich zur Dosierung auch geringer.

Hydratationsprodukte überwachsen mit der Zeit die Oberfläche der Zementpartikel. Die bereits absorbierten FM-Moleküle sind daher nicht mehr wirksam und es müssen neue FM-Moleküle adsorbieren um eine Wirkung entfalten zu können. Bei den Gesteinsmehlen kommt es zu keiner Überwucherung und deshalb ist auch der FM-Bedarf geringer.

In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der FM-Bedarf in Porenlösung wesentlich höher ist (Vergleich Kalksteinmehl 159 Dosierung 0,1% - Bild 4-25) als in destillierten Wasser.

Nach der FM-Zugabe befinden sich die Fließmittel mit unterschiedlichen Ionen in Lösung. Die Adsorptionsflächen werden von den Sulfaten und Alkalien beeinflusst. Die PCE-FM konkurrieren mit dem Sulfat, wodurch die Adsorption der Fließmittel beeinflusst wird. Aufgrund der Sulfate müssen mehr FM in Lösung sein um auf der Oberfläche adsorbieren zu können.¹¹¹

¹¹⁰ Höveling. 2006: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB, S. 38 nach Bolmann

¹¹¹ Schmidt. 2014.: Zum Einfluss von Fließmitteln auf die frühe Zementhydratation , Folie 38

6 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde zunächst versucht Korrelationen zwischen Setzfließmaß und Rheometer Kenngrößen zu finden. Hierfür dienten Ergebnisse von Vorarbeiten und eigene zusätzliche Untersuchungen als Grundlage. Es handelt sich dabei um Versuche zur Ermittlung des Setzfließmaßes mit FM-Zugabe nach einer modifizierten Okamura¹² Methode (Setzfließmaß mit Hägermann-Konus auf trockener Glasplatte).

Hauptbestandteil dieser Arbeit waren vergleichende Untersuchungen am Rheometer von potenziellen Zusatzstoffen für einen ressourceneffizienten Beton, der am Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung der TU Graz entwickelt wird. Bei diesen Stoffen handelt es sich um 2 Zemente unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Feinheit, jeweils 2 Gesteinsmehle der Gesteinsarten Kalkstein, Dolomit und Quarz unterschiedlicher Feinheit und 1 Mikrosilika.

Es wurde die Interaktionen der Wasser/Pulver- Gemische mit zwei verschiedenen Fließmitteln untersucht. Bei den untersuchten Fließmitteln handelt es sich nach der Definition von Schmidt¹¹ um ein FM mit hoher Ladungsdichte (FM 144) und um ein FM mit niedriger Ladungsdichte (FM 108).

Die Methodenauswahl für die Untersuchungen am Rheometer war ein wesentlicher Bestandteil dieser Diplomarbeit. Durch eine einschlägige Literatur-Recherche wurden diverse Mess-Abläufe analysiert und Voruntersuchungen unterzogen. Die Methode, welche am Rheometer zur Anwendung kam, ist ein modifizierter Versuchsablauf nach Schachinger¹⁰². Ein wichtiger Aspekt bei der Erarbeitung der Methodik ist, dass die Ermittlung der rheologischen Eigenschaften der Gemische in einem Rotationsbereich stattfindet, welcher der späteren Anwendung entspricht.¹¹² Der bestehende Ablauf wurde um zusätzliche Rotationsgeschwindigkeitsstufen erweitert um etwaige Ungenauigkeit der Messdaten auf ein Minimum zu reduzieren. Durch die im Nachhinein implementierten Datenpunkte soll eine möglichst realitätsnahe Fließkurve ermittelt werden können. Die Vorscherphase bei höchster Rotationsgeschwindigkeit soll etwaige Agglomerate im Prüfbehälter dispergieren und das Eintreten des Gleichgewichts, welcher für die Auswertung des Datensatzes wesentlich ist, gewährleisten.

Für die Untersuchungen wurde ein eigens hergestellter Schneckenrührer verwendet. Als Auswahlkriterium wurde dabei eine möglichst gute Rührwirkung während der Messung vorausgesetzt. Durch die Rührwirkung soll eine Homogenisierung der Gemische gewährleistet bzw. Agglomerate und Sedimentation sollen während der Messung möglichst gering gehalten werden. Durch den Rührer darf es zu keiner Randausbildung der Suspension kommen, da diese die Messung verfälschen würde.

Die Vergleichbarkeit zwischen dem modifizierten Okamura¹² Verfahren und den rheologischen Kennwerten konnte gezeigt werden. Die relative Fließgrenze korreliert mit dem Setzfließmaß.

Die Sättigungsdosierung kann im Rheometer an einer relativen Fließgrenze bei $M_0 < 0$ mM erkannt werden. Die Sättigung ist bei den Gesteinsmehlen (Kalksteinmehl 159, Dolomitmehl 101 und Dolomitmehl 31-19) im Vergleich zu den Zementen (67-1006 und 102) in der Regel

¹¹² Feys. 2014: Sieben Schritte zur Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit rheologischer Messungen an zementgebundenen Baustoffen, S. 58 – 64.

früher erreicht. Das sehr feine Kalksteinmehl 179 bedarf im Vergleich zu den anderen Stoffen eine wesentlich höhere Dosierung, um eine im Vergleich geringere Verflüssigungswirkung zu erzielen.

Es wurde erkannt, dass die FM-Wirkung in der Regel von der Feinheit und mineralogischen Zusammensetzung der Stoffe abhängt, da diese die Adsorptionsneigung der Moleküle beeinflussen. Im Wesentlichen wirken die Fließmittel auf zementfeine Gesteinsmehle stärker verflüssigend (=Herabsetzung der relativen Fließgrenze und relativen Viskosität) als auf Zemente. Bei einigen sehr feinen Gesteinsmehlen zeigen die Fließmittel aber eine geringe Wirkung als auf Zement.

Die Stoffart hat auf die FM-Wirkung einen großen Einfluss. Generell wirken FM stärker verflüssigend (=Reduktion der relativen Fließgrenze & relativen Viskosität) auf Gesteinsmehle als auf Zement in Wasser/Pulver-Gemischen mit einem niedrigen Wassergehalt nahe dem Sättigungswasseranspruch. Hierbei zeigen sich stoffspezifische Unterschiede der FM-Wirkungen abhängig von der Feinheit. Die Wirkung der Fließmittel ist bei den Dolomitmehlen unabhängig von der stark unterschiedlichen Feinheit nahezu ident.

Bei einigen Stoffen (Quarzmehl, Kalksteinmehl) kommt es mit zunehmender Feinheit zu geringeren Herabsetzten der relativen Fließgrenze bei relativ niedrigen FM-Dosierungen. Bei Mikrosilika sogar zu einer Erhöhung (Agglomeration).

Im Gegensatz zu groben Stoffen benötigen feine Stoffe, aufgrund der größeren spezifischen Oberfläche, eine höhere Dosierung. Der höhere FM-Bedarf erklärt sich bei den Zementen durch die Wechselwirkung zwischen der Zementhydratation und den PCE Fließmitteln.

Bei hohen V_w/V_p – Werten der Ausgangsgemische verlieren die Fließmittel ihren Einfluss und es zeigen sich nur geringe Wirkungen auf relative Fließgrenze und keine Wirkungen auf die Viskosität. Das gilt nur für Stoffe mit geringen E_p d.h. Sensibilität auf Wasserzugabe ist hoch.

