

Ein Beitrag zur Bestimmung der Rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem Kugel-Messsystem

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Ruhr-Universität Bochum

von

Florian Fleischmann

Regensburg, 2014

Dissertation eingereicht am 05.03.2014

Mündliche Prüfung am 26.06.2014

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Wolfgang Kusterle

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2014 während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Regensburg, wo ich das Forschungsprojekt „KONSTROLL“ betreute. Im Rahmen einer kooperativen Promotion wurde diese Arbeit von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Ruhr-Universität Bochum als Dissertation angenommen.

Ein besonderes Dankeschön gilt an erster Stelle Herrn Prof. Dr. Wolfgang Kusterle von der OTH Regensburg für die hervorragende Betreuung meiner Arbeit sowie den vielen netten Gesprächen. Ein herzlicher Dank gilt auch der Ruhr-Universität Bochum und Herrn Prof. Dr. Rolf Breitenbücher für die Betreuung meiner Dissertation und der Übernahme des Referats.

Bedanken möchte ich mich bei der OTH Regensburg, den Kollegen im Labor, den zahlreichen Studierenden, die am Forschungsprojekt „KONSTROLL“ mitgearbeitet haben, sowie meinen Kollegen im Büro für die anregenden Unterhaltungen.

Einen weiteren Dank schulde ich Herrn Dipl.-Ing. Markus Greim und Herrn Dipl.-Ing. Oliver Teubert von der Firma Schleibinger Geräte GmbH, die nicht nur bei der Konstruktion der Messgeräte Anteil hatten, sondern auch bei Fragen und Diskussionen zum Thema Rheologie stets kompetente Ansprechpartner waren. Ein herzliches Dankeschön richtet sich auch an die Firma Rohrdorfer Zement, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. Peter Christlmeier und Herrn Dipl.-Ing. Michael Hartmaier, für die Bereitstellung der Ausgangsstoffe sowie der Unterstützung bei zement- und betontechnologischen Fragestellungen. Zudem möchte ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung danken, das im Rahmen des Förderprogramms FHprofUnt das Forschungsprojekt finanziell unterstützt hat.

Der größte Dank gilt natürlich meiner Familie und Freunden sowie meiner Freundin, die mich während meines gesamten Studiums und meiner Doktorandenzeit unterstützt haben und mir immer zur Seite standen.

Kurzfassung

Zur Erfassung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone (SVB) existieren unterschiedlichste Betonrheometer und Messsysteme. Aufgrund der besonderen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone ist die Erfassung deutlich schwieriger als bei Flüssigkeiten und feinkörnigen Suspensionen. Vor allem die Zusammensetzung unterschiedlicher Ausgangsstoffe, die verwendete grobe Gesteinskörnung sowie die ablaufende Hydratation und die dabei entstehenden Wechselwirkungskräfte erschweren die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften. Ferner haben diese Eigenheiten zur Folge, dass die geforderten Randbedingungen der klassischen Rheologie nicht mehr eingehalten sind und eine genormte Darstellung der Ergebnisse nicht möglich ist. Bei den existierenden Betonrheometern handelt es sich daher meist um Relativ-Messsysteme, die an die Rheometer der klassischen Rheologie angepasst sind. Eine exakte Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone ist daher schwierig. Ein Kennzeichen vieler Betonrheometer ist zudem die hohe Schergeschwindigkeit und die permanente Scherung der Probe. Diese Scherbelastung entspricht aber in den meisten Fällen nicht dem tatsächlichen Fließverhalten Selbstverdichtender Betone.

Aufgrund dieser Sachlage hat sich diese Arbeit ergeben. Ziel war die Entwicklung eines Betonrheometers, das die speziellen Eigenschaften des SVB berücksichtigt und die tatsächlichen Fließbedingungen simuliert. Als Ausgangspunkt diente die exzentrisch rotierende Kugel (Kugel-Messsystem), die bereits für rheologische Untersuchungen von Leimen und Mörtel erfolgreich eingesetzt wird. Eine Kugel bewegt sich dabei auf einer Kreisbahn durch den Leim oder den Mörtel und erfasst das Widerstandsmoment bei definierter Geschwindigkeit. Rheometer auf der Grundlage des Kugel-Messsystems ermöglichen die Ermittlung von mehreren Fließparametern in frischen, ungestörten Zementleimen oder Selbstverdichtenden Mörtel. Durch geeignete Wahl des Messprofils können mit diesem Messsystem in kurzer Zeit genaue Informationen über das Fließverhalten ermittelt werden.

In den hier beschriebenen Studien wurde das Kugel-Messsystem für Selbstverdichtende Betone adaptiert und an seine speziellen Randbedingungen angepasst. Bei der Messung kamen zwei grundlegende Messprofile zum Einsatz: Beim ersten Messprofil wurde ein Rampenprofil mit zu- und abnehmender Geschwindigkeit vorgegeben und die dazugehörigen Messwerte als Fließkurve dargestellt. Beim zweiten Messprofil wurde eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben und die dabei ermittelte Schubspannung über den Messzeitraum bzw. über den zurückgelegten Weg der Kugel abgebildet. Als Resultat konnten die Fließgrenze und die Viskosität ausgewertet werden. Mit unterschiedlichen Messprofilen und den damit verbundenen unterschiedlichen Auswertungen wurden unterschiedlich definierte Fließgrenzen ermittelt und einander gegenübergestellt. Um den Zusammenhang mit dem Setzfließmaß und der Trichterlaufzeit darzulegen, wurde das modifizierte Kugel-Messsystem anhand mehrerer SVB-Rezepturen verifiziert. Für die Bewertung des Fließverhaltens wurde jeder Abschnitt der Messkurven betrachtet und diskutiert. Um die Ergebnisse einordnen und mit anderen Rheometern vergleichen zu können, wurden aus den gemessenen Werten die rheologisch genormten Einheiten berechnet. Neben der Berechnung dieser genormten Einheiten, die in dieser

Arbeit kontrovers diskutiert wird, wurde auch das Strömungsverhalten der Kugel beim Durchfahren des Betons beobachtet und beschrieben. Ein weiterer wesentlicher Aspekt war die Betrachtung der Geschwindigkeit, mit der die Kugel durch den Beton fährt. Diese Geschwindigkeit hat einen beträchtlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Messung. Bei zu geringer Geschwindigkeit konnte weder eine Fließkurve noch der Verlauf der Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit erzeugt werden. Bei zu hoher Geschwindigkeit war dagegen, zu Beginn der Messung eine zusätzliche Widerstandskraft infolge der hohen Beschleunigung der Kugel zu verzeichnen. Neben der Geschwindigkeit war auch der Strukturaufbau nach einer Ruhezeit von Bedeutung. Beobachtet wurde das Verhalten nach einer, drei, fünf, zehn und 20 Minuten. Es konnte beobachtet werden, dass es infolge der Hydratation und unterschiedlicher Wechselwirkungskräfte zu einem Strukturaufbau kommt, der sich deutlich auf die gemessenen Fließgrenzen (insbesondere die Statische Fließgrenze) und die Viskosität auswirkt. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde anhand unterschiedlicher Betonrezepturen und Wiederholungsversuchen gezeigt. Ein besonderes Augenmerk lag dabei in der Betrachtung eines variierenden Wassergehalts bei gleichbleibender Rezeptur. Mit dem modifizierten Kugel-Messsystem war es möglich, bereits geringe Wassergehaltsschwankungen (3 bis 5 l/m³) verlässlich zu erfassen. Das Messgerät wurde schließlich mit der Vane-Zelle und dem Platte/Platte-Messsystem verglichen. Ein direkter Vergleich der Messwerte war jedoch schwierig, da den drei Geräten unterschiedliche Messsysteme zugrunde liegen. Auch die Umrechnung der Messwerte in genormte rheologische Einheiten ist von Messgerät zu Messgerät unterschiedlich und die Ergebnisse somit nicht identisch. Ein Vergleich war aus diesem Grund nur qualitativ möglich.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit einem Messgerät auf Grundlage der exzentrisch rotierenden Kugel, die rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone zu bewerten. Dabei wurden die Bedingungen einer langsamen Schergeschwindigkeit und der Messung in frischem Beton eingehalten.

Abstract

For the determination of the rheological properties of Self-Compacting Concrete (SCC) several concrete rheometers and measurement systems exist. Based on the nature of Self-Compacting Concrete, the determination of the rheological parameters is more difficult than for other substances. This is due to the composition of the mixture, the coarse aggregates used and the ongoing hydration process as well as interaction forces. As a consequence, the laws of the classical rheology are no longer respected. Therefore, usually the existing concrete rheometers are relative measuring systems, which are modified rheometers of the classical rheology. However, the determination of the rheological properties of SCC is very inaccurate. Typically for many concrete rheometers are the applied high shear rate and the permanent shearing of the sample. This shear stress usually does not correspond to the actual flow behavior of Self-Compacting Concrete.

From these issues this work has revealed. The aim was to develop a concrete rheometer that takes into account the special properties of SCC and simulates the actual flow conditions. As a starting point, the eccentric rotating ball (Ball Measuring System) was applied, which is already successfully used for rheological measurements of pastes and mortars. Thereby a ball moves on a circular path through the material and the occurring torque at a defined speed is recorded. Rheometers, based on the ball measuring system allow the determination of several flow parameters in fresh, undisturbed self-compacting mortars or cement pastes. By selecting a suitable measurement profile the relevant information regarding the flow behavior can be found within a short time.

In this thesis the Ball Measuring System was adapted for SCC and adjusted to its peculiarities. For the measuring process two basic measurement profiles were used: For the first profile an increasing and decreasing speed was pretended and the measured values were plotted as a flow curve. For the second profile, a continuous speed was pretended and the determined shear stress was plotted. As a result the yield stress and the viscosity were received. Due to different measurement profiles and analysis, different yield stresses were determined. To show the relationship of the measurement values with the slump flow and the v-funnel time, the modified Ball Measuring System was verified with different SCC mixtures. For the evaluation of the flow behavior each section of the measured curves was observed and discussed. In order to assess the results, the rheological units were calculated from the measured values. In addition to this transformation, which is discussed controversial in this work, also the flow behavior of the ball, passing through the concrete, was observed and described. Another important issue was the consideration of the ball speed, moving through the material. This circumstance has a significant impact on the results of the measurement. At too low speed, neither the flow curve, nor the trend of shear stress at a continuous speed could be recorded. At high speeds, however, an additional torque due to the acceleration of the ball was recorded. In addition to the speed, the structural build-up during a certain rest period (one, three, five, ten and 20 minutes after the first measurement) was of interest. It was observed, that the structural build-up that results from hydration and different interaction forces, significantly affects the measured yield stress (especially the static yield stress) and the viscosity. To show the repro-

ducibility, the tests were repeated. Moreover, the impact of variations in mix-design of several SCC mixtures was evaluated. Even small fluctuations in water content (3 to 5 l/m³) were visible. The modified Ball Measuring System was then compared with other measuring systems. A direct comparison of the results was difficult because of the different measurement systems. Therefore, only a qualitative comparison was possible.

In this work it was shown, that it is possible, to determine the rheological properties of Self-Compacting Concretes with a measuring device, based on the Ball Measuring System. Thereby the demand of a low shear velocity and the measurement in fresh material were achieved.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Einführung in die Rheologie komplexer Fluide	3
2.1	Definition und Aufgaben der Rheologie	3
2.2	Stoffarten und -kombinationen	3
2.3	Wechselwirkungskräfte	4
2.3.1	Teilchenkräfte in Fluiden und Festkörpern	4
2.3.2	Wechselwirkungskräfte in Suspensionen	5
2.3.2.1	Schwerkraft	5
2.3.2.2	Brown'sche Bewegung	5
2.3.2.3	Interpartikuläre Kräfte	5
2.3.2.4	Kapillarkräfte	7
2.3.2.5	Reibungseffekte	7
2.4	Begrifflichkeiten und Bestimmungsmethoden in der klassischen Rheologie	8
2.5	Fließverhalten und Viskosität von Fluiden	10
2.5.1	Newtonsche Fluide	10
2.5.2	Nichtnewtonsche Fluide	10
2.5.3	Zeitabhängiges Fließverhalten	12
2.5.3.1	Zeitabhängige Schubspannungskurven	12
2.5.3.2	Strukturabbau und -Wiederaufbau (Thixotropie und Rheopexie)	12
2.5.4	Fließverhalten von Suspensionen	14
2.5.5	Stabilität von Suspensionen	16
2.6	Verfahren zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Fluiden	16
2.6.1	Einfache Versuche	16
2.6.1.1	Auslaufversuche	16
2.6.1.2	Fließen auf einer Ebene	16
2.6.1.3	Einfache Versuche zur Beurteilung der Fließeigenschaften von Baustoffen	17
2.6.2	Rotationsrheometer	17
2.6.2.1	Messprinzip und Betriebsarten	17
2.6.2.2	Absolut-Messsysteme	18
2.6.2.3	Relativ-Messsysteme	19
2.6.2.4	Fließkurven und Modellfunktionen	21
2.6.2.5	Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit	24
2.6.2.6	Besondere Betrachtung der Fließgrenze	25
2.6.3	Die exzentrisch rotierende Kugel	28
2.6.3.1	Aufbau und Prinzip	28
2.6.3.2	Vorteile gegenüber anderen Systemen	29
2.6.3.3	Strömungsmechanische Betrachtung des KMS	29

2.6.3.4	Umwandlung der Messwerte in rheologische Kenngrößen (Absolut-Werte)	34
2.6.3.5	Kritische Betrachtung des KMS.....	36
3	Rheologie von Selbstverdichtenden Betonen.....	40
3.1	Grundlagen Selbstverdichtender Betone	40
3.1.1	Charakteristika	40
3.1.2	Geschichtliche Entwicklung.....	41
3.1.3	Mischungskonzepte	41
3.1.3.1	Mischungsansätze.....	41
3.1.3.2	Mischungsentwurf nach Okamura	43
3.1.4	Herstellung	45
3.1.5	Frischbetonprüfungen.....	45
3.2	Rheologische Eigenschaften zementgebundener Baustoffe.....	46
3.2.1	Einfluss der frühen Zementhydratation.....	46
3.2.2	Rheologisches Verhalten von Zementleimen.....	47
3.2.2.1	Modelle zum Beschreiben des Fließverhaltens	47
3.2.2.2	Fließkurve und Modellfunktionen.....	52
3.2.2.3	Einflussfaktoren auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleimen	52
3.2.3	Rheologisches Verhalten von Mörtel und Betonen.....	54
3.3	Besonderheiten der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone.....	56
3.4	Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone	59
3.4.1	Rheometrische Prüfverfahren.....	59
3.4.2	Messsysteme und Geräte für den Einsatz in der Betontechnologie	60
3.4.2.1	Platte/Platte-Messsystem.....	60
3.4.2.2	Koaxiale-Zylinder-Messsysteme.....	61
3.4.2.3	Relativ-Messsysteme.....	62
3.4.3	Bestimmung der rheologischen Eigenschaften im Mischer.....	63
3.4.4	Zusammenfassung der Probleme bei der Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mittels Rotationsrheometern.....	64
4	Entwicklung eines Betonrheometers auf dem Prinzip des Kugel-Messsystems.....	67
4.1	Zielsetzung	67
4.2	Anwendung des Kugel-Messsystems beim Selbstverdichtenden Beton.....	67
4.2.1	Grundprinzip	67
4.2.2	Konstruktion.....	68
4.2.3	Messablauf und Auswertung der Ergebnisse	70
4.2.3.1	Messprofile.....	70
4.2.3.2	Durchführung der Messung.....	71
4.2.3.3	Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte.....	71
4.2.3.4	Auswertung der Messergebnisse.....	72
5	Experimentelle Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem modifiziertem Kugel-Messsystem	75
5.1	Forschungsdesign	75
5.1.1	Versuchsprogramm	75

5.1.2	Verwendete Betonrezepturen	75
5.1.3	Ablauf der Versuche.....	77
5.2	Durchgeführte Versuche und Interpretation der Ergebnisse	78
5.2.1	Bewertung der Messergebnisse.....	78
5.2.1.1	Graphische und numerische Darstellung der Ergebnisse.....	78
5.2.1.2	Reproduzierbarkeit	81
5.2.2	Variation Messablauf	83
5.2.2.1	Messgeschwindigkeit	83
5.2.2.2	Messzeitpunkt.....	86
5.2.2.3	Messgeometrie	89
5.2.3	Variation der Betonrezeptur	91
5.2.3.1	Wassergehalt	91
5.2.3.2	Zusatzstoffe	96
5.2.3.3	Fließmittelgehalt.....	98
5.2.4	Strömungsmechanische Beobachtungen	99
5.2.5	Korrelation der Messergebnisse mit anderen Messsystemen.....	101
5.2.5.1	Allgemein	101
5.2.5.2	Vane-Zelle.....	102
5.2.5.3	Platte/Platte-Messsystem.....	103
5.3	Fazit.....	105
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	108
	Literatur	111
	Normen und Richtlinien	121
	Abbildungsverzeichnis	123
	Tabellenverzeichnis	128
	Abkürzungen und Symbole	130
	Anhang	132
A.1	Ausgangsstoffe	132
A.1.1	Wasser	132
A.1.2	Zement.....	132
A.1.3	Zusatzstoffe	133
	Flugasche.....	133
	Kalksteinmehl.....	133
	AHWZ	133
A.1.3	Gesteinskörnung.....	134
A.1.4	Zusatzmittel.....	136
A.2	Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und Wasseranspruch.....	137
A.3	Anwendung des Kugel-Messsystems am Mörtel	138
A.3.1	Ziele.....	138
A.3.2	Messablauf	138

A.4.3	Versuchsergebnisse	140
A.4.3.1	Rampenprofil.....	140
A.4.3.2	Stufenprofil.....	141
A.4	Verwendete Betonrezepte.....	143
A.5	Mischregime Eirich-Intensivmischer	145
A.6	Einzelergebnisse RheoCT	146
A.7	Entwicklung des Laborrheometers eBT2	148
A.7.1	Ausgangssituation: BT2	148
A.7.2	Modifikationen	149
A.7.2.1	Modifikationen in der Konstruktion.....	149
A.7.2.2	Schwachstellen bei der Auswertmethode.....	151
A.7.2.3	Adaption des KMS	152
A.7.3	Versuchsergebnisse	153
A.7.3.1	Vorversuche Betontester BT2	153
A.7.3.2	eBT2 mit Zylinder und Messprinzip KMS	154
A.7.3.3	Vergleich unterschiedlicher Auswertmethoden	160
A.7.3.4	Vergleich RheoCT und eBT2 (Kugel)	162
	Lebenslauf	164
	Eidesstattliche Versicherung	167

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Als Selbstverdichtenden Beton (SVB; engl.: Self Compacting Concrete, SCC) bezeichnet man einen Beton, der ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie, allein unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt, entlüftet sowie die Bewehrungszwischenräume und die Schalung vollständig ausfüllt. Aufgrund dieser Eigenschaften bringt er mehrere ökologische, soziale, technische und ökonomische Vorteile mit sich.

Neben den positiven Eigenschaften, die ein Selbstverdichtender Beton aufweist, bringt dieser aber auch Probleme mit sich, die seinen Einsatz zum Teil unwirtschaftlich und schwierig machen. Bereits kleine Schwankungen in den Ausgangsstoffen können dazu führen, dass der SVB seine angestrebten Frischbetoneigenschaften nicht erreicht. Schon geringe Wassergehaltsschwankungen haben großen Einfluss auf dessen Frischbetoneigenschaften. Diese Schwankungen können aus Feuchtegehaltsschwankungen bei der feinen Gesteinskörnung resultieren, welche von den Feuchte-Messsonden nur ungenau bestimmt werden können. Zudem ist die Dosiergenauigkeit im Transportbetonwerk für die hohen Genauigkeitsanforderungen an Selbstverdichtende Betone nicht ausreichend genug, um die angestrebten Frischbetoneigenschaften verlässlich einzuhalten.

Um die Frischbetoneigenschaften des SVB vollständig beurteilen zu können, sind in der Regel mehrere Prüfverfahren notwendig. Aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit ist die Beurteilung der Konsistenz über die Leistungsaufnahme des Mixers zu ungenau. In Deutschland haben sich zur Prüfung der Frischbetoneigenschaften von SVB das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit durchgesetzt. Auf der Baustelle sind diese Verfahren zeitaufwendig und finden daher nicht immer Anwendung. Zudem liefern diese beiden Verfahren nur bedingt Informationen über die rheologischen Eigenschaften des Selbstverdichtenden Betons. Diese rheologischen Informationen sind zwar für die Qualitätskontrolle auf der Baustelle oder im Fertigteilwerk eher von sekundärer Bedeutung, für die wissenschaftliche Betrachtung des Fließverhaltens von SVB spielt die Rheologie jedoch eine bedeutende Rolle.

Um die rheologischen Eigenschaften bestimmen zu können, kommen Rheometer zum Einsatz. Rheometer wurden entwickelt, um das Fließ- und Verformungsverhalten von Flüssigkeiten zu bestimmen. Sie werden z. B. in der chemischen und pharmazeutischen Industrie, der Kunststoffverarbeitung oder der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Im Gegensatz zu Polymeren oder anderen homogenen Substanzen ist die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von mineralisch gebundenen, grobkörnigen Baustoffen schwieriger. Ein Grund hierfür ist zum einen die laufende Veränderung der Probe infolge der Hydratation sowie den interpartikulären Wechselwirkungskräften des Zements. Ein weiteres Problem ist, dass es sich bei Beton um eine grobdisperse Suspension handelt, für welche die Modelle der klassischen Rheologie nur beschränkt gelten. Dennoch wurden mehrere Betonrheometer, meist Rotationsrheometer, entwickelt, die aber die Eigenschaften Selbstverdichtender Betone meist nicht realistisch abbilden können.

1.2 Zielsetzung

Die Motivation dieser Arbeit gründet in den teilweise unzulänglichen Versuchsergebnissen bisher verfügbarer Betonrheometer sowie den besonderen Eigenheiten des SVB gegenüber Flüssigkeiten und feinkörnigen Suspensionen. Aus dieser Motivation haben sich folgende Ziele entwickelt:

1. Entwicklung eines Betonrheometers zur genauen Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone
2. Auswirkungen unterschiedlicher Einflussfaktoren auf das Fließverhalten Selbstverdichtender Betone

Mit dem neuen bzw. modifizierten Rheometer soll es möglich sein, innerhalb einer Umdrehung und damit sehr schnell, alle wesentlichen Parameter zur Bewertung der rheologischen Eigenschaften zu erhalten. Um das Fließverhalten des SVB realitätsnah zu bewerten, soll eine Prüfgeschwindigkeit gewählt werden, die der Schergeschwindigkeit des SVB beim Fließen in der Praxis entspricht.

Mittels unterschiedlicher Messprofile soll das Fließverhalten Selbstverdichtender Betone interpretiert werden. Von Bedeutung ist dabei vor allem der Einfluss unterschiedlicher Belastungszustände (Scher- bzw. Prüfgeschwindigkeiten). Neben der Fließkurve soll auch der Verlauf der Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit eingehend betrachtet und die Fließgrenze sowie die Viskosität ermittelt werden.

Anhand unterschiedlicher SVB-Rezepturen sollen die Auswirkungen von Änderungen im Wassergehalt, Fließmittelgehalt und weiteren Ausgangsstoffen auf die rheologischen Eigenschaften deutlich gemacht werden. Zudem soll der Strukturaufbau infolge Hydratation und Wechselwirkungskräften betrachtet werden.

Um das entwickelte Gerät mit anderen Rheometern oder Messsystemen vergleichen zu können, werden die Messergebnisse den Ergebnissen der Vane-Zelle und des Platte/Platte-Messsystems gegenübergestellt und bewertet.

Mit den Erkenntnissen dieser Arbeit soll es möglich sein, ein Rheometer für den Einsatz im Labor und auf der Baustelle zu konstruieren. Für die Bauwirtschaft soll das entwickelte Rheometer ein geeignetes Gerät zur Qualitätskontrolle sein. In der Wissenschaft soll das Gerät dazu beitragen, die rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone noch genauer bestimmen zu können.

2 Einführung in die Rheologie komplexer Fluide

2.1 Definition und Aufgaben der Rheologie

Die Rheologie beschreibt das Fließen von Fluiden und die Deformationen von Festkörpern [Mez10]. Die Bezeichnung dieses Teilgebietes der Physik und der physikalischen Chemie stammt aus dem griechischen (ῥεῖ *rhei* - „fließen“; λόγος *logos* - „Lehre“) und wird auf Aussagen Heraklits von Ephesos (gekürztes Zitat „panta rhei - alles fließt“) zurückgeführt [Geh98] [Mez10] [Sch95]. Beim Aufbringen einer äußeren Kraft wird die zeitliche Verformung des untersuchten Stoffes beobachtet. Dabei kann sich ein Verhalten einstellen, das zwischen einer idealviskosen Flüssigkeit (z. B. Wasser, Öl) und einem idealelastischem Festkörper (z. B. Stahl) liegt. Die Rheologie beinhaltet neben der Fluidmechanik auch noch die Plastizitätstheorie sowie die Elastizitätstheorie. Neben der Chemie und der Werkstoffkunde sind vor allem die Gesetze der Physik (Kraft, Auslenkung, Geschwindigkeit) von Bedeutung. Trotz langer Existenz dieser Wissenschaft sind viele Zusammenhänge bis heute noch nicht oder nur unvollständig geklärt. Um diese Lücken zu schließen, ist die Durchführung von Versuchen notwendig.

2.2 Stoffarten und -kombinationen

Die Physik unterscheidet die drei Aggregatzustände (Phasen): fest, flüssig und gasförmig. Neben den reinen Aggregatzuständen gibt es auch unterschiedliche Arten von Gemischen aus unterschiedlichen Phasen [Sig12]: Bei einer Lösung bilden mindestens zwei flüssige Stoffe ein homogenes Gemisch. Die Ausgangsstoffe können dabei aus unterschiedlichen Phasen bestehen. Eine Dispersion besteht aus mindestens zwei Stoffen, wobei ein Stoff (disperse Phase) im anderen flüssigen Stoff (Dispersionsmittel) fein verteilt ist. Die Phasen lösen sich dabei nicht oder kaum ineinander auf, noch sind sie chemisch miteinander verbunden. Somit ist es auch möglich, die unterschiedlichen Phasen durch geeignete Methoden zu trennen. Zudem kann es auch vorkommen, dass eine solche Trennung ohne weiteres Zutun geschieht (Gravitation). Dabei handelt es sich um eine Sedimentation. Dispersionen können weiterhin in Suspensionen und Emulsionen unterteilt werden. Bei einer Suspension ist ein fester Stoff in einer Flüssigkeit gleichmäßig verteilt. Das Dispersionsmittel umhüllt dabei die disperse Phase (Feststoff) vollständig. Suspensionen können auch als Aufschlämmungen oder Slurrys bezeichnet werden [Sig12]. Bei einer Emulsion liegen mindestens zwei Flüssigkeiten vor, die sich nicht ineinander auflösen. Dabei schwebt die eine Flüssigkeit in kleinen kolloidalen Teilchen in der anderen Flüssigkeit. Ein Kolloid ist ein Teilchen der dispersen Phase mit einer linearen Größe von 10^{-9} bis 10^{-6} m [Sig12].

2.3 Wechselwirkungskräfte

2.3.1 Teilchenkräfte in Fluiden und Festkörpern

Unter Teilchenkräfte versteht man die Massenanziehungskräfte, die die Teilchen oder die chemischen Elemente von Stoffen aufeinander ausüben. Hier sind vor allem die chemischen Elemente, die eine kritische Rolle beim Fließverhalten spielen, von Interesse. Dazu gehören Atome, Moleküle, Polymerketten und Zellen. Aber auch Teilchen wie Sandkörner, Tonbestandteile und Zementkörner können Kräfte aufeinander ausüben und sind daher zu betrachten [Sig12].

Das einfachste Material ist ein Feststoffkristall aus identischen Atomen oder Molekülen, die in einem Kristallgitter regelmäßig angeordnet sind [Czi12] [Sig12]. Bei solch einem System interagieren die Atome mit ihren Nachbarn durch Van-der-Waals-, Kovalente- oder Ionische Kräfte. Dabei ist der Abstand der einzelnen Elemente von Bedeutung. Die Energie zwischen den Atomen wird als Potentielle Energie bezeichnet. Im kristallinen Zustand befindet sich jedes Atom in einem Kräftegleichgewicht, was einer minimalen potentiellen Energie entspricht. Erst ab einer bestimmten Kraft kann das Atom ausbrechen. Zusätzlich erfährt jedes Element eine thermische Bewegung (Brown'sche Bewegung), welche im Allgemeinen kleine, ausschlagende Bewegungen dieses Elements um den Gleichgewichtszustand verursacht. Bei kleiner Beanspruchung kann das Atom nur geringfügig von seiner Anfangsposition verschoben werden. Diese kleinen Verschiebungen jedes einzelnen Atoms relativ zu seinem Nachbarn führen schließlich zu einer begrenzten Deformation des Materials. Wenn die Beanspruchung abnimmt, fallen die Atome in ihre Ausgangslage zurück. Auf diese Weise kann das elastische Verhalten von Festkörpern erklärt werden. Mit zunehmender Verformung steigt die Spannung und umgekehrt [Rou12].

Bei Fluiden sind die oben beschriebenen Teilchenkräfte sehr viel kleiner als bei Festkörpern. Zusätzlich fehlt auch eine Gitterstruktur wie bei den Festkörpern. Folglich lassen sich die Elemente leicht gegeneinander verschieben. Darum besitzen Fluide keine feste Gestalt. Um die Form verändern zu können, reichen schon kleinste Kräfte aus [Sig12].

Zwischen den Festkörpern und Fluiden ist die sogenannte „weiche Materie“ anzusiedeln [Gom03]. Dazu gehören u. a. Gele, Polymerschmelzen und kolloidale Suspensionen. Sie können nicht eindeutig den Aggregatzuständen „fest“ oder „flüssig“ zugeordnet werden. Wie bereits erwähnt, sind bei Suspension mesoskopische Elemente in einer Flüssigkeit dispergiert. Bei hoher Konzentration spielen diese Elemente eine entscheidende Rolle für die rheologischen Eigenschaften des Materials. Die Energie der Massenanziehungskräfte ist in diesem Fall niedriger als bei Feststoffen. Die auftretenden Van-der-Waals-Kräfte hängen sehr stark von der Distanz zwischen den Atomen ab. Bei Gelen, bestehend aus Netzwerken verbundener Polymerketten, kann die Steifigkeit als Funktion der einzelnen Ketteneigenschaften beschrieben werden. Jede Kette verhält sich wie ein kleines Gummiband, dessen Steifigkeit proportional zur Temperatur und invers proportional zur Molekülkettenlänge ist. Als Folge führt eine Deformation des Feststoffes zu einer Deformation des Netzwerkes, was zu einer Dehnung oder Stauchung jeder einzelnen Kette führt. Zu der weichen Materie gehören auch Pasten (z. B. Schlamm, Frischbeton), die sich als einfache Flüssigkeiten verhalten, wenn sie zu sehr

verformt werden. Dass diese Pasten sich auch wie Feststoffe verhalten, kann dadurch gezeigt werden, dass sie, in einen Behälter gefüllt, sich nicht ausnivellieren. In der Regel bestehen Pasten aus einer großen Reihe von mesoskopischen Elementen mit unterschiedlichen Wechselwirkungskräften, die in einer Flüssigkeit dispergiert sind [Eve92] [Sig12].

2.3.2 Wechselwirkungskräfte in Suspensionen

2.3.2.1 Schwerkraft

Die Gravitation führt dazu, dass alle Partikel in einer Suspension der Schwerkraft ausgesetzt sind. Dadurch erfahren die Partikel eine Bewegung nach unten. Mit zunehmender Dichte der Partikel wird die Schwerkraft größer. Unter einer bestimmten Partikelgröße kann die Schwerkraft vernachlässigt werden. Für Partikel, die kaum Oberflächenkräfte besitzen ist dies dagegen die entscheidende Kraft. Zu diesen Partikeln gehören u. a. Sand und Kies. Die Schwerkraft spielt eine entscheidende Rolle bei der Sedimentation von Partikeln in einer Suspension [Kor05] [Wüs05].

2.3.2.2 Brown'sche Bewegung

Unter der Brown'schen Bewegung versteht man die Wärmebewegung von Teilchen $< 1 \mu\text{m}$ in einer Flüssigkeit. Die Brown'sche Bewegung beruht auf unregelmäßigen Stößen der Atome und Moleküle, die sich ständig hin und her bewegen. Dabei ist die Bewegung und Intensität der Teilchen temperaturabhängig und nimmt mit abnehmender Größe und Masse der Teilchen zu [Kor05] [Wüs05].

2.3.2.3 Interpartikuläre Kräfte

Van-der-Waals-Kräfte

Bei den Van-der-Waals-Kräften (Dipol-Dipol-Kräfte) handelt es sich um eine nicht-kovalente Bindungsform zwischen Atomen oder Molekülen [Czi12]. Da die Elektronen der Teilchen in Bewegung sind, führt dies zu einer zeitlich begrenzten, unregelmäßigen Verteilung der Ladung in den Teilchen (unsymmetrische Ladungsverteilung). Eine Seite des Teilchens ist dabei positiv und die andere negativ geladen (Dipol). Die Kräfte können dabei sowohl anziehend als auch abstoßend sein. Kommt es bei der Annäherung der Teilchen zu einer synchronen Ladungsverschiebung, dann treten ab einem gewissen Abstand Anziehungskräfte auf. In der Regel sind die Van-der-Waals-Kräfte relativ schwach. Mit zunehmender Oberfläche des Teilchens nimmt aber die Polarisierung zu. Zudem steigt die Intensität der Bindung mit der Entfernung der äußeren Elektronen zum Kern. Folglich steigen mit zunehmender Atom- und Molekülmasse auch die Van-der-Waals-Kräfte an. Die hohe Anzahl an Atomen in kolloidalen Partikeln führt zu hohen Van-der-Waals-Kräften mit großer Reichweite. Bei kolloidalen Teilchen kann die Van-der-Waals'sche Anziehungskraft etwa das Millionenfache der Gewichtskraft

kraft erreichen. Bei hohem Feststoffgehalt in der Suspension sind diese Kräfte daher von Bedeutung für die rheologischen Eigenschaften der Suspension [Hoe06] [Kor05] [Hai10].

Elektrostatische Kräfte

Nahezu alle Partikel, die in einer Suspension verteilt sind, besitzen auf ihrer Oberfläche elektrische Ladungen [Hoe06]. Die Ladungsunterschiede resultieren dabei aus Ladungsverschiebungen im Kristallgitter infolge von Reibung oder thermischer Bewegung. Durch die elektrische Ladung werden die positiv geladenen Ionen einer Lösung angezogen und lagern sich auf der Oberfläche der Partikel in Gestalt einer starren Schicht an. Da es durch die Adsorption zu keinem vollständigen Ladungsaustausch kommt, lagern sich die Ionen in einer diffusen Schicht um das Partikel herum an. Zusammen bilden diese zwei Schichten eine elektrische Doppelschicht. Das Potential, das zwischen den beiden Schichten entsteht, bezeichnet man als Zeta-Potential. Nähern sich Partikel mit gleichgerichteter Ionenladung einander an, so stoßen sie sich dabei ab. Durch eine Erhöhung des Zeta-Potentials kommt es zu einer Zunahme der Abstoßungskräfte. Das Zeta-Potential wird neben den Oberflächeneigenschaften der Partikel vor allem durch die Ionenkonzentration in der Suspension beeinflusst. Mit zunehmender Ionenkonzentration lässt das Potential nach, was zu einer Abnahme der diffusen Schicht führt. Folglich verringert sich auch die Abstoßungskraft zwischen den Partikeln. Zudem führen hohe pH-Werte in einer Suspension zu einer hohen Ionenkonzentration, was wiederum zu einer Verringerung des Zeta-Potentials führt [Hai10] [Hoe06] [Kor05].

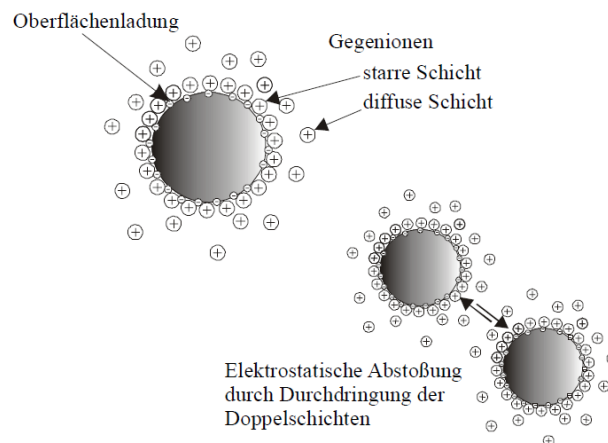


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der diffusen Doppelschicht [Kor05]

Coulomb-Wechselwirkung

Bei der Coulomb-Wechselwirkung handelt es sich um elektrostatische Anziehungs- und Abstoßungskräfte zwischen geladenen Teilchen, die erst bei großer Annäherung der Partikel auftritt (Abstand $z < 1$ nm) [Hai10]. Eine eindeutige Unterscheidung zwischen einzelnen Partikeln, den Atomen und Ionen ist nicht mehr möglich. Die Wechselwirkungskräfte steigen mit abnehmender Ionengröße und zunehmender Ionenkonzentration an.

Die interpartikulären Kräfte ergeben sich aus der Überlagerung der beschriebenen Wechselwirkungskräfte und können somit anziehend als auch abstoßend sein. Die Wechselwirkungskräfte sind für die Stabilität und Verarbeitbarkeit von Suspensionen von enormer Bedeutung [Kor05].

2.3.2.4 Kapillarkräfte

Kapillarkräfte treten in der Regel bei engen Röhren oder Hohlräumen von Festkörpern auf und entstehen durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und der Grenzflächenspannung zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff. Zwischen den Partikeln kommt es durch die entstehenden Kohäsions- und Adhäsionskräfte zur Bildung von Flüssigkeitsbrücken. Bei Suspensionen spielen Kapillarkräfte keine Rolle. Erst wenn der kritische Wassergehalt unterschritten wird und ein teilbefeuchtetes Kornhaufwerk vorliegt, sind diese Kräfte von Bedeutung. Bei vollständig mit Flüssigkeit gefüllten Zwischenräumen ist die Kraft zwischen den Partikeln hingegen vernachlässigbar. Die Kapillarkräfte können die Fließeigenschaften zum Teil sehr stark beeinflussen und sind vor dem Übergang des Haufwerkes in eine Suspension am größten (Abbildung 2-2) [Sch73].

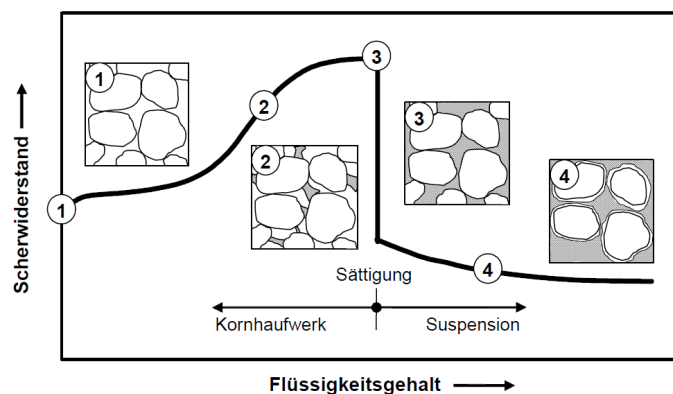


Abbildung 2-2: Scherwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt von Kornhaufwerken [Sch73]

2.3.2.5 Reibungseffekte

Reibungseffekte können in der Suspension sowohl bei Festkörpern als auch bei Flüssigkeiten auftreten [Fer98] [Cou12] [Wüs05]. Bei der Kollision von Partikeln kommt es zu einer Festkörperreibung (intergranulare Reibung) (Abbildung 2-3). Die Größe dieser Reibungskraft hängt sowohl von der Partikelgröße als auch der Konzentration ab. Daneben spielt auch die Form der Partikel eine wesentliche Rolle. Wird ein Feststoffpartikel von einer Flüssigkeit umströmt, kommt es zu einer Flüssigkeitsreibung (viskose Reibung). Die Kräfte werden dabei von der Flüssigkeit auf den Feststoff übertragen und sind abhängig vom Reibungswiderstand auf der Oberfläche des Partikels. Die Flüssigkeitsreibung kann mit Hilfe des Stokes'schen Gesetz beschrieben werden.

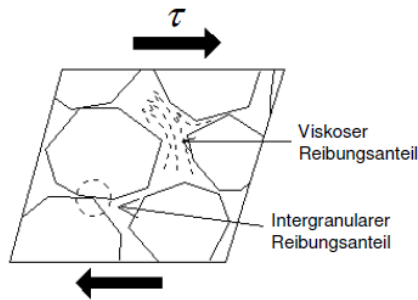


Abbildung 2-3: Viskoser und Intergranularer Reibungsanteil [Fer98] aus [Wüs05]

2.4 Begrifflichkeiten und Bestimmungsmethoden in der klassischen Rheologie

Die Zusammenhänge und Begriffe der Rheologie können am einfachsten mit dem Zwei-Platten-Modell erklärt werden (Abbildung 2-4). Beim Zwei-Platten-Modell wird auf die untere, unbewegliche Platte eine Substanz mit der Höhe h aufgetragen. Darauf befindet sich eine bewegliche Platte. Die Fläche beider Platten beträgt jeweils A . Nun wird die obere Platte mit einer definierten Kraft F bewegt und die Geschwindigkeit v gemessen. Dabei kommt es zur Scherung der Messsubstanz über die Höhe h . Voraussetzung für dieses Modell ist, dass sich über die gesamte Höhe h ein laminares Fließen einstellt und dass zwischen den Platten und der Messsubstanz Reibung besteht. Bei turbulentem Fließen tritt ein komplexeres Verhalten auf, das mit dem Zwei-Platten-Modell nicht erklärt werden kann [Bla02] [Mez10].

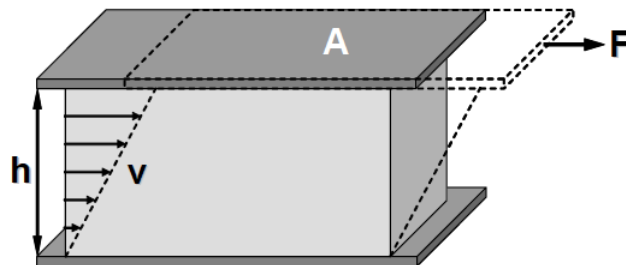


Abbildung 2-4: Zwei-Platten-Modell [Bla02]

Der Quotient aus der Kraft F und der Fläche A wird dabei als Schubspannung oder auch als Scherspannung τ definiert.

$$\tau = F/A \quad [Pa] = [1 \text{ N/m}^2] \quad (2.1)$$

Als Scherrate, auch Schergeschwindigkeit oder Schergefälle genannt, bezeichnet man den Quotienten aus der Geschwindigkeitsdifferenz v und der Schichtdicke h .

$$\dot{\gamma} = v/h \quad [1/s] \quad (2.2)$$

Unter Zuhilfenahme der Differenzialrechnung ergibt sich folgende Gleichung:

$$\dot{\gamma} = dv/dh \quad [1/s] \quad (2.3)$$

mit der differenziell kleinen Geschwindigkeitsdifferenz dv und der differenziell kleinen Schichtdicke dh .

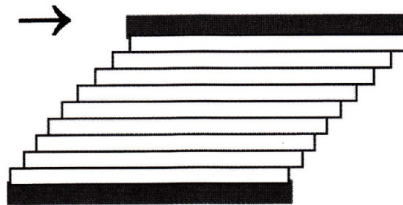


Abbildung 2-5: Einzelne Strömungsschichten [Mez10]

Wenn man von einer laminaren Strömung ausgeht, fällt die Geschwindigkeit v im Scherspalt h linear ab, was zu einer linearen Geschwindigkeitsverteilung $v(h)$ führt. Dabei ist die Geschwindigkeitsdifferenz dv zwischen den benachbarten Schichten gleich groß. Mit zunehmendem Gefälle steigt auch die Reibungskraft zwischen den Schichten. Wenn man davon ausgeht, dass die Schichten eine konstante Dicke haben, kann man daraus folgern, dass auch die Scherrate konstant ist. Bei großer Schichtdicke kann anstatt einer linearen auch eine nicht-lineare Geschwindigkeitsverteilung auftreten, welche wiederum von den Strömungsverhältnissen abhängig ist. Entscheidend dabei ist, ob sich das Fluid oder der Körper bewegt [Sig12].

Wird der Verlauf der Schubspannung τ über die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ angetragen, so erhält man eine Fließkurve. Die Fließkurve bildet das Fließverhalten bei verschiedenen Belastungszuständen ab, welche durch unterschiedliche Scherraten erzeugt werden. Das Verhältnis zwischen der Schubspannung τ und der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ wird als Viskosität η bezeichnet. Unter Viskosität versteht man auch die Zähigkeit eines Stoffes. Bei der Bewegung einer Flüssigkeit werden die Moleküle gegeneinander verschoben. Dabei treten innere Reibungskräfte auf. Der sich hieraus ergebende Fließwiderstand wird als Viskosität bezeichnet. Andere Bezeichnungen für die Viskosität sind dynamische Viskosität, Scherviskosität oder absolute Viskosität. Beeinflusst wird die Viskosität vor allem durch die Van-der-Waals-Kräfte und die Brown'sche Bewegung [Mez10] [Sig12].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [Pa \cdot s] = [1N s/m^2] \quad (2.4)$$

Die Begrifflichkeiten und die Bestimmungsmethoden der klassischen Rheologie sind in DIN 1342-1 bis 3 definiert. Die Anwendung der Rheologie bei unterschiedlichen Materialien ist in zusätzlichen Vorschriften wie z. B. DIN SPEC 91143-2, DIN Fachbericht 143, DIN 13343, DIN 54458, DIN EN ISO 3219, DAfStb Heft 605, geregelt.

2.5 Fließverhalten und Viskosität von Fluiden

2.5.1 Newtonsche Fluide

Das einfachste Fließverhalten zeigen Newtonsche Fluide, z. B. Wasser, Mineralöle etc. Die Merkmale Newtonscher Fluide sind die Proportionalität zwischen der Fließgeschwindigkeit (Scherrate) und dem Fließwiderstand (Schubspannung) einer Flüssigkeit sowie das Fehlen einer Fließgrenze [Mez10] [Geh98]. Dieser Zusammenhang kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

In einer Fließkurve drückt sich das Newtonsche Verhalten durch eine lineare Kurve aus, bei der die Schubspannung proportional zur Scherrate ist und die Kurve durch den Nullpunkt geht. Sobald eine Kraft aufgebracht wird, fließt das Material. Eine Eigenschaft von Newtonschen Fluiden ist, dass die Fließhistorie der Flüssigkeit keinen Einfluss auf die Fließeigenschaften hat und dass keine Speicherung der Energie als Folge einer Verformung stattfindet [Mez10] [Sig12].

2.5.2 Nichtnewtonsche Fluide

In der Natur und Technik treten neben Newtonschen Fluiden auch Nichtnewtonsche Fluide wie Polymerlösungen, Zementleim, Beton usw. auf. Die Nichtnewtonschen Fluide können unterteilt werden in dilatante, pseudoplastische und plastische Fluide (Abbildung 2-6) [Mez10] [Geh98] [Sch95] [Wüs05] [Hai10] [Kor05].

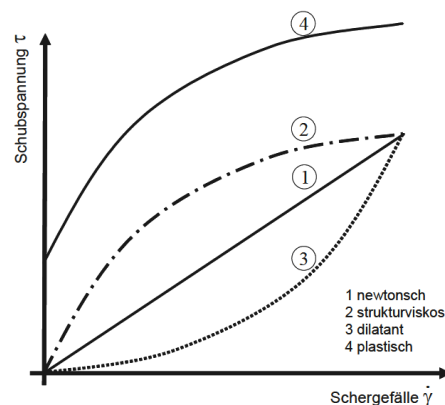


Abbildung 2-6: Fließverhalten von Fluiden [Hoe06]

Bei **dilatanten** (scherverdickenden) Fluiden steigt die Schubspannung progressiv mit wachsender Scherrate an, was auch eine steigende Viskosität mit sich bringt. D. h. das Verhältnis zwischen Scherrate und Schubspannung ändert sich fortlaufend. Somit ändert sich für jede Scherrate auch die Viskosität. Dieses Verhalten ist z. B. bei Stärke, Klebstoffen, feuchten Sand und Dispersionen mit hohem Partikelgehalt zu beobachten. Erklärt werden kann dieses Verhalten durch Strukturänderungen und Wechselwirkungen im Fluid, die bei steigender

Scherrate dazu führen, dass die Partikel sich verhaken und die Reibung erhöht wird. Nach Mezger [Mez10] kann es bei dilatanten Fluiden zum Wandgleiten und Entmischen kommen. Zudem kann bei hohen Scherraten infolge von Sekundärströmungseffekten oder turbulentem Fließen ein höheres Widerstandsmoment gemessen werden, welches ein scherverdickendes Verhalten vortäuscht. Dilatantes Verhalten kommt in der Praxis eher selten vor. Da der Begriff „Scherverdickung“ oft auch für die zeitliche Veränderung unter konstanter Scherbelastung (siehe Kapitel 2.5.3) verwendet wird, ist zwischen diesem Verhalten und dem tatsächlichen dilatanten Verhalten infolge höherer Scherrate zu differenzieren.

Bei **pseudoplastischen** oder strukturviskosen (scherverdünnenden) Fluiden steigt die Scherspannung mit zunehmender Scherrate degressiv. Die Viskosität fällt mit zunehmender Scherrate. Beispiele für solche Stoffe sind Polymerschmelzen und -lösungen oder organische Bindemittel. Im Ruhezustand sind die Partikel weitgehend ineinander verhakt oder agglomeriert. Durch zunehmende Scherung lösen sich die Konglomerate auf und die Teilchen orientieren sich in Scherrichtung, was folglich zu einer verringerten Schubspannung führt. Bei Polymerketten erfolgt durch die zunehmende Scherbelastung eine Streckung der Molekülketten und längliche Partikel können sich durch die Scherbelastung in Fließrichtung ausrichten. Es ist zu erwähnen, dass das strukturviskose Verhalten in den meisten Fällen nicht gleichmäßig über den gesamten Scherratenbereich auftritt. Meist wird erst bei höheren Scherraten ein scherverdünnendes Verhalten festgestellt [Sch95]. Ebenso wie beim scherverdickenden Verhalten, wird der Begriff „Scherverdünnend“ für die Änderung der Fließeigenschaften über einen bestimmten Zeitraum bei gleichbleibender Scherrate verwendet (siehe Kapitel 2.5.3).

Plastische Stoffe verhalten sich bis zu einer gewissen Scherspannung wie Festkörper mit keinen oder nur elastischen Deformationen. Erst nach Überschreiten dieser Scherspannung setzt eine Bewegung ein und der Stoff verformt sich irreversibel. Dieser Übergang wird auch als Fließgrenze bezeichnet. Nach [DIN 1342-1] ist die Fließgrenze definiert, als kleinste Schubspannung, oberhalb derer ein plastischer Stoff sich rheologisch wie eine Flüssigkeit verhält. Ergänzt wird die Definition als plastischer Stoff nach [DIN 1342-3 Pkt. 4.3] (Auszug): „Ein deformierbarer Stoff heißt plastisch, wenn er sich in einem unteren Schubspannungsbereich wie ein starrer, elastischer oder viskoelastischer Festkörper, in einem oberen Schubspannungsbereich dagegen wie eine Flüssigkeit verhält. Die Schubspannung, bei der dieser Übergang stattfindet, wird als Fließgrenze (auch Fließspannung) bezeichnet“. Anders ausgedrückt kann die Fließgrenze wie folgt beschrieben werden: Bevor eine Substanz zu Fließen beginnen kann, muss eine bestimmte Mindestkraft aufgebracht werden. D. h. die äußeren aufgebrachten Kräfte müssen größer als die inneren Strukturkräfte sein. Erst wenn die Struktur aufgebrochen ist, beginnt das Material zu fließen. Als Fließgrenze wird der Punkt bezeichnet, wo äußere Kraft und innere Strukturkraft gleich groß sind. Vor dem Erreichen der Fließgrenze weist das Material ein elastisches Verhalten auf. Es verhält sich in diesem Bereich wie ein Festkörper, der nach der Belastung wieder in seine ursprüngliche Form zurückgeführt wird. Die Verformung des Materials ist dabei sehr gering. Die Fließgrenze ist grundsätzlich von der Temperatur, dem Druck und der thermischen und mechanischen Vorgeschichte des Materials abhängig. Daher ist es notwendig ein genaues Messprofil für reproduzierbare Mes-

sungen festzulegen. Plastische Stoffe können sowohl den Feststoffen als auch den Flüssigkeiten zugeordnet werden [Sch95].

Nach Überwinden der Fließgrenze, kann sich der Stoff newtonisch, pseudoplastisch oder theoretisch auch dilatant verhalten. Verhält sich das Material nach der Fließgrenze newtonisch, dann spricht man auch von einem Bingham-Verhalten oder einem Bingham-Körper.

2.5.3 Zeitabhängiges Fließverhalten

Neben dem scherratenabhängigen Fließverhalten spielt in vielen Fällen auch das zeitabhängige Fließverhalten eine wichtige Rolle [Mez10] [Geh98]. Dabei ist es einerseits von Interesse, wie sich eine Substanz über einen längeren Zeitraum bei gleichbleibender Scherbelastung (zeitabhängige Schubspannungskurven) verhält und andererseits, wie sie sich nach einer Scherbelastung in der Ruhephase verhält (Strukturabbau und Strukturwiederaufbau - Thixotropie und Rheopexie).

2.5.3.1 Zeitabhängige Schubspannungskurven

Um den Verlauf der Schubspannung über einen bestimmten Zeitraum unter dem Einfluss einer äußeren Kraft zu erhalten, wird eine niedrige, konstante Scherrate vorgegeben. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Messdauer ausreichend lange ist, um transiente Effekte zu vermeiden. Diese können zu höheren als den tatsächlich vorhandenen Messwerten führen. Bei zu hohen Scherraten kann es zudem zu einer Erwärmung der Messprobe kommen, was zu einer Beeinflussung der Messwerte führt. Außerdem können bei hohen Scherraten turbulente Strömungsverhältnisse auftreten [Mez10]. Auch das Auftreten von Gleitfilmen innerhalb der Messprobe wird von [Geh98] als negative Begleiterscheinung beschrieben. Dabei trennen sich die Bestandteile des Stoffes bei hoher Scherbelastung und lagern sich in unterschiedlichen Bereichen innerhalb des Messbehälters ab, zwischen denen dann ein Gleitfilm entsteht.

2.5.3.2 Strukturabbau und -Wiederaufbau (Thixotropie und Rheopexie)

Thixotropes Verhalten

Als Thixotropie bezeichnet man nach [DIN 1342-3] die „[...] Abnahme der Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung und Wiederzunahme nach Aufhören der Beanspruchung“. Anders ausgedrückt, versteht man darunter die Abnahme der Viskosität infolge konstanter Scherbelastung und die Wiederzunahme der Viskosität während der anschließenden Ruhezeit (Abbildung 2-7) [Mez10]. Nach Ende der Ruhezeit entspricht die Viskosität der Viskosität vor der Scherbelastung. Dieses Verhalten kann auch als reversibler Strukturbruch bezeichnet werden, bei dem es infolge der Scherbelastung zu einem Strukturbruch und während der Ruhephase zu einem Strukturwiederaufbau kommt. Thixotropes Verhalten liegt nur dann vor, wenn ein vollständiger Wiederaufbau der Struktur möglich ist.

Gehm [Geh98] beschreibt das thixotrope Verhalten als reversible Sol-Gel-Umwandlung. Im Ruhezustand kann sich im Fluid eine dreidimensionale Struktur aufbauen, welche durch abstoßende und anziehende Wechselwirkungskräfte erzeugt wird. Die Hohlräume der Struktur sind dabei mit Flüssigkeit gefüllt. Durch die Scherung wird die Struktur zerstört, die eingeschlossene Flüssigkeit wird freigesetzt und der Scherwiderstand verringert. In der anschließenden Ruhezeit sorgen die Wechselwirkungskräfte wieder für einen erneuten Strukturaufbau.

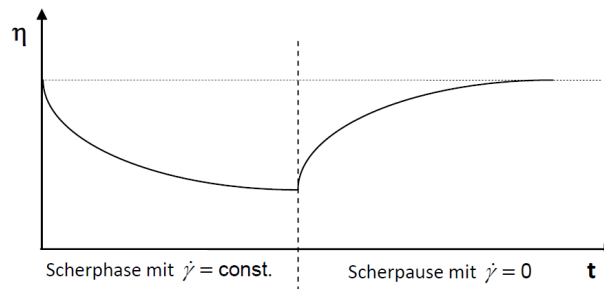


Abbildung 2-7: Zeitabhängige Viskositätsfunktion einer thixotropen Substanz [Mez10]

Rheopexes Verhalten

Das Gegenteil zur Thixotropie ist die Rheopexie [Mez10]. Dabei kommt es durch die Scherbelastung zu einer Erhöhung der Viskosität. In der anschließenden Ruhephase nimmt diese wieder ab und gleicht sich der Anfangsviskosität an. Wie auch bei der Thixotropie handelt es sich hier um einen vollständig reversiblen Vorgang. Es ist zu beachten, dass Substanzen mit rheopexem Verhalten zu inhomogenem Fließen neigen und ein Wandgleiten sowie ein Entmischen möglich sind. Rheopexe Fluide sind relativ selten und spielen im Bauwesen keine Rolle.

Untersuchungsmethoden

Um das thixotrope und rheopexe Verhalten zu untersuchen, nutzt man folgende zwei Verfahren [Mez10]:

Beim sogenannten Sprungversuch werden drei Abschnitten mit unterschiedlichen konstanten Schergeschwindigkeiten vorgegeben:

1. niedrige Schergeschwindigkeit \rightarrow Referenzabschnitt
2. hohe Schergeschwindigkeit \rightarrow Strukturbruch der Probe
3. niedrige Schergeschwindigkeit \rightarrow Simulation der Ruhephase

Durch Auswertung der Viskositätsunterschiede lässt sich auf die Thixotropie rückschließen.

Eine weitere Untersuchungsmethode besteht in der Auswertung von Fließkurven (Abbildung 2-8). Dabei wird ein Messprofil mit drei Scherbereichen vorgegeben. Bei den Bereichen handelt es sich um eine Aufwärtsrampe mit zunehmender Scherrate, einer anschließenden Haltezeit mit konstanter Scherrate und einer Abwärtsrampe, bei der die Scherrate wieder abnimmt. Die dadurch erzeugte Fließkurve liefert dabei eine Aufwärts- und eine Abwärtskurve. Liegt

die Abwärtskurve (infolge abnehmender Scherrate) unter der Aufwärtskurve (zunehmende Scherrate), so handelt es sich um thixotropes Verhalten. Liegt die Abwärtskurve über der Aufwärtskurve, so handelt es sich um rheopexes Verhalten. Die Fläche zwischen den Kurven wird als Hystereseffläche bezeichnet und dient als Maß für die Thixotropie oder Rheopexie. Die Auswertung mittels Fließkurve wird als veraltet angesehen und wird nur noch selten angewandt [Mez10]. In der Baustofftechnologie wird trotzdem meist dieses Verfahren eingesetzt. Zu ausführlichen Testmethoden zur Untersuchung von thixotropen und rheopexen Verhalten wird auf [Mez10] verwiesen.

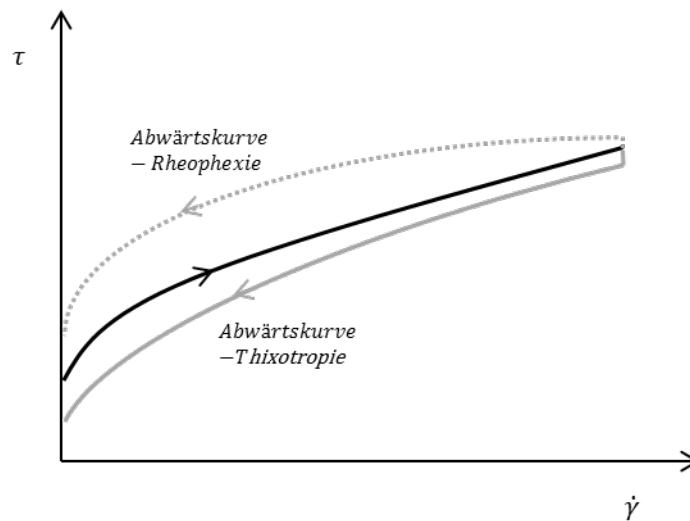


Abbildung 2-8: Auswertung des thixotropen und der rheopexen Verhaltens mittels Fließkurve

2.5.4 Fließverhalten von Suspensionen

Neben reinen Fluiden sind vornehmlich Suspensionen anzutreffen. Dabei ist ein Feststoff in einer Flüssigkeit gleichmäßig verteilt. Bei einer homogenen Verteilung kann die Suspension makroskopisch als Kontinuum betrachtet werden. Das Dispersionsmittel (Flüssigkeit) umhüllt dabei vollständig die disperse Phase (Feststoff). Ein Beispiel für eine Suspension ist Beton, bei dem Partikel unterschiedlicher Größe in der flüssigen Phase Wasser verteilt sind. Im Gegensatz zu reinen Fluiden ist das rheologische Verhalten von Suspensionen sehr viel komplexer. Eine Suspension kann sowohl ein viskoses Verhalten einer Flüssigkeit, als auch ein elastisch-plastisches Feststoffverhalten aufweisen. Bei reinen Fluiden verschieben sich die einzelnen Flüssigkeitsschichten gleichmäßig, wohingegen bei Suspensionen durch das Vorhandensein größerer Partikel keine laminare Schichtenströmung vorliegt. Das Ergebnis ist eine größere viskose Dissipation für eine größere Konzentration an Partikeln.

Ein wichtiger Parameter um das Verhalten von Suspensionen beschreiben zu können, ist der Feststoffanteil ϕ , welcher als volumenbezogener Anteil der Feststoffe auf das Gesamtvolumen der Suspension definiert ist [Cou12]. Ein geringer Feststoffanteil führt zu einem großen Abstand der Partikel zueinander. Durch die Partikel kommt es zu einer Störung im Fließen der umgebenden Flüssigkeit. Aufgrund des großen Abstandes der Partikel, hat diese Störung kei-

nen Einfluss auf andere Partikel. Das rheologische Verhalten der Suspension kann in diesem Fall mit dem Verhalten der umgebenden Flüssigkeit verglichen werden.

Mit zunehmendem Feststoffanteil verringert sich folglich auch der Abstand der Partikel zueinander, was zu einer gegenseitigen Interaktion dieser Teilchen führt [Cou12]. Dies führt zu einem überproportionalen Anstieg der Viskosität (Abbildung 2-9). Neben dem Feststoffanteil spielt auch die Form und die Korngrößenverteilung der Partikel eine wichtige Rolle.

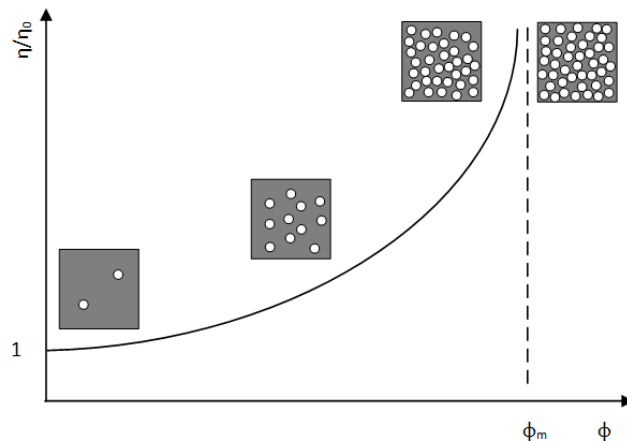


Abbildung 2-9: Relative Viskosität einer Suspension mit granularen Feststoffen in einer Newtonschen Flüssigkeit als Funktion des Feststoffanteils, nach [Cou12]

Tanner [Tan00] beschreibt in seiner Arbeit die Ergebnisse von Reynolds, die dieser bereits 1885 erstmals veröffentlichte. Reynolds nahm damals bereits an, dass konzentrierte Feststoffsuspensionen im Ruhezustand ein minimales Lückenvolumen aufweisen. Die in der Suspension enthaltene Flüssigkeit ist dabei gerade in der Lage die Feststoffzwischenräume auszufüllen. Bei langsamer Schergeschwindigkeit wirkt die Flüssigkeit als Schmiermittel. Dabei sind sowohl die Partikelbewegungen als auch die Spannungen in der Suspension noch vergleichsweise gering. Erst bei höherer Schergeschwindigkeit wird die dichte Partikelpackung aufgelockert und das Materialvolumen dehnt sich leicht aus. Ist aber nicht genügend Flüssigkeit vorhanden um die Partikel ausreichend zu schmieren, führt dies zu einem größeren Scherwiderstand und somit zu einer größeren Schubspannung.