7 **Ausblick**

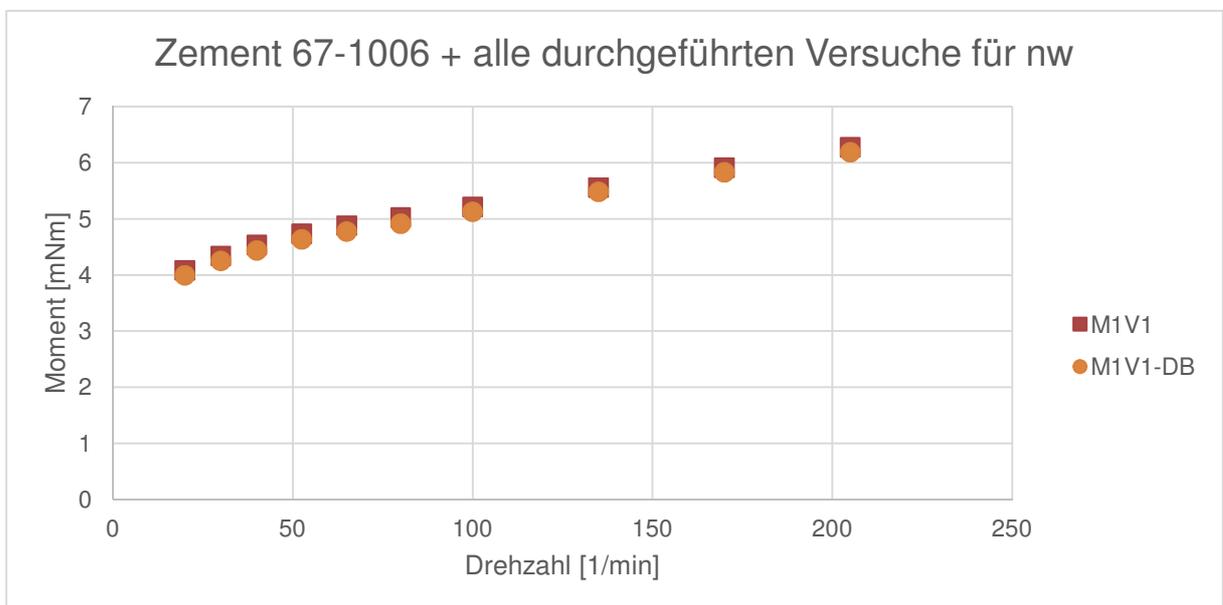
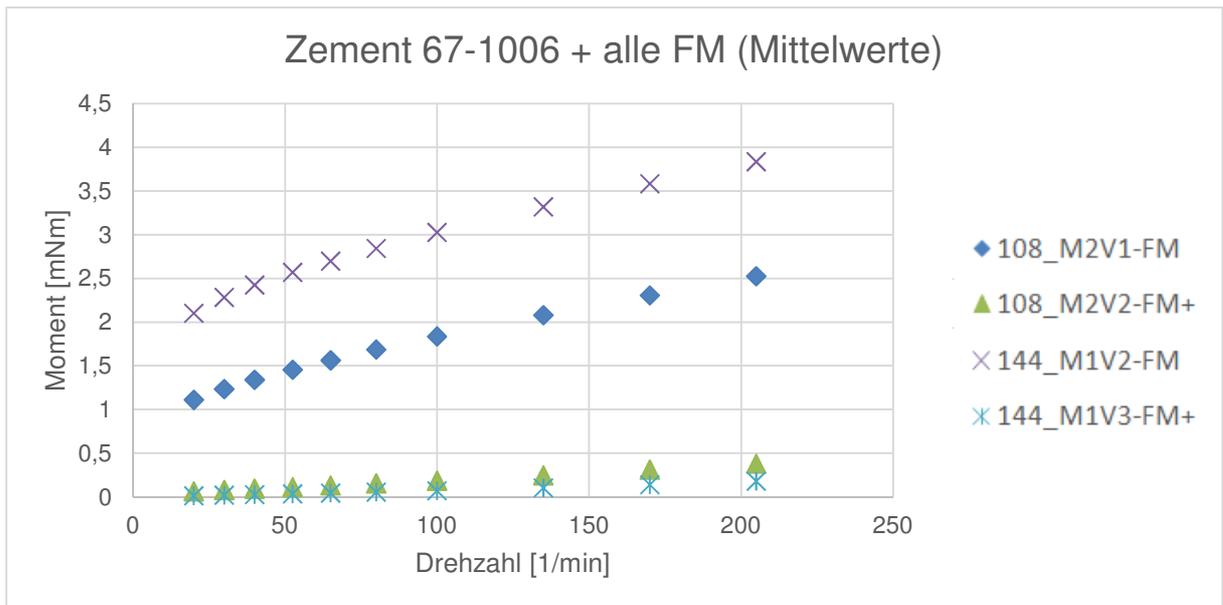
Aufgrund ihrer thixotropen Eigenschaften benötigen die Quarzmehle sowie das Kalksteinmehl 179 eine entsprechende Mischenergie, die in der Lage ist die Ausgangsstoffe auch bei geringem Wasseranspruch zu homogenisieren. Durch eine entsprechende Mischvorrichtung muss das Anmachen der Ausgangsstoffe auch bei geringerem Wasseranspruch gewährleistet werden. Durch die Mischvorrichtung in dieser Diplomarbeit war es nicht möglich mit geringeren Wasseransprüchen zu arbeiten. Für nachfolgende Untersuchungen ist eine geeignete Mischapparatur, welche das Anrühren der Ausgangsstoffe bei kritischen Wasseransprüchen ermöglicht, zu verwenden.

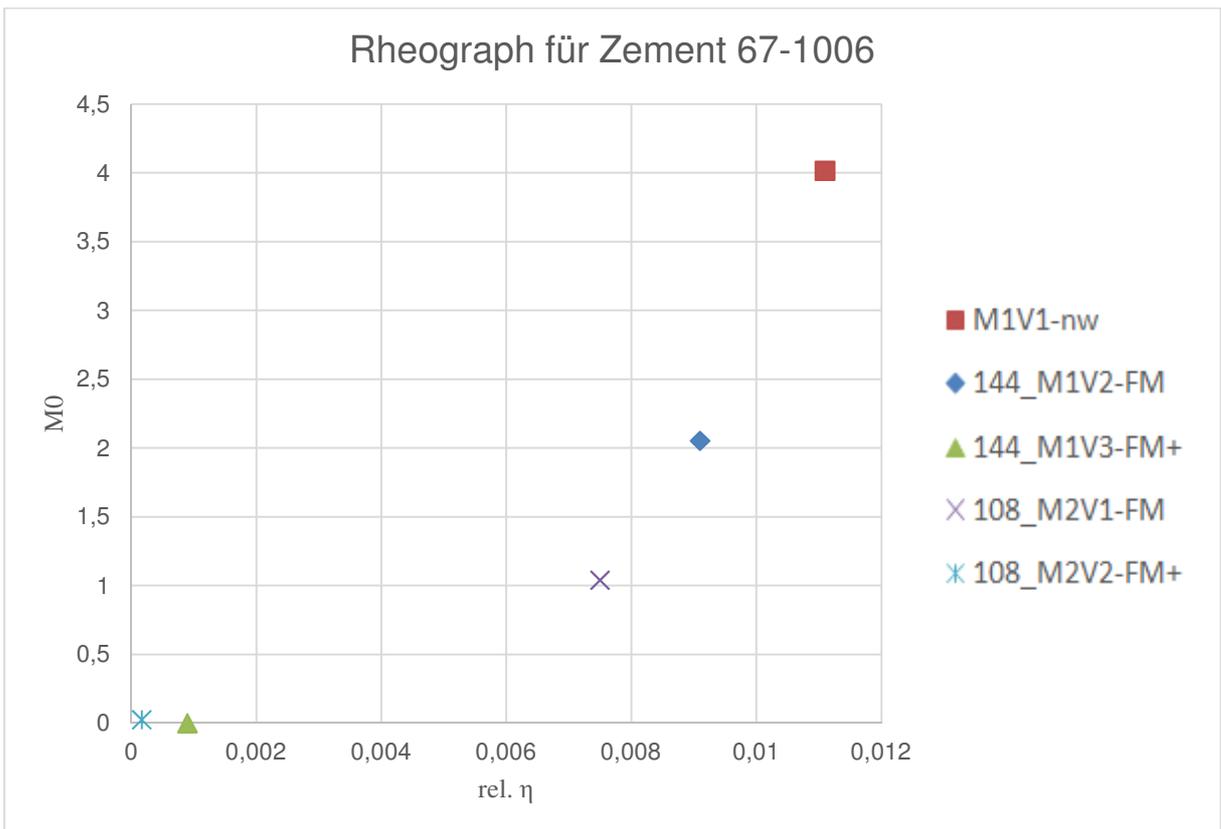
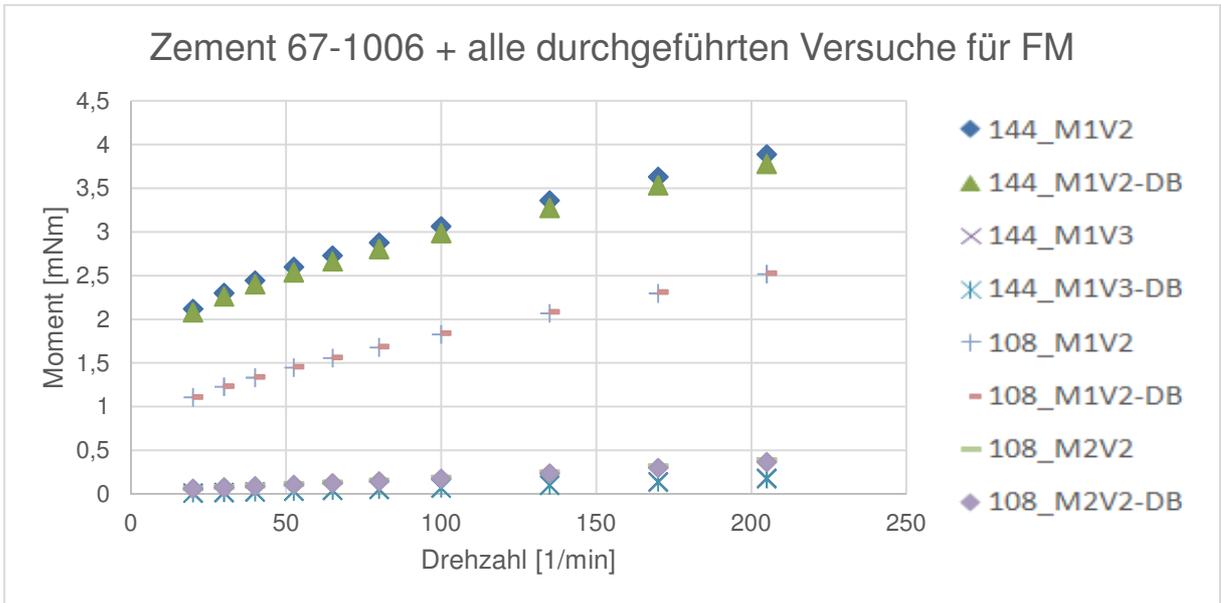
Einige Daten der Diagramme basieren auf einer linearen Interpolation aus 3 Punkten. Aufgrund der Tatsache, dass während der Untersuchungen am Rheometer nicht bei jedem Gemisch die gleichen Dosierung an Fließmittel verwendet worden ist, war es notwendig für eine Vergleichbarkeit bei einer Dosierung die fehlenden Daten linear zu interpolieren. Diese errechneten Werte sollten zukünftig durch zusätzliche Versuche ersetzt werden. Für genauere Aussagen ist es einer vertieften Analyse notwendig. Da es einer größeren Datenbasis Bedarf sind die Untersuchungen um weitere Datenpunkte zu erweitern.

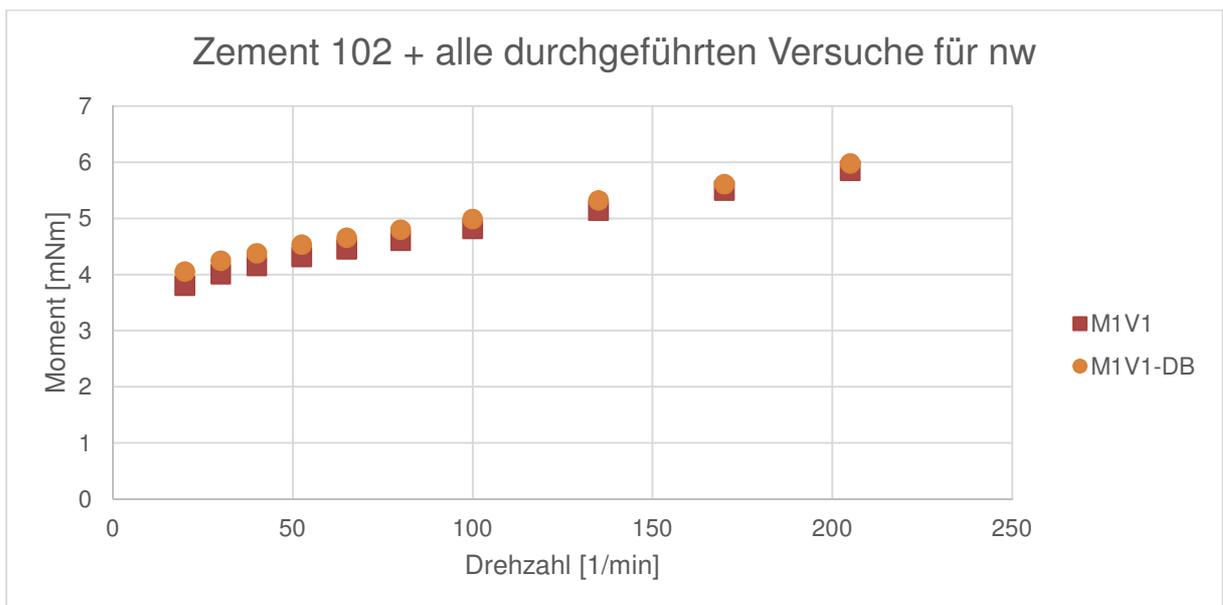
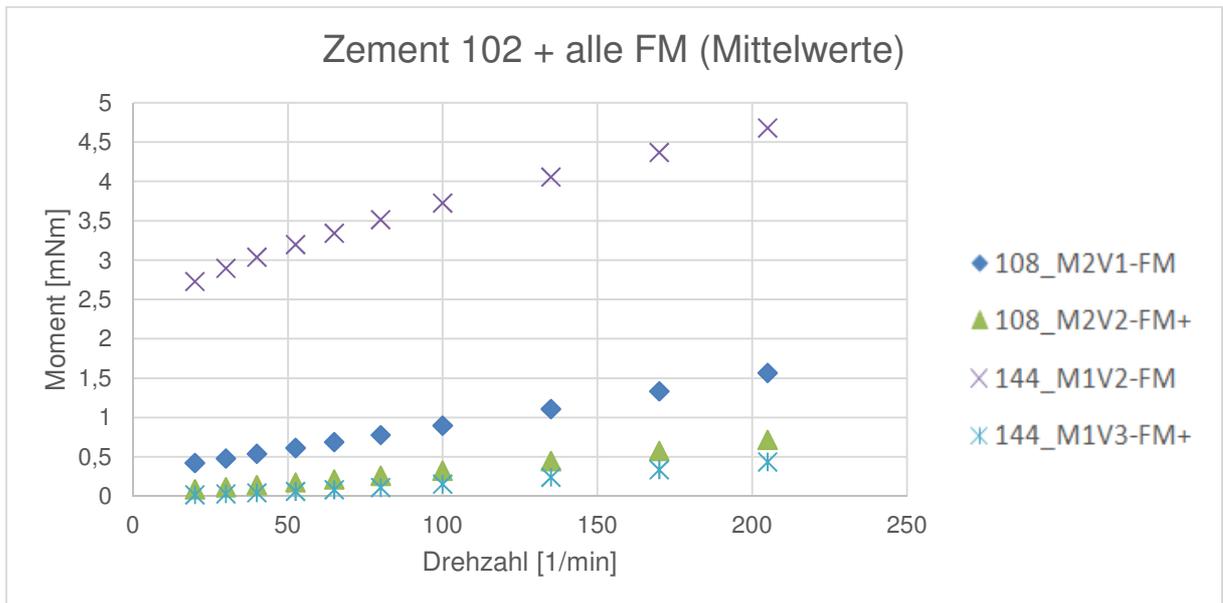
Bei den Gesteinsmehlen sind die Effekte, welche eine Substitution des Anmachwassers durch eine Porenlösung mit sich bringt, zu analysieren um die genauen Auswirkungen bestimmen zu können.