Tanner beschreibt weiterhin, dass die Viskosität einer Suspension modellhaft als Funktion des Feststoffanteils und der Viskosität der flüssigen Phase beschrieben werden kann. Bei größerer Feststoffkonzentration kommt es dabei zu einem überproportionalen Anstieg der Viskosität. Der Reibungswiderstand einer Suspension unter Scherbeanspruchung setzt sich aus einem intergranularen Reibungsanteil (Kornreibungsanteil) und einem viskosen Reibungsanteil zusammen [Fer98]. Der intergranulare Reibungsanteil steigt dabei mit zunehmendem Feststoffanteil an. Die maximal mögliche Feststoffkonzentration in der Suspension ist abhängig von Kornform, Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte. Erst bei Überschreitung der interpartikulären Reibung kommt es zur Fließbewegung. Diesen Punkt bezeichnet man auch als Fließgrenze. Auch Banfill [Ban03] gibt an, dass die Fließeigenschaften von Suspensionen primär vom Kontakt zwischen Feststoffen und Wasser bestimmt werden.

2.5.5 Stabilität von Suspensionen

Eine wichtige Forderung an die Suspension ist deren Stabilität. Darunter versteht man den Widerstand gegen das Entmischen von Feststoff und Flüssigkeit. Eine hohe Stabilität zeichnet sich meist durch einen hohen Deformationswiderstand (Viskosität) und eine hohe Fließgrenze aus. Die Entmischung wird auch als Sedimentation bezeichnet. Dabei sinken die Feststoffe infolge der Schwerkraft nach unten. Ausschlaggebend für die Sedimentation ist die Viskosität der flüssigen Phase. Zudem ist der Dichteunterschied zwischen Feststoff und Fluid sowie die Partikelgröße und der Feststoffgehalt von Bedeutung [Cou12].

Um der Sedimentation entgegen zu wirken, sollte der Dichteunterschied möglichst klein sein, kleine Partikel verwendet werden und ein hoher Feststoffanteil gewählt werden. Zusätzlich ist eine hohe Viskosität der flüssigen Phase anzustreben. Eine weitere Möglichkeit, um eine Sedimentation zu vermeiden, sind sogenannte Dispersionsmittel. Dadurch wird die Viskosität der Suspension erhöht und ein Absinken der groben Partikel verhindert.

2.6 Verfahren zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Fluiden

2.6.1 Einfache Versuche

2.6.1.1 Auslaufversuche

Die einfachste Methode, um die Fließeigenschaften von Fluiden vergleichend zu bewerten, sind Auslaufversuche. Dabei wird die Zeit gemessen, die eine Substanz benötigt, um aus einem Gefäß mit definiertem Volumen und definierter Öffnungsgröße auszulaufen. Als Ergebnis erhält man die kinematische Viskosität. Trotz der einfachen Handhabung hat diese Messmethode zwei entscheidende Nachteile: Erstens ist die genaue Messung von Start- und Endzeitpunkt sehr schwierig und ungenau und das Ergebnis somit nicht 100 % reproduzierbar. Dies wird vor allem dann deutlich, wenn die Versuche von unterschiedlichen Laboranten durchgeführt werden. Der zweite Nachteil besteht darin, dass sich der hydrostatische Druck, welcher als Kraft wirkt, sich mit der Zeit verringert. Um die physikalischen Gesetze einzuhalten, müsste der sich ändernde hydrostatische Druck berücksichtigt werden, was aber in der Praxis so nicht geschieht [Geh98]. Die Abmessungen der Behälter und die Art der Durchführung ist in Normen geregelt: z. B. DIN 53211, DIN ISO 2431. In der Baustoffindustrie kommt u. a. der Auslaufrichter für Selbstverdichtenden Beton nach DIN EN 12350-9 zum Einsatz.

2.6.1.2 Fließen auf einer Ebene

Eine weitere sehr einfache Methode zur Bestimmung der Fließeigenschaften ist das Fließmaß. Dabei wird das zu untersuchende Material in einen kegelförmigen Behälter gegeben, der auf einer horizontalen Platte steht. Nach dem Hochziehen des Behälters kann sich das Material allein unter dem Einfluss der Schwerkraft ausbreiten. Es wird der endgültige Durchmesser sowie die Zeit, die das Material braucht um einen definierten Durchmesser zu überschreiten,

gemessen. Als Alternative zum Fließen unter Schwerkraft kann auch eine definierte Energie infolge von Rütteln, Stößen oder Schlägen aufgebracht werden [Mez10]. In der Baustoffindustrie kommt u. a. das Setzfließmaß für Selbstverdichtenden Beton nach DIN EN 12350-8 zum Einsatz.

Neben den zwei beschriebenen Versuchen gibt es noch eine Vielzahl weiterer Verfahren wie z. B. Kapillar-Viskosimeter oder Eindringversuche.

2.6.1.3 Einfache Versuche zur Beurteilung der Fließeigenschaften von Baustoffen

Die Beurteilung von Baustoffen erfolgt meist mit Prüfverfahren, die auf den oben beschriebenen Verfahren aufbauen. Da die meisten Versuche nur eine einzige Aussage über das Materialverhalten zulassen, werden diese auch als Einpunktverfahren bezeichnet. Um ausführliche Informationen über das Fließverhalten des Baustoffes zu erhalten, sind daher mehrere Verfahren anzuwenden (bei Selbstverdichtenden Betonen: Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit).

2.6.2 Rotationsrheometer

2.6.2.1 Messprinzip und Betriebsarten

Eine objektive und weit verbreitete Möglichkeit die rheologischen Eigenschaften von Materialien zu bestimmen sind Rotationsrheometer [Geh98] [Mez10] [Sch95]. Mit Hilfe dieser wird das in 2.4 beschriebene Zwei-Platten-Modell in die Praxis umgesetzt. Rotationsrheometer bestehen in der Regel aus einem Messbecher, in dem sich das Material befindet und einem Messkörper. In vielen Fällen werden sogenannte Absolut-Rheometer [Mez10] (siehe 2.6.2.2) verwendet, d. h. die Geometrien von Messbecher und Messkörper sind nach Norm definiert. Somit ist eine Umrechnung in physikalisch korrekte Viskositätswerte möglich. Als Messkörper können konzentrische Zylinder, Platten, Kegel oder Kombinationen aus diesen verwendet werden. Die Messung kann dann auf zwei Arten erfolgen: Wird der Messkörper angetrieben und der Messbecher bleibt in Ruhe, so wird dies als Searle-Methode bezeichnet. Wird hingegen der Messbecher angetrieben und der Messkörper bleibt in Ruhe, so bezeichnet man dies als Couette-Methode. In beiden Fällen wird dabei die Widerstandskraft gemessen, die der Messkörper erfährt. Mit dieser Kraft, den definierten Abmessungen und der Drehgeschwindigkeit kann man nun die Schubspannung und die Scherrate berechnen. Daraus kann wiederum eine Fließkurve erzeugt oder direkt die rheologischen Kennwerte berechnet werden.

Bei der Durchführung von Rotationsversuchen gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten der Steuerung: Bei der Vorgabe einer Scherrate oder Schergeschwindigkeit als Treppen- oder Rampenfunktion wird das Widerstandsmoment bzw. die Schubspannung gemessen („CSR-Test“; engl.: controlled shear rate test). Wird dagegen die Schubspannung bzw. das Widerstandsmoments („CSS-Test“; engl.: controlled shear stress test) vorgegeben, wird die dazugehörige Scherrate bzw. Schergeschwindigkeit gemessen.

2.6.2.2 *Absolut-Messsysteme*

Um die rheologischen Parameter nach DIN 1342-1 bis 3 zu ermitteln, sind genau festgelegte und genormte Geometrien der Messsysteme erforderlich. Zudem wird vorausgesetzt, dass ein laminares, ungestörtes Fließen auftritt. Sind diese Bedingungen erfüllt, können aus den Rohdaten die absoluten, physikalischen Größen mit vorgegebenen Dimensionseinheiten berechnet werden [Mez10]. Um dies zu verdeutlichen, werden Messsysteme die diese Bedingungen erfüllen auch als Absolut-Messsysteme [Mez10] bezeichnet. Beispiele für Absolut-Messsysteme sind die Zylinder-Messsysteme, das Doppelspalt-Messsystem, das Platte/Platte-Messsystem, das Kegel/Platte-Messsystem und das Mooney/Ewart-Messsystem. Eine ausführliche Darstellung dieser Systeme liefert u. a. [Mez10]. Der Vorteil von Absolut-Rheometern ist, dass die Ergebnisse unabhängig vom Gerätehersteller und vom Gerätetyp sind und diese somit vergleichbar sind. Um aus den Mess- oder Rohdaten „Scherwiderstand“ und „Schergeschwindigkeit“ die physikalischen Größen „Schubspannung“ und „Scherrate“ berechnen zu können, sind folgende Randbedingungen einzuhalten [Sch95]:

Laminares Fließen

Durch die Bewegung des Messbechers oder des Rührkörpers wird eine Scherung auf das Material aufgebracht. Dabei ist darauf zu achten, dass keine turbulente Strömung auftritt, sondern eine laminare Schichtenströmung. Bei heterogenen Proben kann durch die Rührwirkung die Probe homogenisiert und somit die rheologischen Werte verändert werden. Turbulente Strömung tritt vor allem bei hohen Rotationsgeschwindigkeiten auf. Zudem haben die Homogenität der Probe und die Geometrie des Messkörpers Einfluss auf die Fließeigenschaften.

Stationärer Strömungszustand

Eine weitere Randbedingung ist die Einhaltung eines stationären Strömungszustandes. Darunter versteht man die Proportionalität zwischen Schergeschwindigkeit und Schubspannung. Da die Probe im Rotationsrheometer erst beschleunigt werden muss, wird eine zusätzliche Energie notwendig, die beim Zwei-Platten-Modell nicht berücksichtigt wird. Zusätzlich ist während der Anlaufzeit die Scherrate im gesamten Messspalt noch nicht konstant. Es dauert einige Zeit bis alle Schichten gleichmäßig geschert werden. Die Dauer ist dabei von der Scherrate abhängig. Erst wenn die Probe über den gesamten Scherspalt geschert wird, herrscht ein stationärer Zustand. Diese Anlaufeffekte werden auch als transienter Effekte bezeichnet. Um diese zu vermeiden, ist eine ausreichend lange Messdauer und eine maximal zulässige Scherrate zu wählen.

Wandhaftung

Eine weitere Randbedingung für die Anwendbarkeit des Zwei-Platten-Modells ist die Wandhaftung. Nur wenn das Material an den Flächen von Messbecher und Messkörper haftet, ist eine exakte Berechnung möglich.

Homogenität

Von großer Bedeutung ist auch die Homogenität der Probe. Dabei soll unter Homogenität nicht die absolute Gleichheit verstanden werden, sondern vielmehr die Gleichheit bezogen auf das Messsystem [Sch95]. Das heißt, dass z. B. die Partikel einer Suspension sehr klein bezogen auf die Größe des Messspaltes oder des Messsystems sein müssen. Dies ist insofern wichtig, da in der Realität kaum wirklich homogene Materialien untersucht werden, sondern vielmehr Dispersionen oder Suspensionen. Zusätzlich ist stets darauf zu achten, dass es zu keiner Phasentrennung (Entmischung) kommt.

Chemische oder physikalische Veränderung der Probe

Weiter ist zu beachten, dass es während der Messzeit zu keiner chemischen oder physikalischen Veränderung der Probe kommt. Bei mineralisch gebundenen Materialien ist dies aber meist ab einer gewissen Messdauer der Fall. Eine solche Änderung sollte dann berücksichtigt und messtechnisch beschrieben werden.

Elastizität

Eine zusätzliche Randbedingung ist die Berücksichtigung der Elastizität. Bei Newtonschen Flüssigkeiten stellt sich bei der Belastung bereits von Beginn an, eine Proportionalität zwischen Schubspannung und Scherrate ein. In diesem Fall zeigt die Flüssigkeit nur ein viskoses Verhalten und das Zwei-Platten-Modell kann zur Beschreibung des Fließverhaltens herangezogen werden. Bei viskoelastischen Substanzen liegt neben dem viskosen Verhalten auch ein elastisches Verhalten vor. Dabei stellt sich das viskose Verhalten erst im Anschluss an das elastische Verhalten ein. Erst mit Ende des elastischen Verhaltens stellt sich ein stationärer Strömungszustand ein, bei dem das Zwei-Platten-Modell wieder seine Gültigkeit besitzt. Die Energie zu Beginn bis zum Erreichen des stationären Strömungszustandes wird als elastische Verformung gespeichert. Anschließend wird die Energie schließlich für das viskose Fließen wieder abgegeben.

2.6.2.3 Relativ-Messsysteme

Oft erfordern die zu untersuchenden Materialien eine Abweichung von den definierten Bedingungen der Absolut-Messsysteme. Dies kann z. B. an der Struktur des Materials oder an der Verfahrensbedingung in der Produktion liegen. Dabei kann es zu einer Abweichung von den genormten Geometrien (Zylinder-Messsysteme, Doppelspalt-Messsystem, Platte/Platte-Messsystem, Kegel/Platte-Messsystem, Mooney/Ewart-Messsystem) kommen. Zusätzlich kann ein ungleichmäßiges Fließverhalten mit Sekundärströmungseffekten sowie transientes und instationäres Fließverhalten auftreten [Mez10]. In diesem Fall ist eine Umrechnung in absolute Einheiten nicht mehr möglich. Zu diesem Zweck wurden in den vergangenen Jahren so genannte Relativ-Messsysteme entwickelt [DIN Fachbericht 145] [Mez10]. Relativ-Messsysteme ermöglichen die Bestimmung und Bewertung der rheologischen Eigenschaften von Materialien, unabhängig von den rheologischen Randbedingungen und der Geometrie.

Relativ-Messsysteme eignen sich für die Qualitätskontrolle in der Produktion und für die Entwicklung von Produkten. Sie können neben dem Einsatz im Labor auch in den Produktionsbetrieb integriert werden und eignen sich somit optimal um praxisnahe Bedingungen zu simulieren. Trotzdem ist, wie auch bei den Absolut-Rheometern, darauf zu achten, dass es zu keiner Störung im Messablauf oder zu ungewünschten Effekten und somit zu falschen Ergebnissen kommt. Wie schon bei den Randbedingungen für Absolut-Messsysteme, sind hier das Wandgleiten und die Homogenität der Probe (z. B. Absetzen oder Aufteilung der Probe) zu nennen.

Relativ-Messsysteme bestehen meist aus einem Gefäß und unterschiedlichen Messkörpern, wie z. B. Rührergeometrien oder Spindeln, in Form von Stiften, Scheiben, Zylindern oder Kugeln. Bei der Messung kann sowohl die Couette- als auch die Searle-Methode angewandt werden. Dabei wird das auf den Messkörper einwirkende Widerstandsmoment gemessen. Das Ergebnis sind Rheogramme, die das Widerstandsmoment in Abhängigkeit von der Zeit oder der verwendeten Drehzahl abbilden. Relativ-Messsysteme eignen sich zur Beurteilung des belastungs- oder zeitabhängigen Verhaltens eines Materials sowie zum Vergleich unterschiedlicher Proben. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse von der Wahl des Messkörpers und des Messsystems abhängen. Dabei werden nicht nur unterschiedliche Drehmomente erzeugt, sondern auch der Verlauf der Fließkurve variiert bei der Verwendung unterschiedlicher Messsysteme [Vog08]. Diese Kurvenverläufe werden oft auch als Maschinenkennlinien bezeichnet, weil sie das Produkt aus Messsystem, -geometrie, -profil und Materialeigenschaften sind. Aus diesem Grund ist ein Vergleich unterschiedlicher Relativ-Messsysteme nur bedingt möglich.

Durch die Verwendung von absoluten Einheiten können die Ergebnisse objektiv und unabhängig von der Bauart des Rheometers verglichen werden, was mit relativen Einheiten nicht möglich ist. Zwar existieren zahlreiche Publikationen mit der Herleitung einer Umrechnung in absolute Einheiten (z. B. in [Ova12]), diese sind aber sehr kritisch zu betrachten. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt bei Relativ-Messsystemen durch Angabe in gemessenen Einheiten. Meist wird das Drehmoment [Nmm] bei einer bestimmten Geschwindigkeit [Upm] oder über eine gewisse Zeit [min] gemessen. Da man davon ausgeht, dass der gemessene Widerstand proportional zur Schubspannung ist, werden die Ergebnisse als Relativ-Werte [DIN Fachbericht 143] bezeichnet. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Darstellung der Ergebnisse in einem g-h Diagramm mit den Parametern g = Fließgrenzenparameter und h = Viskositätskoeffizient. Zudem existiert für die Fließgrenze die Bezeichnung „Fließwiderstand“ und für die Viskosität die Bezeichnung „Fließkoeffizient“ [Gre04] [Tat83] [Ban92] [Sch02].

Relativmesssysteme ermöglichen die Ermittlung von Daten, welche durch Absolut-Messsysteme nicht oder nur teilweise ermittelt werden können. Dies ist dann der Fall, wenn die beschriebenen Randbedingungen nicht eingehalten werden können oder die Abmessungen aufgrund großer Partikel zu groß werden. Da in der Praxis häufig komplexe Strömungen auftreten, spiegeln die Relativ-Messsysteme das reale Fließverhalten eher wider als die Absolut-Messsysteme, denen eine laminare Schichtenströmung zugrunde liegt. Zur Qualitätskontrolle und für Vergleichszwecke ist es zudem nicht notwendig, die Ergebnisse als Absolut-Werte vorliegen zu haben.

2.6.2.4 Fließkurven und Modellfunktionen

Fließkurven sind das Ergebnis von Messungen mit Rheometern. Dabei wird ein Rampenprofil mit zu- und abnehmender Scherrate (CSR-Test) oder Schubspannung (CSS-Test) vorgegeben. Im Folgenden wird nur noch der CSR-Test behandelt, da dieser in der Regel für die Messung von zementgebundenen Baustoffen angewandt wird (Abbildung 2-10). Anhand der Fließkurve können Aussagen über Fließgrenze, Viskosität und u. U. Thixotropie getroffen werden. Bei der Bewertung der Fließkurven ist zwischen Aufwärtskurve (infolge zunehmender Geschwindigkeit) und Abwärtskurve (infolge abnehmender Geschwindigkeit) zu differenzieren. Es ist zu beachten, dass sowohl die Art und Dauer der Vorbelastung, die Ruhezeit, als auch die Geschwindigkeit, mit der die Versuche durchgeführt werden die Ergebnisse beeinflussen.

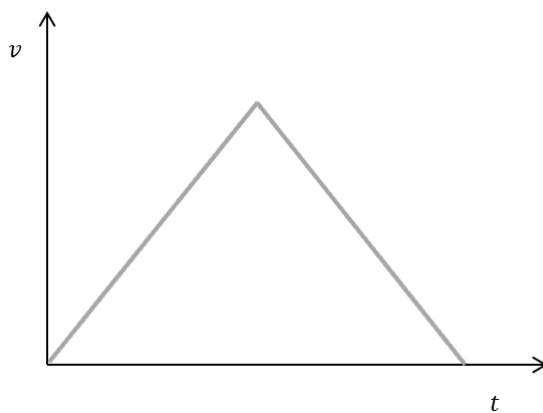


Abbildung 2-10: Rampenprofil

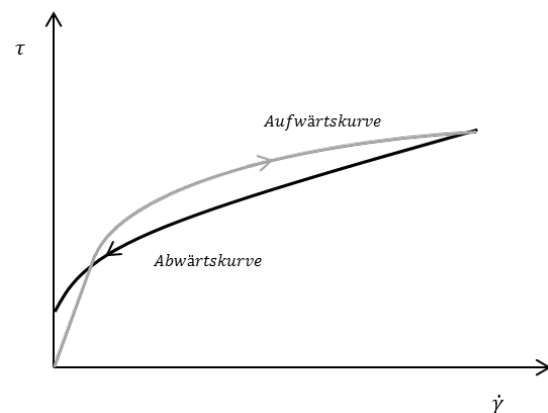


Abbildung 2-11: Fließkurve

Die Auswertung kann anhand der Aufwärts- und der Abwärtskurve erfolgen (Abbildung 2-11). Die Aufwärtskurve beginnt mit einem linearen Verlauf der Kurve. Die Schubspannung steigt dabei bei geringer Scherrate stark an. In diesem Bereich verhält sich das Material elastisch. Mit zunehmender Scherrate nimmt die Steigung und somit die Viskosität wieder ab. Gehm [Geh98] berichtet, dass es bei Vorgabe einer Scherratenrampe mit hohen Schergeschwindigkeiten beim Aufwärtsast zu einer „Nasenbildung“ kommen kann. Er führt dieses Phänomen auf die viskoelastische Eigenschaft des Materials zurück. Je größer demnach die elastischen Anteile des Fluids sind, umso mehr Kräfteverschiebungen treten zu Beginn der Scherbelastung auf. Die „Nasenbildung“ [Geh98] oder der „Peak“ kann aber auch aus einem transienten Verhalten infolge zu hoher Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung resultieren. Nach Überschreiten des elastischen Bereichs folgt der plastische Bereich. Dieser Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich charakterisiert die Statische Fließgrenze.

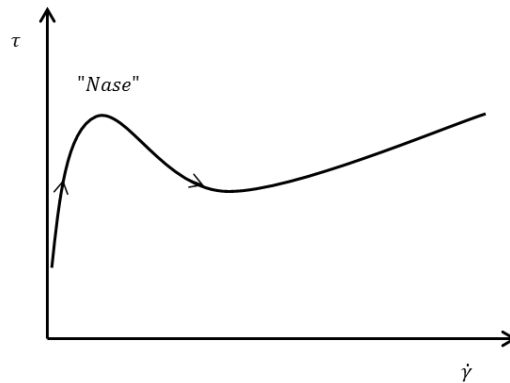


Abbildung 2-12: Aufwärtsast einer Fließkurve mit „Nase“, nach [Geh98]

Zur Auswertung der Fließkurve wird in den meisten Fällen aber die Abwärtskurve herangezogen. Bei der Abwärtskurve wurde das Material bereits geschert und ein Strukturbruch herbeigeführt. Zudem können Anlaufeffekte infolge Beschleunigung sowie instationäres Fließen ausgeschlossen werden. Die Messwerte sind daher bei der Abwärtskurve gleichmäßiger und genauer. Um die Abwärtskurve beschreiben zu können, wurden unterschiedlichste mathematische Modell-Funktionen eingeführt (z. B. in [Mez10]). Diese ermöglichen eine Kurvenanpassung, mit der unterschiedliche Fließkurven und deren Kennwerte miteinander verglichen werden können. Nachfolgend werden nur die Modelle erläutert, die für die Beschreibung des Fließverhaltens von zementgebundenen Baustoffen von Bedeutung sind.

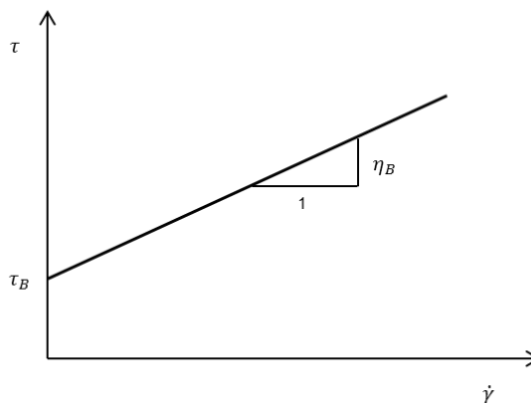


Abbildung 2-13: Bingham-Modell

Das wohl bekannteste Modell zur Beschreibung der Fließeigenschaften zementgebundener Baustoffe ist das Bingham-Modell (Abbildung 2-13). Es beschreibt das Material als einen plastischen Stoff, der ab einer bestimmten Schubspannung (Fließgrenze) zu fließen beginnt und bei dem im Anschluss die Schubspannung proportional zu Scherrate steigt.

Formel (2.6) beschreibt das Bingham-Modell mit der Fließgrenze τ_B , der Scherrate $\dot{\gamma}$ und der Viskosität η_B .

$$\tau = \tau_B + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad (2.6)$$

Genauer betrachtet, verhalten sich zementgebundene Baustoffe jedoch nicht wie Bingham-Körper. Die tatsächliche Fließgrenze liegt unterhalb der Fließgrenze des Bingham-Modells. Der Übergang vom Ruhe- in den Fließzustand wird mit dem Bingham-Modell relativ ungenau beschrieben. Ein Modell das diese Tatsache berücksichtigt ist das Modell von Windhab (Formel (2.7)). Dieses Modell (Abbildung 2-14) ist in der Betontechnologie nicht weit verbreitet, beschreibt aber sehr gut das Fließverhalten bei niedriger Scherrate.

$$\tau = \tau_0 + (\tau_1 - \tau_0) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}^*}\right) \right] + \eta_\infty \cdot \dot{\gamma} \quad (2.7)$$

Für den Fall $\dot{\gamma} = 0$ lässt sich Formel (2.7) zu $\tau = \tau_0 + 0 = \tau_0$ vereinfachen. τ_0 ist in diesem Fall die Schubspannung, bei der noch keine Bewegung stattfindet und somit die Fließgrenze.

Für $\dot{\gamma} = \infty$ kürzt sich die Formel zu $\tau = \tau_1 + \eta_\infty \cdot \dot{\gamma}$. Bei hoher Scherrate ist somit die Viskosität konstant. In diesem Bereich entspricht das Verhalten des Materials demjenigen eines Bingham-Körpers.

Zwischen τ_0 und τ_1 liegt der Bereich der scherinduzierten Strukturveränderung. Bei zunehmender Scherbelastung kommt es zum Strukturaufbau und bei abnehmender Scherbelastung zum Strukturwiederaufbau [Mez10].

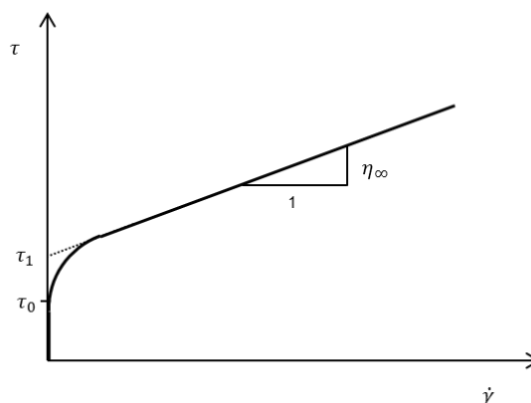


Abbildung 2-14: Windhab-Modell

Ein Modell das bei zementgebundenen Baustoffen angewendet wird, ist das Herschel-Bulkley-Modell. Bei diesem Modell beginnt das Material, wie beim Bingham-Modell, erst ab einer bestimmten Schubspannung (Fließgrenze nach Herschel-Bulkley; τ_{HB}) zu fließen.

$$\tau = \tau_{HB} + \eta_{HB} \cdot \dot{\gamma}^p \quad (2.8)$$

Die Besonderheit dieses Modells liegt im Verlauf der Fließkurve nach dem Überschreiten der Fließgrenze. Herschel-Bulkley führte einen Index „p“ ein, mit dem man zwischen scher-

dünnendem Verhalten ($p < 1$), scherverdickendem Verhalten ($p > 1$) und einem Bingham Verhalten ($p = 1$) unterscheiden kann.

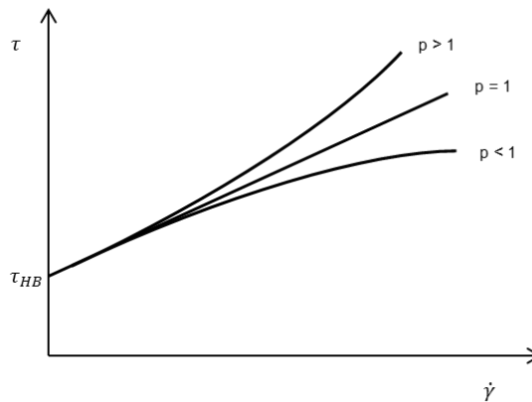


Abbildung 2-15: Herschel-Bulkley-Modell

Die Vorgabe einer Scherrate als Rampenfunktion ist laut Mezger [Mez10] nicht mehr zeitgemäß, zu ungenau und sollte nur für einfache QS-Tests verwendet werden. Trotz alledem wird diese Methode in der Baustoffindustrie und in der Wissenschaft eingesetzt. In der Regel wird, aufgrund der Einfachheit, für zementgebundene Baustoffe das Bingham-Modell verwendet. Da es sich aber nur um eine Näherungsfunktion handelt, ist die Genauigkeit der Ergebnisse fraglich. Das Ergebnis der beschriebenen Funktionen hängt, neben dem Anpassungsmodell, von der vorgegebenen Rampenzeitdauer, dem gewählten Schergeschwindigkeitsbereich und dem Messgerät ab [DIN Fachbericht 143] [Ngu83]. Es ist zu beachten, dass die gemessene dynamische Viskosität nicht als feste Materialkonstante angesehen werden darf [Spa98]. Sie ist vielmehr von der Scherbeanspruchung und somit von der Durchführung der Prüfung abhängig.

2.6.2.5 Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit

Eine weitere Möglichkeit die Fließgrenze zu bestimmen, ist die Vorgabe eines Stufenprofils mit einer konstant niedrigen Drehzahl bzw. Schergeschwindigkeit (Abbildung 2-16) [DIN Fachbericht 143] [Est12]. Zu Beginn der damit generierten Kurve (Abbildung 2-17) ist bei geringer Verformung ein linearer Anstieg erkennbar. In diesem Bereich zeigt das Material ein elastisches Verhalten. Mit zunehmender Verformung endet der elastische Bereich und die maximale Schubspannung wird erreicht. Dieser Punkt charakterisiert die Statische Fließgrenze (τ_{\max}) [Ova12] [Koe04] [Koe08] und ist ein Indikator dafür, welche Kraft benötigt wird, um den Fließprozess zu starten. Sobald die Statische Fließgrenze überschritten wird, stellt sich ein konstanter Schubspannungsverlauf ein. Dieses Plateau kann als Dynamische Fließgrenze (τ_{dyn}) bezeichnet werden [Koe08]. Die Dynamische Fließgrenze ist ein Indikator dafür, welche Kraft benötigt wird, um den Fließvorgang mit einer definierten Schergeschwindigkeit aufrecht zu erhalten.

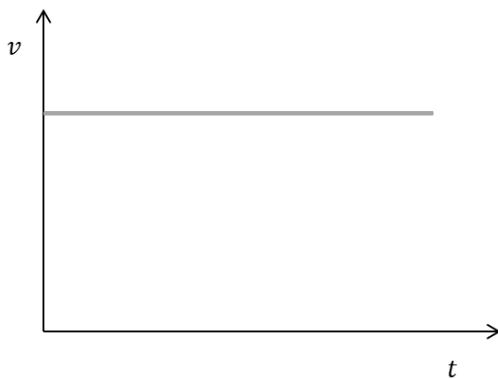


Abbildung 2-16: Stufenprofil

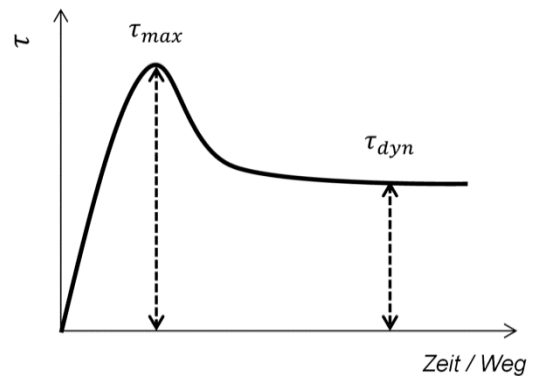


Abbildung 2-17: Verlauf der Schubspannung

Bei der Betrachtung der Statischen und der Dynamischen Fließgrenzen sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. $\tau_{\max} > \tau_{\text{dyn}}$: Die Statische Fließgrenze ist größer als die Dynamische Fließgrenze. Dieses Verhalten tritt dann auf, wenn es durch Wechselwirkungskräfte zwischen den Partikeln zu einem Strukturaufbau kommt. Für das Aufbrechen der Strukturen ist dann eine höhere Kraft notwendig als für das Erhalten des Fließens. Die höhere Statische Fließgrenze kann aber auch auf transiente Effekte infolge einer höheren Prüfgeschwindigkeit zurückgeführt werden. In der Kurve (Abbildung 2-17) wird dieses Verhalten durch den „Peak“ oder die „Nase“ deutlich.
2. $\tau_{\max} = \tau_{\text{dyn}}$: Die Statische Fließgrenze entspricht der Dynamischen Fließgrenze. Dieses Verhalten tritt dann auf, wenn keine Wechselwirkungskräfte zwischen den Partikeln wirken bzw. die Strukturen durch einen Scherprozess bereits aufgebrochen wurden.

2.6.2.6 Besondere Betrachtung der Fließgrenze

Kritische Betrachtung

Seitdem der Begriff „Fließgrenze“ besteht, wird über dieses Thema kontrovers diskutiert. Bereits bei der Frage, ob eine Fließgrenze wirklich existiert, war man sich lange uneins [Bar85] [Bar99]. Dabei traf man die Annahme, dass, wenn man dem Material ausreichend Zeit zum Fließen gibt, keine Fließgrenze existiert. Kritisiert wurde bei den Diskussionen vor allem die Bestimmung der Fließgrenze mittels Extrapolation der Fließkurve (Bingham- oder Herschel-Bulkley-Modell). Bei dieser Auswertung des absteigenden Astes wird angenommen, dass bei sehr kleinen Schergeschwindigkeiten die gemessene Fließkurve die Schubspannungsachse schneidet. Durch die Entwicklung moderner Rheometer sind Messungen bei sehr niedrigen Schergeschwindigkeiten erst möglich geworden. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Viskosität bei sehr niedrigen Schergeschwindigkeiten sehr groß ist. Bei steigender Schergeschwindigkeit kann festgestellt werden, dass die Viskosität ab einem bestimmten Punkt

schlagartig geringer wird. Dieser Punkt beschreibt den Übergang von der linear-elastischen Deformation zum viskosen Fließen. Nach [DIN 1342-1], [DIN 1342-3] und [Mez10] wird dieser Übergangspunkt als Fließgrenze bezeichnet. Koehler [Koe04] dagegen behauptet, dass durch diese Versuche bewiesen wurde, dass es eine Fließgrenze nicht gibt. Diese Diskussion wird sicherlich andauern. Eine genormte Definition [DIN 1342-1] ist aber eine gute Grundlage, um sich bei Fragen zur Fließgrenze auf einer einheitlichen Basis zu verständigen.

Trotz dieser Diskussion um die Existenz einer Fließgrenze, hat sich in vielen Anwendungsbe-
reichen die Fließgrenze zu einem wichtigen Kennwert entwickelt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Fließgrenze keine Materialkonstante ist, sondern nur ein Modellparameter [Mez10] [Ngu83].

Vergleich unterschiedlicher Fließgrenzen

Mittlerweile existieren zahlreiche Auswertmöglichkeiten, die aber auch unterschiedliche Ergebnisse liefern. Von einer einheitlichen Fließgrenze zu sprechen ist daher schwierig. Beeinflusst werden die Ergebnisse weiter durch unterschiedliche Messsysteme (z. B. Platte/Platte-, Zylinder-, Relativ-Messsysteme), Messgeräte (Hersteller, Drehzahlaufösung, messbarer Bereich usw.), Messgeometrien und Messablauf (Schergeschwindigkeit, Vorscherung u. v. m.).

Vergleicht man, z. B. die Bingham-Fließgrenze (Auswertung der Abwärtskurve einer Fließkurve mit dem Bingham-Modell) mit der Dynamischen Fließgrenze bei konstanter Belastung, so sind die Werte nicht identisch, da diese bei unterschiedlichen Belastungszuständen ermittelt wurden. Bei der Fließkurve wird die Bingham-Fließgrenze bei der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma} = 0$ ermittelt, bei der konstanten Scherbelastung ist dagegen eine Scherrate $\dot{\gamma} > 0$ vorgegeben. Bei der Statischen Fließgrenze ist ebenfalls zwischen den beiden Versuchsdurchführungen zu unterscheiden. Bei der Fließkurve wird die Schergeschwindigkeit langsam gesteigert und der Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich festgehalten. Dieser entspricht aber nicht der Statischen Fließgrenze bei vorgegebener konstanter Schergeschwindigkeit.

Neben den erwähnten Faktoren ist auch die Bezeichnung der unterschiedlichen Arten von Fließgrenzen ein stetiges Thema. Wie bereits erwähnt, kann man nicht allgemein von Fließgrenze sprechen, sondern muss immer die Art der Bestimmung miteinbeziehen (Fließkurve oder Schubspannung infolge konstanter Belastung, Auswertung am Belastungsast oder Entlastungsast, tatsächliche Messwerte oder Kurvenanpassungsfunktion). Eine Übersicht über die unterschiedlichen Fließgrenzen sowie die, in dieser Dissertation verwendeten Bezeichnungen, liefert Tabelle 2-1.

In dieser Arbeit verwendete Bezeichnung der Fließgrenze	Alternative Bezeichnungen	Durchführung des Versuchs			Auswertung		Messsystem	
		Fließkurve		Schubspannung bei konstanter Belastung	tatsächlicher Messwert	Kurvenanpassungsfunktion (z. B. Bingham)	Absolutwerte	Relativwerte
		Belastungsast	Entlastungsast					
Statische Fließgrenze	Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich	x			x		x	
	Fließgrenze zu Beginn einer konstanten Belastung			x	x		x	
relative Statische Fließgrenze	Widerstandsmoment beim Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich	x			x			x
	Widerstandsmoment zu Beginn einer konstanten Belastung			x	x			x
Tatsächliche Fließgrenze	Tatsächliche Fließgrenze am Entlastungsast		x		x		x	
relative Tatsächliche Fließgrenze	gemessenes Widerstandsmoment beim Entlastungsast		x		x			x
Dynamische Fließgrenze	Fließgrenze bei konstanter Belastung			x	x		x	
relative Dynamische Fließgrenze	Widerstandsmoment bei konstanter Belastung; notwendige Kraft um den Fließprozess bei vorgegebener Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten			x	x			x
Bingham-Fließgrenze	Scheinbare Fließgrenze		x			x	x	
relative Bingham-Fließgrenze	Bingham-Fließkoeffizient, Fließgrenzenparameter		x			x		x

Tabelle 2-1: Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Fließgrenzen

2.6.3 Die exzentrisch rotierende Kugel

2.6.3.1 Aufbau und Prinzip

Eine besondere Form der Rotationsrheometer, bzw. eine Abwandlung davon, ist das Kugelmesssystem (KMS) [Yas94] [Tyr97] [Tyr00] [Bla02] [Sch05] [Sch09]. Beim KMS rotiert eine exzentrisch angebrachte Kugel mit einer definierten Geschwindigkeit in einem zylindrischen Behälter. Die Kugel ist dabei an einem dünnen Steg befestigt. Bei der Bewegung der Kugel durch das Medium wird an der Halterung das auftretende Widerstandsmoment gemessen. Bereits nach einer Umdrehung kann der Versuch erfolgreich beendet werden. Alle dabei gewonnenen Ergebnisse resultieren aus Messungen im ungescherten Material. Weitere Umdrehungen liefern dagegen Ergebnisse von geschertem Probematerial. Um Aussagen über die Fließeigenschaften zu erhalten, wird im Anschluss an die Messung eine Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Widerstandsmoment und somit eine Beziehung zwischen Schergeschwindigkeit und Schubspannung hergestellt. Aufgrund der Abweichung vom Zwei-Platten-Modell handelt es sich beim KMS um ein Relativ-Messsystem.

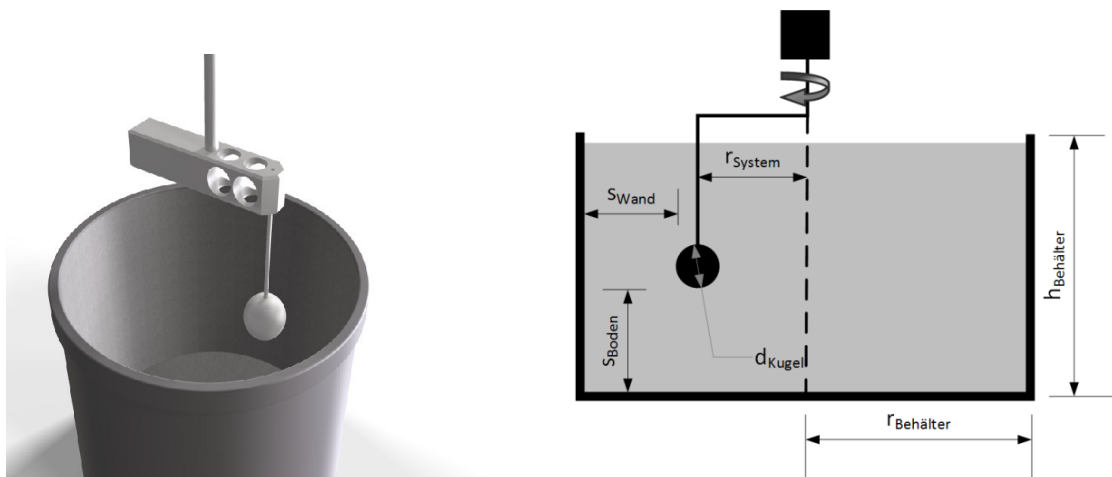


Abbildung 2-18: Kugel-Messsystem, links: Animation [Sch12]; rechts: schematische Darstellung

Der Abstand der Kugel von der Wand und dem Boden (s_{Wand} und s_{Boden}) richtet sich nach der maximalen Partikelgröße und soll mindestens das Fünffache des Größtkorndurchmessers betragen.

Bei der Vorgabe einer variablen Geschwindigkeit (Rampenprofil) kann eine Fließkurve mit auf- und absteigender Schergeschwindigkeit erzeugt werden (siehe 2.6.2.4) [Fle13]. Die Auswertung kann am Belastungsast (Statische Fließgrenze) und am Entlastungsast (Bingham-Modell mit Bingham-Fließgrenze und Bingham-Viskosität) erfolgen. Wird der Versuch mit einer konstant niedrigen Rotationsgeschwindigkeit (Stufenprofil) durchgeführt, kann das Widerstandsmoment über die Zeit oder den zurückgelegten Weg ausgewertet werden und somit Aussagen über die Statische und Dynamische Fließgrenze (siehe 2.6.2.5) sowie über die zeitliche Veränderung des Materials gemacht werden.

2.6.3.2 Vorteile gegenüber anderen Systemen

Das KMS bringt einige Vorteile gegenüber den klassischen Rotationsrheometern mit sich. Bei Rotationsrheometern mit Zylindergeometrie entsteht meist ein Gleitfilm zwischen Material und Behälterwand, der die Ergebnisse stark beeinflusst. Dieses Problem wird dadurch verhindert, dass der Abstand zwischen Kugel und Behälterwand ausreichend groß ist und zudem keine Schichtenströmung erzeugt wird. Durch die ständige Scherung des Materials bei Rotationsrheometern werden auch die rheologischen Eigenschaften erheblich verändert. Die Scherung kann sogar zur Sedimentation führen. Dieses Problem wird umgangen, indem die Messung bereits nach einer Umdrehung abgeschlossen ist. Zudem können die gemessenen Daten auch in physikalische Einheiten (Absolut-Werte) umgewandelt werden (2.6.3.4).

2.6.3.3 Strömungsmechanische Betrachtung des KMS

Das Kugel-Messsystem verursacht nicht, wie bei Rotationsrheometern üblich, eine laminare Schichtenströmung, sondern eine Verdrängungsströmung [Sch05]. Das Zwei-Platten-Modell hat somit keine Gültigkeit. Der Zusammenhang zwischen dem Fließen des Materials und dem Messkörper muss daher auf eine andere Weise beschrieben werden.

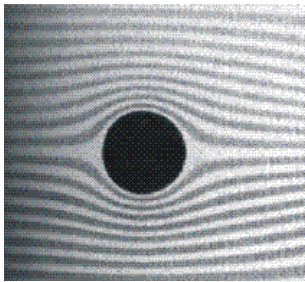
Bei mineralisch gebundenen Baustoffen handelt es sich, strömungstechnisch betrachtet, um reale Fluide. Merkmale dafür sind Reibungseffekte und -arbeit, Schubspannungen in Strömungsrichtung (d. h. in Verschiebungsrichtung) und Kompressibilität. Bei einem realen Fluid haftet im Gegensatz zu einem idealen Fluid das angrenzende Fluid unmittelbar an einem Körper. Erst über eine dünne Zone kann sich ein annähernd körperkonturparalleles Geschwindigkeitsfeld ausbilden. Diese Zone wird auch als Grenzschicht bezeichnet und spielt eine wesentliche Rolle bei der Strömung realer Fluide [Bös10]. Weiterhin ist zwischen stationärer und instationärer Strömung zu unterscheiden [Czi12]. Eine stationäre Strömung liegt vor, wenn alle Strömungsgrößen (Drücke, Strömungsgeschwindigkeiten usw.) nur vom Ort und nicht von der Zeit abhängen [Dob06]. Bei stationären Strömungen ist die lokale Beschleunigung null, d. h. die Geschwindigkeit bleibt gleich. Folglich sind die Stromlinien und Teilchenbahnen identisch. Ein Beispiel für eine stationäre Strömung ist der ruhende Zylinder in der Strömung. Bewegt sich hingegen ein Körper durch ein ruhendes Medium, wie es beim KMS der Fall ist, so liegt eine instationäre Strömung vor. Merkmale für eine instationäre Strömung sind, dass sich das Strömungsfeld mit Ort und Zeit ändert sowie Stromlinien und Teilchenbahnen im Allgemein verschieden sind. Durch Wahl des geeigneten Bezugssystems können instationäre Strömungen oft in stationäre Strömungen überführt werden. Bewegt sich ein Körper durch ein ruhendes Fluid, so erscheint die Ausweichströmung für einen Beobachter aus größerer Entfernung als eine instationäre Strömung. Bewegt sich der Betrachter aber mit dem Körper, so nimmt er die Strömung als stationär wahr. Da eine stationäre Strömung erheblich einfacher zu behandeln ist, wird man in solchen Fällen zweckmäßigerweise ein mit dem Körper mitbewegtes Beobachtungssystem verwenden [Boh08] [Bös10].

Um die Strömungsformen charakterisieren zu können, bedient man sich der Reynolds-Zahl Re . Diese dimensionslose Kennzahl ist von der Geschwindigkeit sowie der Viskosität und der Dichte des Materials abhängig:

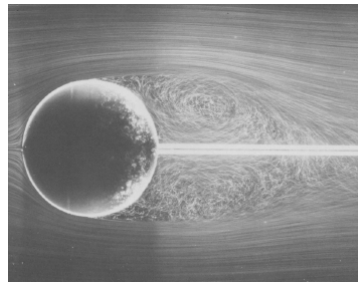
$$Re = \frac{\rho * v * l}{\eta} \quad (2.9)$$

mit ρ = charakteristische Dichte des Fluides
 v = charakteristische Strömungsgeschwindigkeit des Fluides
 l = charakteristische Länge des Gegenstandes oder bei Widerstandskörpern die Breite oder Höhe quer zur Strömungsrichtung
 η = dynamische Viskosität

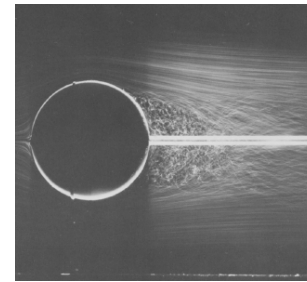
Die kritische Reynolds-Zahl Re_{krit} beschreibt den Übergang von der laminaren ($Re < Re_{krit}$) zur turbulenten ($Re \geq Re_{krit}$) Strömung und muss experimentell bestimmt werden [Sig12] [Bös10].



laminare Strömung
 $Re < 1$
 [Phy13]



Übergangsbereich
 $1 \leq Re \leq 5 * 10^5$
 [Ada13]



turbulente Strömung
 $Re > Re_{krit} = 5 * 10^5$
 [Ada13]

Abbildung 2-19: Darstellung der Strömungszustände

Abbildung 2-19 zeigt die unterschiedlichen Strömungszustände einer umströmten Kugel bei unterschiedlichen Reynolds-Zahlen. Unter einer laminaren Strömung versteht man die geordnete Bewegung von Fluidteilchen in nebeneinanderlaufenden Schichten, ohne eine Kreuzung oder Vermischung der jeweiligen Strombahnen. Eine laminare Strömung liegt bei sehr kleinen Reynolds-Zahlen vor. Bei einer umströmten Kugel und somit auch beim KMS liegt der laminare Strömungsbereich bei einer Reynolds-Zahl ≤ 1 . Im Falle sehr kleiner Reynolds-Zahlen wird diese auch als schleichende Strömung bezeichnet. Das Verhältnis von Trägheitskräften zur Viskosität ist dabei sehr klein ($\ll 1$). Bei der schleichenden Umströmung schließt sich die Strömung hinter dem Körper (Kugel, Zylinder) wieder zusammen und es treten keine oder nur sehr kleine Wirbel auf. Die Widerstandsbeiwerte sind dabei relativ hoch [Sig12] [Bös10] [Sch99]. Bei turbulenter Strömung bewegen sich die Fluidteilchen nicht mehr geordnet. Die Strombahnen überlagern sich und es kommt zu einer Durchmischung der einzelnen Strömungsschichten. Ein Kennzeichen turbulenter Strömung sind die auftretenden Wirbel. Turbulentes Strömen tritt bei sehr großen Reynolds-Zahlen auf. Bei der umströmten Kugel ist

dies bei $Re_{krit} \approx 5 \cdot 10^5$ der Fall [Sch99]. Zwischen dem turbulenten und laminaren Strömungsbereich liegt ein Übergangsbereich, der keinem der extremen Strömungen zugeordnet werden kann und einen fließenden Übergang darstellt [Ebe13]. In Abbildung 2-20 ist der Widerstandsbeiwert c_w einer glatten Kugel in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl dargestellt.

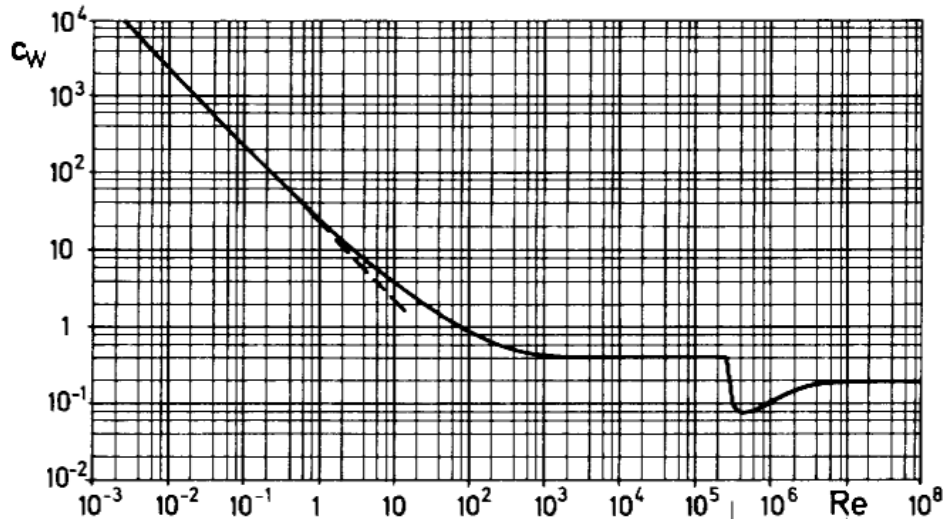


Abbildung 2-20: Widerstandsbeiwert c_w einer glatten Kugel in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl, aus [Jun13]

Für eine exzentrisch rotierende Kugel errechnet sich die Reynolds-Zahl zu:

$$Re = 2\pi \frac{\rho * n * L * d}{\eta} \quad (2.10)$$

mit n = Drehzahl
 L = Abstand zwischen Rotationsachse des Messsystems und Kugelmitte
 d = Kugeldurchmesser

Wird ein Körper von einem Fluid umströmt, so setzt dieser der Strömung einen Widerstand entgegen. Der Gesamtwiderstand setzt sich aus Druckwiderstand (Formwiderstand) und Reibungswiderstand (Flächenwiderstand) zusammen. Die Gesamtwiderstandskraft F_w kann wie folgt berechnet werden:

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A_{st} \quad (2.11)$$

mit ρ = Dichte des Materials
 v = Anströmgeschwindigkeit
 A_{st} = Stirnfläche
 c_w = Widerstandsbeiwert

Aufgelöst nach c_w ergibt sich:

$$c_w = \frac{F_W}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_{St}} = \frac{F_W}{q A_{St}} \quad (2.12)$$

mit $q =$ dynamischer Staudruck

Der Widerstandsbeiwert c_w ist dabei von der Körperform (rund, kantig, schlank usw.), der Oberflächenrauigkeit und der Reynolds-Zahl abhängig. Für eine glatte Kugel existiert für den Fall $Re < 1$ eine analytische Lösung:

$$c_w = \frac{24}{Re} \quad (2.13)$$

Durch Einsetzen von Formel (2.9) und Formel (2.13) in Formel (2.11) erhält man schließlich das Stokes'sche Gesetz:

$$F_W = 6\pi\eta r v = 3\pi\eta d v = F_R \quad (2.14)$$

Da bei laminarer Umströmung einer Kugel durch eine viskose Newtonsche Flüssigkeit vorrangig Reibungskräfte wirken, kann der Reibungswiderstand F_R dem Gesamtwiderstand F_W gleichgesetzt werden [Dob06]. Da es sich bei Beton aber idealisiert um ein Bingham-Material handelt, existiert neben der Reibungskraft auch noch eine Fließgrenze, die in dem Gesetz von Stokes nicht berücksichtigt wird. Folglich setzt sich der Gesamtwiderstand aus der Reibungskraft F_R und der Fließgrenze F_{FG} zusammen, was eine Bestimmung der Viskosität erschwert.

Abbildung 2-21 zeigt die laminare Umströmung einer Kugel in einer Newtonschen, viskosen Flüssigkeit.

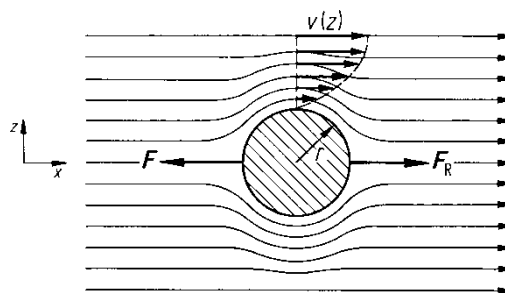


Abbildung 2-21: Umströmung einer Kugel in einer Newtonschen Flüssigkeit [Czi12]

Im Bereich der Kugel beträgt die Geschwindigkeit v_0 , im ungestörten Bereich v_{max} . An der Kugeloberfläche haftet die angrenzende Flüssigkeitsschicht, wodurch ein Geschwindigkeitsgefälle $dv/dz \approx v/r$ auftritt. Die Größe dieses Störungsbereiches entspricht in etwa dem Radius der Kugel [Czi12].

Demzufolge kann die Scherrate als

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{2r} = \frac{v}{d} \quad (2.15)$$

definiert werden [Low13]. Beim KMS bewegt sich die Kugel durch das Fluid. Demnach ist die Geschwindigkeit an der Kugel maximal und im ungestörten Bereich 0.

Setzt man Formel (2.15) in (2.14) ein, so erhält man das Stokes'sche Gesetz in Abhängigkeit von der Scherrate $\dot{\gamma}$:

$$F_R = 3\pi \eta d^2 \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

Um die Nicht-Newtonschen Eigenschaften beim Stokes'schen Gesetz zu berücksichtigen, substituiert [Low13] die Newtonsche dynamische Viskosität durch die plastische Viskosität:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \quad (2.17)$$

Für eine Suspension mit Fließgrenze ergibt sich demnach durch Einsetzen der Formel (2.17) in Formel (2.16) der Reibungswiderstand zu:

$$F_R = 3\pi d^2(\tau_0 + \mu\dot{\gamma}) = 3\pi d^2\tau_0 + 3\pi d^2\mu\dot{\gamma} = 3\pi d^2\tau_0 + 3\pi d \mu v \quad (2.18)$$

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich für $v = 0$ die Fließgrenze:

$$\tau_0 = \frac{F_r}{3\pi d^2} = \frac{F_r}{12\pi r^2} \quad (2.19)$$

Vogel [Vog13] schlägt zur Charakterisierung der Fließgrenze hingegen die Einführung einer entsprechenden dimensionslosen Kenngröße vor. Dies könnte demnach zum Beispiel die Bingham-Zahl Bm sein:

$$Bm = \frac{2r \tau_0}{\eta v} \quad (2.20)$$

Der Widerstandsbeiwert c_w wäre dann eine Funktion von Re und Bm - $c_w(Re; Bm)$, für die anstelle von Formel (2.13) eine Lösung gefunden werden müsste. Als weitere Möglichkeit nennt Vogel eine Konvention der Art:

$$F_W = c_w \left(\tau_0 + \eta \frac{v}{d} \right) \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2.21)$$

Bis auf [Vog13], der sich intensiv mit dieser Thematik auseinandersetzt, liefert die Literatur nur wenig Anhaltspunkte für die Kugelumströmung von Fluiden mit Fließgrenze.

2.6.3.4 Umwandlung der Messwerte in rheologische Kenngrößen (Absolut-Werte)

Wie das vorgehende Kapitel darstellt, ist die physikalische Beschreibung einer bewegten Kugel in einem Bingham-Material äußerst umfassend. Zudem wird das KMS bei grobdispersen Suspensionen mit komplexen Strömungen angewandt, was diese Problematik noch verschärft [Sch05]. Trotz alledem wird angestrebt, die mit dem Kugel-Messsystem gewonnenen Messdaten in rheologische Absolut-Werte zu überführen. Für die Umwandlung der gemessenen Rohdaten Drehmoment M und Drehzahl n in die rheologischen Parameter Scherrate $\dot{\gamma}$ und Schubspannung τ existieren mehrere Ansätze.

Da es sich bei mineralisch gebundenen Baustoffen um Nicht-Newtonsche Fluide handelt, ist die Umwandlung mit der Navier-Stokes Gleichung nicht ohne weiteres möglich [Böh00]. [Tyr00] hat dazu Korrekturfaktoren eingeführt, die er empirisch mit Vergleichsmaterialien für bestimmte Geometrien ermittelt hat. Diese Korrekturfaktoren haben sicherlich für einen speziellen Fall ihre Gültigkeit, sind aber im Allgemeinen zu ungenau. Schatzmann bewies in seiner Arbeit [Sch03] diesen Ansatz, stellte aber auch fest, dass dieser nicht für Nicht-Newtonsche Fluide und turbulente Strömungen zulässig ist. Seine Ergebnisse bei mittel- bis hochkonzentrierten Sediment-Wasser-Mischungen lassen sich auch auf Frischbeton übertragen.

Daraufhin entwickelte Schatzmann [Sch05] auf Basis der Metzner- und Otto-Theorie und unter Berücksichtigung verschiedener Fluidtypen und zweier Strömungsregimes einen verfeinerten Ansatz, welcher auch für Flüssigkeiten mit Fließgrenze Gültigkeit hat. In einem ersten Schritt wird die Newton-Zahl Ne bestimmt, welche den Leistungsaufwand rotierender Systeme beschreibt, und mit der Reynolds-Zahl multipliziert, was die charakteristische Kennzahl C_1 ergibt. Für $Re \leq 1$ verhält sich C_1 konstant, wächst aber mit steigender Reynolds-Zahl an.

Der Zusammenhang zwischen Rotationsgeschwindigkeit v bzw. Ω und Scherrate $\dot{\gamma}$ wurde experimentell ermittelt. Durch Vergleichsmessungen mit einem konzentrischen Zylinder-messsystem konnte für den laminaren Strömungsbereich ein linearer Zusammenhang hergestellt werden und somit die Scherrate $\dot{\gamma}$ ermittelt werden.

Die Umrechnung des Widerstandsmoment T in die Schubspannung τ erfolgt für laminare Strömungen nach folgender Formel:

$$\tau = K_T T \quad (2.22)$$

Der Koeffizient K_T ist dabei vom Kugeldurchmesser und dem Fluidtyp abhängig und muss anhand eines Referenzmaterials mit einem Referenzmesssystem ermittelt werden. Um dimensionslose Werte zu erhalten, wird K_T mit dem Abstand L (Abstand Kugel von Systemachse) und der Summe aus Kugeloberfläche A_S und der Oberfläche der Halterung A_h multipliziert.

Somit ergibt sich die dimensionslose Konstante K'_T :

$$K'_T = K_T L (A_s + A_h) \quad (2.23)$$

Durch Einsetzen von Formel (2.22) in Formel (2.23) ergibt sich K'_T zu:

$$K'_T = \frac{\tau}{T} L (A_s + A_h) \quad (2.24)$$

Um eine allgemeingültige Beziehung zu erhalten, werden das Widerstandsmoment T und der Radius L durch die Kraft $F = T/L$ ersetzt sowie der Einfluss Kugelhalterung A_h vernachlässigt:

$$K'_T = \frac{\tau A_s}{F} \quad (2.25)$$

Die Versuche von Schatzmann haben gezeigt, dass bei einem Material mit Fließgrenze für $Re < 1$ sich für alle Kugeln ein $K'_T \approx 0,28$ ergibt. Für die Umrechnung von Kraft F in die Schubspannung τ ergibt sich somit

$$\tau = \frac{F K'_T}{A_s} = \frac{0,28 F}{A_s} = \frac{0,28 F}{4\pi r^2} \quad (2.26)$$

Die beschriebenen Ergebnisse von Schatzmann entsprechen sehr gut den Erkenntnissen von Beris et al. [Ber85], welche für Fluide mit Fließgrenze bei laminarer Kugelströmung folgendes Gesetz für die Fließgrenzen-Zahl Y aufstellten:

$$Y = \frac{1}{2} \frac{\tau_y A_s}{F} \quad (2.27)$$

Für eine schleichende Strömung haben Beris et al. die Fließgrenzen-Zahl $Y \approx 0,143$ empirisch ermittelt. Die Fließgrenze errechnet sich somit:

$$\tau_y = \frac{2 F}{A_s} Y = \frac{0,286 F}{4\pi r^2} \quad (2.28)$$

Vergleicht man nun die dimensionslose Konstante K'_T von Schatzmann mit der Fließgrenzen-Zahl Y von Beris et al., so erhält man für schleichende Strömungen den Zusammenhang:

$$K'_T \approx 2Y \quad (2.29)$$

Vergleicht man diese Umrechnung von Schatzmann mit der Fließgrenze von Lowke [Low13] (Formel 2.19), so stellt man fest, dass beide Vorgehensweisen ähnliche Werte liefern, welche wiederum den Erkenntnissen von [Ber85] entsprechen (Tabelle 2-2). Da es sich bei Schatz-

mann und Beris um empirisch ermittelte Werte handelt, sind Schwankungen durchaus zulässig.