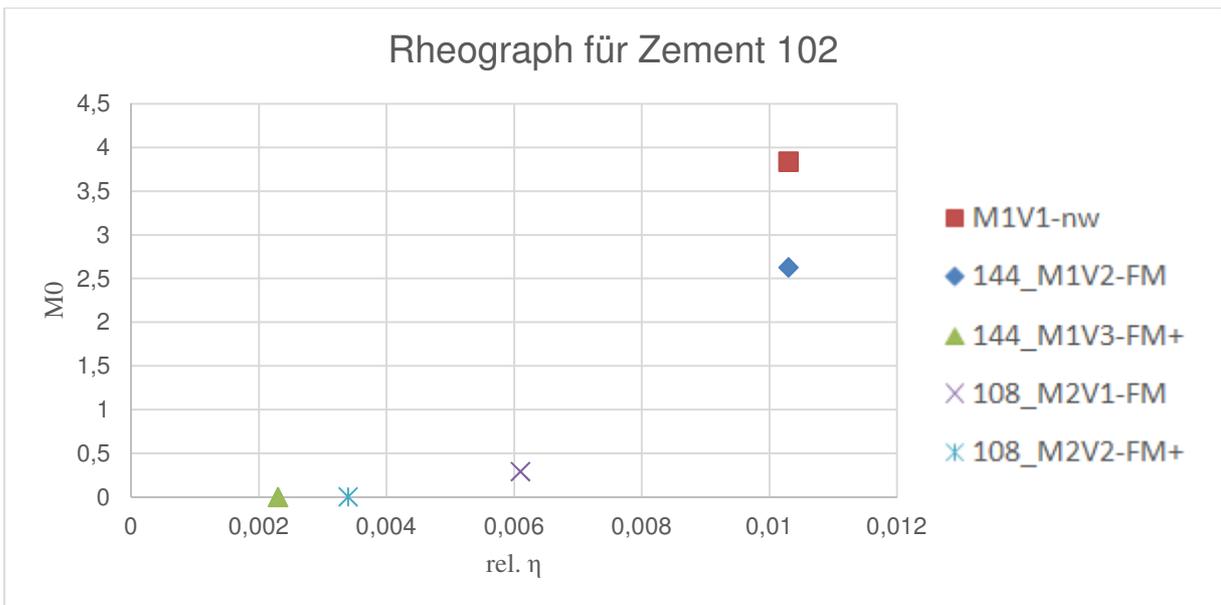
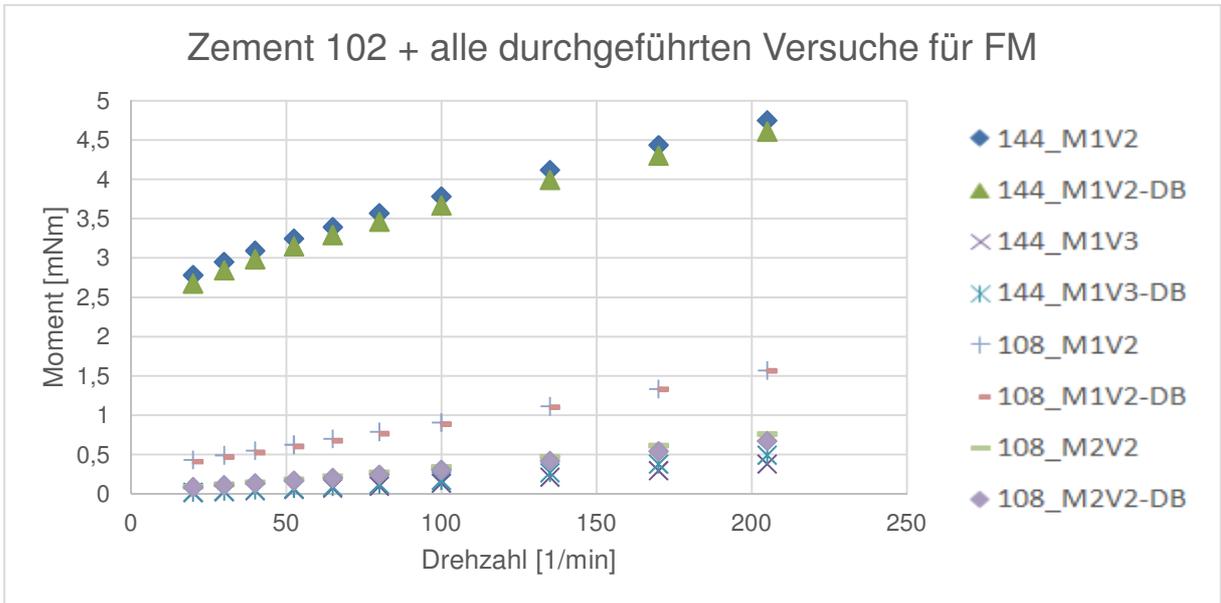
8 Anhang

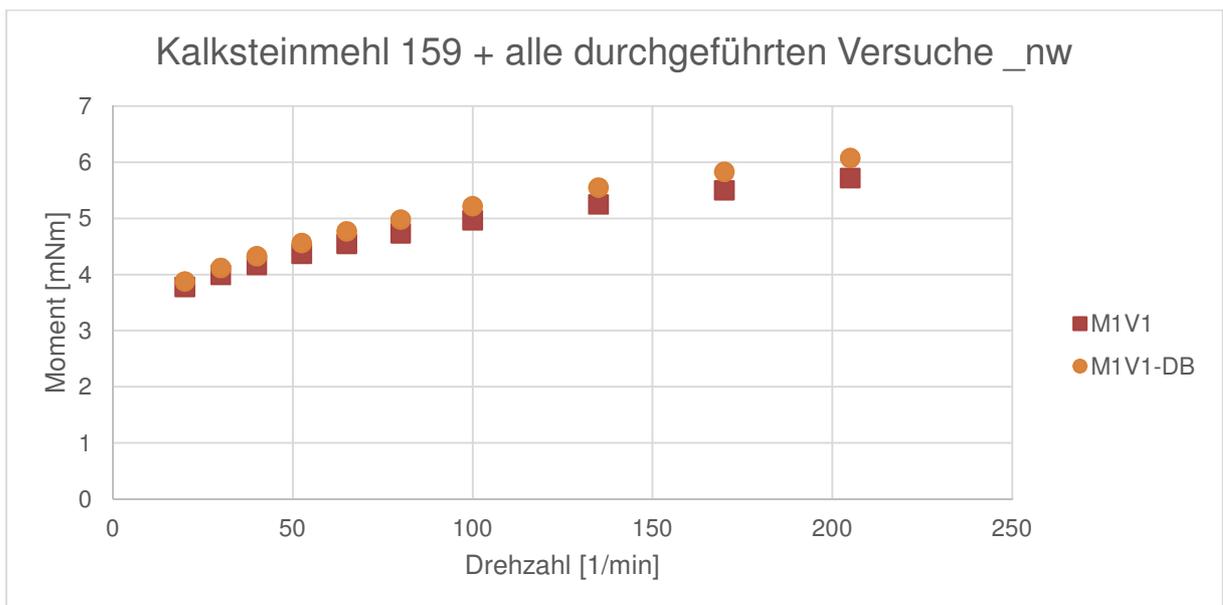
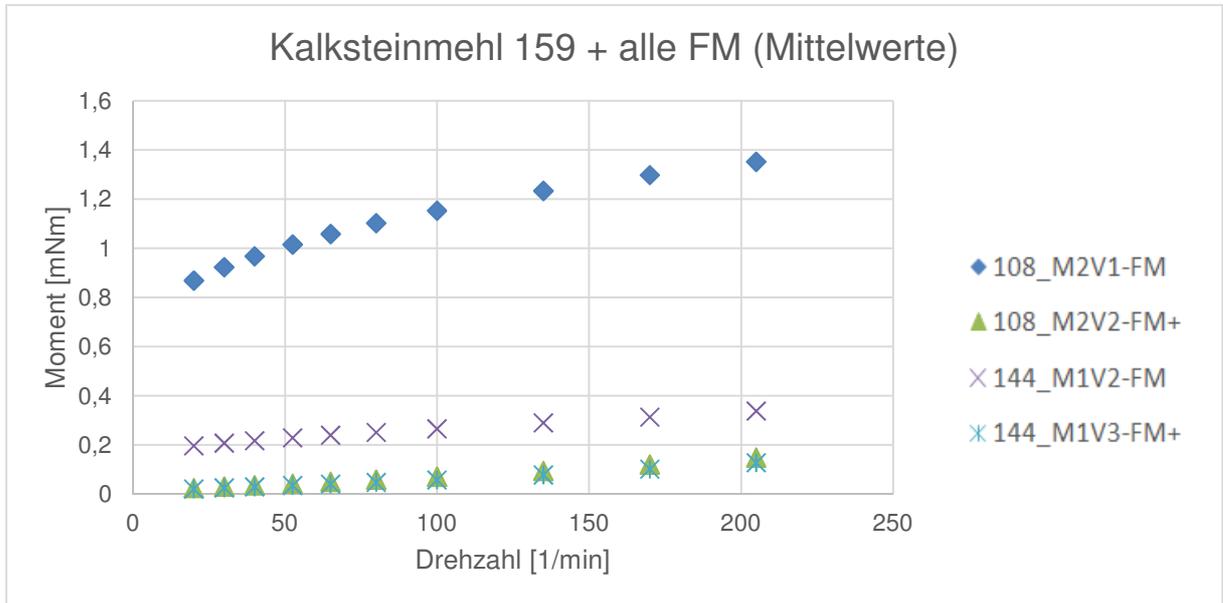
8.1 Auswertung der Versuche aller Wasser/Pulver Gemische mit konstantem Wasseranspruch (Setzfließmaß~130 mm)

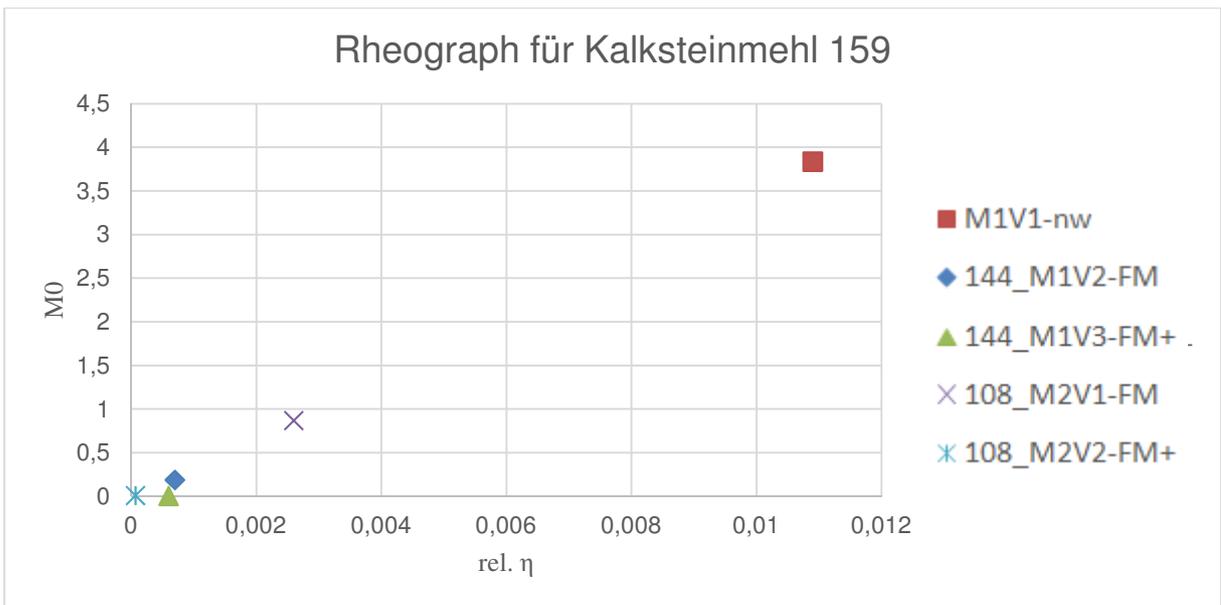
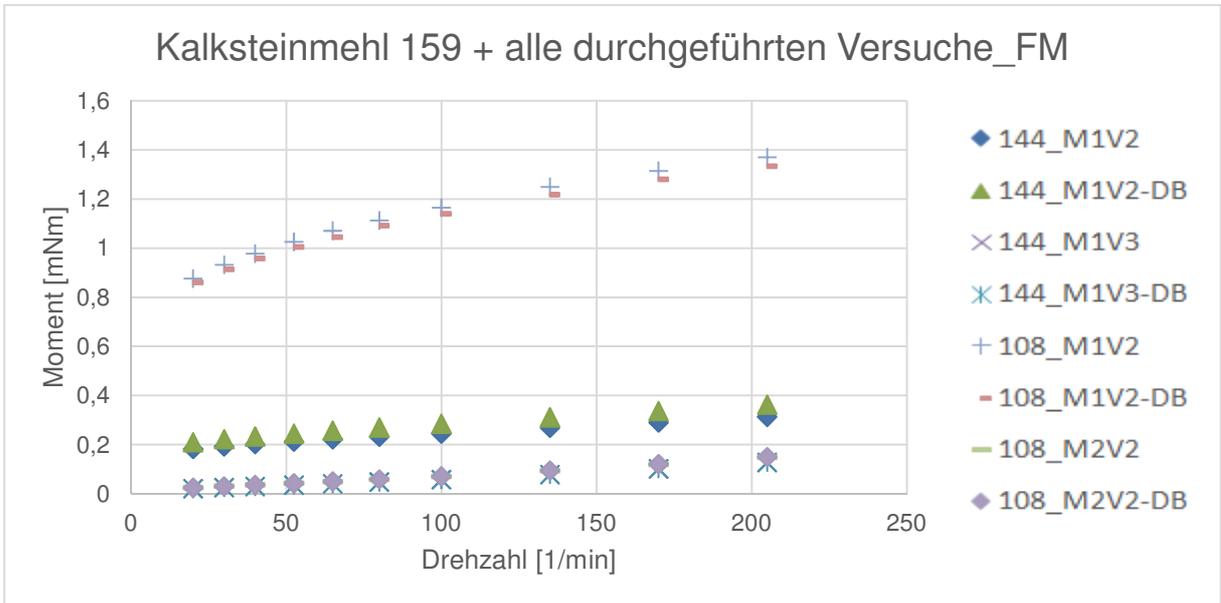


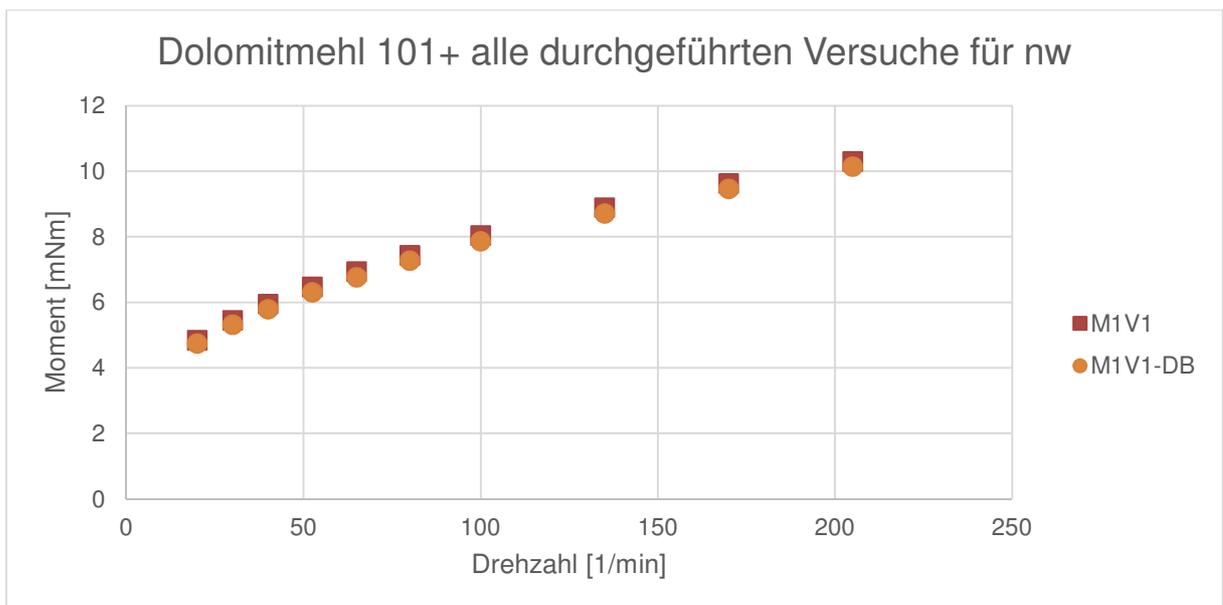
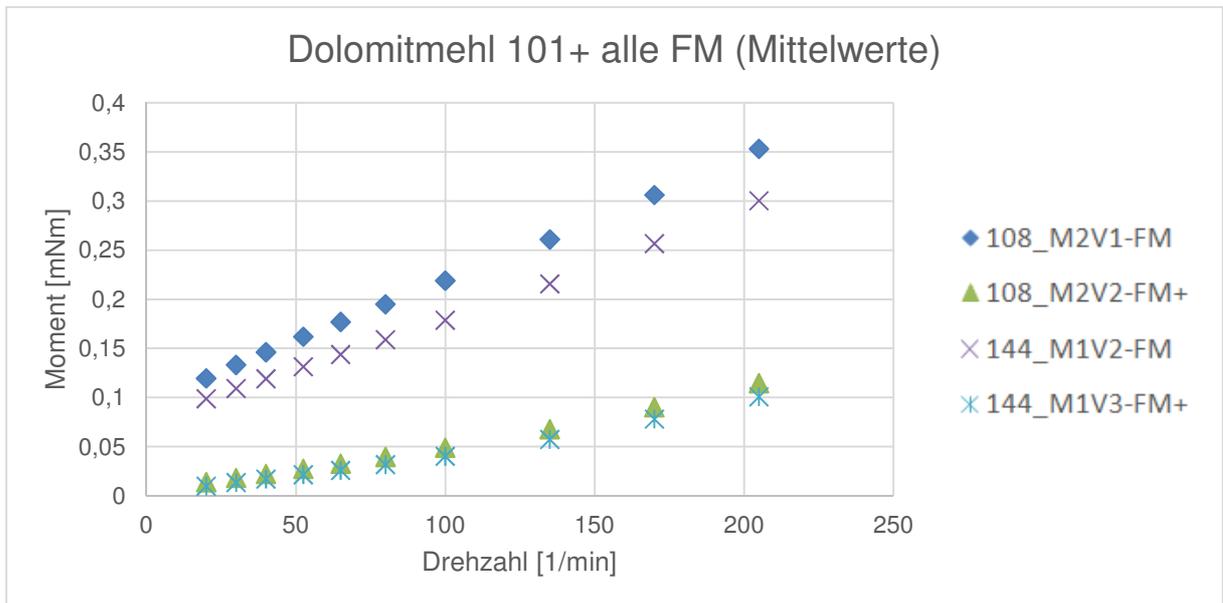