Autor	Literatur	Bestimmung der Fließgrenze	Formel	Q_i
Schatzmann	[Sch05]	$\tau = \frac{0,28 F}{4\pi r^2}$	(2.26)	$Q_S = 0,28$
Beris et al.	[Ber85]	$\tau_y = \frac{0,286 F}{4\pi r^2}$	(2.28)	$Q_B = 0,286$
Lowke	[Low13]	$\tau_0 = \frac{0,33 F_r}{4\pi r^2}$	(2.19)	$Q_L = 0,33$

Tabelle 2-2: Zusammenfassung unterschiedlicher Herleitungen der Fließgrenze aus der Widerstandskraft

Von Interesse ist nicht nur die Fließgrenze, sondern die Schubspannung bei jeder beliebigen Scherrate. Da die gemessene Kraft F bereits eine Funktion von der Viskosität und der Scherrate ist, kann zur Umrechnung der Kraft in die Schubspannung die Annahme $\tau = \tau_y = \tau_0$ getroffen werden. Daraus ergibt sich folgende allgemeine Beziehung für unterschiedliche Konstanten Q_i :

$$\tau = \frac{Q_i F}{4\pi r^2} \quad (2.30)$$

Zur Umrechnung der Geschwindigkeit v in die Scherrate $\dot{\gamma}$ wird die bekannte Beziehung

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{2r} \quad (2.31)$$

verwendet.

Durch die angeführten Ansätze konnte die Umwandlung von Messwerte in rheologische Absolut-Werte gezeigt werden. Eine ausführliche Darstellung liefern die entsprechenden Quellen.

2.6.3.5 Kritische Betrachtung des KMS

Bestimmung der Fließgrenze bei konstanter Belastung

Die beschriebene Bestimmung der Fließgrenze bei Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit wird von einigen Autoren kritisch betrachtet. Dabei wird vor allem angemerkt, dass die Geschwindigkeit, mit der die Kugel durch das Material fährt, großen Einfluss auf das Ergebnis der gemessenen Fließgrenze hat [Bar99] [Dzu85] [Koe04]. Sigloch [Sig12] führt an, dass es bei hohen Geschwindigkeiten zu erhöhter Reibung und zunehmender Partikelkollision kom-

men kann, was in einer zusätzlichen Widerstandskraft resultiert. Zudem können während der Messung auftretende Trägheitseffekte [Dzu85] und turbulente Strömungen [Mez10] die Fließgrenze beeinflussen. Schatzmann [Sch05] berichtet zusätzlich von einem wellenförmigen Aufstauen des Materials vor der Kugel und der Halterung bei hohen Geschwindigkeiten. Dieses Phänomen ist vor allem bei steiferen Proben zu beobachten und führt zu einem höheren Widerstand. Neben den sehr hohen Geschwindigkeiten besteht durch die heutigen hochentwickelten Messsysteme die Möglichkeit, Versuche mit sehr kleinen Geschwindigkeiten und somit im Bereich niedrigerer Scherraten durchzuführen. Dadurch kann das gesamte Fließverhalten von mineralisch gebundenen Baustoffen möglichst präzise dargestellt werden. Wenn gleich die Probleme schneller Messgeschwindigkeiten vermieden werden, so entstehen bei extrem niedrigen Geschwindigkeiten neue Probleme. Durch die geringe Scherwirkung kann es vorkommen, dass es zu keinem Strukturbruch kommt. Zeichen hierfür kann das Fehlen einer Statischen Fließgrenze sein. Auch wenn diese Methode häufig kritisiert wird, so findet sie doch mehrfach und erfolgreich Anwendung bei unterschiedlichen Messsystemen und Rheometern [Low09] [Est12] [Koe04] [Koe08] [Ova12].

Einregelzeit und Beschleunigung

Blask [Bla02] hat bei Mörteln festgestellt, dass das Kugel-Messsystem besonders bei geringen Scherraten eine gewisse Einregelzeit braucht, um einen stabilen Messwert zu liefern. Dabei wurde ein „Abknicken nach unten“ festgestellt. Da mit zunehmender Scherrate die Einregelzeit abnimmt, schließt Blask darauf, dass der Beginn des stabilen Strömungsfeldes hauptsächlich vom zurückgelegten Weg abhängt. Folglich ist bei niedrigen Scherraten mit einer längeren Einregelzeit zu rechnen. Ein anderes Phänomen hat dagegen Schatzmann [Sch09] bei der Messung des Widerstandes bei vorgegebener Geschwindigkeit während einer Umdrehung beobachtet. Um eine definierte Geschwindigkeit zu erreichen, muss die Kugel erst beschleunigt werden, was ein zusätzliches Moment (Kraft) erfordert. Das zusätzliche Moment zu Beginn ist abhängig von der zu erreichenden maximalen Geschwindigkeit und nur im geringen Ausmaß von den Materialeigenschaften. Im Anschluss an diesen „Peak“ stellt sich ein konstantes Widerstandsmoment ein. Aussagekräftige Daten können erst in diesem konstanten Bereich gemessen werden. Das dabei gemessene Moment ist nur von den rheologischen Eigenschaften des Fluids abhängig und nicht wie das Anfangsmoment von der Beschleunigung. Nach [Lee07] kann es einige Zeit dauern bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist, was dazu führen kann, dass die Anzahl der Messpunkte in einigen Fällen zu gering ist, da innerhalb einer Umdrehung gemessen wird (vor allem bei hohen Scherraten). Versuche im Rahmen dieser Dissertation haben gezeigt, dass diese Probleme nur bei hohen Geschwindigkeiten auftreten (Kapitel 5). Bei geringen Geschwindigkeiten ist der Einfluss der Beschleunigung nahezu vernachlässigbar.

Auch bei Fließkurven spielt die Beschleunigung eine wichtige Rolle. Nach Schatzmann [Sch05] kann keine Fließkurve innerhalb einer Umdrehung erzeugt werden, da die Beschleunigung Einfluss auf das Moment hat. Schatzmann [Sch05] empfiehlt daher mehrere Versuche bei unterschiedlich konstanten Geschwindigkeiten durchzuführen. Die durchgeführten Versuche in dieser Arbeit haben gezeigt, dass es durchaus möglich ist, eine Fließkurve während

einer Umdrehung zu erzeugen (Kapitel 5). Dabei ist darauf zu achten, dass die maximale Geschwindigkeit nicht zu hoch gewählt wird.

Einflüsse von grober Gesteinskörnung und Viskosität

Idealerweise ist das Fließen um die Kugel ein homogenes Fließen eines Ein-Phasen-Systems. Größere Partikel führen aber zu einem komplexen Fließverhalten um die Kugel herum. Wie auch bei Rotationsrheometern kann es zu Schwankungen bei den Messergebnissen und zu temporären Störungen kommen. Die Schwankungen beim Moment und der Geschwindigkeit nehmen mit zunehmender Partikelgröße zu, da ein Blockieren zwischen Kugel, Rand und Partikel sowie einer Verzahnung der einzelnen Partikel auftreten kann. Die Schwankungen sind zudem stark vom Feststoffanteil abhängig.

Bei hohen Geschwindigkeiten kann sich vor der Kugel Material aufstauen, was starke Einflüsse auf die gemessenen Werte hat. Zudem kann es vorkommen, dass größere Partikel auf der Kugel liegen und von der Kugelhalterung gehalten und mittransportiert werden. Die Oberfläche des Messkörpers wird dadurch größer und somit auch das gemessene Widerstandsmoment.

Einfluss der Kugelgröße und der Form des Messkörpers

Die Kugelgröße hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Messungen. Zum einen nimmt mit wachsendem Durchmesser das gemessene Widerstandsmoment zu, zum anderen hat der Durchmesser Auswirkungen auf die Qualität der Werte. Mit zunehmendem Durchmesser wird die Messkurve gleichmäßiger. Dies wird dadurch begründet, dass der Einfluss von Ausreißern, welche durch größere Partikel verursacht werden, mit steigender Kugelgröße abnimmt. Soll das Fluid als gleichmäßiges („homogenes“) Material betrachtet werden, so ist es zudem wichtig eine Kugelgröße zu wählen, die deutlich größer ist als der maximale Partikeldurchmesser ($d > (d_{\max} / 0,125)$) [Sch05].

Neben der Kugel ist es auch denkbar weitere geometrische Formen zu verwenden. Beim Betonrheometer BT2 wird z. B. ein Zylinder eingesetzt. Zudem sind weitere Geometrien, wie z. B. Tragflächenprofile, möglich. Die Kugel hat aber den Vorteil, dass es sich bei ihr um einen optimalen, symmetrischen Körper handelt und sie strömungsmechanisch am einfachsten zu betrachten ist. So können Wirbelablösungen größtenteils vernachlässigt werden. Zudem existieren zahlreiche Publikationen und bereits hergeleitete Formeln zum Thema Kugelumströmung (u. a. Stoke). Diese Eigenschaften ermöglichen auch eine Umrechnung von gemessenen Kräften in rheologische Kenngrößen (Absolut-Werte).

Messung im gescherten oder ungescherten Material

Sollen Messungen mit mehreren Umdrehungen durchgeführt werden, dann bewegt sich die Kugel ab der zweiten Umdrehung im gescherten Material. Die Kugel durchläuft dabei die gleiche Bahn wie bei der Umdrehung zuvor. In steiferen Proben kann die Kugel eine Rinne hinterlassen, die sich nicht mehr bzw. nur langsam schließt. Eine weitere Messung in diesem

Material würde zu anderen Ergebnissen führen. Dies kann auch von Vorteil sein, da dadurch die Erholung (Ruhezeit und Wiederaufbau einer Gefügestruktur) des Materials bewertet werden kann. Daher sollte vor jeder neuen Versuchsdurchführung das Material neu aufgemischt werden, um nicht in der bei der ersten Umdrehung erzeugten Spurrinne zu messen.

Umwandlung der Rohdaten in Absolut-Werte

Wie in Kapitel 2.6.3.4 beschrieben, ist es möglich die gemessenen Werte in physikalisch korrekte Kenngrößen (Absolut-Werte) umzuwandeln. Die verschiedenen Ansätze liefern ähnliche Ergebnisse für die Umwandlung des Widerstandsmoments in die Schubspannung. Dennoch bleiben viele Einflussfaktoren ungeklärt. Vor allem für Nicht-Newton'sche Fluide gibt es zahlreiche Einflüsse, die noch nicht ausreichend erforscht sind. Vor allem das unterschiedliche Fließverhalten macht eine exakte Betrachtung schwierig. Zudem existiert noch keine eindeutige mathematische Definition der Reynolds-Zahl, die das Nicht-Newton'sche Verhalten berücksichtigt [Ebe13]. Auch messgerätspezifische Einflüsse wie Kugeldurchmesser, Kugelhalterung, Abstand zum Behälter, Getriebe usw. können Auswirkungen auf die Ergebnisse haben. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Umwandlungen meist auf empirischen Verfahren basieren, die durchaus mit Schwankungen behaftet sein können.

Da der Umwandlung eine Verdrängungsströmung zu Grunde liegt, können die gewonnenen Werte zudem nicht mit den Absolut-Werten verglichen werden, die unter der Annahme der laminaren Schichtenströmung erzeugt wurden [Mez10].

3 Rheologie von Selbstverdichtenden Betonen

3.1 Grundlagen Selbstverdichtender Betone

3.1.1 Charakteristika

Selbstverdichtender Beton (SVB; engl.: Self Compacting Concrete, SCC) ist ein Beton, der ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie, allein unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt, entlüftet sowie die Bewehrungszwischenräume und die Schalung vollständig ausfüllt. Dabei soll ein Blockieren vor Hindernissen sowie ein Entmischen oder Absetzen einzelner Bestandteile vermieden werden. Aufgrund dieser besonderen Eigenschaften kann SVB auch als Hochleistungsbeton bezeichnet werden [DAfStB SVB-Richtlinie] [Bra04] [Bra01] [Rin08] [Gru00] [Hil05] [Hil06] [Spr07].

Die Verwendung Selbstverdichtender Betone bringt eine Reihe ökologischer, sozialer, technischer und ökonomischer Vorteile mit sich [Bra04] [Bra01] [Rin08] [Gru00] [Hil05] [Hil06] [Spr07] [Kov11]:

- Verdichtungsfreier Einbau, selbst bei hohem Anteil an Stahlbewehrung
- Fehlerfreie Ausführung komplizierter, filigraner und unzugänglicher Bauteile
- Keine Lärmbelästigung und Vibration durch den Wegfall von Betonrüttlern
- Bessere Oberflächenqualität und somit deutlich reduzierte Nacharbeiten
- Zeiteinsparung beim Einbau und somit Senkung der Einbaukosten
- Bessere Verdichtung und damit bessere Dauerhaftigkeit der Betone
- Vermeidung von Ausführungsfehlern (Kiesnester, Hohlräume usw.)
- Anwendung bei dünnen Bauteilen beim Bauen im Bestand

Trotz der genannten Vorteile ist der Marktanteil von SVB eher gering, was an den Problemen liegt, die dieser Baustoff mit sich bringt:

- Erhöhte Stoffkosten durch erhöhten Mehlkornanteil und der Verwendung von Zusatzmitteln
- Hohe Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen in den Ausgangsstoffen, wie z. B. Feuchtegehalt der (feinen) Gesteinskörnung, Sieblinie der feinen Gesteinskörnung, Korngrößenverteilung von Zement und Zusatzstoffen
- Hohe Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen
- Höherer Aufwand bei der Rezepturenentwicklung und der Produktion (Dosiergenauigkeit im Mischwerk)
- Längere Mischzeiten im Betonwerk
- Umfangreichere Maßnahmen zur Qualitätssicherung, sowohl im Werk als auch auf der Baustelle (zusätzlicher Laborant)
- Höhere Anforderungen an die Schalung (Dichtigkeit, Frischbetondruck, absolute Spiegelung der Schalhaut)

Die genannten Probleme führen dazu, dass die Herstellungskosten von SVB gegenüber herkömmlichem Rüttelbeton erheblich größer sind und die Produktion somit für viele Unternehmen unwirtschaftlich wird. Daneben ist auch ein größeres Wissen notwendig, um einen stabilen SVB herstellen zu können.

3.1.2 Geschichtliche Entwicklung

Erste Vorläufer Selbstverdichtender Betone gehen auf die 1930er Jahre zurück, wo in den USA so genannte Gussbetone eingebaut wurden, welche sowohl selbstnivellierend als auch selbstverdichtend waren [Bra01] [Bra04]. Diese Eigenschaften konnten nur mit einem erhöhten Wassergehalt erzielt werden, was jedoch dazu führte, dass die Qualität, wie z. B. die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit, negativ beeinträchtigt wurden [Rin08]. In den 1960er wurden zum Untergießen von Maschinen- und Brückenlagern Vergussmörtel und Vergussbetone entwickelt [Spr07] [DAfStb Vergussbeton und Vergussmörtel]. In den 1980er Jahren kam es in Japan immer wieder zu Mängeln, die auf unsachgemäßes Verdichten zurückgeführt werden konnten. Dadurch wurde der Bedarf größer, einen Beton zu entwickeln, der ohne zu verdichten eingebaut werden kann. Der erste Selbstverdichtende Beton wurde 1988 von Okamura und Ozawa entwickelt [Oka00]. Das Prinzip bestand darin, dass der Mehlkornanteil erhöht und der Anteil an grober Gesteinskörnung vermindert wurde. Die wenigen groben Gesteinskörnungen sollten dabei in der viskosen Mörtelmatrix schwimmen. Um eine hohe Dauerhaftigkeit zu gewährleisten musste der Wassergehalt begrenzt werden. Um trotzdem eine hohe Fließfähigkeit zu erhalten, kamen Fließmittel der ersten Generation zum Einsatz (Lignin-, Melamin- und Naphthalin Sulfonate). Somit konnte ein fließfähiger Beton mit hoher Stabilität erzeugt werden. Teubert [Teu81] [Teu82] verfolgte bereits früher einen ähnlichen Ansatz, welcher von Okamura und Ozawa wieder aufgegriffen wurde. Die Entwicklung besonders wirksamer Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern (PCE) in den 1990er Jahren erleichterte die Herstellung von SVB zudem erheblich. Bis 2004 musste in Deutschland für die Verwendung von SVB eine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall eingeholt werden. Seit der Einführung der DAfStb-Richtlinie: „Selbstverdichtender Beton“ (kurz: „SVB-Richtlinie“) darf SVB nun allgemein angewendet werden. Seit 2010 ist die Anwendung von SVB in der DIN EN 206-9 geregelt.

3.1.3 Mischungskonzepte

3.1.3.1 Mischungsansätze

Um die genannten Eigenschaften zu erreichen, sind an die Mischungszusammensetzung von SVB besondere Anforderungen gestellt. Zum einen muss er über ein ausreichend hohes Fließvermögen verfügen, zum anderen muss der SVB ein stabiles Gefüge aufweisen, um ein Entmischen zu verhindern. Dies wird durch eine gegenüber normalem Rüttelbeton veränderte Betonzusammensetzung erreicht. Die Betonrezeptur ist von den gewünschten Frischbetoneigenschaften abhängig und bedarf einer sehr gut aufeinander abgestimmten Mischungszusam-

mensetzung. Je nach Zusammensetzung können Selbstverdichtende Betone in folgende vier Varianten eingeteilt werden [Bra04]: „Mehlkorn-Typ“, „Stabilisierer-Typ“, „Kombinations-Typ“ und „Island-Typ“. Allen Mischungskonzepten ist gemeinsam, dass die Fließfähigkeit durch einen hohen Fließmittelgehalt erreicht wird.

Mehlkorn-Typ

Um bei hoher Fließfähigkeit ein Entmischen zu verhindern, wird beim Mehlkorn-Typ die Gefügestabilität durch eine Erhöhung des Mehlkornanteils erzielt (Abbildung 3-1). Der Mehlkornanteil liegt dabei zwischen 550 und 650 kg/m³ und besteht aus Zement, Gesteinskörnung < 0,125 mm und Zusatzstoffen (z. B. Flugasche oder Kalksteinmehl) [VDZ06]. Durch die größere Menge an Bindemittelleim entsteht eine stabile Suspension, in welcher die grobe Gesteinskörnung schwimmen kann. Um zu gewährleisten, dass die Gesteinskörnung entmischungsfrei schwimmt, bedarf es einer hohen Viskosität des Bindemittelleims [Bra04]. Zur Herstellung des Mehlkorn-Typs wurden verschiedene Vorgehensweisen entwickelt, welche hauptsächlich auf den Ideen von Okamura beruhen [Oka95].

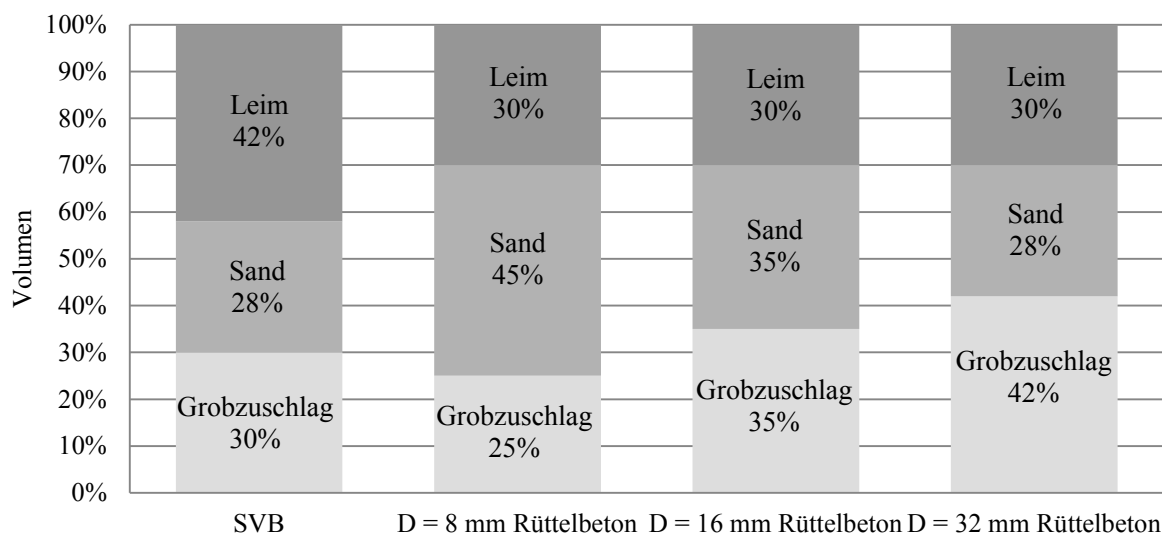


Abbildung 3-1: Vergleich der Zusammensetzung eines konventionellen Rüttelbetons und eines Selbstverdichtenden Betons mit $D_{max}=16$ mm, nach [Hil05]

Stabilisierer-Typ

Beim Stabilisierer-Typ wird die Mischungszusammensetzung des üblichen Rüttelbetons verwendet und die Frischbetoneigenschaften durch Zugabe von Fließmitteln und Stabilisierer eingestellt. Der Mehlkornanteil liegt dabei zwischen 350 und 500 kg/m³ [VDZ06]. Eine Optimierung der Zusammensetzung des Mehlkorns ist analog zum Mehlkorn-Typ anzustreben [Bra04]. Eine schematische Rezeptentwicklung wie beim Mehlkorn-Typ [Oka95] ist beim Stabilisierer-Typ jedoch nicht möglich. Die Zusammensetzung der Mischung muss daher durch Probieren unterschiedlicher Rezepturen erfolgen [Bra04].

Kombinationstyp

Beim Kombinations-Typ handelt es sich um eine Kombination aus Mehlkorn-Typ und Stabilisierer-Typ. Die Grundlage bildet ein SVB des Mehlkorn-Typs, dem zusätzlich stabilisierende Betonzusatzmittel hinzugegeben werden. Der Mehlkornanteil ist abhängig von der Stabilisierergabe und liegt zwischen dem eines Stabilisierer-Typs und dem eines Mehlkorn-Typs. Der Vorteil dieses Typs liegt in der robusten Mischungszusammensetzung im Hinblick auf Schwankungen der Ausgangsstoffe [Bra04].

Islandtyp

Ein weiterer Typ, der aber nur selten erwähnt wird, ist der Island-Typ [Wal03]. Dabei werden der Mehlkorn- und Stabilisierergehalt kaum erhöht. Das Konzept besteht darin, dass die Zusammensetzung der groben und der feinen Bestandteile optimiert wird und somit eine ausreichende Stabilität erreicht wird. Kennzeichen dieses SVB-Typen sind eine geringe Viskosität und eine ausreichend hohe Fließgrenze.

3.1.3.2 *Mischungsentwurf nach Okamura*

Okamura [Oka95] entwickelte ein Konzept, bei dem die grobe Gesteinskörnung in einer Mörtelmatrix schwimmt und in Schwebelage gehalten wird. Dieses Konzept erfordert einen, im Gegensatz zum herkömmlichen Rüttelbeton, erhöhten Leimgehalt und einen verringerten Anteil an grober Gesteinskörnung (Mehlkorntyp). Ein weiterer entscheidender Faktor von Okamuras Konzept ist eine sehr exakte Sieblinienoptimierung und der Einsatz von hochwirksamen Fließmitteln. Okamuras Konzept liegt die Idee der dichtesten Packung der Feststoffpartikel zu Grunde, angefangen vom feinsten Bestandteil des Bindemittels bis hin zum Größtkorn der Gesteinskörnung.

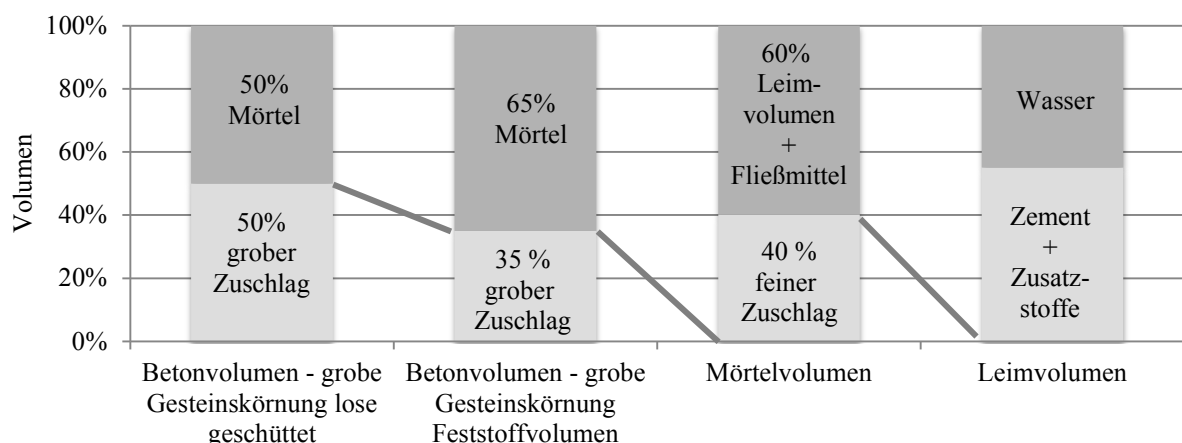


Abbildung 3-2: Mischungsentwurf nach Okamura, nach [Oka95]

Die Rezepturentwicklung erfolgt in mehreren Stufen und basiert zum Teil auf empirisch ermittelten Werten. Im Gegensatz zum herkömmlichen Rüttelbeton wird die Betonrezeptur

durchgehend volumetrisch zusammengesetzt. Im ersten Schritt wird ein Mischungsentwurf erstellt, bei dem der Anteil der groben und feinen Gesteinskörnung festgelegt wird. Abbildung 3-2 liefert Anhaltswerte für die Zusammensetzung, wobei Änderungen, bedingt durch unterschiedliche Materialeigenschaften durchaus zulässig sind. Im zweiten Schritt wird die optimale Zusammensetzung von Zement und Zusatzstoffen sowie der Wasseranspruch des Mehlgemisches ermittelt. Ziel ist es, den Übergang vom Haufwerk zur Suspension auszuweisen [Oka95] [Pun02] [DIN EN 196-3:2009-02].

Im dritten Schritt wird durch die Zugabe des Sandes und des Fließmittels (kann auch im Schritt davor zugegeben werden) ein fließfähiger Mörtel erzeugt. Mittels Ausbreitmaß nach Hägermann (ohne Schlag) und Mörtel-Trichterauslaufzeit wird der Mörtel auf ein Verarbeitungsfenster eingestellt [Oka93] (Abbildung 3-3). Um die Grenzen einzuhalten, kann mit Fließmittel, Wasser und Sand nachjustiert werden.

Sobald die optimalen Fließeigenschaften des Mörtels erreicht sind, wird die grobe Gesteinskörnung hinzugegeben. Um Aussagen über die Fließfähigkeit des Betons zu erhalten, werden das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bestimmt und in einem Verarbeitungsfenster dargestellt (Abbildung 3-3). Die Grenzen dieses Verarbeitungsfenster definieren die selbstverdichtenden Eigenschaften des Betons. Bei einem zu hohem Setzfließmaß und einer niedrigen Trichterauslaufzeit kommt es zur Sedimentation. Wird dagegen ein sehr geringes Setzfließmaß und eine hohe Trichterauslaufzeit gemessen, so kann sich der Beton nicht selbstständig ausnivellieren und verdichten (Stagnation). Wird ein optimales Setzfließmaß erreicht, aber eine zu hohe Trichterauslaufzeit gemessen, kann die Luft nicht entweichen und der Beton somit nicht selbstständig entlüften und verdichten (Lufteinschluss).

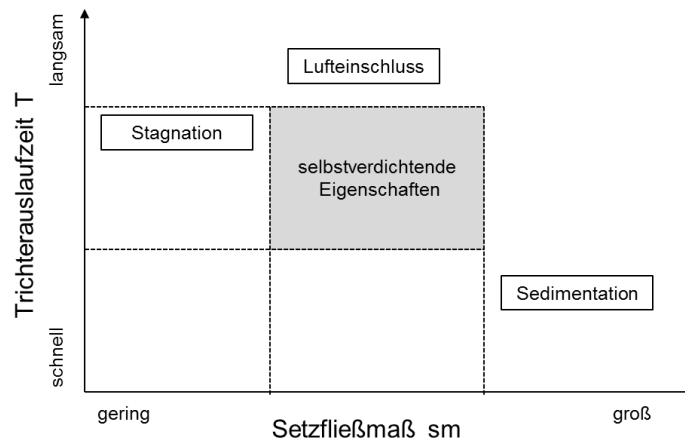


Abbildung 3-3: Verarbeitungsfenster für selbstverdichtende Mörtel und Betone, nach [DAfSTb-Richtlinie SVB]

3.1.4 Herstellung

An die Zusammensetzung, die Eigenschaften und die Gleichförmigkeit der Ausgangsstoffe werden beim SVB hohe Anforderungen gestellt [Rin08]. Bereits kleine Änderungen oder Schwankungen können zu einem veränderten Ergebnis bei den Frischbetonprüfungen führen [Loh04] [Low13] [Bre01] [Lee09] [Kor03]. Besonders empfindlich reagiert SVB auf Änderungen beim Wassergehalt. Bereits 5 bis 10 l/m³ zu viel Wasser können dazu führen, dass der Beton entmischt und die grobe Gesteinskörnung sich absetzt [Loh04] [Hoe06]. Bereits eine Wassergehaltsschwankung von ± 3 l/m³ kann nach [VDZ06] enorme Auswirkungen auf die Qualität des Frischbetons haben. Allein Schwankungen im Feuchtegehalt der feinen Gesteinskörnung können die Robustheit erheblich beeinflussen. Eine Schwankung des Feuchtegehalts der feinen Gesteinskörnung von 2 – 6 M.-% [Kup97] entspricht bei üblichen SVB-Rezepturen einem Wassergehalt von 10 bis 35 l/m³. Mit Feuchtemesssonden können diese Schwankungen gemessen und bei der Einwaage der Ausgangsstoffe berücksichtigt werden. Nach Herstellangaben liegt die Messgenauigkeit solcher Sonden bei 0,3 M.-%. Geht man infolge von unsachgemäßem Einbau, Verschmutzungen usw. von einem realen Wert aus, der deutlich über den Herstellerangaben liegt, so ergibt sich eine mögliche Wassergehaltsschwankung von 2 - 3 l/m³, was bei der Herstellung von SVB bereits zu Schwierigkeiten führen kann.

Aber auch Änderungen in der Sieblinie und der Zusammensetzung der Bindemittel und Gesteinskörnungen können Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften des SVB haben. Zudem bedarf es einer genauen Dosierung des Fließmittels. Dessen Wirkung ist sowohl vom verwendeten Zement, als auch von der Temperatur und dem Zeitpunkt der Zugabe abhängig [Chr09].

Neben der Zusammensetzung sind im Gegensatz zu konventionellem Rüttelbeton auch an den Mischprozess von SVB erhöhte Anforderungen gestellt [Low05]. Der erhöhte Mehlkornanteil erfordert eine besonders gute Desagglomerierung, bei der eingeschlossenes Wasser freigesetzt wird. Da hierfür eine besonders hohe Energie bzw. eine spezielle Mischtechnik notwendig ist, sind nicht alle Mischer für die Produktion von SVB geeignet [No12]. Neben der Mischtechnik haben auch die Mischgeschwindigkeit und die Mischdauer einen entscheidenden Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons. Aufgrund des hohen Mehlkorngehaltes und dem Einsatz von Fließmitteln liegt die Mischdauer von SVB über der Mischzeit von herkömmlichem Rüttelbeton [Kha99] [Hoe06] [Low13].

3.1.5 Frischbetonprüfungen

Um die Frischbetoneigenschaften des SVB beurteilen zu können, sind in der Regel mehrere Prüfverfahren notwendig. Aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit ist die Beurteilung der Konsistenz über die Leistungsaufnahme des Mixers zu ungenau. In Deutschland haben sich zur Prüfung der Frischbetoneigenschaften von SVB das Setzfließmaß [DIN EN 12350-8:2010-12] und die Trichterauslaufzeit [DIN EN 12350-9:2010-12] etabliert. In der Praxis versucht man mit Hilfe dieser beiden Frischbetonprüfungen ein Verarbeitungsfenster zu erstellen, das Aussagen über die anzustrebenden Frischbetoneigenschaften liefert [Kor03]. Um zuverlässige

Angaben über die Qualität des Frischbetons zu erhalten sind somit in der Regel beide Prüfverfahren notwendig. Um die Sedimentationsstabilität bewerten zu können, kommt bei der Entwicklung der SVB-Rezeptur zusätzlich der Sedimentationsversuch [DIN EN 12350-11:2010-12] zur Anwendung. Daneben existieren noch weitere Prüfverfahren, die meist bei der Entwicklung von SVB Rezepturen zur Anwendung kommen, wie z. B. der Blockierringversuch [DIN EN 12350-12:2010-12] oder der L-Kastenversuch [DIN EN 12350-10:2010-12]. Neben den genannten Versuchen gibt es noch weitere Versuchsaufbauten, die aber in Deutschland weniger zum Einsatz kommen. Eine Auflistung weiterer Versuche liefert u. A. [Koe03].

Die erwähnten Versuche eignen sich sehr gut für die schnelle Durchführung im Labor und auf der Baustelle. Sie liefern jedoch keine konkreten Aussagen über die rheologischen Eigenschaften des SVB. Oftmals wird erwähnt, dass die Trichterauslaufzeit mit der Viskosität und das Setzfließmaß mit der Fließgrenze korrelieren. Es existieren sogar empirische Formeln, mit denen es möglich sein soll, aus dem Setzfließmaß die Fließgrenze zu berechnen [Rou12]. In Wirklichkeit fließen in die jeweiligen Frischbetonprüfungen sowohl die Fließgrenze als auch die Viskosität mit ein und es handelt sich somit um ein „verschmiertes Ergebnis“. Zudem sind die Ergebnisse kritisch zu betrachten, da diese stark vom Laboranten und den Versuchsbedingungen beeinflusst werden.

3.2 Rheologische Eigenschaften zementgebundener Baustoffe

3.2.1 Einfluss der frühen Zementhydratation

Damit Zement erhärten kann ist die Zugabe von Wasser notwendig. Bei der Reaktion von Zement und Wasser entstehen chemische Wasserbindungen (Hydratation). Die entstandenen Umwandlungsprodukte werden als Hydratphasen oder Calciumsilicathydrate (CSH-Phasen) bezeichnet [Grü01] [Spr07] [Sta00] [Hol03]. Aufgrund der höheren Energie der Klinkerphasen gegenüber den Hydratphasen kommt es zum Energieausgleich durch Wärmeabgabe (Hydratationswärme). Aus dem nichtverbrauchten Kalkanteil bildet sich Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), das für den Korrosionsschutz eine entscheidende Rolle spielt.

Zur vollständigen Hydratation sind 35 bis 43 M.-% Wasser (bezogen auf den Zement) notwendig. Davon sind für die chemische Reaktion ca. 25 bis 28 M.-% Wasser nötig. Dies entspricht einem w/z-Wert von 0,25 bis 0,28. Daneben können 10 bis 15 M.-% Wasser als Gelwasser vom Zementkorn adsorbiert werden, welches nicht mit dem unhydratisierten Zementteilchen reagiert [Sch07].

Der zeitliche Verlauf der Zementhydratation lässt sich in 5 Stadien einteilen [Sta00]: Im Anfangsstadium (Stadium 1), oder auch Induktionsperiode genannt, kommt es zur ersten Reaktion des Tricalciumaluminats (C_3A) und des Calciumsulfats. Bei dieser kurzen aber heftigen Reaktion bilden sich an der Oberfläche der Zementpartikel dünne Hydratationsprodukte, wobei faserförmige, filzartige Strukturen in den wassergefüllten Raum hineinwachsen. Diese kolloidalen Reaktionsprodukte bezeichnet man auch als Zementgel. Das entstandene Zementgel beansprucht etwa doppelt so viel Raum wie das ursprüngliche Zementkorn. Dieser Vor-

gang läuft nach dem Mischen ab und dauert nur wenige Minuten. Im anschließendem Ruhestadium (Dormante Periode; Stadium 2) kommt die Reaktion des Aluminats mit dem Calciumsulfat zum Stillstand. Die Hydratationsprodukte sind noch zu klein, um feste Verbindungen einzugehen. Die Zementpartikel sind daher noch relativ frei beweglich. Es ist jedoch ein Ansteifen erkennbar. Nach ca. ein bis drei Stunden setzt das Erstarren des Zementleims ein. Auf den Klinkerpartikeln bilden sich die ersten Calciumsilicathydratkristalle (CSH-Phasen). Das Beschleunigungsstadium (Accelerationsperiode; Stadium 3) beginnt nach ca. fünf Stunden und dauert mehrere Stunden. Dabei kommt es zu einer intensiven Hydratation. Um die Zementpartikel bildet sich das immer dicker werdende Zementgel, was zu einer weiteren Verfestigung führt. Die stetig wachsenden Kristalle überbrücken mit fortlaufender Dauer die Zwischenräume der Zementpartikel. Der Zeitpunkt des Zusammenwachsens der Gelschichten wird durch die Dicke der Wasserschicht zwischen den Zementpartikeln beeinflusst. Im Abklingstadium (Decelerationsperiode; Stadium 4) findet ein langsames Abklingen der Reaktion statt. Die Verfestigung nimmt weiter zu und die wassergefüllten Poren werden ausgefüllt. Im Endstadium (Stetige Periode; Stadium 5) geht die Reaktionen langsam dem Ende zu. Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit sind nur die Stadien 1 und 2 von Bedeutung.

3.2.2 Rheologisches Verhalten von Zementleimen

3.2.2.1 Modelle zum Beschreiben des Fließverhaltens

Das rheologische Verhalten von Zementleimen ist ein komplexer Vorgang und wird von mehreren Faktoren beeinflusst [Ban81] [Ban93] [Ban97]. Nach Wasserzugabe läuft eine Reihe von chemischen Reaktionen ab. Zudem wirkt eine Vielzahl an physikalischen Kräften zwischen den einzelnen Partikeln. Dabei ist zwischen anziehenden und abstoßenden Kräften zu unterscheiden, die sich gegenseitig überlagern können (siehe 2.3.2). Die Folge ist die Bildung einer Struktur mit mehr oder weniger festen Bindungen, die von den interpartikulären Kräften abhängig ist [Sta00]. Diese Strukturbildung wird auch als Agglomeration oder Flockenstruktur bezeichnet. Um das Fließverhalten von Zementleimen beschreiben zu können, wurden mehrere Modelle entwickelt. Erste Ansätze lieferten unter anderem Powers, Helmuth und Legrand. Das bekannteste Modell ist aber das nach Keck. Eine Übersicht über die Modelle liefern unter anderem [Wüs05] [Hoe06] [Sta00] [Kec97].

Modellvorstellung nach Powers [Pow68]

Durch die Agglomeration von Zementpartikeln entsteht eine Flockenstruktur, die, abhängig vom Wassergehalt, in zwei unterschiedliche Strukturen eingeteilt werden kann. In einer verdünnten Suspension treten die Agglomerate vereinzelt auf, wohingegen bei einer konzentrierten Suspension die Agglomerate ein durchgehendes Gefüge bilden. Durch die räumliche Struktur der Agglomerate wird ein Absetzen einzelner Partikel oder Flocken verhindert.



Abbildung 3-4: Zementleimmodell nach Powers: Agglomeration von Partikeln in einer verdünnten (links) und einer konzentrierten Suspension (rechts) [Pow68]

Modellvorstellung nach Helmuth [Hel80]

Beim Modell nach Helmuth (Abbildung 3-5) wird von einem konzentrierten Bindemittelleim ausgegangen, der als eine durchgehende Flocke mit ungleichmäßiger Partikelverteilung beschrieben wird. Das Wasser haftet dabei an der Oberfläche der einzelnen Partikel und liegt somit nicht als freies Wasser vor. Helmuth berechnet die Wasserfilmdicke aus dem Verhältnis von Wasservolumen zu spezifischer Oberfläche der Partikel zu ca. $1/10$ der durchschnittlichen Partikelgröße. Der Wasserfilm hat sowohl dispergierende als auch stabilisierende Wirkung auf den Bindemittelleim.

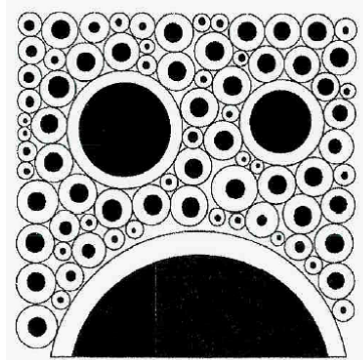


Abbildung 3-5: Modellvorstellung nach Helmuth [Hel80]

Modellvorstellung nach Legrand [Leg80]

Nach Legrand erfolgt die Bildung eines Netzwerkes durch elektrostatische Kräfte. Dabei führen unterschiedliche Oberflächenpotenziale zu unterschiedlichen Kräften, welche sowohl anziehend als auch abstoßend sein können. Die Van-der-Waals Kräfte wirken punktuell an den vorderen Ecken und Kanten und führen zu einer Berührung der Partikel. Zudem wirken Abstoßungskräfte auf die angrenzenden Flächen, die versuchen den Kontaktwinkel zu vergrößern. Dabei wirkt die Kontaktfläche wie eine gelenkige Bindung, die mehr oder weniger beweglich ist [Hoe06].

Reversibler Strukturbruch - Modellvorstellung nach Keck [Kec97]

Zementleim besitzt die Eigenschaft, dass er im Ruhezustand zur Bildung einer Agglomeration neigt. Durch die interpartikulären Kräfte kommt es zu einer gegenseitigen Anziehung der Zementpartikel. Dadurch bildet sich ein räumliches Netzwerk, welches auch als Flockenstruktur bezeichnet wird. Durch die gegenseitige Anziehung wird eine Bewegung der einzelnen Partikel behindert, welche somit auch nicht die dichteste Packung einnehmen. Diese räumlichen Netzwerke können neben trockenen Partikeln auch Wasser einschließen. Der Grad der Flockenstruktur wird von mehreren Einflussfaktoren bestimmt. Mit zunehmender Ruhedauer vergrößern sich die interpartikulären Kräfte und führen zu einer höheren Stabilität der Struktur (Abbildung 3-6). Nach 1-2 Stunden setzt schließlich der Hydratationsprozess ein, welcher die Verflockung verstärkt. Zudem spielt die Anzahl der Kontaktpunkte eine wesentliche Rolle, welche durch den Wassergehalt und der Korngrößenverteilung sowie dem Verhältnis von der Größe der Agglomerate zur Anzahl der Partikel bestimmt wird.

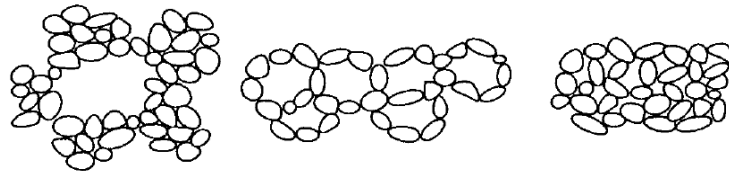


Abbildung 3-6: Mögliche zusammenhängende Partikel-Agglomerat-Verteilung [Kec97]

Wird auf die Flockenstruktur eine Scherbelastung aufgebracht (z. B. Rotationsversuche, Pumpen, Mischen), kommt es zu einer Deformation der Struktur. Bis zu einem gewissen Grad lässt sich die Struktur noch elastisch verformen, wobei schon Teile des Wassers verdrängt werden. Ab einer bestimmten Kraft werden die Strukturen aufgerissen und es entstehen einzelne, ungleichmäßig verteilte Flocken. Dabei wird das eingeschlossene Wasser freigesetzt (Abbildung 3-7). Der Matrix steht nun mehr Wasser zur Verfügung, was zu einer Verflüssigung und somit zu einem niedrigeren Scherwiderstand führt. Mit zunehmender Mischzeit werden die Flocken kleiner und durch das freigesetzte Wasser wird der Abstand der Partikel und Agglomerate vergrößert. Die Zerstörung der Flockenstruktur wird auch als Strukturbruch bezeichnet, darf aber nicht mit dem irreversiblen Strukturbruch nach Tattersall [Tat83] verwechselt werden.



Abbildung 3-7: Mögliche, nicht zusammenhängende Partikel-Agglomerat-Verteilung [Kec97], aus [Wüs05]

Um den Scherwiderstand des Zementleims bei konstanter Scherbelastung über einen bestimmten Zeitraum bewerten zu können, wird der Verlauf in drei Bereiche eingeteilt (Abbildung 3-8). Zu Beginn ist der Scherwiderstand T_A , bedingt durch die Agglomeration infolge der interpartikulären Kräfte, noch relativ groß. Mit zunehmender Scherbelastung werden immer mehr Agglomerate aufgelöst und der Scherwiderstand nimmt stark ab (Bereich I). In diesem Bereich ist die Strukturzerstörung stärker als eine erneute Verflockung. Der Abfall wird mit zunehmender Verflockung jedoch kleiner. Im Bereich II kommt es zu einer Überlagerung von Verflockung und Strukturzerstörung (-bruch), was zu einem Gleichgewichtszustand führt. Die Scherbeanspruchung reicht nicht mehr aus, um weitere Agglomerate zu trennen. Mit zunehmendem Alter des Zementleims nimmt der Einfluss der Hydratation (Bildung von CSH-Phasen) zu. Die Bindungskräfte an den Kontaktstellen der Partikel werden größer und der Scherwiderstand steigt an.

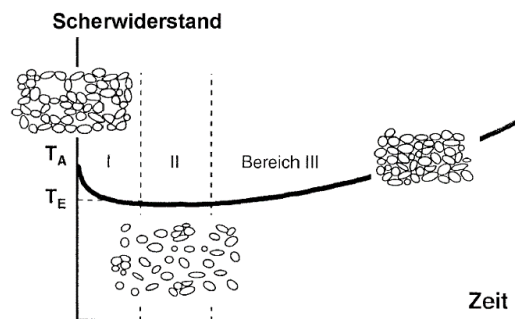


Abbildung 3-8: Schematische Entwicklung des Scherwiderstandes (Drehmoment) infolge konstanter Drehgeschwindigkeit [Kec97], aus [Wüs05]

Der Verlauf des Gesamtwiderstandes ergibt sich aus der Überlagerung der Verläufe von Verflockung, Scherbelastung und Hydratation. Je nach Zeit und Intensität der Scherbelastung dominiert einer der drei Verläufe. Sind die hervorgerufenen Änderungen im Bindemittelleim vollständig reversibel, d. h. folgt auf den Strukturbruch ein Strukturwiederaufbau, bei dem sich ein identischer Scherwiderstand wie vor dem Strukturbruch einstellt, so wird dies auch als Thixotropie bezeichnet [Ban03] [Ban04].

Irreversibler Strukturbruch – Modellvorstellung nach Tattersall [Tat83]

Neben dem Modell nach Keck spielt auch der irreversible Strukturbruch nach Tattersall eine entscheidende Rolle für die Bewertung des Fließverhaltens zementgebundener Baustoffe. Abbildung 3-9 zeigt ein schematisches Modell für einen irreversiblen Strukturbruch von Zementleim. Durch die bereits erwähnten interpartikulären Kräfte kann es zu einer Agglomeration der einzelnen Partikel kommen. Durch die einsetzende Hydratation bildet sich um die einzelnen Partikel und um die Agglomerate eine Schicht aus ersten Reaktionsprodukten. Nach Tattersall [Tat83] hängt die Kraft welche die Partikel zusammenhält von der Dicke der Reaktionsschicht, der sogenannten Membran, ab.

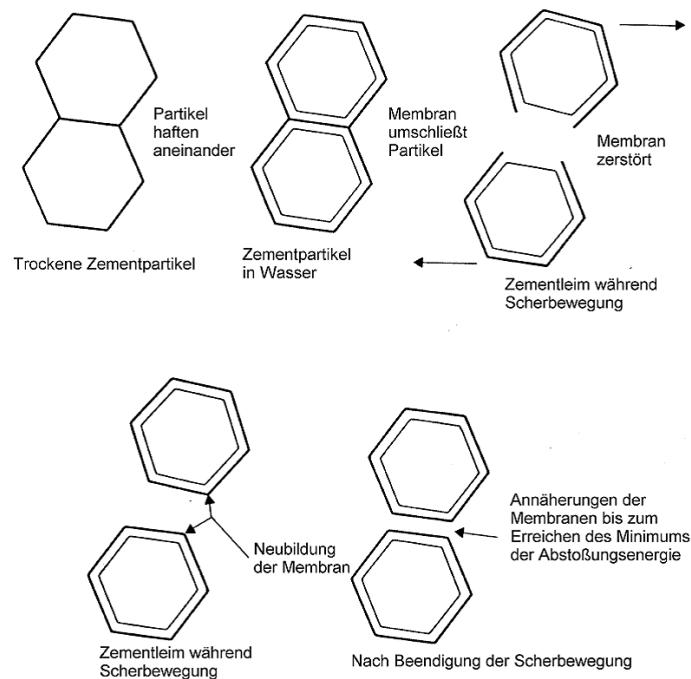


Abbildung 3-9: Schematisches Modell für einen irreversiblen Strukturbruch von Zement in Wasser nach Tattersall [Tat83], aus [Wüs05]

Wird auf den Zementleim eine gewisse Scherkraft aufgebracht, wird diese Membran zerstört und die Partikel voneinander getrennt. Um die einzelnen Partikel bilden sich wieder neue Reaktionsprodukte. Dies hat zur Folge, dass eine erneute Bindung dieser Partikel nicht mehr möglich ist („irreversibler Strukturbruch“). Da aber weiterhin interpartikuläre Kräfte zwischen den einzelnen, von Reaktionsprodukten umhüllten Partikeln wirken, kommt es dennoch zur Agglomeration. Dabei baut sich ein Netzwerk aus Partikeln auf, die bereits von einer Membran umhüllt sind. Die Scherkräfte die nötig sind um einen irreversiblen Strukturbruch zu erzeugen sind relativ groß und werden bei herkömmlichen Mischprozessen, wie sie zur Herstellung von Beton eingesetzt werden, nicht erreicht. Dies hat zu Folge, dass der irreversible Strukturbruch nach Tattersall vernachlässigbar ist und das Modell von Keck (reversibler Strukturbruch) angewandt werden kann [Wüs05]. Bei der Verwendung von Intensiv- und Suspensionsmischern können dagegen durch die großen Scherkräfte die einzelnen Partikel besser aufgeschlossen werden und eine Agglomeration verhindert werden. Dabei kann es durchaus zu einem Abrieb erster Reaktionsprodukte kommen.

Sowohl der reversible als auch irreversible Strukturbruch sind von mehreren Faktoren abhängig [Kec97] [Tat83]. Dazu zählt die Vorgeschichte des Zementleimes, die Agglomerationsrate sowie die verwendete Messgeometrie und das angewandte Messprofil bei Rotationsversuchen. Eigene Versuche haben diese Aussagen bestätigt.

3.2.2.2 *Fließkurve und Modellfunktionen*

Will man Zementleim aus rheologischer Sicht bewerten, so kommen mehrere Modelle in Betracht. Oft wird das Bingham-Modell angewandt [Tat83] [Ban03] [Ban04], obwohl bekannt ist, dass der Zementleim kein lineares Fließverhalten aufweist. Hier wäre die Anwendung von nichtlinearen Modellen, wie z. B. das Herschel-Bulkley-Modell besser angebracht. Der Fließkurve kann entnommen werden, dass Zementleim ein thixotropes Verhalten aufweist. Der Aufwärts- bzw. Belastungsast zeigt dabei ein strukturviskoses Verhalten [Tan00] mit einer Fließgrenze [Spa98]. Unterhalb dieser Fließgrenze können Kräfte aufgenommen werden, ohne dass es zu einer Zerstörung der Struktur kommt. Mit zunehmender Scherbelastung nimmt der Fließwiderstand ab, was auf den Strukturbruch zurückzuführen ist. Der Entlastungs- bzw. Abwärtsast der Fließkurve zeigt laut [Kor05] ein dilatantes Verhalten. Spanka et al [Spa98] beschreiben den Verlauf des Entlastungsast dagegen als geradlinig. Die Bestimmung der Fließgrenze und der Viskosität sollen am Entlastungsast erfolgen, da sich dieser wegen der erhöhten Reproduzierbarkeit besser für Auswertungen eignet [Kor05].

3.2.2.3 *Einflussfaktoren auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleimen*

Wassergehalt

Das Fließverhalten von Zementleim wird in erster Linie vom Wassergehalt beeinflusst. Mit zunehmendem Wassergehalt wächst die Wasserfilmdicke um das Zementkorn. Dadurch ist anfangs der Abstand zwischen den bereits hydratisierten Zementkörnern größer als bei geringer Wasserfilmdicke, was zu einer geringeren Steifigkeit führt. Mit zunehmender Zeit verringert sich aber die Dicke des Wasserfilms und somit der Abstand durch das Zusammenwachsen der Hydratationsprodukte. Dies führt zu einer Erhöhung der Fließgrenze und der Viskosität. Bei einem optimalen Wassergehalt sind die Zementkörner von einer dünnen Wasserschicht umgeben und zueinander noch beweglich. Die Zugabe von Wasser beeinflusst die Fließgrenze nur bis zu einem gewissen Punkt. Wird dieser Punkt überschritten, ändern sich die Fließgrenze und die Viskosität nicht mehr. Das lässt darauf schließen, dass die Zementkörner im Wasser schwimmen und keinen Kontakt mehr zueinander haben. Der optimale Wassergehalt ist dabei von mehreren Faktoren (Mahlfeinheit, Kornform, Oberflächenbeschaffenheit usw.) abhängig. Da das Zementkorn eine dreimal so große Dichte wie Wasser besitzt, neigt es bei einem zu hohen Wassergehalt dazu nach unten zu sinken. Man spricht dann von Sedimentation. Aber auch die Mahlfeinheit spielt bei der Sedimentation eine große Rolle. Bei feiner Mahlung ist die benetzbare Oberfläche größer und das Zementkorn kann mehr Wasser binden. Neben dem Zement wird der Wasserbedarf auch von den anderen Ausgangsstoffen beeinflusst. Vor allem Zusatzstoffe und Sand (Saugfähigkeit, Kornform, Sieblinie usw.) haben einen großen Einfluss [Sta00] [Kor05] [Hoe06].

Zement

Beim Zement spielen die Granulometrie, die Oberfläche sowie die chemische Zusammensetzung eine große Rolle für die rheologischen Eigenschaften [Low10]. Ein Zement mit hoher

spezifischer Oberfläche hat einen höheren Wasseranspruch als ein Zement mit kleiner spezifischer Oberfläche. Bei gleichem Wassergehalt einer Zementleimmischung steht daher weniger Wasser als „Schmiermittel“ zur Verfügung. Die Fließgrenze steigt demzufolge an [Sta00].

Zusatzstoffe

Zusatzstoffe können die rheologischen Eigenschaften von Mörtel und Betonen aufgrund ihrer Form, Größe, Korngrößenverteilung und Porosität beeinflussen [Kor03] [Rin08]. Zusatzstoffe mit hoher Feinheit können die Hohlräume zwischen der feinen Gesteinskörnung und den Zementpartikeln ausfüllen, was den Wasseranspruch verringert und die Fließgrenze und Viskosität herabsetzt. Kugelige Partikel führen zu einer besseren Schmierwirkung im Gegensatz zu rauen, kantigen Zusatzstoffen, die zu höheren Reibungskräften zwischen den Partikeln führen und somit zu einem Anstieg von Fließgrenze und Viskosität beitragen. Porige Zusatzstoffe saugen zudem Wasser auf, das für die Schmierwirkung und somit für die Verarbeitung des Betons nicht mehr zur Verfügung steht [Sta00].

Zusatzmittel

Durch die Zugabe von Fließmitteln und Verflüssigern verringert sich in erster Linie die Fließgrenze gegenüber von Leimen oder Mörteln ohne Zusatzmittel [Sta00]. Fließmittelmoleküle lagern sich an die Zementpartikel und an mehlkornfeine Stoffe an und führen dazu, dass die Oberflächenspannung des Wassers herabgesetzt wird, was zu einer besseren Benetzbarkeit von Zementpartikel und Gesteinskörnung führt. Zudem wirken sterische und elektrostatische Effekte, die zu einer gegenseitigen Abstoßung der Zementpartikel führen. Die sterischen und elektrostatischen Kräfte sind in der Regel höher als die Effekte infolge der Herabsetzung der Oberflächenspannung. Ramachandran [Ram84] nennt zusätzlich die Hemmung der Oberflächenhydratationsreaktion und die Änderung der Morphologie der Hydratationsprodukte als Folgen der Fließmittelzugabe. Die Folge ist eine bessere Desagglomeration und Dispergierung von Zementpartikeln und mehlkornfeinen Stoffen [Spr07], was einen homogenen Zementleim zur Folge hat, dessen geringe innere Reibungskräfte zu einer niedrigen Viskosität führen [Sta00]. Nach Spanka [Spa98] beeinflusst das Fließmittel primär die Fließgrenze und nur geringfügig die Viskosität. Thielen et. al [Thi98] berichten davon, dass die erforderliche Fließmittelmenge im Beton höher ist als im Leim. Sie begründen dies mit der Sorption des Fließmittels durch die feine und grobe Gesteinskörnung. Bei der Verwendung von Zusatzmittel, insbesondere Fließmittel auf PCE-Basis, ist darauf zu achten, dass diese empfindlich auf Temperaturänderungen, den Zeitpunkt der Fließmittelzugabe, Änderungen des Zements, der Zusatzstoffe und dem Feinsand reagieren [Spr07]. Nach einer bestimmten Zeit werden die Fließmittelmoleküle schließlich von ersten Hydratationsprodukten überwuchert. Folglich nimmt die Wirkung des Fließmittels ab und der Zementleim beginnt anzusteifen [Spr07]. Eine ausführliche Beschreibung der Wirkungsweise von Fließmittel liefern u. a. [Chi85][Hau04] [Pla06] [Fla12].

Neben den Fließmitteln kommen zum Teil stabilisierende Zusatzmittel zum Einsatz. Sie sorgen für einen besseren Zusammenhalt des Betons und verhindern so ein Entmischen [Spr07].

Stabilisierer verleihen dem Frischbeton thixotrope Eigenschaften und setzen die innere Reibung hinauf [Grü01]. Jin [Jin02] berichtet, dass Stabilisierer die Viskosität erhöhen und zu einem Fließverhalten nach Herschel-Bulkley führen. Einen umfangreichen Beitrag zu dieser Thematik liefert [Kha12].

Neben den Ausgangsstoffen wird das rheologische Verhalten vom Zementleimen von weiteren Faktoren beeinflusst (Tabelle 3-3). Von Bedeutung sind dabei u. a. die Temperatur, der Zeitpunkt der Zugabe der jeweiligen Ausgangsstoffe [Chi85], die zeitliche Veränderung [Kre85] und der Mischvorgang [Wil99].

3.2.3 Rheologisches Verhalten von Mörtel und Betonen

Durch die Zugabe von feinen und groben Gesteinskörnungen zum Zementleim werden dessen rheologischen Eigenschaften stark verändert. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Bestandteile können Mörtel und Betone als Mehrphasensysteme betrachtet werden.

Der Bindemittelleim, bestehend aus Wasser, Zement, Zusatzstoffen und Feinanteil der Gesteinskörnung ($< 0,125$ mm), hat die Aufgabe den Zuschlag zu umhüllen und die Zwischenräume auszufüllen. Zudem wirkt der Bindemittelleim als Schmiermittel zwischen der Gesteinskörnung. Eine zunehmende Leimmenge führt zu einem leichteren Fließen des Betons, was durch eine niedrigere Fließgrenze gekennzeichnet ist [Thi98] [Wüs05] [Bla02].

Einen wesentlichen Einfluss haben die Gesteinskörnungen. Dabei ist vor allem der Anteil der (groben) Gesteinskörnung von Bedeutung. Die Fließeigenschaften des Betons werden stark vom Kontakt zwischen flüssiger Phase (Bindemittelleim) und der festen Phase (Gesteinskörnung) bestimmt. Zudem spielen die Form und die Korngrößenverteilung eine große Rolle. Feine Sande führen beispielsweise zu einer höheren Fließgrenze als grobe Sande [Sta00], da aufgrund ihrer größeren Oberfläche größere Anziehungskräfte zwischen den Partikeln wirken. Banfill [Ban04] stellte dagegen fest, dass bei zunehmender Partikelgröße der groben Gesteinskörnung eine erhöhte Fließgrenze und Viskosität festgestellt werden kann. Größere Partikel können demnach den entstandenen Spannungen ohne Verformung besser standhalten, was eine Erhöhung der Fließgrenze mit sich bringt. Zudem erhöht sich die Viskosität aufgrund zunehmender interpartikulärer Kontakte und Oberflächenspannungen. Banfill hat zudem festgestellt, dass ein Ersetzen der runden Gesteinskörnungen durch kantige Gesteinskörnungen nur eine Änderung der Viskosität bewirkt, nicht aber der Fließgrenze. Der Einfluss der Gesteinskörnungen auf die rheologischen Eigenschaften von Beton ist größer als bei Mörteln. Blask [Bla02] sieht darin die Hauptursache für die schlechte Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus Mörtelversuchen auf den Beton. Abbildung 3-10 zeigt, wie sich grobe Gesteinskörnungen auf das Geschwindigkeitsprofil beim Zwei-Platten-Modell auswirkt.

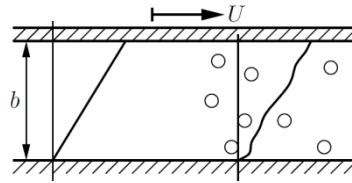


Abbildung 3-10: Vergleich des Geschwindigkeitsprofils einer Newtonschen Flüssigkeit (links) und einer Suspension (rechts) [Ste10]

Nach Kordts [Kor05] kann das Fließverhalten von Mörtel und Beton einfacher beschrieben werden als das von Zementleim. Das rheologische Verhalten von Mörtel und Beton lässt sich demnach mit dem Bingham-Modell beschreiben [Ban94] [Tat91] [Fer03]. Das thixotrope Verhalten von Beton ist weniger ausgeprägt als bei Zementleim. Banfill [Ban03] erklärt dieses Verhalten dadurch, dass mit zunehmender Menge an Gesteinskörnung die innere Scherung während des Mischens erhöht wird und es so zu einem nahezu vollständigen Strukturbruch kommt. Bei Zementleimen erfolgt der Strukturbruch bei hohen Scherbelastungen meist erst im Rheometer. Larrard [Lar98] beschreibt das Verhalten von Beton dagegen mit dem Herschel-Bulkley Modell.

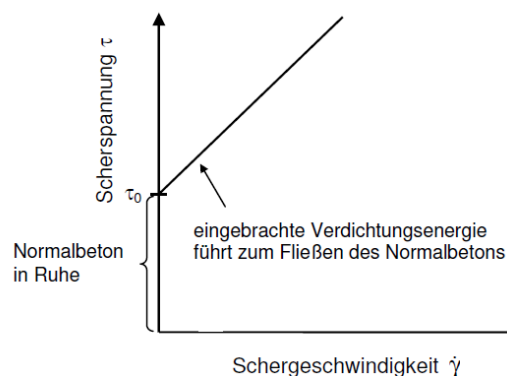


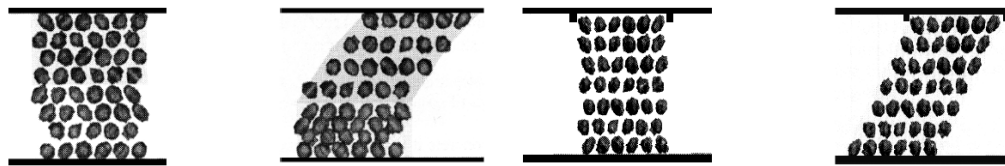
Abbildung 3-11: Fließkurve (Bingham-Modell) eines konventionellen Normalbetons [Hil06]

In Abbildung 3-11 ist die Fließkurve (Bingham-Modell) eines konventionellen Rüttelbetons exemplarisch dargestellt. Unterhalb der Fließgrenze befindet sich der Beton in Ruhe [Hil06]. Erst ab einer entsprechenden Scherbelastung beginnt dieser zu fließen. Bei Rüttelbeton entspricht diese Scherbelastung der aufgebrauchten Verdichtungsenergie. Infolge der aufgebrauchten Energie und dem Überschreiten der Fließgrenze entweicht die Luft aus dem Beton und eingeschlossenes Wasser wird freigesetzt, wodurch der Beton seine Gefügestruktur und seine Form ändert. Man kann in diesem Fall nicht von einem reversiblen Strukturbruch (Thixotropie) wie beim Zementleim sprechen, da durch die Entweichung der Luft das Gefüge vollständig verändert wird. Die Scherbelastung nach dem Verdichten ist folglich nicht identisch mit derjenigen vor dem Verdichten.