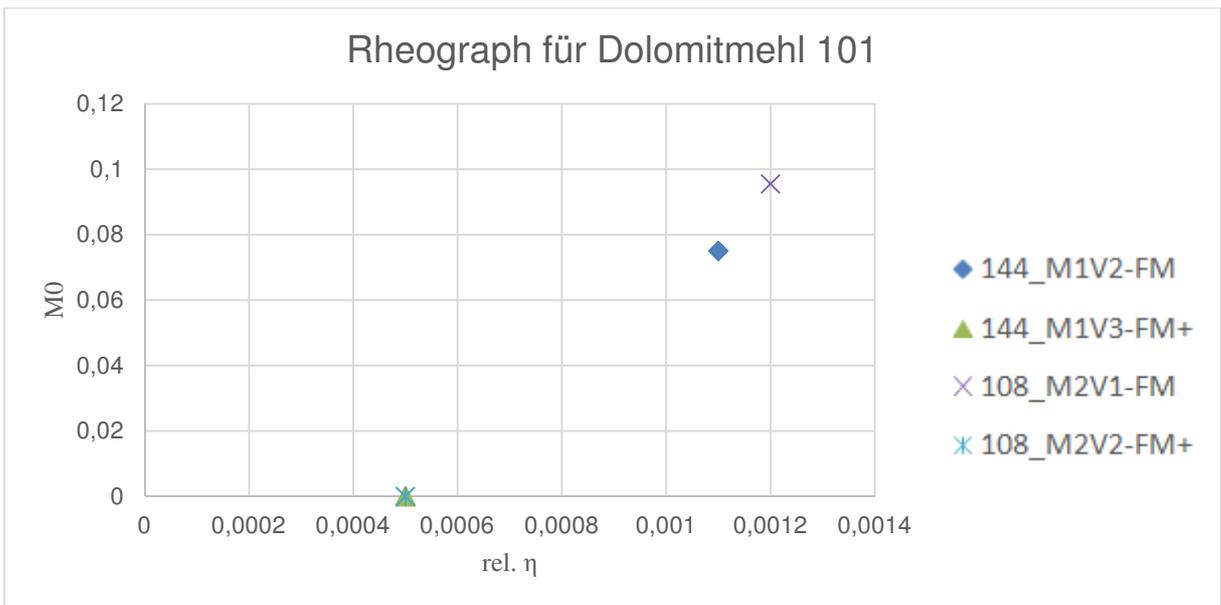
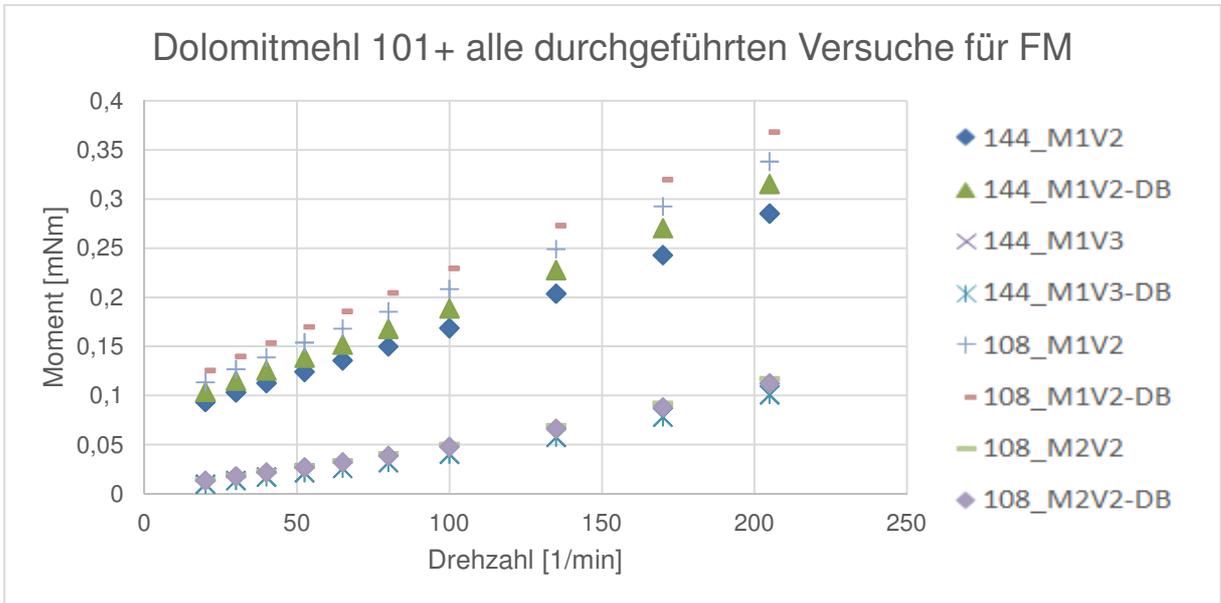


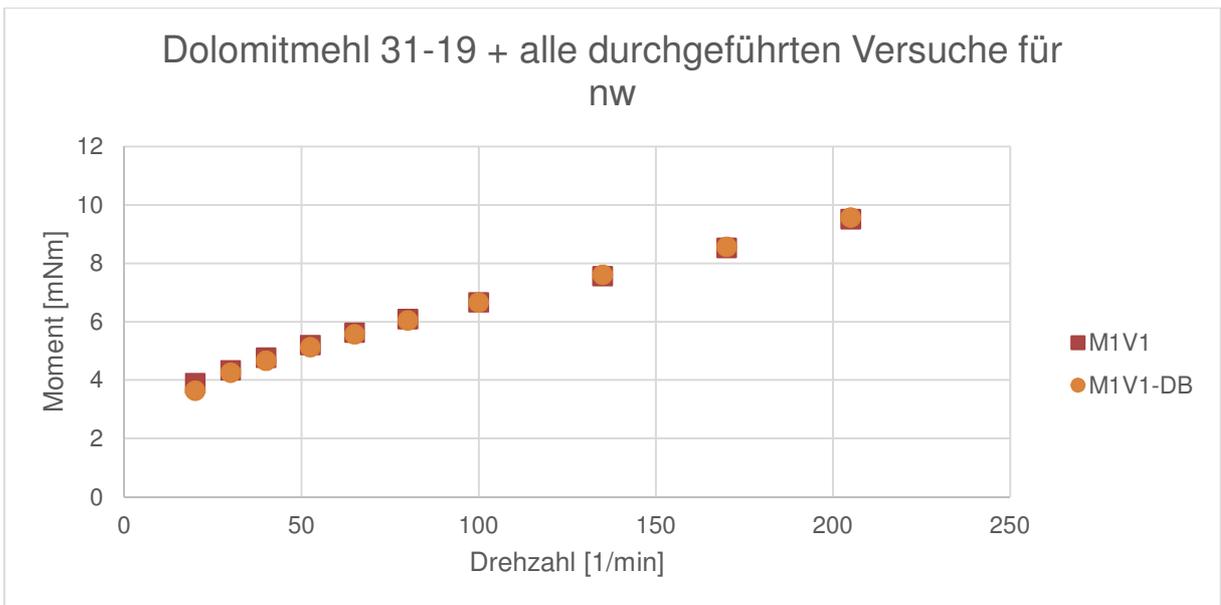
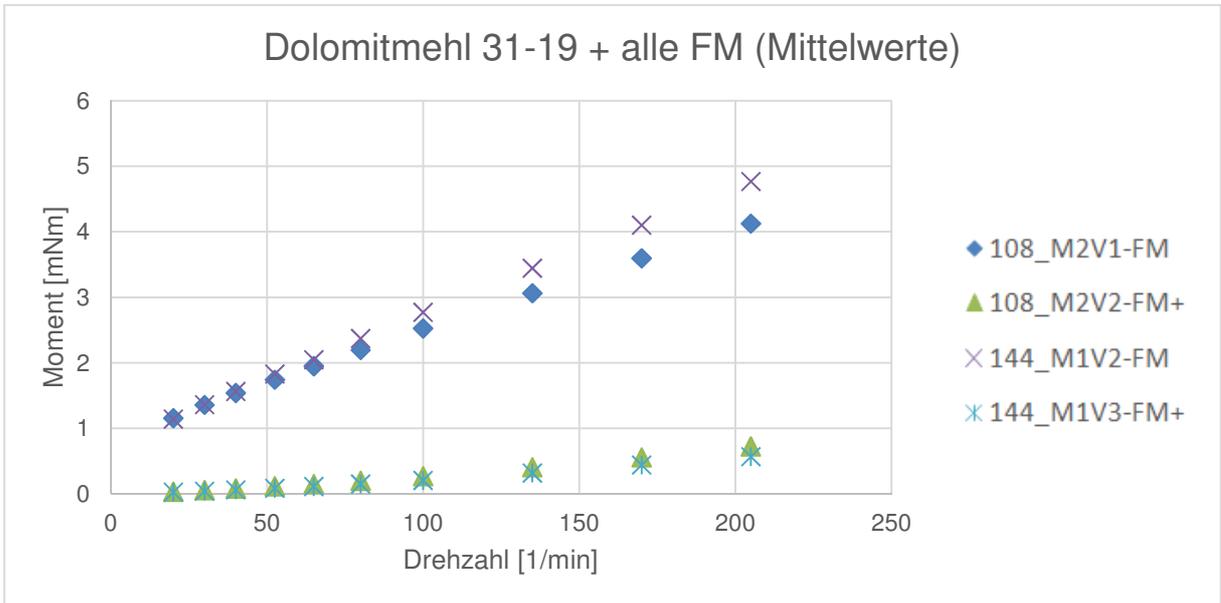


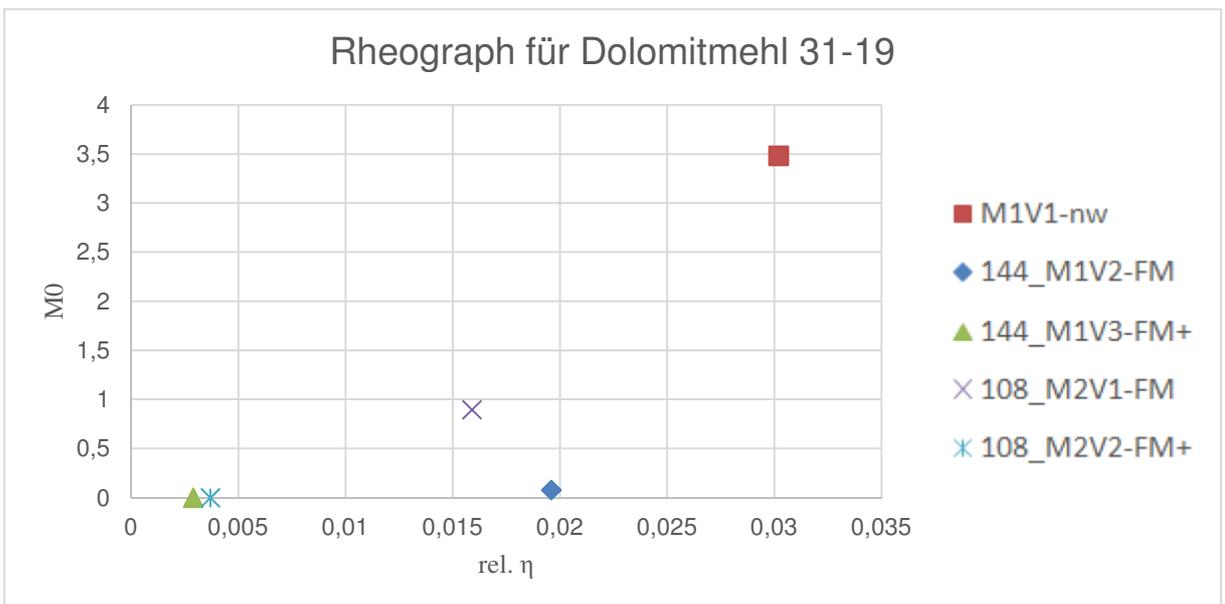
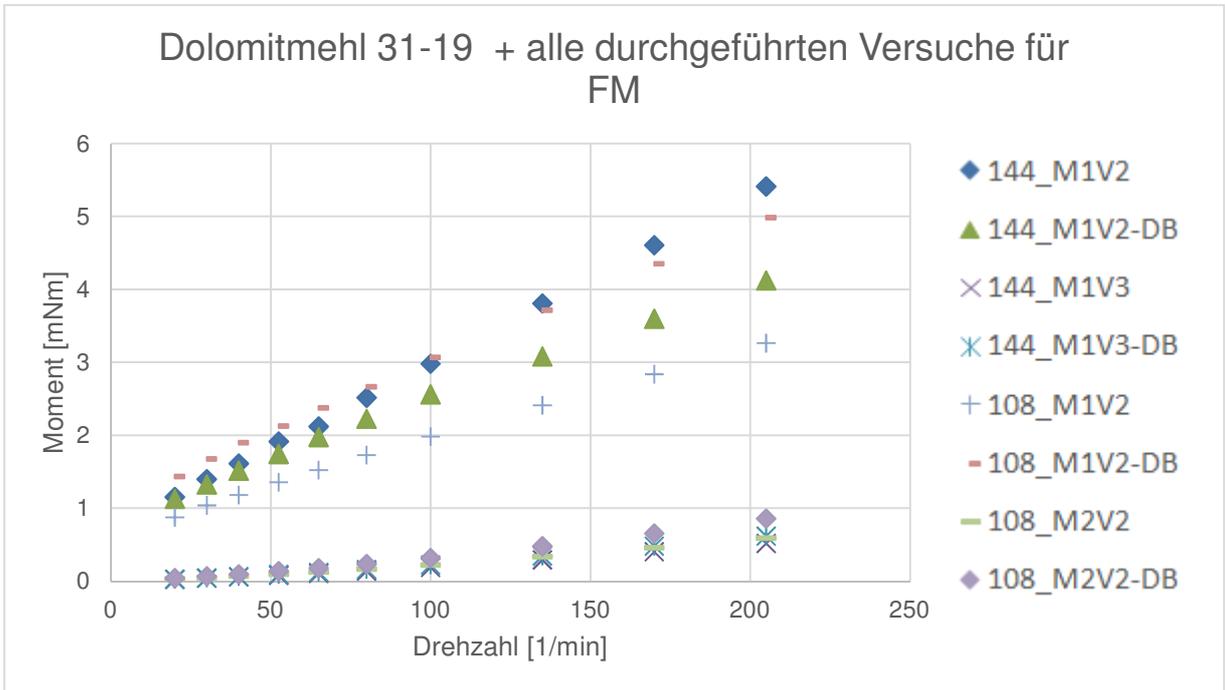