3.3 Besonderheiten der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone

Das Fließverhalten von SVB baut auf dem oben beschriebenen Verhalten von Leim, Mörtel und Beton auf [Gol07]. Selbstverdichtender Beton ist dabei eine hochkonzentrierte Suspension [Wüs05], bei der die festen Bestandteile (Gesteinskörnungen) in einer viskosen Flüssigkeit (Mehlkornleim) schwimmen. Die Fließfähigkeit von SVB hängt in großem Maße von der Fließfähigkeit des Leimes ab. Steuermöglichkeiten sind dabei in erster Linie das Wasser – Mehlkornverhältnis und der Einsatz von Fließmitteln. Es muss aber beachtet werden, dass zusätzliches freies Wasser zur Benetzung der Gesteinskörnung zur Verfügung stehen muss [Hoe06]. Zudem wird das Fließverhalten von einer Reihe weiterer Einflussfaktoren bestimmt (Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2).

Mit zunehmender Fließfähigkeit ist es umso wichtiger den Wassergehalt genau einzustellen, da bereits ein leicht erhöhter Wassergehalt zur Sedimentation führen kann [Bil99] [Kor03]. Mit abnehmender Leimmenge wird der Abstand zwischen den Gesteinskörnungen geringer und somit die interpartikulare Reibung größer (Abbildung 3-12). Ist die Leimmenge dagegen groß genug, kann die Gesteinskörnung kollisionsfrei darin schwimmen. Der Bindemittelleim muss eine Viskosität aufweisen die niedrig genug ist, um ein gutes Fließen des Betons zu ermöglichen. Ist die Viskosität dagegen zu gering, können grobe Gesteinskörnungen nicht mittransportiert werden und der Beton neigt zum Entmischen. Bei zu hoher Viskosität fließt der Beton nur langsam und kann zum Blockieren neigen. Zudem kann die Luft schwer entweichen, was dazu führt, dass der Beton nicht vollständig verdichtet wird. Die Viskosität gibt an, wie schnell der Beton fließt [Thi98] [Wüs05] [Bla02]. Selbstverdichtender Beton weist zudem eine hohe Thixotropie auf, d. h. die Viskosität nimmt während des Einbaus infolge der Scherbelastung ab und nimmt nach Ende des Fließens wieder zu [Hoe06].



Normalbeton mit ca. 28 % Matrixanteil

SVB mit ca. 36 % Matrixanteil

Abbildung 3-12: Unterschied Normalbeton und SVB vor und nach der Scherbelastung [Wal03]

Neben der Viskosität ist auch die Fließgrenze von Bedeutung für das Fließverhalten von SVB. Sie gibt an, ab welcher Belastung der Beton zu Fließen beginnt und spielt daher für die Nivellierfähigkeit und die Entmischungsneigung eine entscheidende Rolle. Eine zu hohe Fließgrenze führt dazu, dass der SVB ohne äußere Einwirkung (Verdichtungsenergie) nicht ausreichend fließt und sich somit nicht selbständig ausnivellieren kann. Ist dagegen die Fließgrenze zu niedrig, kann die grobe Gesteinskörnung sedimentieren. Folglich ist eine optimale Balance zwischen zu niedriger und zu hoher Fließgrenze zu finden. Die Fließgrenze ist auch ein wichtiger Kennwert für den Transport, die Beförderung mit Pumpen und das Einfüllen in die Schalung (Schalungsdruck). Die Fließgrenze ist zeitlich veränderlich und hängt vor allem von der

Zusammensetzung der Mischung ab. Den größten Einfluss auf die zeitliche Veränderung haben Wechselwirkungskräfte und die etwas später einsetzende Hydratation.

Einflussfaktor		Eigenschaften	Quelle
Ausgangsstoffe	Zement	Korngrößenverteilung Chemische Zusammensetzung Spezifische Oberfläche Art und Anteil der Hauptbestandteile	[Sta00]
	Zusatzstoffe	Art Form und Größe Korngrößenverteilung Porosität	[Sta00]
	Feine Gesteinskörnung	Kornform Sieblinie Anteil an Mehlkornfeinen Bestandteilen Bestandteile	[Sta00] [Ban04]
	Grobe Gesteinskörnung	Anteil Form und Größtkorn Sieblinie Saugfähigkeit	[Ban04] [Bla02] [Ste10]
	Zusatzmittel	Art Menge Zeit der Zugabe Reaktion mit Zement, Zusatzstoffen und Sand	[Spr07] [Thi98] [Hau04] [Pla06] [Fla12] [Grü01] [Jin02] [Kha12]
Mischungszusammensetzung	Wassergehalt	Abhängig von Mahlfeinheit, Kornform, Oberflächenbeschaffenheit, Porosität, Saugfähigkeit, Sieblinie der Ausgangsstoffe Mischungszusammensetzung	
	Bindemittelleim	Zusammensetzung Zement - Zusatzstoffe Anteil Wasser Anteil Bindemittelleim im Beton Zusammenspiel mit Zusatzmitteln	
	Betonzusammensetzung	SVB-Typ Mischungszusammensetzung Wahl der Ausgangsstoffe Robustheit der Rezeptur	
Herstellung	Lagerung	Temperatur der Ausgangsstoffe Feuchtegehalt der Ausgangsstoffe	
	Mischen	Mischertyp Mischdauer und -intensität Reihenfolge der Zugabe Temperatur	[Cha01] [Low05] [Org06] [Maz08] [Bau10] [Tak11] [Wüs05] [Bra01]
Lieferung und Einbau	Transport	Dauer des Transports Umdrehungsgeschwindigkeit der Mischtrommel Restwasser in der Mischtrommel Temperatur	
	Frischbetonprüfungen	Art und Weise der Durchführung Feuchte der Prüfgeräte Zeitpunkt der Prüfung	
	Einbau	Pumpe, Kübel oder Rutsche Wasser in der Schalung Saugfähigkeit der Schalung Temperatur	

Tabelle 3-1: Einflüsse auf das Fließverhalten von SVB

Einflussfaktor	Fließgrenze	Viskosität
steigende Feinheit des Zements	+	+
steigende Feinheit der Füllstoffe	+	+
Steinkohlenflugasche anstatt Zement	-	-
Mikrosilika anstatt Zement	-	-
steigender Mehlkorngelalt	+	+
steigender Sandgehalt	+	+
steigender Zuschlaggehalt	+	+
steigender w/z-Wert (V _w /V _p -Wert)	-	-
herkömmliche Fließmittel	-	-
Fließmittel auf PCE-Basis	-	O
LP-Mittel	-	-

+ steigt / O bleibt gleich / - sinkt

Tabelle 3-2: Einflüsse auf das Fließverhalten von Frischbeton, nach [Hoe06]

In Kapitel 2.6.2 wurde bereits zwischen Statischer und Dynamischer Fließgrenze differenziert. In diesem Abschnitt soll der Unterschied dieser beiden Fließgrenzen beim Selbstverdichtenden Beton gezeigt werden: Gleich nach dem Mischprozess sind Statische und Dynamische Fließgrenzen noch identisch. Mit zunehmender Dauer steigen beide Werte. Die Größe der Statischen Fließgrenze wird durch den Strukturaufbau und der Thixotropie beeinflusst und steigt stärker an als die Dynamische Fließgrenze. Die Dynamische Fließgrenze hängt stark von der einsetzenden Hydratation und der Wirksamkeit der Zusatzmittel ab. Durch den Mischprozess wird das Material geschert und somit die Struktur zerstört. In der Fließkurve und beim Verlauf der Schubspannung infolge konstanter Belastung wird dies dadurch ersichtlich, dass die Statische Fließgrenze der Dynamischen Fließgrenze entspricht. In der Praxis wird der Aufbau einer Statischen Fließgrenze dadurch verhindert, dass der Beton im Fahrmi-scher in Bewegung bleibt und somit kein Strukturaufbau ermöglicht wird. Beim Einbau in die Schalung oder beim Pumpen ist der Beton ebenfalls in Bewegung und somit nur die Dynamische Fließgrenze maßgebend. Um beim Selbstverdichtenden Beton ein ausreichendes Fließen und selbstständiges Ausnivellieren zu gewährleisten, sollte die Dynamische Fließgrenze gering sein. Sobald der Beton aber in Ruhe kommt, baut sich eine Struktur und somit eine Statische Fließgrenze auf. Nach Einbau ist eine hohe Statische Fließgrenze erwünscht, weil dadurch die Sedimentationsneigung sinkt und auch der Schalungsdruck abnimmt [Bil05]. Die Statische Fließgrenze wird daher häufig auch als Beurteilungskriterium für die Sedimentationsstabilität herangezogen [Koe08]. Bei einem Stillstand der Mischertrommel oder dem Ausfall der Betonpumpe kann eine hohe Statische Fließgrenze dagegen zu erheblichen Problemen führen. Um den Beton wieder in Bewegung zu setzen, sind größere Kräfte notwendig, als ihn in Bewegung zu halten. In manchen Fällen ist dies nicht immer möglich und es kommt zu Störungen im Bauablauf und somit zu hohen Kosten. An der Existenz einer Statischen Fließgrenze wird oft gezweifelt. Vielmehr werden transiente Effekte für das höhere Widerstandsmoment zu Beginn der Messkurve verantwortlich gemacht. Die Frage, ob eine Statische Fließgrenze existiert oder nicht, wird anhand eigener Versuche im Kapitel 5 geklärt.

In der Praxis dient zur Bestimmung der Fließgrenze oft das Setzfließmaß. Ansätze einen direkten Zusammenhang zwischen Setzfließmaß und Fließgrenze herzustellen, z. B. [Rou06], [Saa01], werden aber stets kontrovers diskutiert.

In Tabelle 3-3 ist die Fließgrenze und die Plastische Viskosität von Zementleim, Mörtel und Beton dargestellt [Ban04]. Die niedrigste Fließgrenze und Viskosität weist dabei der Zementleim auf. Dies begründet sich dadurch, dass dieser als Schmiermittel für die anderen Materialien dient und somit niedrigere Werte aufweisen muss, da sich durch die Zugabe von feiner und grober Gesteinskörnung die Werte sukzessive erhöhen. Der Unterschied in der Fließgrenze zwischen Zementleim und SVB ist dagegen marginal. Dies kann durch das kollisionsfreie Schwimmen der groben Gesteinskörnung im fließfähigen Leim erklärt werden. Bei konventionellem Rüttelbeton ist die intergranulare Reibung dagegen größer und somit auch die Fließgrenze höher. Bei der plastischen Viskosität hingegen weisen SVB und konventioneller Beton nach [Ban04] ähnliche Eigenschaften auf.

Material	Zementleim	Mörtel	Fließbeton	SVB	Beton
Fließgrenze [N/m ²]	10-100	80-400	400	50-200	500-2000
Plastische Viskosität [Ns/m ²]	0,01-1	1-3	20	20-100	50-100
Strukturbruch	Bedeutend	leicht	Kein Bruch	Kein Bruch	Kein Bruch

Tabelle 3-3: Rheologisches Verhalten von Zementleim, Mörtel und Beton, nach [Ban04]

In Kapitel 3.2.2 wurde ausführlich darüber berichtet, wie es zum Strukturaufbau und Strukturbruch beim Zementleim kommt und welche Bedeutung dieser hat [Fey09]. Banfill [Ban04] hat weiterführend festgestellt, dass mit zunehmendem Anteil an Gesteinskörnung dieser Strukturbruch abnimmt. Beim Mörtel ist der Strukturbruch noch leicht ersichtlich, bei Betonen konnte demnach kein Strukturbruch mehr festgestellt werden.

3.4 Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone

3.4.1 Rheometrische Prüfverfahren

Zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Betonen existiert eine Vielzahl an Messgeräten und Messsystemen. Bei den meisten Betonrheometern wird der Beton zwischen zwei Flächen geschert. Meist befindet sich dabei eine Fläche in Ruhe und die andere in Bewegung. Zur Anwendung kommen sowohl die Searle- als auch die Couette-Methode (siehe Kapitel 2.6.2.1). Prinzipiell können die Rheometer scherraten- oder schubspannungsgesteuert ausgeführt werden (siehe Kapitel 2.6.2.1). Aber nahezu alle Betonrheometer arbeiten scherraten-gesteuert [Fer12]. Während der Durchführung werden die Rotationsgeschwindigkeit und das Widerstandsmoment des Messkörpers gemessen. Da keines der existierenden Betonrheometer die Anforderungen gemäß Kapitel 2.6.2.2 exakt erfüllt [Fer12], handelt es sich im Grunde bei allen Betonrheometern um Relativ-Messgeräte. Trotz alledem werden die Mess-

werte mit Hilfe von Eichmedien und Vergleichsmessungen in Absolut-Werte umgerechnet. Rotationsrheometer für Beton, die den Absolut-Messsystemen am ehesten entsprechen, sind die Platte/Platte-Messsysteme und die Koaxiale-Zylinder-Messsysteme. Eine Übersicht existierender Betonrheometer liefern u. a. [Fer01] [Koe03] [Hil05] [Wüs05] [Kor05] [Fer12].

Unabhängig davon, ob es sich bei Betonrheometer um Relativ-Messsysteme handelt oder nicht, sind einige Randbedingungen einzuhalten. Es darf während der Prüfung zu keinem Entmischen der Probe kommen und der Beton muss an den Scherflächen haften. Zudem ist der Abstand zwischen den Scherflächen ausreichend groß zu dimensionieren. Dieser sollte das Fünf- bis Zehnfache des maximalen Partikeldurchmessers betragen [Fer12].

Die Bestimmung der Fließkurve eines Selbstverdichtenden Betons erfolgt analog zu 2.6.2.4. Dabei muss zwischen Aufwärtskurve und Abwärtskurve unterschieden werden. Zu Beginn zeigt der SVB ein elastisches Verhalten. Erst ab einer gewissen Scherbeanspruchung kommt es zum Strukturbruch und somit zum Fließen. Diese Abweichung von der linearen Beziehung charakterisiert die Statische Fließgrenze. Der anschließende Bereich zeichnet sich durch sein dilatantes Fließverhalten aus. Aufgrund des fast vollständigen Strukturbruches verläuft die Abwärtskurve unter der Aufwärtskurve und anfangs nahezu geradlinig [Hoe06]. Die Auswertung erfolgt daher häufig mit dem Bingham-Modell. Im Bereich niedriger Scherraten weicht das lineare Verhalten des Bingham-Modells stark vom tatsächlichen Verlauf der Kurve ab. Die Steigung und somit die Viskosität nehmen bei langsamer werdender Scherrate stark zu und die Tatsächliche Fließgrenze liegt unter der Bingham-Fließgrenze. Um die Tatsächliche Fließgrenze darstellen zu können, sind Rheometer mit sehr hoher Genauigkeit erforderlich.

Alternativ kann eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben werden und somit Aussagen über die Statische und Dynamische Fließgrenze gemacht werden (2.6.2.5).

3.4.2 Messsysteme und Geräte für den Einsatz in der Betontechnologie

3.4.2.1 Platte/Platte-Messsystem

Das Platte/Platte-Messsystem besteht aus zwei parallelen, kreisrunden Platten, von denen eine fest und die andere beweglich ist. Das Drehmoment wird meist an der rotierenden Platte gemessen. Bei Ölen und Polymeren beträgt der Plattenabstand nicht mehr als 1 mm. Bei grobdispersen Suspensionen, wie z. B. Beton, ist ein größerer Messspalt zu wählen. Diese Höhe erfordert im Gegensatz zur Messung von Polymeren eine seitlich Begrenzung. Die Lösung bietet ein Behälter, in dem sich die beiden Platten und das Material befinden. Nachteilig ist dabei die Wandreibung, welche die Messung beeinflusst. Zudem ist zu beachten, dass im Spalt keine konstante Scherrate herrscht. Diese ist abhängig vom Abstand r zur Plattenmitte und steigt somit von der Mitte zum Rand linear an. Die Vorteile dieses Systems liegen zum einen in der Anpassung des Messspaltes an die großen Partikeldurchmesser von Selbstverdichtenden Betonen und zum anderen in der Umwandlung der Messdaten in absolute rheologische Werte. Nachteilig sind die inkonstante Scherrate im Messspalt und das Auftreten von

turbulenten Strömungen und Trägheitseffekten am Rand infolge von Zentrifugalkräften. Ein Beispiel für dieses Messsystem ist der BTRHEOM [Lar97] (Abbildung 3-13).

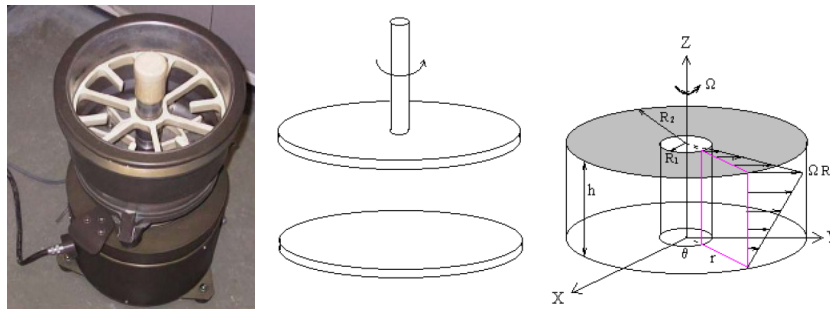


Abbildung 3-13: BTRHEOM [Lar97], aus [Koe09] (links) und schematische Darstellung, aus [Wüs05] (rechts)

3.4.2.2 Koaxiale-Zylinder-Messsysteme

Das koaxiale Zylindersystem besteht aus einem Behälter und einem innenliegenden Zylinder. Dabei kann entweder der Zylinder oder der Behälter rotieren. Das Drehmoment wird in der Regel am Zylinder gemessen. Zwischen Zylinder und Behälter befindet sich ein Spalt, in den das Material gefüllt wird. Da die Spaltgröße mindestens das Fünffache des größten Partikeldurchmessers betragen soll, ergibt sich bei einem Größtkorn von 20 mm eine Mindestspaltbreite von 100 mm. Zusätzlich soll nach [DIN 53019] das Verhältnis vom Radius des äußeren Zylinders zum Radius des inneren Zylinders 1,085 betragen. Die Folge wäre ein Betonrheometer mit einem sehr großen Durchmesser.

Durch die Bewegung der Zylinder wird nicht nur entlang der Spaltfläche eine Schubspannung erzeugt, auch an den Enden des Innenzylinders wird eine Scherströmung mit entsprechenden Beiträgen zum gemessenen Drehmoment erzeugt. Die Vorteile dieses Systems liegen in der hohen Schergeschwindigkeit und der Umwandlung der gemessenen Werte in rheologische Parameter (Absolut-Werte) [Mez10]. Der Nachteil liegt neben den enormen Abmessungen in der Entstehung von Taylerwirbeln (instabiles Fließverhalten), die zu falschen Werten führen können. Taylerwirbel entstehen aufgrund von Zentrifugalkräften und Massenträgheitskräften und treten nur bei der Searle-Methode auf [Mez10]. Ein Betonrheometer, das auf diesem Messprinzip aufbaut ist der ConTec BML Viskosimeter [Wal90] (Abbildung 3-14).



Abbildung 3-14: ConTec BML Viskosimeter Version 3 (links), Version 4 (rechts), [Wal90] aus [Fer01]

3.4.2.3 Relativ-Messsysteme

Unter Relativ-Messsystemen versteht man alle Messsysteme, die nicht den Anforderungen nach DIN 53019-1 entsprechen (Abmessungen, laminare Schichtenströmung usw.) und somit nicht in absolute rheologische Parameter überführt werden können. Zu den Relativ-Messsystemen gehören die Vane-Zelle (ICAR Rheometer [Koe04], Abbildung 3-15), Rheometer mit verschiedenen Rührgeometrien (IBB Rheometer [Bea94], Abbildung 3-16; Two-Point Rheometer – MK-I bis MK-III [Tat83]; BT2 [Teu95]; Convi Visco Probe [Con08]) und das Kugel-Messsystem [Yas94] [Tyr97].

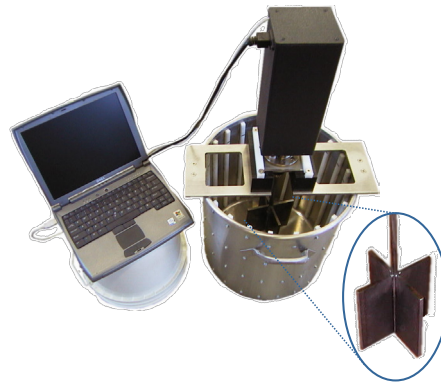


Abbildung 3-15: ICAR Rheometer [Koe09]

Relativ-Messsysteme sind die am meisten eingesetzten Rheometer in der Betontechnologie. Dies liegt an der zum Teil einfachen Bauart und ermöglicht zudem den Einsatz unterschiedlichster Messgeometrien. Obwohl die genannten Relativ-Messsysteme die Randbedingungen für die Umwandlung der gewonnenen Ergebnisse in rheologische Absolut-Werte nicht einhalten, existieren dennoch für viele Geräte Umrechnungen.

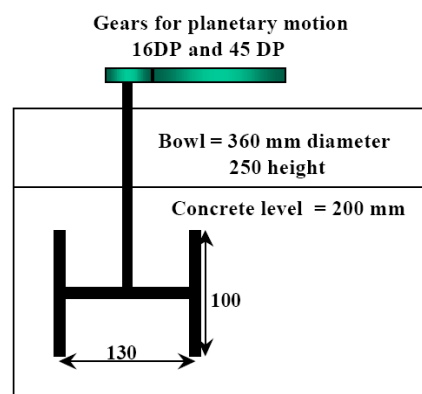


Abbildung 3-16: IBB Rheometer [Bea94]: schematische Darstellung (links), Rührkörper (rechts), aus [Fer01]

3.4.3 Bestimmung der rheologischen Eigenschaften im Mischer

Um die Fließeigenschaften herkömmlicher Rüttelbetone bereits während des Mischvorgangs im Betonwerk kontrollieren zu können, bedient man sich der Leistungsaufnahme des Motors des Betonmischers oder dem Drehmoment des Mischwerkzeuges. Bei Selbstverdichtenden Betonen ist dieses Verfahren aufgrund der hohen Fließfähigkeit nicht möglich. Unterschiede in der Mischung sind kaum zu messen. Ein System das die Konsistenz von SVB im Mischer kontrollieren soll, ist das Messsystem „*Viscoprobe*“ des Unternehmens Convi aus Dänemark [Con09] [Con08] [Nie12]. Das System wird in den Mischer eingebaut und liefert über den gesamten Mischzeitraum Aussagen über die rheologischen Eigenschaften des SVB. Die Möglichkeit der Konsistenzsteuerung gründet darauf, dass der Mischung nur 90 % der erforderlichen Wassermenge zugegeben werden und aufgrund der gewonnen Messergebnisse automatisch entschieden wird, ob und wie viel Wasser der Mischung noch hinzugegeben werden muss.

Die Funktionsweise des Viscoprobe-Systems ist von der Bauweise des Mixers abhängig und kann in zwei Typen unterteilt werden. Beim Planetenmischer wird eine Viscoprobe-Sonde an das rotierende Mischwerkzeug angebracht (Abbildung 3-17, oben rechts). Das Messgerät misst dabei die Geschwindigkeit und die Kraft, die auf die Sonde wirkt. Durch die Planetenbewegung entsteht eine sinusförmige Kraft-Zeit Kurve (Abbildung 3-17, oben links). Beim Tellermischer werden dagegen zwei Sonden mit unterschiedlichem Abstand vom Zentrum eingebaut. Beide Sonden messen die jeweilige Geschwindigkeit und das Widerstandsmoment. Aufgrund der gleichbleibenden Geschwindigkeit des Tellermischers sind die Geschwindigkeiten der inneren und äußeren Sonde jeweils konstant.

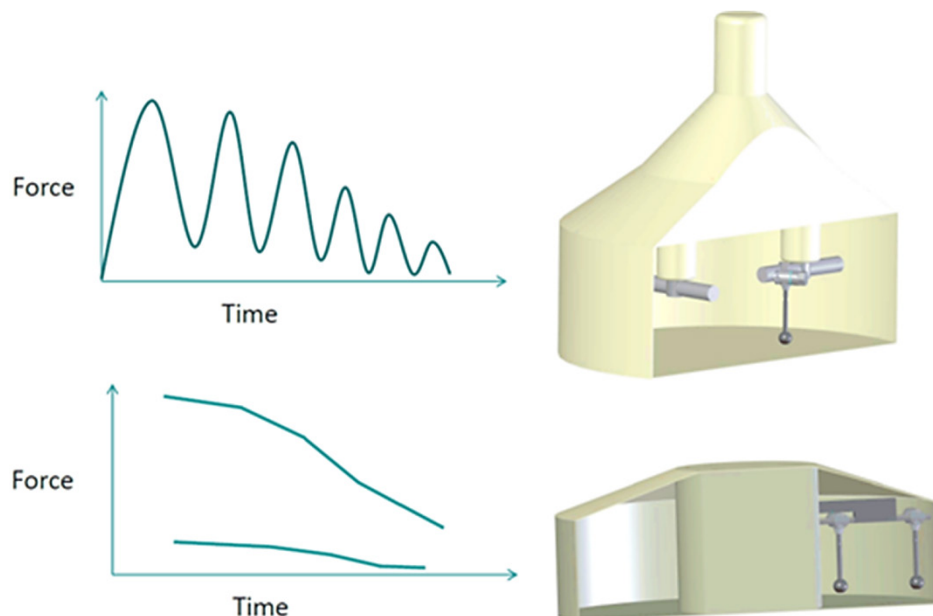


Abbildung 3-17: Anwendung der Viscoprobe im Planetenmischer (oben) und im Tellermischer (unten) und dazugehörige Messwerte (links) [Nie12]

Die Auswertung erfolgt bei beiden Typen mit dem Bingham-Modell. Beim Planetenmischer wird das Maximum und darauffolgende Minimum einer Periode für die Auswertung herange-

zogen. In einem Diagramm werden das Widerstandsmoment und die dazugehörige Geschwindigkeit angetragen (Abbildung 3-18). Beim Tellermischer werden für einen bestimmten Zeitpunkt ebenfalls das Widerstandsmoment und die dazugehörige Geschwindigkeit beider Sonden in einem Diagramm angetragen. Anschließend wird in beiden Fällen mittels Regressionsrechnung eine Bingham-Kurve erzeugt. Da es sich um ein Relativ-Messsystem handelt, werden nur Relativ-Werte erzeugt. Um die Ergebnisse in Absolut-Werten ausdrücken zu können, werden für die verwendete Rezeptur im Labor Vergleichsmessungen mit einem Rheometer durchgeführt.

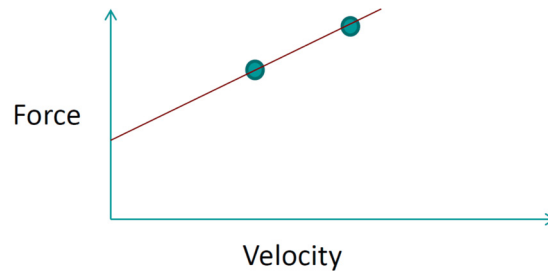


Abbildung 3-18: Auswertung der Viscoprobe mit dem Bingham-Modell [Nie12]

Die Messung kann während des gesamten Mischprozesses erfolgen und dauert nur wenige Sekunden. Für die Konsistenzkontrolle und somit für die Nachdosierung von Wasser wird nur die Viskosität herangezogen; die Fließgrenze dient lediglich als Kontrollmöglichkeit.

Das Messsystem „Viscoprobe“ ist eine einfache und praktikable Möglichkeit um die Konsistenz von SVB zu bewerten. Jedoch sind die Absolut-Werte kritisch zu betrachten. Zum einen ist die Auswertung mit dem Bingham-Modell sehr kritisch zu sehen (siehe Anhang A.7.2), zum anderen basiert die Umrechnung der Relativ-Werte nur auf Vergleichsmessungen. Zudem entsteht durch die Mischbewegung eine komplexe, turbulente Strömung, die eine Bewertung der Frischbetoneigenschaften auf Grundlage der klassischen Rheologie nicht zulässt.

Obwohl das Messsystem „Viscoprobe“ gute Resultate verspricht, hat sich dieses Gerät in der Praxis jedoch noch nicht durchgesetzt. Aus diesem Grund existieren bisher kaum unabhängige Ergebnisse, die die Funktionalität des Gerätes sowie die Möglichkeit der Nachdosierung bestätigen.

3.4.4 Zusammenfassung der Probleme bei der Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mittels Rotationsrheometern

Im Gegensatz zu Polymeren oder homogenen Substanzen ist die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von zementhaltigen Baustoffen schwieriger [Fla74] [Kai74] [Teu82] [Tyr97] [Bla02] [Sch09]. Die Gründe hierfür sind:

- Die Veränderung der Probe infolge der Hydratation des Zementes und den Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen in einer Suspension, was zu einer

Veränderung der Struktur führt. Folglich verändert sich diese fortlaufend und ist über einen bestimmten Zeitraum unbeständig [Ban03] [Ban04]. Der Zeitpunkt der Messung ist daher von Bedeutung für die Informationen der Fließeigenschaften.

- Rotationsrheometer haben den Nachteil, dass sie durch die ständige Scherung die gebildeten Strukturen im Material zerstören, was zu einer Veränderung der rheologischen Eigenschaften führt [Tat55]. Zudem wird vermutet, dass es zum Abrieb erster Hydratationsprodukte kommt und somit der chemische Prozess beeinflusst werden kann [Kec97]. Folglich wird das Fließverhalten sowie das Ansteifen und Erstarren erheblich beeinträchtigt. In manchen Fällen kann der ständige Scherprozess sogar bis zum Entmischen der Probe (vor allem beim Beton) führen. Befürworter von Rotationsrheometern argumentieren damit, dass der Beton auch während des Verarbeitens einer ständigen Belastung ausgesetzt ist. Durch das Entleeren, Pumpen oder Verdichten wird der Beton durch Scherprozesse beansprucht [Bla02]. Diese Vorgänge sind mit der Belastung durch Rotationsrheometer vergleichbar und sprechen daher für die Anwendung solcher Rheometer.
- Eine weitere Herausforderung ist, dass es sich beim Leim, Mörtel und Beton nicht um ein homogenes Material, sondern um eine Suspension handelt. Je größer die Partikel werden, desto schwieriger wird die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften dieser Suspension. Bei Zementleimen ist die Durchführung rheologischer Versuche noch relativ gut möglich. Zudem können in diesem Fall Absolut-Messsysteme angewandt werden. Bei homogenen Materialien läuft die Scherung in die Regel gleichmäßig ab, was bei inhomogenen Materialien nicht immer der Fall ist. Durch die grobe Gesteinskörnung im Beton wird ein komplexes Fließverhalten erzeugt, welches stark von der laminaren Schichtenströmung abweichen kann. Die Feststoffe können sich dabei mit unterschiedlicher Geschwindigkeit untereinander und gegenüber der Flüssigkeit bewegen. Die Körner können untereinander kollidieren und somit ihre Bewegungsrichtung verändern, welche von der Bewegungsrichtung der Flüssigkeit abweichen kann. Mit zunehmender Korngröße wird dieser Effekt verstärkt. Neben dem Größtkorn spielen dabei auch die Sieblinie und die Kornform eine entscheidende Rolle. So kommt es bei kantigem, splittrigem Korn eher zu einem Blockieren als bei rundem, gedrunge-nem Material. Aufgrund der Inhomogenität von Beton und der dadurch ungenauen rheologischen Messungen empfiehlt [Spa98], die Rheologie des Leims zu bestimmen und das Zusammenwirken mit den Gesteinskörnungen zu betrachten.
- Durch die Größe der groben Gesteinskörnung wird zudem die Geometrie der Messsysteme beeinflusst. Zylinder, Platte oder Kegel-Platte Messsysteme sind ungeeignet, da der Kraftschluss in der Probe nicht repräsentativ und die Spaltbreite nicht ausreichend für Grobzuschläge ist [Tyr97]. Nach [DIN 53019-1] und [ISO 3219] wäre ein Abstand zwischen Behälterwand und Messgeometrie notwendig, der dem Fünf- bis Zehnfachen des maximalen Partikeldurchmessers entsprechen würde. Dies würde zu einer enormen Größe des Systems und der erforderlichen Materialmenge führen. Aufgrund des

großen Spaltes können zudem keine stationären Fließverhältnisse gewährleistet werden, was dazu führt, dass das Plattenmodell nicht mehr anwendbar ist.

- Ein oft beobachtetes Phänomen ist das Auftreten eines Gleitfilms an der Grenzfläche zwischen Probe und Oberfläche des Gerätes [Sch09] [Bla02]. Meist tritt dies bei koaxialen Zylindergeometrien auf, ist aber auch bei anderen Geometrien von Rotationsrheometern zu beobachten. Durch den entstandenen Gleitfilm wird meist eine zu niedrige und somit falsche Viskosität gemessen.

Die genannten Probleme führen dazu, dass die Ermittlung von absoluten rheologischen Kennwerten (Absolut-Werte) nicht genau genug möglich ist. Oft wird versucht, die relativen Messsysteme mit Eichmedien zu kalibrieren um die gemessenen Werte in Absolut-Werte umrechnen zu können. Dies ist aber nur für Newtonsche Flüssigkeiten möglich und nicht für zementhaltige Suspensionen mit ausgeprägter Fließgrenze [Gre04]. Aus diesem Grund strebt das ACI Committee 238 die Entwicklung eines Referenzmaterials an, das den rheologischen Eigenschaften von Beton entsprechen soll [Fer12] [Fer13].

In einer ebenfalls vom ACI Committee 238 [Fer12] [Fer13] durchgeführten Studie wurden unterschiedliche Rheometer (BTRHEOM, IBB, Two-Point Test und BML Viskosimeter) miteinander verglichen [Fer12]. Dabei wurde festgestellt, dass die verschiedenen Rheometer nach Umrechnung der Messwerte in Absolut-Werte zu unterschiedlichen Fließgrenzen und Viskositäten führten. Eine einheitliche Tendenz bei unterschiedlichen Mischungen war jedoch erkennbar. Eine Korrelation zwischen je zwei unterschiedlichen Rheometern konnte nicht festgestellt werden, was einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Rheometern nahezu unmöglich macht.

Feyes [Fey13] hat zusätzlich das ICAR-Rheometer und das ConTec5 BML-Viskosimeter gegenübergestellt. Feyes hat festgestellt, dass beide Rheometer unterschiedliche Werte liefern, obwohl bei beiden die Messwerte in Absolut-Werte umgerechnet werden können und somit vergleichbar sein sollten. Die errechnete Fließgrenze war beim ICAR-Rheometer um 10 bis 20 Pa höher und die errechnete Viskosität um die Hälfte niedriger.

Für den Anwender stellt sich die Frage, ob es überhaupt notwendig ist, die gemessenen Werte in absolute rheologische Kenngrößen umzurechnen. Die Baustoffindustrie sucht nach einem Gerät, das Aussagen über die Qualität des Betons liefert und benötigt dazu keine Absolut-Werte. Um die Frischbetoneigenschaften vergleichen zu können, reichen allein die gemessenen Rohdaten. Dabei ist aber darauf zu achten, dass die Versuchsabläufe immer identisch durchgeführt werden (Geschwindigkeit, Messgeometrie, Zeitpunkt). Zudem haben die Versuche von Ferraris und Feyes [Fer12] [Fey13] gezeigt, dass ein Vergleich unterschiedlicher Betonrheometer mit absoluten Einheiten ohnehin schwierig ist.

4 Entwicklung eines Betonrheometers auf dem Prinzip des Kugel-Messsystems

4.1 Zielsetzung

Wie in Kapitel 3.4.4 beschrieben, erfüllen die wenigsten Betonrheometer die Ansprüche um das Fließverhalten Selbstverdichtender Betone angemessen zu beschreiben. Vor allem die Einhaltung der stationären Fließbedingungen und die Veränderung der Probe infolge langer und hoher Scherbelastung stellen oftmals ein Problem dar.

Aufgrund der besonderen Eigenschaften zementhaltiger Baustoffe sind grundsätzlich besondere Anforderungen an die Bestimmung der rheologischen Parameter zu stellen: Um eine Veränderung des SVB infolge Strukturaufbaus ausschließen zu können, soll die Datenerfassung innerhalb einer kurzen Messdauer erfolgen. Dabei soll nur eine geringe Belastung in Form einer schwachen Bewegung aufgebracht werden, um die rheologischen Eigenschaften des SVB nicht zu verändern sowie den in der Praxis auftretenden Belastungen zu entsprechen. Zudem soll jegliche zeitliche Veränderung im Material aufgenommen werden. Es soll die Möglichkeit bestehen im frischen, ungescherten Material zu messen. Das Ziel ist es, unter Einhaltung der genannten Anforderungen die wichtigsten rheologischen Kennwerte wie Viskosität, Fließgrenze und thixotropes Verhalten zu bestimmen.

Um dieses Ziel zu erreichen wurde die exzentrisch rotierende Kugel in Betracht gezogen (siehe Kapitel 2.6.3). Yasuo et al. [Yas94] veröffentlichten dazu erstmals Ergebnisse. Später entwickelten Müller und Tyrach [Tyr00] [Tyr97] das sogenannte Kugelmesssystem (KMS) weiter, um damit die rheologischen Eigenschaften fließfähiger Baustoffe, Dispersionen und Suspensionen bestimmen zu können. Bisher wurde das KMS nur für Leime und Mörtel eingesetzt. Ziel dieser Arbeit ist die Adaption dieses Systems für Selbstverdichtende Betone.

4.2 Anwendung des Kugel-Messsystems beim Selbstverdichtenden Beton

4.2.1 Grundprinzip

Bevor das Kugelmesssystem beim SVB eingesetzt werden konnte, wurden Versuche an selbstverdichtenden Mörteln durchgeführt (siehe Anhang A3). Bei diesen Versuchen wurde eruiert, ob es möglich ist, die rheologischen Eigenschaften selbstverdichtender Mörtel zu messen, welche Möglichkeiten des Messablaufes es gibt, wie genau die Ergebnisse sind und welche Faktoren die Messergebnisse beeinflussen. Nachdem das Kugelmesssystem bei den Mörtelversuchen zuverlässige Ergebnisse geliefert hatte, wurde das KMS für die Anwendung bei Selbstverdichtenden Betonen angepasst.

Das Grundprinzip entspricht dabei dem des Mörtels. Eine Kugel, befestigt an einer dünnen Halterung, bewegt sich innerhalb einer Umdrehung mit einer definierten Geschwindigkeit durch den Selbstverdichtenden Beton. Aufgrund der Bewegung durch das Material, wirkt auf die Kugel eine Kraft. Diese Kraft wird dabei oberhalb der Kugel als Widerstandsmoment auf-

genommen. Im Anschluss werden Geschwindigkeit und Widerstandsmoment in Beziehung zueinander gesetzt. Um einen Vergleich mit anderen Betonrheometern zu ermöglichen, werden die Messwerte zudem in Absolut-Werte umgerechnet. Während dieser einen Umdrehung werden alle wichtigen rheologischen Parameter ermittelt, um zuverlässige Aussagen über die Eigenschaften des SVB zu ermöglichen.

Da die Messung nach einer Umdrehung abgeschlossen ist, wird der Beton nur einmal geschert. Würde man weitere Umdrehungen durchführen, so würde ab der zweiten Umdrehung im vorgescherten Bereich gemessen werden. Bei steiferem Beton würde in diesem Fall hinter der Kugel eine Rinne entstehen, was eine reproduzierbare Messung unmöglich macht.

Die Geschwindigkeit, mit der die Kugel durch den SVB fährt, ist von großer Bedeutung. Zum einen soll eine Geschwindigkeit gewählt werden, mit der genaue und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können, zum anderen soll die Messgeschwindigkeit der Fließgeschwindigkeit des Betons in der Praxis entsprechen (Tabelle 4-1).

Phänomen	Scherratenbereich
Sedimentation größerer Partikel	$10^{-4} \dots 10^{-1} \text{ s}^{-1}$
Verlaufen der Schwerkraft (Selbstnivellierung)	$10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ s}^{-1}$
Abtropfen durch Schwerkraft	$10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ s}^{-1}$
Rohrströmungen	$10^0 \dots 10^3 \text{ s}^{-1}$
Mischen, Rühren	$10^1 \dots 10^3 \text{ s}^{-1}$

Tabelle 4-1: Schergeschwindigkeiten verschiedener, für die Verarbeitung von Baustoffen relevanter Vorgänge, nach [Bla02]

4.2.2 Konstruktion

Das entwickelte Betonrheometer (Abbildung 4-1) besteht aus einem Behälter für ein Betonvolumen von 40 l, einem PC für die Steuerung und dem eigentlichen Rheometer. Der entwickelte Prototyp trägt die Bezeichnung „RheoCT“.

Als Behälter dient für den Prototyp eine runde Mörtelwanne mit einem Durchmesser von 500 mm und einer Höhe von 330 mm. Das eigentliche Rheometer (Abbildung 4-2) besteht aus mehreren Komponenten. Auf einer Holzplatte sitzt ein Steuerkasten der mit dem PC verbunden ist. In diesem Steuerkasten werden die Signale des PCs verarbeitet und an den Antrieb weitergeleitet. Dieser Antrieb sitzt ebenfalls auf der Holzplatte und entspricht demjenigen des existierenden Betonrheometers ViskomatXL. An der Unterseite des Antriebes schließt ein Stahlgestänge in der Form eines Hebelarms an. Die Länge des Hebelarms beträgt 115 mm. Die Höhe ist über eine Schraubklemmung verstellbar. Am unteren Ende des Hebelarms befindet sich ein Messsensor (Dehnmessstreifen) zur Aufnahme des Widerstandsmomentes. Die Signale des Sensors werden an den Steuerkasten geschickt, verarbeitet und an den PC weitergeleitet.

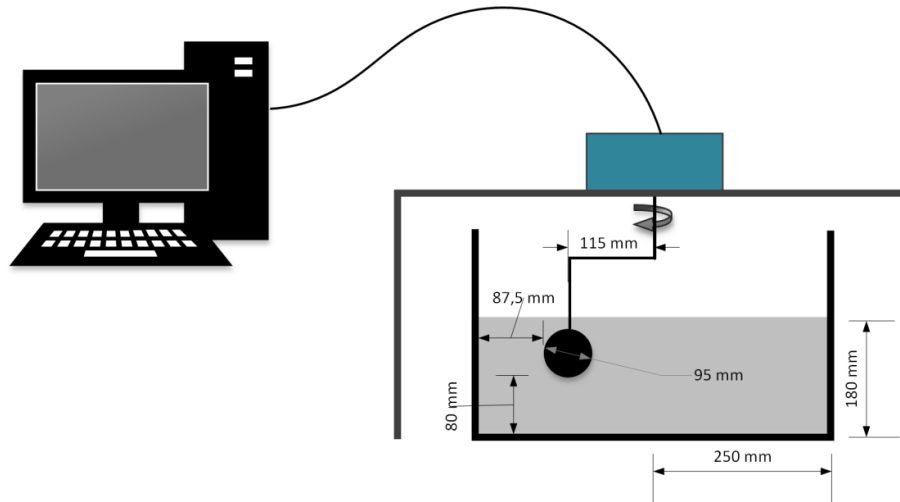


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des RheoCT; Messung von SVB in einem Behälter

Direkt unterhalb des Sensors befindet sich die Kugel. Der Kugeldurchmesser orientiert sich am Größtkorn und soll etwa das Fünf- bis Zehnfache des Größtkorns betragen. Bei einem Größtkorn von 16 mm erfordert dies einen Kugeldurchmesser von 80 bis 160 mm. Zusätzlich besteht die Anforderung, dass zwischen Kugel und Behälterboden sowie zwischen Kugel und Behälterrind ein Abstand von mindestens dem Fünffachen des Größtkorns eingehalten wird. Aus diesen Randbedingungen ergibt sich ein Kugeldurchmesser von 95 mm. Die Eintauchtiefe der Kugel beträgt beim Prototyp lediglich 15 mm. Diese geringe Tiefe ergibt sich aus der begrenzten Menge an Beton (40 l) die pro Mischung möglich ist und der Prämisse, in frischem Beton zu messen. Um eine größere Eintauchtiefe zu erhalten, müsste eine zweite Charge hergestellt werden, die aber zum Zeitpunkt der Prüfung aufgrund der zeitlichen Veränderung der ersten Charge nicht mit dieser übereinstimmen würde. Aufgrund der geringen Tiefe ist es hingegen möglich, das Fließverhalten des Betons um die Kugel genauer zu betrachten. Um den Einfluss der Kugelgröße bewerten zu können, wurden zusätzlich Versuche mit einem Kugeldurchmesser von 115 mm durchgeführt. Ferner wurde die Kugel durch einen Zylinder ($h = 100 \text{ mm}$, $d = 80 \text{ mm}$) ersetzt. Anhand dieser Versuche wurde der Einfluss der Messgeometrie untersucht.



Abbildung 4-2: Betonrheometer RheoCT

Das Rheometer (Antrieb, Steuerkasten, Hebelarm, Kugel) ist auf einem Rahmen montiert und wird nach dem Einfüllen des Betons über den Behälter gestellt. Anschließend wird die Messung gestartet. Die Steuerung und Auswertung erfolgt mit Hilfe eines PCs. Bei der Software handelt es sich um eine modifizierte Version des Baustoffrheometers ViskomatNT.

4.2.3 Messablauf und Auswertung der Ergebnisse

4.2.3.1 Messprofile

Vor der Messung müssen am PC Messprofile definiert werden. Dabei werden die Geschwindigkeit n [min^{-1}], mit der sich die Kugel durch das Material bewegt und die Zeitdauer t [s] festgelegt. Aus der Umdrehungsgeschwindigkeit n kann die Geschwindigkeit v [m/s] und die Scherrate $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] (Formel 4.1) berechnet werden. Die Messprofile sind frei programmierbar und können den jeweiligen Anforderungen (Tabelle 4-1) angepasst werden. In dieser Arbeit werden zwei Messprofile vorgestellt, die sich im Zuge der Versuche als erfolgversprechend herausgestellt haben:

- Rampenprofil mit zu- und abnehmender Schergeschwindigkeit
- Stufenprofil mit konstanter Schergeschwindigkeit

Rampenprofil

Beim ersten Messprofil handelt es sich um ein Rampenprofil (Abbildung 2-10) mit zu- und abnehmender Schergeschwindigkeit. Bei der Wahl der Maximalgeschwindigkeit sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen: Eine zu schnelle Geschwindigkeit würde eine zusätzliche Beschleunigungskraft mit sich bringen, was zu einer Schubspannung führt, die deutlich höher ist als die tatsächliche Schubspannung. Zudem wird mit steigender Maximalgeschwindigkeit die Zeitdauer für eine Umdrehung immer kürzer. Dies führt zu deutlich weniger Messpunkten und somit zu ungenaueren Ergebnissen. Bei einer zu niedrigen Geschwindigkeit wird nur ein kleiner Schergeschwindigkeitsbereich abgedeckt. Folglich sind keine Aussagen über das Fließverhalten von SVB bei hohen Schergeschwindigkeiten möglich. In Tabelle 4-2 sind die untersuchten Rampenprofile dargestellt. Versuche mit einer Maximalgeschwindigkeit von $n = 10 \text{ min}^{-1}$ führten zu keinerlei Resultaten, da das Maximalmoment des Messgerätes überschritten wurde.

Messprofil	Maximalgeschwindigkeit		maximale Scherrate	Profildauer	zurückgelegter Winkel
	n [min^{-1}]	v [m/s]	$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]		
R1	1	0,0118	0,123	120	360
R2	2	0,0235	0,245	60	360
R3	5	0,0588	0,600	24	360

Tabelle 4-2: untersuchte Rampenprofile

Stufenprofil

Beim Stufenprofil wird eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben (Abbildung 2-16). Um transiente Effekte ausschließen zu können, sind hohe Belastungsgeschwindigkeiten zu vermeiden. Wird dagegen eine zu niedrige Geschwindigkeit gewählt, kann das reale Fließverhalten Selbstverdichtender Betone (Tabelle 4-1) nicht richtig abgebildet werden. In Tabelle 4-3 sind drei Stufenprofile mit konstanter Geschwindigkeiten dargestellt. Bei den langsamen Profilen (S1 und S2) wurde keine vollständige Umdrehung zurückgelegt, da der Versuche ansonsten zu lange gedauert hätte.

Messprofil	konstante Geschwindigkeit		Scherrate	Profildauer	zurückgelegter Winkel
	n [min ⁻¹]	v [m/s]	$\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]	t [s]	[°]
S1	0,05	0,00058	0,006	120	35
S2	0,25	0,00280	0,031	120	180
S3	1,0	0,01176	0,123	60	360

Tabelle 4-3: untersuchte Stufenprofile

4.2.3.2 Durchführung der Messung

Nach Eingabe der Messprofile werden die Signale an den RheoCT geschickt und eine Kalibrierung des Sensors durchgeführt. Der RheoCT wird über den Behälter gestellt und die Kugel manuell in den SVB eingetaucht. Anschließend wird die Messung gestartet. Nach Abschluss der Messung können die Messdaten als xls-Daten exportiert und in Microsoft-Excel[®] eingelesen und ausgewertet werden. In Zukunft ist angedacht, die Auswertung direkt mit der Software des RheoCT durchzuführen.

Nach Beendigung der Messung wird der RheoCT aus dem Behälter entfernt und gereinigt. Um eine neue Messung durchführen zu können, muss der Beton nochmals mit einer Schaufel oder Quirl aufgemischt werden, damit nicht zweimal an derselben Stelle gemessen wird.

4.2.3.3 Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte

Bei der Verwendung einer Kugel können die Messwerte in Absolut-Werte umgerechnet werden (siehe Kapitel 2.6.3.4). Diese Umrechnung wurde an die Eigenheiten des RheoCT angepasst. Formeln (4.1) zeigt die Umrechnung der vorgegebenen Schergeschwindigkeit n in die Scherrate $\dot{\gamma}$.

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{2r} = \frac{L 2\pi n}{2r_K} \quad (4.1)$$

mit L = Abstand Rotationsachse zu Kugelmitte; hier $L = 112,5$ mm
 n = Drehzahl

Die Umrechnung des gemessenen Widerstandsmoments M in die Schubspannung τ erfolgt mit Formel (4.2).

$$\tau = \frac{Q_i F}{4\pi r^2} = \frac{0,3 \frac{K_m M}{r_K + l_H}}{4\pi r_K^2} \quad (4.2)$$

mit

Q_i	= 0,3
K_m	= Maschinenkennwert; hier $K_m = 0,86$
M	= gemessenes Widerstandsmoment
r_K	= Kugelradius
l_H	= Distanz Kugel zu Kraftaufnehmer; hier: $l_H = 20$ mm

Da das Widerstandsmoment 20 mm über der Kugel ($l_H = 20$ mm) aufgenommen wird, kann der Einfluss der Kugelhalterung vernachlässigt werden. Beim gemessenen Widerstandsmoment handelt es sich lediglich um einen Gerätekenwert und nicht um das tatsächlichen Moment. Durch eine Kalibrierung wurde ein Faktor $K_m = 0,86$ ermittelt. Multipliziert mit dem Messwert ergibt sich so das tatsächliche Moment.

4.2.3.4 Auswertung der Messergebnisse

Die Darstellung der Messergebnisse des RheoCT kann sowohl graphisch, als auch numerisch erfolgen. Die Auswertung erfolgt anhand der xls-Daten mittels Microsoft-VBA[®]. Bei beiden Auswertungen werden die Daten als erstes grob gefiltert und Ausreißer entfernt. Zur Anwendung kommt dabei ein abgewandeltes Boxplot-Verfahren. Im Gegensatz zum herkömmlichen Boxplot-Verfahren wird mit dem Durchschnittswert gearbeitet und nicht mit dem Median. Dies ist ausreichend, da nur sehr extreme Ausreißer das Ergebnis beeinflussen. Im Anschluss erfolgt die Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte. In Abhängigkeit vom angewandten Messprofil erfolgt eine mathematische Berechnung der rheologischen Parameter. Die Ergebnisse werden anschließend in einem Diagramm und einer Tabelle dargestellt.

Fließkurve

Wird ein Rampenprofil mit zu- und abnehmender Geschwindigkeit vorgegeben, kann die Schubspannung in einer Fließkurve dargestellt (Abbildung 4-3) werden. Die Interpretation der Fließkurve und die Auswertung der Kennwerte sind in Kapitel 2.6.2.4 beschrieben. Im Gegensatz zur Auswertung mit Rotationsrheometern wird hier die Fließkurve innerhalb einer einzigen Umdrehung erzeugt. Dabei wird der SVB nur einmal geschert und nicht, wie bei Rotationsrheometern üblich, mehrmals. Auf- und absteigender Ast der Fließkurve sind daher für hohe Schergeschwindigkeiten nahezu identisch. Folglich ist eine Auswertung der thixotropen Eigenschaften mittels Fließkurve in diesem Fall nicht möglich. Würde sich die Kugel mehrmals durch das Material bewegen, könnte der Einfluss des Strukturbruchs dagegen bewertet werden. Dazu müsste jedoch auf derselben Kreisbahn gemessen werden, was dazu führt, dass man bei steiferen Betonen in einer sich bereits gebildeten Rinne messen würde. Um die thixotropen Eigenschaften mit dem KMS beurteilen zu können, muss daher die

Messung zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden und der Unterschied beider Messkurven betrachtet werden.

Bei der graphischen Auswertung können unterschiedliche Fließkurven verglichen und Kennwerte aus den Kurven abgelesen werden.

Die numerische Auswertung der Statischen Fließgrenze am Aufwärtsast ist schwierig und wird daher nur graphisch ausgewertet. Die Abwärtskurve kann dagegen sowohl graphisch als auch numerisch ausgewertet werden.

Um die Tatsächliche Fließgrenze auszuwerten, wurde festgelegt, dass der fünftletzte Messwert verwendet wird. Dadurch wird verhindert, dass keine zusätzlichen Effekte beim Beenden des Messvorgangs in die Auswertung miteingehen. Die Auswertung der Abwärtskurve mit dem Bingham-Modell (Bingham-Viskosität und Bingham-Fließgrenze) erfolgt mittels einer linearen Trendlinie. Zudem wird das Bestimmtheitsmaß angegeben, welches Aussagen über die Genauigkeit der Ergebnisse zulässt.

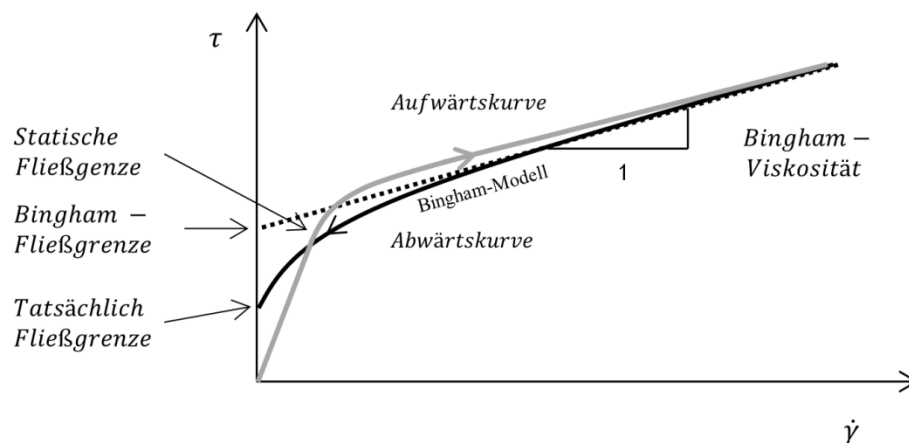


Abbildung 4-3: Fließkurve mit Bingham-Modell

Schubspannung bei konstanter Belastung

Wird ein Stufenprofil mit einer konstanten Schergeschwindigkeit vorgegeben (Abbildung 2-16), erhält man den Verlauf der Schubspannung über die Messdauer oder den zurückgelegten Weg (Abbildung 4-4). Die Interpretation der Messkurve und die Auswertung der Kennwerte sind in Kapitel 2.6.2.5 beschrieben. Wie auch bei der Fließkurve wird hier die Kurve innerhalb einer Umdrehung erzeugt. Aus den Messergebnissen können Aussagen über die Statische und Dynamische Fließgrenze getroffen werden.

Um die Statische Fließgrenze mathematisch zu bestimmen, wurde festgelegt, dass nur die ersten 30 % der Messpunkte betrachtet werden. Innerhalb dieser Messpunkte wird das Maximum ermittelt und als Statische Fließgrenze ausgegeben. Zur Bestimmung der Dynamischen Fließgrenze werden die ersten 30 % und die letzten 10 % aller Messpunkte ausgeschlossen. Aus dem Mittelwert der restlichen Messpunkte (30% bis 90%) wird die Dynamische Fließ-

grenze berechnet. Auf diese Weise wird nur der stationäre Bereich ausgewertet und Fehler infolge der Beschleunigung am Anfang oder eines Abbremsens am Ende der Messung vermieden.

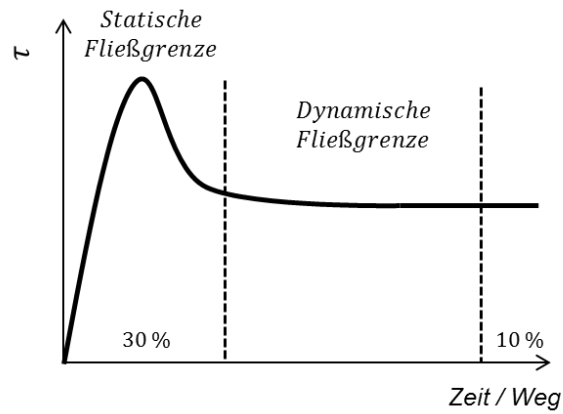


Abbildung 4-4: Auswertung der Schubspannung bei Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit

5 Experimentelle Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem modifiziertem Kugel-Messsystem

5.1 Forschungsdesign

5.1.1 Versuchsprogramm

Mit dem entwickelten Betonrheometer RheoCT wurden Versuche an Selbstverdichtenden Betonen durchgeführt. Dabei wurden zwei Hauptziele festgelegt:

- Evaluation des Kugelmesssystems anhand unterschiedlicher Messabläufe
- Anwendung des KMS bei unterschiedlichen SVB-Rezepturen.

Aus diesen Hauptzielen hat sich das Versuchsprogramm entwickelt, das sich in mehrere Abschnitte gliedert:

- 1 Bewertung der Messergebnisse
 - Fließkurve infolge zu- und abnehmender Schergeschwindigkeit
 - Verlauf der Schubspannung bei einer konstanten Schergeschwindigkeit
 - Reproduzierbarkeit
- 2 Variation Messablauf
 - Messgeschwindigkeit
 - Messzeitpunkt
 - Messgeometrie
 - Kugelgröße
 - Ersetzen der Kugel durch einen Zylinder
- 3 Variationen der Betonrezeptur
 - Wassergehalt
 - Zusatzstoffe
 - Fließmittelgehalt
- 4 Strömungsmechanische Beobachtungen
- 5 Korrelation der Messergebnisse mit anderen Messsystemen

5.1.2 Verwendete Betonrezepturen

Für die Versuche mit dem RheoCT wurden die in Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-3 dokumentierten SVB-Rezeptserien B2 bis B4 (ausführliche Zusammensetzung siehe Anhang A.4) verwendet. Zur Bewertung der Messergebnisse (Versuchsprogramm 1) und bei der Variation des Messablaufes (Versuchsprogramm 2) kam die Rezeptur B2.3 zur Anwendung. In Abschnitt 3 bleiben die Messabläufe konstant und es wird die Betonrezeptur variiert. Im ersten Schritt wurde ausgehend von der Rezeptur B2.3 der Wassergehalt verändert (Betonserie B2).

Anschließend wurde die Flugasche durch Kalksteinmehl (B3) und AHWZ¹ (B4) ersetzt. Bei diesen Rezepturen wurde ebenfalls der Wassergehalt variiert. Zusätzlich wurde bei der Betonserie B3 der Fließmittelgehalt verändert (B3.2b).

Zur Durchführung von Wiederholungsversuchen wurde ein Verzögerer (0,2 M.-% vom Zement; Sika® Verzögerer VZ 2) verwendet. Versuche, bei denen die zeitliche Veränderung im Vordergrund stand, wurden ohne Verzögerer durchgeführt.

Beton-Nr.			B2.1	B2.2	B2.3	B2.4
Zement	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N	kg/m ³	407,2	397,9	388,9	380,4
Zusatzstoff	Flugasche	kg/m ³	212,7	207,8	203,1	198,6
Wasser		kg/m ³	177,7	182,9	187,9	192,7
Sand	0/4 mm	kg/m ³	747,3	747,3	747,3	747,3
Grobzuschlag	4/16 mm	kg/m ³	779,1	779,1	779,1	779,1
Fließmittel	Viscocrete®-1020X	M.-% v. Z.	2,40	2,40	2,40	2,40
Setzfließmaß		mm	630	670	790	830
Trichterauslaufzeit		sec	11,1	7,16	6,3	4,8
Sedimentation			nein	nein	nein	ja

Tabelle 5-1: Betonserie B2

Beton-Nr.			B3.1	B3.2	B3.2b	B3.3	B3.4	B3.5	B3.6
Zement	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N	kg/m ³	417,0	407,2	407,2	402,5	397,9	388,9	372,2
Zusatzstoff	Kalksteinmehl	kg/m ³	250,2	244,3	244,3	241,5	238,7	233,4	223,3
Wasser		kg/m ³	172,3	177,7	177,7	180,4	182,9	187,9	197,2
Sand	0/4 mm	kg/m ³	747,3	747,3	747,3	747,3	747,3	747,3	747,3
Grobzuschlag	4/16 mm	kg/m ³	779,1	779,1	779,1	779,1	779,1	779,1	779,1
Fließmittel	Viscocrete®-1020X	M.-% v. Z.	2,40	2,40	2,60	2,40	2,40	2,40	2,40
Setzfließmaß		mm	623	670	700	710	735	740	810
Trichterauslaufzeit		sec	15,3	14,4	9,4	7,41	7,28	6,0	3,4
Sedimentation			nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja

Tabelle 5-2: Betonserie B3

Beton-Nr.			B4.1	B4.2	B4.3	B4.4
Zement	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N	kg/m ³	412,1	407,2	402,5	397,9
Zusatzstoffe	AHWZ	kg/m ³	242,7	239,8	237,0	234,3
Wasser		kg/m ³	175,0	177,7	180,4	182,9
Sand	0/4 mm	kg/m ³	747,3	747,3	747,3	747,3
Grobzuschlag	4/16 mm	kg/m ³	779,1	779,1	779,1	779,1
Fließmittel	Viscocrete 1020X	M.-% v. Z.	2,40	2,40	2,40	2,40
Setzfließmaß		mm	550	660	720	755
Trichterauslaufzeit		sec	30,7	14,3	14,1	9,7
Sedimentation			nein	nein	nein	nein

Tabelle 5-3: Betonserie B4

¹ AHWZ: Aufbereitet hydraulisch wirksamer Zusatzstoff – ein in Österreich zugelassener, kombiniert hydraulischer Zusatzstoff, der aus Flugasche, Hüttensand und Kalksteinmehl besteht. Er ist mit einem k-Wert von 0,8 auf den w/z-Wert anrechenbar.

5.1.3 Ablauf der Versuche

Der Mischablauf erfolgte nach MA2 (siehe Anhang A.5). Im Anschluss an den Mischprozess wurden das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bestimmt. Nach dem Befüllen des Messbehälters wurde die Messung gestartet und als Messzeitpunkt $t = 0$ festgelegt. Zur Anwendung kamen die Rampen- und Stufenprofile aus Kapitel 4.2.3.1. Sowohl die Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit, als auch die Fließkurve wurden jeweils während einer ganzen Umdrehung ermittelt. Somit war es notwendig, die Mischung vor dem erneuten Messen mit einer Kelle aufzumischen. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu zeigen, wurde die Messung nach abermaligem Aufmischen des Betons mehrmals wiederholt bzw. wurde an einer neuen Mischung durchgeführt. Alternativ wurde das Verhalten infolge einer Ruhezeit von bis zu 20 Minuten bewertet. In Abbildung 5-1 sind die Ermittlung der Fließgrenze und der Viskosität sowie die Bezeichnungen nochmals zusammengefasst.

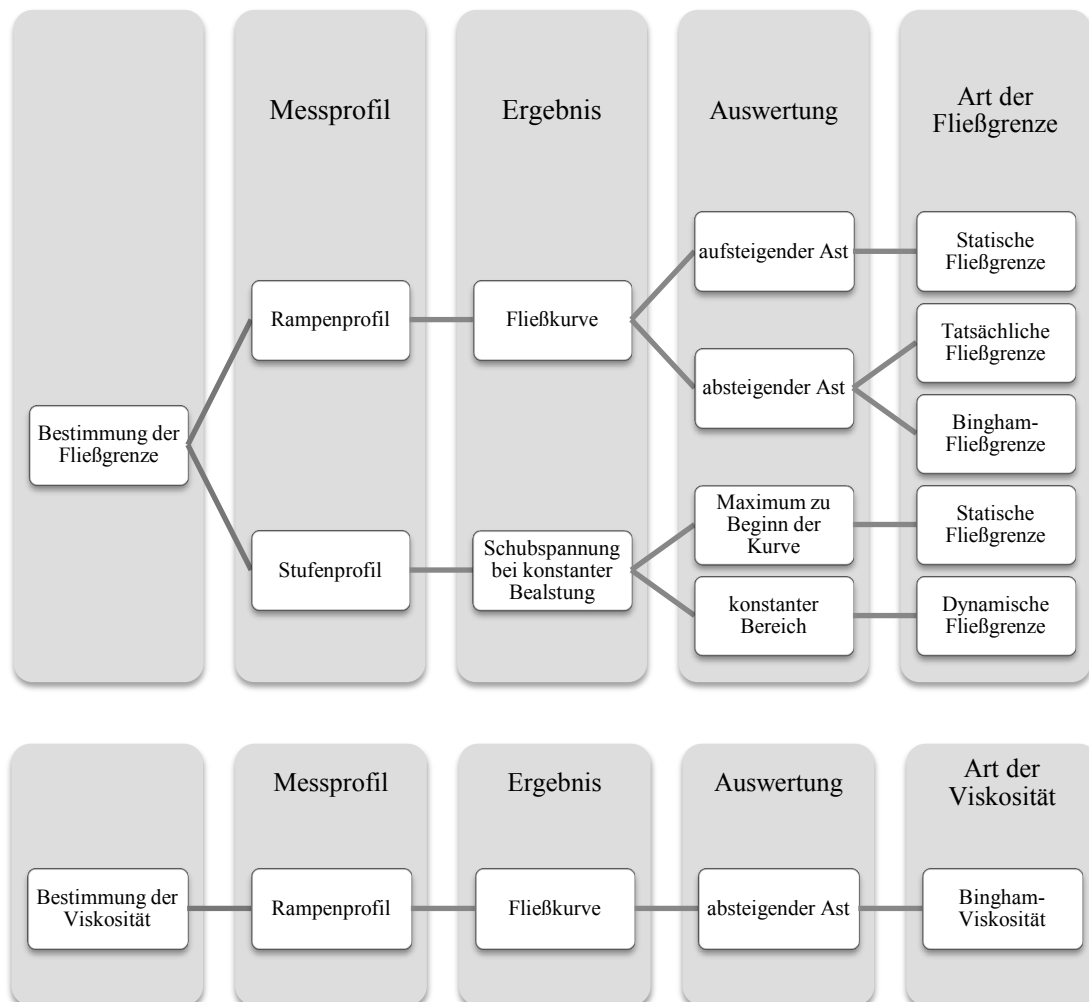


Abbildung 5-1: Ermittlung der Fließgrenze und der Viskosität mit dem KMS

5.2 Durchgeführte Versuche und Interpretation der Ergebnisse

5.2.1 Bewertung der Messergebnisse

5.2.1.1 Graphische und numerische Darstellung der Ergebnisse

Um Aussagen über die Qualität der Messergebnisse machen zu können, müssen die Messdaten erst am PC aufgearbeitet werden. Mittels eines eigens geschriebenen VBA-Programms werden aus den Rohdaten die rheologischen Parameter berechnet und in einem Diagramm dargestellt. Anhand dieser Diagramme kann die Messung beurteilt werden.

Als Beton kam ein SVB vom Mehlkorntyp mit einem Setzfließmaß von 790 mm und einer Trichterauslaufzeit von 6,3 sec zur Anwendung. Es handelt sich dabei um das Rezept B2.3. Beim Messablauf kamen die Messprofile R2 und S2 zum Einsatz.

Fließkurve

Um eine Fließkurve zu erzeugen wurde das Messprofil R2 (Rampenprofil; Tabelle 4-2) vorgegeben. Die Geschwindigkeit wurde innerhalb einer halben Umdrehung auf $n = 2 \text{ min}^{-1}$ beschleunigt und während einer halben Umdrehung wieder auf 0 reduziert. Abbildung 5-2 zeigt die ermittelte Fließkurve.

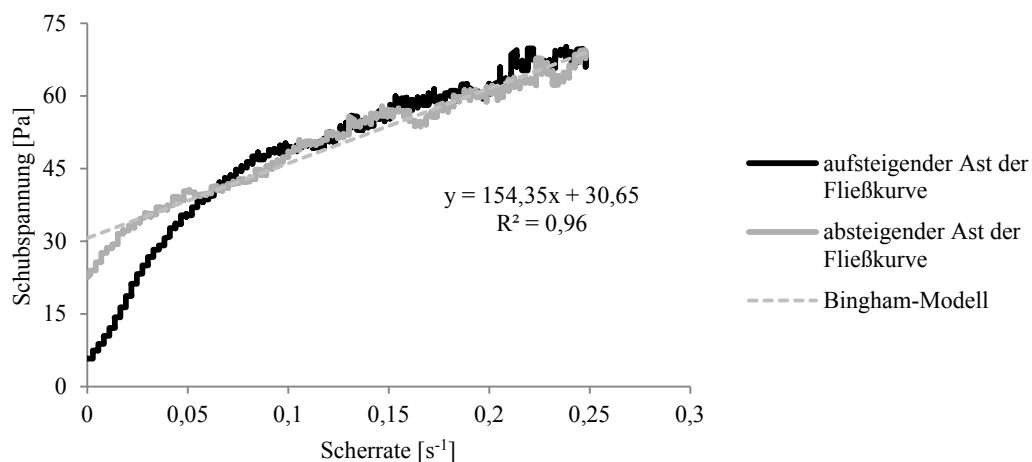


Abbildung 5-2: Fließkurve eines SVB, gemessen mit dem KMS bei einer Umdrehung; Messprofil R2; Rezept B2.3

Betrachtet man den aufsteigenden Ast der Fließkurve, so kann man im Anfangsbereich einen nahezu linearen Anstieg der Fließkurve feststellen. Mit zunehmender Scherrate wird die Kurve und somit die Viskosität immer flacher. Ab ca. $0,1 \text{ s}^{-1}$ ist in diesem Fall der Viskositätsverlauf konstant. Der Übergang erfolgt fließend und kann nicht exakt bestimmt werden. Eine Möglichkeit diesen Übergang auszuwerten, wäre eine Kurvenanpassungsfunktion. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten: Bei der ersten wird eine Gerade an den linearen Anfangsbereich gelegt und dann festgehalten, wo die Kurve von dieser Anpassungsgeraden abweicht. Bei der zweiten Möglichkeit wird zusätzlich zu der Geraden im linearen Bereich eine Gerade durch

den plastischen Bereich gelegt. Der Schnittpunkt beider Geraden kann dann als Statische Fließgrenze ausgewertet werden.

Beim absteigenden Ast der Fließkurve ist deutlich zu erkennen, dass sich die Kurve nicht linear verhält und die Viskosität im Bereich niedriger Scherraten zunimmt. Bei der Auswertung mit dem Bingham-Modell ergeben sich eine Fließgrenze von 30,6 Pa und eine Viskosität von 154,3 Pas. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Bingham-Fließgrenze höher ist als die Tatsächliche Fließgrenze (ca. 22 Pa).

Weiterhin kann beobachtet werden, dass der absteigende Ast auf Höhe des aufsteigenden Astes liegt. Dies wird dadurch erklärt, dass ohne permanente Scherung des Materials die Struktur nicht zerstört wird. Der absteigende Ast wird deshalb im frischen, ungescherten Material ermittelt. Es kann somit keine Hysterese fläche erzeugt werden. Der Einfluss der Thixotropie ist daher nicht ersichtlich.

Schubspannung bei konstanter Belastung

Wird ein Stufenprofil (Tabelle 4-3) vorgegeben, erhält man den Verlauf der Schubspannung. In Abbildung 5-3 ist der Verlauf der Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit $n = 1 \text{ min}^{-1}$ dargestellt (Messprofil S3). Als Betonrezept kam erneut das Rezept B2.3 zur Anwendung. Die Messung wurde 5 min nach dem Befüllen des Messbehälters durchgeführt.

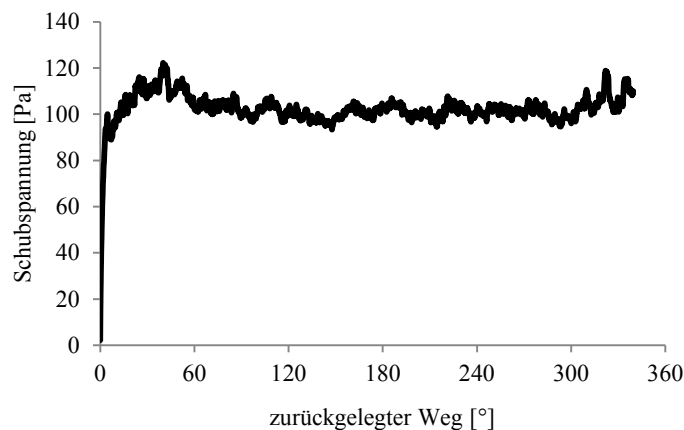


Abbildung 5-3: Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S3; Messzeitpunkt $t = 5 \text{ min}$; Rezept B2.3

Sofort nach Beginn steigt die Kurve stark an, wird dann flacher und erreicht schließlich das Maximum bei $\tau = 120 \text{ Pa}$, welches als Statische Fließgrenze bezeichnet werden kann. Im Anschluss fällt die Kurve leicht ab und pendelt sich bei $\tau = 100 \text{ Pa}$ ein (Dynamische Fließgrenze). Die Statische Fließgrenze kann durch den Strukturaufbau innerhalb der kurzen Ruhezeit erklärt werden. Ob die Statische Fließgrenze auch von der Geschwindigkeit abhängt, wird im nächsten Kapitel geklärt.

Interpretation der Messergebnisse anhand eines Federmodells

Um die gewonnenen Ergebnisse interpretieren zu können, bietet sich ein Modell an (Abbildung 5-4). Dabei wird die SVB-Mischung vereinfacht durch mehrere Partikel (hier: graue Kugeln) dargestellt, die durch Strukturkräfte (hier: Federn) zusammengehalten werden (Bild 1).

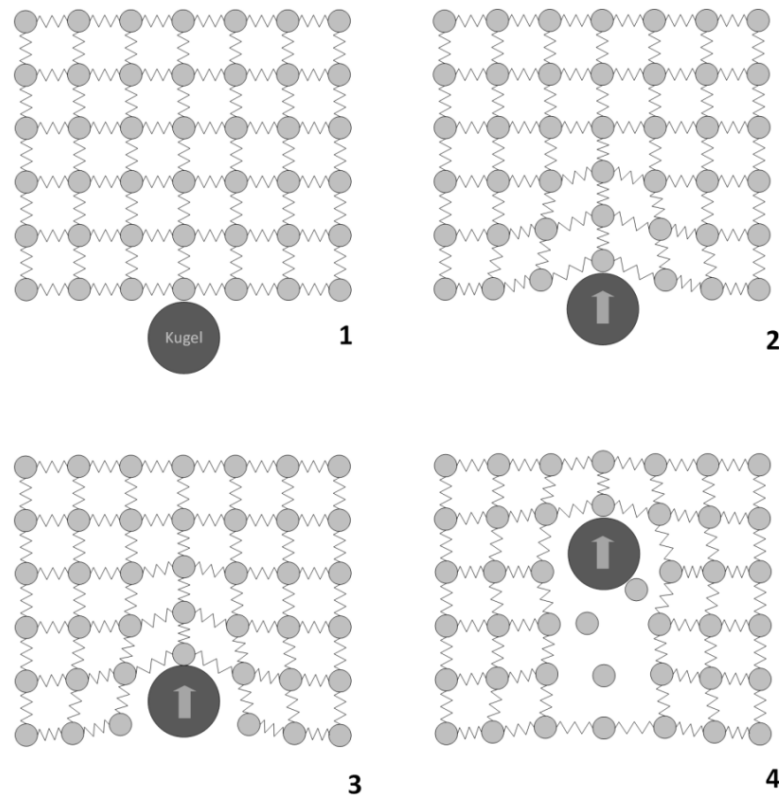


Abbildung 5-4: Federmodell zur Beschreibung des Strukturverhaltens eines SVB beim Durchfahren mit einer Kugel

Bewegt sich eine Kugel durch das Material, so kommt es anfangs zu einer elastischen Verformung der Struktur (Bild 2). Die Partikel werden bewegt, sind aber durch ihre Strukturkräfte (Federn) weiterhin miteinander verbunden. Dieser Vorgang ist bei den Fließkurven am Aufwärtsast zu erkennen und wird gekennzeichnet durch den linearen Bereich. Bei anschließender Entlastung würden die Partikel in ihre Ausgangslage zurückgehen. Wird die Kugel dagegen weiter durch das Material bewegt, so kommt es zu einem Aufbrechen der Strukturen (Bild 3). Trotz dieses lokalen Strukturbruchs wird das Material weiterhin elastisch verformt. Die gelösten Partikel werden zur Seite gedrängt und hinter der Kugel entsteht eine Rinne. Bei hoher Fließfähigkeit des Betons können die Partikel in ihre ursprüngliche Länge zurückkehren (Bild 4). Nach einer gewissen Zeit kommt es schließlich wieder zu einem erneuten Struktur-
aufbau.

Dieses Strukturmodell entspricht dem Maxwell-Modell, das das Verhalten viskoelastische Flüssigkeiten beschreibt.

5.2.1.2 Reproduzierbarkeit

Ein wichtiges Kriterium für den Einsatz des Kugel-Messsystems beim SVB ist, neben Aussagen über die rheologischen Eigenschaften, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Um die Reproduzierbarkeit zu demonstrieren, wurden Wiederholungsversuche durchgeführt. Dabei kamen zwei Arten von Wiederholungsversuchen zur Anwendung. Bei der ersten Art wurden die Wiederholungsversuche an ein und derselben Probe durchgeführt. Zwischen den Versuchen wurde die Probe mit einer Kelle aufgemischt um nicht mehrmals in derselben Rinne zu messen. Zwischen den Messungen lagen ca. 10 Sekunden. Bei der zweiten Art wurde eine neue Mischung hergestellt und geprüft.

In Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 sind die Wiederholungsversuche der Betonrezepte B2.1 und B2.3 dargestellt. Die Wiederholungsversuche an ein und derselben Probe wurden am Beton B2.1 und B2.3 durchgeführt. Dabei wurde der Versuch nach kurzem Aufmischen mehrmals wiederholt. Bei Beton B2.3 W wurde die Betonrezeptur B2.3 neu hergestellt und ebenfalls mehrmals geprüft.

Fließkurve

In Abbildung 5-5 sind die Fließkurven der Betonrezepte B2.1 und B2.3 dargestellt (Messprofil R2). Beton B2.1 und B2.3 W wurden jeweils dreimal geprüft, Beton B2.3 viermal. Die Auswertung der Fließkurven erfolgte mit dem Bingham-Modell. Die ermittelten rheologischen Parameter sind in Tabelle 5-4 dargestellt.

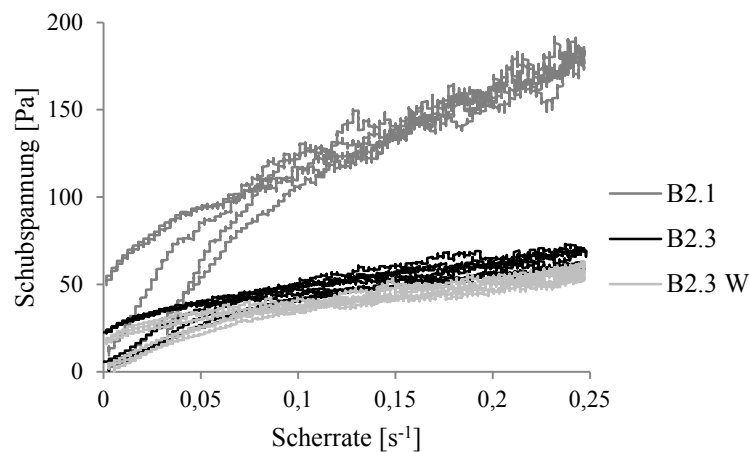


Abbildung 5-5: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse; Vergleich unterschiedlicher Fließkurven; Messprofil R2; Rezept B2.1 und B2.3

Schubspannung bei konstanter Belastung

Abbildung 5-6 zeigt die Reproduzierbarkeit der Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit (Messprofil S2).

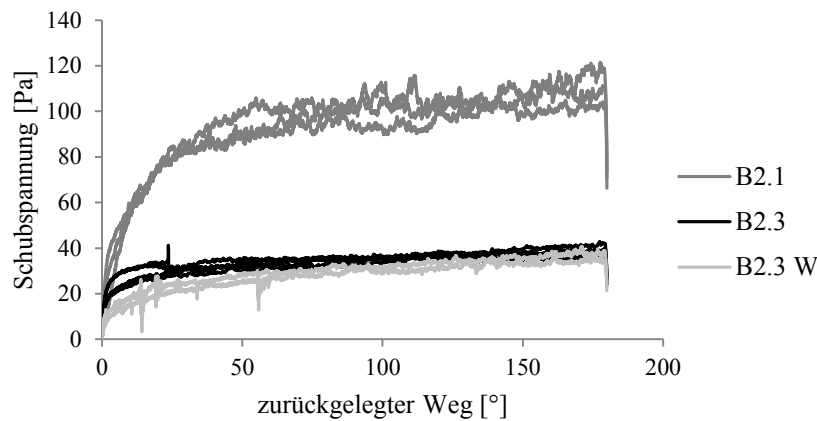


Abbildung 5-6: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse; Schubspannung bei konstanter Belastung; Messprofil S2; Rezept B2.1 und B2.3

Numerische Darstellung der Ergebnisse

In Tabelle 5-4 sind die Ergebnisse der Wiederholungsversuche numerisch dargestellt.

Rezept	Fließkurve					Schubspannung bei konstanter Belastung	Ein-Punkt-Verfahren	
	Bingham-Modell			Ablese an der Fließkurve			Dynamische Fließgrenze	Setzfließmaß
	R ²	η [Pas]	τ [Pa]	Statische FG [Pa]	Tatsächliche FG [Pa]	[Pa]		
B2.1	0,97	460,5	67,6	75,0	52,9	98,7	623	15,3
	0,97	429,7	67,9	75,0	49,6	103,3		
	0,98	461,7	66,1	80,0	51,9	97,4 102,1		
B2.3	0,96	160,0	31,6	38,0	23,3	35,6	670	14,4
	0,96	123,2	30,6	35,0	22,0	34,0		
	0,89	116,3	32,8	35,0	22,8	37,0		
	0,96	160,5	29,4	35,0	22,1	35,6		
	0,97	154,4	30,6	35,0	22,5	36,3		
B2.3 W	0,96	140,7	26,0	25,0	18,5	29,5	665	12,2
	0,94	115,5	24,9	25,0	17,4	30,2		
	0,96	123,7	22,3	30,0	16,2	29,1		

Tabelle 5-4: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse; numerische Darstellung

Sowohl bei der Auswertung der Fließkurven als auch bei der Auswertung der Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit liegen die Graphen der jeweiligen Rezeptur sehr nahe beisammen. Zudem ist sehr gut der Unterschied zwischen den beiden Rezepturen erkennbar. Eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse konnte somit nachgewiesen werden. Weitere Versuche (siehe Anhang) bestätigten diese Erkenntnisse.

5.2.2 Variation Messablauf

5.2.2.1 Messgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit mit der die Kugel durch ein Material fährt hat erhebliche Einflüsse auf die Messergebnisse. Um diese Auswirkungen zu untersuchen, wurden Versuche mit unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten durchgeführt. Dabei kamen erneut das Rampenprofil und das Stufenprofil zur Anwendung. Bei beiden dieser Basisprofile wurde jeweils die Geschwindigkeit variiert. Als Betonrezeptur wurde Rezept B2.3 verwendet.

Fließkurve

Bei den Rampenprofilen kamen drei unterschiedliche Geschwindigkeiten zum Einsatz (Tabelle 4-2). In Abbildung 5-7 sind die untersuchten Profile graphisch zusammengefasst.

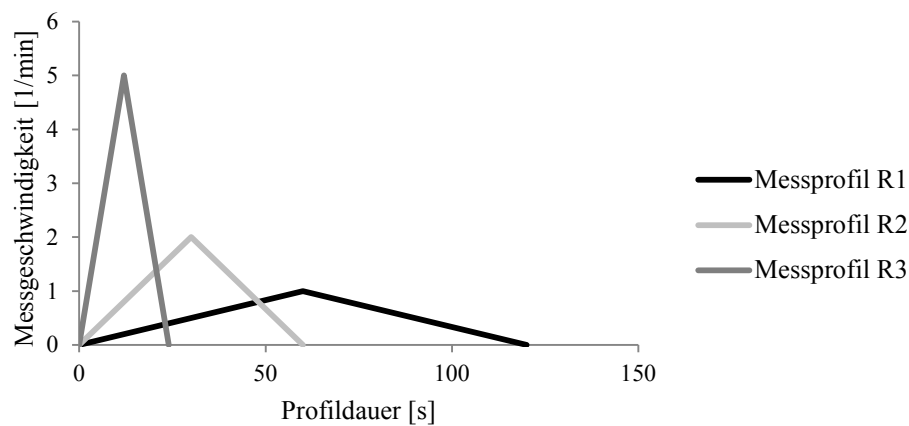


Abbildung 5-7: Untersuchte Rampenprofile

Abbildung 5-8 zeigt die Fließkurven mit unterschiedlicher Maximalgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$. Dabei fällt auf, dass alle drei Kurven einen linearen Anstieg bis ca. 40 bis 50 Pa aufweisen und dann flacher werden. Dieser Übergang kann als Statische Fließgrenze ausgewertet werden. Es ist zu erkennen, dass sich mit steigender Maximalgeschwindigkeit die Statische Fließgrenze erhöht. Diese höhere Statische Fließgrenze weist auf ein zusätzliches Moment infolge einer höheren Beschleunigung bzw. eines höheren Impulses hin. Zudem verringert sich mit zunehmender Maximalgeschwindigkeit die Steigung des elastischen Bereiches. Beim aufsteigenden Ast konnte trotz höherer Geschwindigkeit keine „Nase“ oder „Peak“, wie oft berichtet, festgestellt werden. Bei den Versuchen mit der hohen Maximalgeschwindigkeit konnte ein weiter Scherratenbereich abgedeckt werden. Bei hoher Viskosität führte die hohe Beschleunigung oft zu einem vorzeitigen Ende der Messung, da das Maximalmoment des Messgerätes in diesen Fällen überschritten wurde. Bei den Abwärtsästen der Fließkurve ist zu erkennen, dass diese ebenfalls nicht identisch sind.

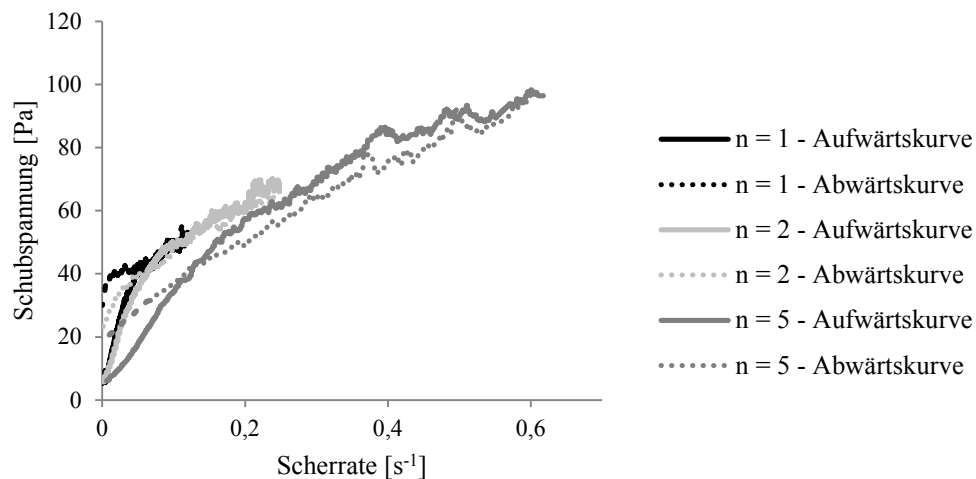


Abbildung 5-8: Vergleich Messprofile; Fließkurven; Messprofile R1 ($n=1$), R2 ($n=2$) und R3 ($n=5$); $t = 0$; Rezept B2.3

Aus Abbildung 5-8 kann entnommen werden, dass die Abwärtskurven nahezu parallel verlaufen. Man kann daraus schließen, dass die Messgeschwindigkeit kaum die Viskosität beeinflusst. Die Bingham-Fließgrenze wird dagegen mit zunehmender Geschwindigkeit geringer (Tabelle 5-6).

Messprofil	Maximalgeschwindigkeit [min^{-1}]	Messzeitpunkt [min]	Viskosität [Pas]	Bingham-Fließgrenze [Pa]
R1	$n = 1$	$t = 0$	120,5	38,4
R2	$n = 2$	$t = 0$	142,9	30,6
R3	$n = 5$	$t = 0$	124,7	25,0

Tabelle 5-5: Auswertung der Fließkurve mit dem Bingham-Modell; unterschiedliche Messprofile; Rezept B2.3

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der Erstellung von Fließkurven die Geschwindigkeit und die Beschleunigung einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Bei zu niedriger Maximalgeschwindigkeit kann es vorkommen, dass das Material nicht vollständig geschert wird. Eine zu hohe Maximalgeschwindigkeit führt, aufgrund der Prämisse innerhalb einer halben Umdrehung diese Maximalgeschwindigkeit zu erreichen, zu einer hohen Beschleunigung, was eine zusätzliche Kraft erfordert und somit zu einer höheren Schubspannung führt. Die gewonnen Erkenntnisse in diesem Abschnitt konnten durch mehrere Messungen bestätigt werden.

Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit

Bei den Stufenprofilen kamen drei unterschiedliche Geschwindigkeiten zum Einsatz (Tabelle 4-3). In Abbildung 5-9 sind die untersuchten Profile graphisch zusammengefasst.

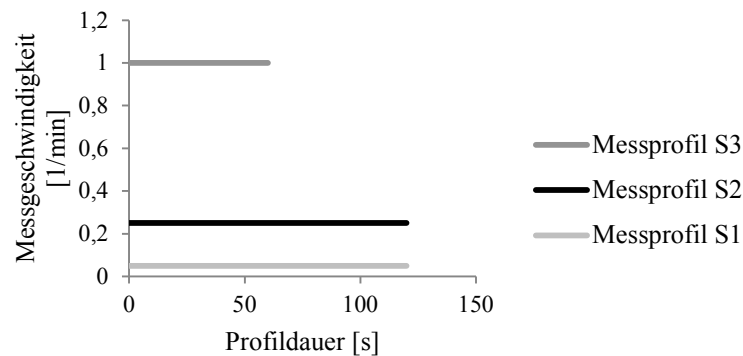


Abbildung 5-9: Untersuchte Stufenprofile

Abbildung 5-10 zeigt den Verlauf der Schubspannung bei drei konstanten Schergeschwindigkeiten für das Betonrezept B2.3. Bei einer Geschwindigkeit von $n = 0,05 \text{ min}^{-1}$ (Messprofil S1) stellt sich auch nach 45° kein stationärer Zustand ein. Zudem endet der elastische Bereich später als bei den anderen Geschwindigkeiten. Durch die extrem langsame Geschwindigkeit wird die Struktur der Probe erst später gebrochen. Der Beton kann dadurch höhere elastische Verformungen aufnehmen. Wird die Geschwindigkeit erhöht (Messprofil S2: $n = 0,25 \text{ min}^{-1}$), stellt sich relativ bald ein konstanter Bereich ein. Durch die höhere Geschwindigkeit wird der Beton konstant geschert und die Strukturen aufgebrochen.

Wird die Geschwindigkeit weiter gesteigert, wird eine höhere Dynamische Fließgrenze verzeichnet. Durch die höhere Geschwindigkeit entsteht physikalisch bedingt eine größere Widerstandskraft und somit eine höhere Schubspannung. Eine Statische Fließgrenze in Form einer „Nase“ konnte bei der hohen Geschwindigkeit jedoch nicht festgestellt werden. Wiederholungsversuche bestätigten diese Erkenntnisse.

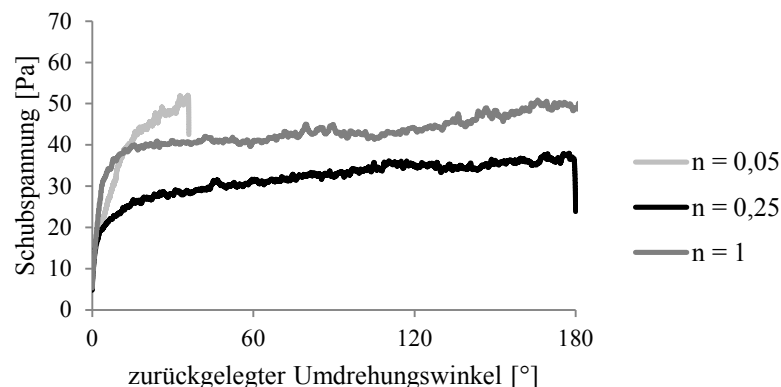


Abbildung 5-10: Vergleich Messprofile; Schubspannung bei konstanten Schergeschwindigkeiten; Messprofile S1 ($n=0,05$), S2 ($n=0,25$) und S3 ($n=1$); $t = 0 \text{ min}$; Rezept B2.3

Die Versuche haben gezeigt, dass die gewählte Prüfgeschwindigkeit Auswirkung auf die Ergebnisse hat.

Im nächsten Schritt soll untersucht werden, ob bei einem steiferen Beton zum Zeitpunkt $t = 0$ min eine Statische Fließgrenze vorhanden ist. Dazu wurde die Betonrezeptur B2.1 mit zwei unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten geprüft (Messprofil S2 und S3).

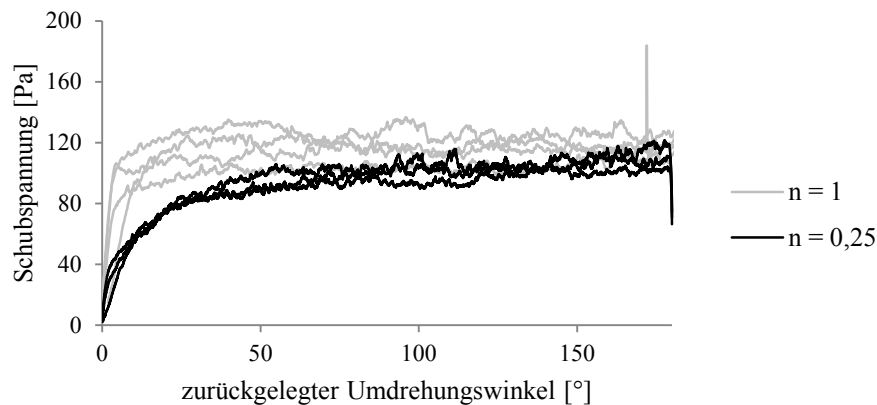


Abbildung 5-11: Vergleich Messprofile; Schubspannung bei zwei konstanten Schergeschwindigkeiten; Messprofile S2 ($n=0,25$) und S3 ($n=1$); $t = 0$ min; Rezept B2.1

Abbildung 5-11 zeigt den Verlauf der Schubspannung bei zwei konstanten Schergeschwindigkeiten für das Betonrezept B2.1. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die Versuche mehrmals wiederholt. Bei $n = 1 \text{ min}^{-1}$ stellt sich hier, im Gegensatz zum Betonrezept B2.3, bereits eine (geringe) statische Fließgrenze ein. Begründet werden kann dies durch die steifere Struktur infolge des geringeren Wassergehaltes bei dieser Rezeptur. Es kann also festgehalten werden, dass die Statische Fließgrenze neben der Geschwindigkeit auch von der Konsistenz des Betons abhängig ist.

5.2.2.2 Messzeitpunkt

Um die zeitliche Veränderung des SVB beurteilen zu können, wurden Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt. Als Zeitpunkt $t = 0$ min wurde der Start der ersten Messung festgelegt. Nach der ersten Messung wurde der Beton händisch aufgemischt und im Anschluss fünf Minuten ruhen gelassen ($t = 5$ min). Die Messung $t = 20$ min erfolgte 20 Minuten nach erneutem Aufmischen. Es kam die Betonrezeptur B2.3 zur Anwendung.

Fließkurve

In Abbildung 5-12 sind die Fließkurven, bei einer maximalen Schergeschwindigkeit von $v = 0,01176 \text{ m/s}$ bzw. $n = 1 \text{ min}^{-1}$ (Messprofil R2), zu unterschiedlichen Messzeitpunkten dargestellt. Beim aufsteigenden Ast konnte keine „Nase“ oder „Peak“ festgestellt werden. Dagegen verläuft der lineare Anfangsbereich mit zunehmender Ruhezeit steiler, was wiederum auf die steifere Struktur zurückzuführen ist. Beim absteigenden Ast werden mit zunehmender Ruhe-

zeit sowohl die Steigung (Viskosität), als auch die Tatsächliche Fließgrenze höher, was auf den Strukturaufbau zurückgeführt werden kann. In Tabelle 5-6 sind die Auswertungen der Fließkurve mit dem Bingham-Modell für unterschiedliche Messgeschwindigkeiten und Messzeitpunkte zusammengefasst.

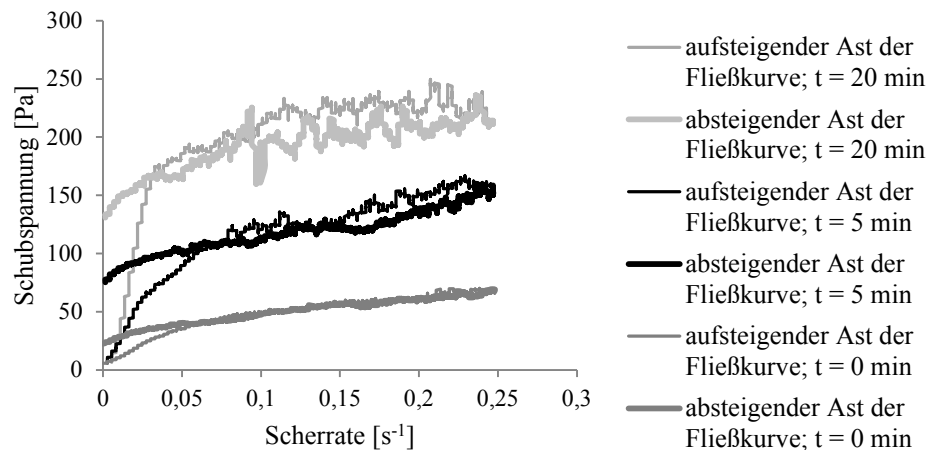


Abbildung 5-12: Vergleich Messzeitpunkt; Fließkurven; Messprofil R2; Rezept B2.3

Messprofil	Maximalgeschwindigkeit [min ⁻¹]	Messzeitpunkt [min]	Viskosität [Pas]	Bingham-Fließgrenze [Pa]
R1	n = 1	t = 0	120,5	38,4
		t = 20	287,8	136,5
R2	n = 2	t = 0	142,9	30,6
		t = 5	247,3	87,4
		t = 20	266,2	159,3
R3	n = 5	t = 0	124,7	25,0
		t = 5	202,8	104,9

Tabelle 5-6: Auswertung der Fließkurven mit dem Bingham-Modell; unterschiedliche Messprofile und Messzeitpunkte; Rezept B2.3

Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit

In Abbildung 5-13 ist der Verlauf der Schubspannung für eine extrem langsame Geschwindigkeit (Messprofil S1: $n = 0,05 \text{ min}^{-1}$ bzw. $v = 0,00058 \text{ m/s}$) dargestellt. Da sich die Kugel sehr langsam durch das Material bewegt, wurde der Versuch nach ca. 35° Umdrehungswinkel beendet.

Auffällig ist, dass zu keinem der drei Messzeitpunkte eine Statische Fließgrenze beobachtet werden konnte, obwohl es innerhalb einer Ruhezeit von 20 min bereits zu einem Strukturaufbau gekommen ist. Dagegen sieht man, dass mit zunehmender Ruhezeit die Steigung im Anfangsbereich zunimmt, was auf eine ansteigende steifere Struktur zurückzuführen ist. Mit zunehmender Ruhezeit wird auch eine höhere Kraft notwendig um diese Strukturkräfte aufzubrechen. Weiterhin fällt bei dieser Abbildung auf, dass kein Plateau existiert, mit der eine

Aussage über eine Dynamische Fließgrenze möglich wäre. Der kontinuierliche Anstieg kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Da bei dieser langsamen Geschwindigkeit der Versuch zwei Minuten dauert, kommt es im noch nicht gescherten Bereich zu einem Aufbau größerer Strukturkräfte. Zusätzlich kann sich vor der Kugel mehr Material aufstauen und wird nicht zur Seite verdrängt, was zu einer stetigen Zunahme der Widerstandskräfte führt.

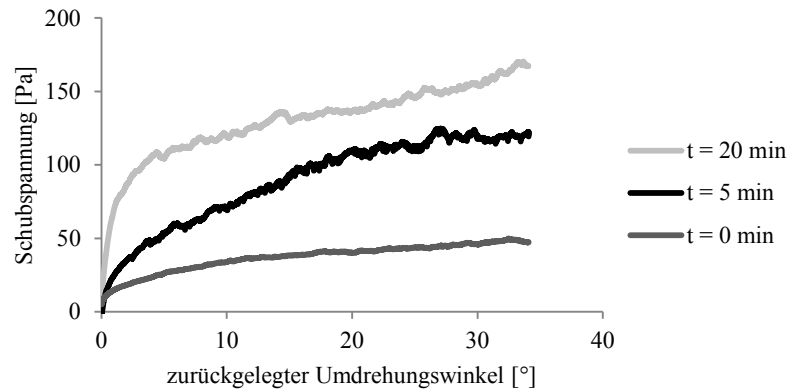


Abbildung 5-13: Vergleich Messzeitpunkt; Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S1; Rezept B2.3

Abbildung 5-14 zeigt den Verlauf der Schubspannung für eine konstante Schergeschwindigkeit von $v = 0,0028 \text{ m/s}$ bzw. $n = 0,25 \text{ min}^{-1}$ (Messprofil S2). Mit zunehmender Ruhezeit steigt auch hier die Kurve zu Beginn stärker an. Beim Zeitpunkt $t = 20 \text{ min}$ ist eine Statische Fließgrenze zu erkennen.

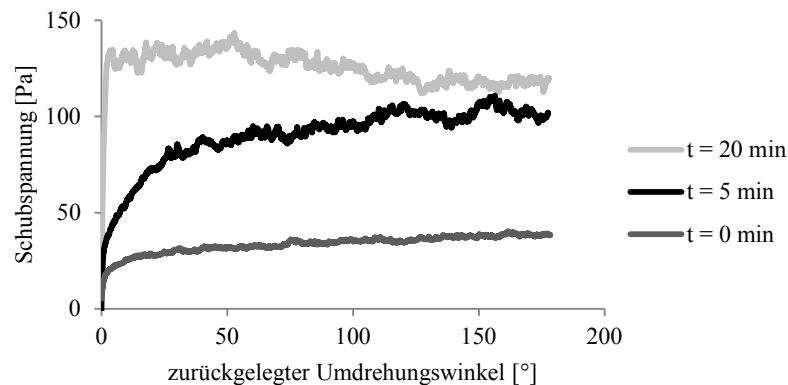


Abbildung 5-14: Vergleich Messzeitpunkt; Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S2; Rezept B2.3

Im Gegensatz zu Abbildung 5-13 stellt sich hier nahezu ein Plateau ein, das als Dynamische Fließgrenze ausgewertet werden kann. Da die Messung ebenfalls 2 min dauerte, ist der Verlauf des Plateaus nicht absolut gleichmäßig, was ebenfalls durch den Strukturaufbau und dem Aufstauen des Materials vor der Kugel begründet werden kann. Wird die Geschwindigkeit weiter erhöht (Messprofil S3: $n = 1 \text{ min}^{-1}$), stellt sich bereits nach 0,5 min eine geringe Statische Fließgrenze ein (Abbildung 5-15). Nach 5 min ist diese etwas stärker und nach 20 min

sehr stark ausgeprägt. Durch die niedrige Messdauer von 1 min entsteht ein sehr konstantes Plateau, was wiederum der Dynamischen Fließgrenze entspricht.

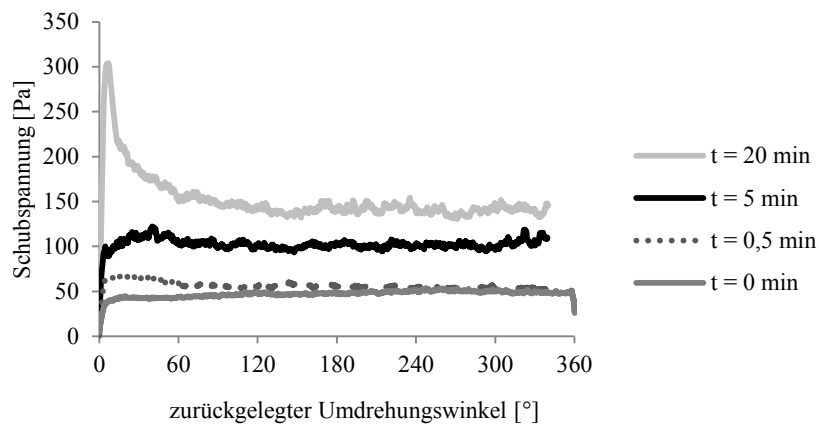


Abbildung 5-15: Vergleich Messzeitpunkt; Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S3; Rezept B2.3

Vergleicht man die Ergebnisse von Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-15 miteinander, so wird deutlich, dass die Statische Fließgrenze neben dem Strukturaufbau infolge der Ruhezeit auch sehr stark von der Geschwindigkeit beeinflusst wird. Mit zunehmender Geschwindigkeit ist demnach auch eine höhere Statische Fließgrenze zu verzeichnen. Dies kann durch den größeren Impuls infolge höherer Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung erklärt werden, der in einer größeren Widerstandskraft resultiert. Der höhere Impuls wirkt sich auf einen größeren Strukturbereich aus, dessen elastische Widerstandskräfte in der Summe größer werden. Erst nach Durchbrechen dieser ersten Strukturen verringern sich die elastischen Widerstandskräfte.

Im weiteren dieser Arbeit werden das Messprofil S2 (konstante Geschwindigkeit von $n = 0,25 \text{ min}^{-1}$) und das Messprofil R2 (Maximalgeschwindigkeit $n = 2 \text{ min}^{-1}$) angewandt.

5.2.2.3 Messgeometrie

Variation Kugelgröße

Neben der verwendeten Kugel ($d = 95 \text{ mm}$) können weitere Messgeometrien eingesetzt werden. Um einen Einfluss dieser Geometrien zu erhalten, wurden Versuche mit einer größeren Kugel ($d = 115 \text{ mm}$) und unterschiedlichen Zylindern durchgeführt.

Um den Einfluss der Kugelgröße zu bewerten, kam ein Rampenprofil (Messprofil R2) mit einer Maximalgeschwindigkeit von $n = 2 \text{ min}^{-1}$ und ein Stufenprofil (Messprofil S2) mit einer konstanten Geschwindigkeit von $n = 0,25 \text{ min}^{-1}$ zum Einsatz. Es wurde die Betonrezeptur B2.3 verwendet.

Beim Vergleich der beiden Kugeln ($d = 95 \text{ mm}$ und $d = 115 \text{ mm}$) konnte beim Strömungsverlauf kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Auch der Verlauf der gemessenen Fließkurven und der Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit waren vergleichbar.

Jedoch konnte bei der Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Kugeln festgestellt werden. Die berechneten Absolut-Werte der Kugeln mit unterschiedlichem Durchmesser liegen deutlich auseinander (Tabelle 5-7). Diese Erkenntnisse entsprechen den Ergebnissen der Mörtelversuche im Anhang A.3. Man kann daraus schließen, dass entweder die Transformation der Messwerte in Absolut-Werte falsch ist oder dass der Durchmesser der Kugel einen Einfluss auf die rheologischen Kennwerte hat.

Kugel	Fließkurve		konstante Geschwindigkeit
	Durchmesser	Bingham-Fließgrenze	Dynamische Fließgrenze
	[mm]	[Pa]	[Pa]
	95	30,9	34,7
	115	53,9	63,5

Tabelle 5-7: Vergleich unterschiedlicher Kugeldurchmesser; rheologische Parameter; gemittelte Werte aus je drei Versuchen; Rezept B2.3

Ersetzen der Kugel durch einen Zylinder

Neben der Kugel wurden beim RheoCT auch Zylinder unterschiedlicher Größe eingesetzt (Zylinder Nr.1: $h = 60$ mm, $d = 28$ mm; Zylinder Nr.2: $h = 100$ mm, $d = 80$ mm). Es konnte festgestellt werden, dass der Durchmesser des Zylinders große Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse hat. Mit zunehmendem Durchmesser wird die Messkurve immer gleichmäßiger. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bei kleinem Durchmesser eine Kollision mit der groben Gesteinskörnung zu einem deutlicheren Ausschlag führt als bei einem größeren Durchmesser. Die Messung mit dem kleinen Zylinder kann dabei als Messung in einem Mörtel betrachtet werden, indem die grobe Gesteinskörnung schwimmt und hin und wieder mit dem Zylinder kollidiert. Beim großen Zylinder oder der Kugel ($d = 95$ mm) wird der Beton dagegen als Ganzes betrachtet. Sowohl bei der Kugel als auch beim Zylinder konnte mit zunehmender Größe ein deutlicherer (genauerer) Unterschied beim Vergleich unterschiedlicher Rezepturen festgestellt werden. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Fläche, auf die eine Kraft wirkt, bei einer kleinen Geometrie kleiner ist als bei einer großen Geometrie, was wiederum Auswirkung auf das gemessene Widerstandsmoment hat. Um genauere Aussagen über die rheologischen Eigenschaften zu erhalten, wird somit die Durchführung mit einem größerem Durchmesser empfohlen.

Die Wahl der Kugel anstelle des Zylinders erfolgte aufgrund der einfacheren Betrachtung der Strömung und der damit verbundenen Transformation der Messwerte in rheologische Absolut-Werte. Auch wenn die Bewegung einer Kugel in einem Nicht-Newtonschen Material in der Literatur bisher sehr wenig beschrieben wird, existieren doch mehr Erkenntnisse gegenüber dem Zylinder. Die strömungsmechanische Betrachtung eines Zylinders ist dahingegen schwierig, da es an der Ober- und Unterseite zu Wirbelablösungen kommen kann, welche die rheologischen Eigenschaften maßgeblich beeinflussen können. Ein erster Schritt zur Behandlung dieses Problems wäre die Durchführung von Simulationen am Rechner mit vergleichenden Untersuchungen an definierten Materialien.

5.2.3 Variation der Betonrezeptur

5.2.3.1 Wassergehalt

Ausgehend von der bisherigen Referenzrezeptur B2.3, wurden Mischungen mit 5 l/m³ weniger Wasser (B2.2), 10 l/m³ weniger Wasser (B2.1) und 5 l/m³ mehr Wasser (B2.4) hergestellt. Die Ergebnisse der Rezeptur B2.2 sind nicht dargestellt, da diese aufgrund falscher Kalibrierung des RheoCT unbrauchbare Ergebnisse lieferte. In Tabelle 5-8 sind die Basisinformationen der untersuchten Betonserie B2 zusammengefasst.

Als Messablauf kam ein Rampenprofil mit einer Maximalgeschwindigkeit von $n = 2 \text{ min}^{-1}$ (R2) und ein Stufenprofil mit einer konstanten Geschwindigkeit von $n = 0,25 \text{ min}^{-1}$ (S2) zum Einsatz.

Beton-Nr.		B2.1	B2.3	B2.4
Wassergehalt	kg/m ³	177,7	187,9	192,7
Setzfließmaß	mm	630	790	830
Trichterauslaufzeit	sec	11,1	6,3	4,8
Sedimentation		nein	nein	ja

Tabelle 5-8: Wassergehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Betonserie B2

Fließkurve

In Abbildung 5-16 sind die Fließkurven der Rezeptserie B2 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmendem Wassergehalt die Kurven flacher werden. Somit nimmt auch die Viskosität ab. Neben der Viskosität werden auch die Statische Fließgrenze (Auswertung des aufsteigenden Astes) und die Bingham-Fließgrenze (Auswertung des absteigenden Astes mit dem Bingham-Modell) geringer.

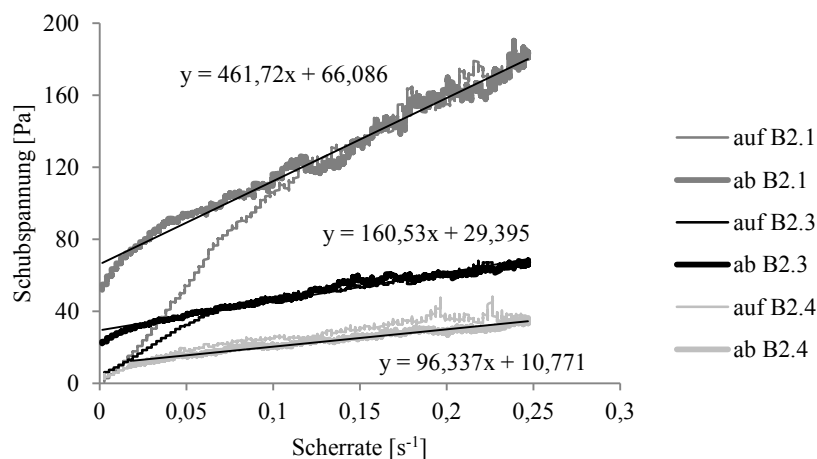


Abbildung 5-16: Variation Wassergehalt; Fließkurven; Messprofil R2; Betonserie B2

Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit

In Abbildung 5-17 ist der Verlauf der Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass sich mit zunehmendem Wassergehalt die Kurven nach unten verschieben. Die Dynamische Fließgrenze wird somit geringer. Eine Statische Fließgrenze konnte nicht festgestellt werden. Wiederholungsversuche haben diese Erkenntnisse bestätigt.

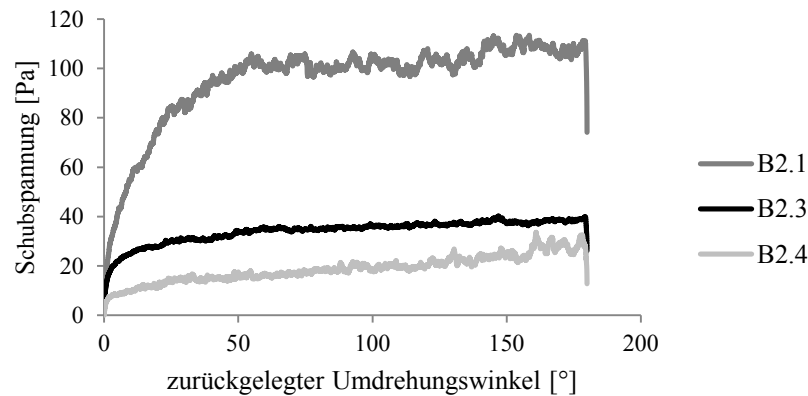


Abbildung 5-17: Variation Wassergehalt; Schubspannung bei konstanter Belastung; Messprofil S2; Betonserie B2

Numerische Darstellung der Ergebnisse

In Abbildung 5-18 sind die Bingham-Fließgrenze einer Fließkurve und die Dynamische Fließgrenze bei Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit für die Betone mit unterschiedlichen Wassergehalten dargestellt. In Abbildung 5-19 ist die Viskosität der Betonserie B2 bei unterschiedlichen Wassergehalten dargestellt. Die Versuche wurden nach händischem Aufmischen mehrmals wiederholt. Beide Diagramme zeigen, wie sich der Wassergehalt auf die unterschiedlichen Fließgrenzen und die Viskosität auswirkt.

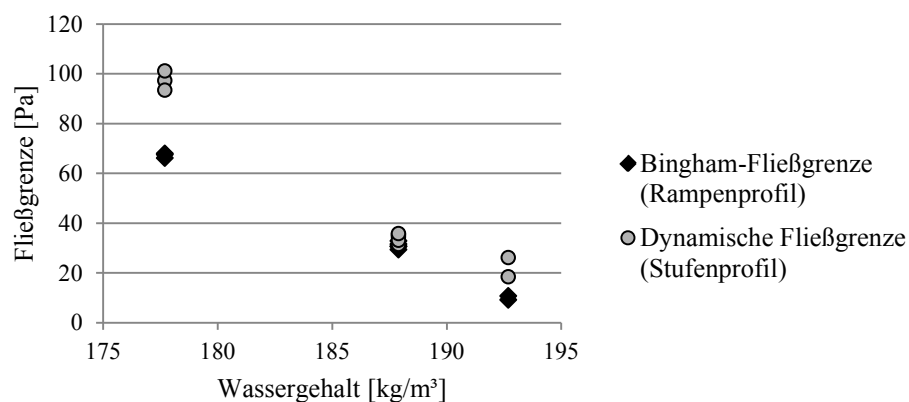


Abbildung 5-18: Variation Wassergehalt; Vergleich unterschiedlicher Fließgrenzen; Betonserie B2

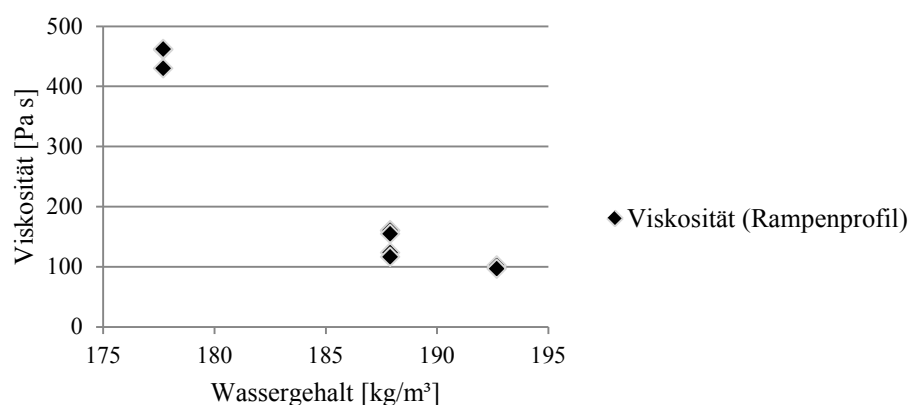


Abbildung 5-19: Variation Wassergehalt; Viskosität; Betonserie B2

Die Abbildungen zeigen, wie mit zunehmendem Wassergehalt sowohl die Fließgrenzen, als auch die Viskosität abnehmen. Zudem ist ersichtlich, dass die Dynamische Fließgrenze höher ist als die Bingham-Fließgrenze. Die jeweiligen Messpunkte eines Kennwertes bei gleichem Wassergehalt liegen sehr nahe zusammen und sprechen folglich für eine sehr gute Reproduzierbarkeit.

Korrelation mit Ein-Punkt-Messsystemen und Vergleich unterschiedlicher Fließgrenzen

Um den Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Setzfließmaß sowie zwischen Viskosität und Trichterauslaufzeit zu untersuchen, waren mehrere Versuche mit unterschiedlichem Wassergehalt notwendig. Da bei der Betonserie B2 nicht ausreichend Daten vorhanden waren, wurden die Ergebnisse der Betonserie B3 (Tabelle 5-2) verwendet. In Tabelle 5-9 sind der Wassergehalt und die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Betonserie B3 zusammengefasst.

Neben der Korrelation zwischen Fließgrenze und Setzfließmaß, wurde auch der Zusammenhang unterschiedlicher Fließgrenzen untersucht. Die dargestellten Werte für Fließgrenze und Viskosität basieren auf einer Mittelung von mehreren Einzelmessungen. Beim Setzfließmaß und der Trichterauslaufzeit handelt es sich um Einzelmessungen. Die Einzelwerte sind im Anhang A.6 dargestellt. Der Verlauf der Fließkurven bei Rezept B3.3 und B3.5 war nicht eindeutig und entsprach nicht den bisher erzeugten Messkurven. Eine korrekte Bestimmung der Fließgrenze und der Viskosität war nicht möglich.

Beton-Nr.		B3.1	B3.2	B3.3	B3.4	B3.5	B3.6
Wasser	kg/m ³	172,3	177,7	180,4	182,9	187,9	197,2
Setzfließmaß	mm	623	670	710	735	780	810
Trichterauslaufzeit	sec	15,3	14,4	7,41	7,28	6,0	3,4
Sedimentation		nein	nein	nein	nein	ja	ja

Tabelle 5-9: Wassergehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Betonserie B3

Betrachtet man Setzfließmaß und Fließgrenze in Abbildung 5-20, so ist ein Zusammenhang durchaus erkennbar, wobei dieser jedoch nicht linear sondern vielmehr regressiv ist. Mit zunehmendem Setzfließmaß wird die Kurve demnach immer flacher, d. h. mit zunehmendem Setzfließmaß werden Unterschiede bei der Fließgrenze geringer. Vergleicht man die Bingham-Fließgrenze mit der Dynamischen Fließgrenze, so fällt auf, dass beide ähnlich verlaufen. Die Dynamische Fließgrenze weist aber deutlich höhere Werte auf als die Bingham-Fließgrenze. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Dynamische Fließgrenze bei einer definierten Geschwindigkeit gemessen wird, die deutlich größer als 0 ist. Bei der Bingham-Fließgrenze wird der Wert ermittelt, bei dem die Ausgleichsgerade die y-Achse bei der Geschwindigkeit 0 schneidet. Eine noch höhere konstante Geschwindigkeit führt, wie schon untersucht (Kapitel 5.2.2.1), zu einer höheren Dynamischen Fließgrenze.

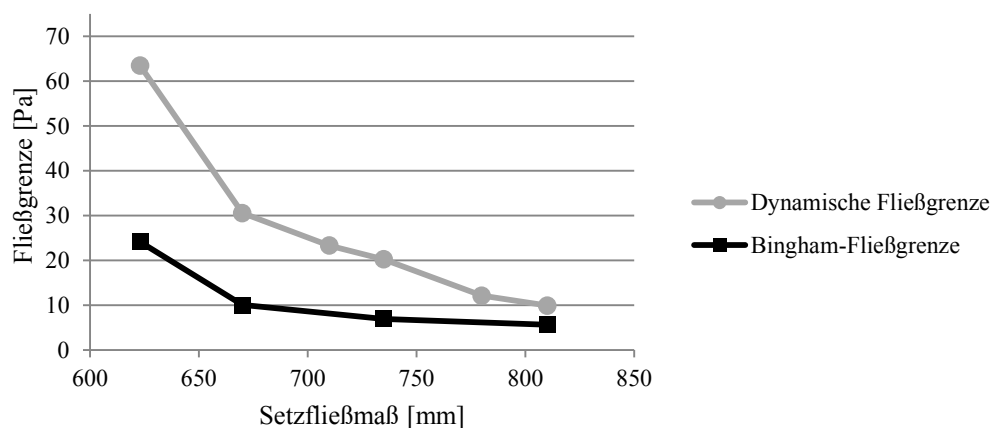


Abbildung 5-20: Korrelation Fließgrenze und Setzfließmaß; Betonserie B3

Neben den beiden genannten Fließgrenzen wurden auch die Tatsächliche Fließgrenze und die Statische Fließgrenze einer Fließkurve ermittelt (Abbildung 5-21). Die Tatsächliche Fließgrenze liegt bei allen Versuchen unter der Bingham-Fließgrenze. Sie kann durch Ablesen des absteigenden Astes der Fließkurve bei minimaler Geschwindigkeit ermittelt werden.

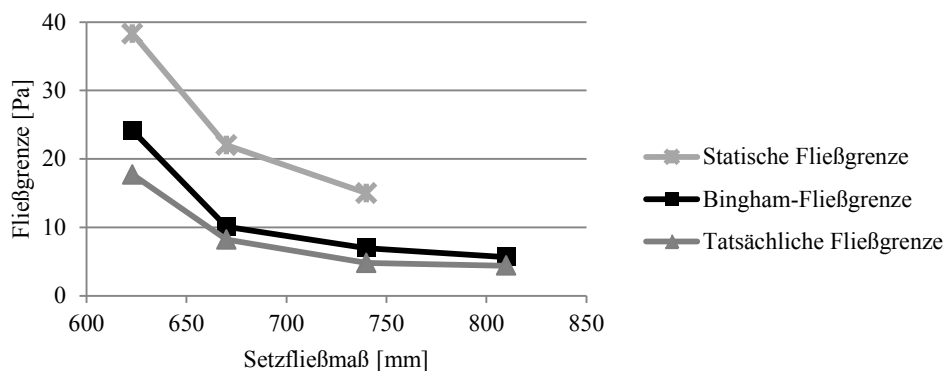


Abbildung 5-21: Vergleich unterschiedlicher Fließgrenzen einer Fließkurve; Betonserie B3

Die Bestimmung der Statischen Fließgrenze am aufsteigenden Ast der Fließkurve ist dagegen deutlich schwieriger zu bestimmen und liefert daher auch keine exakten Ergebnisse. Sie entspricht mindestens der Tatsächlichen Fließgrenze, kann aber auch deutlich über der Bingham-Fließgrenze liegen. Bei den Versuchen mit hohem Setzfließmaß konnte keine Statische Fließgrenze festgestellt werden.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Bestimmung der Fließgrenze beim Stufenprofil (Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit) bessere Messergebnisse liefert als beim Rampenprofil (Fließkurve), was auch in Abbildung 5-20 deutlich erkennbar ist. Vor allem bei sehr fließfähigen SVB, ist bei der Dynamischen Fließgrenze infolge konstanter Geschwindigkeit der Unterschied der Fließfähigkeit deutlicher zu sehen als bei der Bingham-Fließgrenze.

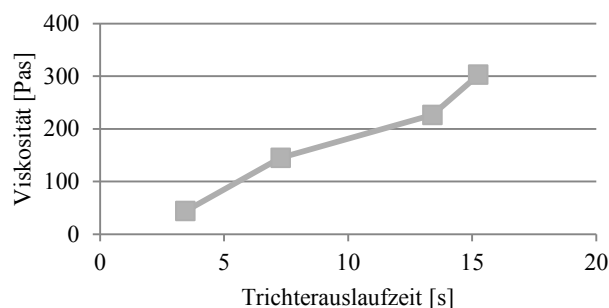


Abbildung 5-22: Korrelation Viskosität – Trichterauslaufzeit

In Abbildung 5-22 ist der Zusammenhang zwischen Viskosität und Trichterauslaufzeit dargestellt, wobei jedoch nicht erkennbar ist, ob dieser linear ist oder nicht. Mehr Daten wären hier notwendig um verlässliche Aussagen treffen zu können. Auch bei anderen Versuchen hat sich kein eindeutig linearer Verlauf ergeben. Dabei sei angemerkt, dass die Fehlerursache nicht unbedingt beim KMS liegen muss, sondern durchaus an der Messung der Trichterauslaufzeit liegen kann.

Steuerung des Wassergehaltes

Ein Ziel bei der Entwicklung eines Rheometers für SVB war unter anderem die Optimierung der Qualitätskontrolle im Betonwerk sowie auf der Baustelle. Da SVB besonders sensibel auf Wassergehaltsschwankungen reagiert, ist diese Kontrolle von besonderer Bedeutung. Wie bereits gezeigt, ist es mit dem KMS sehr gut möglich Schwankungen im Wassergehalt festzustellen. In diesem Abschnitt wird ein Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Dynamischer Fließgrenze, Bingham-Fließgrenze und Setzfließmaß (Abbildung 5-23) sowie zwischen Wassergehalt, Viskosität und Trichterauslaufzeit (Abbildung 5-24) hergestellt.

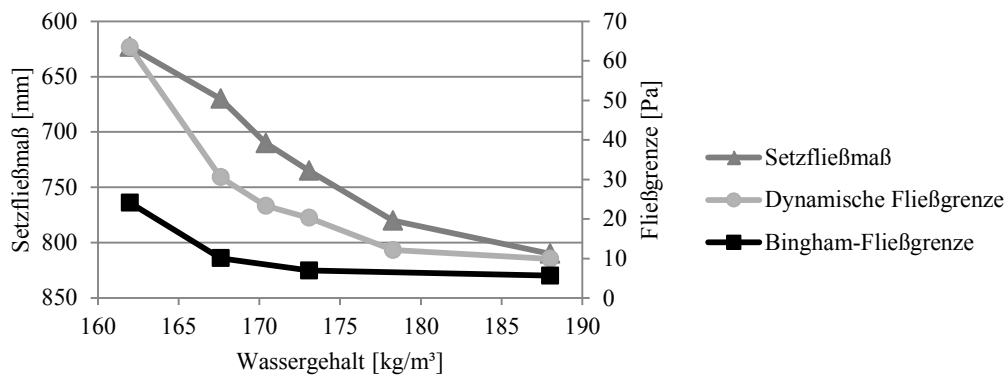


Abbildung 5-23: Korrelation Wassergehalt, Setzfließmaß, Dynamische Fließgrenze und Bingham-Fließgrenze; Betonserie B3

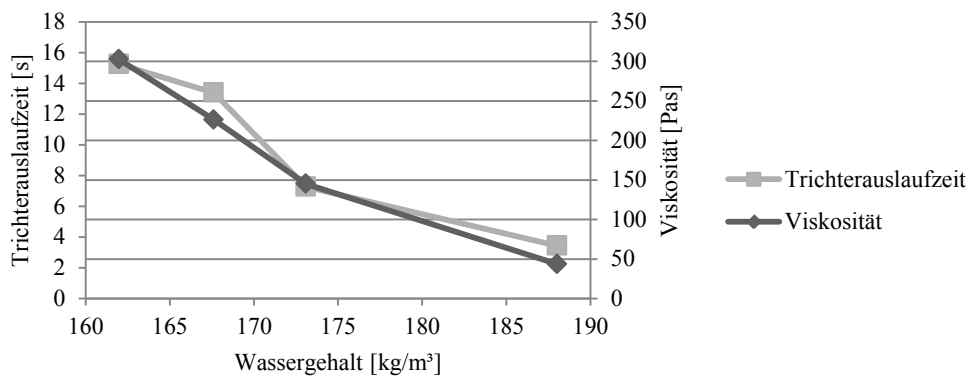


Abbildung 5-24: Korrelation Wassergehalt, Trichterauslaufzeit und Viskosität; Betonserie B3

In beiden Diagrammen ist zu erkennen, wie mit zunehmendem Wassergehalt die unterschiedlichen Fließgrenzen und die Viskosität abnehmen. Aus Abbildung 5-23 kann entnommen werden, dass sich die Fließgrenzen nicht linear verhalten, sondern mit zunehmendem Wassergehalt die Unterschiede in der Fließgrenze kleiner werden. Bei der Viskosität konnte dagegen ein nahezu linearer Verlauf festgestellt werden. Diese Erkenntnisse konnten auch bei den anderen durchgeführten Betonserien festgestellt werden. Vor allem die Dynamische Fließgrenze sowie die Viskosität führen durchwegs zu aussagekräftigen Ergebnissen. Für die Steuerung der Frischbetoneigenschaften ergeben sich hierdurch sehr gute Möglichkeiten.

5.2.3.2 Zusatzstoffe

In diesem Kapitel wird die Flugasche der Betonserie B2 durch Kalksteinmehl (B3) und AHWZ (B4) ersetzt. Aufgrund unterschiedlicher physikalischer und granulometrischer Eigenschaften der Zusatzstoffe, muss der Wassergehalt angepasst werden, um einen optimalen SVB herstellen zu können. Die vollständigen Betonrezepturen sind im Anhang abgebildet. Bei der Messung mit dem KMS kam erneut das Rampenprofil R2 und das Stufenprofil S2 zum Einsatz. In Tabelle 5-10 sind die Messergebnisse des RheoCT sowie Setzfließmaß und Trichter-

auslaufzeit zusammengefasst. Bei den Messungen mit dem KMS handelt es sich um Mittelwerte aus mindestens drei Messungen. Die Einzelergebnisse sind im Anhang abgebildet.

Rezept	Zusatzstoff	Wassergehalt	Fließkurve		Schubspannung bei konstanter Belastung	Ein-Punkt-Verfahren	
			η	τ	Dynamische Fließgrenze	Setzfließmaß	Trichter-auslaufzeit
		[kg/m ³]	[Pas]	[Pa]	[Pa]	[mm]	[s]
B2.1	Flugasche	177,7	450,6	67,2	100,4	623	15,3
B2.3		187,9	142,9	31	35,7	670	14,4
B2.4		192,7	100,1	10	31,2	710	7,4
B3.1	Kalksteinmehl	172,3	302,6	24,1	63,5	623	15,3
B3.2		177,7	226,3	10	30,6	670	14,4
B3.3		180,4	k. v. E.*	k. v. E.	23,3	710	7,4
B3.4		182,9	145	6,9	20,3	735	7,3
B3.5		187,9	k. v. E.	k. v. E.	12,1	780	6
B3.6		197,2	43,6	5,6	9,9	810	3,4
B4.1	AHWZ	175,0	449	18,8	67,7	550	29,7
B4.2		177,7	355,3	7,7	35,3	660	14,3
B4.3		180,4	207,4	3,9	23,6	720	14,1
B4.4		182,9	99,5	5,7	17,1	755	9,7

Tabelle 5-10: Messergebnisse unterschiedlicher Rezepturen (* keine verwertbaren Ergebnisse)

In Abbildung 5-25 sind die Bingham-Fließgrenze der Betonserien B2, B3 und B4 und die entsprechenden Setzfließmaße dargestellt. Mit Ausnahme der Rezeptur B4.1 (schwarze Markierung) zeigt sich ein guter Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Setzfließmaß.

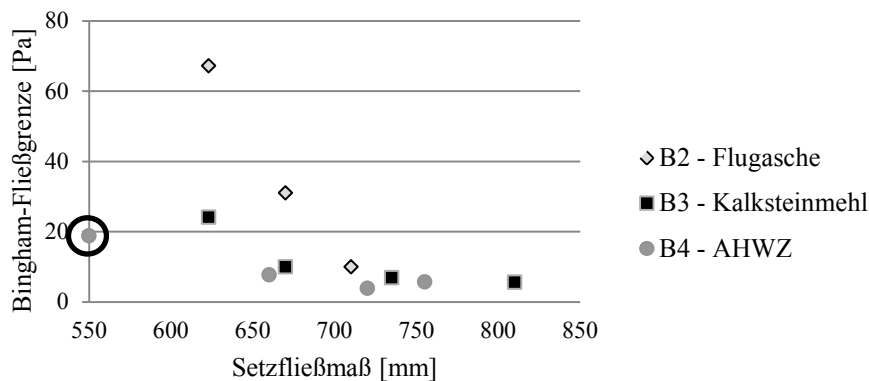


Abbildung 5-25: Korrelation Bingham-Fließgrenze und Setzfließmaß; unterschiedliche Betonrezepturen

In Abbildung 5-26 sind die Dynamische Fließgrenze (bei konstanter Schergeschwindigkeit) und das Setzfließmaß unterschiedlicher Betonrezepturen dargestellt. Auch hier zeigt sich ein Zusammenhang zwischen Setzfließmaß und Fließgrenze. Wie in Kapitel 5.2.3.1 bereits fest-

gestellt, liefert die Dynamische Fließgrenze bei Vorgabe eines Stufenprofils genauere Ergebnisse als die Auswertung der Fließkurve mit dem Bingham-Modell.

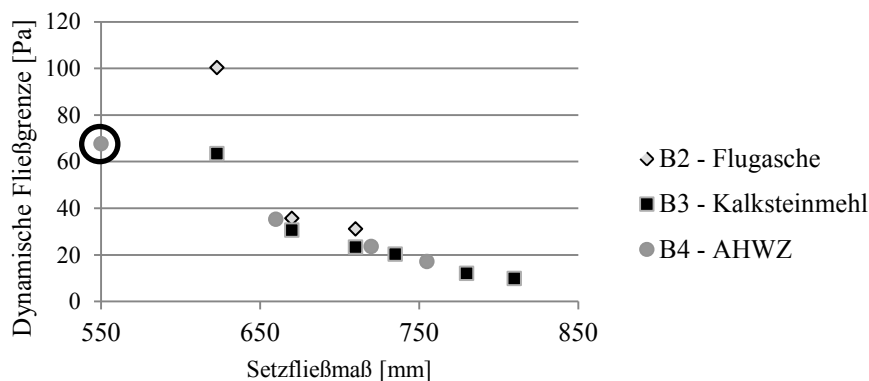


Abbildung 5-26: Korrelation Dynamische Fließgrenze (bei konstanter Schergeschwindigkeit) und Setzfließmaß; unterschiedliche Betonrezepturen

In Abbildung 5-27 sind die Viskosität und Trichterauslaufzeit unterschiedlicher Betonrezepturen dargestellt. Auch hier ist eine Tendenz erkennbar. Ausreißer ist erneut die Betonrezeptur B4.1.

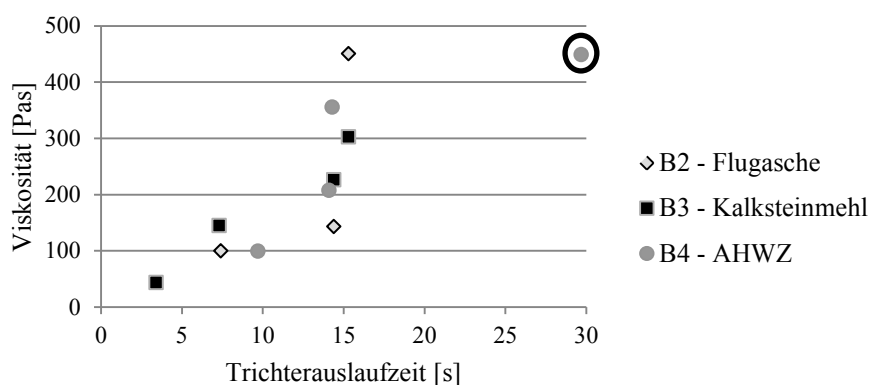


Abbildung 5-27: Korrelation Viskosität und Trichterauslaufzeit; unterschiedliche Betonrezepturen

5.2.3.3 Fließmittelgehalt

Neben Variationen im Wassergehalt wurde auch der Einfluss des Fließmittelgehalts untersucht. Dazu wurde der Fließmittelgehalt der Betonrezeptur B3.3 um 0,2 % erhöht. In Tabelle 5-11 sind die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen für den jeweiligen Fließmittelgehalt abgebildet.

Rezept	Fließmittelgehalt	Frischbetonprüfungen	
	[%]	Setzfließmaß [mm]	Trichterauslaufzeit [s]
B3.3	2,40	670	14,40
B3.3b	2,60	700	9,44

Tabelle 5-11: Fließmittelgehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen; Rezept B3.3

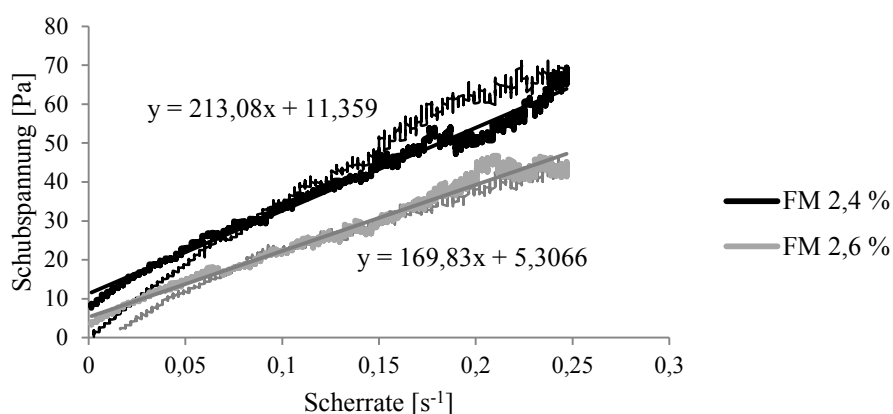


Abbildung 5-28: Variation Fließmittelgehalt; Fließkurven; Messprofil R2; Rezept B3.3 (FM 2,4 %) und B3.3b (FM 2,6 %)

Abbildung 5-28 zeigt die Fließkurven der Betonrezeptur B3.3 mit unterschiedlicher Fließmitteldosierung. Mit zunehmendem Fließmittelgehalt wird die Fließkurve flacher. Die Auswertung des absteigenden Astes mit dem Bingham-Modell ergibt für den höheren Fließmittelgehalt eine niedrigere Bingham-Fließgrenze sowie eine niedrigere Viskosität. Daneben nimmt auch die Dynamische Fließgrenze infolge konstanter Schergeschwindigkeit bei höherer Fließmitteldosierung ab (Tabelle 5-12).

Rezept	Fließmittelgeh. [%]	Fließkurve		Konstante Geschwindigkeit		Frischbetonprüfungen	
		Viskosität [Pas]	Bingham – Fließgrenze [Pa]	Dynamische Fließgrenze [Pa]	Setzfließmaß [mm]	Trichterauslaufzeit [s]	
B3.3	2,40	246,42	7,4178	28,05	670	14,40	
		204,36	12,043	28,91			
		213,08	11,359	26,76			
B3.3b	2,60	142,80	4,7783	16,88	700	9,44	
		135,85	5,1938	18,58			
		132,94	4,4667	16,04			

Tabelle 5-12: Vergleich unterschiedlicher Fließmittelgehalte (je drei Messungen)

5.2.4 Strömungsmechanische Beobachtungen

Im bisherigen Verlauf der Arbeit wurde angenommen, dass es sich beim KMS um eine laminaire Kugelumströmung handelt. Mit Hilfe der gemessenen Viskosität soll diese Annahme in diesem Abschnitt bewiesen werden. Tabelle 5-13 zeigt die nach Formel 4.2 errechneten Reynolds-Zahlen und die nach Formel 4.12 errechneten Bingham-Zahlen für die Betonserie B2 bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Reynolds-Zahlen weit unter der kritischen Zahl 1 liegen und daher die Annahme einer laminaren Strömung bestätigt werden kann. Die Ergebnisse sind aber trotzdem kritisch zu betrachten, da die Herleitung der Reynolds-Zahl nur für Newtonsche Fluide Gültigkeit besitzt. Da es

bislang noch keine Reynolds-Zahl für Bingham-Materialien gibt, ist zudem die Bingham-Zahl mitangegeben.

	Drehzahl [min ⁻¹]	Fließgrenze [N/m ²]	Viskosität [N/m ² s]	Reynolds-Zahl Re [-]	Bingham-Zahl Bm [-]
Rezept B2.1	2	66,1	461,7	1,14*10 ⁻⁵	3,20*10 ⁻⁴
Rezept B2.3	1	38,4	120,5	2,18*10 ⁻⁵	3,57*10 ⁻⁴
	2	29,4	160,5	3,28*10 ⁻⁵	4,10*10 ⁻⁴
	5	25,0	124,7	1,05*10 ⁻⁴	1,12*10 ⁻³
Rezept B2.4	2	10,7	96,3	5,46*10 ⁻⁵	2,49*10 ⁻⁴

Tabelle 5-13: Reynolds-Zahl und Bingham-Zahl für unterschiedliche Betonrezepte und unterschiedliche Drehzahl des KMS

Wie die Reynolds-Zahl beweist, ist die Umströmung der Kugel von der Viskosität und der Geschwindigkeit abhängig. Diese Abhängigkeiten können nicht nur numerisch ausgedrückt werden, sondern sind auch mit dem bloßen Auge erkennbar. Bei hoher Viskosität und langsamer Rotationsgeschwindigkeit konnte beobachtet werden, dass sich eine ausgeprägte Rinne hinter der Kugel bildet, die sich nur langsam schließt. Zudem kam es zu einem Anstauen von Material vor der Kugel. Der Strömungsbereich (Scherbereich) um die Kugel ist dabei relativ gering. Dieser Scherbereich steigt jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit an und entspricht daher entgegen den Aussagen von [Czi12] nicht grundsätzlich dem Radius der Kugel. Folglich ist auch die Richtigkeit der Beziehung $\dot{\gamma} = \frac{v}{d}$ in Frage zu stellen. Durch diese Feststellung kann auch der Unterschied in den Ergebnissen bei den Kugeln mit unterschiedlichen Durchmessern erklärt werden.

Mit abnehmender Viskosität wird die Rinne hinter der Kugel immer kleiner und schließt sich zudem schneller. Die Geschwindigkeit mit der sich die Rinne wieder schließt hängt zudem von der Geschwindigkeit ab, mit der die Kugel durch das Material läuft. Umso schneller die Kugel sich durch das Material bewegt, desto rascher schließt sich die Rinne. Die Dauer bis sich die Rinne schließt, hängt zudem von der Viskosität ab. Bei abnehmender Viskosität konnte zusätzlich ein geringeres Aufstauen von Material vor der Kugel festgestellt werden. Abbildung 5-29 zeigt die eben diskutierten Strömungsbilder bei unterschiedlicher Viskosität und Kugelgeschwindigkeit.

Neben der ungenauen Bestimmung des Scherbereiches haben auch so genannte Totzonen Einfluss auf die Ergebnisse. Unter Totzonen versteht man Bereiche, die von der Strömung nicht oder nur teilweise erfasst werden. In unserem Fall können solche Totzonen vor und hinter der Kugel auftreten. Entsteht infolge hoher Viskosität eine Rinne hinter der Kugel, so kann dies als Totzone bezeichnet werden. Dagegen ist bei niedriger Viskosität die Rinne und somit auch die Totzone kleiner. Diese Totzonen haben nicht nur Auswirkungen auf die Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte, sondern auch auf die Messwerte selbst.



Abbildung 5-29: Umströmung der Kugel bei unterschiedlicher Viskosität und Geschwindigkeit: 1 hohe Viskosität (~ 450 Pas), langsam ($\dot{\gamma} = 0,006$ 1/s); 2 mittlere Viskosität (~ 220 Pas), langsam ($\dot{\gamma} = 0,006$ 1/s); 3 niedrige Viskosität (~ 90 Pas), schnell ($\dot{\gamma} = 0,123$ 1/s); 4 niedrige Viskosität (~ 90 Pas), langsam ($\dot{\gamma} = 0,006$ 1/s)

Die Beobachtungen haben gezeigt, dass das Strömungsbild von einer Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt wird und nicht konstant ist. Auch die Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte ist somit nicht zweifelsfrei möglich.

5.2.5 Korrelation der Messergebnisse mit anderen Messsystemen

5.2.5.1 Allgemein

Um das Kugel-Messsystem mit anderen Systemen oder Rheometern vergleichen zu können, wurden eine Vane Zelle ($h = 130$ mm, $d = 130$ mm) und ein Platte/Platte-Messsystem angefertigt (Abbildung 5-30). Für die Messungen wurde ebenfalls der RheoCT verwendet. Im Gegensatz zum KMS wurde das Widerstandsmoment am oberen Ende des Messsystems aufgenommen. Die Messung des Drehmoments erfolgte konzentrisch. Da es sich um unterschiedliche Messsysteme handelt ist ein direkter Vergleich schwierig. Beim Platte/Platte-Messsystem wurden die Messwerte in Absolut-Werte umgerechnet. Bei der Vane-Zelle wurden dagegen die Messkurven nur qualitativ miteinander verglichen.

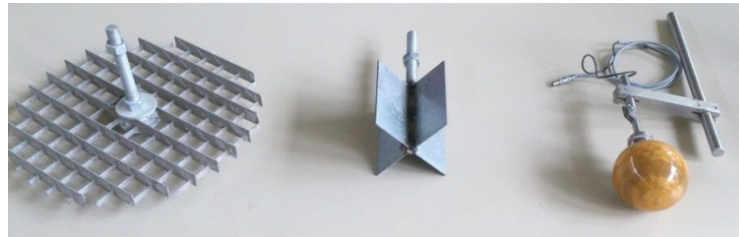


Abbildung 5-30: Platte/Platte-Messsystem, Vane-Zelle und KMS ($d = 95 \text{ mm}$)

Zum direkten Vergleich wurden die gleichen Messprofile (S2 und R2) wie beim KMS angewandt. Die Versuche wurden mit der Betonserie B2 durchgeführt (Tabelle 5-14).

Beton-Nr.		B2.1	B2.3	B2.4
Wassergehalt	kg/m ³	177,7	187,9	192,7
Setzfließmaß	mm	630	790	830
Trichterauslaufzeit	sec	11,1	6,3	4,8
Sedimentation		nein	nein	ja

Tabelle 5-14: Wassergehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Betonserie B2

5.2.5.2 Vane-Zelle

Abbildung 5-31 zeigt den Verlauf des Widerstandsmoments der Vane-Zelle (Abbildung 5-30) bei einer konstanten Geschwindigkeit. Da sich die Vane-Zelle konzentrisch dreht, wird die x-Achse als „Rotation“ bezeichnet. Man kann daraus erkennen, dass der SVB nicht dauerhaft geschert wird, sondern nur eine Drehung um 180° durchgeführt wird. Der Verlauf der Messkurven ähnelt dem des KMS. Ein Plateau stellt sich aber erst ab ca. 120° ein. Unterschiede im Wassergehalt sind deutlich sichtbar. Eine Statische Fließgrenze konnte nicht festgestellt werden.

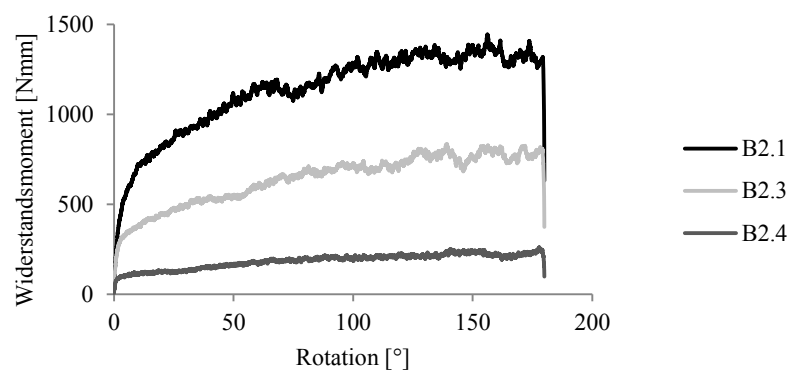


Abbildung 5-31: Vane-Zelle; Widerstandsmoment bei konstanter Geschwindigkeit; Messprofil S2; unterschiedlicher Wassergehalt; Betonserie B2

Um eine Fließkurve innerhalb einer Umdrehung zu erzeugen, wurde analog zum KMS die Geschwindigkeit bis zu einer Umdrehung von 180° gesteigert und bis 380° wieder reduziert. Die Auswertung der Messergebnisse erwies sich bei der Vane-Zelle deutlich schwieriger als

beim KMS. Nur ca. 50 % der Messergebnisse waren verwertbar. Bei den restlichen 50 % ergab sich ein unstetiger Kurvenverlauf mit vielen Ausschlägen. Diese Ausschläge können auf das Wechseln der groben Gesteinskörnung von einer Zelle in die andere erklärt werden, was bei Beobachtung der Messung auch deutlich zu erkennen war.

5.2.5.3 Platte/Platte-Messsystem

Bei den Versuchen mit dem Platte/Platte-Messsystem wurde der Beton zwischen zwei Gitterroste in einen Behälter gefüllt. Der untere Rost war fest und der obere Rost wurde über den RheoCT angetrieben (Abbildung 5-32). Der Abstand der Platten betrug $H = 140 \text{ mm}$, der Durchmesser $D = 340 \text{ mm}$.



Abbildung 5-32: Platte/Platte-Messsystem

Um die Ergebnisse des Platte/Platte-System mit denen der Kugel vergleichen zu können, wurden die Messwerte in Absolut-Werte umgewandelt [Mez10]:

$$\tau = \frac{4 M}{3\pi R^3} \quad (5.1)$$

mit M = gemessenes Widerstandsmoment [Nmm]
 R = Radius Platte [mm]

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi n R}{45 H} \quad (5.2)$$

mit H = Plattenabstand [mm]
 n = Drehzahl [min^{-1}]

Da die Scherrate über den Plattenspalt nicht konstant ist (nimmt von der Mitte nach außen zu), erfolgte die Angabe der Scherrate und der Schubspannung als gemittelte Werte.

Bei der Durchführung der Versuche konnte beobachtet werden, dass eine gleichmäßige Scherung des Materials erst nach einer gewissen Zeit erfolgt. In Abbildung 5-33 sind die Fließkurven des KMS und des Platte/Platte-Messsystems bei gleichem Messablauf dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse nicht identisch, aber in der gleichen Größenordnung liegen. Die Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Messsysteme und die Transformation in Absolut-Werte zurückzuführen. Bei der Auswertung mit dem Bingham-Modell liefern beide Versuche eine ähnliche Fließgrenze. Bei der Viskosität liefert das Platte/Platte-Messsystem

einen doppelt so hohen Wert. Der Unterschied zwischen auf- und absteigenden Ast der Fließkurve beim Platte/Platte-Messsystem kann auf den Scherprozess zurückgeführt werden, der sich deutlich von der Scherung der Kugel unterscheidet.

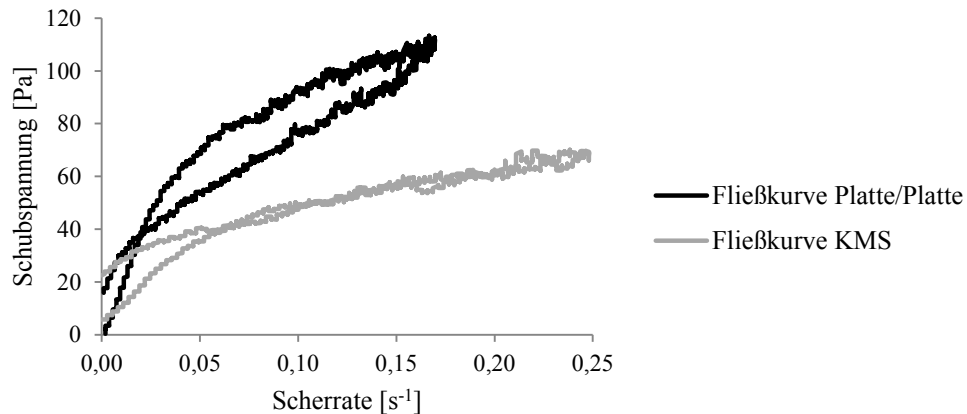


Abbildung 5-33: Vergleich KMS und Platte/Platte-Messsystem; Fließkurve; Messprofil R2; Rezept B2.3

In Abbildung 5-34 ist der Verlauf der Schubspannung bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit für das Platte/Platte-Messsystem für unterschiedliche Betonrezepturen dargestellt. Aus der vorgegebenen Schergeschwindigkeit $n = 0,25 \text{ min}^{-1}$ ergibt sich, nach Einsetzen in Formel (5.2), eine Scherrate $\dot{\gamma} = 0,021 \text{ s}^{-1}$. Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass ab einer Rotation von ca. 35° der Verlauf der Schubspannung nahezu konstant ist. Dies lässt darauf schließen, dass ab diesem Zeitpunkt das Material gleichmäßig geschert wird und der stationäre Zustand erreicht ist.

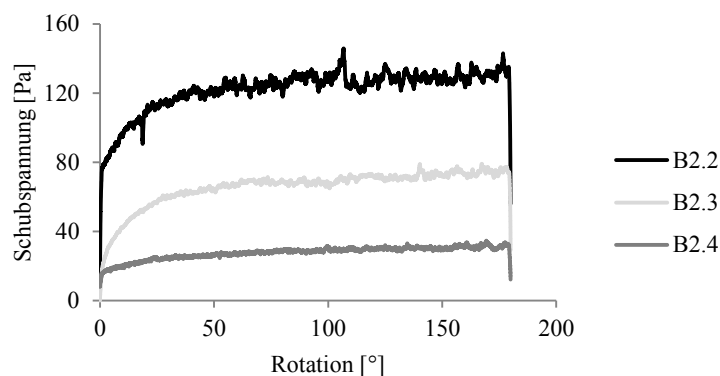


Abbildung 5-34: Platte/Platte-Messsystem; Schubspannung bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit; Messprofil S2; Betonserie B2

Vergleicht man die Ergebnisse des Platte/Platte-Messsystems mit den Ergebnissen des KMS (Abbildung 5-35), so fällt auf, dass die Werte für die Dynamische Fließgrenze beim Platte/Platte-Messsystem um einiges höher sind, obwohl die berechnete Scherrate des KMS ($\dot{\gamma} = 0,031 \text{ s}^{-1}$) größer ist als beim Platte/Platte-Messsystem ($\dot{\gamma} = 0,021 \text{ s}^{-1}$). Auch hier zeigt sich, dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist.

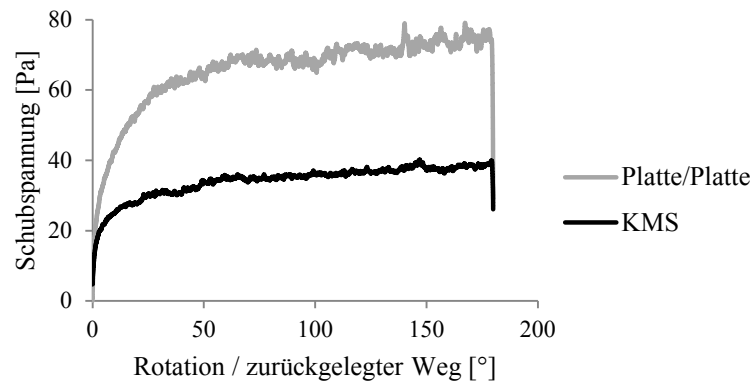


Abbildung 5-35: Vergleich KMS und Platte/Platte-Messsystem; Schubspannung bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit; Messprofil S2; Rezept B2.3

Ein Vergleich des Kugel-Messsystems mit anderen Betonrheometern ist prinzipiell schwierig, da sich die Messsysteme komplett unterscheiden und die Berechnung der Absolut-Werte unterschiedliche Ergebnisse liefert. Dennoch ist der Verlauf der Fließkurve und der Schubspannung bei konstanter Belastung mit anderen Systemen vergleichbar.

5.3 Fazit

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass das Kugel-Messsystem bei Selbstverdichtenden Betonen angewendet werden kann. Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

Möglichkeiten des KMS:

- Fließkurve innerhalb einer Umdrehung
 - Statische Fließgrenze: Übergang vom linear-elastischen Bereich in den plastischen Bereich beim aufsteigenden Ast der Fließkurve
 - Bingham-Fließgrenze: Auswertung des absteigenden Astes der Fließkurve mit dem Bingham-Modell
 - Bingham-Viskosität: Auswertung des absteigenden Astes der Fließkurve mit dem Bingham-Modell
 - Tatsächlichen Fließgrenze: Ende des absteigenden Astes der Fließkurve
- Verlauf der Schubspannung bei konstanter Scherbelastung
 - Statische Fließgrenze zu Beginn der Kurve
 - Dynamische Fließgrenze nach kurzer Einregelzeit

Bewertung des Kugel-Messsystems

- Messprofile
 - Die Prüfgeschwindigkeiten entsprechen den Fließgeschwindigkeiten von SVB in der Praxis
 - Die Messung erfolgt stets im frischen, ungescherten Material
 - Der absteigende Ast der Fließkurve wird im ungescherten Material gemessen und nicht wie bei Rotationsrheometern im gescherten Material
- Bestimmung der rheologischen Parameter
 - Die Bestimmung der Fließgrenze mit dem Bingham-Modell ist zu ungenau.
 - Besser: Dynamische Fließgrenze bei konstanter Schergeschwindigkeit
 - Die Bingham-Viskosität liefert gute Ergebnisse
 - Um die aussagekräftigsten Ergebnisse zu erzielen, soll ein Messprofil gewählt werden, bei dem innerhalb einer halben Umdrehung die Dynamische Fließgrenze bei konstanter Schergeschwindigkeit und innerhalb einer weiteren halben Umdrehung die Viskosität bei abnehmender Geschwindigkeit bestimmt werden kann
- Einfluss der Geschwindigkeit:
 - Mit dem KMS lässt sich vor allem der Bereich niedriger Scherraten/Schergeschwindigkeiten sehr gut bewerten
 - Die Geschwindigkeit beeinflusst sowohl die Fließgrenze als auch die Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit
- Vergleich unterschiedlicher Fließgrenzen
 - Die Statische Fließgrenze bei der Fließkurve ist höher als die Bingham-Fließgrenze und die Tatsächliche Fließgrenze
 - Die Statische Fließgrenze infolge konstanter Schergeschwindigkeit wird sowohl von der Messgeschwindigkeit als auch vom Strukturaufbau beeinflusst
- Variation Betonrezeptur
 - Unterschiede bei der Betonrezeptur sind messbar
 - Wassergehaltsschwankungen von 3 l/m³ können nachgewiesen werden
- Strömungsmechanische Betrachtung
 - Laminare Strömung
 - Viskosität und Messgeschwindigkeit beeinflussen das Strömungsbild
 - Die Scherfläche ist nicht konstant
 - Einfluss von Totzonen auf die Messergebnisse
- Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte
 - Die Umwandlung der Messwerte in rheologische Absolut-Werte ist zu ungenau und muss kritisch bewertet werden
 - Keine Übereinstimmung der Absolut-Werte bei Kugeln unterschiedlicher Durchmesser
- Reproduzierbarkeit
 - bei Wiederholungsmessungen nach kurzem Aufmischen der Probe und
 - bei neuer Herstellung der Mischung
- Vergleich der rheologischen Parameter mit Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit
 - Die rheologischen Parameter korrelieren mit Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit

- Der Zusammenhang ist nicht linear
- Vergleich KMS mit andern Messsystemen
 - Ein direkter Vergleich mit anderen Betonrheometern ist nur bedingt möglich
 - Rheologische Werte für SVB liegen im Bereich anderer Rheometer
 - Wegen der ungenauen Umwandlung von Mess- in Absolut-Werte ist keine exakte Übereinstimmung möglich
 - Dem RheoCT liegt ein komplett anderes Messsystem zu Grunde wie anderen Betonrheometern (keine anhaltende Scherung der Probe)

Nachteile, die das KMS mit sich bringt:

- Die Messung muss nach einer Umdrehung abgeschlossen sein, da ab der zweiten Umdrehung in bereits geschertem Material gemessen wird und bei etwas steiferem Beton sich eine „Rinne“ bildet, bei der die grobe Gesteinskörnung nach außen verdrängt wird
- Eine durchgehende Scherung ist nicht möglich
- Ein Strukturbruch im gesamten Material infolge einer Scherbelastung wie bei anderen Rotationsrheometern kann nicht erzeugt werden. Dies muss getrennt mit einem Mischer oder Handrührgerät erfolgen
- Die maximale Schergeschwindigkeit ist stark eingeschränkt
- Einzelne Ausschläge in Folge von Partikelkollisionen können die Messergebnisse stark beeinflussen

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um die rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone besser verstehen zu können, wurden in dieser Arbeit eingangs die Grundlagen der klassischen Rheologie sowie der Rheologie komplexer Fluide erklärt. Das Fließverhalten Selbstverdichtender Betone ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. Vor allem die Wechselwirkungskräfte und das Anfangsstadium der Hydratation sind dabei von enormer Bedeutung. Eine Gegenüberstellung mit Zementleim, Mörtel und Rüttelbeton machte die Merkmale Selbstverdichtender Betone deutlich und wies auf die Problematiken bei der Bestimmung der rheologischen Eigenschaften hin.

Aufgrund der besonderen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone ist die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften deutlich schwieriger als bei anderen Stoffen. Vor allem die fortschreitende Veränderung des Materials infolge von Hydratation und verschiedener Wechselwirkungskräfte kann die Messung stark beeinflussen. Zudem handelt es sich beim SVB um eine inhomogene Suspension mit sehr großen Partikeln. Diese Besonderheiten wirken sich stark auf Messungen mit Rotationsrheometern aus. Die Bedingungen, die an die klassische Rheologie gestellt sind, können in diesem Fall nicht eingehalten werden. Dies hat zur Folge, dass die verwendeten Rheometer von der Ausführung und Abmessung klassischer Rheometer stark abweichen. Aus diesem Grund handelt es sich bei den meisten Betonrheometern um Relativ-Messsysteme. Die Strömung die dabei erzeugt wird weicht stark von der laminaren Schichtenströmung und somit vom Zwei-Platten-Modell ab. Eine Darstellung der rheologischen Kennwerte in rheologisch-richtigen Einheiten (Absolut-Werte) ist daher nicht möglich. Trotz alledem werden die gemessenen Widerstandsmomente oder Widerstandskräfte in Absolut-Werte umgerechnet. Durch Vergleichsmessung und diverse Herleitungen wird versucht einen Zusammenhang zwischen Messwerten und Absolut-Werten herzustellen. Das größte Problem liegt dabei in der Existenz einer Fließgrenze. Kalibrierflüssigkeiten existieren nur für Newtonsche Fluide. Auch sind bei diesen Stoffgruppen die physikalischen Fließgesetze ausführlicher untersucht als bei Nichtnewtonschen Fluiden. Ein Vergleich unterschiedlicher Rheometer ist aufgrund unterschiedlicher Bauart und Umwandlung von Messwerte in Absolut-Werte schwierig. Bei gleicher Rezeptur und Versuchsbedingung liefern die Rheometer dabei abweichende Ergebnisse. Eine weitere Eigenschaft existierender Betonrheometer ist die permanente Scherung des Betons und der damit verbundenen Strukturänderung. Die Ergebnisse sind somit stark von Art und Dauer der Scherung abhängig und spiegeln meist nicht das, in der Praxis auftretende, Fließverhalten von SVB wieder.

Aufgrund dieser Gegebenheiten wurde das Ziel verfolgt, ein Betonrheometer zu entwickeln, dass die Veränderung der Messsubstanz infolge einer permanenten Scherung ausschließt und nur eine geringe Belastung in Form einer langsamen Bewegung aufbringt. Dabei sollten die wichtigsten rheologischen Kennwerte wie Viskosität und Fließgrenze bestimmt werden.

Ein bereits existierendes Messsystem das eine Lösung für das gesetzte Ziel liefert ist das Kugel-Messsystem (KMS). Bei diesem Messsystem bewegt sich eine Kugel auf einer Kreisbahn durch das Material und nimmt das dabei auftretende Widerstandsmoment auf.

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Adaption des Kugel-Messsystem für die Anwendung bei Selbstverdichtenden Betonen.

Mit dem Kugel-Messsystem war es möglich, eine Fließkurve mit variierender Geschwindigkeit und einen Verlauf der Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit zu erzeugen, mit denen die Fließgrenze sowie die Viskosität bestimmt werden konnten. Bei der Bestimmung der Fließgrenze wurden unterschiedliche Auswertmethoden angewandt und die Ergebnisse miteinander verglichen und ausführlich diskutiert. Von großer Bedeutung war außerdem die Geschwindigkeit mit der die Kugel durch das Material fährt. Die Versuche haben gezeigt, dass die Geschwindigkeit einen großen Einfluss auf den Verlauf der Messkurve und die Ergebnisse hat. An verschiedenen Betonrezepturen wurde das Kugel-Messsystem verifiziert. Somit konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Gerät verlässliche Ergebnisse liefert und Unterschiede in der Betonrezeptur und dem Messzeitpunkt deutlich sichtbar sind. Parallel dazu wurden das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit gemessen und die Ergebnisse mit den rheologischen Kennwerten verglichen. Ein Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Setzfließmaß sowie zwischen Viskosität und Trichterauslaufzeit war deutlich zu erkennen.

Neben der Beurteilung der Messwerte war auch die Betrachtung der Strömung ein wesentlicher Bestandteil. Die Beobachtungen haben gezeigt, dass das Strömungsbild sowohl von der Geschwindigkeit als auch von der Viskosität abhängt. Eine theoretische Betrachtung der Strömung stellte sich allerdings als schwierig heraus, da neben der Viskosität eine Fließgrenze vorhanden ist, für die u. a. keine Reynolds-Zahl existiert. Die Existenz einer Fließgrenze machte auch die Umwandlung der Messwerte in Absolut-Werte schwierig. Die Versuche haben gezeigt, dass die Absolut-Werte im Bereich anderer Betonrheometer liegen, jedoch wurde beim Vergleich unterschiedlicher Kugeldurchmesser deutlich, dass die Werte nicht übereinstimmen.

Insgesamt lieferte das, auf der Grundlage des Kugel-Messsystems entwickelte Betonrheometer sehr gute Ergebnisse. Die Bestimmung der wichtigsten rheologischen Kennwerte war durchwegs erfolgreich und eine Bewertung unterschiedlicher Betonrezepturen möglich.

Das Kugelmesssystem soll im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts in den Mischer eines Fertigteilwerks eingebaut werden. Das Messgerät soll dabei in einer kurzen Mischpause die wichtigsten rheologischen Kennwerte ermitteln und mit einem zuvor festgelegten Soll-Wert abgleichen. Dem Mischmeister soll dann automatisch mitgeteilt werden, ob der SVB die geforderten Eigenschaften einhält oder nicht. Der Hintergrund für diese Idee liegt in der schwierigen Herstellung Selbstverdichtender Betone. Bereits kleinste Schwankungen in den Ausgangsstoffen (vor allem der Feuchtegehalt der feinen Gesteinskörnung) führen zu einer erheblichen Veränderung der Frischbetoneigenschaften. Eine Beurteilung der Leistungsaufnahme des Mixers, wie es bei konventionellem Rüttelbeton üblich ist, liefert bei Selbstverdichtenden Betonen zu ungenaue Ergebnisse und lässt eine Aussage über die Frischbetonqualität nicht zu. Aufgrund der Angaben über den Ist-Zustand der rheologischen Eigenschaften im Mischer soll eine (automatische) Nachdosierung erfolgen. Auf diese Weise soll ein optimales Ergebnis bei der Herstellung von SVB erreicht werden. Um solche Regelmechanismen zu entwickeln, ist noch weitere Forschungsarbeit notwendig.

Um die Umströmung einer Kugel in einem Bingham-Fluid besser verstehen und die Messwerte besser in Absolut-Werte umrechnen zu können, ist eine weiterführende Forschung auf diesem Gebiet dringend notwendig. Nicht nur bei der umströmten Kugel bedarf es an Arbeit, sondern auch die Rheologie Selbstverdichtender Betone muss weiterhin intensiv betrachtet werden.

Obgleich sowohl die Rheologie als auch der Beton auf eine lange Vergangenheit zurückblicken können, so befindet sich die Betrachtung der Kombination dieser beider Thematiken doch erst am Anfang.

„Pánta chorei kai oudèn ménei - Alles bewegt sich fort und nichts bleibt.“ (Platon)

Literatur

- [Ada13] Adams, N. A.: *Vorlesungsskript* (2013). Abgerufen am 12. März 2013, http://www.aer.mw.tum.de/fileadmin/tumwaer/www/pdf/lehre/fluidmechanik1/2012-sm/Vorlesung-mit-Notizen/VL11_Folien_fertig.pdf.
- [Ban81] Banfill, P.: *On the viscometric examination of cement pastes*. Cement and Concrete Research 11, S. 363-370, 1981.
- [Ban92] Banfill, P.; Hornung, F.: *Zweipunktmessung im ViscoCorder*. Beton - Verlag Bau und Technik, Nr. 42, S. 84-88, 1992.
- [Ban93] Banfill, P.: *Structure and rheology of cement-based systems*. Material Research Soc. Symp. Proc., Nr. 289, S. 149-161, 1993.
- [Ban94] Banfill, P.: *Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials*. Construction and Building Materials, 1994.
- [Ban97] Banfill, P.: *Rheology of Fresh Cement Paste*. Annual Transactions of the Nordic Rheology Society, 1997.
- [Ban03] Banfill, P.: *The Rheology of fresh cement and concrete - a review*. 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, 2003.
- [Ban04] Banfill, P.: *Die Rheologie von Frischzement und Beton*. BetonWerk International, 2004.
- [Bar85] Barnes, H. A.; Walters, K.: *The yield stress myth*. Rheological Acta, Nr. 24, S. 323-326, 1985.
- [Bar89] Barnes, H. A.; Hutton, J. F.; Walters, K.: *An introduction to rheology*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1989.
- [Bar99] Barnes, H. A.: *The yield stress - a review*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, S. 133-178, 1999.
- [Bau10] Baumert, C.; Garrecht, H.: *Mischen von Hochleistungsbetonen*. Beton- und Stahlbetonbau, Nr. 105, Heft 6, 2010.
- [Bea94] Beaupré, D.: *Rheology of High Performance Shotcrete*. PhD Thesis, University of British Columbia, Canada, 1994.
- [Ber85] Beris, A.; Tsamopoulos, J.; Armstrong, R.; Brown, R.: *Creeping motion of a sphere through a Bingham plastic*. Journal of Fluid Mechanics, Nr. 158, S. 219-244, 1985.
- [Bil99] Billberg, P.: *Self-compacting concrete for civil engineering structures - the swedish experience*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI report 2:99, 1999.
- [Bil99b] Billberg, P.: *Fine mortar rheology in mix design of SCC*. Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, 1999.

- [Bil05] Billberg, P.: *Development of SCC static yield stress at rest and its effect on the lateral form pressure*. Proceedings of the Second North American Conference in the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, USA, 2005.
- [Bla02] Blask, O.: *Zur Rheologie von polymermodifizierter Bindemittelleimen und Mörtelsystemen*. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, Siegen, 2002.
- [Boh08] Bohl, W.; Elmendorf, W.: *Technische Strömungslehre*. 14. Auflage, Vogel Fachbuch, Würzburg, 2008.
- [Böh00] Böhme, G.: *Strömungsmechanik nichtnewtonscher Fluide*. 2. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, 2000.
- [Bös10] Böswirth, L.: *Technische Strömungslehre*. 8. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [Bra01] Brameshuber, W.; Uebachs, S.; Eck, T.: *Betontechnologische Grundlagen des Selbstverdichtenden Betons*. In: König; Holschemacher; Dehn: *Selbstverdichtender Beton*, S. 11-23, Bauwerk, 2001.
- [Bra04] Brameshuber, W.: *Selbstverdichtender Beton*. In: Schriftenreihe Spezialbetone, Nr. 5, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2004.
- [Bre01] Breitenbücher, R.: *Selbstverdichtender Beton - Chancen und Voraussetzungen*. Beton - Verlag Bau und Technik, 2001.
- [Cha01] Chang, P.; Peng, Y.: *Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete*. Cement and Concrete Research, Nr. 31, S. 87-95, 2001.
- [Chi85] Chiocchio, G.; Paolini, A. E.: *Optimum Time for Adding Superplasticizers to Portland Cement Pastes*. Cement and Concrete Research, Nr. 15, 1985.
- [Chr09] Christmeier, P.; Hartmeier, M.: *Zement und PCE für unterschiedliche Betonieraufgaben*. Zement und Beton, S. 26-27, 2009.
- [Con08] Convi: *Convi Visco Probe 1*, Abgerufen am 25. August 2010, <http://www.convi.dk/tysk/home.htm>.
- [Con09] Convi: *Bedienungs und Service Handbuch Visco Probe* (2009). Abgerufen am August 2010, http://www.convi.dk/Dokumentation/10100d_6.pdf.
- [Cou12] Coussot, P.: *Introduction to the rheology of complex fluids*. In: Roussel, N.: *Understanding the rheology of concrete*, Woodhead Publishing Limited, Oxford, 2012.
- [Czi12] Czichos, H.; Hennecke, M.: *Hütte - Das Ingenieurwissen*. 24. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2012.
- [Dob06] Dobrinski, P.; Krakau, G.; Vogel, A.: *Physik für Ingenieure*. 11. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006.

- [Dzu85] Dzuy, N. Q.; Boger, D. V.: *Direct Yield Stress measurement with the Vane Method*. Journal of Rheology, S. 335-347, 1985.
- [Ebe13] Ebersbach, S.: *Rheologische Messungen an selbstverdichtenden Mörteln - Bewertung und Optimierung des Kugelmesssystems*. Masterarbeit, Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen, 2013.
- [Est12] Estellé, P.; Lanos, C.: *High Torque Vane Rheometer for concrete: principle and validation from rheological measurements*. Applied Rheology, S. 12881, 2012.
- [Eve92] Everett, D. H.; Findenegg, I.: *Grundzüge der Kolloidwissenschaft*. Dietrich Steinkopf Verlag, 1992.
- [Fer98] Ferraris, C. F.; De Larrard, F.: *Testing and modelling of fresh concrete rheology*. NIST-Report 6094, National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [Fer01] Ferraris, C. F.; Brower, L. E.: *Comparison of Concrete Rheometers – International Tests at LCPC*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Report NISTIR 6819, Gaithersburg, USA, 2001.
- [Fer12] Ferraris, C. F.; Martys, N.: *Concrete Rheometers*. In: N. Roussel, Understanding the Rheology of Concrete, Woodhead Publishing, Oxford, 2012.
- [Fer03] Ferraris, C. F.; Martys, N.: *Relating fresh concrete viscosity measurements from different rheometers*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Nr. 8, 2003.
- [Fer13] Ferraris, C. F.; Martys, N. S.; George, W. L.: *Development of Standard Reference Materials for Cement-Based Materials*. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2013.
- [Fey09] Feys, D.; Verhoeven, R.; De Schutter, G.: *Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?* Cement and Concrete Research, Nr. 39, S. 510-523, 2009.
- [Fey13] Feyes, D.; Khayat, K. H.: *Comparing Rheological Properties of SCC Obtained with the ConTec and ICAR Rheometers*. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2013.
- [Fla74] Flatten, H.; von Berg, W.: *Überlegungen zum Verformungsverhalten von Feinmörtel und Frischbeton*. Betonwerk + Fertigteiltechnik, Nr. 7, S. 469-475, 1974.
- [Fla12] Flatt, R.; Schober, I.: *Superplasticizers and the rheology of concrete*. In: Roussel, N.: Understanding the Rheology of Concrete, Woodhead Publishing, Oxford, 2012.
- [Fle11] Fleischmann, F.; Kusterle, W.: *The assessment and control of the flowability of Self-Compacting Concrete*. Rheologie Kolloquium Regensburg, Onlinepublikation: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie>, Regensburg, 2011.

- [Fle12] Fleischmann, F.; Kusterle, W.: *Das Betonrheometer BT2 zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone - Möglichkeiten und Entwicklungspotential*. Rheologie Kolloquium Regensburg, Onlinepublikation: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie>, Regensburg, 2012.
- [Fle13] Fleischmann, F.; Kusterle, W.: *A new concrete rheometer for the assessment of the rheological properties of Self-Compacting Concrete*. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete - SCC2013, Chicago, 2013.
- [Fle13b] Fleischmann, F.; Greim, M.; Kusterle, W.: *The Assessment and Control of the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete in a Concrete Mixer*. Proceedings of the 1st International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, Paris, 2013.
- [Geh98] Gehm, L.: *Rheologie - Praxisorientierte Grundlagen und Glossar*. Vincentz Verlag, Hannover, 1998.
- [Gol07] Golaszewski, J.: *Rheologie von frischem Mörtel und frischen Betonmischungen*. Betonwerk + Fertigteiltechnik, S. 42-51, 2007.
- [Gom03] Gompper, G.; Dhont, J.; Richter, D.: *Was ist Weiche Materie? Komplexe Materialien auch mesoskopischer Skala*. Physik in unserer Zeit 34(1), S. 12-38, 2003.
- [Gre04] Greim, M.: *Alles fließt - Baustoff-Rheometrische Messverfahren und ihre Grenzen*. Internetveröffentlichung der Beiträge zum 13. Kolloquium und Workshop über Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen, Regensburg, 2004.
- [Gru00] Grube, H.; Rickert, J.: *Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton*. Betontechnische Berichte, S. 3-8, 2000.
- [Grü01] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: *Beton, Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Ausgabe, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001.
- [Hai10] Haist, M.: *Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen*. Dissertation, Karlsruhe Institut of Technology (KIT), Karlsruhe, 2010.
- [Här03] Härig, S.; Klausen, D.; Hoscheid, R.: *Technologie der Baustoffe*. C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2003.
- [Hau04] Hauck, H. G.: *Fließmittel der neuen Generation für die Transportbetonindustrie*. Beton - Verlag Bau und Technik, Nr. 3, 2004.
- [Hel80] Helmuth, R. A.: *Structure and Rheology of Fresh Cement Paste*. 7. International Congress Chemistry and Cement, Paris, 1980.
- [Hil05] Hillemeier, B.: *Spezialbetone*. In: Bergmeister, K.; Wörner, J. D.: *Betonkalender 2006*, Ernst und Sohn Verlag, 2005.

- [Hil06] Hillemeier, B.: *Selbstverdichtender Beton als kostengünstige und produktive Methode für den Hochbau, das Bauen im Bestand und die stationäre Vorfertigung*. Fraunhofer IRB Verlag, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiete Baustoffe und Baustoffprüfung, Technische Universität Berlin, Abschlussbericht, Stuttgart, 2006.
- [Hoe06] Hoevelling, H.: *Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB)*. Dissertation, Universität Hannover, Institut für Baustoffe, Hannover, 2006.
- [Hol03] Holzer, L.; Winnefeld, F.; Lothenbach, B.; Zampini, D.: *The early cement hydration: a multi-method approach*. 11th International Congress on the Chemistry of Cement, S. 330-339, 2003.
- [Jin02] Jin, J.: *Properties of mortar for self-compacting-concrete*. PhD Thesis, University of London, London, 2002.
- [Jun13] Junglas, P.: Vorlesung Strömungslehre. <http://www.peter-junglas.de/fh/vorlesungen/stroemungslehre2/images/bild54.png>. Abgerufen am 13. März 2013.
- [Kai74] Kaier, W.: *Untersuchungen an Zementsuspensionen*. Zement-Kalk-Gips International 27, S. 565-569, 1974.
- [Kec97] Keck, H. J.: *Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen*. Dissertation, Universität Essen, 1997.
- [Kec97b] Keck, H. J.; Setzer, M. J.: *Modellvorstellung vom Verhalten der Zementleimstruktur unter Scherbeanspruchung*. 13. ibausil, S. 0187, Weimar, 1997.
- [Kha99] Khayat, K. H.: *Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete*. ACI Materials Journal, S. 346-353, 1999.
- [Kha12] Khayat, K. H.; Mikanovic, N.: *Viscosity-enhancing admixtures and the rheology of concrete*. In: Roussel, N.: *Understanding the Rheology of Concrete*, Woodhead Publishing, Oxford, 2012.
- [Koe03] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: *Summary of Concrete Workability Test Methods*. The University of Texas at Austin, International Center for Aggregates Research, 2003.
- [Koe04] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: *Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete*. The University of Texas at Austin, International Center for Aggregates Research, 2004.
- [Koe08] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: *Static and Dynamic Yield Stress Measurement of SCC*. Proceedings of SCC 2008, Chicago, 2008.
- [Koe09] Koehler, E. P.: *Test Methods for Workability and Rheology of Fresh Concrete*. ACI Fall Convention, 2009.
- [Kor03] Kordts, S.; Breit, W.: *Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton*. Betontechnische Berichte, S. 113-124, 2003.

- [Kor05] Kordts, S.: *Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005.
- [Kov11] Kovler, K.; Roussel, N.: *Properties of fresh and hardened concrete*. Cement and Concrete Research, S. 775-792, 2011.
- [Kre85] Krell, J.: *Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung*. Schriftenreihe der Zementindustrie, 1985.
- [Kup97] Kupfer, K.: *Materialfeuchtemessung - Grundlagen, Messverfahren, Applikationen, Normen*. Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1997.
- [Kus12] Kusterle, W.; Fleischmann, F.; Christmaier, P.: *Ein neues Beurteilungsverfahren der Konsistenz von Selbstverdichtenden Betonen*. Forschungskolloquium des VÖZfi, Onlinepublikation: <http://www.zement.at/index.php/service/publikationen/kolloquium>, Wien, 2012.
- [Lam31] Lamb, H.: *Lehrbuch der Hydrodynamik*. 2. Auflage, Teubner Verlag, Leipzig, 1931.
- [Lar97] Larrard, F.: *A new rheometer for soft-to-fluid fresh concrete*. ACI Materials Journal 94, S. 234-243, 1997.
- [Lar98] Larrard, F.; Ferraris, C.; Sedran, T.: *Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material*. Materials and Structures, S. 494-498, 1998.
- [Lee07] Leemann, A.; Winnefeld, F.: *The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete*. Cement and Concrete Composites, Nr. 29, S. 341-349, 2007.
- [Lee09] Leemann, A.: *Mischrezepturen für selbstverdichtenden Beton - vom Labor zum Betonwerk*. BWI-BetonWerk International, Nr. 3, S. 66-68, 2009.
- [Leg80] Legrand, C.: *L'état flocculent des pâtes de ciment avant prise et ses conséquences sur le comportement rhéologique*. CR 15ème Coll. GFR, 1980.
- [Loh04] Lohaus, L.; Höveling, H.; Schießl, P.; Lowke, D.: *Eigenschaften Selbstverdichtender Betone*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2004.
- [Loi06] Loimer, T.: *Ein- und Mehrphasenströmungen*. Vorlesungsskript, Technische Universität Wien, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Wien, 2006.
- [Low05] Lowke, D.; Plötz, M.; Schießl, P.: *Optimierung des Mischablaufs für Selbstverdichtende Betone*. Beton - Verlag Bau und Technik, Nr. 2005/5, 2005.
- [Low09] Lowke, D.; Kränkel, T.; Schießl, P.: *Optimization of powder fineness and water/powder ratio to improve segregation resistance of SCC*. Proceedings of the Second International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete - SCC'2009, Beijing, China, 2009.

- [Low10] Lowke, D.; Kränkel, T.; Gehlen, C.: *Effekt of cement on super plasticizer adsorption, yield stress, thixotropy and segregation resistance*. Proceedings of SCC2010, S.91-102, Springer Verlag, Montreal, Canada, 2010.
- [Low13] Lowke, D.: *Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone - Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen*. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, München, 2013.
- [Maz08] Mazanec, O.; Schießl, P.: *Mixing Time Optimisation for UHPC*. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, 2008.
- [Mez10] Mezger, T. G.: *Das Rheologie Handbuch*. Vincentz Network, Hannover, 2010.
- [Neu12] Neumann, T.: *Einflüsse auf die Pumpbarkeit von Beton*. Beton - Verlag Bau und Technik, Nr. 5/2012, S. 166-171, 2012.
- [Ngu83] Nguyen, Q. D.; Boger, D. V.: *Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions*. Journal of Rheology, Nr. 27, S. 32-349, 1983.
- [Nie12] Nielsen, N. H.; et al: *Measuring and adjusting rheological parameters*. 21. Kolloquium Rheologische Messungen an Mineralischen Baustoffen, Regensburg, 2012.
- [Nol12] Nold, P.: *Warum mischen nicht alle Beton-Mischer "gut"?* BFT International, Nr. 01, 2012.
- [Oka93] Okamura, H.; Maekawa, K.; Ozawa, K.: *High Performance Concrete*. Gihodo Shuppan, 1993.
- [Oka95] Okamura, H.; Ozawa, K.: *Mix Design for Self-Compacting Concrete*. Concrete Library of JSCE No. 25, 1995.
- [Oka00] Okamura, H.; Ozawa, K.; Ouchi, M.: *Self-compacting concrete*. Structural Concrete, Nr. 1, 2000.
- [Org06] Orgass, M.; Dehn, F.: *Einfluss der Mischtechnik bei Hochleistungsbetonen*. BFT International, Nr. 2006/1, 2006.
- [Ots80] Otsubo, Y.; Miyai, S.; Umeya, K.: *Time-dependent flow of cement pastes*. Cement and Concrete Research 10, S. 631-638, 1980.
- [Ova12] Ovarlez, G.: *Introduction to the rheometry of complex suspensions*. In: Roussel, N.: Understanding the rheology of concrete, Woodheas Publishing Limited, Oxford, 2012.
- [Phy13] Physikalisches Institut der Universität Stuttgart: *Vorlesungsversuche Strömungsapparat*. <http://www.pi1.physik.uni-stuttgart.de/teaching/Vorlesungsversuche/V332.html>, Abgerufen am 27. Januar 2013.
- [Pla06] Plank, J.; Bassioni, G.; Dai, Z., ; Keller, H.; Sachsenhauser, B.; Zouaoui, N.: *Neues zur Wechselwirkung zwischen Zementen*. Ibausil, Weimar, 2006.

- [Pow68] Powers, T. C.: *The Properties of Fresh Concrete*. John Wiley & Sons, New York, 1968.
- [Pun02] Puntke, W.: *Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken*. Beton - Verlag Bau und Technik, 2002.
- [Ram84] Ramachandran, V. S.: *Concrete Admixtures Handbook - Properties. Science and Technology*. Noyes Publications, New Jersey, 1984.
- [Rin08] Rings, K.: *Selbstverdichtender Beton*. Erweiterte Betontechnologische Ausbildung nach DIN 1045, Ausbildungsunterlagen Bayerische Bauakademie, 2008.
- [Rou05] Roussel, N.; Coussot, P.: *Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: from slump to spreading flow*. Journal of Rheology, Nr. 49(3), S. 705-718, 2005.
- [Rou06] Roussel, N.: *A theoretical frame to study stability of fresh concrete*. Materials and Structures 39, S. 81-91, 2006.
- [Rou12] Roussel, N.: *Understanding the Rheology of Concrete*. Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [Saa01] Saak, A.; Jennings, H.; Shah, S.: *New methodology for designing self-compacting concrete*. ACI Materilas Journal 98 (6), S. 429-439, 2001.
- [Sch03] Schatzmann, M.; Fischer, P.; Bezzola, G.: *Rheological behaviour of fine and large particle suspensions*. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Nr. 129, S. 796-803, 2003.
- [Sch05] Schatzmann, M.: *Rheometry for large particle fluids and debris flows*. Eigenverlag, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie, Zürich, 2005.
- [Sch09] Schatzmann, M.; Bezzola, G. R.; Minor, H.; Windhab, E. J.; Fischer, P.: *Rheometry for large-particulated fluids: analysis of the ball measuring system and comparison to debris flow rheometry*. Rheol Acta, 2009.
- [Sch02] Schleibinger Geräte GmbH : *Grundlagen der Rheologie*. Workshop Rheologische Messungen, Regensburg, 2002.
- [Sch12] Schleibinger Geräte GmbH: *Schleibinger Testing Systems*, Abgerufen am 6. August 2012, http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:BT_-_SCC_Rheometer_f%FCr_Frischbeton.
- [Sch07] Scholz, W.; Knoblauch, H.; Hiese, W.: *Baustoffkenntnis*. 16. Auflage, Werner Verlag, Köln, 2007.
- [Sch95] Schramm, G.: *Einführung in Rheologie und Rheometrie*. HAAKE Rheometer, Karlsruhe, 1995.
- [Sch99] Schröder, W.: *Fluidmechanik*. 1. Auflage, Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, Aachen, 1999.

- [Sch73] Schubert, H.: *Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen*. Chemie-Ingenieur Technik, S. 396-401, 1973.
- [Sig12] Sigloch, H.: *Technische Fluidmechanik*. Springer Verlag, Heidelberg, 2012.
- [Spa98] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: *Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel*. Beton - Verlag Bau und Technik, 1998.
- [Spr07] Springenschmid, R.: *Betontechnologie für die Praxis*. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 2007.
- [Sta00] Stark, J.; Wicht, B.: *Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff*. Bau Praxis Birkhäuser, Weimar, 2000.
- [Ste10] Steinbrück, H.: *Ein- und Mehrphasenströmung*. Vorlesungsskript, Technische Universität Wien, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, 2010.
- [Suc75] Sucker, D.; Brauer, H.: *Fluiddynamik bei quer angeströmten Zylindern*. In: Wärme und Stoffübertragung, Ausg. 8, S. 149-158, 1975.
- [Tak11] Takahashi, K.; Bier, T.; Westphal, T.: *Effects of mixing energy on technological properties and hydration kinetics of grouting mortars*. Cement and Concrete Research, Nr. 41, 2011.
- [Tan00] Tanner, R.: *Engineering Rheology*. Oxford engineering science 52, 2000.
- [Tat55] Tattersall, G.: *The rheology of portland cement pastes*. British Journal of Applied Physics, Nr. 6, 1955.
- [Tat83] Tattersall, G.; Banfill, P. F.: *The Rheology of Fresh concrete*. Pitmann Advanced Publishing Program, Boston, London, Melbourne, 1983.
- [Tat91] Tattersall, G.: *Workability and Quality-Control of Concrete*. Routledge Chapman & Hall, London, 1991.
- [Teu81] Teubert, J.: *Die Messung der Konsistenz von Betonmörtel und ihre Bedeutung für die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons*. Betonwerk und Fertigteil-Technik, 1981.
- [Teu82] Teubert, J.; Kilian, G.: *Konsistenzmessungen am Zementmörtel mittels eines Rotationsviskosimeters*. Beton - Verlag Bau und Technik, S. 103-107, 1982.
- [Teu95] Teubert, O.; Greim, M.: *Verfahren zum Messen des Fließverhaltens grobkörniger Stoffgemenge*, DE 19503028 B4, Deutschland, 1995.
- [Thi98] Thielen, G.; Spanka, G.; Grube, H.: *Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel*. Beton - Verlag Bau und Technik, S. 61-68, 1998.
- [Tyr97] Tyrach, J.; Müller, M.; Brunn, P.: *Kugelmesssystem zur Messung von rheologischen Größen von fließfähigen Baustoffsystemen oder Suspensionen*. Patentnummer: 29707609, Deutschland, 1997.
- [Tyr00] Tyrach, J.: *Rheologische Charakterisierung von zementären Baustoffsystemen*. Dissertation, Technische Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2000.

- [VDZ06] VDZ - Verein Deutscher Zementwerke: *Zement-Merkblatt Betontechnik B29*. Düsseldorf, 2006.
- [Vog08] Vogel, R.: *Mitteilung 08/2: Manuskript zum Vortrag vom 07.05.08 in Leipzig-Günthersdorf anlässlich einer Beratung des VDE*. R. Vogel-Forschung, Weimar, 2008.
- [Vog13] Vogel, R.: *Zur Sedimentation von kugelförmigen Teilchen in Fluiden mit Fließgrenze Teil I*. 22. Kolloquium Rheologische Messungen an Mineralischen Baustoffen, Regensburg, 2013.
- [Wal03] Wallevik, O. H.: *Rheology - a scientific approach to develop self compacting concrete*. Proceedings of the 3rd international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, S. 23-31, Reykjavik, 2003.
- [Wal90] Wallevik, O. H.; Gjorv, O. E.: *Development of a coaxial cylinder Viscometer for fresh concrete*. RILEM Proceedings 10, Properties of fresh concrete, S. 213-224, Hannover, 1990.
- [Wes96] Wesche, K.: *Baustoffe für Tragende Bauteile*. Bd. 1: Grundlagen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1996.
- [Wil99] Williams, D. A.; Saak, A. W.; Jennings, H. M.: *The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste*. Cement and Concrete Research, Nr. 29, S. 1491-1496, 1999.
- [Won01] Wong, S.; Alexander, M.; Haskins, R.: *Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report*. U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, Mc Lean, USA, 2001.
- [Wüs05] Wüstholtz, T.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton*. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwesen, 2005.
- [Yas94] Yasuo, T.; Hirotsugu, M.; Yoshiyuki, K.; Kenji, W.; Koji, T.: *Method and Apparatus for testing Fluidity of Fresh Mortar*, Patent Nr.07229823 A, Japan, 1994.

Normen und Richtlinien

DIN 1342-1	Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe
DIN 1342-2	Viskosität - Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten
DIN 1342-2	Viskosität - Teil 3: Nicht newtonsche Flüssigkeiten
DIN 53019-1	Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 1: Grundlagen und Messgeometrie
DIN SPEC 91143-2	Moderne rheologische Prüfverfahren - Teil 2: Thixotropie - Bestimmung der zeitabhängigen Strukturänderung - Grundlagen und Ringversuch
DIN Fachbericht 143	Moderne rheologische Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Fließgrenze - Grundlagen und Ringversuch
DIN 13343:2004-04	Linear-viskoelastische Stoffe; Begriffe, Stoffgesetze, Grundfunktionen
DIN 54458:2013:03	Strukturklebstoffe - Bestimmung des Fließ- und Applikationsverhaltens von viskoelastischen Klebstoffen mit Hilfe der Oszillationsrheometrie
DIN EN ISO 3219	Kunststoffe - Polymere/Harze in flüssigem, emulgiertem oder dispergiertem Zustand - Bestimmung der Viskosität mit einem Rotationsviskosimeter bei definiertem Geschwindigkeitsgefälle (ISO 3219:1993)
DAfStb Heft 605	Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen
DAfStb SVB-Richtlinie	Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) - Teil 1: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA - Teil 2: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 206-1, DIN EN 206-9 und DIN 1045-2 - Teil 3: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 13670 und DIN 1045-3; 2012-09
DIN EN 206-9	Beton - Teil 9: Ergänzende Regeln für Selbstverdichtenden Beton (SVB); Deutsche Fassung EN 206-9:2010
DIN EN 196-3	Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 196-3:2005+A1:2008
DIN EN 12350-5	Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009

DIN EN 12350-8	Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch; Deutsche Fassung EN 12350-8:2010
DIN EN 12350-9	Prüfung von Frischbeton - Teil 9: Selbstverdichtender Beton - Auslauftrichterversuch; Deutsche Fassung EN 12350-9:2010
DIN EN 12350-10	Prüfung von Frischbeton - Teil 10: Selbstverdichtender Beton - L-Kasten-Versuch; Deutsche Fassung EN 12350-10:2010
DIN EN 12350-11	Prüfung von Frischbeton - Teil 11: Selbstverdichtender Beton - Bestimmung der Sedimentationsstabilität im Siebversuch; Deutsche Fassung EN 12350-11:2010
DIN EN 12350-12	Prüfung von Frischbeton - Teil 12: Selbstverdichtender Beton - Blockierring-Versuch; Deutsche Fassung EN 12350-12:2010

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung der diffusen Doppelschicht [Kor05].....	6
Abbildung 2-2:	Scherwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt von Kornhaufwerken [Sch73].....	7
Abbildung 2-3:	Viskoser und Intergranularer Reibungsanteil [Fer98] aus [Wüs05].....	8
Abbildung 2-4:	Zwei-Platten-Modell [Bla02].....	8
Abbildung 2-5:	Einzelne Strömungsschichten [Mez10].....	9
Abbildung 2-6:	Fließverhalten von Fluiden [Hoe06].....	10
Abbildung 2-7:	Zeitabhängige Viskositätsfunktion einer thixotropen Substanz [Mez10]....	13
Abbildung 2-8:	Auswertung des thixotropen und der rheopexen Verhaltens mittels Fließkurve	14
Abbildung 2-9:	Relative Viskosität einer Suspension mit granularen Feststoffen in einer Newtonschen Flüssigkeit als Funktion des Feststoffanteils, nach [Cou12]	15
Abbildung 2-10:	Rampenprofil.....	21
Abbildung 2-11:	Fließkurve	21
Abbildung 2-12:	Aufwärtsast einer Fließkurve mit „Nase“, nach [Geh98]	22
Abbildung 2-13:	Bingham-Modell	22
Abbildung 2-14:	Windhab-Modell	23
Abbildung 2-15:	Herschel-Bulkley-Modell.....	24
Abbildung 2-16:	Stufenprofil	25
Abbildung 2-17:	Verlauf der Schubspannung	25
Abbildung 2-18:	Kugel-Messsystem, links: Animation [Sch12]; rechts: schematische Darstellung	28
Abbildung 2-19:	Darstellung der Strömungszustände.....	30
Abbildung 2-20:	Widerstandsbeiwert c_w einer glatten Kugel in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl, aus [Jun13]	31
Abbildung 2-21:	Umströmung einer Kugel in einer Newtonschen Flüssigkeit [Czi12]	32
Abbildung 3-1:	Vergleich der Zusammensetzung eines konventionellen Rüttelbetons und eines Selbstverdichtenden Betons mit $D_{\max}=16$ mm, nach [Hil05]	42
Abbildung 3-2:	Mischungsentwurf nach Okamura, nach [Oka95]	43
Abbildung 3-3:	Verarbeitungsfenster für selbstverdichtende Mörtel und Betone, nach [DAfSTb-Richtlinie SVB]	44
Abbildung 3-4:	Zementleimmodell nach Powers: Agglomeration von Partikeln in einer verdünnten (links) und einer konzentrierten Suspension (rechts) [Pow68]	48
Abbildung 3-5:	Modellvorstellung nach Helmuth [Hel80]	48
Abbildung 3-6:	Mögliche zusammenhängende Partikel-Agglomerat-Verteilung [Kec97]...	49

Abbildung 3-7: Mögliche, nicht zusammenhängende Partikel-Agglomerat-Verteilung [Kec97], aus [Wüs05]	49
Abbildung 3-8: Schematische Entwicklung des Scherwiderstandes (Drehmoment) infolge konstanter Drehgeschwindigkeit [Kec97], aus [Wüs05]	50
Abbildung 3-9: Schematisches Modell für einen irreversiblen Strukturbruch von Zement in Wassernach Tattersall [Tat83], aus [Wüs05].....	51
Abbildung 3-10: Vergleich des Geschwindigkeitsprofils einer Newtonschen Flüssigkeit (links) und einer Suspension (rechts) [Ste10]	55
Abbildung 3-11: Fließkurve (Bingham-Modell) eines konventionellen Normalbetons [Hil06]	55
Abbildung 3-12: Unterschied Normalbeton und SVB vor und nach der Scherbelastung [Wal03]	56
Abbildung 3-13: BTRHEOM [Lar97], aus [Koe09](links) und schematische Darstellung, aus [Wüs05](rechts)	61
Abbildung 3-14: ConTec BML Viskosimeter Version 3 (links), Version 4 (rechts), [Wal90] aus [Fer01]	61
Abbildung 3-15: ICAR Rheometer [Koe09]	62
Abbildung 3-16: IBB Rheometer [Bea94]: schematische Darstellung (links), Rührkörper (rechts), aus [Fer01]	62
Abbildung 3-17: Anwendung der Viscoprobe im Planetenmischer (oben) und im Tellermischer (unten) und dazugehörige Messwerte (links) [Nie12]	63
Abbildung 3-18: Auswertung der Viscoprobe mit dem Bingham-Modell [Nie12]	64
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des RheoCT; Messung von SVB in einem Behälter	69
Abbildung 4-2: Betonrheometer RheoCT	69
Abbildung 4-3: Fließkurve mit Bingham-Modell.....	73
Abbildung 4-4: Auswertung der Schubspannung bei Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit.....	74
Abbildung 5-1: Ermittlung der Fließgrenze und der Viskosität mit dem KMS	77
Abbildung 5-2: Fließkurve eines SVB, gemessen mit dem KMS bei einer Umdrehung; Messprofil R2; Rezept B2.3	78
Abbildung 5-3: Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S3; Messzeitpunkt $t = 5$ min; Rezept B2.3	79
Abbildung 5-4: Federmodell zur Beschreibung des Strukturverhaltens eines SVB beim Durchfahren mit einer Kugel	80
Abbildung 5-5: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse; Vergleich unterschiedlicher Fließkurven; Messprofil R2; Rezept B2.1 und B2.3.....	81
Abbildung 5-6: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse; Schubspannung bei konstanter Belastung; Messprofil S2; Rezept B2.1 und B2.3.....	82
Abbildung 5-7: Untersuchte Rampenprofile	83

Abbildung 5-8: Vergleich Messprofile; Fließkurven; Messprofile R1(n=1), R2 (n=2) und R3 (n=5); t = 0; Rezept B2.3	84
Abbildung 5-9: Untersuchte Stufenprofile	85
Abbildung 5-10: Vergleich Messprofile; Schubspannung bei konstanten Schergeschwindigkeiten; Messprofile S1 (n=0,05), S2 (n=0,25) und S3 (n=1); t = 0 min; Rezept B2.3	85
Abbildung 5-11: Vergleich Messprofile; Schubspannung bei zwei konstanten Schergeschwindigkeiten; Messprofile S2 (n=0,25) und S3 (n=1); t = 0 min; Rezept B2.1	86
Abbildung 5-12: Vergleich Messzeitpunkt; Fließkurven; Messprofil R2; Rezept B2.3	87
Abbildung 5-13: Vergleich Messzeitpunkt; Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S1; Rezept B2.3	88
Abbildung 5-14: Vergleich Messzeitpunkt; Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S2; Rezept B2.3	88
Abbildung 5-15: Vergleich Messzeitpunkt; Schubspannung bei konstanter Schergeschwindigkeit; Messprofil S3; Rezept B2.3	89
Abbildung 5-16: Variation Wassergehalt; Fließkurven; Messprofil R2; Betonserie B2.....	91
Abbildung 5-17: Variation Wassergehalt; Schubspannung bei konstanter Belastung; Messprofil S2; Betonserie B2	92
Abbildung 5-18: Variation Wassergehalt; Vergleich unterschiedlicher Fließgrenzen; Betonserie B2	92
Abbildung 5-19: Variation Wassergehalt; Viskosität; Betonserie B2	93
Abbildung 5-20: Korrelation Fließgrenze und Setzfließmaß; Betonserie B3.....	94
Abbildung 5-21: Vergleich unterschiedlicher Fließgrenzen einer Fließkurve; Betonserie B3	94
Abbildung 5-22: Korrelation Viskosität – Trichterauslaufzeit.....	95
Abbildung 5-23: Korrelation Wassergehalt, Setzfließmaß, Dynamische Fließgrenze und Bingham-Fließgrenze; Betonserie B3	96
Abbildung 5-24: Korrelation Wassergehalt, Trichterauslaufzeit und Viskosität; Betonserie B3	96
Abbildung 5-25: Korrelation Bingham-Fließgrenze und Setzfließmaß; unterschiedliche Betonrezepturen	97
Abbildung 5-26: Korrelation Dynamische Fließgrenze (bei konstanter Schergeschwindigkeit) und Setzfließmaß; unterschiedliche Betonrezepturen	98
Abbildung 5-27: Korrelation Viskosität und Trichterauslaufzeit; unterschiedliche Betonrezepturen	98
Abbildung 5-28: Variation Fließmittelgehalt; Fließkurven; Messprofil R2; Rezept B3.3 (FM 2,4 %) und B3.3b (FM 2,6 %).....	99

Abbildung 5-29: Umströmung der Kugel bei unterschiedlicher Viskosität und Geschwindigkeit: 1 hohe Viskosität (~ 450 Pas), langsam ($\gamma = 0,006$ 1/s); 2 mittlere Viskosität (~ 220 Pas), langsam ($\gamma = 0,006$ 1/s); 3 niedrige Viskosität (~ 90 Pas), schnell ($\gamma = 0,123$ 1/s); 4 niedrige Viskosität (~ 90 Pas), langsam ($\gamma = 0,006$ 1/s).....	101
Abbildung 5-30: Platte/Platte-Messsystem, Vane-Zelle und KMS ($d = 95$ mm).....	102
Abbildung 5-31: Vane-Zelle; Widerstandsmoment bei konstanter Geschwindigkeit; Messprofil S2; unterschiedlicher Wassergehalt; Betonserie B2.....	102
Abbildung 5-32: Platte/Platte-Messsystem.....	103
Abbildung 5-33: Vergleich KMS und Platte/Platte-Messsystem; Fließkurve; Messprofil R2; Rezept B2.3.....	104
Abbildung 5-34: Platte/Platte-Messsystem; Schubspannung bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit; Messprofil S2; Betonserie B2.....	104
Abbildung 5-35: Vergleich KMS und Platte/Platte-Messsystem; Schubspannung bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit; Messprofil S2; Rezept B2.3.....	105
Abbildung A 1: Korngrößenverteilung der Mehlkornfeinen Stoffe.....	134
Abbildung A 2: Sieblinie der verwendeten Korngruppe 0/4.....	135
Abbildung A 3: Verwendete Sieblinie 0/16.....	136
Abbildung A 4: Verwendete Sieblinie inklusive Mehlkornanteil.....	136
Abbildung A 5: Volumetrische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe.....	137
Abbildung A 6: ViskomatNT mit KMS.....	138
Abbildung A 7: Fließkurve inklusive Auswertung mit dem Bingham-Modell; Messzeitpunkt $t = 0$ min; Messprofil $n = 15$ min ⁻¹ ; Rezept MR1.....	140
Abbildung A 8: Fließkurve bei Vorgabe einer niedrigen Schergeschwindigkeit; Auswertung mit dem Bingham-Modell und der Tangentenmethode; Messprofil $n = 1$ min ⁻¹ ; Messzeitpunkt $t = 0$ min; Rezept MR1.....	141
Abbildung A 9: Vergleich unterschiedlicher Ruhezeiten; Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit; Messprofil $n = 0,75$ min ⁻¹ ; Rezept MR1.....	141
Abbildung A 10: Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeiten; Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit; Messzeitpunkt $t = 30$ min; Rezept MR1.....	142
Abbildung A 11: Verwendeter Eirich-Intensivmischer.....	145
Abbildung A 12: Schematischer Aufbau des BT2 (links); der BT2 im Einsatz (rechts).....	148
Abbildung A 13: Auswertung der BT2-Rohdaten mit Hilfe einer Ausgleichsgeraden.....	149
Abbildung A 14: Schematische Darstellung des neuen, erwerblichen eBT2.....	150
Abbildung A 15: Animation erwerblicher eBT2.....	150
Abbildung A 16: Fließkurve BT2 mit Fehlerquellen.....	151
Abbildung A 17: Schematische Darstellung des eBT2 mit Kugel-Messsystem.....	152
Abbildung A 18: Fließkurve eines SVB; ermittelt mit originalem BT2.....	153

Abbildung A 19: Fließkurve eines SVB; ermittelt mit originalem BT2 und dickeren Messstäben	154
Abbildung A 20: Korrelation relative Fließgrenze BT2 und Setzfließmaß; unterschiedliche Betonrezepte	154
Abbildung A 21: Messprofil eBT2.....	155
Abbildung A 22: Einfluss des Wassergehalts; aufsteigender Ast der Fließkurve; Messgerät eBT2; Betonserie B1.....	156
Abbildung A 23: Einfluss des Wassergehaltes; absteigende Ast der Fließkurve; Auswertung mit dem Bingham-Modell; Messgerät eBT2; Betonserie B1	156
Abbildung A 24: Einfluss des Wassergehaltes; Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit; $v = 0,018$ m/s; Messgerät eBT2; Betonserie B1 ...	157
Abbildung A 25: Einfluss der Ruhezeit; aufsteigender Ast der Fließkurve; Messgerät eBT2; Rezept B1.2	158
Abbildung A 26: Einfluss der Ruhezeit auf das Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit; $v = 0,018$ m/s; Messgerät eBT2; Rezept B1.2	158
Abbildung A 27: Einfluss des Fließmittelgehalts auf Fließkurven mit Bingham-Modell; Messgerät eBT2; Betonserie B1.....	159
Abbildung A 28: Einfluss des Fließmittelgehalts; Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit; $v = 0,018$ m/s; Messgerät eBT2; Betonserie B1 ...	159
Abbildung A 29: Vergleich der relativen Fließgrenze bei Verwendung unterschiedlicher Auswertmethoden; Messgerät eBT2	161
Abbildung A 30: Vergleich der relativen Viskosität bei Verwendung unterschiedlicher Auswertmethoden; Messgerät eBT2	161
Abbildung A 31: Vergleich RheoCT und eBT2; Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit; Messprofil S2; Rezept B2.3	162
Abbildung A 32: RheoCT; Fließkurve; Messprofil R2; Rezept B2.3.....	162
Abbildung A 33: eBT2; Fließkurve; Messprofil R2; Rezept B2.3	163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Fließgrenzen	27
Tabelle 2-2:	Zusammenfassung unterschiedlicher Herleitungen der Fließgrenze aus der Widerstandskraft	36
Tabelle 3-1:	Einflüsse auf das Fließverhalten von SVB.....	57
Tabelle 3-2:	Einflüsse auf das Fließverhalten von Frischbeton, nach [Hoe06].....	58
Tabelle 3-3:	Rheologisches Verhalten von Zementleim, Mörtel und Beton, nach [Ban04].....	59
Tabelle 4-1:	Schergeschwindigkeiten verschiedener, für die Verarbeitung von Baustoffen relevanter Vorgänge, nach [Bla02].....	68
Tabelle 4-2:	untersuchte Rampenprofile	70
Tabelle 4-3:	untersuchte Stufenprofile	71
Tabelle 5-1:	Betonserie B2	76
Tabelle 5-2:	Betonserie B3	76
Tabelle 5-3:	Betonserie B4	76
Tabelle 5-4:	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse; numerische Darstellung	82
Tabelle 5-5:	Auswertung der Fließkurve mit dem Bingham-Modell; unterschiedliche Messprofile; Rezept B2.3	84
Tabelle 5-6:	Auswertung der Fließkurven mit dem Bingham-Modell; unterschiedliche Messprofile und Messzeitpunkte; Rezept B2.3	87
Tabelle 5-7:	Vergleich unterschiedlicher Kugeldurchmesser; rheologische Parameter; gemittelte Werte aus je drei Versuchen; Rezept B2.3	90
Tabelle 5-8:	Wassergehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Betonserie B2	91
Tabelle 5-9:	Wassergehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Betonserie B3	93
Tabelle 5-10:	Messergebnisse unterschiedlicher Rezepturen (* keine verwertbaren Ergebnisse).....	97
Tabelle 5-11:	Fließmittelgehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen; Rezept B3.3	98
Tabelle 5-12:	Vergleich unterschiedlicher Fließmittelgehalte (je drei Messungen)	99
Tabelle 5-13:	Reynolds-Zahl und Bingham-Zahl für unterschiedliche Betonrezepte und unterschiedliche Drehzahl des KMS	100
Tabelle 5-14:	Wassergehalt und Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Betonserie B2	102
Tabelle A 1:	Eigenschaften des verwendeten Leitungswassers	132
Tabelle A 2:	Physikalische Werte des Zements; Herstellerangaben.....	132

Tabelle A 3:	Festigkeiten des Zements; Herstellerangaben.....	132
Tabelle A 4:	Chemische Werte des Zements; Herstellerangaben.....	133
Tabelle A 5:	Technische Daten Flugasche; Herstellerangaben.....	133
Tabelle A 6:	Physikalische Werte unterschiedlicher Zusatzstoffe; Herstellerangaben...	134
Tabelle A 7:	Mineralogische Angaben der verwendeten Gesteinskörnung.....	135
Tabelle A 8:	Mörtelrezept MR1.....	139
Tabelle A 9:	Mischanweisung MA1.....	139
Tabelle A 10:	Untersuchte Messprofile.....	139
Tabelle A 11:	Betonserie B1.....	143
Tabelle A 12:	Betonserie B2.....	143
Tabelle A 13:	Betonserie B3.....	144
Tabelle A 14:	Betonserie B4 (* in Deutschland nicht zugelassen; in Österreich anrechenbar mit $k = 0,8$).....	144
Tabelle A 15:	Mischanweisung Eirich-Intensivmischer.....	145
Tabelle A 16:	Versuchsergebnisse Betonserie B2 (* nicht ermittelbar).....	146
Tabelle A 17:	Versuchsergebnisse Betonserie B3.....	147
Tabelle A 18:	Versuchsergebnisse Betonserie B4.....	147
Tabelle A 19:	Wassergehalt und Frischbetonprüfungen; Betonserie B1.....	155
Tabelle A 20:	Überblick über die verwendeten Betonrezepturen mit dazugehörigen Frischbetonprüfungen und der Bahngeschwindigkeit der zwei Messstäbe; Messungen durchgeführt mit eBT2.....	160

Abkürzungen und Symbole

SVB	Selbstverdichtender Beton
SCC	Self-Compacting Concrete
KMS	Kugel-Messsystem
CSR-Test	controlled shear rate test
CSS-Test	controlled shear stress test
z	Partikelabstand
τ	Schubspannung
A	Fläche
h	Höhe (Plattenabstand)
r	Radius, Kugelradius
s	Abstand
l	Länge
L	Abstand zwischen Rotationsachse und Kugelmitte (Radius)
d	Kugeldurchmesser
d_{\max}	maximaler Partikeldurchmesser
F	Kraft
v	Geschwindigkeit, Bahngeschwindigkeit
n	Rotationsgeschwindigkeit
t	Zeit, Dauer
$\dot{\gamma}$	Scherrate, Schergeschwindigkeit
η	Viskosität, dynamische Viskosität, Scherviskosität, plastische Viskosität
τ_0	Fließgrenze
τ_B	Bingham-Fließgrenze
η_B	Bingham-Viskosität
τ_{\max}	Maximale Schubspannung - Statische Fließgrenze
τ_{dyn}	Konstanter Schubspannungsverlauf - Dynamische Fließgrenze
g	Fließgrenzenparameter
h	Viskositätskoeffizient
T	Trichterauslaufzeit
sm	Setzfließmaß
M.-%	Masse - %
V.-%	Volumen - %
CSH-Phasen	Hydratphasen, Calciumsilicathydrate
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert
V_W/V_P -Wert	Verhältnis Wasser/Mehlkorn-Volumen
FM	Fließmittel
PCE	Fließmittel auf Basis Polycarboxylatether
Re	Reynolds-Zahl
Re_{krit}	kritische Reynolds-Zahl
ρ	Charakteristische Dichte des Fluids
c_w	Widerstandsbeiwert
q	Dynamischer Staudruck

A_{st}	Stirnfläche
A_S	Kugeloberfläche
F_w	Gesamtwiderstand
F_R	Reibungswiderstand
F_{FG}	Fließgrenze (Kraft)
BM	Bingham-Zahl
M	Drehmoment
T	Widerstandsmoment
Q_i	Konstante zur Umrechnung von Messwerten in Absolut-Werte

Anhang

A.1 Ausgangsstoffe

A.1.1 Wasser

Bezeichnung	Wert
Wasserhärte	17 °dH
pH-Wert	7,4
Elektrische Leitfähigkeit (bei 20°C)	560 μ S cm^{-1}

Tabelle A 1: Eigenschaften des verwendeten Leitungswassers

A.1.2 Zement

Eigenschaften		Zementart	
Bezeichnung	Einheit	CEM II/A-S 42,5 R	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N
Wasserbedarf	[%]	29	27
Erstarrungsbeginn	[min]	170	205
Erstarrungsende	[min]	260	275
M 45 μ m	[%]	1,8	7,4
M 90 μ m	[%]	0,1	0,4
d50	[μ m]	10,76	13,06
Blaine	[cm^2/g]	4480	4080
Spezifische Oberfläche	[m^2/cm^3]	1,12	1,08
Dichte	[kg/dm^3]	3,0	3,0

Tabelle A 2: Physikalische Werte des Zements; Herstellerangaben

Prüfalter	CEM II/A-S 42,5 R		CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N	
	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
1d	5,1	21,6	2,9	12,7
2d	6,6	31,9	4,7	23,4
7d	8,0	45,9	6,8	36,6
28d	7,7	57,9	8,3	47,6
56d	9,5	63,1	8,3	53,8

Tabelle A 3: Festigkeiten des Zements; Herstellerangaben

	RFA [%]	
	CEM II/A-S 42,5 R	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N
CO ₂	0,52	4,04
CaO	61,11	61,56
SiO ₂	20,54	19,84
Al ₂ O ₃	6,09	5,67
Fe ₂ O ₃	3,06	2,72
SO ₃	3,21	3,24
MgO	3,38	3,68
K ₂ O	0,76	0,84

Tabelle A 4: Chemische Werte des Zements; Herstellerangaben

A.1.3 Zusatzstoffe

Flugasche

Bei der verwendeten Flugasche handelt es sich um das Produkt Rohrdorfer ROFAMENT, einem Betonzusatzstoff Typ II Steinkohlenflugasche gemäß DIN EN 450-1. Herkunftsort ist der Block 5 des Kraftwerks Zolling. Die technischen Daten finden sich in Tabelle A 5, die physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle A 6 zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Char. Wert (Jahresmittel)	Normanforderung
Feinheit	[M-% R. bei 40 µm]	24,6	≤ 40
Glühverlust	[M-%]	2,28	≤ 5
Sulfat (SO ₃)	[M-%]	0,85	≤ 3
Chlorid (Cl ⁻)	[M-%]	0,005	≤ 0,10
Dichte	[kg/dm ³]	2,35	-
Aktivitätsindex 28d/90d	-	78/94	≥ 75/85

Tabelle A 5: Technische Daten Flugasche; Herstellerangaben

Kalksteinmehl

Das verwendete Kalksteinmehl des Kalkwerks Rygol entspricht den Anforderungen nach DIN EN 13043 / TL Gestein-StB 04. Der Calciumcarbonatgehalt beträgt 98,4 M.-%. Die physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle A 6 zusammengefasst.

AHWZ

Beim AHWZ (Aufbereitete Hydraulisch Wirksame Zusatzstoffe) handelt es sich um einen Betonzusatzstoff Typ GC/GC-HS des Werkes Eiberg mit der Bezeichnung Fluasit. Er wird hergestellt durch gemeinsame Vermahlung von Hüttensand, Flugasche und Kalkstein. Regelt sind die AHWZ in der ÖNORM B3309-1. Gemäß ÖNORM B 4710-1 kann die AHWZ

mit einem Anrechnungsfaktor (k-Wert) von 0,8 eingesetzt werden. Die physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle A 6 zusammengefasst.

Eigenschaften		Zusatzstoff		
Bezeichnung	Einheit	Flugasche	Kalksteinmehl	AHWZ
d10	[μm]	3,0	1,68	1,87
d50	[μm]	17,48	7,10	13,26
d90	[μm]	73,64	45,19	46,04
Blaine	[cm^2/g]		4802	
Spezifische Oberfläche	[m^2/cm^3]	0,76	1,33	1,01
Dichte	[kg/dm^3]	2,35	2,70	2,65

Tabelle A 6: Physikalische Werte unterschiedlicher Zusatzstoffe; Herstellerangaben

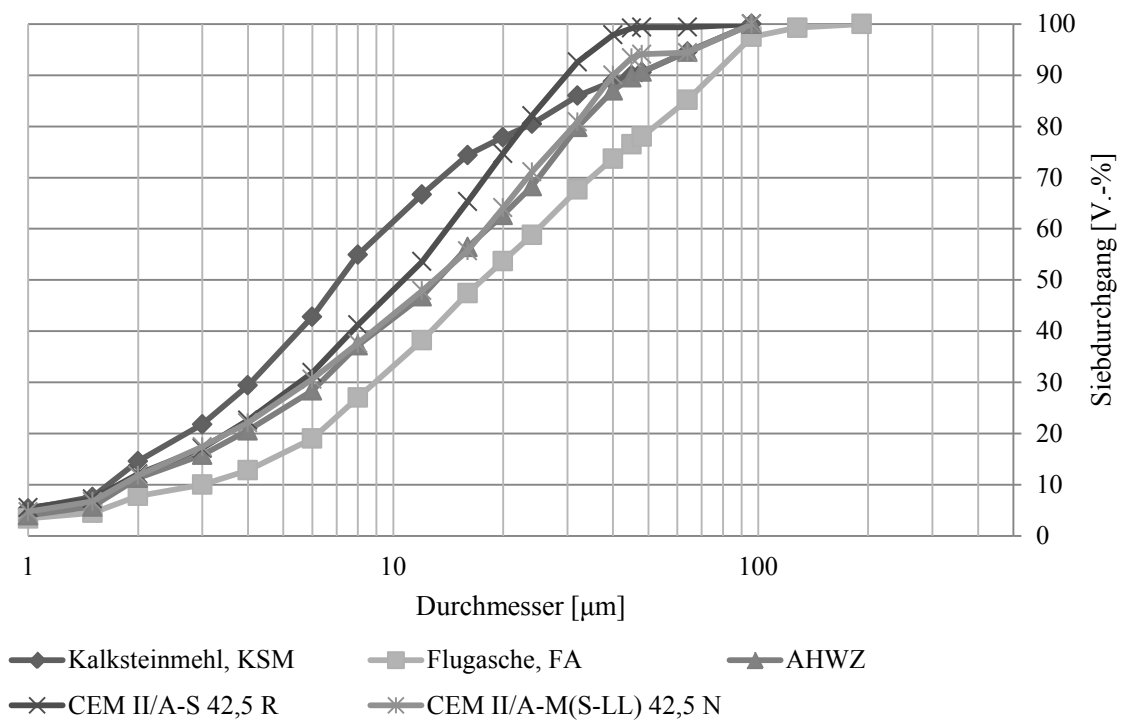


Abbildung A 1: Korngrößenverteilung der Mehlkornfeinen Stoffe

A.1.3 Gesteinskörnung

Bei der Gesteinskörnung handelt es sich um eine natürliche Gesteinskörnung aus dem Kieswerk Roith in Bayern. Verwendet wurden die Korngruppen 0/4, 4/8 und 8/16, wobei die Korngruppe 0/4 bei 2 mm gesiebt wurde, um eine größere Genauigkeit zu erzielen. Im Labor wurde die Korngruppe 0/4 schließlich wieder zusammengesetzt und die Sieblinie wie in Abbildung A 2 erzeugt.

Der Natursand besteht zu praktisch 100 % aus Quarzkörnern und enthält keine verwitterte, schiefrige oder tonig-lehmige Bestandteile. Gemäß Prüfbericht bestand kein Verdacht auf kohleartige, zuckerähnliche, sulfidische oder sulfatische Stoffe sowie auf alkalilösliche Kieselsäure und stahlangreifende Stoffe. Der Sand erfüllt die Anforderungen nach DIN EN 12620:2003-04 für die Verwendung beim Beton.

Eigenschaften	Einheit	Korngruppe		
		0/4	4/8	8/16
Bezeichnung				
Kornzusammensetzung	Kategorie	G _C 85/20	G _C 85/20	G _F 85
Gehalt an Feinanteilen	Kategorie	f ₃	f _{1,5}	f _{1,5}
Gehalt an leichtgew. org. Verunreinigungen (Anforderung)	[M.-%]	0,00 (< 0,25)	0,00 (< 0,05)	0,00 (< 0,05)
Frost-Tausalz-Widerstand (Anforderung XF2)	[M.-%]	3,5 (< 25)	3,5 (< 25)	3,5 (< 25)
		MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈
Schwefelhaltige Bestandteile	[M.-%]	< 0,2		
	Kategorie	AS _{0,2}		
Chloridgehalt C (Anforderung)	[M.-%]	0,0003 (< 0,04)		

Tabelle A 7: Mineralogische Angaben der verwendeten Gesteinskörnung

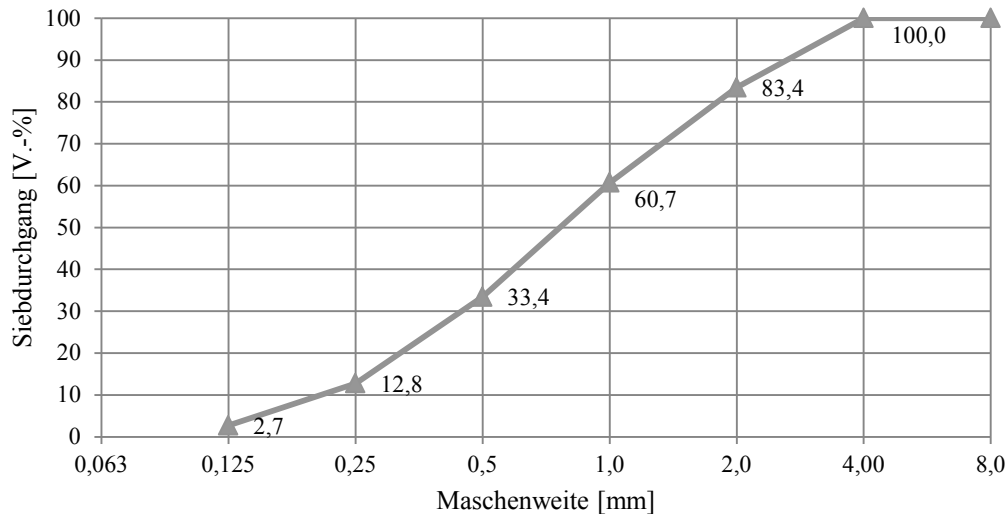


Abbildung A 2: Sieblinie der verwendeten Korngruppe 0/4

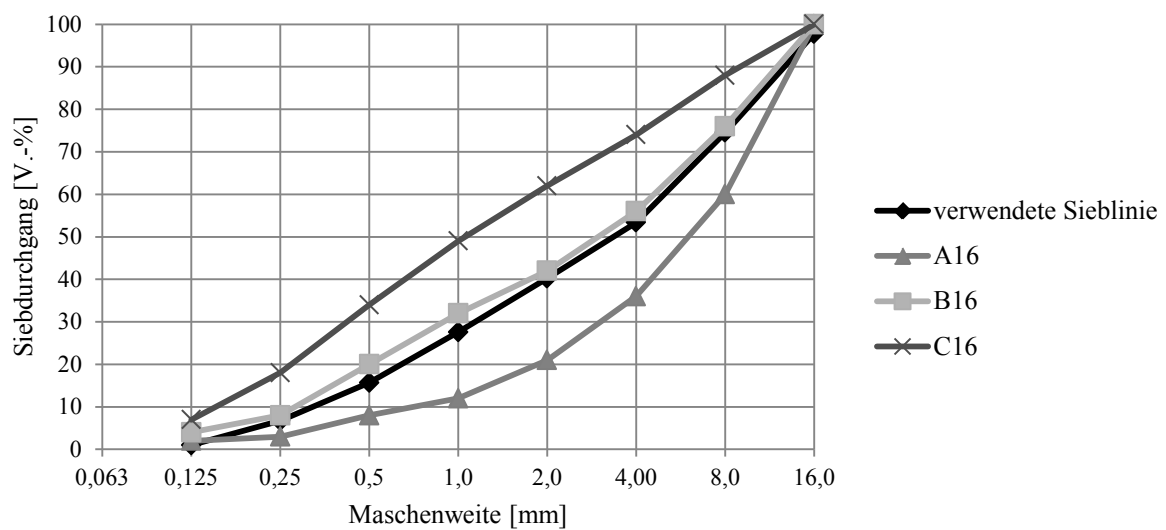


Abbildung A 3: Verwendete Sieblinie 0/16

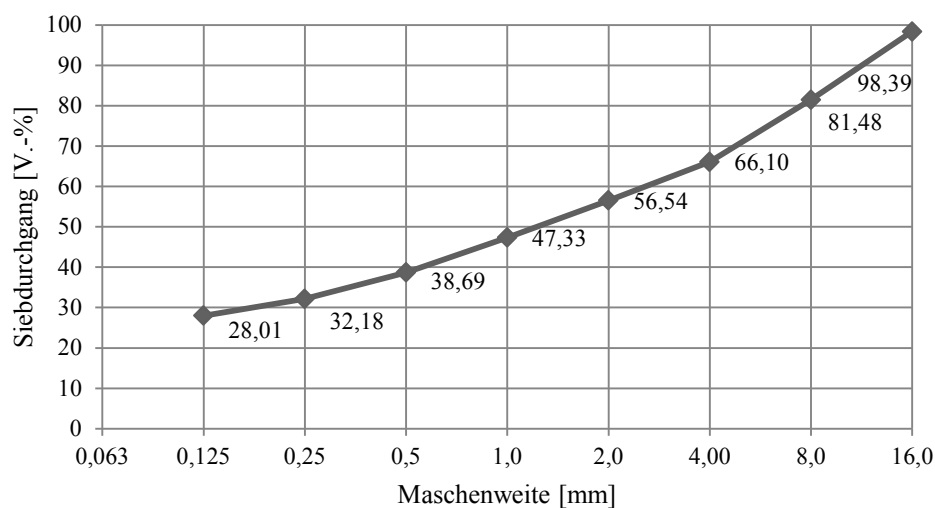


Abbildung A 4: Verwendete Sieblinie inklusive Mehlkornanteil

A.1.4 Zusatzmittel

Als Fließmittel kamen Produkte der neusten Generation auf PCE-Basis zum Einsatz. Die Auswahl und Dosiermenge erfolgte anhand von Vorversuchen an Mörteln mit unterschiedlichen Zementen und Zusatzstoffen. Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden mit dem Produkt Sika® ViscoCrete®-1020 X durchgeführt. Angaben dazu können dem Datenblatt auf der Internetseite der Fa. Sika entnommen werden.

A.2 Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und Wasseranspruch

Die Zusammensetzung der Mörtel und Betonrezeptur erfolgte nach dem Prinzip von Okamura (Abbildung A 5).

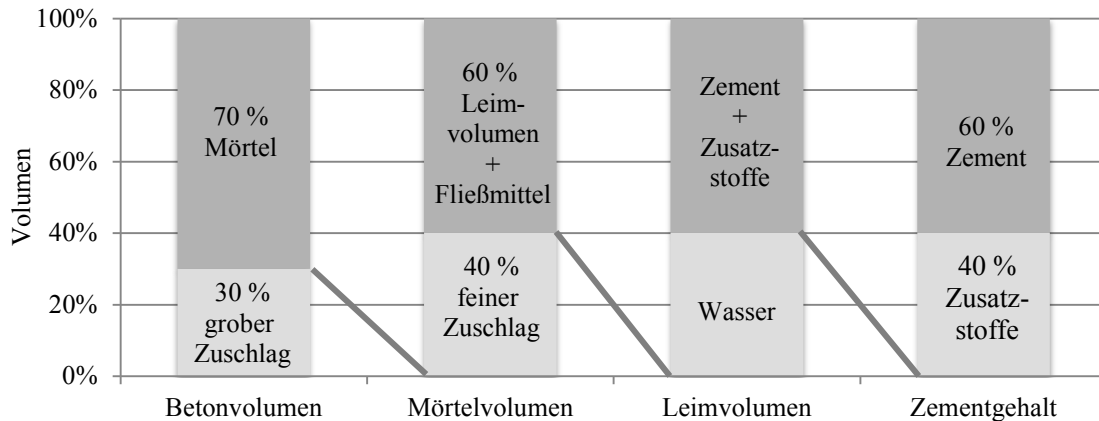


Abbildung A 5: Volumetrische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe

Die Volumenanteile wurden in dieser Arbeit nicht verändert. Durch die unterschiedlichen Rohdichten der Zusatzstoffe ergaben sich aber Unterschiede in der Betonrezeptur. Der Wasseranspruch wurde durch die Verfahren nach Okamura, Puntke und Normsteife ermittelt. Da dieser je nach Zusammensetzung der mehlkornfeinen Stoffe variiert, kann kein gleichbleibender Wert angegeben werden.

Bei der Optimierung der Zusammensetzung von Zement und Zusatzstoffen zeigte sich, dass die Mischung mit zunehmendem Zementgehalt robuster gegenüber Wassergehaltsschwankungen wurde. Der maximale Zementgehalt wurde aber aus betontechnischen Gründen auf 60 V.-% begrenzt.

A.3 Anwendung des Kugel-Messsystems am Mörtel

A.3.1 Ziele

Um allgemeine Informationen über das Kugel-Messsystem zu erhalten, wurden vor den Messungen am SVB Versuche mit einem Selbstverdichtenden Mörtel durchgeführt. Bei den durchgeführten Mörtel-Versuchen waren unter anderem folgende Fragestellungen von Bedeutung:

1. Ist ein Strukturaufbau infolge Wechselwirkungskräften und Hydratation ersichtlich und existiert die Statische Fließgrenze bei der Betrachtung des Schubspannungsverlaufs infolge konstanter Belastung?
2. Welchen Einfluss hat die vorgegebene Geschwindigkeit?
3. Kann eine Fließkurve innerhalb einer Umdrehung erzeugt werden und ist der Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich sichtbar?

Weitere Versuche dienten zur optimalen Einstellung des Rheometers. Diese Versuche sind nicht Teil dieser Arbeit.

A.3.2 Messablauf

Die Messungen am Selbstverdichtenden Mörtel erfolgten mit einem ViskomatNT der Firma Schleibinger Geräte GmbH [Sch12] und dem KMS (Kugeldurchmesser $d = 30$ mm). Der Durchmesser des Behälters beträgt 140 mm und die Füllhöhe 110 mm, der Abstand r_{System} zwischen Kugelmitte und Rotationsachse 3 cm. Bei der Verwendung der größten Kugel ($d = 30$ mm) verbleibt zwischen der Außenseite der Kugel und der Innenseite des Messtopfes somit ein Abstand von 25 mm. Dies entspricht etwa dem Sechsfachen der maximalen Partikelgröße und somit den Anforderungen an den Mindestwert, der einen fünffachen Abstand vorschreibt.



Abbildung A 6: ViskomatNT mit KMS

Zur Anwendung kam das Mörtelrezept MR1 (Tabelle A 8) und der Mischablauf MA1 (Tabelle A 9). Das gemessene Setzfließmaß betrug 255 mm. Neben dem verwendeten Mörtelrezept wurden auch Versuche mit anderen Mischungen durchgeführt, die aber nicht Bestandteil dieser Arbeit sind. Die Umwandlung der Messwerte in rheologische Absolut-Werte erfolgte nach Formel (2-30) und (2-31).

Bei den Versuchen kamen zwei unterschiedliche Profiltypen zum Einsatz: Ein Rampenprofil mit steigender und fallender Geschwindigkeit sowie ein konstantes Geschwindigkeitsprofil. Die Messprofile sind in Tabelle A 10 dargestellt.

Ausgangsstoff		[kg/m ³]
Sand	0/2	960,9
	2/4	240,2
Zusatzstoff	Flugasche	263,9
Zement	CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N	505,3
Wasser		235,5
Zusatzmittel	Fließmittel Viscocrete 1020X	2,20%
V _w /V _p		0,84

Tabelle A 8: Mörtelrezept MR1

Vorgang	Dauer	Geschwindigkeit
1. Zement, Flugasche und Sand trocken mischen	10 s	Stufe 1
2. Wasserzugabe	60 s	Stufe 1
3. Aufkratzen	-	-
4. Zugabe Restwasser und Fließmittel (innerhalb der ersten 60 s)	120 s	Stufe 1
5. Aufkratzen	-	-
6. Mischen	60 s	Stufe 1

Tabelle A 9: Mischanweisung MA1

Rampenprofile		Stufenprofile	
maximale Geschwindigkeit	maximale Scherrate	konstante Geschwindigkeit	konstante Scherrate
n [min ⁻¹]	$\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]	n [min ⁻¹]	$\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]
1	0,157	0,75	0,118
15	2,356	15	2,356

Tabelle A 10: Untersuchte Messprofile

A.4.3 Versuchsergebnisse

A.4.3.1 Rampenprofil

Abbildung A 7 zeigt die Fließkurve und die Auswertung mit dem Bingham-Modell der Mörtelrezeptur MR1. Die Fließkurve wurde innerhalb einer Umdrehung erzeugt. Die Maximale Geschwindigkeit betrug $n = 15 \text{ min}^{-1}$. Aufgrund des hohen Scherratenbereichs ist die Messung nach wenigen Sekunden beendet. Dies führt folglich dazu, dass nur wenige Messpunkte aufgenommen werden können.

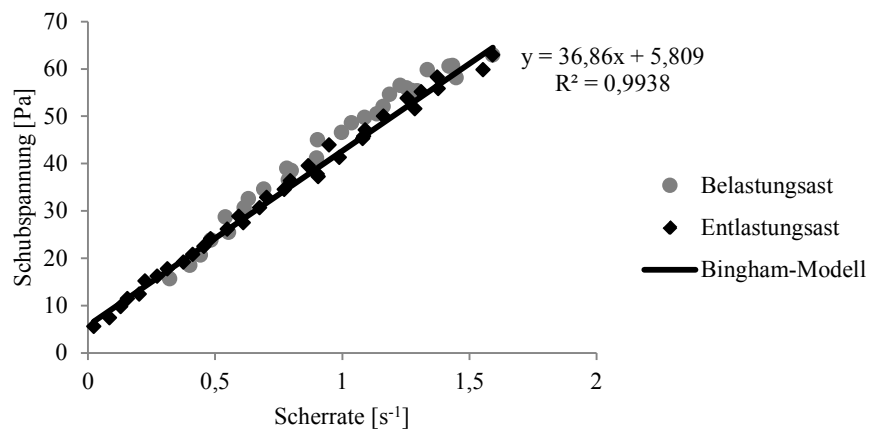


Abbildung A 7: Fließkurve inklusive Auswertung mit dem Bingham-Modell; Messzeitpunkt $t = 0 \text{ min}$; Messprofil $n = 15 \text{ min}^{-1}$; Rezept MR1

Um nähere Informationen über den Bereich niedriger Scherraten zu erhalten, wurde ein Rampenprofil mit einer maximalen Geschwindigkeit von $n = 1 \text{ min}^{-1}$ vorgegeben. Die Messung erfolgte auch in diesem Fall innerhalb einer Umdrehung. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit konnte eine hohe Datenmenge aufgezeichnet werden. Die Fließkurve ist in Abbildung A 8 dargestellt.

Am aufsteigenden Ast der Fließkurve (Belastungsast) kann die Statische Fließgrenze ausgewertet werden. Diese ist durch das Ende des linear elastischen Bereiches und den Übergang in den plastischen Bereich gekennzeichnet (roter Pfeil). Der absteigende Ast wird mit dem Bingham-Modell ausgewertet. Hierbei ist zu erkennen, dass die Bingham-Fließgrenze deutlich über der Tatsächlichen Fließgrenze liegt. Vergleicht man die Statische und die Bingham-Fließgrenze, so erkennt man, dass die Statische Fließgrenze etwas größer ist. Da das Ende des linearen Bereiches in der Regel schwer zu bestimmen ist, ist die Genauigkeit dieser Auswertung durchaus kritisch zu bewerten.

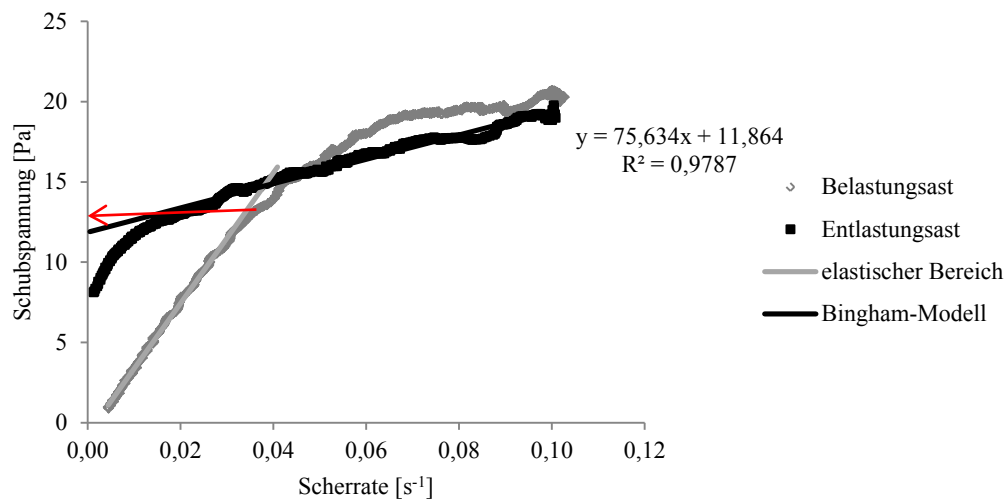


Abbildung A 8: Fließkurve bei Vorgabe einer niedrigen Schergeschwindigkeit; Auswertung mit dem Bingham-Modell und der Tangentenmethode; Messprofil $n = 1 \text{ min}^{-1}$; Messzeitpunkt $t = 0 \text{ min}$; Rezept MR1

A.4.3.2 Stufenprofil

Abbildung A 9 zeigt den Schubspannungsverlauf von Mörtelrezept MR1 bei einer konstant langsamen Rotationsgeschwindigkeit $n = 0,75 \text{ min}^{-1}$ zu unterschiedlichen Messzeitpunkten. Mit diesem Versuch sollte festgestellt werden, ob es möglich ist die Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit darzustellen und zu bewerten. Weiterhin wurde untersucht, ob eine Statische Fließgrenze infolge Strukturaufbaus erkennbar ist oder nicht.

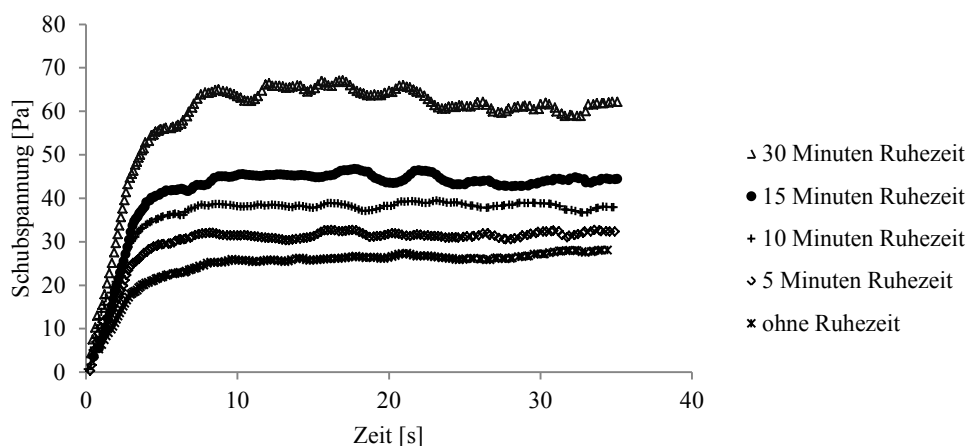


Abbildung A 9: Vergleich unterschiedlicher Ruhezeiten; Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit; Messprofil $n=0,75 \text{ min}^{-1}$; Rezept MR1

Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass sich mit zunehmender Ruhezeit (Dauer von Einfüllen des Mörtels in den Messbehälter bis zur Beginn der Prüfung) eine höhere Schubspannung einstellt und auch die Steigung im Anfangsbereich zunimmt. Beides deutet auf den fortlaufenden Hydratationsprozess hin, bei dem es infolge von Wechselwirkungskräften, chemischen

Reaktionen und Vernetzung der Partikel zu höheren Widerständen kommt. Der Strukturaufbau verleiht dem Mörtel die Eigenschaft, ein steigendes Maß an Spannungen im elastischen Bereich aufnehmen zu können und reduziert gleichzeitig die Fließfähigkeit des Mörtels. Eine Statische Fließgrenze konnte nicht festgestellt werden. Der Grund hierfür kann in der niedrigen Schergeschwindigkeit liegen. Nach einer Einregelzeit von ca. 10 s zeigt die Abbildung einen konstanten Verlauf der Schubspannung, welcher als Dynamische Fließgrenze ausgewertet werden kann.

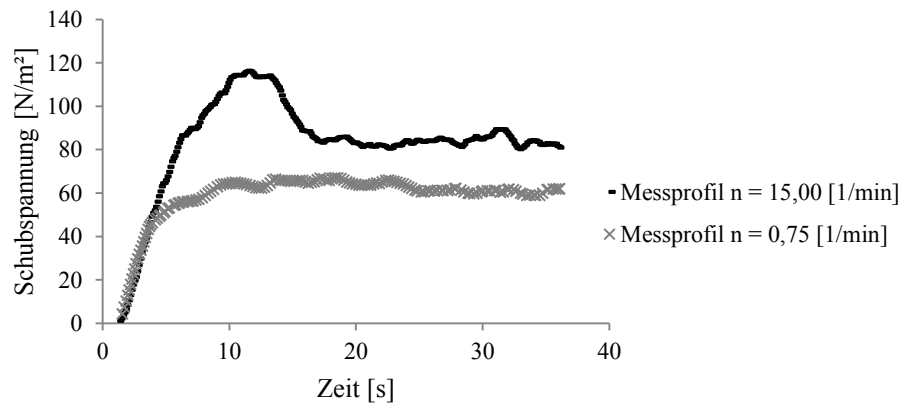


Abbildung A 10: Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeiten; Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit; Messzeitpunkt $t = 30$ min; Rezept MRI

In Abbildung A 10 ist der Vergleich unterschiedlicher Geschwindigkeiten nach 30 Minuten Ruhezeit dargestellt. Bei der Kurve, die mit höherer Drehzahl ermittelt wurde, ist eine Statische Fließgrenze erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass neben dem Strukturaufbau auch transiente Effekte, welche durch die hohe Geschwindigkeit erzeugt werden, mitverantwortlich sind für die Statische Fließgrenze.

Beim Vergleich unterschiedlich konstanter Schergeschwindigkeiten zeigte sich, dass sich mit Zunahme der Geschwindigkeit eine höhere Fließgrenze einstellte, was den Gesetzen der Physik geschuldet ist. Zusätzlich konnte mit steigender Geschwindigkeit ein steilerer Anstieg des linear-elastischen Bereiches am Anfang festgestellt werden.

Um den Einfluss des Kugeldurchmessers festzustellen, wurden zwei Kugeln mit den Durchmessern $d_1 = 20$ mm und $d_2 = 30$ mm bei einer konstanten Geschwindigkeit von $0,75 \text{ min}^{-1}$ verglichen. Bei der Darstellung der Ergebnisse als Relativ-Werte liegen die Werte der größeren Kugel über den Werten der kleineren Kugel. Eine Umrechnung in Absolut-Werte sollte dagegen ähnliche Werte liefern. Entgegen der Erwartungen wurde aber festgestellt, dass die Unterschiede doch erheblich sind und die Absolut-Werte der kleineren Kugel größer sind als die Werte der Größeren. Durch diese Feststellung kann angenommen werden, dass weitere Effekte bei der Kugelumströmung von Bingham-Fluiden eine Rolle spielen. Aufgrund dieser Erkenntnisse muss die beschriebene Umwandlung in Absolut-Werte stark angezweifelt werden.

A.4 Verwendete Betonrezepte

In dieser Arbeit wurden folgende Betonrezepte verwendet:

Beton-Nr.			B1.1	B1.2	B1.3	B1.4	B1.5
Zement	CEM II/A-S 42,5 R	kg/m ³	397,9	388,9	380,4	372,2	368,2
Zusatzstoff	Flugasche	kg/m ³	207,8	203,1	198,6	194,4	192,3
Wasser		kg/m ³	182,9	187,9	192,7	197,2	199,4
Sand	0/4 mm	kg/m ³	747,3	747,3	747,3	747,3	747,3
Grobzuschlag	4/16 mm	kg/m ³	779,1	779,1	779,1	779,1	779,1
Fließmittel	Viscocrete [®] -1020X	M.-% v. Z.	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40
w/z-Wert			0,46	0,48	0,51	0,53	0,54
w/z eq.			0,43	0,46	0,48	0,50	0,51
V _w /V _p			0,80	0,84	0,88	0,92	0,94
Mehlkorn		kg/m ³	625,9	612,2	599,2	586,7	580,6
Bindemittel		kg/m ³	605,7	592,1	579,0	566,5	560,5
Setzfließmaß		mm	630	720	750	775	800
Trichterauslaufzeit		sec	8,0	4,5	3,7	3,3	2,5
Sedimentation			nein	nein	nein	ja	ja

Tabelle A 11: Betonserie B1

Beton-Nr.			B2.1	B2.2	B2.3	B2.4
Zement	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N	kg/m ³	407,2	397,9	388,9	380,4
Zusatzstoff	Flugasche	kg/m ³	212,7	207,8	203,1	198,6
Wasser		kg/m ³	177,7	182,9	187,9	192,7
Sand	0/4 mm	kg/m ³	747,3	747,3	747,3	747,3
Grobzuschlag	4/16 mm	kg/m ³	779,1	779,1	779,1	779,1
Fließmittel	Viscocrete [®] -1020X	M.-% v. Z.	2,40	2,40	2,40	2,4
w/z-Wert			0,44	0,46	0,48	0,5
w/z eq.			0,41	0,43	0,46	0,48
V _w /V _p			0,76	0,8	0,84	0,9
Mehlkorn		kg/m ³	640,1	625,9	612,2	599,2
Bindemittel		kg/m ³	619,9	605,7	592,1	579,0
Setzfließmaß		mm	630	670	790	830
Trichterauslaufzeit		sec	11,1	7,16	6,3	4,8
Sedimentation			nein	nein	nein	ja

Tabelle A 12: Betonserie B2

Beton-Nr.			B3.1	B3.2	B3.2b	B3.3	B3.4	B3.5	B3.6
Zement	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N	kg/m ³	417,0	407,2	407,2	402,5	397,9	388,9	372,2
Zusatzstoff	Kalksteinmehl	kg/m ³	250,2	244,3	244,3	241,5	238,7	233,4	223,3
Wasser		kg/m ³	172,3	177,7	177,7	180,4	182,9	187,9	197,2
Sand	0/4 mm	kg/m ³	747,3	747,3	747,3	747,3	747,3	747,3	747,3
Grobzuschlag	4/16 mm	kg/m ³	779,1	779,1	779,1	779,1	779,1	779,1	779,1
Fließmittel	Viscocrete®-1020X	M.-% v. Z.	2,40	2,40	2,60	2,40	2,40	2,40	2,40
w/z-Wert			0,41	0,44	0,44	0,45	0,46	0,48	0,53
w/z eq.			0,41	0,44	0,44	0,45	0,46	0,48	0,53
V _w /V _p			0,72	0,76	0,76	0,78	0,80	0,84	0,92
Mehlkorn		kg/m ³	687,4	671,8	671,8	664,2	656,8	642,5	615,6
Bindemittel		kg/m ³	667,3	651,6	651,6	644,0	636,6	622,3	595,5
Setzfließmaß		mm	623	670	700	710	735	740	810
Trichterauslaufzeit		sec	15,3	14,4	9,4	7,41	7,28	6,0	3,4
Sedimentation			nein	nein	nein	nein	nein.	ja	ja

Tabelle A 13: Betonserie B3

Beton-Nr.			B4.1	B4.2	B4.3	B4.4
Zement	CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N	kg/m ³	412,1	407,2	402,5	397,9
Zusatzstoffe	AHWZ *	kg/m ³	242,7	239,8	237,0	234,3
Wasser		kg/m ³	175,0	177,7	180,4	182,9
Sand	0/4 mm	kg/m ³	747,3	747,3	747,3	747,3
Grobzuschlag	4/16 mm	kg/m ³	779,1	779,1	779,1	779,1
Fließmittel	Viscocrete 1020X	M.-% v. Z.	2,40	2,40	2,40	2,40
w/z-Wert			0,42	0,44	0,45	0,46
w/z eq.			*			
V _w /V _p			0,74	0,76	0,78	0,8
Mehlkorn		kg/m ³	674,9	667,3	659,7	652,4
Bindemittel		kg/m ³	654,8	647,1	639,6	632,2
Setzfließmaß		mm	550	660	720	755
Trichterauslaufzeit		sec	30,7	14,3	14,1	9,7
Sedimentation			nein	nein	nein	nein

Tabelle A 14: Betonserie B4 (* in Deutschland nicht zugelassen; in Österreich anrechenbar mit $k = 0,8$)

A.5 Mischregime Eirich-Intensivmischer

Die eben beschriebenen Mischungen wurden alle mit einem Intensivmischer der Firma Eirich angemischt. Der verwendete Mischer besitzt ein Trommelvolumen von 75 l. Um ein optimales Mischergebnis zu erzielen, wurde ein Mischungs-Volumen von 40 l gewählt. Die Steuerung des Mixers erfolgte mit einer speziellen Hochschulsteuerung, mit der es auch möglich ist Mischprotokolle zu erzeugen. Als Mischwerkzeug kam der Stiftwirbler zum Einsatz. Die Messung der rheologischen Eigenschaften erfolgte sofort nach dem Entleeren.



Abbildung A 11: Verwendeter Eirich-Intensivmischer

Vorgang	Dauer [s]	Geschwindigkeit [m/s]	
		Wirbler	Trommel
1. Zement, Flugasche und Sand trocken mischen	30	2,3	-1
2. Wasserzugabe	30	2,3	1
3. Restwasser und Fließmittel	30	2,3	1
4. Mischen	90	2,3	1
5. Entleeren	10	2,3	1

Tabelle A 15: Mischanweisung Eirich-Intensivmischer

A.6 Einzelergebnisse RheoCT

Nachfolgend sind die Einzelergebnisse sowie die Durchschnittswerte (grau hinterlegt) für die verwendeten Betonrezepturen dargestellt. Es sind die Ergebnisse der Messprofile R2 und S2 dargestellt.

Rezept	Fließkurve					Schubspannung bei konstanter Belastung	Ein-Punkt-Verfahren		
	Bingham-Modell			AbleSEN an der Fließkurve			Dynamische Fließgrenze	Setzfließmaß	Trichter- auslaufzeit
	R ²	η	τ	Statische FG	Tatsächliche FG				
	[Pas]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[mm]	[s]	
B2.1	0,97	460,5	67,6	75,0	52,9	98,7			
	0,97	429,7	67,9	75,0	49,6	103,3			
	0,98	461,7	66,1	80,0	51,9	97,4			
						102,1			
	0,97	450,6	67,2	76,7	51,5	100,4	623	15,3	
B2.3	0,96	160,0	31,6	38,0	23,3	35,6			
	0,96	123,2	30,6	35,0	22,0	34,0			
	0,89	116,3	32,8	35,0	22,8	37,0			
	0,96	160,5	29,4	35,0	22,1	35,6			
	0,97	154,4	30,6	35,0	22,5	36,3			
	0,95	142,9	31,0	35,6	22,5	35,7	670	14,4	
B2.3 W	0,96	140,7	26,0	25,0	18,5	29,5			
	0,94	115,5	24,9	25,0	17,4	30,2			
	0,96	123,7	22,3	30,0	16,2	29,1			
	0,95	126,6	24,4	26,7	17,4	29,9	665	12,2	
B2.4	0,96	101,8	9,2	12,0	5,8	20,5			
	0,96	96,3	10,8	15,0	n.e.*	27,1			
						46,7			
					31,3				
	0,96	100,1	10,0	13,5	5,8	31,2	710	7,4	

Tabelle A 16: Versuchsergebnisse Betonserie B2 (* nicht ermittelbar)

Rezept	Fließkurve					Schubspannung bei konstanter Belastung	Ein-Punkt-Verfahren		
	Bingham-Modell			AbleSEN an der Fließkurve			Dynamische Fließgrenze	Setzfließmaß	Trichter- auslaufzeit
	R ²	η	τ	Statische FG	Tatsächliche FG				
	[Pas]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[mm]	[s]	
B3.1	0,98	287,1	25,6	n.e.	17,7	85,3			
	0,98	293,4	25,4	40,0	17,5	54,9			
	0,98	325,7	23,4	37,0	18,0	62,1			
	0,98	304,2	21,9	38,0	17,5	51,4			
		0,98	302,6	24,1	38,3	17,7	63,5	623	15,3
B3.2	0,97	241,6	9,5	25,0	8,5	34,4			
	0,98	246,4	7,4	20,0	n.e.	29,4			
	0,98	204,3	12,0	18,0	8,2	30,6			
	0,97	213,0	11,3	25,0	8,0	27,8			
		0,98	226,3	10,0	22,0	8,2	30,6	670	14,4

B3.3		k. v. E*	k. v. E	k. v. E	k. v. E	25,8		
						22,3		
						23,9		
						21,2		
						23,3	710	7,4
B3.4	0,98	143,8	4,4	12,0	4,6	22,2		
	0,98	142,8	7,2	15,0	5,0	19,9		
	0,97	146,2	7,3	15,0	4,5	18,6		
	0,96	145,9	6,3	n.e.	5,0			
	0,97	145,0	6,9	15,0	4,8	20,3	735	7,3
B3.5		k. v. E	k. v. E	k. v. E	k. v. E	11,4		
						12,5		
						12,5		
						12,1	780	6,0
B3.6	0,93	44,3	6,4	n.e.	4,5	12,7		
	0,94	42,9	4,8	n.e.	4,3	9,5		
						7,5		
	0,94	43,6	5,6	-	4,4	9,9	810	3,4

Tabelle A 17: Versuchsergebnisse Betonserie B3 (* keine verwertbaren Ergebnisse)

Rezept	Fließkurve					Schubspannung bei konstanter Belastung Dynamische Fließgrenze [Pa]	Ein-Punkt-Verfahren	
	Bingham-Modell			Ablesen an der Fließkurve			Setzfließmaß [mm]	Trichter- auslaufzeit [s]
	R ²	η [Pa·s]	τ [Pa]	Statische FG [Pa]	Tatsächliche FG [Pa]			
B4.1	0,92	410,4	24,6	60,0	13,3	58,2		
	0,97	471,4	15,2	60,0	10,3	72,0		
	0,90	474,4	13,5	n.e.	13,0	64,4		
	0,97	439,6	21,9	n.e.	13,0	76,3		
	0,94	449,0	18,8	60,0	12,4	67,7	550	29,7
B4.2	0,96	326,7	7,4	n.e.	5,1	42,7		
	0,91	398,6	4,1	n.e.	1,8	33,5		
	0,97	338,5	9,3	n.e.	5,3	33,2		
	0,92	357,5	10,1	n.e.	12,5	31,7		
	0,94	355,3	7,7	-	6,2	35,3	660	14,3
B4.3	0,98	233,0	2,4	n.e.	3,0	24,9		
	0,97	214,1	4,8	n.e.	3,5	23,8		
	0,98	182,9	5,8	n.e.	3,1	22,7		
	0,97	199,7	2,7	n.e.	2,6	22,9		
	0,97	207,4	3,9	-	3,1	23,6	720	14,1
B4.4	0,96	99,6	3,8	n.e.	1,0	19,3		
	0,95	89,3	7,7	17,0	3,6	17,0		
	0,97	98,5	6,4	13,0	3,5	15,6		
	0,96	110,7	5,0	n.e.	3,2	16,7		
	0,96	99,5	5,7	15,0	2,8	17,1	755	9,7

Tabelle A 18: Versuchsergebnisse Betonserie B4

A.7 Entwicklung des Laborrheometers eBT2

A.7.1 Ausgangssituation: BT2

Auf der Grundlage des Kugel-Messsystems wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH ein Betonrheometer für den Einsatz im Labor und auf der Baustelle entwickelt. Ausgangssituation war das existierende Betonrheometer BT2 (Abbildung A 12) der Firma Schleibinger Geräte GmbH [Teu95]. Der BT2 (BetonTester2) besteht aus zwei Teilen: einem Topf für ein Betonvolumen von 20 l und dem Messgerät mit Rührkörper (Messkörper), Messgeber für die Winkelgeschwindigkeit, Messfühler für jeden Rührkörper, einem Rechner mit Infrarotschnittstelle und einer Handkurbel. Nach dem Befüllen des Topfes wird das Messgerät auf die Zentrierstange aufgesetzt. Mit der Handkurbel wird der BT2 durch Drehen mit gleichbleibender Geschwindigkeit in Bewegung gesetzt. Auf die Rühr- bzw. Messkörper wirkt dadurch eine Kraft, die am oberen Ende des Messkörpers als Widerstandsmoment gemessen wird. Aufgrund der unterschiedlichen Abstände der Messkörper vom Mittelpunkt, ergeben sich bei gleichbleibender Winkelgeschwindigkeit (Umdrehungsgeschwindigkeit) unterschiedliche Bahngeschwindigkeiten (Geschwindigkeiten der einzelnen Messkörper). Der innere Messkörper erfährt durch die niedrigere Geschwindigkeit ein niedrigeres Widerstandsmoment als der äußere Messkörper. Nach einer Umdrehung ist die Messung abgeschlossen.

In einem v - T -Diagramm (Abbildung A 13) werden auf der Abszisse die Geschwindigkeiten und auf der Ordinate die dazugehörigen Widerstandsmomente angetragen. Unter der Annahme, dass sich Beton wie ein Bingham-Körper verhält, wird mittels Regressionsrechnung eine Fließkurve erzeugt. Durch Extrapolation dieser Kurve ergibt der Schnittpunkt mit der Ordinate die relative Fließgrenze. Die Steigung der Kurve kann als relative Viskosität ausgewertet werden. Da dem System keine definierten Scherbedingungen nach DIN 1342-1 zu Grunde liegen, ist eine Umrechnung in rheologische Kennwerte (Absolut-Werte) jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund werden die gemessenen Werte als sogenannte Relativ-Werte angegeben. Ein absoluter Vergleich mit anderen Rheometern ist daher nicht möglich. Ein Zusammenhang zwischen relativen und absoluten Messsystem ist aber dennoch gegeben.

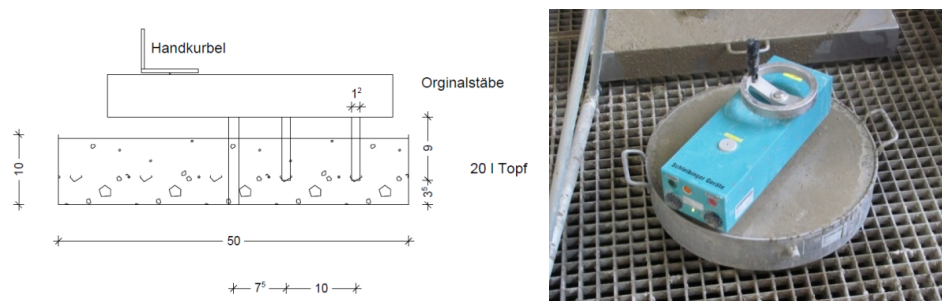


Abbildung A 12: Schematischer Aufbau des BT2 (links); der BT2 im Einsatz (rechts)

Gegenüber anderen Betonrheometern hat der BT2 einige entscheidende Vorteile. Bei den meisten Rheometern wird die Fließkurve durch die Messung des Widerstandsmoments bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten erzeugt. Da beim BT2 die Messung während einer

einzigsten Umdrehung erfolgt, können die Probleme, die bei hohen Scherbelastungen vieler Zylindergeometrien auftreten, vernachlässigt werden. Zudem wird immer im ungescherten, frischen Material gemessen. Da der BT2 nicht speziell für die Messung von SVB entwickelt wurde, ergeben sich jedoch einige Probleme bei der Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone.

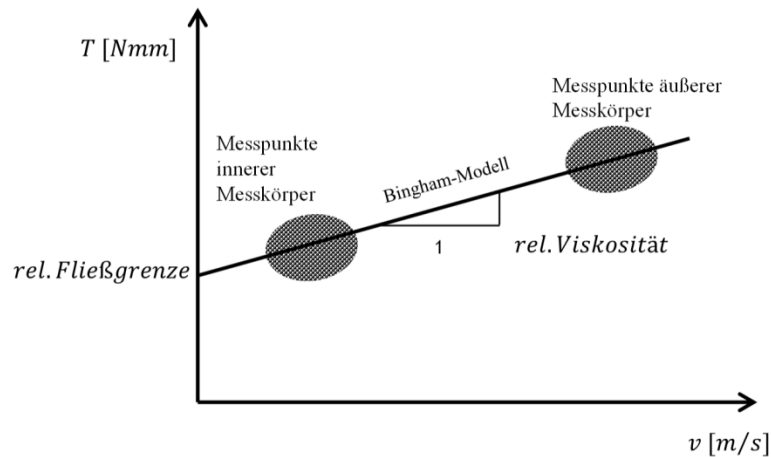


Abbildung A 13: Auswertung der BT2-Rohdaten mit Hilfe einer Ausgleichsgeraden

A.7.2 Modifikationen

A.7.2.1 Modifikationen in der Konstruktion

Erste Versuche (siehe A.7.3.1) mit dem BT2 offenbarten einige Schwachstellen des Gerätes. So war bei Messungen von SVB die Genauigkeit nicht ausreichend. Aussagen über die Konsistenz waren somit nicht möglich. Zudem zeigte die verwendete Auswertmethode einige Schwächen. In mehreren Schritten wurde daher sowohl die Messgeometrie, der Antrieb, der Topf als auch die Auswertmethode umgestaltet (Abbildung A 14).

Um im Bereich niedriger Fließgrenzen genauere Ergebnisse zu erhalten, musste der Rühr- bzw. Messkörper neu angepasst werden. Die ursprünglichen Zylinder mit einem Durchmesser von 12 mm wurden in mehreren Schritten vergrößert. Ziel war es, durch die größere Oberfläche ein höheres Widerstandsmoment zu erhalten und somit genauere Werte, vor allem bei Betonen mit hoher Fließfähigkeit, zu erzielen. Mit einem Zylinderdurchmesser von 28 mm konnten schließlich gute Ergebnisse erzielt werden (Abbildung A 19).

Ein weiteres Problem waren Ausreißer in den Messkurven, welche vor allem bei SVB auftraten, der zum Sedimentieren neigte. Dies kann dadurch erklärt werden, dass bei zu geringem Abstand zwischen Messkörper und Behälterboden ein Blockieren der Gesteinskörnung auftreten kann, was zu ungewollten Ausschlägen in der Fließkurve führt. Um ein Blockieren ausschließen zu können, war es notwendig die Tiefe des Behälters zu erhöhen und einen ausreichenden Abstand zwischen Messgeometrie und Behälterboden sicherzustellen. Ein Einfluss sedimentierter Gesteinskörnungen konnte nach dieser Verbesserung nicht mehr festgestellt werden.

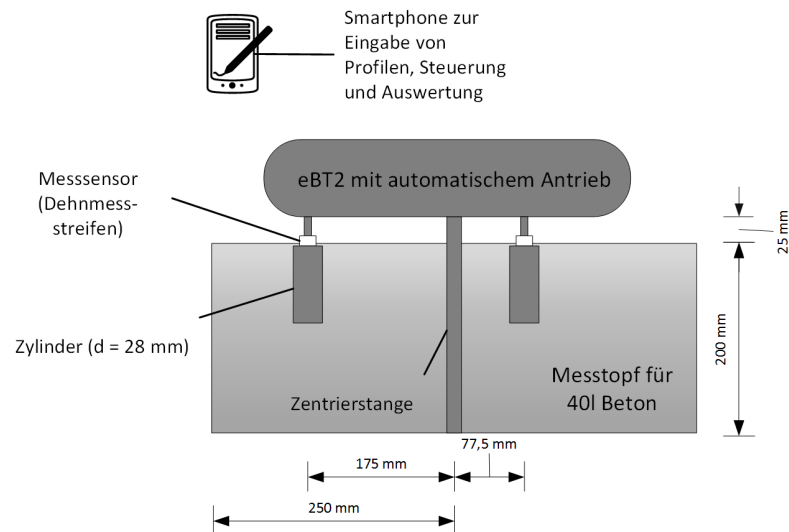


Abbildung A 14: Schematische Darstellung des neuen, erwerblichen eBT2

Da angenommen wird, dass es sich beim SVB um einen Bingham-Körper handelt, müssen alle Messpunkte auf einer Geraden liegen. Es wird also davon ausgegangen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Widerstandsmoment besteht. Aus diesem Grund hat der Hersteller bisher auch auf einen automatischen Antrieb verzichtet, weil kleine Unterschiede in der Geschwindigkeit keine Auswirkung auf die Bingham-Kurve haben. Dies ist aber nur bedingt richtig. In Wirklichkeit verhält sich der SVB nicht wie ein Bingham-Körper, sondern eher strukturviskos (scherverdünnend). Die Anwendung des Bingham-Modells ist daher kritisch zu sehen. Um trotzdem die Auswertung mit dem Bingham-Modell durchführen zu können, ist es notwendig immer mit konstanter Geschwindigkeit zu prüfen. Nur so können gleichmäßige, vergleichbare Messergebnisse erzielt werden. Durch den Einbau eines elektrisch geregelten Antriebs konnte diese Problematik überwunden werden. Die Steuerung des Rheometers erfolgt per Smartphone und einer, für den eBT2 entwickelten, App.



Abbildung A 15: Animation eBT2

Der eBT2 mit den bisher beschriebenen Modifikationen (Abbildung A 14 und Abbildung A 15) wird von der Fa. Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH gebaut und vertrieben.

A.7.2.2 Schwachstellen bei der Auswertmethode

Neben den beschriebenen Modifikationen der mechanischen Komponenten war auch eine Verbesserung der Auswertmethode notwendig. Abbildung A 16 zeigt exemplarisch die gemessenen Rohdaten des ursprünglichen BT2 inklusive der Anwendung des Bingham-Modells eines SVB. Die Punkte zwischen 0,020 und 0,50 m/s zeigen die Ergebnisse des inneren Stabes; die Punkte von 0,060 bis 0,1 m/s zeigen die Werte des äußeren Stabes. Dabei sind zwei typische Fehlerquellen markiert: Beim Start der Messung kann es zu Anlaufeffekten (transiente Effekte) kommen, dessen Werte über den tatsächlichen liegen (runde Markierung). Erst nach einer gewissen Zeit wird das Material gleichmäßig geschert. Diese Werte dürfen bei der Auswertung mit dem Bingham-Modell nicht in die Regressionsrechnung mitaufgenommen werden, da dadurch die Gerade und somit die Fließgrenze und die Viskosität verfälscht werden.

Zementleim und Frischbeton haben die Eigenschaft, dass sich durch Wechselwirkungskräfte im Ruhezustand räumliche Netzwerke, sogenannte Flockenstrukturen, bilden. Beim Mischen werden diese Strukturen durch die Scherbelastungen wieder aufgebrochen. Da aber beim BT2 immer im ungescherten Material gemessen wird, kommt es zu keinem vollständigen Abbau dieser Strukturen infolge permanenter Scherung. Lediglich im Bereich der Messkörper kommt es bei einer entsprechend hohen Scherbelastung zu einem lokalen Abbau der Struktur.

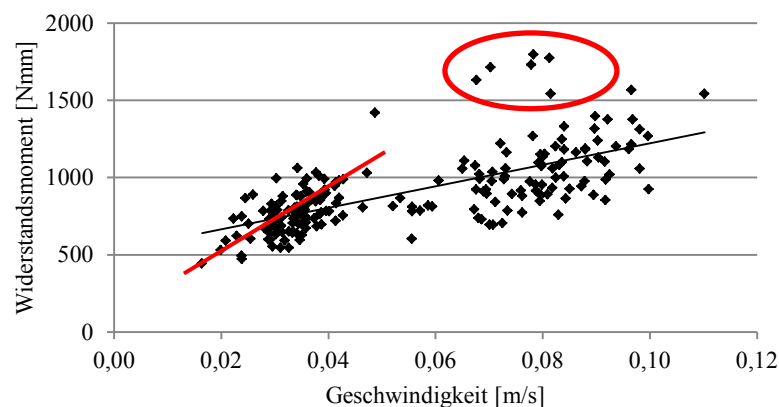


Abbildung A 16: Fließkurve BT2 mit Fehlerquellen

Wie schon erwähnt, erfolgt der Strukturbruch erst ab einer bestimmten Schergeschwindigkeit. Bis dieser eintritt, verhält sich der SVB linear-elastisch. Dies wird in der Regel durch den linearen Anstieg zu Beginn der Fließkurven ersichtlich. Da bei den Versuchen mit dem BT2 keine Fließkurven erzeugt werden, ist eine Auskunft über den linear-elastischen Bereich und den Übergang in den plastischen Bereich nicht möglich.

In Abbildung A 16 lässt die eingezeichnete Gerade im Bereich des inneren Stabes eine andere Steigung vermuten als die Auswertung mit dem Bingham-Modell. Die Richtigkeit der Auswertung mit dem beschriebenen Bingham-Modell muss somit in Frage gestellt werden.

A.7.2.3 Adaption des KMS

Da man bereits einen elektrischen Antrieb für den neu entwickelten eBT2 vorsah, war somit auch der Einsatz des Messprinzips des KMS möglich. Im ersten Schritt wurde das Messprinzip des KMS bei Zylindern ($d = 28 \text{ mm}$) angewandt (Abbildung A 14).

Im zweiten Schritt wurden die Zylinder durch eine Kugel ($d = 95 \text{ mm}$) ersetzt (Abbildung A 17). Somit konnten die Messergebnisse in Absolut-Werte umgerechnet werden. Ein Vergleich mit dem RheoCT und anderen Messgeräten ist dadurch leichter möglich.

Dem Käufer des eBT2 bleibt es freigestellt, welche Messkörper (Zylinder oder Kugel) er verwendet. Durch ein Gewinde können diese jederzeit gewechselt werden. Auch bei der Messung und der Auswertung kann der Anwender zwischen dem Prinzip des ursprünglichen BT2 und dem KMS wählen.

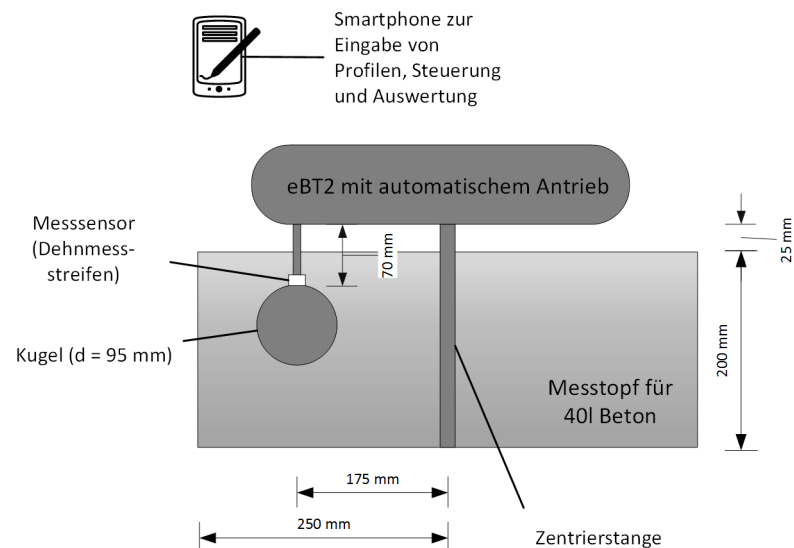


Abbildung A 17: Schematische Darstellung des eBT2 mit Kugel-Messsystem

Die Wahl der Profile erfolgte analog zum RheoCT. In dieser Arbeit kamen ein Rampenprofil zur Erzeugung einer Fließkurve sowie ein Stufenprofil zur Bewertung des Widerstandmoments bei konstanter Belastung, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, zur Anwendung. Die Steuerung erfolgte mittels Smartphone. Die Auswertung wurde mit Hilfe eines eigens entwickelten VBA Programms am PC durchgeführt.

A.7.3 Versuchsergebnisse

A.7.3.1 Vorversuche Betontester BT2

Mit dem Betonrheometer BT2 der Fa. Schleibinger Geräte wurden Versuche an unterschiedlichen Selbstverdichtenden Betonen durchgeführt. Abbildung A 18 zeigt exemplarisch die Fließkurve eines Selbstverdichtenden Betons. Es sind zwei Punktwolken zu erkennen. Diejenige im Bereich niedriger Geschwindigkeiten resultiert aus den Messungen am inneren Messkörper, die Punktwolke mit den höheren Geschwindigkeiten aus den Messungen des äußeren Stabes. Mittels einer linearen Regressionsgerade wird das Bingham-Modell erzeugt und die relative Viskosität bzw. h (hier: 6955,9 Nmm/m/s) sowie die relative Fließgrenze bzw. g (hier: 526,28 Nmm) bestimmt. R^2 gibt den Regressionskoeffizienten an. Bei diesem Beispiel beträgt $R^2 = 0,4636$ und steht somit für eine relativ niedrige Genauigkeit. Wie in A.7.2 beschrieben, liefert diese Auswertung ungenaue Ergebnisse. Mit zunehmender Fließfähigkeit des Betons nimmt R^2 immer mehr ab und die Ergebnisse werden somit ungenauer. Die Schwankungen sind auf den geringen Durchmesser der Messkörper zurückzuführen. Diese wurden daraufhin durch Größere ersetzt ($d = 28$ mm).

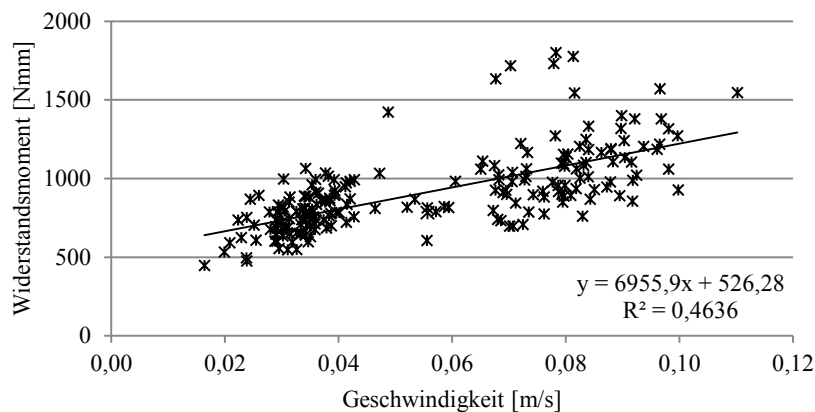


Abbildung A 18: Fließkurve eines SVB; ermittelt mit originalem BT2

Die Fließkurve mit den größeren Messkörpern ist in Abbildung A 19 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Punktwolken kleiner und der Regressionskoeffizient größer ist und die Ergebnisse somit genauer werden. Dies kann dadurch begründet werden, dass durch die größere Oberfläche des Messkörpers Ausreißer weniger ins Gewicht fallen. Trotzdem lassen diese Fließkurven keine ausreichend genauen Informationen über das Fließverhalten von Selbstverdichtenden Betonen zu, da nur zwei Belastungszustände untersucht werden.

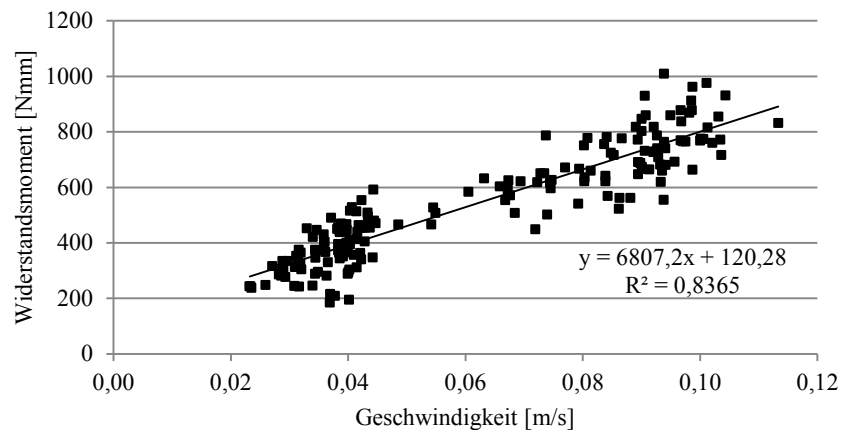


Abbildung A 19: Fließkurve eines SVB; ermittelt mit originalem BT2 und dickeren Messstäben

In Abbildung A 20 wurden das Setzfließmaß und die relative Fließgrenze mehrerer SVB-Rezepturen gegenübergestellt. Auch wenn diese Auswertung höchst kritisch betrachtet wird, wird hier versucht eine Korrelation zwischen beiden Kennwerten abzuleiten. Es zeigte sich vor allem bei den neuen, dickeren Stäben ein guter Zusammenhang. Viel wichtiger ist bei dem Diagramm aber die Aussage, dass mit zunehmendem Setzfließmaß die relative Fließgrenze immer kleiner und ungenauer wird. Für Selbstverdichtende Betone wird es demnach schon ab einem Setzfließmaß von 650 mm schwierig, eindeutige Aussagen zu machen.

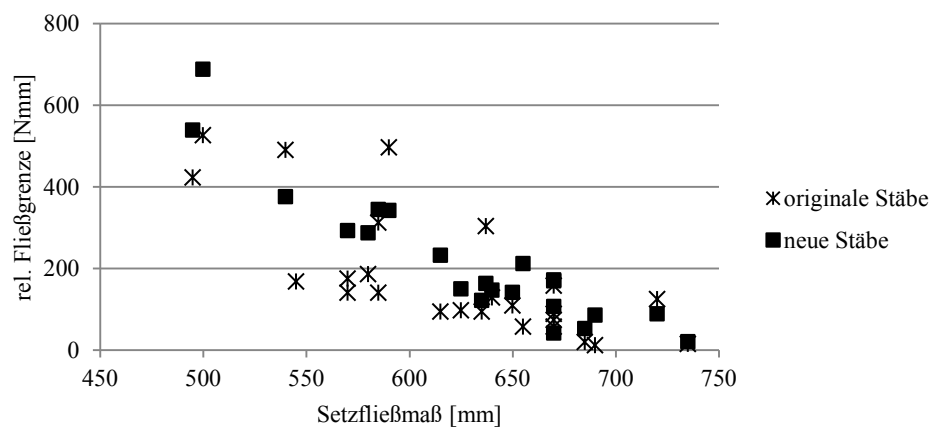


Abbildung A 20: Korrelation relative Fließgrenze BT2 und Setzfließmaß; unterschiedliche Betonrezepte

A.7.3.2 eBT2 mit Zylinder und Messprinzip KMS

Im Anschluss an die Veränderungen des Systems erfolgte eine eingehende Evaluierung des eBT2. Es wurden Zylinder mit einem Durchmesser von 28 mm verwendet und für die Messung wurde das Prinzip des KMS angewandt. Es kam ein Rampenprofil und ein Stufenprofil zur Anwendung. Dabei wurden beide Profile innerhalb einer Umdrehung durchgeführt. Die Eingabe der Geschwindigkeit erfolgte in Abhängigkeit der maximalen Geräteleistung. Die tatsächliche Geschwindigkeit v [m/s] wurde an den Messkörpern gemessen und gespeichert.

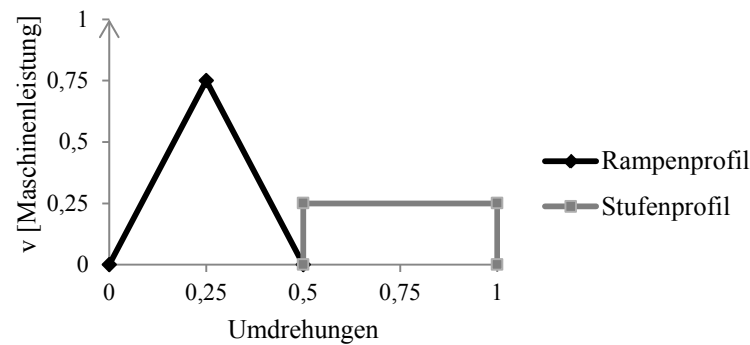


Abbildung A 21: Messprofil eBT2

Als Betonrezept diente die Betonrezeptserie B.1. Die Versuche wurden je viermal durchgeführt und zeigten eine sehr gute Reproduzierbarkeit.

Beton-Nr.		B1.1	B1.2	B1.3	B1.4	B1.5
Wasser	kg/m ³	182,9	187,9	192,7	197,2	199,4
Setzfließmaß	mm	630	720	750	775	800
Trichterauslaufzeit	sec	8,0	4,5	3,7	3,3	2,5
Sedimentation		nein	nein	nein	ja	ja

Tabelle A 19: Wassergehalt und Frischbetonprüfungen; Betonserie B1

Das Mischregime entsprach MA2. Im Anschluss an den Mischprozess wurde das Material direkt in den Messbehälter gefüllt und die Messung gestartet. Der Start dieser Messung wurde als Messzeitpunkt $t = 0$ festgelegt. Im Anschluss an die Messung mit dem eBT2 wurden das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bestimmt.

Variation Wassergehalt

Abbildung A 22 und Abbildung A 23 zeigen die gemessenen Widerstandsmomente bei steigender und fallender Geschwindigkeit für unterschiedliche Betonrezepturen, gemessen mit dem eBT2. Abbildung A 22 zeigt den Aufwärtsast der Fließkurve (Belastungsast). Dieser besteht aus den Werten des inneren und äußeren Stabes (Zylinder mit Durchmesser 28 mm). Der innere Stab liefert genaue Aussagen über den Beginn der Kurve (niedrige Bahngeschwindigkeit), der äußere Stab liefert Werte sowohl für langsame als auch für hohe Geschwindigkeiten. Auf diese Weise kann ein großer Schergeschwindigkeitsbereich abgedeckt werden. Der Einfluss des Wassergehalts ist deutlich zu erkennen. Mit zunehmendem Wassergehalt werden die Kurven demnach immer flacher. Bei den Kurven ist zudem sehr gut zu erkennen, dass die Viskosität mit zunehmender Schergeschwindigkeit immer mehr abnimmt. Eine exakte Bestimmung der Statischen Fließgrenze ist hier schwierig, da der lineare Bereich nicht ganz eindeutig ist.

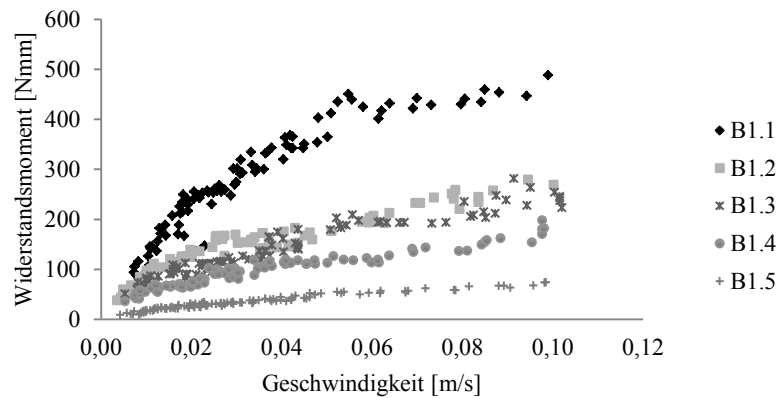


Abbildung A 22: Einfluss des Wassergehalts; aufsteigender Ast der Fließkurve; Messgerät eBT2; Betonserie B1

Abbildung A 23 zeigt die Abwärtsäste der Fließkurven bei unterschiedlichem Wassergehalt. Die gemessenen Werte wurden dabei mit dem Bingham-Modell ausgewertet. Die Formeln neben den Kurven liefern Informationen über die Viskosität (Viskositätskoeffizient; erster Wert) und die Fließgrenze (Fließwiderstand; zweiter Wert). Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigendem Wassergehalt sowohl die Viskosität als auch die Fließgrenze sinken. Der hohe Regressionskoeffizient deutet zudem darauf hin, dass es kaum Schwankungen bei der Messung gab. Die Kurven geben aber keine Auskunft über den Bereich niedriger Schergeschwindigkeiten (zwischen 0 und 0,02 m/s). Dies ist dem Messgerät geschuldet, welches im Bereich niedriger Schergeschwindigkeiten keine Messpunkte aufnehmen kann.

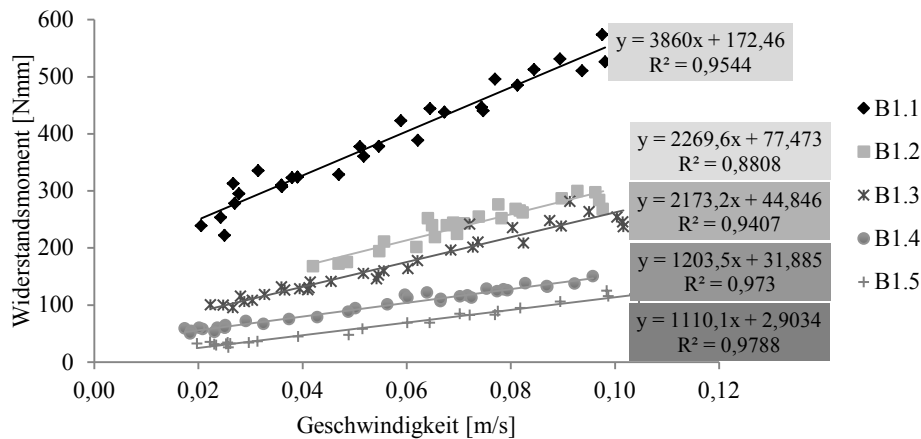


Abbildung A 23: Einfluss des Wassergehaltes; absteigende Ast der Fließkurve; Auswertung mit dem Bingham-Modell; Messgerät eBT2; Betonserie B1

Abbildung A 24 zeigt die Ergebnisse des Stufenprofils. Dabei wurde das Widerstandsmoment über eine halbe Umdrehung mit einer konstant langsamen Geschwindigkeit gemessen. Die Spitze am Anfang kann als Statische Fließgrenze und der anschließende konstante Bereich als Dynamische Fließgrenze charakterisiert werden. Mit zunehmendem Wassergehalt werden die Kurven immer niedriger. Sowohl die Statische als auch Dynamische Fließgrenze werden kleiner. Bei hohem Wassergehalt besteht kaum ein Unterschied zwischen Statischer und Dynami-

scher Fließgrenze. Da die Versuche direkt nach dem Mischvorgang erfolgten, sollte keine Statische Fließgrenze vorhanden sein. Die Abbildung zeigt aber, dass diese mit abnehmendem Wassergehalt größer werden. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Existenz einer Statischen Fließgrenze nicht nur von den thixotropen Eigenschaften des SVB beeinflusst wird, sondern auch von der Schergeschwindigkeit und der Fließfähigkeit des Materials. Untersuchungen mit einer niedrigeren Geschwindigkeit waren mit diesem Gerät nicht möglich. Eine genauere Untersuchung der Statischen Fließgrenze erfolgte daher mit dem RheoCT.

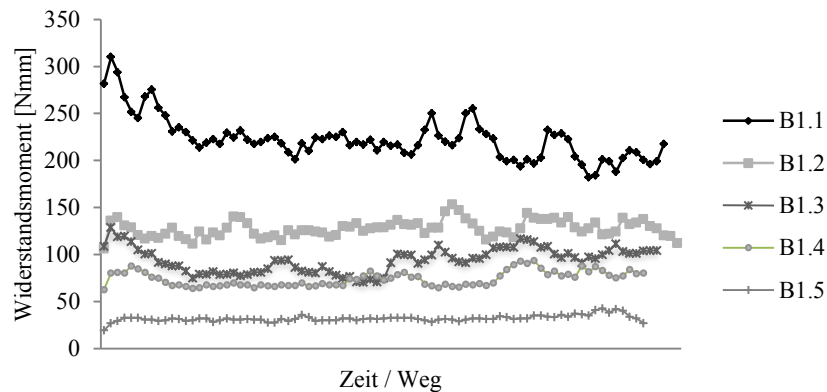


Abbildung A 24: Einfluss des Wassergehaltes; Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit; $v = 0,018 \text{ m/s}$; Messgerät eBT2; Betonserie B1

Variation Messzeitpunkt

Es liegt in der Natur des Betons, dass sich infolge von Wechselwirkungskräften während einer Ruhezeit innerer Strukturen aufbauen. Diese natürliche Entwicklung des Hydratationsprozesses ist in Abbildung A 25 und Abbildung A 26 dargestellt. In der ersten dieser zwei Abbildungen ist der aufsteigende Ast der Fließkurve direkt nach dem Mischen ($t = 0 \text{ min}$) und nach 10 min Liegezeit dargestellt. Zwischen den Messungen erfolgte kein Aufmischen der Probe. Direkt nach dem Mischprozess zeigt die Kurve einen kurzen steilen Anstieg, gefolgt von einem flacheren nahezu linearen Verlauf. Nach 10 Minuten folgt auf den sehr steilen Anstieg ein „Peak“ oder eine „Nase“, die als Statische Fließgrenze bezeichnet werden kann. Nach einem kurzen Abfall erfolgt ein linearer Anstieg, der etwas steiler ist als derjenige zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$. Die dazugehörigen Bingham-Modelle, ausgewertet am absteigenden Ast der Fließkurve, liefern für die Messung nach 10 min eine höhere relative Fließgrenze sowie eine höhere relative Viskosität. Diese Versuchsdurchführung zeigt sehr gut die Folge des Strukturbaus für die Fließkurve.

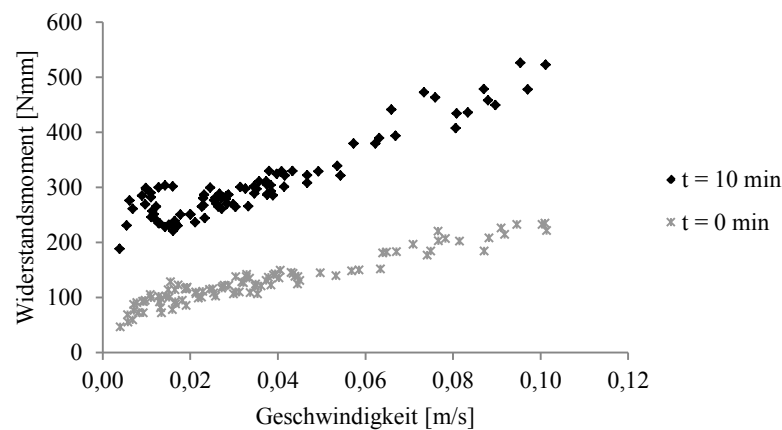


Abbildung A 25: Einfluss der Ruhezeit; aufsteigender Ast der Fließkurve; Messgerät eBT2; Rezept B1.2

Beim Profil mit konstanter Schergeschwindigkeit zeigt sich ebenfalls, dass mit zunehmender Ruhezeit sowohl die Statische als auch die Dynamische Fließgrenze ansteigen (Abbildung A 26), was auf den Aufbau innerer Strukturen zurückzuführen ist. Um Aussagen über die thixotropen Eigenschaften des Betons zu erhalten, wurde das Material vor der erneuten Messung zum Zeitpunkt $t = 5$ min und $t = 10$ min für jeweils 30 Sekunden mit einem Handrührgerät aufgemischt. Dabei konnte festgestellt werden, dass sowohl die Statische als auch die Dynamische Fließgrenze kleiner werden. Die Werte liegen dabei sogar unter den Werten zum Zeitpunkt $t = 0$ min. Dies kann durch die verzögernde Wirkung des Fließmittels und dem Freisetzen von eingeschlossenem Wasser durch die hohe Scherbelastung des Handrührgerätes begründet werden.

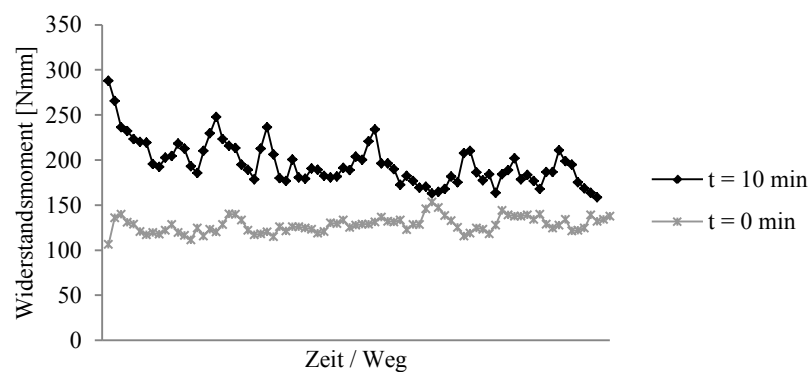


Abbildung A 26: Einfluss der Ruhezeit auf das Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit; $v = 0,018$ m/s; Messgerät eBT2; Rezept B1.2

Variation Fließmittelgehalt

Neben dem Wassergehalt und dem Einfluss der Ruhezeit wurde zudem der Einfluss des Fließmittels untersucht. Abbildung A 27 zeigt, wie sich die Fließkurven bei unterschiedlichen Fließmittelgehalten verhalten.

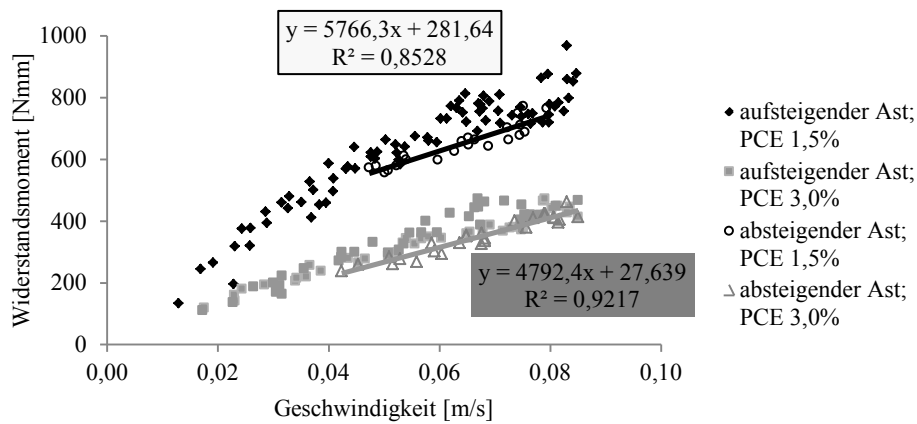


Abbildung A 27: Einfluss des Fließmittelgehalts auf Fließkurven mit Bingham-Modell; Messgerät eBT2; Betonserie B1

Es ist zu erkennen, dass sich vor allem die Relative Fließgrenze ändert. Mit zunehmendem Fließmittelgehalt wird diese niedriger, wohingegen der Relative Viskositätswert sich nur geringfügig ändert.

Bei konstanter Schergeschwindigkeit ist ebenfalls ersichtlich, dass sich mit zunehmendem Fließmittelgehalt die Fließgrenze verringert (Abbildung A 28). Bei niedrigem Fließmittelgehalt ist zudem eine Statische Fließgrenze erkennbar. Diese Ergebnisse passen gut zu den bekannten Auswirkungen der Fließmittelzugabe.

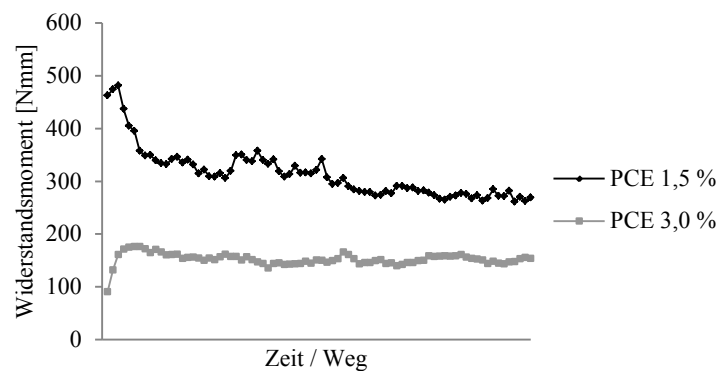


Abbildung A 28: Einfluss des Fließmittelgehalts; Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit; $v = 0,018$ m/s; Messgerät eBT2; Betonserie B1

In diesem Kapitel wurde deutlich, dass die Beurteilung der rheologischen Eigenschaften mit dem eBT2 (Zylindergeometrie und Messprinzip KMS) sehr gut möglich ist. Es konnte gezeigt werden, dass eine Fließkurve innerhalb einer Umdrehung erzeugt werden kann und dass das Widerstandsmoment bei konstanter Geschwindigkeit zur Auswertung der Statischen und Dynamischen Fließgrenze herangezogen werden kann. Es wurde auch deutlich, dass die Messgeschwindigkeit großen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Unterschiede bei verschiedenen Betonrezepturen waren deutlich zu erkennen.

A.7.3.3 Vergleich unterschiedlicher Auswertmethoden

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Auswertmethoden des eBT2 miteinander verglichen. Folgende Auswertungen sind möglich:

1. Auswertung wie beim ursprünglichen BT2: siehe A.7.1 und Abbildung A 13
2. Auswertung mit dem Prinzip des KMS

In Abbildung A 29 und Abbildung A 30 werden diese beiden Auswertmethoden verglichen. Als Betonrezept kam die Betonserie B1 zur Anwendung (Tabelle A 20). Die Messung erfolgte mit Zylindern $d = 28$ mm. Die Ergebnisse sind als Relativ-Werte angegeben. Die Aufnahme des Widerstandmoments erfolgte an zwei Stäben mit unterschiedlichem Abstand zur Rotationsachse. Der Messablauf erfolgte nach Abbildung A 21. Das Messprinzip des KMS kann sowohl beim inneren als auch beim äußeren Stab angewandt werden. Man erhält dadurch die Ergebnisse zweier Fließkurven sowie den Verlauf des Widerstandmoments bei zwei konstanten Belastungsgeschwindigkeiten. Zusätzlich kann man die Messwerte wie beim ursprünglichen BT2 auswerten. Dazu werden die Widerstandsmomente bei konstanter Belastung beider Stäbe in einem Diagramm eingetragen. Mittels Ausgleichsgerade durch die beiden Punktwolken erhält man eine Bingham-Gerade, die wiederum Auskunft über Fließgrenze und Viskosität liefert.

Rezept	V_W/V_P	Setzfließmaß [mm]	Trichterauslaufzeit [s]	$v_{\text{konst.,innen}}$ [m/s]	$v_{\text{konst.,außen}}$ [m/s]
B1.1	0,80	630,00	8,00	0,022	0,050
B1.2	0,84	720,00	4,50	0,021	0,050
B1.3	0,88	750,00	3,70	0,021	0,050
B1.4	0,92	775,00	3,30	0,022	0,050
B1.5	0,94	800,00	2,50	0,022	0,051

Tabelle A 20: Überblick über die verwendeten Betonrezepturen mit dazugehörigen Frischbetonprüfungen und der Bahngeschwindigkeit der zwei Messstäbe; Messungen durchgeführt mit eBT2

Aus Abbildung A 29 ist zu entnehmen, dass alle Methoden tendenziell gleiche Trends liefern. Die besten Ergebnisse können bei der Messung des Widerstandmomentes bei konstanter Geschwindigkeit erzielt werden. Dabei wurde das Widerstandsmoment am äußeren Stab erfasst. Aussagen über Änderungen im Wassergehalt sind hier am deutlichsten erkennbar.

Die niedrigsten und im Bereich hoher Setzfließmaße ungenauesten Werte, lieferte die Auswertmethode des ursprünglichen BT2.

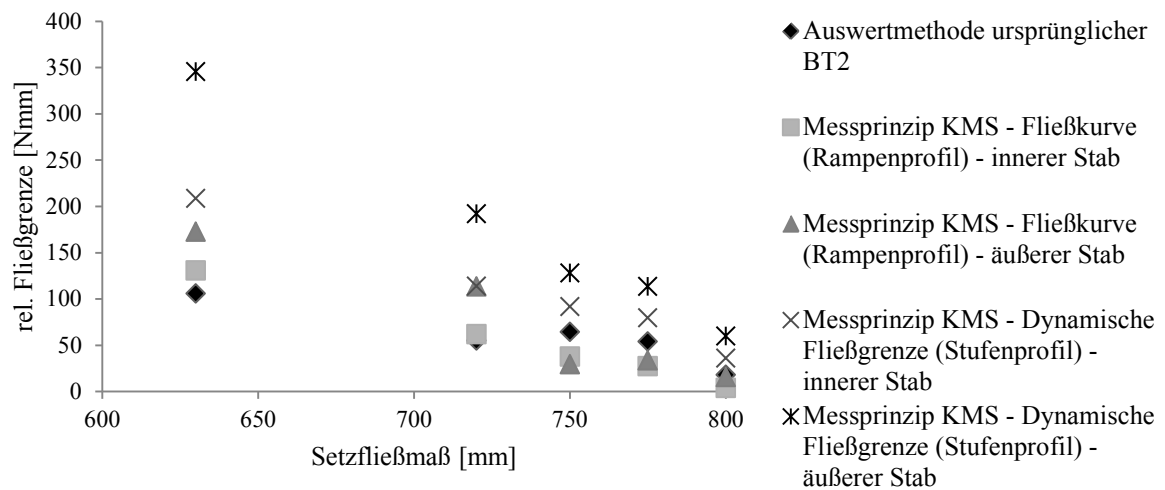


Abbildung A 29: Vergleich der relativen Fließgrenze bei Verwendung unterschiedlicher Auswertmethoden; Messgerät eBT2

Bei der Relativen Viskosität kann ein einheitlicher Verlauf festgestellt werden. Die Ergebnisse liegen ebenfalls nahe beieinander, sind aber nicht identisch. Die besseren Ergebnisse liefert die Auswertung mit dem KMS-Prinzip, bei der eine Fließkurve erzeugt wird und mit dem Bingham-Modell ausgewertet wird.

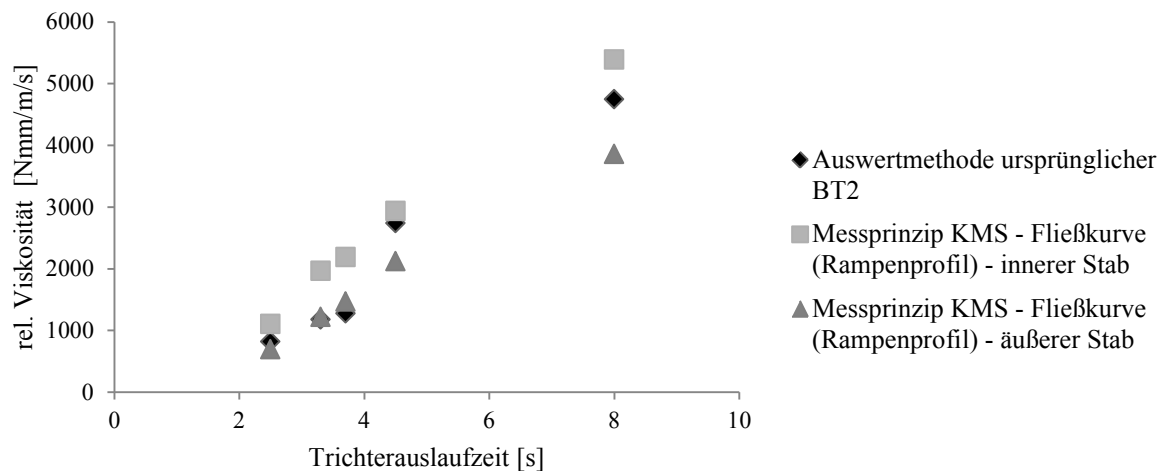


Abbildung A 30: Vergleich der relativen Viskosität bei Verwendung unterschiedlicher Auswertmethoden; Messgerät eBT2

A.7.3.4 Vergleich RheoCT und eBT2 (Kugel)

Ein direkter Vergleich des RheoCT mit dem ursprünglichen BT2 ist nicht möglich. Wie bereits festgestellt wurde, ist der BT2 zu ungenau, um Aussagen über die rheologischen Eigenschaften eines Selbstverdichtenden Betons zu treffen. Zudem sind die Messsysteme völlig unterschiedlich.

Ein Vergleich des RheoCT mit dem eBT2 ist dagegen möglich. Um die Geräte vergleichen zu können, wurde beim eBT2 anstelle der Zylinder eine Kugel mit gleichem Durchmesser ($d = 95 \text{ mm}$) wie beim RheoCT verwendet (Abbildung A 17). Für beide Geräte wurden identische Messprofile verwendet. Es kam das Stufenprofil S2 und das Rampenprofil R2 zur Anwendung.

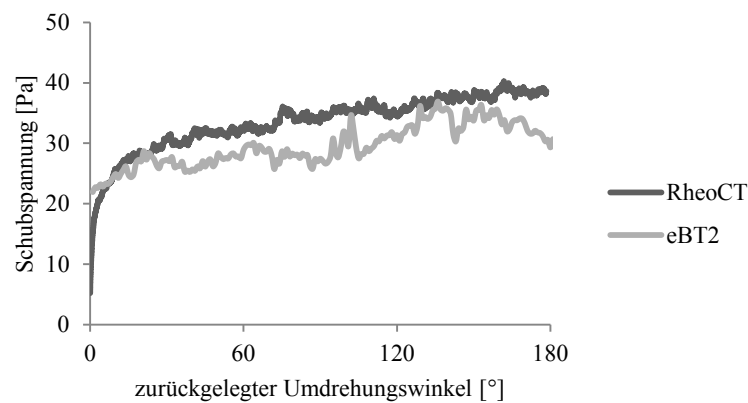


Abbildung A 31: Vergleich RheoCT und eBT2; Schubspannung bei konstanter Geschwindigkeit; Messprofil S2; Rezept B2.3

Beim Vergleich des eBT2 mit dem RheoCT konnten vergleichbare Ergebnisse erzielt werden (Abbildung A 31 bis Abbildung A 33). Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Abmessungen zurückzuführen.

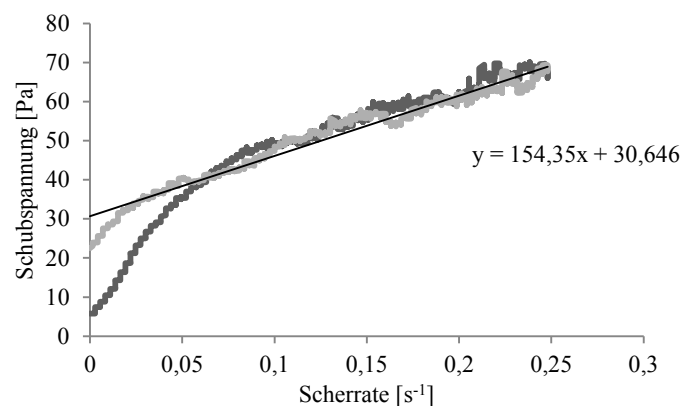


Abbildung A 32: RheoCT; Fließkurve; Messprofil R2; Rezept B2.3

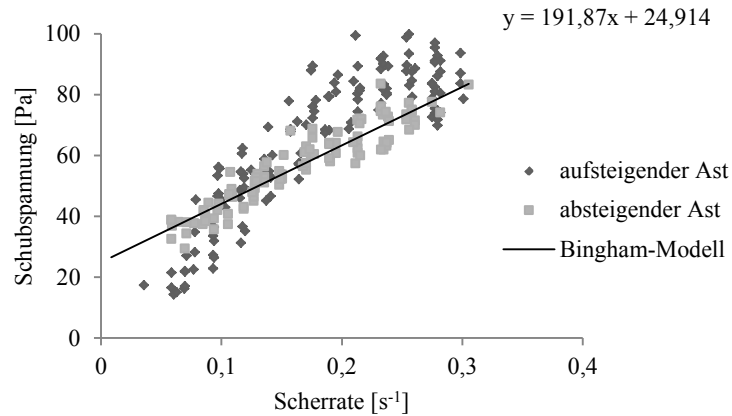


Abbildung A 33: eBT2; Fließkurve; Messprofil R2; Rezept B2.3

Bei Abbildung A 32 und Abbildung A 33 wird deutlich, dass mit dem RheoCT genauere Ergebnisse erzielt werden konnten. Durch die vielen Messpunkte wird die Fließkurve sehr dicht und kann als Linie wahrgenommen werden. Die ungenaueren Ergebnisse des eBT2 gegenüber dem RheoCT resultieren aus der einfacheren Bauart des eBT2.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Geburtsdatum/-ort: 28.09.1983 in Deggendorf

Schulbildung:

09/1990 – 08/1994 Grundschule in Prackenbach

09/1994 – 07/2003 Dominicus-von-Linprun Gymnasium in Viechtach
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Zivildienst:

08/2003 – 05/2004 Luitpoldklinik in Bad Kötzing

Studium:

10/2004 – 09/2008 Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen
Vertiefung: Konstruktiver Ingenieurbau (Diplom)
Abschluss: Diplom-Ingenieur (FH)

10/2008 – 09/2009 Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen
Vertiefung: Bauen im Bestand (Master)
Abschluss: Master of Engineering

Stipendien und Auszeichnungen:

Graduiertenstipendium zur Anfertigung der Masterarbeit im Ausland, verliehen vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD), März 2009

Auslandserfahrung:

08/2006 – 11/2006 Praxissemester in Sydney/Australien bei Technologies in Structural Engineering P/L; Aufgaben: Durchführung und Auswertung von Betonversuchen

03/2008 – 09/2008 Auslandssemester an der University of Colorado at Boulder, USA; Anfertigung der Masterarbeit

04/2009 Firmenpräsentation und Vorvertragsgespräche in den Vereinigten Arabischen Emiraten für die EBB Ingenieurgesellschaft mbH in Regensburg

2013 Fachvorträge in Chicago und Paris zum Thema Rheologie von Selbstverdichtenden Betonen

Berufserfahrung:

- 08/2006 – 11/2006* Diplomarbeit bei der Dolan GmbH in Kelheim und dem Kalkwerk Rygol GmbH & Co. KG in Painten
- 10/2008 – 02/2009* Tutor an der Hochschule Regensburg im Fach Baustoffkunde
- 11/2009 – 05/2010* Tragwerksplaner bei der EBB Ingenieurgesellschaft mbH in Regensburg
- seit 06/2010* Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg im Fachgebiet Baustoffkunde bei Herrn Prof. Dr. Kusterle

Vorträge und Veröffentlichungen:

- Fleischmann, F.; Kusterle, W.: Die Frischbetonprüfung Selbstverdichtender Betone direkt im Mischer. Rheologie Kolloquium Regensburg, 2014.
- Fleischmann, F.: Die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem Kugel-Messsystem. Jahrestagung und 54. Forschungskolloquium des DAfStb, Bochum, November, 2013.
- Fleischmann, F.; Greim, M.; Kusterle, W.: The Assessment and Control of the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete in an Concrete Mixer. Proceedings of the 1st International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, Paris, 2013.
- Fleischmann, F.; Kusterle, W.: A new concrete rheometer for the assessment of the rheological properties of Self-Compacting Concrete. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete - SCC2013, Chicago, 2013.
- Fleischmann, F.; Kusterle, W.: Selbstverdichtender Beton (SVB) – von der Herstellung bis zum Einbau. VDB - Fachtagung, Regensburg, 2013.
- Fleischmann, F.: Selbstverdichtender Beton - Herstellung und Frischbetoneigenschaften. Sika Betontage, Salzburg, 2013.
- Fleischmann, F.; Kusterle, W.: Das Betonrheometer BT2 zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone - Möglichkeiten und Entwicklungspotential. Rheologie Kolloquium Regensburg, Onlinepublikation: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie>, Regensburg, 2012.

Greim, M.; Fleischmann, F.: Oscillation Shear Measurements of SCC with a Couette Type Rheometer. Proceedings of HAC 2012- the 3rd Ibero-American Congress on SCC, Madrid, 2012.

Kusterle, W.; Fleischmann, F.; Christlmaier, P.: Ein neues Beurteilungsverfahren der Konsistenz von Selbstverdichtenden Betonen. Forschungskolloquium des VÖZfi, Onlinepublikation: <http://www.zement.at/index.php/service/publikationen/kolloquium>, Wien, 2012.

Fleischmann, F.; Kusterle, W.: The assessment and control of the flowability of Self-Compacting Concrete. Rheologie Kolloquium Regensburg, Onlinepublikation: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie>, Regensburg, 2011.

Eidesstattliche Versicherung

gemäß § 7 der Promotionsordnung der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften vom 15.03.2012.

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe ausgeführt und verfasst habe.

Dabei wurden die „Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis und Grundsätze für das Verfahren bei vermutetem wissenschaftlichen Fehlverhalten“ in der jeweils neuesten Fassung eingehalten.

Die Arbeit wurde in dieser oder ähnlicher Form bisher weder bei dieser oder einer anderen in- oder ausländischen Hochschule als Dissertation eingereicht.

Florian Fleischmann, M.Eng.