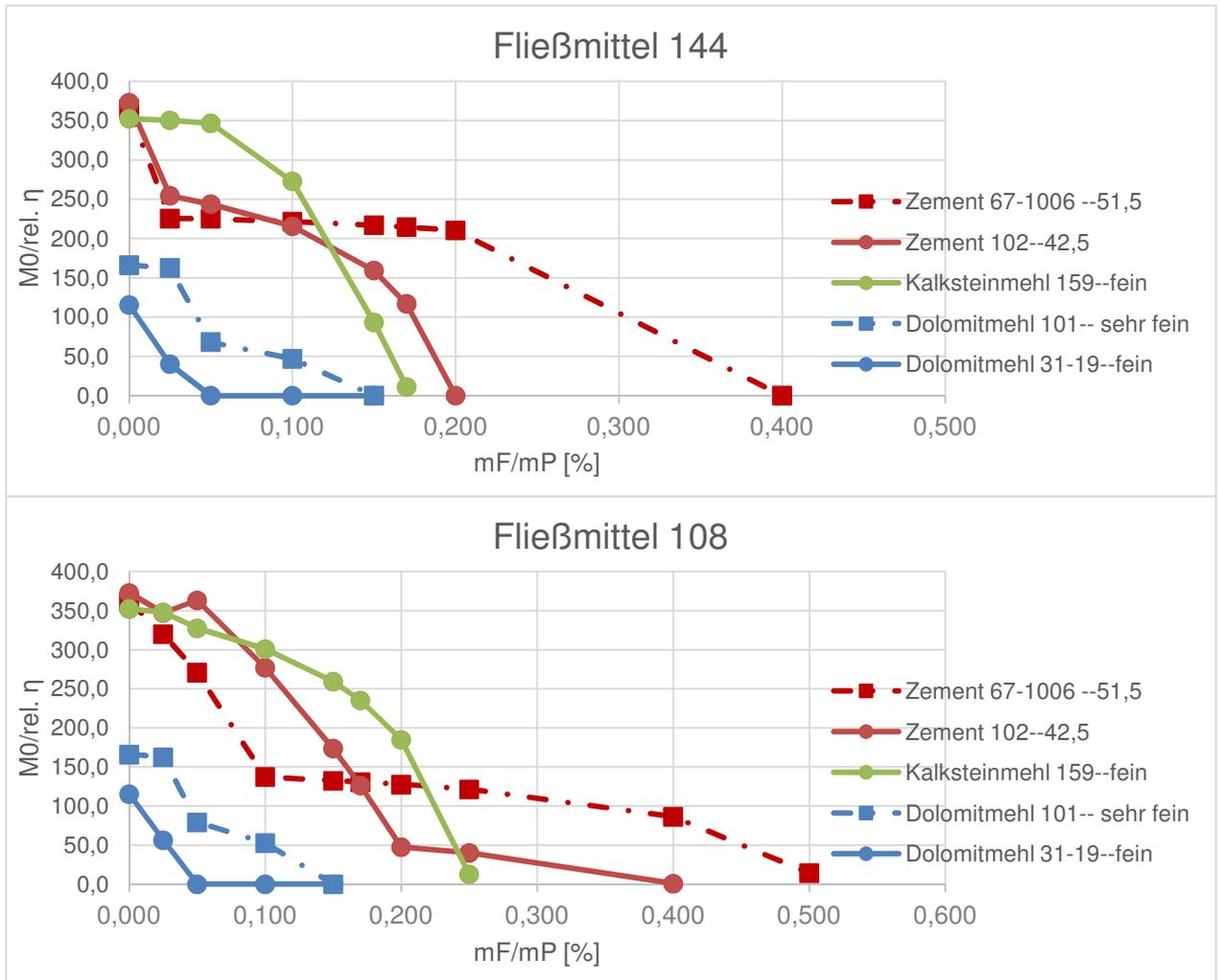








8.2 Verhältnis relative Fließgrenze/relative Viskosität in Abhängigkeit der FM-Dosierung



9 Literaturverzeichnis

- BASF. „Wirkung von Fließmitteln in Zementgebundenen Baustoffen.“ Technisches Merkblatt, 2008.
- BASF. „Maßgeschneiderte Zusatzmittel für Beton.“ Journalisten und Wissenschaftler im Gespräch – Chemie Innovationen für die Baubranche, Ludwigshafen, 2007.
- Bonen, D., und S. Sarkar. „The Superplasticizer Adsorption Capacity of Cement Pastes, Pore Solution Composition, and Parameters Affecting Flow Loss.“ *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, 1995.
- David, G. „Evaluierung von Methoden zur Messung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs pulverförmiger Stoffe für ressourceneffizienten Beton.“ 2. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 2014, S. 9-24.
- Feys, D. „Sieben Schritte zur Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit rheologischer Messungen an zementgebundenen Baustoffen.“ *Betonwerk International*, Heft 5, 2014, S. 58-64.
- Haist, Michael. „Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen.“ Dissertation - Institut für Massivbau und Baustofftechnologie Universität Karlsruhe, 2009.
- Höveling, H. „Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB).“ Dissertation - Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Universität Hannover, 2006.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). „Climate Change“, Synthesis Report, 2014
- Juhart, J. „Ökologisch optimierter Beton: Stoffauswahl und Methoden der Rezepturenentwicklung.“ 2. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 2014, S. 221-229.
- Juhart, J., und Tritthar J. „Betontechnologische Methoden zur Klinkerreduktion im Beton.“ 1. Grazer Betonkolloquium, TU Graz, 2012, S.187-192.
- Kordts, S. „Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone.“ Dissertation - Technischen Universität Berlin, 2005.
- Lowke, D. „Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone.“ Bd. Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen.“ Dissertation – TU München, 2013.
- Maier, C. „Untersuchungen zur Wirkung von PCE-Fließmitteln auf stoffe für Ressourcen optimierten Beton.“ Master Projekt - Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung TU Graz, in Arbeit 2014.
- Maydl, P.. „Skriptum Baustofflehre GL.“ Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung TU Graz, 2007.
- Okamura, H., Ouchi, M., und Otawa, K. „A Rational Mix- Design Method for Mortar in Self-Compacting Concrete.“ *The 6th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*. Nr. 14-16. Taipei-Taiwan, 1998, S.1307-1312.
- Okamura, H., und Ouchi, M. „Self-compacting concrete.“ *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Vol. 1, No. 1 P 5-15, 2003, S.7.
- ÖNORM EN, 196-3. „Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit“ 2009.

- ÖNORM EN, 1015-3. „Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).“ 2007.
- Plank, J., Bassioni, G., Dai, Z., Keller, H., Sachsenhauser, B., und Zouaoui, N. „Neues zur Wechselwirkung zwischen Zementen und Polycarboxylat-Fließmitteln.“ Weimar, 2006, S. 579-598.
- Proske, T., Graubner, C.A., und Hainer S. „Ökobetone zur Herstellung von Fertigbetonbauteilen.“ Vortrag bei den Darmstädter Betonfertigteiltagen, Ökobeton für Betonfertigteile, 2012.
- Schachinger, A. I. „Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität.“ Dissertation - Technische Universität München, 2007.
- Schmidt, W. „Design Concepts for the Robustness Improvement.“ Dissertation - Technische Universität Eindhoven, 2014.
- Schmidt, W. „Zum Einfluss von Fließmitteln auf die frühe Zementhydratation.“ Vortragsreihe der Fakultät für Bauingenieurwesen der TU Graz, 2014.
- Schönauer, A. „Die Wirkung von Fließmittel (PCEs) auf das Fließvermögen von Stoffgemischen für Ressourcen – effizienten Beton und deren zeitliche Abhängigkeit.“ Bachelor Projekt - Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung TU Graz, in Arbeit 2014.
- Teichmann, T. „Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein.“ Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Uni Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 12, 2008.
- Tritthart, J. „interne Untersuchung am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung TU Graz“, 2012 unveröffentlicht.
- Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ). „Nachhaltigkeitsbericht.“ 2010.
- Wallevik, O. H. „Introduction to Rheology of Fresh Concrete.“ ICI Rheocente course, Reykjavik, 2009.
- Wallevik, O. H. „Description of Fresh Concrete Properties by use of Two-Point Workability Test Instrument.“ Diplomarbeit - The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1983.
- Wallevik, O. H. und Wallevik, J. E. „Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes.“ Cement and Concrete Research, Nr. 41, Reykjavik, 2011, S.1279-1288.
- wikipedia.org.
„http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid#mediaviewer/Datei:Scherspannung_Nichtnewtonscher_Fluide_linear.png.“ Download 18.07.2014.
- wikipedia.org.
„http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid#mediaviewer/Datei:Thixotropie_und_Rheopexie.svg.“ Download 18.07.2014.
- wikipedia.org.
„http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsches_Fluid#mediaviewer/Datei:Viskosit%C3%A4t_Nichtnewtonscher_Fluide_linear.png.“ *wikipedia.org*. Download 18.07.2014.
- wikipedia.org.
„<http://de.wikipedia.org/wiki/Rheologie>.“ Download 18.07.2014.

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom(Master)arbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
B – Projekt Bachelor | M – Projekt Master | S – Skripten,
Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl