

# Erfassung und in situ Aussteuerung der rheologischen Eigenschaften von SVB

von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Ruhr-Universität Bochum zur Erlangung  
des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.–Ing.) genehmigte

Dissertation

von

Ivan Parić

Bochum, 2023

Gutachter:

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

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

Mündliche Prüfung am 17.05.2023

„Lange habe ich mich gesträubt.

Endlich gab ich nach!

Wenn der alte Mensch zerstäubt, wird der neue wach.“

*J. W. v. Goethe*

*Meinem Vater*

*Anto Parić*

*(1948-2022)*

*gewidmet*

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2016 bis 2022 im Rahmen des Forschungsprogramms SVBA „Selbstverdichtender Beton mit zeitnaher Aussteuerung der Betonzusammensetzung im Betonmischer“. Ich durfte die Forschungsarbeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Bauingenieurwesen der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg durchführen. Das Forschungsvorhaben wurde von der Bayerischen Forschungstiftung gefördert, wofür ich hier meinen großen Dank ausspreche. Im Rahmen einer kooperativen Promotion wurde diese Arbeit von der Ruhr-Universität Bochum als Dissertation angenommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher von der Ruhr-Universität Bochum für die stete Unterstützung, die motivierenden Gespräche, die Betreuung meiner Dissertation und Übernahme des Referats.

Ein herzlicher Dank geht an Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Wolfgang Kusterle für das Vertrauen, die Förderung meiner Ausbildung und die herausragende fachliche und menschliche Betreuung über etliche Jahre.

Das Forschungsprogramm wurde in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern realisiert. Daher gilt den beteiligten Unternehmen und ihren Vertretern ein besonderes Dankeschön. Diese sind: Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. Oliver Teubert und Herrn Dipl.-Ing. Markus Greim, Südbayerisches Portlandzementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. Michael Hartmaier und Herrn Dipl.-Ing. Peter Christlmeier, BETOSERV GmbH, vertreten durch Frau Dr. Saskia Bernstein, Godelmann GmbH & Co. KG, vertreten durch Herrn Dipl.-Chem. Horst Weißmann und Hemmerlein Ingenieurbau GmbH, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. Markus Erhardt. Danke für ihr Vertrauen, die Hilfestellungen und die gute Zusammenarbeit.

Für die programmiertechnische Umsetzung des Algorithmus und der Aussteuerungssoftware, bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Schneider und Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlegl und deren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von der Fakultät Maschinenbau der OTH Regensburg.

Ich bedanke mich auch bei der Fakultät Bauingenieurwesen der OTH Regensburg und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, besonders bei den Werkmeistern Johann Stolz und Markus Simson, sowie den zahlreichen Studierenden, die am Forschungsprogramm SVBA mitgearbeitet haben. Es war mir eine Freude und Ehre, mit ihnen in diesem Forschungsprogramm an dieser schönen Institution arbeiten und leben zu dürfen.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Ruža und Anto Parić und meinem Bruder Zlatko, die meine persönliche Entwicklung und meine Talente gefördert und unterstützt haben.

## Abkürzungen, Symbole und Begriffe

SVB	Selbstverdichtender Beton
SCC	Self-Compacting Concrete
Frischbeton	Beton, der fertig gemischt ist und sich im verarbeitbaren Zustand befindet
HPC	High Performance Concrete (Hochfester Beton)
FTW	Fertigteilwerk
KMS	Kugelmesssystem
FM	Fließmittel
PCE	Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether
ST	Stabilisierer
FA	Flugasche
KSM	Kalksteinmehl
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert: Verhältnis von Masse Wasser zu Masse Zement
W/B-Wert	Wasser/Bindemittel-Wert: Verhältnis von Masse Wasser zu Masse Bindemittel, zum Bindemittel zählen hier Zement und alle Betonzusatzstoffe unabhängig von ihrer Reaktivität
W/P-Wert	Wasser/Pulver-Wert: Verhältnis von Volumen Wasser zu Volumen Pulver; zum Pulver zählen alle Feinstoffe $\leq 0,125$ mm unabhängig von ihrer Reaktivität
M.-% v.Z.	Masseprozent vom Zement
sm	Setzfließmaß
$t_{Tr}$	Trichterauslaufzeit
$t_{500}$	Fließzeit
$SF_{FC}$	Kegelsetzfließmaß
$t_{FC}$	Kegelauslaufzeit
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$\tau$	Schubspannung
$\tau_y / \tau_f$	Fließgrenze
$\eta$	Viskosität
$\dot{\gamma}$	Scherrate/Schergeschwindigkeit
F	Scherkraft
A	Scherfläche
v	Geschwindigkeit

g	Fließgrenzparameter
g <sub>B</sub>	Fließgrenzparameter nach Bingham
g <sub>D</sub>	Fließgrenzparameter Dynamische Fließgrenze
h	Viskositätskoeffizient/Viskosität
T	Scherwiderstand, Temperatur
t	Zeit
s	Sekunden
min	Minuten

## Kurzfassung

Selbstverdichtender Beton (SVB; englisch: SCC, Self-Compacting Concrete) ist ein moderner Hochleistungsbeton, der neue Möglichkeiten in der Erstellung hoch anspruchsvoller Bauwerke und Betonprodukte eröffnet. Die erhöhte Dauerhaftigkeit und eine bessere Sichtbeton-Qualität im Gegensatz zu Rüttelbeton sind nur einige Vorteile von SVB. Dieser Hochleistungsbeton wird jedoch kaum auf dem deutschen Transportbetonmarkt angeboten. Im Fertigteilektor kommen Einsätze vereinzelt vor.

Ein wesentlicher Grund für den geringen Einsatz der SVB-Technologie ist die geringere Robustheit im Vergleich zu konventionellem Rüttelbeton und die damit einhergehenden Herausforderungen bei der Herstellung. Durch die geringe Robustheit können die designierten Frischbetoneigenschaften infolge minimaler Schwankungen im wirksamen Wassergehalt oder der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe eingebüßt werden.

Zur Optimierung der Robustheit von SVB sind seit seiner Entwicklung in den Achtzigerjahren des vorigen Jahrhunderts viele wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt worden. Gezielt abgestimmte und robuste SVB-Rezepturen sind weniger anfällig auf eine natürliche Schwankungsbreite der Ausgangsstoffe.

Allerdings können selbst moderne Betonmischanlagen und eine gute Qualitätskontrolle die auftretenden Schwankungen in den Ausgangsstoffen sowie die Einflüsse aus wechselnden Umgebungs- und Herstellbedingungen nicht genügend genau erfassen und in den Produktionsprozess integrieren.

Es erfordert ein hohes Maß an betontechnologischem Verständnis, die relevanten rheologischen Eigenschaften von SVB zielsicher einzustellen und während der Produktion dann aufrecht zu erhalten. Erfahrungsgemäß ist der Ausschussanteil von SVB im Vergleich zu Rüttelbeton immer noch höher.

Aktuell gibt es keine anerkannten und schnellen Messsysteme, die Schwankungen der Konsistenz während der Produktion zielsicher messtechnisch erfassen, bewerten und gegebenenfalls zielgerichtet und exakt korrigieren können.

Für die exakte Bewertung der Konsistenz von SVB während der Herstellung diskutiert die vorliegende Arbeit den Einsatz eines neuen rheologischen Messsystems. Bei Abweichungen von einer angestrebten Konsistenz bzw. von einer guten Verarbeitbarkeit können durch den Einsatz des neuen Messsystems zielsicher Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden.

Um dies zu realisieren, wurden umfangreiche rheologische Untersuchungen an selbstverdichtenden Frischbetonen mit einem Kugelmesssystem bzw. Betonrheometer durchgeführt. Die Untersuchungen bzw. rheologischen Messungen wurden direkt in einem Laborbetonmischer realisiert. Die Ergebnisse dieser Arbeiten zeigen, dass die Konsistenz von SVB unmittelbar nach der Herstellung im Mischer zielsicher und reproduzierbar gemessen, und somit beurteilt werden kann. Dies geschieht unmittelbar nach dem Mischprozess vor dem Entleeren des Mischgutes. In einer kurzen Mischpause wird die Konsistenz mit einem Rheometer am ruhenden Frischbeton geprüft. Zu diesem Zeitpunkt ist es noch möglich, gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen einzuleiten.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden vier verschiedene SVB-Rezepturen des Mehlkorntyps untersucht. Einzelne Mischungen jeder Rezeptur wurden mit unterschiedlich wirksamen Wassergehalten bzw. w/z-Werten hergestellt. Dabei wurden planmäßig zu den Mischungen mit optimalem Wassergehalt und der entsprechend angestrebten Konsistenz auch gezielt solche mit Wassermangel und Wasserüberschuss hergestellt. Die einzelnen Messergebnisse liefern aneinandergereiht rheologische Kennlinien über den w/z-Wert. Eine solche Kennlinie für den Wasseranspruch einer Rezeptur erlaubt die zahlenmäßige Definition eines guten Verarbeitungsbereichs bzw. eines optimalen Verarbeitungspunktes. Bereiche, in denen der Beton stagniert oder zum Sedimentieren neigt, sind ebenfalls in diesen Kennlinien durch Zahlenwerte definiert.

Nach der SVB-Richtlinie des DAfStb Abs. 5.2.6 darf SVB nur mit Fließmittel (FM) hergestellt werden.

Moderne Betonzusatzmittel haben auch in geringen Mengen eine Wirksamkeit und Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften bzw. die Konsistenz (Verarbeitbarkeit) von Frischbeton. Aufgrund dieser Tatsache wurden auch die Möglichkeiten einer Konsistenzoptimierung durch Betonzusatzmittel untersucht. Zu diesem Zweck wurden Kennlinien mit Fließmitteln und Stabilisierern generiert. Mischungen, die gezielt mit Wassermangel hergestellt wurden und stagnierten, wurden durch schrittweise Zugabe von zusätzlichem Fließmittel in einen Ziel-Verarbeitungsbereich geführt. Mischungen, die planmäßig mit einem Wasserüberschuss hergestellt wurden und bereits zum Sedimentieren neigten, brachte man durch schrittweise Nachdosierung mit einem Stabilisierer in einen robusten Verarbeitungsbereich. Bei diesen Untersuchungen wurde nach jeder einzelnen Zudosierung des jeweiligen Zusatzmittels bzw. nach dem Untermischen eine rheologische Prüfung zur Erfassung von einhergehenden Änderungen der Konsistenz vollzogen. Auf Basis von gemessenen rheologischen Kennwerten ergaben sich, die einzelnen Messpunkte aneinandergereiht, Kennlinien für den zusätzlichen Fließmittel- oder Stabilisierer-Gehalt.

Kennlinien für den Wasseranspruch sowie Kennlinien für zusätzliches Fließmittel- und zusätzlichen Stabilisierer bilden eine Wissensdatenbank für die entsprechend untersuchte Rezeptur. Eine solche Wissensdatenbank beschreibt die Verarbeitungseigenschaften einer SVB Rezeptur bei unterschiedlich wirksamen Wasser- und Zusatzmittelgehalten. Mit den Kennlinien wird auch ein Punkt für die angestrebte Konsistenz definiert und in dieser Wissensdatenbank gespeichert. Ein neu entwickelter Algorithmus, eingebettet in eine eigens entwickelte Software, kann die rheologischen Messwerte einer aktuellen Mischung mit einer entsprechend ermittelten und gespeicherten Wissensdatenbank vergleichen. Bei Abweichungen von der angestrebten Konsistenz berechnet das Aussteuerungssystem durch Vergleich des Istwerts mit dem Sollwert die Art und Menge einer zusätzlich erforderlichen Komponente. Das bedeutet konkret, dass für eine zu steif hergestellte Mischung eine exakt benötigte Menge an Wasser oder zusätzlichem Fließmittel berechnet wird. Eine Mischung, die zu flüssig ist, wird durch eine genau berechnete Menge an Stabilisierer in einen robusten Zustand eingestellt.

Im Gegensatz zu den genormten Prüfmethode, wie z. B. Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit oder dem Auslaufkegel, können die Verarbeitungseigenschaften von SVB durch das neue rheologische Messprinzip wesentlich früher, schneller, präziser und rationeller erfasst werden.

Durch die Interpretation der Versuchsergebnisse konnte die Aussteuerung von SVB über nur einen rheologischen Parameter ausreichend begründet werden.

Abschließend zeigen die Ergebnisse der Versuchsserien mit automatisch berechneten Korrekturanweisungen, zu zielgerichteten Korrekturen von Frischbetonen mit abweichender Konsistenz, befriedigende Resultate.

Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit vom Alter des Frischbetons (Rücksteifen), zu Thixotropieeffekten versus Liegezeit und unterschiedlicher Frischbetontemperaturen werden ebenfalls diskutiert.

## Abstract

Self-Compacting Concrete (SCC) is a modern high-performance concrete that opens up completely new possibilities for the creation of highly ambitious structures and concrete products. The increased durability and a much better quality of exposed concrete surfaces, in contrast to vibrated concrete, are just a few of the advantages of SCC. However, this high-performance concrete is rarely offered on the German ready-mix concrete market. In the precast sector, there are occasional uses.

A major reason for the rare use of the SCC technology is its lower robustness compared to conventional vibrated concrete and the associated challenges in production. Due to the low robustness, the designated fresh concrete properties can be lost as a result of small fluctuations in the effective water content or the composition of the constituents.

A great deal of scientific work has been done to optimize the robustness of SCC since its development in the 1980s. Well-designed and robust SCC formulations are less susceptible to natural fluctuations in the raw materials.

However, even modern concrete mixing plants and proper quality control cannot collect and process with sufficient accuracy the complex fluctuations in the constitutive materials and the influences from changing environmental and manufacturing conditions.

It requires a high degree of understanding of concrete technology to develop the relevant rheological properties of SCC in a targeted manner and to maintain them during production.

Experience has shown that the reject rate from SCC is still higher compared to vibrated concrete.

Currently no recognized and fast measuring systems, which are able to measure accurately, subsequently evaluate fluctuations in consistency during production and, if necessary, correct them in a targeted and precise manner.

For the exact assessment of the consistency of SCC during production, the present work discusses the use of a new rheological measuring system. In the event of deviations from an aimed consistency or from good process ability, corrective measures can be initiated with the use of the new control-system.

In order to achieve this, extensive rheological tests were carried out on fresh self-compacting concrete using a ball measuring system (concrete rheometer). The investigations and rheological measurements were carried out directly in a laboratory concrete mixer. The results of this work show, that the consistency of SCC immediately after the production in the mixer can be measured, classified and thus assessed in a targeted and reproducible manner.

As part of the research work, four different SCC recipes with high powder content were examined. Individual mixtures of each mix-design were produced with different effective water contents (w/c values). In addition to the mixtures with the aimed water content and the corresponding targeted consistency, mixtures with a lack of water and excess of water have also been specifically produced. The individual results provide rheological characteristic curves for the effective water content. Such a characteristic curve for the water requirement of a recipe allows the numerical definition of a good processing range and an target processing point. Areas in

which the concrete stagnates or tends to sediment are also defined by numerical values in these characteristic curves.

SCC can and may only be produced with highly effective superplasticizers (HRWRA).

Even in small quantities, modern concrete admixtures have an effectiveness and influence on the rheological properties and the consistency (workability) of fresh concrete. Due to this fact, the possibilities of optimizing the consistency using concrete admixtures were also examined. For this purpose, characteristic curves were generated with superplasticizers and stabilizers. Mixtures that were specifically produced with a lack of water and stagnated have been brought into a proper processing range by the step by step addition of additional superplasticizer. Mixtures that have been produced with an excess of water as planned and already tended to sediment could be brought into a robust processing range by gradually adding more stabilizer. In these investigations, a rheological test was carried out after each individual dosing of the respective admixture to record the associated changes in consistency. Based on the measured rheological values, the individual measuring points are linearized, and leading to characteristic curves for the additional superplasticizer or stabilizer content.

Characteristic curves for the water requirement as well as a characteristic curves for additional superplasticizer and additional stabilizer generate a knowledge database for the mix-design examined accordingly. Such a knowledge database describes the processing properties of an SCC recipe with different effective water and additive contents. A target point for the aimed consistency is also defined together with the characteristic curves and stored in this knowledge database. A newly developed algorithm, embedded in specially developed software, can compare the rheological measured values of a current mixture with a correspondingly determined knowledge database. In the event of deviations from an target consistency, the control system calculates the type and quantity of an additional component required by comparing the actual value with the target value. In concrete terms, this means that the exact amount of water or additional superplasticizers required is calculated for a mixture that has been produced too stiff. A mixture that is too wet will be adjusted to a robust state by a precise calculated amount of stabilizer.

In contrast to the classic standardized test methods such as e.g. slump flow and funnel flow time, the processing properties can be evaluated much earlier, faster, more precisely and more efficiently thanks to the new rheological measuring principle.

By interpreting the results, it was possible to adequately justify the control of SCC using just one rheological parameter.

Finally, the results of the test series show good results for corrections of fresh SCC of insufficient consistency by the automatically calculated correction instructions.

Investigations on the workability depending on the age of the fresh concrete (stiffening), on thixotropic effects versus time and different fresh concrete temperatures are also discussed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Ziel dieser Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b> .....	<b>3</b>
2.1	Betonkonsistenz und klassische Rheologie .....	3
2.1.1	Grundlagen .....	3
2.1.2	Selbstverdichtender Beton (SVB) .....	4
2.1.3	Robustheit von SVB vs. Einflussfaktoren .....	6
2.1.4	Einflussfaktoren auf die Konsistenz aus der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe .....	8
2.1.5	Äußere Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit .....	21
2.2	Beurteilung der Verarbeitungseigenschaften von Stoffen, Stand der Technik.....	23
2.2.1	Klassische Rheologie und Rheometrie, Normen, Definitionen, Festlegungen ..	23
2.2.2	Relativmesssysteme und Kennwerte aus rheometrischen Untersuchungen .....	28
2.2.3	Klassische Beurteilung der Konsistenz und Festlegungen von Betonen.....	32
2.3	Rheologische Messsysteme zur Konsistenz-Optimierung im Betonmischer .....	36
2.4	Kugelmesssysteme (KMS) für Zementleim, Mörtel und SVB.....	37
2.4.1	KMS für Zementleim und Mörtel nach <i>Tyrach</i> [58] .....	37
2.4.2	Kugelmesssystem für SVB nach <i>Fleischmann</i> [24].....	38
2.5	Rheologische Untersuchungen im Mischer mit einem langsam laufenden KMS .....	40
2.6	Zusammenfassung der Literaturrecherche.....	42
<b>3</b>	<b>Eigene Untersuchungen und Entwicklungen</b> .....	<b>45</b>
3.1	Konzept, Rezepte, Verarbeitung .....	45
3.1.1	Konzept.....	45
3.1.2	Verwendete Betonrezepturen und Ausgangsstoffe.....	45
3.1.3	Verwendeter Betonmischer im Labor.....	48
3.2	Rheologische Untersuchungen im Mischer .....	48
3.3	Ermittlung und Verifizierung aussagekräftiger rheologischer Kennwerte .....	50
3.4	Systematische Erstellung von Wissensdatenbanken und Vergleiche der einzelnen rheologischen Parameter.....	51
3.4.1	Allgemeines .....	51
3.4.2	Erstellung von Kennlinien für den Wasseranspruch .....	52
3.4.3	Kennlinie für Fließmittel .....	53
3.4.4	Kennlinie für Stabilisierer .....	54

3.5	Versuche zur Korrektur suboptimaler Frischbetoneigenschaften.....	54
3.6	Untersuchungen zu Verarbeitbarkeit über die Zeit, Thixotropie versus Liegezeit und Temperatur.....	55
<b>4</b>	<b>Eigene Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>56</b>
4.1	Vorbereitende und begleitende Arbeiten .....	56
4.1.1	Erkenntnisse aus Proben-Vorbereitung und Herstellung .....	56
4.1.2	Labormischer und Mischprogramme.....	56
4.2	Rheologische Untersuchungen im Mischer .....	58
4.3	Ermittlung und Verifizierung aussagekräftiger rheologischer Messwerte .....	60
4.4	Erstellung einer Wissensdatenbank für einen SVB am Beispiel der Rezeptur 3b und Diskussion der ermittelten rheologischen Kennwerte .....	73
4.4.1	Allgemeines .....	73
4.4.2	Erstellung von Kennlinien für den Wasseranspruch .....	73
4.4.3	Erstellung von Kennlinien für zusätzliches Fließmittel .....	77
4.4.4	Erstellung von Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer .....	81
4.4.5	Vergleich der möglichen Präzision von dynamischer Fließgrenze und Viskosität.....	84
4.4.6	Zusammenfassung zur Erstellung einer Wissensdatenbank und Bewertung der rheologischen Parameter .....	86
4.5	Erstellung eines Algorithmus zur Aussteuerung .....	91
4.6	Untersuchungen und Nachweise zur Funktion der Korrekturmaßnahmen mit dem Aussteuerungssystem.....	92
4.7	Untersuchungen zur Beurteilung der Verarbeitbarkeitszeit, Liegezeit vs. Thixotropie und Frischbeton Temperatur .....	105
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>110</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>114</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>119</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>125</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>126</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>137</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

In der Praxis der SVB-Produktion ist es schwierig, kontinuierlich eine gleichbleibende Konsistenz bzw. eine passende Verarbeitbarkeit von SVB gleicher Rezeptur herzustellen. Im Gegensatz zu Rüttelbetonen hat SVB ein relativ kleines Verarbeitungsfenster, in dem er die selbstverdichtenden Eigenschaften aufweist. Nur in diesem Bereich fließt und entlüftet er selbstständig, ohne zu sedimentieren.

Auch wenn Zement und Gesteinskörnungen industriell hergestellt und aufbereitet werden, bleibt Beton ein Produkt aus überwiegend regional und natürlich vorkommenden Ausgangsstoffen. Die Verarbeitung dieser Ausgangsstoffe bringt auch natürlich vorkommende Schwankungen in den Produktionsprozess mit ein. Dies führt zwangsläufig zu wechselnden rheologischen Eigenschaften.

Auch wechselnde Umgebungsbedingungen (insbesondere der Feuchtegehalt der Gesteinskörnung, der Zeitfaktor und die Temperatur) und Produktionsschwankungen (z.B. Ungenauigkeiten bzw. Toleranzen der Dosieranlagen) haben Einfluss auf die Konsistenz von Frischbeton, besonders bei frischem Selbstverdichtendem Beton.

Die Folge, dieser im Einzelnen oft nur geringen Schwankungen, ist eine ungleichmäßige Verarbeitbarkeit, welche sich negativ auf die Qualität der Endprodukte auswirkt. Obwohl die Betonmischanlagen über automatische Mess-, Kontroll- und Steuermechanismen verfügen, sind sie nicht in der Lage, diese Schwankungen in der Praxis der SVB-Produktion genau genug zu erfassen und in den laufenden Herstellungsprozess zu integrieren. Auch eine gute Qualitätsüberwachung bietet keine Sicherheit für fortlaufend optimale Resultate.

Derzeit wird die Frischbetonqualität, genauer gesagt die Konsistenz, mit zeitaufwändigen Frischbetonprüfungen, wie z. B. Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit, überprüft. Die Ergebnisse dieser Versuche sind infolge einer Versuchsdauer von mindestens 20 Minuten nicht geeignet, um effektiv und rationell in den Produktionsprozess integriert zu werden.

Da SVB auch bei der Herstellung von Sichtbetonfertigteilen oder Bauwerken eingesetzt wird, werden aus gestalterischen und optischen Gründen oft auch schwierig zu verarbeitende Ausgangsstoffe verwendet. Dazu zählt z. B. die Verwendung von Marmorbruch (Marmorsplitt) als Gesteinskörnung. Zur farblichen Gestaltung kommen auch Farbpigmente zum Einsatz. Die gestalterischen Vorgaben führen dazu, dass es sich bei solchen SVB-Rezepturen in vielen Fällen um Sechs- oder Siebenstoffsysteme handelt. Die Entwicklung und zielsichere Herstellung solcher SVB-Rezepturen ist aus betontechnologischer Sicht eine weitaus größere Herausforderung als die Herstellung klassischer Rüttelbetone.

## 1.2 Ziel dieser Arbeit

Infolge einer geringeren Robustheit und der einhergehenden Problematik bei der zielsicheren Herstellung von SVB wurde folgender Ansatz entwickelt:

- Die Konsistenz bzw. die Verarbeitungseigenschaften von Selbstverdichtenden Betonen sollen mit einem neuen Mess- und Steuersystem während der Herstellung im Mischer zielsicher erfasst werden. Bei Abweichungen von der angestrebten Konsistenz der jeweiligen Rezeptur soll automatisch die Menge einer geeigneten Komponente berechnet werden, die eine Korrektur auf die angestrebte bzw. optimale Konsistenz ermöglicht.

Um Korrekturmaßnahmen realisieren zu können, waren elementare Fragestellungen zur Erfassung der Frischbetonkonsistenz während der Herstellung zu klären. Eine Korrektur abweichender Verarbeitungseigenschaften setzt eine präzise Feststellung der Konsistenz voraus.

Zum Erreichen des Hauptzieles mussten folgende Teilziele definiert und Arbeitsschritte umgesetzt werden:

- Ein Kugel-Messsystem (Betonrheometer) generiert in einer Messung drei rheologische Parameter (Bingham Fließgrenze, Bingham Viskosität und dynamische Fließgrenze). Die einzelnen rheologischen Kennwerte wurden untersucht, diskutiert und bewertet. Ein Parameter mit einer hohen Aussagekraft bzw. physikalischen Präzision sollte ermittelt und weiterverwendet werden.
- Einflussfaktoren aus Depoteffekten, Thixotropie und Rücksteifen des Betons auf die Messwerte mussten untersucht und ausgeschlossen werden. Das Messsystem muss zu einem definierten Zeitpunkt zielsicher reproduzierbare Messwerte, also rheologische Kenngrößen, generieren.
- Untersuchungen an Mischungen mit unterschiedlich wirksamen Wassergehalten, im weiteren als w/z-Wert definiert, mussten über rheologische Parameter Zahlenwerte zur zielsicheren Erfassung der Konsistenz liefern. Die einzelnen Messpunkte bilden Kennlinien, die die Konsistenz bei unterschiedlichen w/z-Werten sicher und plausibel abbilden.
- Weitere Informationen sollten über eingesetzte Zusatzmittel gewonnen werden. Steife Mischungen wurden durch schrittweise Zudosierung von Fließmittel in eine gute Verarbeitbarkeit gebracht. Zu flüssige Mischungen wurden schrittweise durch zusätzlichen Stabilisierer in eine robuste Konsistenz gesteuert. Die einzelnen Messpunkte der einhergehenden rheologischen Veränderungen in der Konsistenz, mussten plausible und sichere rheologische Kennlinien für Betonzusatzmittel generieren.
- Durch diese Kennlinien sollten Zustände mit Stagnation und Sedimentation sicher erfasst werden. Ein optimaler, zahlenmäßig definierter Zielwert (angestrebte Konsistenz) wurde für verschiedene Rezepturen festgelegt. Diese Kennlinien wurden als Wissensdatenbank für die jeweilige Rezeptur gespeichert und für die weitere Bewertung und Korrektur wiederverwendet.

- Anhand von reproduzierbaren rheologischen Kennwerten und präzise definierten Kennlinien wurde ein Algorithmus entwickelt. Dieser vergleicht die rheologischen Messwerte der aktuellen Frischbetonkonsistenz mit jenen der Wissensdatenbank. Bei Abweichungen von der angestrebten Konsistenz wird die erforderliche Art und Menge einer Komponente zur Aussteuerung berechnet. Durch die Nachdosierung und das Untermischen wird die angestrebte Konsistenz im Betonmischer während der Produktion eingestellt.

➤ Abgrenzung der Problembehandlung

Alle Versuche wurden mit vier verschiedenen SVB-Rezepturen des Mehlkorntyps aus der gängigen Praxis zweier Fertigteilwerke (FTW) durchgeführt. Wegen der besseren Randbedingungen und einer vorhandenen, stetigen SVB-Produktion wurden die Arbeiten in Kooperation mit Fertigteilwerken durchgeführt. Diese Rezepturen sind zwar im Fertigteilbereich bewährt, jedoch nicht typisch für die Praxis des Transportbetonbereichs. Die Rezepturentwicklung von SVB und die programmiertechnische Umsetzung der Software werden in dieser Arbeit nicht diskutiert. Die Mehlkorngelhalte der einzelnen Mischungen wurden prinzipiell nicht bewusst variiert. Zur Aussteuerung wurden nur Wasser, FM und ST eingesetzt. Ein nachträgliches Untermischen von pulverförmigen Materialien (z. B. Zement, FA oder KSM) wurde nicht in Erwägung gezogen. Ermittelt wurden instrumentenspezifische relative Messgrößen. Diese wurden auch gespeichert und im Weiteren eingesetzt. Eine Umrechnung auf genormte absolute rheologische Werte wurde nicht durchgeführt (Begründung siehe Kap. 2.2.1 und 2.2.2).

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Betonkonsistenz und klassische Rheologie

#### 2.1.1 Grundlagen

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über den Wissensstand der hier relevanten Themenbereiche.

Seit den 1950er-Jahren wurden stetig neue, weichere Konsistenzklassen für Beton definiert und eingeführt. Infolge des vermehrten Einsatzes von neuartigen Superverflüssigern (Fließmittel nach heutiger Festlegung) erhielt in den 1970er-Jahren die DIN 1045 eine neue Rubrik „Fließbeton“. Damit konnten Ausbreitmaße von 510 – 600 mm realisiert werden. Heute definiert DIN 1045-2 die Konsistenzklasse F6 mit einem Ausbreitmaß von  $\geq 630$  mm (Konsistenzbezeichnung: sehr fließfähig). Ein solcher Beton benötigt beim Einbau vergleichsweise wenig Rüttelenergie, es muss aber trotzdem noch Verdichtungsarbeit geleistet werden [1].

Viele wissenschaftliche Arbeiten über zementgebundene Stoffe diskutieren rheologische Untersuchungsmethoden. Meist handelt es sich um Grundlagenforschung an Leimen oder Mörteln. Untersuchungen der Konsistenz von Betonen werden in den meisten Fällen immer noch mit genormten Einpunktversuchen durchgeführt. Das Kapitel 2.2 vermittelt die wichtigsten Grundlagen und Festlegungen aus der genormten Rheologie und Konsistenzprüfungen der Betontechnologie. Die Kapitel 2.4.1 und 2.4.2 erörtern Arbeiten und

Ergebnisse der Grundlagenforschung zur Rheologie von zementgebundenen Stoffen und Betonen.

### 2.1.2 Selbstverdichtender Beton (SVB)

*Brameshuber* fasste in seiner Einleitung zu „Spezialbetone Band 5 Selbstverdichtender Beton“ Anforderungen und Entwicklungen in Bezug auf die Verarbeitbarkeit in zwei Sätze zusammen und lieferte somit auch den Einstieg in einen kurzen geschichtlichen Rückblick [1]:

„Das Bestreben, Einbau und Verdichtung von Beton möglichst einfach und damit weniger fehleranfällig zu machen, ist fast so alt wie der Betonbau selbst. Es manifestiert sich zum Beispiel im Gussbeton der 20er-Jahre des 20. Jahrhunderts.“

Die einfache Verarbeitbarkeit des Gussbetons wurde durch sandreiche und optimierte Sieblinien und vor allem durch hohe w/z-Werte erreicht. Fließmittel oder betonverflüssigende Zusatzmittel gab es zu dieser Zeit nicht. Aus betontechnologischer Sicht waren damals die Zusammenhänge in Bezug auf Wassergehalt und Dauerhaftigkeit gut bekannt. Daher wurde der Gussbeton nur in Verbindung mit der Verblendung von Natursteinen oder Spritzputz im Bereich von Außenbauteilen verwendet. Aus diesen Gründen konnte sich der Gussbeton im normalen Stahlbetonbau nicht durchsetzen.

Anfang der 1980er-Jahre war in Japan das Dauerhaftigkeitsproblem von neu hergestellten Betonbauwerken ein großes Thema. Aufgrund des Fehlens an geschulten Facharbeitern in der japanischen Bauindustrie kam es zu ungenügend ausgeführten Verdichtungsarbeiten, die qualitative Mängel an Betonbauwerken verursachten.

Die Entwicklung von SVB wird auf *Hajime Okamura* zurückgeführt. Dieser formulierte 1986 einen Lösungsvorschlag, um dauerhafte Betonbauwerke, unabhängig von der Erfahrung und den Fähigkeiten der Facharbeiter, sicherzustellen [2]. *Okamura* setzte sich zum Ziel, einen Beton zu entwickeln, der ohne jeglichen Einsatz von Verdichtungsenergie, nur aufgrund seines Eigengewichts, in die letzten Ecken einer Schalung fließt und entlüftet.

*Okamura* zeigte und begründete die Notwendigkeit dieser Entwicklung auch grafisch, wie in dem folgenden Diagramm (Abbildung 1) zu sehen ist.

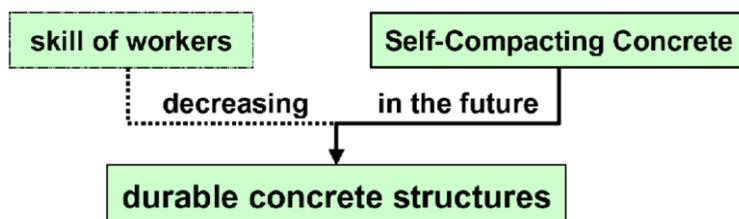


Abbildung 1: Notwendigkeit für Selbstverdichtenden Beton nach Okamura und Ouchi [3]

Im Jahr 1988 präsentierten *Okamura* und sein wissenschaftliches Team den ersten Prototypen eines neuartigen, vollfunktionsfähigen Selbstverdichtenden Betons. Dieser Prototyp wurde aus handelsüblichen Ausgangsstoffen hergestellt. Bei der Vorstellung der Neuentwicklung wurde der Begriff „*High Performance Concrete*“ verwendet.

Diese stützt sich auf drei definierte Punkte:

- (1) Fresh: self-compactable
- (2) Early age: avoidance of initial defects
- (3) After Hardening: protection against external factors

Die Bezeichnung „*High Performance Concrete*“ hat sich weltweit fast zeitgleich für hochfeste und dauerhafte Betone durchgesetzt. Die Entwickler des SVB wechselten deshalb den Terminus zu „*Self-Compacting High Performance Concrete*“.

Die folgende Abbildung 2 zeigt die Gegenüberstellung der Mischungszusammensetzung eines konventionellen Betons und eines SVB des Mehlkorntyps.

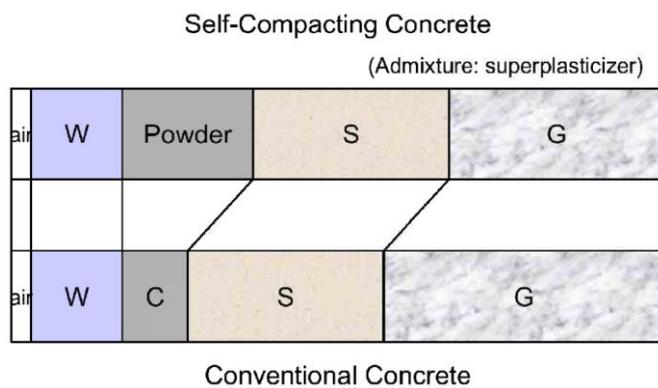


Abbildung 2: Vergleich der Mischungszusammensetzung zwischen konventionellem Beton und Selbstverdichtendem Beton nach Okamura und Ouchi [3]

Selbstverdichtender Beton weist einen geringeren Anteil an grober Gesteinskörnung, einen höheren Mehlkornanteil und den Einsatz von Fließmittel auf. In der folgenden Abbildung 3 ist das Wirkprinzip des Selbstverdichtenden Betons näher erörtert.

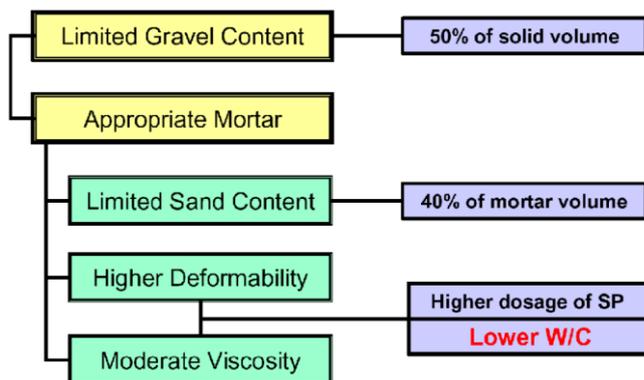


Abbildung 3: Methoden zum Erreichen von selbstverdichtenden Eigenschaften nach Okamura und Ouchi [3]

Ein Hauptelement des SVB ist ein geeigneter bzw. fließfähiger Mörtel (Appropriate Mortar). Ein fließfähiger Mörtel nach Okamura hat einen Leimanteil von 60 %. Die Erstellung eines fließfähigen Mörtels wird durch eine höhere Fließmitteldosierung erreicht. Die Leimphase bzw. der Mörtel müssen dem Selbstverdichtenden Beton eine hohe Verformungsfähigkeit und einen ausreichenden Widerstand gegen Entmischen verleihen.

In Japan und weltweit wurden seit Ende der 1980er-Jahre zahlreiche Forschungsarbeiten zur Rezepturentwicklung, Robustheit, zu Untersuchungsmethoden und Einflussfaktoren auf die Konsistenz durchgeführt. Zahlreiche Großprojekte konnten mit dem Einsatz der SVB-Technologie erfolgreich realisiert werden [4] [3] [2] [5] [6].

### 2.1.3 Robustheit von SVB vs. Einflussfaktoren

Die Schlüsselfunktionen des SVB sind die Frischbetoneigenschaften und deren funktionale Ausgewogenheit. Diese Ausgewogenheit wird durch eine niedrige Fließgrenze und eine ausreichend hohe Viskosität erzielt. Der SVB soll allein durch die Wirkung der Schwerkraft, erzeugt durch das Eigengewicht, bis in die letzte Ecke der Schalung fließen, was eine niedrige Fließgrenze erfordert. Die Fließgrenze hat auch einen direkten Einfluss auf die Entmischungsneigung, Entlüftung und Nivellierfähigkeit. Der frische SVB muss während des Einbaus und danach seine Homogenität behalten. Somit muss die Leim- und Mörtelmatrix einen ausreichend hohen Entmischungswiderstand besitzen, um die dynamische und statische Stabilität zu gewährleisten. Die Viskosität und die Fließgrenze müssen so eingestellt werden, dass eine ausreichende Entlüftung analog zu einem vollständig verdichteten Rüttelbeton sichergestellt werden kann.

Zu Einflussfaktoren auf die Robustheit geben die „Europäische Richtlinien für SCC“ [7] unter Punkt 8.6 den Hinweis, dass jede, wenn auch geringe Veränderung der Ausgangsstoffe die Ausgewogenheit der rheologischen Parameter Fließgrenze und Viskosität stören kann. Dies kann zu Stagnation oder Sedimentation führen.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Bezeichnung „Europäische Richtlinien für SCC“ aus dem Namen abgeleitet ist. Diese Bezeichnung ist nicht ganz korrekt, vielmehr handelt es sich um ein Dokument, das von den fünf europäischen Organisationen BIBM, CEMBU-REAU, ERMCO, EFCA und EFNARC 2005 veröffentlicht wurde. Die deutsche Übersetzung „Europäische Richtlinien für SCC“ erschien 2006. Da dieses Dokument einige interessante und wichtige Aspekte der SVB-Thematik beinhaltet, wird dieses in vorliegender Arbeit auch eingebunden.

Die Europäischen Richtlinien für SCC empfehlen SVB-Rezepturen mit ausgewogenen Eigenschaften zu entwickeln, weil diese geringe Abweichungen der Bestandteile in der Praxis der Betonherstellung tolerieren. Diese Toleranz wird als Robustheit bezeichnet.

Nach den Europäischen Richtlinien für SCC verträgt eine ausgewogene SVB-Rezeptur eine Abweichung im Wassergehalt von 5 bis 10 Liter pro Kubikmeter. Die angegebenen 10 l/m<sup>3</sup> sind nach Ansicht des Verfassers zu hoch gegriffen.

Breitenbücher stellte in folgender Abbildung 4 die höhere Sensibilität der Frischbetoneigenschaften des SVB gegenüber Normalbeton grafisch dar:

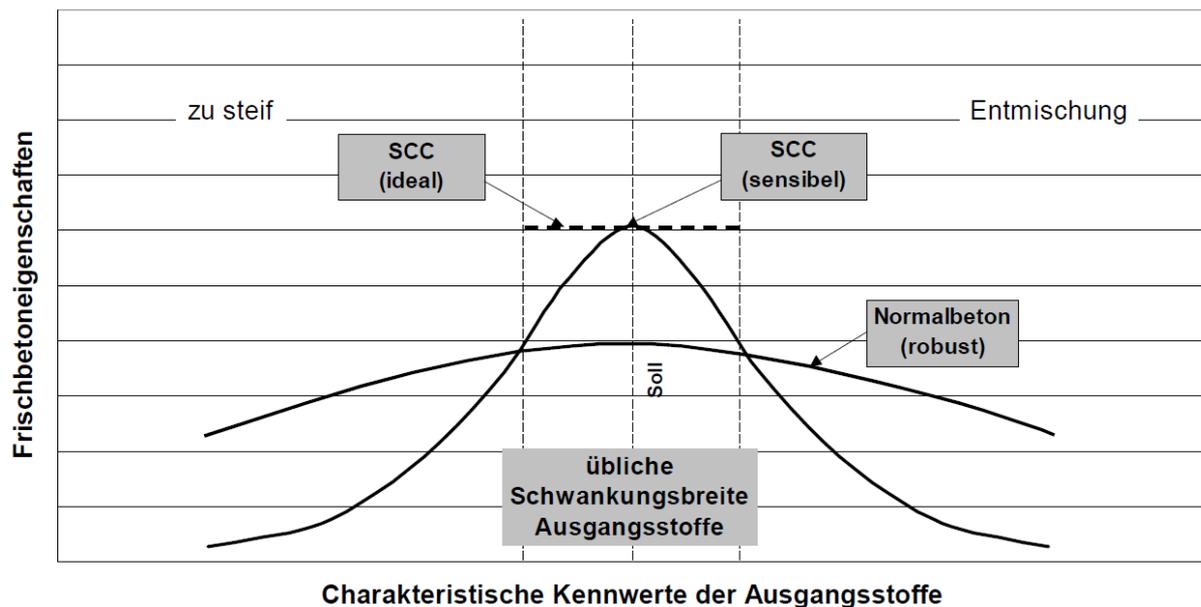


Abbildung 4: Unterschied der Robustheit SVB gegenüber Normalbeton [8]

Der Einfluss einer üblichen Schwankungsbreite der Ausgangsstoffe bewirkt wesentlich stärkere Veränderungen in den Frischbetoneigenschaften. Beim Verarbeiten von Normalbeton können erfahrene Betonbauer durch die Wahl der Verdichtungsarbeit abweichende Frischbetoneigenschaften unter Umständen noch ausgleichen. Da bei SVB dieser Arbeitsschritt völlig entfällt, sind die passenden Frischbetoneigenschaften von SVB von essenzieller Bedeutung und Wichtigkeit, um einwandfreie Resultate zu erzielen.

Somit kann aus den oben diskutierten Zusammenhängen die ausreichende Robustheit als eine essenzielle Eigenschaft einer SVB-Rezeptur festgemacht werden. Selbstverdichtende Betone, die nicht über eine ausreichende Robustheit gegenüber natürlich vorkommenden Schwankungen der Ausgangsstoffe und anderen Einflüssen verfügen, sind problematisch. Diese können nicht wirtschaftlich hergestellt werden, da der zu erwartende Ausschussanteil oder der Betreuungsaufwand zu hoch sind. Nicht erkannte negative Frischbetoneigenschaften wie Sedimentation oder Stagnation während der Herstellung oder der Verarbeitung sind am Endprodukt sichtbar (mangelhafte Oberflächen) oder durch Entnahme von Bohrkernen feststellbar (Entmischung bzw. Sedimentation).

Die Optimierung der Robustheit ist seit der Einführung der SVB-Technologie zentrales Thema vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Hier soll eine kurze Diskussion gesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse zu Einflussfaktoren, Steuerungsmöglichkeiten und Robustheit, elementare Informationen und Erkenntnisse wiedergeben.

#### 2.1.4 Einflussfaktoren auf die Konsistenz aus der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe

##### ➤ Wasser

Bei der Herstellung von SVB sind Schwankungen im wirksamen Wassergehalt der Hauptgrund für abweichende Verarbeitungseigenschaften. Der wirksame Wassergehalt beeinflusst die Viskosität und die Fließgrenze. Davon hängen wiederum die Selbstnivellierfähigkeit, das Entlüftungsverhalten, die Sedimentationsbeständigkeit und das blockierungsfreie Fließen ab. Im Wesentlichen sind unterschiedlich feuchte Gesteinskörnungen für Schwankungen im wirksamen Wassergehalt verantwortlich. Diese Tatsache ist bekannt, daher wird von den Verfassern der DAfStb-Richtlinie für SVB [9] unter Punkt 9.7 Dosieren der Ausgangsstoffe vorgeschrieben, dass die Eigenfeuchte der feinen Gesteinskörnung durch entsprechende Einrichtungen kontinuierlich ermittelt und berücksichtigt werden muss. Die Messeinrichtung soll an jedem Produktionstag kalibriert werden.

Insbesondere Feuchtemesssonden erfassen die Feuchte des Sandes, die allerdings auch gewisse Toleranzen aufweisen. Die Feuchten der groben Gesteinsfraktionen, z.B. 4/8 mm und 8/16 mm müssen täglich durch Darren bestimmt und manuell in der Mischanlage berücksichtigt werden.

##### ➤ Zement

Zement ist der wesentliche Bestandteil jeden Betons und ist somit maßgeblich für dessen Eigenschaften verantwortlich. Dies gilt für die Frisch- sowie die Festbetoneigenschaften. Der w/z-Wert ist entscheidend für die Festigkeitsklasse und dient mit dem Mindestzementgehalt zur Erfüllung der Anforderungen der Expositionsklassen. Für die Frischbetoneigenschaften sind vor allem die chemisch-mineralogische Zusammensetzung, der Sulfatgehalt und -träger sowie die Korngrößenverteilung von Bedeutung. Diese wirken sich auf den Wasseranspruch und die Reaktivität des Zements aus. Davon hängen auch maßgeblich die Fließmittel-Adsorption und die zeitliche Entwicklung der Konsistenz ab. Nach den Europäischen Richtlinien für SCC gibt es keine Einschränkungen für die Verwendung von Zementen gemäß EN 197-1 [10].

*Höveling* bestätigte, dass nahezu alle Zementsorten und Festigkeitsklassen erfolgreich für die SVB-Herstellung eingesetzt wurden [11]. *Kubens* untersuchte den Einfluss der Mahlfeinheit eines Zementes aus 29 verschiedenen Chargen über neun Monate. Dabei ist klar zu unterscheiden, ob die Untersuchungen mit oder ohne Fließmittel stattgefunden haben. Nach den ersten zwölf Zementchargen konnte ein Zusammenhang zwischen der Mahlfeinheit und dem Fließgrenzparameter (Relativwert des verwendeten Rheometers für die Fließgrenze) abgeleitet werden. Demnach erhöhte sich der Fließgrenzparameter mit steigender spezifischer Oberfläche des Zements. Dieser Zusammenhang wurde ohne den Einsatz von Fließmittel gezeigt. Mit steigender Anzahl an unterschiedlichen Zementchargen konnte dieser Zusammenhang jedoch nicht mehr dargestellt werden. *Kubens* vermutete dafür eine Variation der mineralogischen Zusammensetzung, die im Wesentlichen auf die Reaktivität der Aluminat Phase und der Verfügbarkeit des Sulfatträgers zurückzuführen seien. Aus den rheologischen Untersuchungen an Mörteln mit Fließmittel konnte kein Zusammenhang zwischen unterschiedlicher Mahlfeinheit und dem Fließgrenzparameter nachgewiesen werden. *Kubens* folgert, dass die spezifische Oberfläche von Zement keinen wesentlichen Einfluss auf die Konsistenz von Mörteln hat, wenn Fließmittel eingesetzt werden [12]. *Marquardt* beleuchtet den Einfluss von

drei Zementen (zwei Portlandzemente unterschiedlicher Mahlfeinheit, ein Hochofenzement) auf die Frischbetoneigenschaften eines SVB des Kombinationstyps. Trotz deutlicher Unterschiede im Wasseranspruch wurde kein oder ein vernachlässigbarer Einfluss auf die Anfangskonsistenz festgestellt [13]. Da die Konsistenz des Frischbetons letztlich auch durch Fließmittel eingestellt wird, hat die Mahlfeinheit des Zements nur einen sekundären Einfluss auf die Konsistenz.

*Lowke* betrachtete das Sedimentationsverhalten und die Robustheit Selbstverdichtender Betone. Er bestimmte neben der Anfangskonsistenz auch die zeitliche Entwicklung der Verarbeitungseigenschaften. Ein Fokus der Untersuchungen war das thixotrope Verhalten bzw. die Ermittlung der dynamischen und statischen Fließgrenze bei Soll-Wassergehalt und bei Wasserüberdosierung. *Lowke* zeigte, dass Zementmörtel mit einem geringeren Fließmittelanspruch bei Wasserüberschuss ein stärker ausgeprägtes thixotropes Verhalten aufweisen (alle Mörtel wurden mit einem PCE Fließmittel auf ein Ausbreitfließmaß von  $255 \pm 5$  mm eingestellt). Infolge eines geringeren Fließmittelanspruches ergibt sich eine geringere sterische Wechselwirkung. Dies begünstigt den Strukturaufbau und damit die Entwicklung der Festigkeit aus thixotropen Effekten. Versuche mit Betonen bestätigen diese Zusammenhänge. *Lowke* definiert das thixotrope Materialverhalten von SVB als Frischbetoneigenschaft und nutzt die Thixotropie gezielt zur Optimierung der Stabilität bzw. Robustheit (durch Erhöhung der statischen Fließgrenze) [14].

#### ➤ Wasser/Zement-Wert

Der w/z-Wert gibt das massenbezogene Verhältnis von Wasser und Zement an. Die Betondruckfestigkeit wird maßgeblich von der Zementdruckfestigkeit und vom w/z-Wert beeinflusst.

Der Wasser/Zement-Wert ist für die Dauerhaftigkeit wesentlich. In DIN EN 206 Anhang F Tabelle F.1 [15] und DIN 1045-2 Anhang F, Tabelle F.2.1 und Tabelle F.2.2 [16] sind in fein abgestuften Expositionsklassen jeder Klasse die maximal zulässigen w/z-Werte zugeordnet.

Die Hauptherausforderung der rationellen und zielsicheren Herstellung von SVB ist aus der differenzierten Diskussion von *Lowke* zu entnehmen. Demnach ist die Robustheit gegenüber Schwankungen des Wassergehalts von besonderer baupraktischer Bedeutung. Diese Schwankungen im Wassergehalt sind im Rahmen der Messgenauigkeit von Feuchte-messsonden vorhanden. *Lowke* zeigte, dass Abweichungen im Bereich von 1 bis 2 % bei einem Sandgehalt von  $800 \text{ kg/m}^3$  Schwankungen von bis zu  $16 \text{ l/m}^3$  verursachen. Weiter stellte er fest, dass Schwankungen im Zement- Zusatzstoff- oder Fließmittelgehalt in automatisierten Mischanlagen aufgrund der hohen Einwaagepräzision eher gering ausfallen [14].

Ein variierender Feuchtegehalt der groben Gesteinskörnungen, der manuell durch Darren ermittelt werden muss, kann ebenfalls zu unterschiedlichen wirksamen Wassergehalten führen.

➤ Wasser/Pulver-Wert

Im Gegensatz zum massenbezogenen w/z-Wert gibt der Wasser/Pulver-Wert (W/P-Wert oder  $V_W/V_P$ -Verhältnis) das Volumenverhältnis von Wasser zu mehlkornfeinen Bestandteilen (meist  $\leq 0,125$  mm) an. Daher wird in der Literatur zu SVB häufig der Wasser-Pulver-Wert verwendet. Die zu benetzende Oberfläche der Feianteile ist ausschlaggebend für den Wasseranspruch der Leimphase. Der Wasser/Pulver-Wert ist der zu variierende Parameter, um nach dem Entwicklungsschema von *Okamura* den  $\beta_p$  Wert zu bestimmen [5]. Der fließfähige Leim ist die entscheidende Komponente für einen funktionellen SVB.

Somit ist dieser Faktor essenziell, um den Mindestwassergehalt der mehlkornfeinen Ausgangsstoffe zu bestimmen.

➤ Zusatzstoffe

Die Frischbetoneigenschaften (Fließfähigkeit) von Selbstverdichtenden Betonen werden durch Verwendung von Zusatzstoffen (Mehlkorn) verwirklicht. Durch den erhöhten Mehlkorngelalt wird ein Mindestleimgehalt sichergestellt. Die Komponenten Zement, Zusatzstoff, mehlkornfeine Anteile des Sandes, Wasser und Fließmittel bilden einen fließfähigen Leim. Dies ist die Basis von SVB. Zusatzstoffe werden nach ihrer Reaktionsfähigkeit mit Wasser in Typ I und Typ II klassifiziert. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Zusatzstoffe.

*Tabelle 1: Klassifizierung der Zusatzstoffe entsprechend der Reaktionseigenschaft mit Wasser aus den Europäischen Richtlinien für SCC [7]*

TYPE I	inert oder semi-inert	– mineralische Füllstoffe (Kalkstein, Dolomit usw.) – Pigmente
TYPE II	puzzolanisch	– Flugasche gemäß EN 450 – Mikrosilica gemäß EN 13263
	hydraulisch	– Hüttensand (wenn der Hüttensand nicht einem Zement gem. EN 197-1 zuge- mahlen wird, finden nationale Normen Anwendung, bis die neue EN 15167 erscheint)

*Mazanec* beschäftigt sich in seiner Dissertation mit der Mischzeit und der Rheologie von Ultrahochfestem Beton (UHPC). Er kommt zu dem Schluss, dass die Gesteinsmehlart (Kalksteinmehl oder Quarzmehl) selbst keinen signifikanten Einfluss auf die rheologischen Parameter plastische Viskosität, dynamische Fließgrenze und die Thixotropie hat. Unterschiede sind demnach hauptsächlich auf die Partikelgrößenverteilung zurückzuführen [17]. *Lowke* berichtet, dass der teilweise Austausch von Zement durch Flugasche eine deutliche Verringerung des thixotropen Verhaltens bewirkt [14]. *Höveling* diskutiert in seiner Dissertation den Einsatz unterschiedlicher Füller (Zusatzstoffe). Er weist darauf hin, dass sich bei Kalksteinmehl je nach Herstellung (Mahlen und Sieben oder Entstaubungsanlagen) die Korngrößenverteilung erheblich unterscheiden kann [11]. Diese Änderungen können die rheologischen Eigenschaften von SVB wesentlich verändern. Auch wurde gezeigt, dass sich die Adsorption von FM auf Kalksteinmehl zum Zement unterscheidet und somit deutlichen Einfluss haben kann.

Die Untersuchungen von *Höveling* umfassen auch die Verwendung von Flugasche und Microsilica [11]. *Höveling* kommt wie *Mazanec* [17] zu der Schlussfolgerung, dass die rheologischen Einflussfaktoren im Wesentlichen von der Partikelgrößenverteilung abhängen und weniger stoffspezifischer Natur sind [11]. *Kordts* analysiert in seiner Dissertation die Wirkung verschiedener Zusatzstoffe über deren Granulometrie. Seine Ergebnisse zeigen, dass der Scherwiderstand bei **gleichem Wassergehalt** abhängig vom kumulativen Hohlraum einer Suspension ist. Je niedriger der Hohlraumgehalt, desto niedriger der Scherwiderstand. Bei den folgenden Ergebnissen von *Kordts* in Abb. 5 wurde den Leimen kein Fließmittel zugegeben, sodass die Ergebnisse rein von der Packungsdichte abhängen [18].

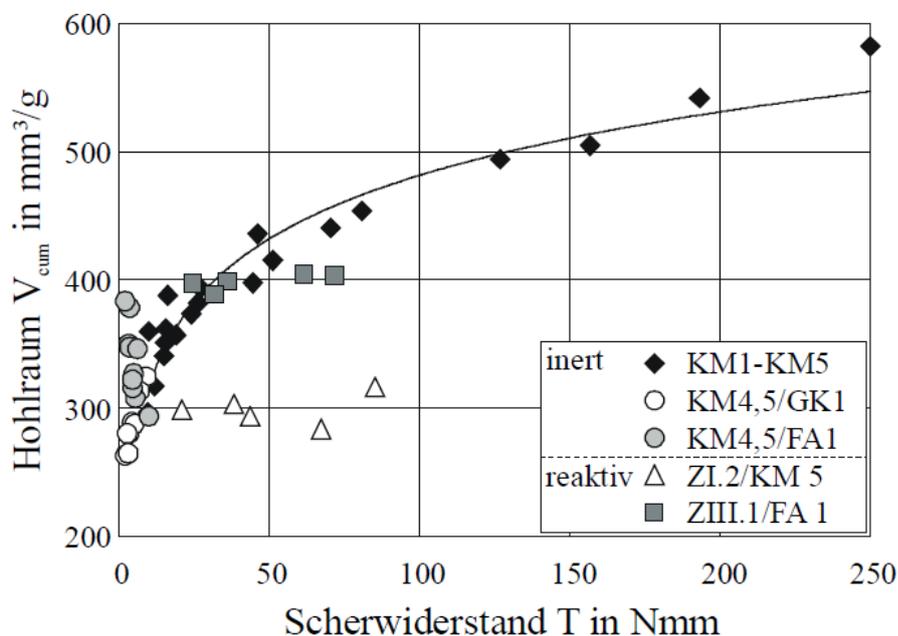


Abbildung 5: Kumulativer Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Scherwiderstand der Mehlkornhaufwerke in Suspensionen nach *Kordts* [18]

*Osterheeren et al.* analysierten den Einfluss der Kornform des Mehlkorns auf die Eigenschaften selbstverdichtender Mörtel [19]. Die Packungsdichte wird neben der Partikelgrößenverteilung auch von der Kornform beeinflusst. Daher ist fraglich, ob die Zusammenhänge der entsprechenden Untersuchungen direkt von der Kornform oder indirekt von der Packungsdichte beeinflusst werden. In einer Versuchsreihe konnte ein klarer Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und dem Fließmittelbedarf (der nötig ist, um die Mörtel auf ein Ausbreitmaß von  $24 \pm 1$  cm einzustellen) nachgewiesen werden (Abb. 6).

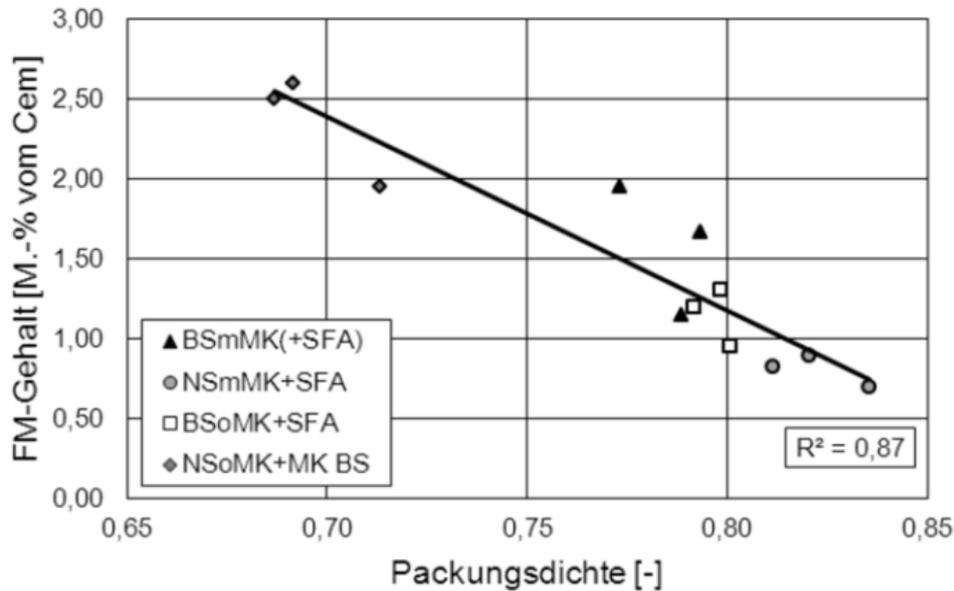


Abbildung 6: Einfluss der Packungsdichte auf den Fließmittelbedarf nach Osterheeren et al. [19]

Da der verwendete Wasser/Zement-Wert bei allen Mörteln konstant bei 0,60 lag, ist davon auszugehen, dass durch eine höhere Packungsdichte mehr freies Wasser zur Verfügung steht und somit weniger Fließmittel benötigt wird. Dieses Ergebnis bestätigt in Bezug auf den Einfluss der Packungsdichte grundsätzlich die Ergebnisse von *Kordts* aus Abbildung 5.

Die *Funk & Dinger* Idealsieblinie ist eine Weiterentwicklung der *Fuller*-Parabel und berücksichtigt vor allem den Feinkornbereich [20].

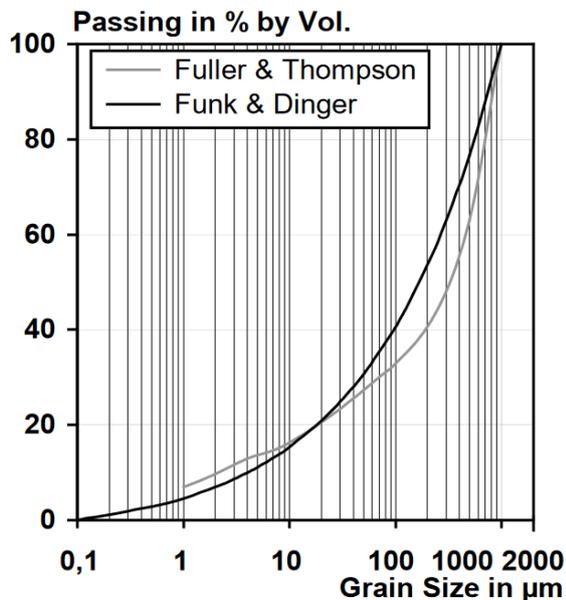


Abbildung 7: Ideale Kornverteilungskurven nach Fuller & Thompson und Funk & Dinger [20]

*Uebachs* und *Brameshuber* kamen zu dem Schluss, dass sich ideale rheologische Eigenschaften erzielen lassen, wenn sich die Kornverteilungskurve dem Prinzip von *Funk & Dinger* anlehnt.

Je geringer die Abweichung von der idealen *Funk & Dinger*-Verteilung ist, desto geringer ist die Fließgrenze des Mörtels und umso größer ist das Setzfließmaß [20].

Die Partikelgrößenverteilung der Zusatzstoffe, die Packungsdichte und die Kornform der mehlkornfeinen Bestandteile haben einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften von Leimen und Mörteln. Daraus lässt sich ableiten, dass Schwankungen der Partikelgrößenverteilung und der Kornform der Zusatzstoffe den Wasser- oder Fließmittelbedarf und somit die rheologischen Eigenschaften beeinflussen können.

#### ➤ Sand

*Höveling* untersuchte Schwankungen in der Sandsieblinie auf den Wasseranspruch [11]. Hervorgerufen durch eine natürliche Schwankungsbreite in der Zusammensetzung der Gesteinskörnungen, sind solche Abweichungen in der Praxis der Betonherstellung realistisch.

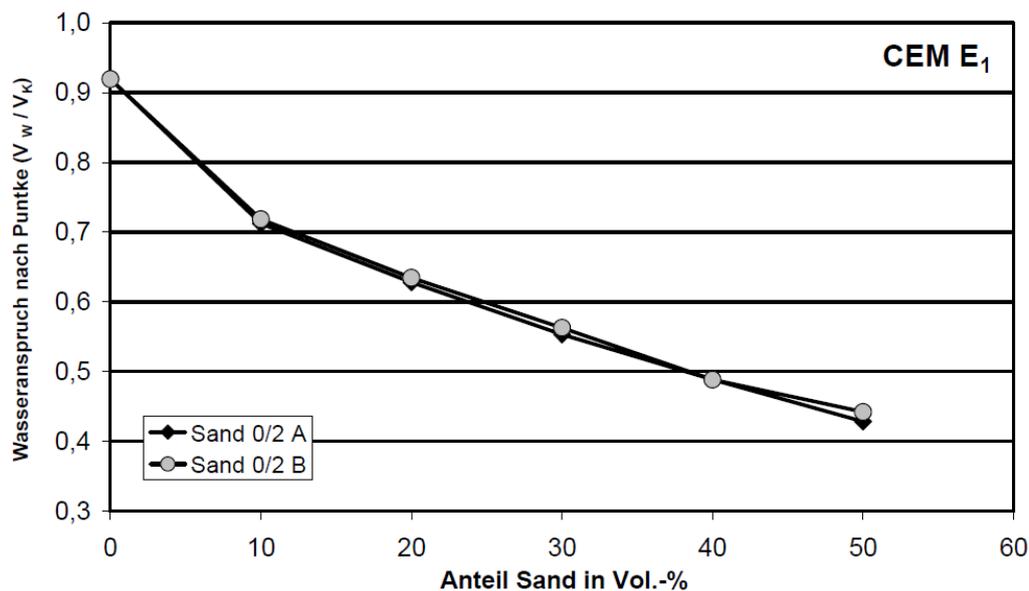


Abbildung 8: Einfluss variierender Sandgehalte unterschiedlicher Sandsieblinien auf den Wasseranspruch nach Puntke [11]

In den Versuchen in Abb. 8 wurde der Wasseranspruch nach *Puntke* für einen CEM I 42,5 R in Kombination mit zwei verschiedenen Sanden untersucht. Sand 0/2 A enthält 0,1 M.-% Mehlkorn während Sand 0/2 B 5 M.-% Mehlkorn enthält.

Da sich die Graphen nahezu komplett überlagern, kann man ableiten, dass die unterschiedlichen Mehlkorngehalte der beiden Sande keinen relevanten Einfluss auf den Wasseranspruch bewirken. *Höveling* folgert, dass sich Unterschiede in der Sieblinie von Sanden nicht wesentlich auf die Konsistenz auswirken [11].

*Kubens* variierte den Feingehalt eines Normsand (nach EN 196-1). Es wurden bis zu 5 % des groben Anteils durch Feinteile (0 - 0,16 mm) ersetzt. Die Änderung wurde auch durch Substitution der Feinteile mit den groben Anteilen untersucht. Die Versuche fanden ohne den Einsatz von Fließmittel statt. Die Ergebnisse zeigten, dass erst ab 5 % Abweichung messbare rheologische Unterschiede auftreten [12]. *Wüstholtz* entwickelte ein Modell zur Berechnung der Leimschichtdicke. Seine Analysen zeigen, dass die Gesamtoberfläche der Gesteinskörnung im

Bereich einer AB16 Sieblinie zu 48 % von der Kornfraktion 0,25 / 0,5 mm abgedeckt wird. Nach *Wüstholz* bewirken bereits kleine Veränderungen im Feinsandbereich Änderungen der Konsistenz [21]. Dies widerspricht jedoch prinzipiell den Ergebnissen von *Höveling* und *Kubens*.

Versuche von *Huß* zeigen, dass der Austausch von Natursand zu Brechsand eine Erhöhung des Leimgehaltes von 390 auf 445 dm<sup>3</sup> / m<sup>3</sup> (AB16) bewirkt. Damit ist ein direkter Zusammenhang zwischen der Granulometrie des Sandes und dem Leimbedarf hergestellt [22]. Versuche von *Ostheeren et al.* zu den Auswirkungen verschiedener Natur- und Brechsande [19] bringen den Nachweis, dass die Brechsand-Mischungen eine deutlich höhere Fließgrenze und Viskosität aufweisen, was auch die Erkenntnisse von *Huß* bestätigen. Daraus folgt, dass die granulometrischen Eigenschaften des Sandes einen Einfluss auf die Rheologie eines SVB haben.

#### ➤ Leimvolumen

Eine ausgewogene und fließfähige Konsistenz des Leimes ist die Basis eines SVB. Der Leim wird in Fließmodellen für Beton als flüssige Phase angenommen, dabei bildet die grobe Gesteinskörnung die feste Phase in der Suspension [21]. Die Leimphase besteht aus Feinstoffen (< 0,125 mm), in der Regel Zement und Zusatzstoff, Feinanteil der Gesteinskörnung, Wasser und Fließmittel. In der Europäischen Richtlinie für SCC [7] ist unter Punkt 8.2 *Prinzipien zur Erstellung von Betonrezepturen* die Funktion der Leimphase beschrieben. Demnach bewegen sich die Gesteinskörner im Leim. Somit muss das Leimvolumen größer als das Restvolumen zwischen den Gesteinskörnungen sein. Alle einzelnen Gesteinskörner müssen von Leim umgeben sein. Dadurch wird die Fließfähigkeit erhöht und die Reibung zwischen den Gesteinskörnern reduziert.

Nach Tabelle 8.2 der Europäischen Richtlinie für SCC ist ein Leimvolumen von ca. 300 l/m<sup>3</sup> bis 380 l/m<sup>3</sup> empfohlen [7]. Auch in der DAfStb-Richtlinie für SVB [9] sind unter Punkt 5.3.2 „Grenzwerte für die Betonzusammensetzung“ Leimmengen angegeben. Diese unterscheiden sich jedoch von den Empfehlungen der Europäischen Richtlinie. Ausgehend von der Mindestmenge an Mehlkorngeliegt das Leimvolumen zwischen 160 l/m<sup>3</sup> bis maximal 250 l/m<sup>3</sup>. Aus *Kordts* [18] ist zu entnehmen, dass nach *Thielen et al.* [23] die Leimmenge mindestens 250 l/m<sup>3</sup> betragen soll.

*Höveling* beleuchtete in einer Versuchsreihe die Wirkung des Leimvolumens auf die Fließeigenschaften eines selbstverdichtenden Mörtels. Das Leimvolumen wurde zwischen 58 % und 65,2 % variiert. *Höveling* kam zu dem Schluss, dass geringe Änderungen des Leimvolumens die Fließeigenschaften kaum beeinflussen, solange ein Mindestwert nicht unterschritten wird. Eine Optimierung in dieser Richtung sei demzufolge nicht möglich [11].

Eine differenzierte Betrachtungsweise verfolgten *Wüstholz* und *Huß*. Ein zentraler Punkt dieser Arbeiten ist die Ermittlung des Mindestleimvolumens. Dieses setzt sich aus dem Hohlraumvolumen der Gesteinskörnung ( $\geq 0,125$  mm) und dem überschüssigen Leimvolumen zusammen. Erst durch das überschüssige Leimvolumen werden die Gesteinskörnungen auseinandergedrängt. Somit kann der Überschussleim als Schmiermittel fungieren und bildet mit den Ge-

steinskörnungen eine Suspension. Während *Wüstholtz* [21] zur Berechnung der Leimschichtdicke die Gesteinskörnung als Kugel modellierte, verfeinerte *Huß* [22] diese Methodik weiter. Damit ist es möglich, für beliebige Korngemisch-Zusammensetzungen bzw. Kornformen den Mindestleimgehalt des Mehlkorntyps zu ermitteln. Dieses Verfahren von *Huß* wurde als Korn-Gemisch-Prüfung (KGP) bezeichnet. Demnach lässt sich durch die Kenntnis der erforderlichen Leimmenge die Mischungsberechnung auf die bekannte Stoffraumrechnung reduzieren.

Die folgende Abbildung 9 aus *Huß* nach *Wüstholtz* ist von *Huß* um die Darstellung der Volumenanteile ergänzt worden.

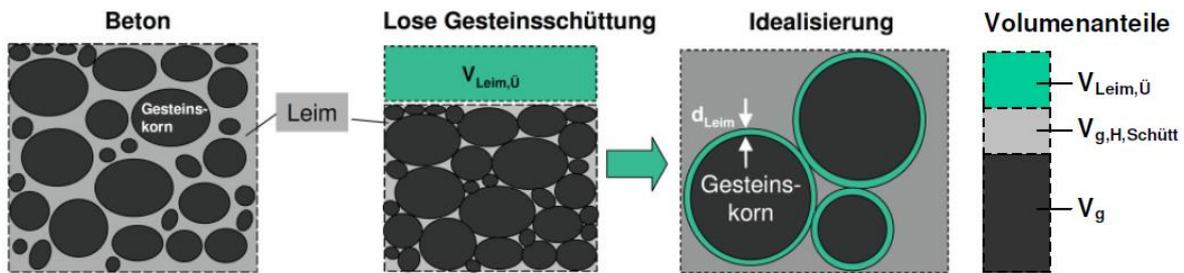


Abbildung 9: Modell der Leimschichtdicke mit Darstellung des Überschussleims  $V_{Leim,Ü}$  und der Idealisierung der Leimschichtdicke  $d_{Leim}$ , ergänzt aus *Wüstholtz* [21] nach *Huß* [22]

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Schwankungen im Leimvolumen prinzipiell unproblematisch sind, solange ein Mindestmaß an überschüssigem Leim vorhanden ist.

➤ Grobe Gesteinskörnung

*Wüstholtz* analysierte den Einfluss der Sieblinie auf die Konsistenz, indem er diese systematisch von Regelsieblinie A16 (grob) bis C16 (fein) variierte [21]. Alle anderen Parameter wie Leimvolumen ( $352 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ), Wasser-Bindemittelverhältnis ( $V_w / V_b = 0,88$ ), Fließmittelgehalt ( $M_{FM} = 1,25\% \text{ v. Z.}$ ) und Stabilisiergehalt ( $M_{ST} = 0,1\% \text{ v. Z.}$ ) blieben unverändert. Die ermittelten Setzfließmaße und Trichterauslaufzeiten wurden über die Körnungsziffer  $k$  aufgetragen. Die Ergebnisse in Abb. 10 zeigen ein Optimum der rheologischen Eigenschaften, ausgedrückt durch Trichterauslaufzeit und Setzfließmaß zwischen B16 und AB16.

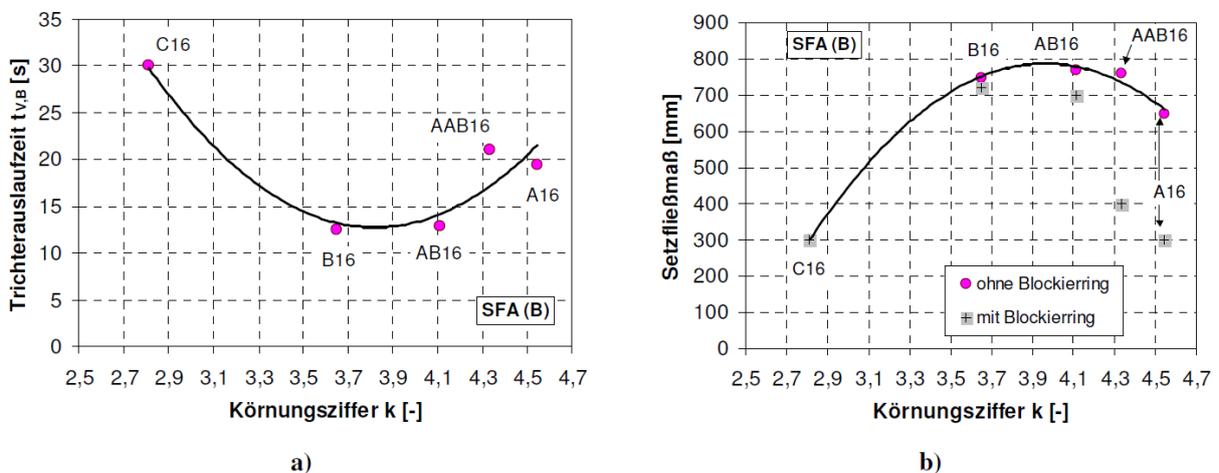


Abbildung 10: Trichterauslaufzeit des Betons (a) sowie Setzfließmaß (b) über der Körnungsziffer der Sieblinie nach *Wüstholtz* [21]

*Wüstholtz* untersuchte zur Modellierung der Fließeigenschaften die zwei unterschiedlichen Modellparameter Leimschichtdicke und relative Feststoffkonzentration. In einem weiteren Abschnitt zeigt er, dass genau in dem oben gezeigten Optimum zwischen B16 und AB16 der Hohlraumgehalt und die spezifische Oberfläche minimal sind. Gleichzeitig weist die Leimschichtdicke der Gesteinskörnung ein Maximum auf. Diese Zusammensetzung des Betons bewirkt die minimale Trichterauslaufzeit in Abb. 10 a und das maximale Setzfließmaß in Abb. 10 b.

Durch Variation der Sieblinien verfolgt *Marquardt* [13] einen ähnlichen Ansatz wie *Wüstholtz*. Die Ergebnisse weisen nach, dass eine Sieblinie AB16 ( $k = 4,10$ ) und ein nach der Fuller-Parabel optimiertes Gemenge von Gesteinskörnungen ( $k = 3,77$ ) eine ideale Packungsdichte ergeben. In diesem Fall konnte bei konstantem Ausbreitmaß und Trichterauslaufzeit das Feinststoffvolumen verringert werden.

Untersuchungen von *Huß* ergaben, dass Änderungen der Volumenverhältnisse, ausgelöst durch ungenaue Einwaagen der Gesteinskörnung im Rahmen der zulässigen Einwiegetoleranzen, Abweichungen in der Konsistenz hervorrufen können [22].

Nach *Kordts* sind die Verarbeitungseigenschaften von Selbstverdichtenden Betonen hauptsächlich von der Zusammensetzung des Leims abhängig [18]. Demnach beeinflussen die groben Gesteinskörnungen das Blockierverhalten, wobei das Fließverhalten an sich nur in geringem Maße beeinflusst wird. Dies gilt, solange genug Leim und damit überschüssiges Leimvolumen vorhanden ist.

Die Diskussion über die grobe Gesteinskörnung zeigt, dass diese die Verarbeitungseigenschaften von SVB beeinflussen kann. Hierbei können bei grenzwertigem Leimvolumen schon die Einwiegetoleranzen im Normbereich negative Auswirkungen haben.

#### ➤ Einflussfaktoren aus Zusatzmitteln

- Fließmittel

In gleicher Weise wie Zement ein Grundbestandteil eines jeden Betons ist, ist Fließmittel ein elementarer Bestandteil des SVB. Heute werden in der Regel Fließmittel auf PCE-Basis (Polycarboxylatether) verwendet. Diese übertreffen in der Wirkung die Betonverflüssiger alter Generation (Sulfonate) um das Zwei- bis Dreifache. Diese Entwicklung begünstigte auch die SVB-Herstellung. Polycarboxylatether sind langkettige Moleküle, bestehend aus einer Hauptkette und mehreren Seitenketten. Es gibt eine Fülle von verschiedenen Faden-, Wurm-, Bürsten- oder Sternmolekül Ketten. Durch negative Teilladungen an der Hauptkette adsorbieren sie an positiv geladenen Teilen des Zements. Die Wirkung als grenzflächenaktive Substanz basiert auf elektrostatischer Abstoßung (wie Betonverflüssiger) und zusätzlich auf sterischer Abstoßung, hervorgerufen durch die Seitenketten [18] [17] [24].

Infolge der großen Anzahl am Markt vorhandener PCE-Fließmittel in Verbindung mit den unterschiedlichsten Zementen, können keine allgemeingültigen Aussagen zu Wirkmechanismen abgeleitet werden, vgl. *Lowke* [14]. In vorliegender Arbeit wird die Wirkung von Fließmittel auf Makroebene, also dem Beton, betrachtet. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 11, das die drei Anwendungsfälle im Zusammenhang mit Fließmittel darlegt.

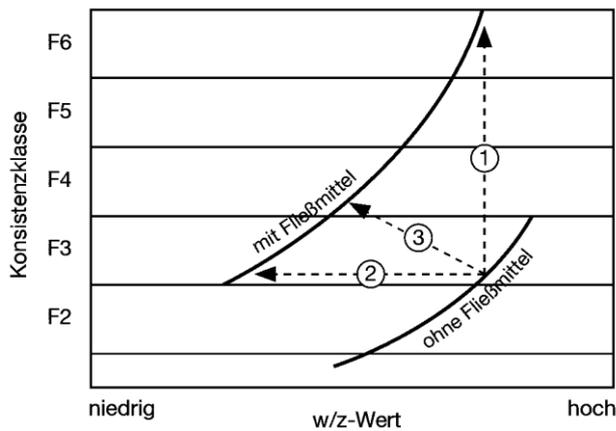


Abbildung 11: Anwendungsmöglichkeiten von Fließmitteln aus [25]

Aus dem Diagramm in Abb. 11 lassen sich drei Anwendungsmöglichkeiten ableiten:

- (1) Verflüssigung bei gleichem Wasserzementwert
- (2) Wassereinsparung bei gleicher Konsistenz
- (3) Wassereinsparung bei gleichzeitiger Verflüssigung

Die Wirkungsweise von Fließmittel in Abbildung 11 ist anhand von Rüttelbetonen dargestellt, diese Wirkmechanismen sind jedoch auf SVB übertragbar.

Mehrere wissenschaftliche Studien (z. B. in [26] nach *Breit et al.* [27]) lassen den Schluss zu, dass Fließmittel die Viskosität nicht beeinflussen. Die Wirkung von zusätzlichem Wasser und Fließmittel ist in der folgenden Abbildung 12 dargestellt.

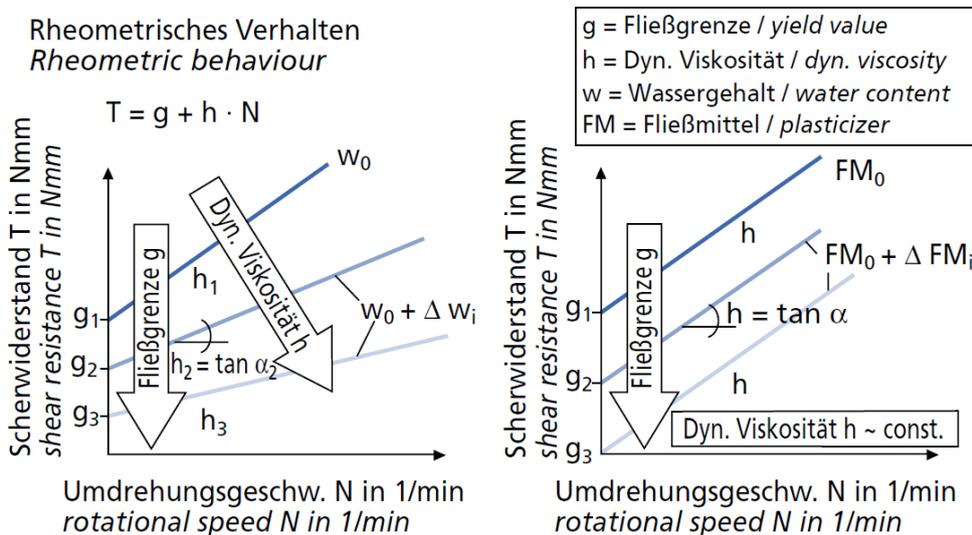


Abbildung 12: Einfluss von Zugabewasser (links) und von Fließmittel (rechts) auf die rheologischen Eigenschaften von Zement und Mehlkornsuspensionen nach Kordts [18]

Die Zusammenhänge und die Modellierung derselben führte *Kordts* auf Basis der Erkenntnisse von *Spanka et al.* [28] aus. Diese Versuchsreihen sind an verschiedenen Zementleimen, inerten Mehlkornsuspensionen und Betonen erstellt worden. Zur Anwendung kamen nur die drei

wichtigsten Grundstoffe für verflüssigende Betonzusatzmittel, um Einflüsse stofflicher Beimengungen in Handelsprodukten auszuschließen. Es handelte sich um Calciumlignin-, Natriumnaphthalin-, und Natriummelaminsulfonat, also keine PCE Fließmittel der neuen Generation. Mit dem Rheometer Viskomat PC wurden dann die Fließkurven anhand der Scherwiderstände gemessen und ausgewertet. Die Versuchszeiten lagen zwischen 20 bis 50 Minuten mit Umdrehungsgeschwindigkeiten von 150, 120 und 90 Umdrehungen je Minute. *Spanka et al.* stellten fest, dass zusätzliches Fließmittel die Fließgrenze deutlich herabsetzt. Im Gegensatz dazu sind die relativen Viskositäten von den Zementleimen durch die verflüssigenden Zusatzmittel nur geringfügig und unspezifisch beeinflusst worden [28].

Weiterhin untersuchte Wüstholtz [21] die Auswirkungen von variierendem Fließmittelgehalt (PCE Fließmittel) an Selbstverdichtenden Betonen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen abweichende Wirkmechanismen zu den oben gezeigten Annahmen. *Wüstholtz* verwendete für seine Tests Leime und Betone mit unterschiedlichen Füllern (KSM & SFA). Die Testserien umfassten klassische Einpunktversuche und rheologische Prüfungen. Für die rheologischen Untersuchungen an Selbstverdichtendem Frischbeton wurde ein Parallel-Platten-Rheometer eingesetzt (Relativmesssystem mit der Bezeichnung „BTRHEOM“). Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen 13 und 14 dargestellt. In den Abbildungen ist die Fließmittelmasse auf die Bindemittelmasse bezogen. Der Gesamtwassergehalt wurde durch Berücksichtigung des Wassers vom Fließmittel konstant gehalten. Somit sind die Änderungen der Fließfähigkeit auf die Wirkung des Fließmittels zurückzuführen.

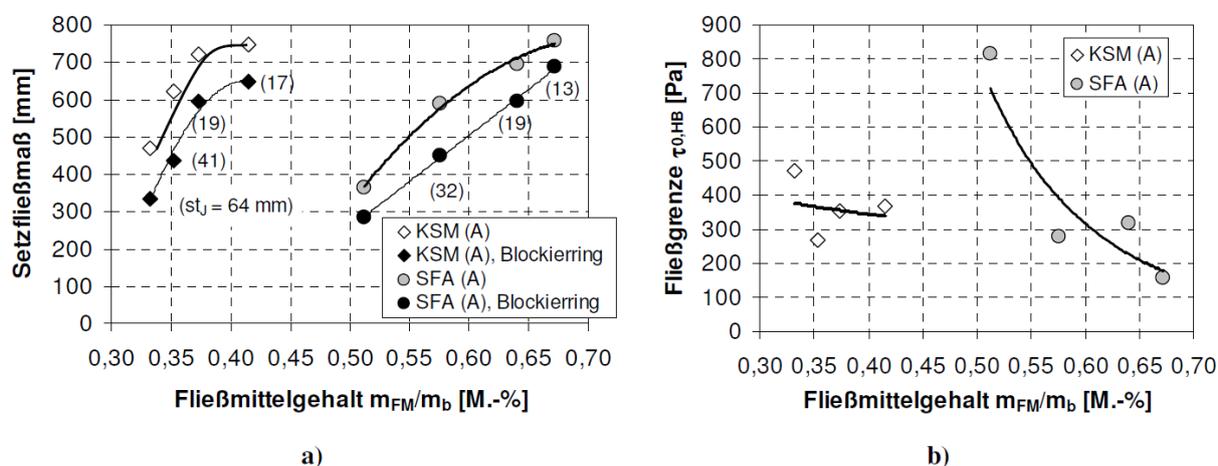


Abbildung 13: Variation des Fließmittelgehaltes nach Wüstholtz [21]

- a) Setzfließmaß und Setzfließmaß mit Blockierring (Höhenunterschied  $st_J$ )
- b) Ermittelte Fließgrenze (Rheometer BTRHEOM)

Die Ergebnisse aus Abbildung 13a bestätigen die zu erwartenden Änderungen bzw. Vergrößerung der Setzfließmaße. Weiter zeigen die Beobachtungen von *Wüstholtz*, dass auch eine Verringerung der Blockierneigung mit steigendem FM-Gehalt festzustellen ist. Bei steigendem Fließmittelgehalt sinkt die Fließgrenze (Abb. 13b), was die Ergebnisse und Zusammenhänge aus 13a bestätigt und mit dem Setzfließmaß entsprechend korreliert.

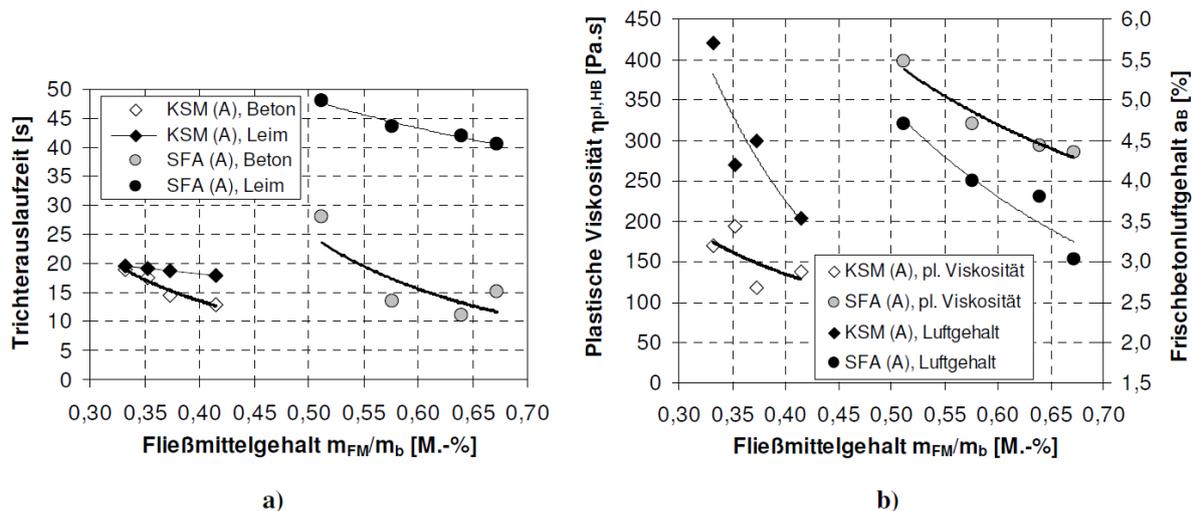


Abbildung 14: Variation des Fließmittelgehaltes nach Wüstholtz [21]

a) Trichterauslaufzeit des Leimes und des Betons

b) Plastische Viskosität (Rheometer BTRHEOM) und Frischbetonluftgehalt

Die Ergebnisse in Abbildung 14 a zeigen, dass sich die Trichterauslaufzeit mit steigendem Fließmittelgehalt verringert. Die Resultate aus den rheologischen Untersuchungen in Abbildung 14 b bestätigen dieses Verhalten mit einer fallenden Viskosität bei steigendem Fließmittelgehalt. Wüstholtz folgerte, dass sich durch die Erhöhung des Fließmittelgehaltes eine verbesserte Mehlkorndispersierung einstellt und somit die Zähigkeit herabgesetzt wird.

Damit zeigt Wüstholtz, dass Fließmittel neben der starken Wirkung auf die Fließgrenze auch die Viskosität beeinflussen.

Fleischmann untersuchte ebenfalls den Einfluss von unterschiedlicher Fließmitteldosierung bei gleicher Betonrezeptur [24]. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Vergleich unterschiedlicher Fließmittelgehalte (je drei rheologische Messungen) nach Fleischmann [24]

Rezept	Fließmittelgeh. [%]	Fließkurve		Konstante Geschwindigkeit Dynamische Fließgrenze [Pa]	Frischbetonprüfungen	
		Viskosität [Pas]	Bingham – 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		

Die Zahlenwerte in Tabelle 2 zeigen eindeutig, dass eine Erhöhung des Fließmittels um 0,2 % die Viskosität, Bingham Fließgrenze, dynamische Fließgrenze, das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit beeinflusst. Diese Resultate decken sich mit den Ergebnissen von Wüstholtz.

Bezogen auf die Konsistenz von SVB ist die Wirkung von PCE-Fließmittel in Verbindung mit dem verwendeten Zement (inkl. Abbinderegler) die komplexeste Reaktionskinetik im Frischbeton.

- Stabilisierer (ST)

Allgemein werden ST eingesetzt, um das Zusammenhaltevermögen (z. B. bei Unterwasserbeton und Spritzbeton) und die Pumpbarkeit zu verbessern sowie das Bluten zu reduzieren. Bei SVB des Kombinationstyps kommen Betonzusatzmittel in Form von Stabilisierern zum Einsatz, um einen SVB mit geringerem Mehlkornanteil realisieren zu können. Der Markt hält verschiedene Produkte mit stabilisierender Wirkung vor. Neben den klassischen Stabilisierern (ST) werden Viskositätsmodifizierer (VMA) und Sedimentationsreduzier (SR) angeboten. Diese Produkte können im Fall von SVB die Gefahr des Entmischens infolge eines Wasserüberschusses reduzieren, was letztlich zu einem robusteren Beton führt [25].

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen organischen und anorganischen Stabilisierern, welche sich in ihrer Wirkungsweise unterscheiden.

**Organische Stabilisierer** können wiederum in zwei Gruppen unterteilt werden:

Synthetische und natürliche Polymere:

Der Wirkmechanismus dieser Stoffgruppe (z. B. Polysaccharide und Celluloseether) basiert auf langen Polymeren, die durch Wasseradsorption ein Gel bilden. Somit wird Wasser temporär gebunden und die Viskosität und die Sedimentationsstabilität des Frischbetons erhöht [11].

Organische, wasserlösliche Flockungsmittel:

Die Wirkungsweise ist ähnlich den organischen Polymeren, jedoch adsorbieren die Flockungsmittel zusätzlich an Feststoffen. Dies bewirkt auch eine Erhöhung der Fließgrenze neben der Viskosität. Weiterhin kann das thixotrope Verhalten verstärkt werden. Vertreter dieser Gruppe sind z. B. Stärkeether, Xanthan und Welan Gum. Zur SVB Herstellung wird oftmals Welan Gum verwendet, da es neben Schwankungen im Wassergehalt auch Abweichungen des Feinanteils des Sandes neutralisieren kann [11] [13] [29].

**Anorganische Stabilisierer** lassen sich ebenfalls in zwei Gruppen einteilen:

In Wasser quellfähige anorganische Stoffe:

Bentonit, als ein Beispiel für diese Stoffgruppe, stabilisiert aufgrund seiner Plättchenstruktur mit großer Oberfläche und Quellfähigkeit, das damit ein ausgeprägtes Wasserrückhaltevermögen besitzt und die Sedimentationsstabilität erhöhen kann [11].

Anorganische Stoffe mit hoher spezifischer Oberfläche:

Zu dieser Kategorie zählen Stoffe mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von etwa 15 nm und geringer. Nanosilika und synthetische Kieselsäuren sind z. B. Vertreter dieser Stoffgruppe. Infolge der sehr kleinen Korngröße besitzen diese Stoffe eine sehr große Oberfläche und sind in der Lage, viel Wasser zu binden. Prinzipiell besitzen alle mehlkornfeinen Zusatzstoffe stabilisierende Wirkungen, was in erster Linie bei SVB des Mehlkorntyps genutzt wird. Die Intensität der stabilisierenden Wirkung ist bei Nanosilika durch die enorm große spezifische Oberfläche wesentlich höher [11].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Einsatz von Stabilisierern eine höhere Viskosität hervorruft. Auch können die Fließgrenze und die Thixotropie beeinflusst werden. Eine Überdosierung kann jedoch die Fließeigenschaften negativ beeinflussen. Die Wirkung hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab (Stabilisiererart, Feststoffgehalt, Fließmittel, etc.). Infolge der Wechselwirkungsmöglichkeiten in Kombination mit einer enormen Anzahl von möglichen Produkten können keine allgemeingültigen Erkenntnisse über die Wirkungsweise auf die Verarbeitbarkeit bzw. Konsistenz abgeleitet werden [11] [21] [29] [30] [17] [31].

#### 2.1.5 Äußere Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit

Neben den Einflüssen aus der Zusammensetzung einer Rezeptur spielen bezüglich der Verarbeitbarkeit auch äußere Einflüsse eine Rolle. Daher ist es wichtig, die Auswirkungen der äußeren Einflüsse zu verstehen.

- Zeit

Frischbetone im Allgemeinen verändern ihre Konsistenz bzw. Verarbeitungseigenschaften über die Zeit. Gründe sind die Reaktion des Zements mit Wasser bzw. die Hydratation und das in Lösung Gehen des Abbindereglers. Hinzu kommt die Wirkung des Fließmittels, welche wiederum von der Temperatur, dem Zugabezeitpunkt und dem Mischregime beeinflusst werden kann. Am deutlichsten äußert sich der Faktor Zeit durch das Ansteifen bei ruhendem Beton infolge Thixotropie. Dieser Vorgang ist weitgehend reversibel. Bei Verwendung von SVB im Fertigteilwerk ist der Zeitfaktor von einer untergeordneten Rolle, da der Beton in der Regel zügig verarbeitet wird. Allerdings kann eine Liegezeit im Betonkübel ohne Rührwerk von fünf bis zehn Minuten in manchen Fällen einen Verlust der designierten Verarbeitungseigenschaften zur Folge haben. Im Transportbetonbereich kann der Faktor Zeit nicht isoliert betrachtet werden. Bei langen Anfahrtswegen ist die zeitliche Veränderung der Konsistenz im Transportbetonmischer in Abhängigkeit von der Temperatur zu betrachten. *Kordts* hat zu den Einflussfaktoren Zeit und Temperatur umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Er diskutiert die Verarbeitbarkeit in Verbindung mit dem Verarbeitungsfenster (Fensterlösung nach DAfStb - SVB Richtlinie) [18] [9].

- Temperatur

Wie die Zeit hat auch die Temperatur einen Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften von Betonen. Prinzipiell ist schon die Reaktionskinetik des Zements mit Wasser von der Temperatur abhängig. Den größeren Einfluss auf das Frischbetonverhalten haben jedoch das Fließmittel und dessen Temperaturempfindlichkeit. Nach *Brameshuber* kann bereits eine Temperaturänderung des Frischbetons um 1 K bewirken, dass der Beton keine selbstverdichtenden Eigenschaften mehr aufweist [1]. *Brameshuber et al.* [32] untersuchten selbstverdichtende Mörtel mit sechs verschiedenen PCE-Fließmitteln. Als Messinstrument kam ein Viskomat NT zum Einsatz. Die Prüfdauer betrug 90 min bei jeweils 5-, 10-, 15-, 20- und 30 °C Mörteltemperatur. Es wurde gezeigt, dass sich über die Zeit in Abhängigkeit von dem eingesetzten Fließmittel und der Temperatur sehr unterschiedliches rheologisches Materialverhalten zeigt. Das Fazit dieser Untersuchungen ist: Einige Mörtel zeigen bei Temperaturen über 15°C ein so deutliches Ansteifen, dass eine Verwendung der entsprechend verwendeten Fließmittel für die SVB Herstellung ausgeschlossen werden kann.

- Mischregime

Durch die hohen Mehlkorngelhalte entsteht eine geringere innere Reibung des Mischgutes. Prinzipiell müssen auch höhere Fließmitteldosierungen infolge des hohen Feinanteils bei SVB in Kauf genommen werden. Für die volle Entfaltung der Fließmittelwirkung bzw. der vollständigen Dispergierung der Mischung ist ein Mindestmaß an Mischenergie und Mischzeit notwendig, was allerdings von der einzelnen Rezeptur abhängt. Die Mischzeit ist wiederum von der Mischintensität und der eingebrachten Mischenergie abhängig. Generell sind für die Herstellung von SVB, durch den hohen Gehalt an Feinteilen, längere Mischzeiten notwendig. *Chopin et al.* diskutieren den Umstand, dass HPC und SCC längere Mischzeiten benötigen [33]. *Lowke et al.* haben den Mischprozess für SVB näher untersucht. In der Veröffentlichung wird die Verkürzung der Mischzeit diskutiert. Die Ergebnisse zeigten, dass in einem Intensivmischer vom Typ Eirich durch Verwenden eines hybriden Mischprozesses (anfangs hohe Werkzeuggeschwindigkeit, geringere Mischenergie in der Homogenisierungsphase) die Gesamtmischzeit auf ein Niveau von Rüttelbeton gesenkt werden kann [34]. *Schießl et al.* untersuchten den Einfluss der Mischtechnologie auf SVB und UHPC [35]. Eine generelle Erhöhung von Mischzeit und Werkzeuggeschwindigkeit muss beim Mischprozess von Hochleistungsbetonen nicht immer vorteilhaft sein. Die folgende Abbildung 15 aus *Lowke und Schießl* [34] zeigt, dass der Mischprozess in drei Phasen eingeteilt werden kann. Das Diagramm in Abb. 15 zeigt ein Maximum im Setzfließmaß in Phase 2 (Optimum). Durch weiteres Mischen verringert sich das Setzfließmaß wieder, was letztlich eine Verschlechterung der Verarbeitbarkeit darstellt, welche auf eine Übermischung zurückzuführen ist. Daraus lässt ableiten, dass es für jede Rezeptur und Mischintensität eine optimale Mischzeit gibt.

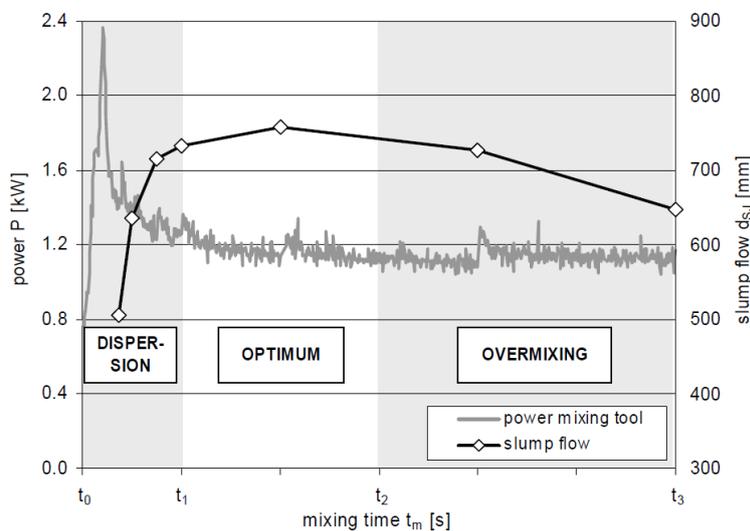


Abbildung 15: Einfluss der Mischzeit auf das Setzfließmaß nach Lowke und Schießl [34]

Die Forschungsergebnisse über den Mischprozess von UHPC von *Mazanec* bestätigen die oben gemachten Aussagen und Ergebnisse. Jedoch teilte *Mazanec* den Mischprozess in fünf Phasen ein [17]. Fest steht, dass der Mischprozess einen wesentlichen Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften hat. Daraus lässt sich ableiten, dass die Art des Mixers auch ein entscheidendes Kriterium ist, was die Mischer Hersteller erkannt haben. Die Entwicklung von Mixern, die auf die Anforderungen zur Herstellung von Hochleistungsbetonen abgestimmt

sind, ist bereits Realität. Im Rahmen der Forschungsarbeit von *Baumert* wurde gezeigt, dass durch ein zweistufiges Mischregime in einem Intensiv-Konus-Mischer die Mischzeiten deutlich reduziert werden können [36]. Diese Erkenntnis deckt sich mit den oben zitierten Ergebnissen von *Lowke* und *Schießl* [34]. Diese Diskussion zeigt, dass der Mischprozess eine Schlüsselfunktion bei der Herstellung von Hochleistungsbeton wie SVB einnimmt.

#### ➤ Nutzen thixotroper Eigenschaften von SVB

Wie oben angeführt, hat *Lowke* die Thixotropie als Frischbetoneigenschaft definiert und deren Nutzen untersucht. Ein Ansteifen infolge Thixotropie kann eine Entmischung (Absetzen der groben Gesteinskörnung) nach dem Betonierprozess unterbinden [14]. Andererseits kann diese Eigenschaft bei ungewollten Warte- bzw. Liegezeiten zu einer Verschlechterung und sogar zu einem Verlust der designierten Fließeigenschaften führen.

*Sarmiento* untersuchte mit einem innovativen Ansatz die Möglichkeiten, SVB zur Herstellung von Fahrbahndecken aus Betonen einzusetzen [37]. Die große Herausforderung in der Zielsetzung von *Sarmientos* Arbeiten lag in der Kombination von zwei einander entgegenlaufenden Eigenschaften. Die einerseits hohe Fließfähigkeit und Selbstentlüftung des SVB musste nach wenigen Minuten eine erhöhte Grünstandfestigkeit aufweisen, um die eingeprägte Form der Fahrbahndecke nach Verlassen des Gleitschalungsfertigers zu behalten.

Aus der Arbeit von *Sarmiento* [37] ist zu entnehmen, dass nach *Bornemann* [38] und [39] die statische Fließgrenze  $\tau_{0R}$ , die Adhäsionskräfte zwischen dem Wasser und den festen Bestandteilen, die Packungsdichte sowie die Kornverzahnung der Gesteinskörnung für die Entwicklung der Grünstandfestigkeit verantwortlich sind. Die Basisuntersuchungen wurden an Bindemittelleimen durchgeführt. Die Anforderung an die Bindemittelleime waren Setzfließmaße  $\geq 200$  mm unmittelbar nach dem Mischprozess. Das zweite Kriterium war eine Grünstandfestigkeit nach 5 bzw. 10 min. gemäß eines eigens von *Sarmiento* definierten Formkoeffizienten  $K_L \geq 0,90$ .

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten zeigen, dass durch die Verwendung von speziellen und gut abgestimmten Zusatzstoffen und speziellen Zusatzmitteln eine praxistaugliche Grünstandfestigkeit von Selbstverdichtenden Betonen für den Einsatz im Betonstraßenbau erreicht werden kann. Aus der Diskussion von *Sarmiento* geht hervor, dass durch Wegfall des Rüttelns die Qualität bzw. Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen gesteigert werden kann.

## 2.2 Beurteilung der Verarbeitungseigenschaften von Stoffen, Stand der Technik

### 2.2.1 Klassische Rheologie und Rheometrie, Normen, Definitionen, Festlegungen

Die klassische Rheologie an Flüssigkeiten, die Begriffe, die Einheiten, das zugrundeliegende rheologische Modell und die Messinstrumente (Rheometer) sind in verschiedenen Normen präzise und sehr ausführlich beschrieben und definiert. Es existieren Festlegungen für bestimmte Untersuchungsmethoden und für die Verwendung von genormten Kennwerten und den zugehörigen Maßeinheiten.

Eine kurze Übersicht der wesentlichen Normen zur klassischen Rheologie, mit den wichtigsten rheologischen Begriffen und Definitionen, soll eine differenzierte und einfache Betrachtung der verschiedenen Messsysteme und Kennwerte erleichtern.

In der dreiteiligen DIN 1342 Viskosität sind rheologische Begriffe in Teil 1 definiert [40]. Die Zusammenhänge werden in Teil 2 (Newtonsche Flüssigkeiten) [41], Teil 3 (Nicht-newtonsche Flüssigkeiten) [42] und DIN 13343 Linear-viskoelastische Stoffe behandelt [43]. Die genormten rheologischen Parameter können bzw. müssen, mit den entsprechend genormten Rheometern (Absolut-Messgeometrien) der vierteiligen DIN 53019 Viskosimetrie-Messung von Viskositäten und Fließkurven, mit Rotationsviskosimetern bestimmt werden [44–47]. DIN 1342 und DIN 53019 sind in den jeweiligen normativen Verweisungen verknüpft. Die zweiteilige DIN EN ISO 3219 Rheologie behandelt ebenfalls die Grundlagen der Rheologie und Viskosimetrie [48] [49]. Dazu werden in Teil 2 neben dem Punkt 3.7 *Absolut-Messgeometrie* unter Punkt 3.6 auch *Relativmesssysteme* definiert und in weiteren Abschnitten behandelt.

DIN EN ISO 3219-1 (Absatz 3.28) definiert die Rheologie als Lehre vom Deformations- und Fließverhalten von Materialien. Die Rheometrie ist unter Absatz 3.29 als jenes Teilgebiet der Rheologie definiert, das sich mit der Messung des Deformations- und Fließverhaltens von Materialien befasst.

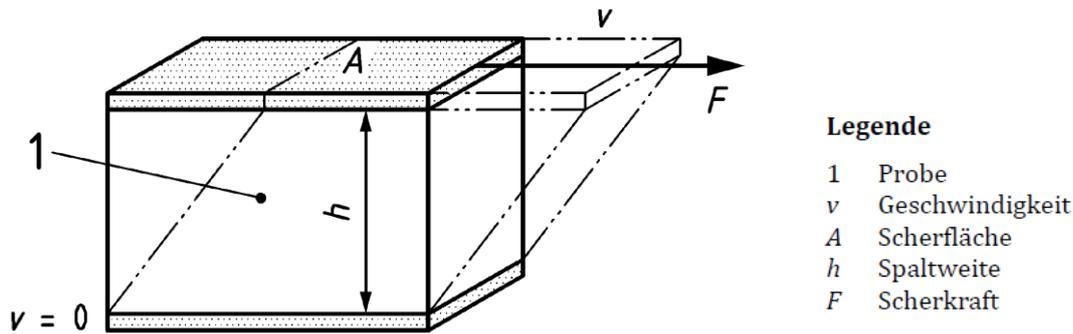
Unter die Absolut-Messsysteme fallen nach DIN EN ISO 3219-2, Absatz 6.3.1 die koaxialen Zylinder-, Doppelspalt- und Kegel-Platte-Messgeometrien. Alle anderen sind Relativ-Messgeometrien.

DIN 53019-1 definiert analog ebenfalls absolute Messgeometrien, führt jedoch im Absatz 9.4 zusätzlich noch das Platte-Platte-Rotationsviskosimeter auf.

Der folgende Auszug aus dem Punkt 5.2 Rotationsrheometrie aus DIN EN ISO 3219-2 beschreibt das zugrundeliegende rheologische Modell und die zugehörigen wichtigsten rheologischen Parameter:

„Im Grundversuch Rotation wird die Probe konstant oder variabel in eine Richtung belastet. Aus den gemessenen Daten lässt sich die Scherviskosität berechnen.“

„Schematisch können die Grundgrößen des Versuchs mit dem Zwei-Platten-Modell dargestellt werden. Dabei wird in diesem Unterabschnitt ein infinitesimaler Ausschnitt aus der Messgeometrie betrachtet (siehe Abbildung 16). Das Zwei-Platten-Modell besteht aus zwei parallelen Platten mit jeweils einer Fläche  $A$  und einer Spaltweite  $h$ , zwischen denen sich die Probe befindet. Die untere Platte hat die Geschwindigkeit Null ( $v = 0$ ). Die obere Platte wird mit der definierten Scherkraft  $F$  bewegt, woraus sich die Geschwindigkeit  $v$  ergibt. Es wird angenommen, dass die Probe zwischen den Platten aus Schichten besteht, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen  $v = 0$  und  $v$  bewegen.“



#### Legende

1	Probe
$v$	Geschwindigkeit
$A$	Scherfläche
$h$	Spaltweite
$F$	Scherkraft

Abbildung 16: Zwei-Platten-Modell mit vereinfachter schematischer Darstellung der Grundgrößen eines Rotationsversuches aus DIN EN ISO 3219-2 [49]

„Durch dieses Modell werden die nachfolgenden Größen in Gleichung (1) bis Gleichung (3) beschrieben [49]:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dabei ist

- $\tau$  die Schubspannung in Pascal;
- $F$  die Scherkraft in Newton;
- $A$  die Scherfläche in Quadratmeter.

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

Dabei ist

- $\dot{\gamma}$  die Scherrate in reziproken Sekunden;
- $v$  die Geschwindigkeit in Meter je Sekunde;
- $h$  die Spaltweite in Meter.

Mittels des Newtonschen Viskositätsgesetzes kann die Scherviskosität nach Gleichung (3) berechnet werden:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

Dabei ist

- $\eta$  die Scherviskosität in Pascal mal Sekunde.“

Nach DIN EN ISO 3219-1 Absatz 3.52 ist die Viskosität als Maß für den inneren Fließwiderstand eines Materials definiert [48].

Das Zwei-Platten-Modell in Abbildung 16 aus DIN EN ISO 3219-2 [49] ist in ähnlicher Form in DIN 1342-2 [41] unter Punkt 4.2 und in DIN 1342-3 [42] unter Punkt 6.1.1 dargestellt.

Um Verwechslungen oder eventuellen Ungereimtheiten vorzubeugen, soll das folgende Zitat aus *Mezger*, von Seite 24 [50] eine wichtige Information zu dem **Begriff Scherrate** liefern.

„Als Synonym wird auch verwendet: Deformationsrate (englisch: strain rate). Früher wurden auch verwendet: Schergeschwindigkeit, Schergefälle, Geschwindigkeitsgefälle, Deformationsgeschwindigkeit (englisch: shear gradient, velocity gradient, rate of deformation).“

In DIN 1342-2/3 wird bei diesem Modell der Begriff Schergeschwindigkeit verwendet.

Nach *Mezger* [50] werden für die Anwendung des rheologischen Zwei-Platten-Modells folgende Scherbedingungen vorausgesetzt:

1. Die Probe hat an beiden Flächen Wandhaftung, sie rutscht oder gleitet nicht.
2. Es herrschen laminare Fließbedingungen (d. h. Schichtenströmung); es soll keine turbulente Strömung auftreten (d. h. keine Wirbelbildungen).

DIN 53019-1 führt unter Abschnitt 1 (Anwendungsbereich) insgesamt sechs Voraussetzungen auf, unter denen die Festlegungen der Norm gelten [44]. Diese werden hier jedoch nicht weiter betrachtet.

Um die Verwendung und das Zustandekommen der rheologischen Parameter Schubspannung  $\tau$  und Scherrate  $\dot{\gamma}$  vollständig verstehen zu können, muss folgende Definition aus DIN 53019-1, Absatz 5 Kurzbeschreibung bekannt sein [44]:

„Die zu untersuchende **Flüssigkeit** befindet sich im Messspalt zwischen den rotations-symmetrischen und koaxial angeordneten Randflächen, von denen die eine mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  rotiert (Rotor), die andere ruht (Stator).“

„Ermittelt werden die **Drehzahl** und das **Drehmoment**, das nötig ist, um den Reibungs-widerstand der Flüssigkeit im Ringspalt zu überwinden. Aus den **geometrischen Abmessungen des Systems** sowie den ermittelten **Drehmoment-** und **Drehzahlwerten** lassen sich die in der Flüssigkeit herrschende **Schubspannung** und die **Schergeschwindigkeit berechnen**.“

Somit ist klar, dass die Schubspannung und die Schergeschwindigkeit bzw. Scherrate in Abhängigkeit der Messgeometrie berechnete Modellwerte sind. Solche Kennwerte, die mit einer entsprechend genormten Absolut-Messgeometrie (Rheometer nach DIN 53019 oder DIN EN ISO 3219) ermittelt sind, werden auch als rheologische Absolut-Werte bezeichnet. Die Verwendung dieser Absolut-Kennwerte ermöglicht geometrieunabhängige Vergleiche von Ergebnissen.

Eine klare Abgrenzung zwischen Absolut- und Relativmessgeometrie ist im Absatz **3.6 Relative-Messgeometrie** der **DIN EN ISO 3219-2** gegeben. Der hauptsächliche Unterschied ist, dass bei den Relativmesssystemen das Strömungsprofil und damit die rheologischen Größen nicht berechnet werden können. Somit darf bei den Ergebnissen für die Viskosität, welche mit Relativmesssystemen ermittelt werden, die Einheit Pascal mal Sekunde ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) nicht verwendet werden [49].

Der Begriff Fließgrenze ist im Absatz 3.55 der **DIN EN ISO 3219-1** als Schubspannung definiert, unterhalb derer ein Material nicht fließt. Die Fließgrenze  $\tau_y$  hat die Einheit Pascal (Pa).

Eine prinzipiell identische Definition für die Fließgrenze liefert DIN 1342-1 unter Absatz 3.18, verwendet wird jedoch die Abkürzung  $\tau_f$ . Die Fließgrenze wird in den bisher zitierten Normen im Vergleich zur Viskosität spärlich thematisiert, weil viele Flüssigkeiten Newtonsche Flüssigkeiten sind.

Das Thema Fließgrenze wird im DIN-Fachbericht 143 Moderne rheologische Prüfverfahren-Teil 1: Bestimmung der Fließgrenze - Grundlagen und Ringversuch behandelt [51]. Dieser Fachbericht wurde im Arbeitskreis „Rheologie“ der Normenausschüsse Pigmente und Füllstoffe (NPF) sowie Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. erarbeitet. Interessant ist folgender Satz aus dem Vorwort:

„Da die rheologischen Eigenschaften von den einzelnen Produkten abhängig sind, erschien es dem Arbeitskreis nicht sinnvoll, eine allgemeingültige Norm zur Bestimmung der Fließgrenze zu erstellen, sondern die Ergebnisse umfangreicher Ringversuche in Form eines Fachberichtes zu veröffentlichen [51].“

Diese Aussage des Arbeitskreises verdeutlicht die bestehende Problematik, allgemein gültige Regeln für die Bestimmung einer Fließgrenze festzulegen. Da es in dem Fachbericht 143 wie in den zuvor zitierten Normen im Wesentlichen um Untersuchungen an Flüssigkeiten und flüssigkeitsähnlichen Stoffen (Lacktechnologie) geht, kann für Untersuchungen an SVB (Fließgrenze) kein Mehrwert abgeleitet werden. In der Literatur ist die Bestimmung der Fließgrenze jedoch gängige wissenschaftliche Praxis.

Aus demselben Arbeitskreis ging auch der DIN SPEC 91143-2 Moderne rheologische Prüfverfahren - Teil 2: Thixotropie-Bestimmung der zeitabhängigen Strukturänderung-Grundlagen und Ringversuch hervor [52]. Die Thixotropie ist in der Betontechnologie in Bezug auf die Verarbeitbarkeit und Sedimentationsstabilität ebenfalls ein essenzielles Thema. Daher ist folgendes Zitat eine wertvolle Information sowie eine grundlegende Erkenntnis:

„Die Aufnahme von Fließkurven zur Bestimmung der Thixotropie ist weniger geeignet, quantitative Aussagen (Hysteresefläche als Maß für Thixotropie) treffen zu können. Fließkurven können in diesem Zusammenhang nur einen ersten Überblick über das generelle Fließverhalten einer Substanz liefern [52].“

Für die Ermittlung von rheologischen Parametern werden Fließkurven vielfach nach dem Bingham-Model ausgewertet. Es ist jedoch bekannt, dass über das Bingham-Model keine genauen Informationen generiert werden können, vgl. *Mezger* [50]. Die Erkenntnisse von *Mezger* decken sich mit den Erfahrungen von [51] und [52].

Ein gut funktionierender SVB fließt, entlüftet und nivelliert in der Schalung infolge der Schwerkraft nahezu vollständig selbst aus. SVB kann im physikalischen Sinne jedoch nicht als Flüssigkeit definiert werden. Wird hingegen von einer hochkonzentrierten grobkörnigen Suspension gesprochen, kommt das der Realität wohl am nächsten. Aufgrund der geringen Spaltweiten bei den genormten Rheometern sind diese nicht für rheologische Untersuchungen von SVB geeignet.

Genormte Rheometer sind jedoch die Voraussetzung, um rheologisch genormte Kennwerte mit den entsprechenden Einheiten zu generieren.

## 2.2.2 Relativmesssysteme und Kennwerte aus rheometrischen Untersuchungen

In dieser Arbeit wird der Einsatz eines Relativmesssystems gezeigt und diskutiert. Das Relativmesssystem (Kuglrheometer) liefert Relativmesswerte.

Das grundsätzliche Messprinzip von vielen Betonrheometern ist auf die Forschungsarbeiten und Entwicklungen von *Tattersall* (1973) zurückzuführen [53].

Für *Tattersall* waren die gängigen Einpunktversuche unzureichend aussagekräftig, um das Materialverhalten von Frischbeton vollständig zu beschreiben. Er stellte ein rheologisches Zweipunkt-Messprinzip zur Beschreibung der Verarbeitbarkeit vor. In seinen Arbeiten ist das Bingham-Modell ein zentraler Punkt für die Charakterisierung der Verarbeitungseigenschaften von Frischbeton. *Tattersall* stellte fest, dass die Ergebnisse einer Messung bei konstanter Geschwindigkeit keine ausreichenden Informationen liefern können. Den Einsatz von konzentrischen Zylindermesssystemen sah *Tattersall* kritisch. Er stellte fest, dass sich Betone in den zylindrischen Messsystemen nicht ausreichend genau bewerten lassen. Infolge dieser Erkenntnisse entwickelte *Tattersall* einen empirischen Ansatz bzw. eine Testmethodik.

In der folgenden Abbildung 17 ist ein Hobart Mischer AE 200 mit einem vorgeschalteten Wattmeter zu sehen.



Abbildung 17: Hobartmischer mit vorgeschaltetem Wattmeter nach *Tattersall* (1973) [53]

Bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten wurde die Leistungsaufnahme gemessen. Die Leistungsaufnahme wurde durch die Drehzahl geteilt und lieferte den Scherwiderstand  $T$ . *Tattersall* legte damals für  $T$  keine Einheit fest und schrieb (TORQUE – in arbitrary units) also beliebige Einheiten. Zur Visualisierung wurde der Scherwiderstand  $T$  über die Schergeschwindigkeit aufgetragen. Aus den Versuchsergebnissen konnte *Tattersall* folgende Gleichung ableiten:

$$T = g + hw$$

Nach *Tattersall* ist dabei  $T$  das Drehmoment bei der Geschwindigkeit  $w$  und die Parameter  $g$  und  $h$  charakterisieren das Material in Abhängigkeit vom  $w/z$ -Wert. Der Relativwert  $g$  verhält sich proportional zur Fließgrenze  $\tau_f$  und  $h$  proportional zur plastischen Viskosität  $\eta$ . *Tattersall* zeigte, dass die Werte für  $g$  und  $h$  bei steigenden  $w/z$ -Werten monoton fallen.

Die Abkürzungen  $g$  für die Fließgrenze und  $h$  für die Viskosität stellen relative Messgrößen dar. Diese Abkürzungen bzw. Bezeichnungen haben sich in der Baustoffrheologie bei Verwendung von Relativmesssystemen etabliert und werden international von vielen Wissenschaftlern verwendet. *Kordts* diskutiert in seiner Dissertation [18] verschiedenste Rheometer und rheologische Modelle. Für die Diskussion seiner Untersuchungen verwendete er das Bingham-Modell mit den Kennwerten  $g$  und  $h$ . Der prinzipielle Zusammenhang bzw. die systematische Ermittlung der Kennwerte ist in dem Diagramm in der folgenden Abbildung 18 dargestellt.

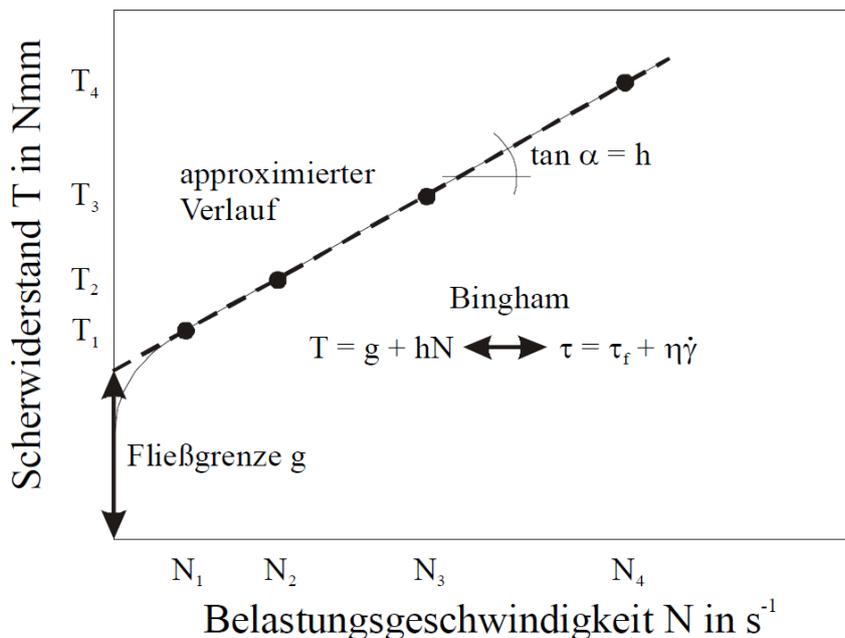


Abbildung 18: Ermittlung von Fließkurven mit den Kennwerten  $g$  und  $h$  nach *Kordts* [18]

Entgegen der Annahme von *Tattersall* haben sich in der Baustoffrheologie auch Prüfverfahren mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit etabliert. Wie im Kapitel 2.2.1 dargestellt, wird z. B. vom Arbeitskreis des DIN SPEC 91143-2 die Aufnahme von Fließkurven kritisch gesehen.

Vor diesem Hintergrund ist die folgend dargestellte Messmethode eine Alternative zum Bingham-Modell.

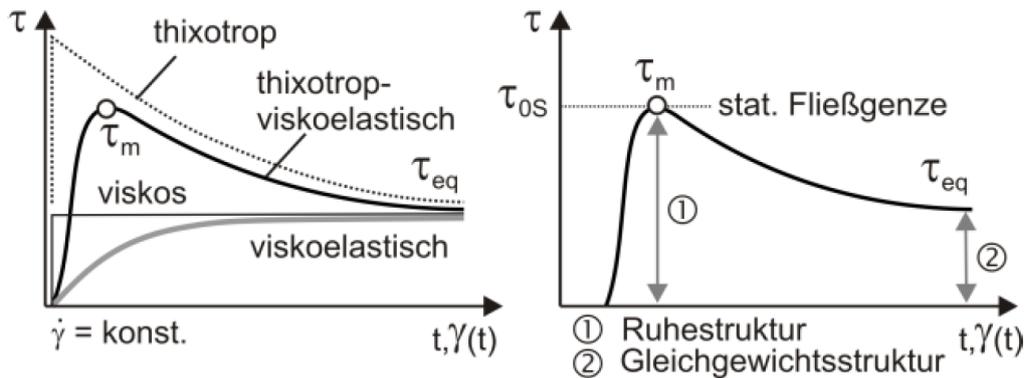


Abbildung 19: Entwicklung der Scherspannung  $\tau$  bei konstanter Scherrate (links) und statische Fließgrenze  $\tau_{0s}$  (rechts) aus Lowke [14] nach Cheng [54]

In Abbildung 19 ist dargestellt, dass mit einer konstanten Scherung zwischen der Fließgrenze der Ruhestruktur (statische Fließgrenze) und der Fließgrenze der bewegten Struktur (dynamische Fließgrenze) unterschieden werden kann. Der gesamte Graph wird als Gleichgewichtsscherspannung bezeichnet.

Zum obigen Modell zeigte Roussel [55] Ergebnisse (Abbildung 20), die diese Annahme bestätigen.

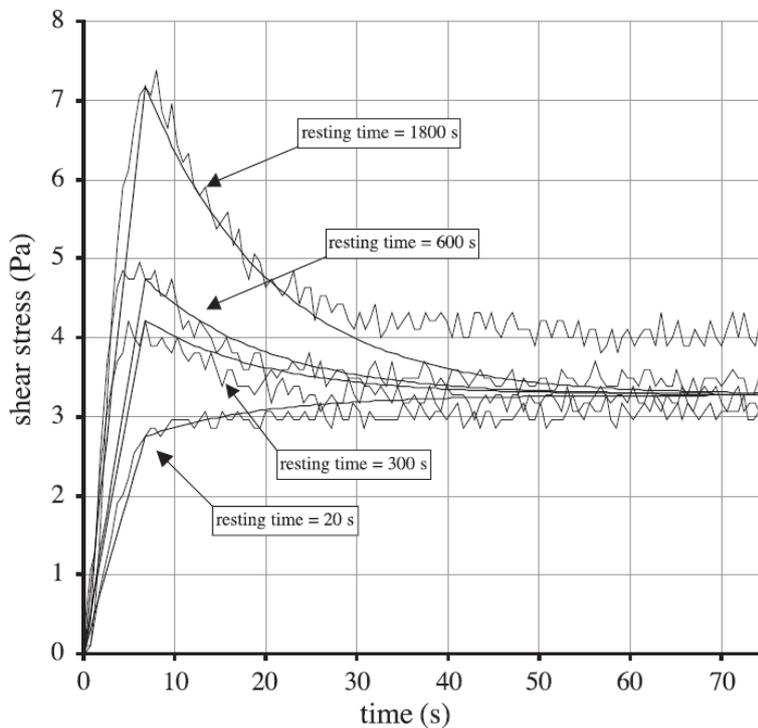


Abbildung 20: Gleichgewichtsscherspannung nach verschiedenen Ruhezeiten über die Zeit bei niedriger Scherrate ( $0,5 \text{ s}^{-1}$ ) nach Roussel [55]

Die Graphen belegen, dass mit einer konstanten Scherung die statische Fließgrenze infolge Thixotropie aus Ruhezeit und die dynamische Fließgrenze erfasst und beschrieben werden können.

Teilweise werden Relativmesswerte, wie von *Tattersall* gezeigt, kritisch gesehen. Vergleiche von Ergebnissen unterschiedlicher Messsysteme sind mit Relativwerten nicht möglich. Etliche Publikationen zeigen Berechnungsmodelle, um von relativen Messwerten auf genormte absolute Messgrößen zu kommen, also die Fließgrenze in Pa (Pascal) und die Viskosität in Pa\*s (Pascalsekunden) auszudrücken. Ein Beispiel für die Entwicklung einer solchen Umrechnung zeigten *Feys et al.* [56].

Eine Diskussion über die am Markt vorhandenen Betonrheometer soll hier nicht angestoßen werden. Diese Art von Vergleichen, Beschreibungen und Betrachtungen von Vor- und Nachteilen der einzelnen Systeme sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen bereits vorhanden, siehe z. B. *Fleischmann* [24], *Ferraris et al.* [57], *Thyrach* [58] und *Kordts* [18].

Ein entscheidend kritischer Punkt ist jedoch die Ermittlung der Fließgrenze von SVB. Durch den Einsatz von Fließmitteln weist ein gut eingestellter SVB generell eine sehr niedrige Fließgrenze nach dem Bingham-Modell auf. Aufgrund dieser Tatsache wird in einigen Literaturquellen auch eine alternative Sichtweise diskutiert. Diese greift das rheologische Modell einer Newton-Flüssigkeit auf. In der folgenden Abbildung 21 sind das Bingham-Modell und das Fließverhalten einer Newton-Flüssigkeit gegenübergestellt.

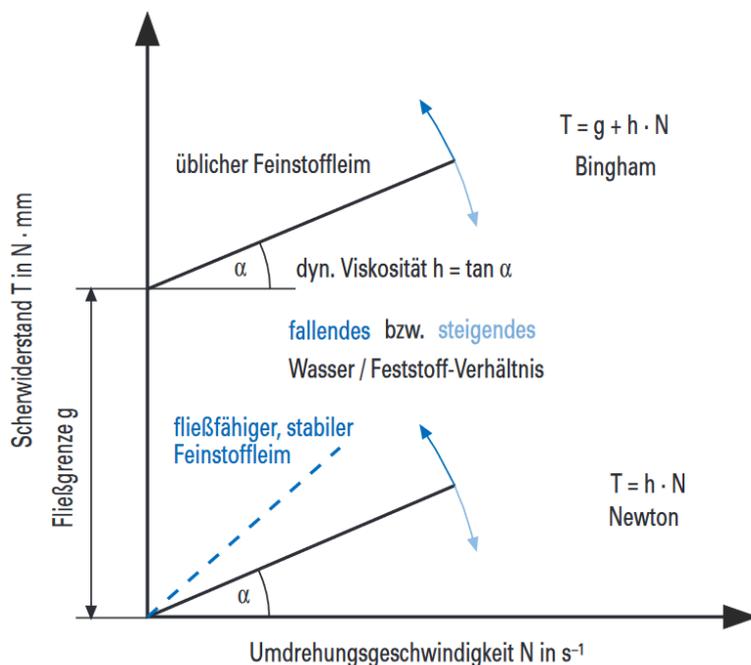


Abbildung 21: Rheometrische Verhalten von Mehlkorn/Wasser-Suspensionen; ohne Fließmittel (Bingham-Körper), und mit Fließmittel (Newton-Flüssigkeit) aus [39]

Die wesentliche Unterscheidung im Diagramm der Abbildung 21 ist, dass das Material des Binghamkörpers ohne Fließmittel hergestellt wurde und der fließfähige Feinstoffleim Fließmittel enthält.

*Sarmiento* hat diese Modelle auf Betone adaptiert [37], dabei wird üblicher Rüttelbeton als Bingham Körper charakterisiert und Selbstverdichtender Beton als Newton-Flüssigkeit. Diese These wird in vorliegender Arbeit anhand eigener Versuchsergebnisse vertiefend diskutiert.

### 2.2.3 Klassische Beurteilung der Konsistenz und Festlegungen von Betonen

DIN EN 206 [15] und DIN 1045-2 [16] beinhalten in Deutschland die wesentlichen Festlegungen, Grundlagen und Regeln klassischer betontechnologischer Aspekte. DIN EN 206 enthält in Verbindung mit der zwölfteligen DIN EN 12350 auch die Verfahren zur Prüfung der Konsistenz von SVB.

Zur SVB-Technologie geben weitere Richtlinien ergänzende Vorschriften und Informationen. Diese sind im Wesentlichen die DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) [9] und die Europäische Richtlinien für SCC [7].

Hier soll eine kurze Übersicht der wichtigsten Untersuchungsmethoden und Festlegungen zur Konsistenz von Betonen den Stand der Technik wiedergeben. Für ein besseres Verständnis des Begriffes Konsistenz sollen auch die elementaren Festlegungen für konventionelle Rüttelbetone kurz diskutiert werden.

#### ➤ Rüttelbeton, Konsistenz und Beurteilung

Naturgemäß prüfen und beurteilen die Verarbeiter von Frischmörteln und Betonen seit jeher die Konsistenz haptisch und visuell mit einfachen Hilfsmitteln (z. B. Kelle oder Schaufel). Eine solche Beurteilung der Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit ist jedoch immer subjektiver Natur. Einschlägige Normen geben den am Bau Beteiligten praxistaugliche Versuche und Rahmenwerte vor, um die Qualität und Konsistenz von Frischbeton, einheitlich feststellen und definieren zu können. DIN EN 206 nennt unter Punkt 4.2. in Anlehnung an EN 12350 Konsistenzklassen für Betone. Tabelle 3 gibt die Konsistenzklassen, ausgedrückt als Setzmaß S1 bis S5, Tabelle 4 gibt die Konsistenzklassen, ausgedrückt als Verdichtungsmaß C0 bis C4 und Tabelle 5 gibt die Konsistenzklassen, ausgedrückt als Ausbreitmaß F1 bis F6 an. Die Tabellen in DIN 1045-2 sind um eine Spalte reicher und geben auch eine Konsistenzbeschreibung. In DIN 1045-2 Punkt 5.4 Anforderungen an Frischbeton, Unterpunkt 5.4.1 Konsistenz, sind als bevorzugte Prüfverfahren die Ermittlung des Ausbreitmaßes und für steifere Betone das Verdichtungsmaß festgelegt.

Mit der Durchführung des Ausbreitversuches nach DIN EN 12350-5 lässt sich die größte Bandbreite möglicher Konsistenzklassen für Rüttelbetone bestimmen [59]. Die Ausbreitmaßklasse F6 ist auch die Grenze zur SVB-Technologie.

Neben den schon genannten Verfahren Setz-, Verdichtungs- und Ausbreitmaß beschreibt DIN 12350-3 noch das Setzzeitmaß in der Vebe-Prüfung [60].

Der Begriff Viskosität ist in DIN EN 206 unter Punkt 3.1.3.15 als „Fließwiderstand von Frischbeton nach Beginn des Fließens“ definiert, diese wird jedoch in Zusammenhang mit Rüttelbetonen nicht verwendet.

Rüttelbeton kann normgerecht nach einer der vier genannten Methoden in seiner Konsistenz geprüft und beurteilt werden. Es wird jeweils ein Wert bestimmt, mit dem man auf die Konsistenzklasse schließen kann. Daher werden Versuche dieser Art auch als Einpunktversuche bezeichnet.

- Allgemeine Schwankungsbreiten der Konsistenz von konventionellem Rüttelbeton

Beton ist in frischem Zustand ein komplexes System. An dieser Stelle muss hervorgehoben werden, dass die Herausforderungen einer gelungenen und zielsicheren Herstellung nach wie vor auch eine Thematik von Rüttelbetonen sind.

Dies ist z. B. in einem Bericht von *Reiners et. al.* [61] mit dem Titel „Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe“ ersichtlich. Diese Forschungsarbeiten fanden ausschließlich an Rüttelbetonen statt.

Eine umfangreiche Untersuchung zu abweichenden Verarbeitungseigenschaften eines Rüttelbetons der Klasse F4 (Sichtbeton) zeigte *Heidelberger Zement* [62]. Daraus geht hervor, dass Themen wie Mischregime, Leimgehalt, PCE-Gehalt, Frischbetontemperatur und die Wasserdosierung innerhalb der zulässigen Dosiergenauigkeiten die Frischbetoneigenschaften beeinflussen können. Diese Erkenntnisse haben einen direkten Bezug zur Praxis des Transportbetonsektors.

#### ➤ SVB, Konsistenzprüfung nach Regelwerk

Für eine vollständige normgerechte Bewertung der rheologischen Eigenschaften von frischem SVB sind zwei Kennwerte notwendig. Die rheologische Beschreibung und Definition des frischen SVB erfolgt näherungsweise durch das Bingham-Modell. Danach werden die zwei Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität bestimmt. Durch diese Kenngrößen soll ein Konsistenzbereich definiert werden, in dem eine SVB-Rezeptur ihre besonderen Materialeigenschaften, wie Fließfähigkeit, Selbstentlüftung und Sedimentationsstabilität, zielsicher erfüllt. Normativ werden die Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität nicht mit Rheometern ermittelt. Es wurden praxistaugliche und einfache Methoden bzw. Versuche entwickelt, um die Konsistenz zu beschreiben. Diese Versuche werden auch als rheologische Ersatzverfahren bezeichnet.

Der folgende Ausschnitt aus der SVB-Richtlinie des DAfStb Anhang Q1 Allgemeines, Abs. (2) liefert eine vollständige Definition, welchen Versuchen welche Kennwerte zugeordnet werden.

„Als Messverfahren zur Bestimmung des Fließverhaltens von Selbstverdichtendem Beton haben sich Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bewährt. Während das Setzfließmaß überwiegend von der Fließgrenze beeinflusst wird, hängt die Trichterauslaufzeit hauptsächlich von der Viskosität ab.“ [9]

Letztlich muss man aber auch berücksichtigen, dass es sich bei den Versuchen zur Ermittlung des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit um rheologische Ersatzverfahren handelt. Diese können nur eine grobe und stark vereinfachte Beschreibung eines komplexen rheologischen Verhaltens liefern.

Neben der Ermittlung der Auslauftrichter-Fließzeit im Auslauftrichter Versuch (V-Funnel-Test) nach DIN EN 12350-9 [63] kann die Viskosität laut SVB-Richtlinie alternativ auch über die  $t_{500}$  Zeit bestimmt werden, sofern bei der Erstprüfung ein Zusammenhang mit der Auslauftrichter-Fließzeit nachgewiesen wurde. Zusätzlich können weitere Prüfverfahren dieser Normenreihe wichtige Informationen über essenzielle Verarbeitungseigenschaften liefern. Dazu zählen der L-Kastenversuch nach DIN EN 12350, Teil 10 [64], Sedimentationsstabilität

im Siebversuch nach DIN EN 12350, Teil 11 [65] und der Blockierring-Versuch nach Teil 12 [66]. Um den Versuchsaufwand zur Charakterisierung von SVB zu reduzieren, wurde ein kombiniertes Prüfverfahren entwickelt. *Kordts und Breit* stellen einen Auslaufkegel vor, mit dem man eine Kegelauslaufzeit und ein Setzfließmaß in einer Versuchsanordnung ermitteln kann[67].

Die Sedimentationsstabilität des Frischbetons kann nach SVB-Richtlinie des DAfStb Anhang N.2 Auswaschversuch oder alternativ nach Anhang N.1 Prüfung der Sedimentationsstabilität am Festbeton ermittelt werden [9].

DIN EN 206 [15] und die Europäische Richtlinie für SCC [7] definieren Konsistenzklassen für verschiedene SVBs in nahezu übereinstimmender Weise. Die folgenden drei Tabellen aus EN 206 zeigen Klassen des Setzfließmaßes und zwei Varianten zur Beurteilung der Viskosität von SVB.

*Tabelle 3: Setzfließmaßklassen aus EN 206*

<b>Klasse</b>	<b>Setzfließmaß<sup>a</sup>, ermittelt nach EN 12350-8</b> mm
SF1	550 bis 650
SF2	660 bis 750
SF3	760 bis 850
<sup>a</sup> Die Klasseneinteilung gilt nicht für Beton mit $D_{\max} > 40$ mm.	

*Tabelle 4: Viskositätsklassen- $t_{500}$  aus EN 206*

<b>Klasse</b>	<b><math>t_{500}</math><sup>a</sup>, ermittelt nach EN 12350-8</b> s
VS1	< 2,0
VS2	≥ 2,0
<sup>a</sup> Die Klasseneinteilung gilt nicht für Beton mit $D_{\max} > 40$ mm.	

*Tabelle 5: Viskositätsklassen- $t_v$  aus EN 206*

<b>Klasse</b>	<b><math>t_v</math><sup>a</sup>, ermittelt nach EN 12350-9</b> s
VF1	< 9,0
VF2	9,0 bis 25,0
<sup>a</sup> Die Klasseneinteilung gilt nicht für Beton mit $D_{\max} > 22,4$ mm.	

Toleranzbereiche für die hier angeführten Versuche sind auf S. 59 Tab. 23 der EN 206 angegeben.

DIN EN 206 gibt in Anhang G.1 Allgemeines unter Punkt 5 an, dass in der Regel das Setzfließmaß zum Nachweis der Verarbeitungseigenschaften festgelegt wird.

Weiter ist aus DIN EN 206 in Anhang G.2.1 Konsistenz zu entnehmen, dass sich das Setzfließmaß auf die Konsistenz bezieht.

Die SVB-Richtlinie des DAfStb enthält keine Angaben zu Verarbeitbarkeitsklassen (Setzfließmaß- oder Viskositätsklassen). Der folgende Auszug aus der SVB-Richtlinie, Anhang Q.1 Allgemeines Abs. (1) beschreibt ein Verfahren mit der Bezeichnung „Verarbeitungsfenster“.

„Feste Grenzwerte oder Verarbeitungsklassen in dieser Richtlinie sind weder zweckmäßig noch geeignet, Selbstverdichtende Betone (SVB) zu erfassen. Bei der Rezeptentwicklung und in der Erstprüfung ermittelt der Betonhersteller in Frisch- und Festbetonprüfungen den optimalen Verarbeitbarkeitsbereich für seinen Selbstverdichtenden Beton. Der optimale Verarbeitungsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und sedimentationsstabil ist. Um für alle Formen des Selbstverdichtenden Betons einheitliche Regeln und Bewertungsmaßstäbe zu setzen, wird im Folgenden ein Verfahren zur Bestimmung des Verarbeitbarkeitsbereiches von Selbstverdichtendem Beton beschrieben („SVB-Verarbeitungsfenster“).“

Anhang Q.2, Abs. (2) gibt Formeln zur Ermittlung von Zielwerten und der zulässigen Abweichungen des Setzfließmaßes  $s_{m,u}$  und der Trichterauslaufzeit  $t_{Tr}$  vor.

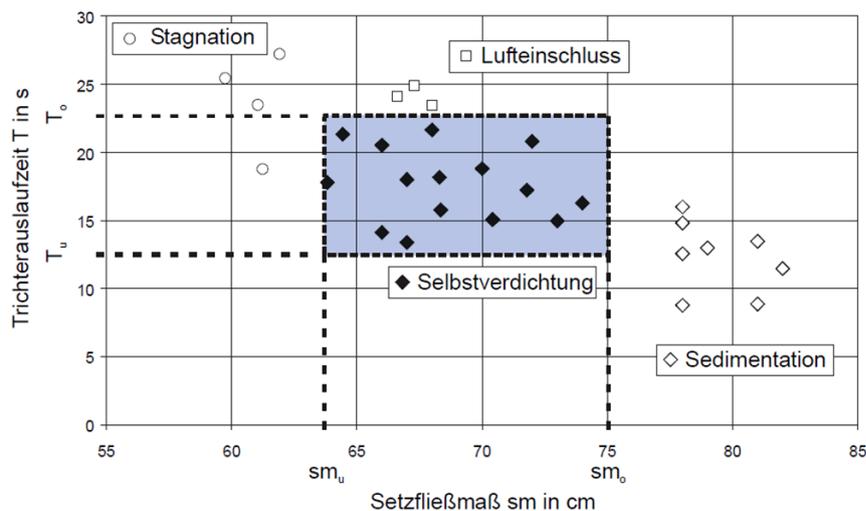


Abbildung 22: Verarbeitungsfenster definiert durch Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit [9]

Das Verarbeitungsfenster in Abb. 22 ist ein Beispiel, das einen Bereich definiert, in dem ein SVB seine essenziellen Eigenschaften besitzt und somit eine reibungslose Betonage und ein gutes Endprodukt garantiert. Eine solcher definierter Konsistenz bzw. ein solcher Zielbereich (Verarbeitungsfenster) kann in der Praxis der SVB-Produktion nicht immer kontinuierlich hergestellt werden. Dies geht durch die Erfahrungen der Verfasser der SVB-Richtlinie hervor. Die Hersteller von SVB sind angewiesen, die Grenzen des Fensters in der laufenden Produktion kontinuierlich zu prüfen, da sich diese infolge von Schwankungen in den Ausgangsstoffen verändern können.

Falls ein Wert vom Verarbeitungsfenster abweicht, müssen geeignete Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden, um den Beton wieder in den definierten Bereich zu bringen. Gelingt dies nicht, ist der Beton zu verwerfen.

Die Anweisungen der SVB-Richtlinie der DAfStb machen deutlich, dass eine Korrektur der Konsistenz in einem laufenden Produktionsprozess nicht reibungslos umgesetzt werden kann. Die Versuchsdauer der zwei Einpunktversuche von mindestens 20 Minuten, also die Ermittlung des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit, dauern zu lange. Auch die Entscheidung, Berechnung und Festlegung der genauen Menge einer erforderlichen nachträglich zu dosierender Komponente (z. B. Fließmittel) stellt auch gut ausgebildete Experten vor eine Herausforderung.

Die hier zusammengefassten Regelungen stehen aus rheologischer Sicht in einem gewissen Widerspruch zu den diskutierten Annahmen nach [39] aus Abbildung 21 und der weiterführenden Diskussion von Sarmiento [37]. Diese klassifizieren Rüttelbeton über das Bingham-Modell und SVB nach einem Newtonschen Fluid. Demnach müsste für eine vollständige rheologische Beschreibung des konventionellen Rüttelbetons die Bingham Fließgrenze und die Viskosität bestimmt werden. Im Gegensatz dazu könnte man die Konsistenz von SVB mit nur einem Kennwert erfassen bzw. beschreiben. In vorliegender Arbeit werden die Grundmodelle anhand eigener Untersuchungen betrachtet und durch Ergebnisse vertiefend diskutiert.

### 2.3 Rheologische Messsysteme zur Konsistenz-Optimierung im Betonmischer

Es gibt Systeme zur Bewertung der Konsistenz von Beton im Mischer. Meist handelt es sich um Systeme, die das Drehmoment am Mischerantrieb oder die benötigte Mischenergie messen (Konsistenzbalken). Diese Technik leistet gute Dienste bei der Herstellung von Normalbeton, kann die rheologischen Eigenschaften von SVB jedoch nicht genau genug erfassen, da die Unterschiede im Drehmoment zu gering sind. Aktuelle Forschungsarbeiten von *Garrecht* und *Baumert* haben sich zum Ziel gemacht, diesen Umstand zu beheben [68]. Dabei steht im Mittelpunkt eine verbesserte Mischprozessessteuerung und Optimierung von Mischanlagen mit dem Ziel, Hochleistungsbetone wie HPC, UHPC und SVB auf den Punkt genau herzustellen, um eine einwandfreie Pumpbarkeit und Verarbeitbarkeit sicherzustellen.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgte auch *Setzer* für eine verbesserte Herstellung von konventionellem Beton [69]. Ausgangspunkt für seine Arbeiten war die Tatsache, dass der Feuchtegehalt der Gesteinskörnung nicht ausreichend genau erfasst werden konnte. Das Ausbreitmaß als alleinigen Indikator zu Konsistenzkontrolle sah er kritisch. Setzer regte eine computergestützte Konsistenzkontrolle zur optimalen Einstellung des Betons an. Demnach sollte die designierte Konsistenz während des Herstellungsprozesses durch eine exakt berechnete Menge an Wasser korrigiert werden. Messgrößen sind demnach die Leistungsaufnahme des Mixers, eine präzise Bestimmung der Zuschlagsfeuchte und die Bestimmung des Wassergehaltes des Betons im Mischer. Der Ansatz wurde jedoch nicht weiterverfolgt oder realisiert.

Von der dänischen Firma *Convi* wurde ein Messsystem für den Einsatz im Betonmischer entwickelt das unter dem Namen *Visco Probe 1* zum Patent angemeldet ist. Das rheologische Prinzip baut auf dem Bingham-Modell auf. Daten werden während des Mischvorgangs bei

turbulenten Strömungsverhältnissen ermittelt. Der Beton soll demnach erst den Mischer verlassen, wenn die Konsistenz in einem bestimmten Zielbereich ist. Dies wird durch sukzessive Wasserzugabe realisiert [70]. Kritisch zu sehen ist bei diesem System, dass die Eingangsdaten während des Mischprozesses unter turbulenten Strömungsbedingungen ermittelt werden.

#### ➤ Rheologische Messsysteme in Fahrmischern

Zeit und Temperatur können die Konsistenz von Frischbeton zwischen der Herstellung und der Übergabe auf der Baustelle verändern. Eine Abweichung der Konsistenz über einen zugelassenen Toleranzbereich hinaus hat zur Folge, dass solche Lieferchargen zurückgewiesen werden müssen, was zu Problemen im Baufortschritt und nachfolgenden Arbeitsabläufen führt. Rheologische Messsysteme im Fahrmischer sollen die Veränderungen der Konsistenz erfassen und somit zielgerichtete Korrekturmaßnahmen ermöglichen (z. B. Zugabe von FM). In den USA wird vielfach die Mixed in Truck Methode angewandt. Daher ist es in diesem Fall noch wichtiger, ein Hilfsmittel zu haben, um die richtige Konsistenz einzustellen (sozusagen der Konsistenzbalken im Fahrmischer). Wissenschaftliche Untersuchungen und Ergebnisse zur Rheologie in Fahrmischern diskutieren z. B. *Wallevik* und *Wallevik* in [71].

## 2.4 Kugelmesssysteme (KMS) für Zementleim, Mörtel und SVB

### 2.4.1 KMS für Zementleim und Mörtel nach *Tyrach* [58]

*Die Rheologische Charakterisierung von zementären Baustoffsystemen* ist der Titel von *Tyrachs* Dissertation [58]. Die zwei folgenden Zitate geben den Kern der Überlegungen und Analysen wieder:

„Die Produktentwicklung, die Qualitätskontrolle sowie die Produktionsverfahren sind die entscheidenden Kriterien aufseiten des Produkts. Um diese Bereiche kontrollieren zu können, sind gut ausgebildete Spezialisten aus Technik und Naturwissenschaften notwendig, um die vielfältigen und komplexen Fragestellungen bearbeiten bzw. beantworten zu können.“

„Ein wesentlicher Aspekt bei zementären Baustoffsystemen ist, dass diese Baustoffe in flüssiger Form verarbeitet werden. Dementsprechend sind grundlegende Materialeigenschaften des flüssigen Systems von großer Bedeutung. Insbesondere die Fließeigenschaften dieser Baustoffe sind für die Anwendung die bestimmenden Parameter.“

Die Literaturstudie dieser Arbeit beleuchtet rheologische Untersuchungen an Zementleimen und Mörteln. Zentrales Thema dieser Diskussionen sind die eingesetzten rheologischen Messinstrumente und die verwendeten Messmethoden.

Die Schlussfolgerungen aus der gesichteten Literatur untermauert *Tyrach* durch eigene Versuche und Ergebnisse. Sinngemäß lautete die abschließende Beurteilung wie folgt:

Ein wesentliches Problem bei den meisten genormten Messgeräten:

- Bei zementgebundenen Materialien ist Wandgleiten zumeist vorhanden („Zementleim kann mit Messverfahren der Rheologie nur gemessen werden, wenn die Wände aufgeraut sind, ansonsten sind die Haftbedingungen nicht erfüllt“) [58].

Werden bei genormten Rheometern Oberflächenmodifizierungen vorgenommen, handelt es sich nicht mehr um Absolut-Messsysteme. Solche Instrumente sind nach DIN EN 3219-2 Abs. 6.3.3 Relativ-Messgeometrien mit Oberflächenmodifizierung [49].

Eine grundsätzliche und viel diskutierte Tatsache, die *Tyrach* in eigenen Versuchen auch nachgewiesen hat:

- Bei zementgebundenen Leimen ist keine laminare Schichtenströmung nachzuweisen.

Aus *Tyrach* ist zu entnehmen, dass seine Vorüberlegungen und die finale Entwicklung in Teilaspekten aus den Arbeiten von *Banfill*, *Tattersall*, *Zhenqing* und *Teubert* abgeleitet sind. Diese Wissenschaftler entwickelten rheologische Messverfahren, die auf komplexen Strömungen mittels eines zentrisch rotierenden Rührorgans basieren (Relativmesssysteme). Das Drehmoment und die Drehzahl dienten dabei als Messgrößen. Diese Methoden sind mit einem intensiven Mischen des Prüfgutes verbunden. Dieser Teilaspekt sollte nach dem Anforderungsprofil von *Tyrach* vermieden werden.

Das Patent von *Tyrach* basiert auf einer exzentrisch rotierenden Kugel. Die Funktionsweise seiner Entwicklung definiert *Tyrach* wie folgt:

„Der Unterschied zum Rührer ist, dass sich die Kugel auf einer Kreisbahn um die Rotationsachse bewegt. Beim Durchdringen des Baustoffs (bei *Tyrach* Leim oder Mörtel) wird die Kugel von diesem umströmt, ohne nennenswert vermischt, d. h. verändert zu werden. Solange die Kugel eine Kreisbahn nicht vollendet hat, hat dies zwangsweise zur Folge, dass ungemischtes und nicht vorgeschertes Material um die Kugel strömt.“

Dieses Messprinzip stellt eine Alternative zu den zuvor diskutierten Systemen dar. Durch das Erzeugen einer komplexen Verdrängungsströmung auf einer Kreisbahn wird das Prüfgut über einen größeren Bereich geschert. Vor dem Hintergrund, dass diese Messdaten langsam im ungescherten Material gewonnen werden, stellt dieses Messprinzip die realitätsnahe Situation eines Fließvorgangs von SVB nach.

#### 2.4.2 Kugelmesssystem für SVB nach *Fleischmann* [24]

*Fleischmann* adaptierte dieses Kugelmesssystem erfolgreich auf Selbstverdichtende Betone. Neben der Entwicklung eines Betonrheometers mit der Bezeichnung eBT-V für den mobilen Einsatz, konnte *Fleischmann* in seiner Dissertation die Vorteile einer Messung mit konstanter Scherung des Betons vorstellen, dessen Messergebnis er als „*Dynamische Fließgrenze*“ bezeichnete.

Er verwendete ein Rampen- und ein Stufenprofil für eine 360° Umdrehung, mit dem der Frischbeton geschert wurde.

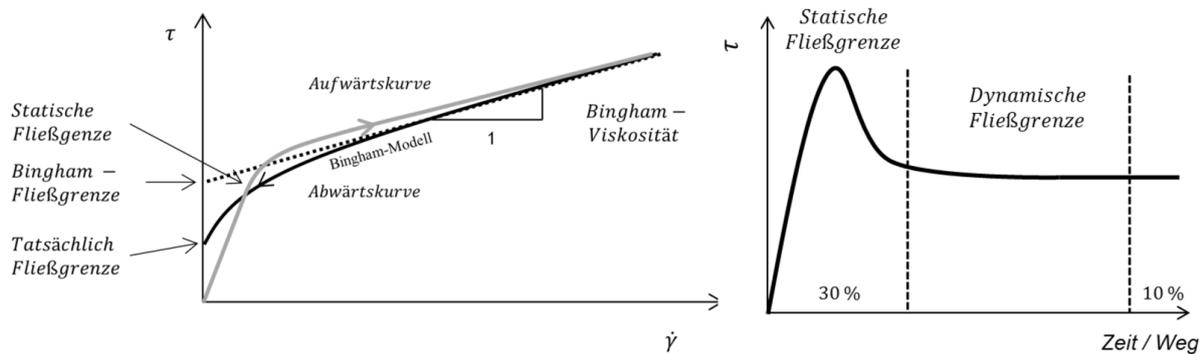


Abbildung 23: Auswertung des Rampenprofils links, Auswertung des Stufenprofils rechts [24]

Fleischmann verifiziert seine Ergebnisse bzw. die rheologischen Parameter mit den klassischen Einpunkt-Versuchen, Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit. In der folgenden Abbildung 24 ist deutlich nachvollziehbar zu sehen, dass Unterschiede im Wassergehalt durch das Setzfließmaß und durch die dynamische Fließgrenze dargestellt werden können. Die Bingham Fließgrenze lässt infolge einer geringen Spreizung eine weniger differenzierte Charakterisierung der Konsistenz zu.

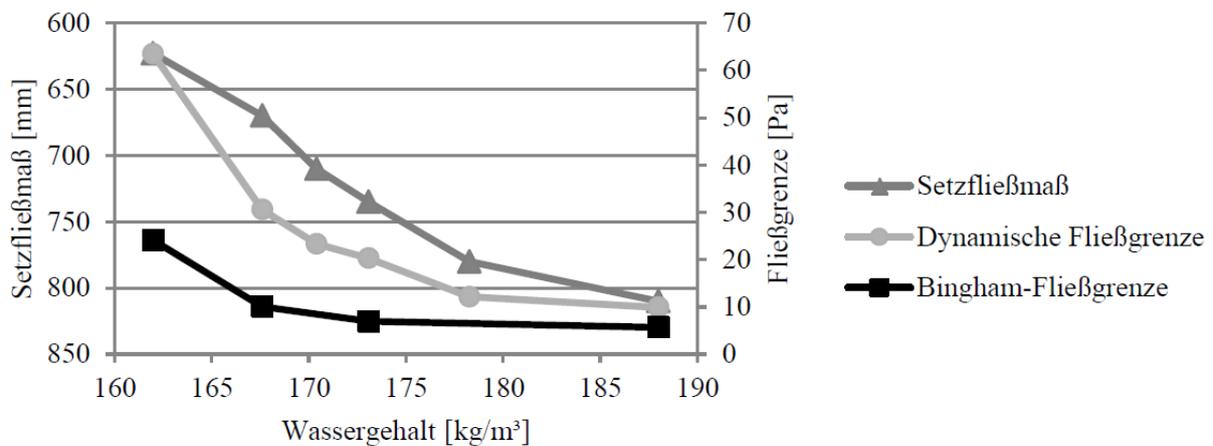


Abbildung 24: Die Ergebnisse zeigen, dass die dynamische Fließgrenze unterschiedliche Wassergehalte messtechnisch gut erfassen kann [24]

In der folgenden Abbildung 25 sind die Viskosität und die Trichterauslaufzeit einander gegenübergestellt.

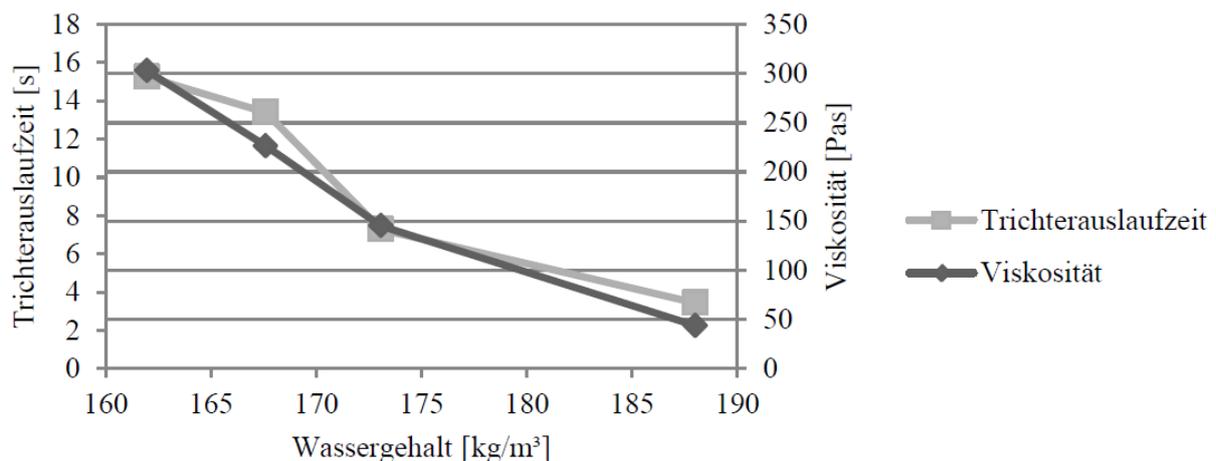


Abbildung 25: Die Bingham-Viskosität bildet unterschiedliche Wassergehalte analog zur Trichterauslaufzeit ab [24]

Die rheologischen Messwerte sind an Frischbetonproben nach dem Entleeren aus dem Betonmischer in einem externen Container mit dem e-BTV ermittelt worden.

*Fleischmann* folgerte, dass die dynamische Fließgrenze und die Bingham Viskosität aussagekräftige rheologische Kennwerte sind.

## 2.5 Rheologische Untersuchungen im Mischer mit einem langsam laufenden KMS

Um die einhergehenden Fragestellungen und Herausforderungen dieser Arbeit lösen zu können, ist es erforderlich, die Konsistenz des SVB im Mischer direkt nach dem Mischprozess möglichst genau zu erfassen.

Die grundsätzliche Umsetzbarkeit dieses Messprinzips und die mögliche Qualität der einhergehenden Erfassung von SVB Frischbetoneigenschaften im Mischer wurden im Rahmen der Masterarbeit von *Mirwald / Paric* untersucht und diskutiert [72].

### ➤ Kugelmesssystem RheoCT im Mischer

Für diesen Zweck wurde für einen Prototyp mit der Bezeichnung RheoCT eine spezielle Unterkonstruktion für die schräg angeordnete Mischertrommel eines Eirich Intensivmischers geschaffen. Mit dieser Mimik wird das Rheometer vertikal in den Mischer und in den Frischbeton eingesetzt. Diese Position ermöglicht eine exakt horizontale, kreisförmige Scherbewegung. Somit sind fehlerhafte bzw. vertikale Einflüsse aus der Schwerkraft ausgeschlossen. Aufbauend auf den Erfahrungen und Ergebnissen von *Tyrach* und *Fleischmann* wurde eine Kugel als Scherkörper verwendet (Durchmesser 90 mm).

Das Rheometer drehte die Kugel auf einer Kreisbahn mit Radius 109 mm, mit einem speziellen Messprogramm durch den Frischbeton. Die aktuelle Geschwindigkeit und die Widerstandskraft auf die Kugel wurden erfasst. Die Widerstandskraft wird indirekt als Biegemoment zwischen Einspannung der Kugel und der Scherfläche gemessen. Die Einheit ist gerätespezifisch, deshalb Kraft mal Hebelarm, also N\*mm. Die folgende Abbildung 26 zeigt das Rheometer bzw. die Versuchsanordnung.

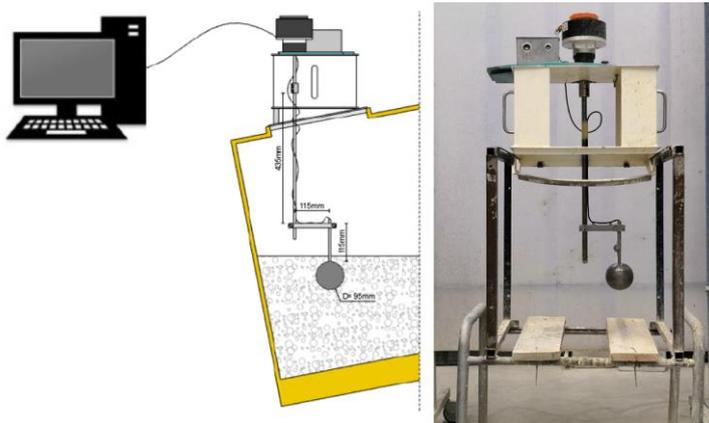


Abbildung 26: Schematische Darstellung (links) und Abbildung des RheoCT mit Konsole für einen Intensivmischer (Hersteller Eirich) im Labor (rechts)

Die Kugel ist nach dem Einsetzen des Rheometers in den Mischer 1 cm vom Beton überdeckt.

➤ Neue gekürzte Messprofile

Für rheologische Untersuchungen im Labormischer ist infolge des geringen Gesamtvolumens von 70 l keine vollständige 360° Umdrehung möglich. Die Abbildung 27 zeigt die räumliche Begrenzung im Eirich-Labormischer.



Abbildung 27: Die Messkugel bzw. der Scherkörper befindet sich in der Startposition. Die Messung erfolgt von oben gesehen in einer 140° Linksdrehung

Um trotzdem alle essenziellen rheologischen Parameter ermitteln und diskutieren zu können und gleichzeitig den Messvorgang kurz zu halten, wurden gekürzte Messprofile entwickelt und getestet. In der folgenden Abbildung 28 sind die getesteten Messprofile grafisch dargestellt. Diese sollten während einer 140° Umdrehung, je nach Schergeschwindigkeit in 16 bis 62 Sekunden, alle relevanten Kennwerte ermitteln.

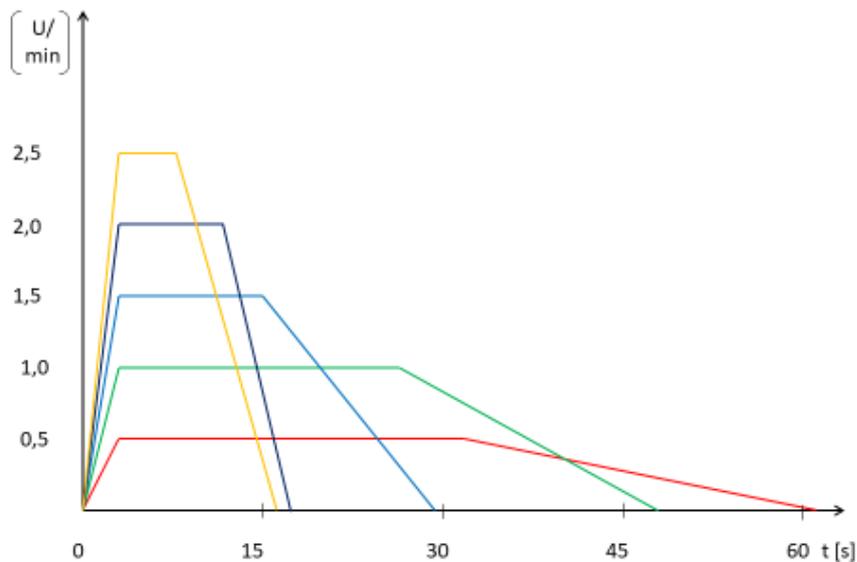


Abbildung 28: Getestete Scherprofile in der Arbeit Mirwald / Paric [72]

In mehreren Versuchsreihen wurde versucht, nachträglich gezielte Änderungen in der Konsistenz einer SVB-Rezeptur hervorzurufen. Im Anschluss wurde überprüft, ob diese Änderungen mit dem RheoCT und dem gewählten Profil nachweisbar sind. Diese nachträglichen Änderungen wurden mit zum Teil sehr geringen Mengen Wasser ( $1 \text{ l/m}^3$ ) und geringen Mengen an Zusatzmitteln (zum Teil unter der Mindestzugabemenge) bewirkt. Es konnte gezeigt werden, dass mit den Messprofilen im Bereich 1 und 2 U/min Änderungen der Konsistenz plausibel darstellbar sind und verwertbare Ergebnisse erzielt werden können.

## 2.6 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Der völlige Wegfall von jeglichen Verdichtungsarbeiten ist das Merkmal des Selbstverdichtenden Betons. Die Verdichtungsarbeit zu umgehen, war letztlich der Hauptgrund für die Entwicklung dieses Hochleistungsbetons. Unsachgemäß durchgeführte Verdichtungsarbeit kann die Funktionalität und Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken und Bauteilen negativ beeinflussen. Aus der Arbeit von *Sarmiento* und der Diskussion zum Thema Rüttelenergie geht hervor, dass es auch bei fachgerecht ausgeführter Verdichtungsarbeit im direkten Einflussbereich von Rüttlern und darüber hinaus zu Inhomogenität des Betons kommt. Dies wirkt sich erwiesenermaßen nachteilig auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit aus [37].

Die Frischbetoneigenschaften bilden die Schlüsselfunktionen des SVB ab. Die Konsistenz von Selbstverdichtendem Frischbeton muss eine sehr hohe Verformungsfähigkeit aufweisen. Der Beton muss in der Lage sein, entmischungsfrei durch hohe Bewehrungsgrade bis in die letzten Ecken einer Schalung zu fließen, was durch eine hohe dynamische Stabilität gewährleistet wird. Der SVB muss nach dem Einbau seine Homogenität beibehalten, dies wird durch eine hohe statische Stabilität bewerkstelligt. Zugleich muss die Konsistenz eine Entlüftung gewährleisten, welche einem vollständig verdichteten Rüttelbeton entspricht.

Diesen Anforderungskatalog zu erfüllen kann schwierig sein, da Selbstverdichtender Beton sehr sensibel auf Änderungen in der Mischungszusammensetzung reagiert.

Durch die Verarbeitung von natürlichen Ausgangsstoffen (z. B. Gesteinskörnung) fließen auch natürlich vorkommende Schwankungen in den Produktionsprozess mit ein.

Selbst geringe Veränderungen der designierten Zusammensetzung können zu Abweichungen in der Konsistenz oder sogar zum Verlust der designierten Frischbetoneigenschaften führen. Tatsache ist, dass sich Änderungen der Zusammensetzung aus der natürlichen Schwankungsbreite der Ausgangsstoffe ergeben können, vgl. *Breitenbücher* [8], Abbildung 4. Im Weiteren können Abweichungen im Rahmen der Einwiegetoleranzen entstehen, vgl. *Huß* [22] und [62]. Bei grenzwertigem bzw. zu geringem Leimvolumen können diese Toleranzen zu Störungen der selbstverdichtenden Eigenschaften führen.

Die Hauptproblematik ist jedoch der wirksame Wassergehalt, vgl. *Lowke* [14]. Abweichungen von wenigen Litern Wasser pro m<sup>3</sup> können demnach bereits zu Stagnation oder Sedimentation führen. Dabei können schon die Toleranzen im Rahmen der möglichen Genauigkeiten der Sandmesssonden von ein bis zwei Prozent zu Ausschussmischungen führen. Die fortlaufende manuelle Ermittlung der Feuchte der groben Gesteinskörnung stellt eine zusätzliche Herausforderung und mögliche Fehlerquelle dar.

Unerwünschte Variationen der Konsistenz können auch durch äußere Einflüsse wie Schwankungen der Temperatur und ungünstigen Zeitfaktoren auftreten.

Daher müssen die Entwickler von SVB die Robustheit berücksichtigen und diese nachgewiesenermaßen möglichst hoch einstellen. Eine SVB-Rezeptur muss so zusammengesetzt sein, dass bei geringen Abweichungen von der Soll-Zusammensetzung die Verarbeitungseigenschaften nicht wesentlich beeinflusst werden.

In der Praxis der Betonproduktion können sich aber mehrere der oben genannten Einflussfaktoren gleichzeitig ändern. Vor diesem Hintergrund können auch sehr robust eingestellte SVB-Rezepturen keine baupraktische Lösung anbieten.

Am Markt sind gegenwärtig viele rheologische Messsysteme präsent, die sich grundsätzlich in schnell laufenden Rotationsrheometern und langsam prüfenden Kugelrheometern unterscheiden lassen. Alle Betonrheometer sind Relativmesssysteme, somit werden immer Relativwerte erfasst. Aus der Literaturstudie von *Fleischmann* z.B. geht hervor, dass Bestrebungen, Relativwerte verschiedener Messsysteme in absolute und somit vergleichbare rheologische Kennwerte umzurechnen, keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert haben [24].

In der Baustoffrheologie wird vielfach das Bingham-Modell verwendet, um eine Fließgrenze und die Viskosität zu bestimmen. Führende Experten auf dem Gebiet der Rheologie weisen jedoch explizit darauf hin, dass die Bestimmung der Fließgrenze nach dem Bingham-Modell relativ ungenau ist, vgl. *Mezger* [50]. Im Weiteren weist *Mezger* auch darauf hin, dass die Bingham-Viskosität  $\eta_B$  kein Viskositätswert der untersuchten Probe ist. Demnach ist dieser Wert letztlich nur ein berechneter Koeffizient zur Kurvenanpassung. Daher empfiehlt er die Verwendung des Begriffs „Bingham-Fließkoeffizient“. Da sich der Begriff „Viskosität“ nach dem Bingham Modell etabliert hat, wird dieser in vorliegender Arbeit auch weiterverwendet.

In zahlreichen Publikationen, den einschlägigen Normen und Richtlinien, wird die Konsistenz von SVB über zwei Kennwerte definiert. Nach der SVB-Richtlinie des Deutschen Ausschuss

für Stahlbeton bzw. dem Stand der Technik liefern diese zwei Kennwerte zwei rheologische Ersatzverfahren, nämlich das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit. Dabei ist das Setzfließmaß ein Indikator für die Fließgrenze und die Trichterauslaufzeit ein Maß für die Viskosität [9]. Sie können die komplexen rheologischen Zusammenhänge näherungsweise grob erfassen. Für die Qualitätskontrolle der laufenden Produktion sind diese Versuche jedoch zu zeitintensiv.

Es ist aber auch bekannt, dass die Fließgrenze von gut eingestelltem SVB nahe null liegt. Einige Quellen charakterisieren fließfähige Leime oder SVB deshalb näherungsweise als Newtonsche Flüssigkeit, vgl. [37, 39, 73]. Diese Betrachtung bzw. dieser Ansatz erlaubt somit die rheologische Erfassung und Beschreibung der Verarbeitbarkeit mit nur einem Parameter.

Die eindeutige Festlegung auf ein rheologisches Modell ist schwierig. Derzeit gibt es kein allgemeingültiges rheologisches Maß für die Konsistenz von SVB. Diese kann je nach Rezeptur bzw. Verwendung unterschiedlich sein, vgl. Setzfließ- und Viskositätsklassen nach EN 206, Pkt. 2.2.3.

Abschließend ist festzustellen, dass es für die zeitnahe, genaue und schnelle Erfassung der Konsistenz von SVB während der Produktion derzeit keine etablierten Systeme, Instrumente oder Verfahren gibt. In der Praxis der Herstellung von Hochleistungsbetonen wäre dies aber erforderlich, um Abweichungen schon während der Produktion genau erfassen zu können. Mit funktionierenden, rheologischen Messsystemen könnte die Qualität der Produktion gesteigert, der Ausschussanteil vermindert und die Anwendung von SVB erleichtert werden.. Das nicht Vorhandensein von geeigneten Prüfsystemen dürfte der wesentliche Grund sein, warum SVB im deutschsprachigen Raum zu selten zum Einsatz kommt.

## 3 Eigene Untersuchungen und Entwicklungen

### 3.1 Konzept, Rezepte, Verarbeitung

#### 3.1.1 Konzept

Die Grundlage für eine zielgerichtete Korrektur der Konsistenz von SVB ist eine differenzierte und sichere rheologische Erfassung seiner variierenden Verarbeitungseigenschaften. Die Erfassung der Konsistenz im Betonmischer ist das erste Kernthema dieser Arbeit. Gemessen wurde mit einem Kugelmesssystem und niedriger Schergeschwindigkeit. In einer kurzen Mischpause unmittelbar nach dem Hauptmischgang, vor dem Entleeren des Frischbetons, wurden die rheologischen Kennwerte Viskosität, Bingham Fließgrenze und dynamische Fließgrenze ermittelt. Die Analysen der unter definierten Randbedingungen gewonnenen rheologischen Kennwerte lieferten wichtige Informationen zu möglichen Genauigkeiten und der Reproduzierbarkeit von Messergebnissen. Mittels Vergleichen der rheologischen Kennwerte mit den Ergebnissen des kombinierten Auslaufkegels nach *Kordts* und *Breit* [67], wurden die Funktionalität der rheologischen Untersuchungen und die Qualität der Messdaten verifiziert.

Eine systematische Erfassung der Verarbeitbarkeit bei unterschiedlichen Wasser- und Zusatzmittelgehalten der jeweiligen Rezeptur lieferte weitere wichtige Daten. Die einzelnen Messergebnisse für dynamische Fließgrenze und Viskosität bilden aneinandergereiht Kennlinien für den Wasseranspruch bzw. zusätzlichen Zusatzmittelgehalt. Zusammengenommen bilden die gewonnenen und gespeicherten Kennlinien für die jeweilige Rezeptur eine Art von Wissensdatenbank. Die angestrebten Verarbeitungseigenschaften wurden über eine Kennlinie für Wasseranspruch bei einem festgelegten  $w/z$ -Wert definiert. Bereiche, in denen ein Beton zum Stagnieren oder Sedimentieren neigt, sind ebenfalls durch Zahlenwerte in diesen Kennlinien hinterlegt.

Das zweite Kernthema dieser Arbeit ist die Erstellung einer automatisierten Korrekturanweisung bei abweichenden Frischbetoneigenschaften. Ein neu entwickelter Algorithmus vergleicht die Konsistenz einer aktuellen Mischung mit den in der Wissensdatenbank hinterlegten Werten der entsprechenden Rezeptur. Bei Abweichungen von der angestrebten Konsistenz wird die Art und Menge einer erforderlichen Komponente berechnet, um die angestrebten Frischbetoneigenschaften einzustellen. Dabei wird auch nachgewiesen, dass die Konsistenz von SVB mit einem rheologischen Parameter genau genug erfasst, beschrieben und angesteuert werden kann.

#### 3.1.2 Verwendete Betonrezepturen und Ausgangsstoffe

Vorliegende Untersuchungen wurden mit vier unterschiedlichen Sichtbeton SVB-Rezepturen aus der Praxis der Fertigteilindustrie durchgeführt.

Die Rezepturen und Serienbezeichnungen sind in Tabelle 6 gelistet. Bei allen Rezepturen handelt es sich um Sechs- oder Siebenstoffsysteme. Die Gesteinskörnungen der Rezeptur 1 und 2 bestehen aus Donausand- und Kies. Bei der Rezeptur 3 wurden Marmorbrechsand und Marmorsplitt als Gesteinskörnung verwendet. Rezeptur 4 enthält Brechsand und gewaschenen Quarzkies.

Tabelle 6: Vier unterschiedliche SVB-Rezepturen, die für vorliegende Forschungsarbeiten verwendet wurden. Es wurde kein Luftporenbeton eingesetzt. Der Luftgehalt der verschiedenen Rezepturen variierte zwischen 0,5 und 1,5 %

Rezepturen	Weißzement	Wasser	w/z-Wert	Zusatzstoff 1	Zusatzstoff 2	Zusatzmittel 1	Zusatzmittel 2	Sand	Kies	Kies
	CEM II/A-LL 52,5 N kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	-	KSM kg/m <sup>3</sup>	Farbe Weiß M% v. Z.	FM M% v. Z.	Entlüfter M% v. Z.	0/4 kg/m <sup>3</sup>	4/8 kg/m <sup>3</sup>	8/16 kg/m <sup>3</sup>
<b>R 1</b>	350	172	0,49	220,5	2	1,60	-	767	240	591
<b>R 2</b>	350	172	0,49	220,5	7	2,10	0,4	761	238	586
<b>R 3 a/b</b>	Zement CEM II/A-LL 42,5 kg/m <sup>3</sup>	410	180,4	0,44	120	1,80	1,5	Brechsand 0/3 kg/m <sup>3</sup>	Marmor- splitt 1/3 kg/m <sup>3</sup>	Marmor- splitt 9/16 kg/m <sup>3</sup>
<b>R 4 a/b/c</b>	Zement CEM I 42,5 R kg/m <sup>3</sup>	520	187,5	0,36	240	2,00	0,20	Brechsand 0/2 kg/m <sup>3</sup>	Kies 2,5/5 kg/m <sup>3</sup>	835,86

Mit Rezeptur R3 fanden zwei Testserien statt, die aus unterschiedlichen Lieferchargen (Charge a/b) stammen. Die Rezeptur R4 wurde über den Untersuchungszeitraum dreimal aus verschiedenen Chargen (a/b/c) eingesetzt. Konkret bedeutet die Unterscheidung der einzelnen Lieferchargen, dass alle Bestandteile des Betons aus zeitlich weit auseinanderliegenden Lieferungen und somit aus unterschiedlichen Produktionszeiträumen herrühren. Variierende Verarbeitungseigenschaften aus den wechselnden Produktionsbedingungen konnten somit untersucht werden.

Die Sieblinien der einzelnen Rezepturen bzw. der entsprechenden Gesteinskörnungen sind im Anhang in den Abbildungen 84 bis 89 wiedergegeben.

➤ Probenvorbereitung und Herstellung

Im Labor wurden feucht angelieferte Gesteinskörnungen auch feucht verarbeitet. Nach Eingang einer Charge ist der Feuchtegehalt der einzelnen Gesteinsfraktionen im oberen, mittleren und unteren Drittel der Big Bags ermittelt worden. Der Feuchtegehalt unterschied sich z. B. beim Sand der Rezeptur 2 von oben nach unten um bis zu 3,9 % (siehe Anhang Tabelle 12). Dies zeigt die Problematik einer exakten Feuchte-Bestimmung der Gesteinskörnungen. Die Gesteinskörnungen wurden täglich für den darauffolgenden Versuchstag vorbereitet. Die Vorbereitung umfasste die Homogenisierung der einzelnen Kornfraktionen mit einem Einwellenmischer. Dieser Arbeitsschritt sollte eine gleichmäßige Feuchteverteilung bewirken und eine Entmischung der Feinteile aus Abfüllen und Transport so weit wie möglich ausschließen. Aus jeder homogenisierten Fraktion wurden drei Proben zur Feststellung des Feuchtegehaltes (nach DIN EN 1097-5) genommen. Die Feuchte der Gesteinskörnung fand bei der Berechnung des Zugabewassers Berücksichtigung. Vor der Probenherstellung wurden die feuchten Gesteinskörnungen erneut homogenisiert, da die Lagerung über Nacht zu einer inhomogenen Feuchteverteilung führt.

Das Beschicken des Mixers mit den Ausgangsstoffen erfolgte im ruhenden Zustand und gemäß der SVB-Richtlinie vom DAfStb Abs. 9.8 *Mischen des Betons* [9] stets in der gleichen Reihenfolge. Diese Mischanweisung war wie folgt:

1. Sand 20 kg
2. Zusatzstoff
3. Zement
4. Sand Rest
5. Zuschlag mittel
6. Zuschlag grob
7. Wasser 2/3
8. Wasser 1/3 mit Zusatzmitteln

Das Standard-Volumen aller hergestellten Mischungen betrug 40 l.

### 3.1.3 Verwendeter Betonmischer im Labor

Für die Herstellung von SVB im Labor kam ein Eirich-Intensivmischer mit 75 l Trommelvolumen und 20° Schrägstellung zum Einsatz.

Das eingesetzte Mischprogramm (siehe Punkt 4.1.2, Tabelle 7) wurde in mehreren Versuchen angepasst und optimiert, bzw. die Nassmischzeit variiert. Ziel dieser Anpassungen war es, einen vollständig dispergierten Frischbeton von jeder Rezeptur bzw. jeder Liefercharge herzustellen. Depoteffekte aus der Fließmittelwirkung mussten unterbunden werden.

## 3.2 Rheologische Untersuchungen im Mischer

In der vorliegenden Arbeit sind die wesentlichen Versuchsserien mit dem Scherprofil 1 U/min und einer Messkugel  $D = 90$  mm erfolgt. Mit dieser Konfiguration des Kugelmesssystems konnten in den abschließenden Arbeiten plausible und präzise Ergebnisse erzielt werden. Untersuchungen zu grundlegenden Fragestellungen wurden auch mit den Scherprofilen 1 oder 2 U/min und einer kleinen Messkugel  $D = 50$  mm bearbeitet.

Vor einer Messung wurde die Kugel des Rheometers (Scherkörper) mit einem nassen Schwamm benetzt und anschließend mit einem trockenen Papiertuch abgewischt, sodass zu jeder Messung ein leichter, gleichmäßiger Feuchtefilm auf dem Scherkörper vorhanden war. Die Messkugel wurde nach jeder Messung bzw. nach Herausnehmen des Rheometers aus dem Mischer mit einem Schwamm von Hand gereinigt. Verkrustungen, Zementschleier oder ein gesättigter Wasserfilm mit Wassertropfen an dem Scherkörper können die Messergebnisse verfälschen und sind konsequent vermieden worden.

#### ➤ Messprofil und rheologische Kennwerte

Das verwendete Messprofil generiert in einer 140° Drehbewegung alle relevanten rheologischen Kennwerte, hier dynamische Fließgrenze, Bingham Viskosität und Bingham Fließgrenze. Abbildung 29 zeigt das Messprofil 1 U/min und die rheologischen Parameter, die in den einzelnen Phasen ermittelt wurden. Der wesentliche Unterschied dieses Messprofils ist, dass der Aufwärtsast des Rampenprofils nicht verwendet wird. Die essenziellen rheologischen Parameter nach dem Bingham Modell werden grundsätzlich aus den Messdaten des Abwärtsastes ermittelt (Phase 2).

Somit ist das Messprofil eine gekürzte Kombination aus Stufen und Rampenprofil, wobei trotzdem alle rheologisch relevanten Parameter ermittelt werden. Diskussionen über Hysterese-Kurven können jedoch nicht geführt werden.

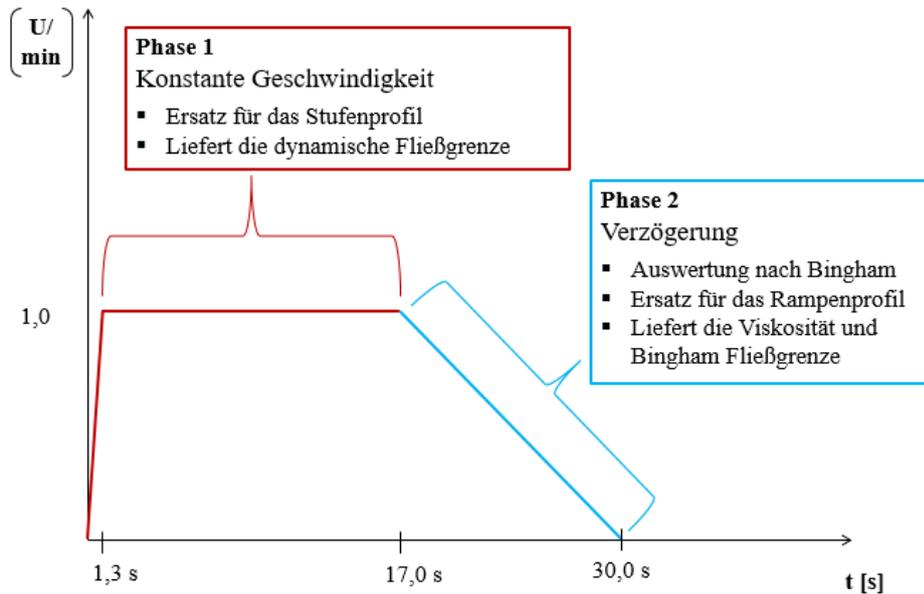


Abbildung 29: Messprofil mit 1 U/min für den Einsatz im Mischer

Eine U/min entspricht einer Schergeschwindigkeit von 1,204 cm/s bzw. 0,01204 m/s.

Die Auswertung bzw. die Ergebnisse einer Messung werden in Kapitel 4.2, Abb. 31 bis 33 diskutiert.

Der erste Teil der hier diskutierten Arbeiten wurde mit dem Messsystem RheoCT ausgeführt (s. Kap 2.5). Dieser Teil umfasst die Grundlagenuntersuchungen, Verifizierung des Messzeitpunktes und die Reproduzierbarkeit von rheologischen Kennwerten (siehe Kap. 4.3 Abb. 34 bis 38).

In den abschließenden Untersuchungen und Testserien (Kap. 4.4 und 4.6) kam ein modifiziertes Kuglrheometer (Abbildung 30) zum Einsatz. Vorteil dieses modifizierten Instrumentes ist eine schnellere Übertragung und Auswertung der Messdaten.

Der gesamte Vorgang vom Anhalten des Mixers bis zum Ergebnis (Erfassung der Konsistenz und Berechnung einer möglichen Korrekturmaßnahme) dauert 180 Sekunden.

Um eine Unterscheidung der Instrumente zu ermöglichen, wird das Rheometer aus Abbildung 30 als RheoCT2 bezeichnet.



Abbildung 30: Modifiziertes Kugelmesssystem (Betonrheometer) mit der Bezeichnung RheoCT2, Links: Werkzeinsatz in einem Planetenmischer

Das Messprinzip „Scheren des Frischbetons auf einer Kreisbahn“, das Messprofil und die Geometrie sind identisch wie beim RheoCT.

Beide Rheometer müssen vor dem Einsatz tariert werden. Dazu wird ein Nullsignal bei unbelastetem Scherkörper gemessen und damit eine Offsetkorrektur durchgeführt.

### 3.3 Ermittlung und Verifizierung aussagekräftiger rheologischer Kennwerte

Die Untersuchungen zur Erfassung der Verarbeitbarkeit / Konsistenz und das Verifizieren der Messergebnisse und des Messsystems erfolgten in mehreren Versuchsreihen. All diese Untersuchungen dienen dem Ziel, eine möglichst präzise und reproduzierbare Erfassung der Konsistenz zu erreichen und eine einwandfreie Funktionalität der rheologischen Untersuchung nachzuweisen.

#### ➤ Messzeitpunkt

Rheologische Messergebnisse von Frischbeton sind infolge chemisch/physikalischer Prozesse immer eine Momentaufnahme. Es musste daher ein geeigneter Zeitpunkt für die Messung definiert bzw. gewählt werden. Unmittelbar nach dem Mischvorgang bzw. nach Anhalten des Mixers entlüftet der Beton anfangs stark. Durch die Schrägstellung der Mischertrommel des Intensivmischer fließt der Beton bzw. nivelliert aus. Mögliche Einflüsse auf die Messergebnisse aus diesen physikalischen Prozessen waren auszuschließen. Im Weiteren haben chemische Reaktionen einen direkten Einfluss auf die Konsistenz.

Um eine kontrollierte bzw. verzögerte Hydratation zu gewährleisten, wird dem Zementklinker eine Menge von ca. 3-5 % Calciumsulfat (z. B. Gips) zugegeben. Diese Maßnahme verzögert den Hydratationsprozess und macht Beton erst über einen Zeitraum von bis zu 90 Minuten verarbeitbar. Eine gute Übersicht liefert der Zusammenhang zwischen Reaktionskinetik der Wärmeentwicklungsrate versus Zeitfaktor nach *Stark und Wicht* in [74], siehe Anhang Abbildung 90 und Tabelle 13. Für die hier diskutierte frühe Messung im Mischer sind die Anfangshydrolyse (Stadium 1) und die dormante Periode (Stadium 2) von Interesse. Diese 2 Phasen repräsentieren den Zeitraum, in dem der Frischbeton verarbeitet werden muss. Eine

zuverlässige Charakterisierung von Frischbetoneigenschaften musste direkt zu Beginn der dormanten Periode stattfinden.

Für vorliegende Untersuchungen wurde der Messzeitpunkt variiert. Die erste Prüfung erfolgte 30 Sekunden nach dem Mischprozess. Dieser Vorgang ist mit einer Steigerung von 10 s Schritten (auch 30, 60 und 120 s bei späteren Versuchsreihen) wiederholt worden. Jeder Messung folgte ein drei Sekunden langes Aufmischen, um nicht in einem bereits gescherten Bereich zu messen. Ziel war es, einen Messzeitpunkt zu definieren, der möglichst kurz nach dem Mischprozess nachweislich sichere Messdaten bzw. rheologische Kennwerte liefert.

- Vergleich der rheologischen Kennwerte mit den klassischen genormten Konsistenzprüfverfahren

Wie im Kapitel 2 dargestellt, werden zur Beurteilung der Konsistenz von SVB rheologische Ersatzverfahren eingesetzt. Daher werden hier die Ergebnisse dieser Prüfverfahren den entsprechenden rheologischen Kennwerten gegenübergestellt. In vorliegender Arbeit wurde der kombinierte Auslaufkegel verwendet. Daher wird das Kegelsetzfließmaß mit dem rheologischen Kennwert dynamische Fließgrenze verglichen und die Viskosität der Kegelauslaufzeit gegenübergestellt.

Zum Funktionsnachweis wurde dazu unmittelbar nach der Prüfung mit dem Rheometer Beton aus dem Mischer entnommen und die entsprechenden Versuche durchgeführt.

### 3.4 Systematische Erstellung von Wissensdatenbanken und Vergleiche der einzelnen rheologischen Parameter

#### 3.4.1 Allgemeines

In einer Wissensdatenbank wird das implizite Wissen (Erfahrungswissen) eines Fachmanns als explizites Wissen (dokumentiertes Wissen) gespeichert und allgemein zugänglich gemacht. Die Grundlage der systematisch erstellten Wissensdatenbank bilden Kennlinien für jede Betonrezeptur. Diese Kennlinien beschreiben mit den rheologischen Eingangsparametern dynamische Fließgrenze und Viskosität die Konsistenz des frischen Betons bei verschiedenen Wasser- und Zusatzmittelgehalten. Die Basis der Kennlinien sind einzelne Messpunkte, welche mit dem Rheometer nach dem Mischprozess im Mischer ermittelt werden.

Die Grundlage einer Wissensdatenbank für jede Rezeptur beinhaltet daher drei Kennlinien mit der dynamischen Fließgrenze  $g_D$  und drei Kennlinien mit der Viskosität  $h$ :

- Zwei Kennlinien für Wasseranspruch,  $g_D$  sowie  $h$  versus  $\Delta w/z$ -Wert
- Zwei Kennlinien  $g_D$  sowie  $h$  für zusätzliches Fließmittel
- Zwei Kennlinien  $g_D$  sowie  $h$  für zusätzlichen Stabilisierer

Die Kennlinien für den Wasseranspruch decken idealerweise einen Konsistenzbereich ab, der infolge von Schwankungen des Wassergehalts in der Praxis der SVB-Herstellung auftreten kann. Die Kennlinien für Fließmittel basieren auf einer Mischung mit Wassermangel. Diese Mischung wird durch nachträgliche Fließmittel-Zudosierung in einen guten Verarbeitungsbereich gebracht. Die Kennlinien für Stabilisierer basieren auf einer Mischung mit Wasser-

überschuss. Durch nachträgliche Zudosierung von Stabilisierer wird eine solche Mischung in eine gute Verarbeitbarkeit und stabile Konsistenz geführt. Die angestrebten Verarbeitungseigenschaften sind bei dem w/z-Wert definiert, bei dem die designierte Festigkeits- und Expositionsklasse der jeweiligen Rezeptur festgelegt sind.

Eine Prüfung des Frischbetons mit dem Messprofil aus Abbildung 29 liefert drei rheologische Kennwerte (Viskosität, Bingham Fließgrenze und dynamische Fließgrenze). *Fleischmann* identifizierte in seiner Arbeit die dynamische Fließgrenze und die Bingham Viskosität als aussagekräftige rheologische Kenngrößen [24]. Diese Aussage impliziert, dass die dynamische Fließgrenze bessere Ergebnisse liefert als die Bingham Fließgrenze. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Aussage nochmals aufgegriffen und die Diskussion darüber weiter vertieft. Zu diesem Zweck wurde in umfangreichen Untersuchungen die Bingham Fließgrenze der dynamischen Fließgrenze gegenübergestellt. Eine Gegenüberstellung der dynamischen Fließgrenze und der Viskosität erlaubt die Diskussion der maximal erreichbaren Präzision der unterschiedlichen rheologischen Parameter.

Ziel dieser Diskussion ist die Festlegung auf Parameter mit der bestmöglichen Differenzierung der untersuchten Konsistenzbereiche.

#### 3.4.2 Erstellung von Kennlinien für den Wasseranspruch

Der w/z-Wert, mit dem eine Rezeptur planmäßig hergestellt wird, ist über die baupraktischen Anforderungen vorgegeben. Bei diesem w/z-Wert bzw. wirksamen Wassergehalt ist die angestrebte Konsistenz festgelegt und die erforderliche Festigkeitsklasse und Expositionsklasse erfüllt. Der wirksame Wassergehalt der Kennlinie für Wasseranspruch wird über den w/z-Wert definiert. Grundsätzlich ist der massenbezogene w/z-Wert aber keine explizite Kenngröße für die Konsistenz oder Verarbeitbarkeit. Der volumenbezogene Wasser/Pulver-Wert ist aus rheologischer Sicht für die Verarbeitungseigenschaften aussagekräftiger, da er die ausreichende Benetzung von Oberflächen kleiner und kleinster Körnung berücksichtigt. Die zahlenmäßige Beschreibung der Verarbeitbarkeit über dem Wasser-Pulver-Wert würde jedoch implizieren, dass der Pulveranteil immer exakt erfasst und bestimmt ist. Dies ist jedoch nicht der Fall. Aus den Diskussionen in Kapitel 2 geht hervor, dass eine natürliche Schwankungsbreite in den Ausgangsstoffen existiert. In vorliegenden Untersuchungen wird die variierende Wassermenge bei der designierten Zementmenge untersucht. Die unterschiedliche Zusammensetzung ist über den w/z-Wert ausgedrückt. Dieses Vorgehen spiegelt die Hauptproblematik in der Praxis wider. Es ist bekannt, dass abweichende Verarbeitungseigenschaften hauptsächlich infolge ungenauer Feuchtebestimmung der einzelnen Gesteinsfraktionen entstehen. Die Definition und Vorgabe des w/z-Wertes ist in den Normen der Betontechnologie eine zentrale Kenngröße, um Festigkeit und Dauerhaftigkeit zu garantieren. Aus diesem Grund sind in der Literatur auch viele rheologische Untersuchungen über variierende w/z-Werte dargestellt, siehe z. B. bei *Brameshuber* [1]. Für die prinzipiellen Erkenntnisse aus dieser Fragestellung spielt die Festlegung als w/z-Wert, Wassergehalt oder W/P-Wert keine Rolle. Bei weiteren Einsätzen sollte man aber immer die am besten zutreffende Steuergröße auswählen.

Der Aufbau einer Kennlinie für den Wasseranspruch erfolgte hier über die Herstellung von mindestens fünf Mischungen mit unterschiedlichen w/z-Werten. Die einzelnen Werte liegen gleichmäßig um den Idealwert verteilt. Als Inkrement wurde  $\Delta 0,01$  w/z festgelegt.

Die unmittelbar nach dem Mischvorgang gemessenen rheologischen Parameter dynamische Fließgrenze und Viskosität geben jeweils einen Punkt einer Kennlinie. Mit diesen zwei Parametern aus mindestens fünf Versuchen werden zwei Kennlinien erzeugt: dynamische Fließgrenze und Viskosität versus w/z-Wert.

Die angestrebte Konsistenz wird bei dem designierten w/z-Wert ermittelt. Dieser Wert dient später bei der Aussteuerungsberechnung als Zielwert. Prinzipiell sind für eine Aussteuerung mit Wasser Werte über dem angestrebten w/z-Wert bzw. niedrigeren rheologischen Parametern nicht notwendig. Jedoch liefern diese Punkte eine gute Plausibilitätskontrolle für den Verlauf einer Kennlinie. Ein weiterer Grund, diese Punkte messtechnisch zu erfassen und die entsprechenden Versuche durchzuführen, ist, dass die Aussteuerungsberechnung bei einer zu weichen Konsistenz den Wasserüberschuss angeben kann.

Des Weiteren kann ein Zielwert nach oben als auch unten angepasst werden. Dies erweist sich bei der Übertragung der Laborergebnisse (Wissensdatenbank) in die Praxis möglicherweise als notwendig. Auch kann die Auswertung einer Prüfung der Sedimentationsstabilität am Festbeton nach der SVB-Richtlinie des DAfStb Anhang N1 die zahlenmäßige Anpassung des angestrebten Zielwertes erforderlich machen [9].

#### ➤ Erstellung von Kennlinien mit Zusatzmitteln

Die Dosiereinrichtungen für Betonzusatzmittel in den Mischanlagen werden regelmäßig überprüft und müssen die vorgegebene Menge an Zusatzmittel exakt dosieren. Für die Generierung der Zusatzmittel-Kennlinien wurde daher vereinfacht je eine Mischung hergestellt.

### 3.4.3 Kennlinie für Fließmittel

Eine Kennlinie für zusätzliches Fließmittel ermöglicht die Korrektur einer zu steifen Konsistenz über die nachträgliche Zudosierung von Fließmittel. Dieser Ansatz stellt eine Alternative zur Aussteuerung mit Wasser dar.

Eine Messreihe zur Erstellung einer Kennlinie für den zusätzlichen Fließmittelgehalt startet gegenüber dem Idealwert mit einer zu steifen Konsistenz (simuliert Wassermangel bzw. Stagnation). In der Regel wurde ein solcher Wassermangel durch die Reduzierung des w/z-Wertes um  $-0,02$  bis  $-0,03$  w/z erzeugt. Eine solche Abweichung im w/z-Wert erzeugt bei einem Zementgehalt von  $350 \text{ kg/m}^3$  ein Defizit von  $7$  bis  $10,5 \text{ l/m}^3$  im wirksamen Wassergehalt. Das stellt eine realistische Schwankungsbreite des wirksamen Wassergehalts dar und kann erhebliche Probleme in der Verarbeitbarkeit und eine mangelhafte Oberflächenqualität verursachen. Diese Mischung, die bereits zum Stagnieren neigt, wird mit schrittweiser Zudosierung von FM in eine weichere Konsistenz überführt. Nach jeder Zugabe einer genau definierten Menge an Fließmittel wird dieses für  $60 \text{ s}$  untergemischt und anschließend die Konsistenz mit dem Rheometer erfasst. Die einzelnen Messpunkte bilden dann aneinandergereiht eine Kennlinie in Abhängigkeit der zusätzlichen Fließmittelmenge.

Die Kennlinie für Fließmittel wird in der Wissensdatenbank über den zusätzlichen Fließmittelgehalt in Masseprozent vom Zement angegeben und startet demzufolge bei einem Gehalt von 0 M. % v. Z. Dabei ist der Grundgehalt der standardmäßigen Fließmittelmenge in der Mischung enthalten. Alle Messergebnisse kleiner einem Idealwert dienen lediglich der Plausibilitätskontrolle des Kurvenverlaufs und zeigen den Sättigungsbereich auf.

#### 3.4.4 Kennlinie für Stabilisierer

Eine Messreihe zum Generieren einer Kennlinie für Stabilisierer (ST) gestaltet sich prinzipiell analog zu der des Fließmittels. Dazu wird jedoch mit einer zu weichen Konsistenz begonnen. Ein genau definierter Wasserüberschuss wird über eine Erhöhung des w/z-Wertes über den planmäßigen Wert hinaus erzeugt. Je nach Rezeptur ist das eine Erhöhung um +0,02 bis +0,03 w/z.

Bei den verwendeten SVB-Rezepturen handelt es sich ausschließlich um Mehlkorntypen. Diese Rezepturen beinhalten standardmäßig keinen Stabilisierer. Es soll aber gezeigt werden, dass mit geeigneten ST-Produkten die Korrektur einer zu flüssigen Konsistenz auch bei Mehlkorntypen möglich ist. Es wurden unterschiedliche flüssig Produkte verschiedener Hersteller untersucht.

Verwendung fanden Stabilisierer, die vom gleichen Hersteller der eingesetzten Fließmittel stammten. Es konnte jedoch nicht bei allen eingesetzten Stabilisierern eine physikalisch messbare Wirksamkeit festgestellt werden. Daher kam zu Vergleichszwecken auch das Produkt einer Firma zum Einsatz, von der bei keiner Rezeptur das Fließmittel verwendet wurde. Dieser Stabilisierer zeigte sich in allen Versuchsreihen und bei jeder Rezeptur als effektiv und wirkungsvoll. Vor diesem Hintergrund sind mit diesem Stabilisierer auch die abschließenden Untersuchungen und Tests durchgeführt worden.

### 3.5 Versuche zur Korrektur suboptimaler Frischbetoneigenschaften

Für Tests zur möglichen Korrektur der Konsistenz ist immer Beton mit abweichenden Eigenschaften der Ausgangspunkt. Die jeweilige Mischung wird entweder zu steif hergestellt (Wassermangel) und neigt zum Stagnieren, oder eine Mischung wird zu flüssig hergestellt (Wasserüberschuss) und neigt zum Sedimentieren. Die Funktionalität des neuen Systems bzw. der Aussteuerung wird über die Zugabe der selbstständig berechneten Art und Menge einer Komponente (Wasser, Fließmittel oder Stabilisierer) nachgewiesen. In Kap. 4.6 werden Untersuchungen zur Aussteuerung mit Wasser, Fließmittel und Stabilisierer diskutiert. Eingangswerte kommen aus rheologischen Prüfungen an Mischungen mit abweichender Konsistenz. Durch die Zugabe und das Untermischen der berechneten Art und Menge einer Komponente wird versucht, die Zielkonsistenz einzustellen. Über eine Kontrollmessung wird der Erfolg der Maßnahmen bewertet.

### 3.6 Untersuchungen zu Verarbeitbarkeit über die Zeit, Thixotropie versus Liegezeit und Temperatur

Die Konsistenz bzw. die Verarbeitbarkeit wird generell von der Zeit nach der Wasserzugabe beeinflusst. Für eine reibungslose Verarbeitung muss die Konsistenz jedoch über eine gewisse Zeit konstant bleiben. Diese Zeit wird in der SVB-Richtlinie des DAfStb als Verarbeitbarkeitszeit  $t_{VB}$  bezeichnet.

Demnach darf die Verarbeitbarkeitszeit bei der Fertigteilherstellung 20 Minuten und bei Transportbeton ab Anlieferung auf der Baustelle 45 Minuten nicht unterschreiten [9].

Bei ruhendem Frischbeton kann ein Ansteifen infolge Thixotropie die Verarbeitbarkeit heruntersetzen. Je nach Zusammensetzung der Rezeptur, vor allem bei einer ungünstigen Kombination von Bindemittel und PCE, kann ein frischer SVB unter Umständen in kurzer Zeit seine Verarbeitbarkeit auch nahezu vollständig einbüßen.

#### ➤ Verarbeitbarkeit über die Zeit

Zur Beurteilung der Konsistenz über die Zeit wird eine Mischung über mindestens 30 Minuten mehrmals im Mischer geprüft. Nach jeder Messung wird der Beton für drei Sekunden aufgemischt. Dadurch ist gewährleistet, dass immer im ungescherten Material gemessen wird. Diese Versuchsführung simuliert beispielsweise den Transport in einem Fahrmischer oder einem Betonkübel mit Rührwerk. Ein unerwünschtes, aber mögliches Rücksteifen des Betons kann so relativ einfach und plausibel nachgewiesen werden.

#### ➤ Liegezeit, Thixotropie versus Verarbeitbarkeit

Im Gegensatz zur Untersuchung über die Zeit wird zur Bewertung der thixotropen Effekte mit größer werdenden Zeitintervallen geprüft. Mit dieser Versuchsführung wird ermittelt, wie sich die Konsistenz während einer Ruhephase des Frischbetons entwickelt. Erstmals wird die Konsistenz unmittelbar nach der Herstellung bzw. nach einer Minute ermittelt. Für die nächste Prüfung wird für drei Sekunden aufgemischt, um wieder im ungescherten Material zu messen. Das Rheometer wird planmäßig 30 Sekunden nach dem Mischprozess eingesetzt, jedoch wird der Messvorgang erst nach drei Minuten ausgelöst. Weitere Messungen erfolgen dann nach fünf, zehn und fünfzehn Minuten. Die letzte Prüfung erfolgt erneut nach einer Minute. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen die Konsistenzveränderungen infolge einer länger werdenden Liegezeit und somit den Einfluss aus Thixotropie Effekten auf. Dieses Materialverhalten hat einen starken Einfluss auf die Verarbeitungs- bzw. Frischbetoneigenschaften.

#### ➤ Frischbetontemperatur

In einer Versuchsserie wurde eine Kennlinie für den Wasseranspruch mit gekühlten Ausgangsstoffen hergestellt. Die Frischbetontemperaturen der kühleren Mischungen waren 4 K unter dem Niveau der unter normalen Laborbedingungen hergestellten. Diese Versuchsreihe sollte mögliche Einflüsse auf die Konsistenz aus Temperaturschwankungen im Frischbeton aufzeigen.

## 4 Eigene Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Vorbereitende und begleitende Arbeiten

#### 4.1.1 Erkenntnisse aus Proben-Vorbereitung und Herstellung

Das Hauptthema dieser Arbeit ist die präzise Erfassung variierender Konsistenz (Verarbeitungseigenschaften) von SVB. Zentraler Punkt ist dabei die Erstellung von Kennlinien für den Wasseranspruch einer Rezeptur. Für die Erstellung der Kennlinien für Wasseranspruch wurde generell das Inkrement 0,01 w/z verwendet. Bei einem Zementgehalt von 350 kg/m<sup>3</sup>, wie z. B. in Rezeptur 1, ist das ein Unterschied im Wassergehalt von  $\Delta$  3,50 l/m<sup>3</sup>. Diese Rezeptur hat einen Sandanteil von 767 kg/m<sup>3</sup>. Eine Ungenauigkeit in der Bestimmung der Sandfeuchte von 0,5 % entspricht einer Schwankung des Wassergehaltes  $\pm$  von 3,83 l/m<sup>3</sup>. Diese Zahlen verdeutlichen, dass bei der Probenvorbereitung und Herstellung der Feuchtegehalt der Gesteinskörnung sehr genau ermittelt und berücksichtigt werden muss. Selbst geringe Ungenauigkeiten bei der Feuchteermittlung der einzelnen Gesteinsfraktionen führen bzw. führten zu unbrauchbaren Mischungen bzw. Ergebnissen.

Das Absetzen des Wassers bzw. der Feuchte in den Gesteinskörnungen machte eine Homogenisierung der einzelnen Gesteinsfraktionen (Sand und Kies) selbst nach Zwischenlagerung über Nacht unumgänglich. Erst das Homogenisieren erlaubte eine ausreichend genaue Bestimmung der Feuchte und die planmäßige Herstellung der angestrebten Konsistenz.

Diese Zusammenhänge und Erfahrungen verdeutlichen die erforderlichen Genauigkeiten bei der SVB-Herstellung. Letztlich sind es die Ungenauigkeiten in der Praxis der SVB-Produktion, die eine Aussteuerung erfordern, um fortlaufend gleichmäßige Verarbeitungseigenschaften zu erzielen.

#### 4.1.2 Labormischer und Mischprogramme

Der Mischprozess muss eine vollständig dispergierte Frischbetonkonsistenz erzeugen. Vollständig dispergiert bedeutet, dass das Haufwerk aus den Ausgangsstoffen ganz in einen homogenen und fließfähigen SVB übergegangen ist. Das Fließmittel muss seine Wirkung vollständig entfaltet haben. Dieser Prozessschritt wurde in mehreren Versuchsreihen angepasst. Diese Anpassungen wurden notwendig, um eine realistische Erfassung der Konsistenz von frischem SVB diskutieren zu können.

In den ersten Untersuchungen mit der Rezeptur **R4 aus Charge a** wurde eine **Nassmischzeit** von **90 s.** eingehalten. Diese Nassmischzeit ist deutlich geringer als die in Tabelle 7 angegebenen **210 s.** Durch visuelle Beurteilung konnte ein gutes Entlüftungsverhalten festgestellt werden. Im Verlauf der kompletten Testserie mit der Rezeptur R4a war der Beton vollständig dispergiert und homogen. Alle Proben zeigten beim Ermitteln des Setzfließmaßes die volle Transportfähigkeit der groben Gesteinskörnung bis an den Rand des Betonkuchens.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei derselben Rezeptur **R4 aus Charge b** (alle Ausgangsstoffe sechs Monate nach Charge a geliefert) die Nassmischzeit von 90 Sekunden nicht ausreichend war. Bei der Ermittlung eines geeigneten Messzeitpunktes wurde in den ersten Messungen eine

deutliche Nachverflüssigung festgestellt. Um diesem Materialverhalten vorzubeugen, wurde die Nassmischzeit von 90 auf **120 Sekunden** angehoben. In einer weiteren Untersuchung zur Ermittlung eines geeigneten Messzeitpunktes zeigte sich erneut eine Nachverflüssigung. Diese ist jedoch zeitverzögert aufgetreten. Daher wurde die Nassmischzeit weiter von 120 auf **150 Sekunden** erhöht. Diese Maßnahme bewirkte eine nahezu konstant bleibende dynamische Fließgrenze und Viskosität bei gleichbleibendem Messzeitpunkt. Daraus lässt sich auch ableiten, dass der Frischbeton vollständig dispergiert und somit in einem guten und verarbeitbaren Zustand war. In der entsprechenden Versuchsserie mit der Rezeptur R4b wurde die Nassmischzeit von 150 Sekunden weiterverwendet.

In den ersten Arbeiten mit der **Rezeptur R3a** zeigten sich im frisch hergestellten Beton Konglomerate (Klumpen der Ausgangsstoffe). Im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Rezepturen, bei denen Donausand/ -kies verwendet wurde, kam bei der Rezeptur 3 ausschließlich gebrochener Marmorsplitt als Gesteinskörnung zum Einsatz. Der höhere Mehlkorngehalt, die scharfkantige Form und raue Oberfläche der gebrochenen Gesteinskörnung erforderten eine von 150 auf **210 Sekunden** verlängerte Nassmischzeit. Das folgend dargestellte Mischprogramm in Tabelle 7 ist also das Ergebnis aus mehreren fortlaufenden Anpassungen, deren Notwendigkeit empirisch ermittelt wurde.

Das Mischprogramm in Tabelle 7 mit 210 Sekunden Nassmischzeit kam bei den Untersuchungen und Ergebnissen in den Kapiteln 4.4, 4.6 und 4.7 zum Einsatz.

*Tabelle 7: Eingesetztes Mischprogramm für den Labor-Intensiv-Mischer der vorliegenden Untersuchungen*

Mischabschnitte	Drehrichtung rechts U/min		Mischzeit s	Gesamtmischzeit s
	Wirbler	Trommel		
Trockenmischen	60	20	40	40
Wasserzugabe	120	20	90	130
Restwasser + FM	120	20	90	220
Nassmischen	120	20	210	430

Die hier gemachten Erfahrungen zur Thematik des Mischprozesses decken sich mit den Erkenntnissen der Autoren aus Kapitel 2, vgl. z. B. *Lowke et al.* [34], *Chopin et al.* [33]. Das bedeutet, dass für jede Betonrezeptur ein idealer Mischprozess existiert. Zu viel oder zu wenig Mischenergie oder Mischzeit haben einen negativen Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften. Im Gegensatz zu den Untersuchungsmethoden der oben genannten Autoren wird der Mischprozess hier nicht über die Leistungsaufnahme des Mixers evaluiert. In vorliegender Arbeit dienen die rheologischen Kennwerte des Frischbetons für die Bewertung des Mischprozesses.

Liefert der Mischprozess keinen vollständig dispergierten und homogenisierten SVB, der eine einwandfreie Verarbeitung garantiert, ist auch keine plausible Erfassung der Konsistenz möglich.

## 4.2 Rheologische Untersuchungen im Mischer

In der folgenden Abbildung 31 sind das Messprofil und das gemessene Widerstandsmoment einer rheologischen Prüfung in Form von Graphen dargestellt.

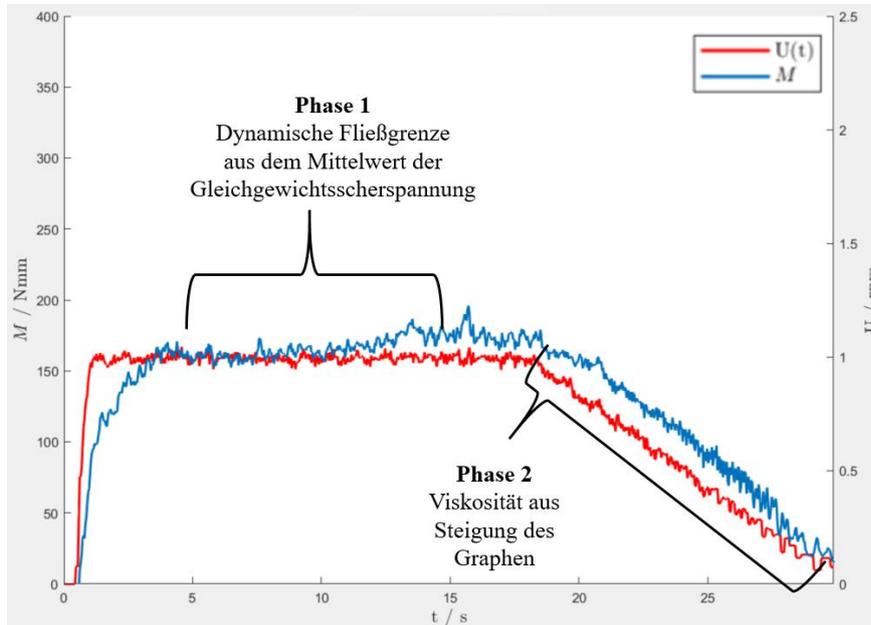


Abbildung 31: Geschwindigkeitsprofil (roter Graph) und Widerstandsmoment (blauer Graph) über die Zeit

Nach 1,3 Sekunden erreicht der Scherkörper seine Sollgeschwindigkeit (1,204 cm/s bzw. 0,01204 m/s). Anschließend wird der Beton für 17 Sekunden bei konstanter Geschwindigkeit geschert. Der Graph des Widerstandsmoments erreicht zeitverzögert nach ca. vier Sekunden ein gleichmäßiges Niveau.

Nach 18 Sekunden beginnt Phase 2. Der Scherkörper wird von 1 U/min konstant auf 0 U/min verzögert.

In Tabelle 8 sind die Eckdaten einer rheologischen Standardprüfung aus vorliegenden Untersuchungen zu sehen.

Tabelle 8: Auszug aus den Messpunkten einer Messung

Messpunkt Nr.	Zeit [s]	Drehzahl - soll [UpM]	Drehzahl - ist [UpM]	Winkel [°]	Moment [Nmm]
52	1,23244792	1	0,985977213	3,515625	97,79592691
53	1,26869792	1	1,013209246	3,8671875	98,21475315
515	18,0289063	1	0,96954898	103,7109375	170,9858123
516	18,0651476	0,999584807	0,986265342	103,8867188	168,0540286
839	29,808559	0,022150863	0,074156266	139,3945313	18,0095283
840	29,8448003	0,022150863	0,074156266	139,3945313	16,22951678
841	29,8810417	0,022150863	0,074156266	139,3945313	15,49657086

Ein Messvorgang dauert ca. 30 Sekunden. Der Scherkörper legt auf einer Kreisbahn (Radius 109 mm) die Strecke von 26,2 cm und einen Winkel von knapp 140° zurück. Während einer Messung werden je nach Abtastrate etwa 840 Messpunkte der jeweiligen Kenngröße aufgenommen. Die folgende Abbildung 32 zeigt die Auswertung bzw. Bestimmung der dynamischen Fließgrenze aus der gemessenen Gleichgewichtsscherspannung von Abbildung 31 und Tabelle 8.

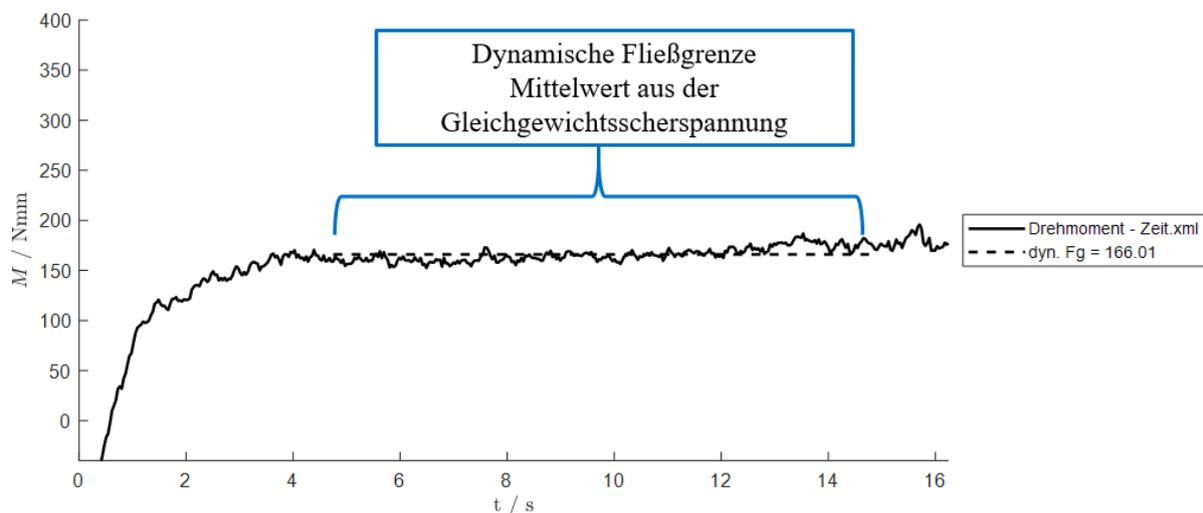


Abbildung 32: Bestimmung der dynamischen Fließgrenze aus dem Drehmoment-Zeit-Diagramm, erstellt mit Phase 1 des Geschwindigkeitsprofils

Die dynamische Fließgrenze wird aus dem Mittelwert des Widerstandsmoments zwischen fünf und 15 Sekunden des Scherprozesses berechnet, was über die gestrichelte Linie abgebildet ist. Die Spannweite der Werte liegt in diesem Bereich zwischen 152,45 Nmm (Minimum) und 186,90 Nmm (Maximum). Die Standardabweichung beträgt 6,97 Nmm.

Zwischen der 18ten und der 30ten Sekunde des Messvorgangs werden die Werte für die Auswertung der Phase 2 entnommen. Diese liefern als Ausgleichsgerade nach dem Bingham-Modell, die Viskosität (Steigung) und die Bingham Fließgrenze (Schnittpunkt mit Y-Achse).

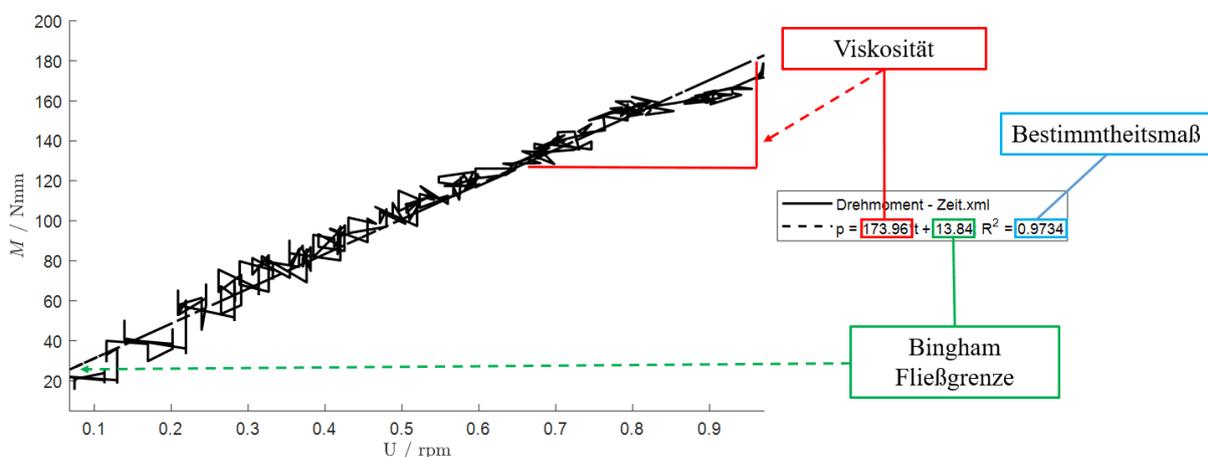


Abbildung 33: Fließkurve erstellt mit dem Bingham-Modell aus Phase 2 des Messprofils, die wesentliche Größe ist die Viskosität

Das Bestimmtheitsmaß des Graphen in Abbildung 33 ist mit 0,9734 nahe 1. Dies zeigt, dass das ermittelte Widerstandsmoment in Phase 2 der Messung eine ziemlich präzise Bestimmung der Viskosität durch die Geradengleichung nach dem Bingham-Modell erlaubt. In allen Versuchsserien konnten ähnlich gute Korrelationen nachgewiesen werden.

Im Folgenden werden die Abkürzungen  $g$  für die Fließgrenze und  $h$  für die Viskosität verwendet. Dabei werden im Kapitel 4.4 zur Unterscheidung die dynamische Fließgrenze mit  $g_D$  und die Bingham Fließgrenze mit  $g_B$  abgekürzt.

### 4.3 Ermittlung und Verifizierung aussagekräftiger rheologischer Messwerte

#### ➤ Einfluss der Mischzeit und Festlegung eines geeigneten Messzeitpunktes

In diesem Kapitel sind Untersuchungen von rheologischen Messwerten dargelegt. Ziel dieser Untersuchungen ist die Festlegung auf einen geeigneten Messzeitpunkt. Die Erfassung der Konsistenz sollte zeitnah nach dem Mischprozess erfolgen. Die ermittelten rheologischen Parameter sollten plausible und aussagekräftige Informationen liefern, die eine zuverlässige Beurteilung der Konsistenz erlauben. Zu diesem Zweck wurden mehrere Mischungen hergestellt und rheologisch geprüft. Die Konsistenz der jeweiligen Mischung wurden mit größer werdenden Zeitintervallen  $\Delta t$  mehrfach nach dem Mischprozess gemessen. Hierbei wurde prinzipiell angenommen, dass der Frischbeton seine Konsistenz über den Untersuchungszeitraum nicht verändert. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass sich der Frischbeton in der dormanten Periode befindet (siehe Anhang Abb. 90 und Tab. 13). Mögliche Einflüsse aus thixotropen Wirkmechanismen, Depoteffekten und des Zeitfaktors (Rücksteifen) sollten soweit wie möglich ausgeschlossen werden. Diese Untersuchungen wurden mit dem RheoCT durchgeführt. Die Diagramme in Abbildung 34/35 zeigen die Ergebnisse von Untersuchungen zweier Proben der Rezeptur 4 aus Charge a. In diesen Untersuchungen wurde das Profil 1 U/min und die kleine Kugel mit 50 mm Durchmesser verwendet. Diese zwei Versuche wurden am Anfang der Forschungsarbeiten durchgeführt. Die Nassmischzeit betrug zum Anfang der Untersuchungen generell 90 s, also deutlich weniger als die in Tabelle 7 angegebenen 210 s. Der Beton war bei der ersten Messung 30 s nach dem Hauptmischgang bereits vollständig ausnivelliert, was prinzipiell eine Messung der Konsistenz erlaubte.

Das Diagramm der folgenden Abbildung 34 zeigt die dynamische Fließgrenze von zwei untersuchten Proben bei verschiedenen Messzeitpunkten. Mit der primären horizontalen Achse ist die Zeit nach der Wasserzugabe aufgetragen, was das Alter des Frischbetons zum jeweiligen Messpunkt definiert. In der sekundären horizontalen Achse sind die größer werdenden Messzeitpunkte  $\Delta t$  aufgetragen. **Messzeitpunkt** bedeutet die Zeit zwischen dem Ende des Mischvorgangs oder Aufmischvorgangs und dem Start der Messung. Die erste Messung erfolgte 30 s nach dem Mischprozess. Für die nachfolgenden Messungen wurde der Beton jeweils für drei Sekunden aufgemischt. Unmittelbar nach dem Aufmischen wurde das Rheometer eingesetzt. Der Messvorgang ist dann bei der zweiten Messung erst nach 40 Sekunden ausgelöst worden. Die weiteren Messungen erfolgten nach dem gleichen Schema bei größer werdenden Zeitintervallen  $\Delta t$  nach dem Mischen.

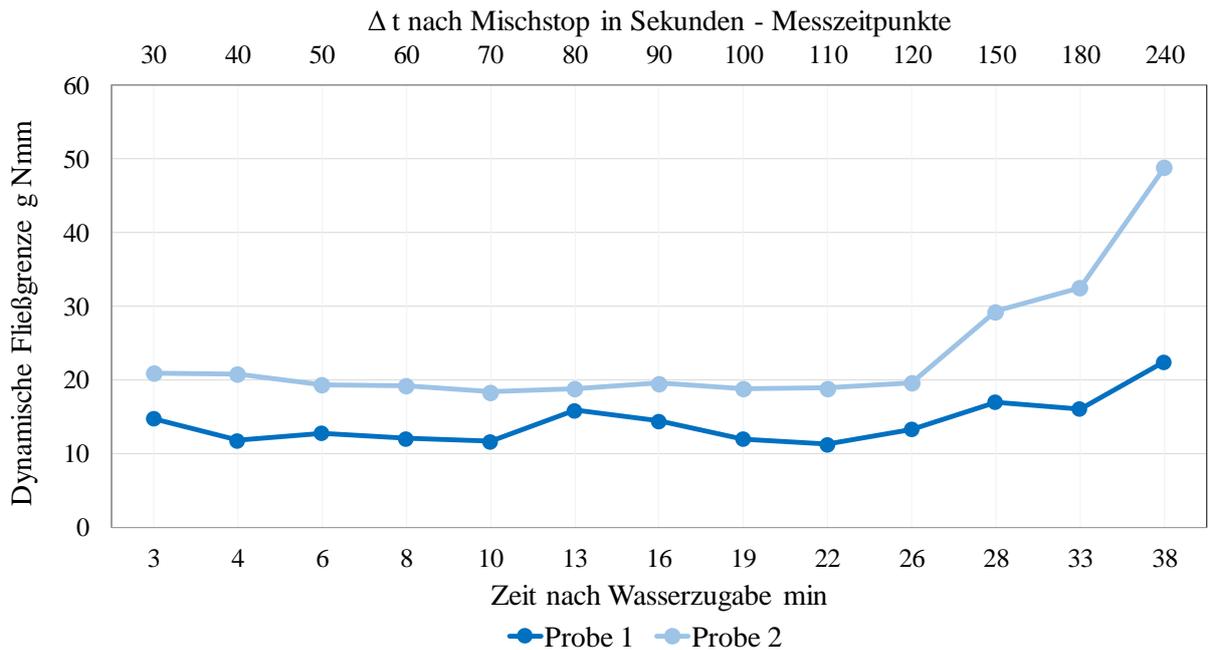


Abbildung 34: Dynamische Fließgrenze von zwei Betonproben zu verschiedenen Messzeitpunkten, Versuchsserie mit Rezeptur R4a, Nassmischzeit 90 s

Die größer werdenden Zeitintervalle nach dem Hauptmischgang bzw. nach dem jeweiligen Aufmischen liefern Informationen über die Konsistenz und erfassen mögliche zeitliche Einflüsse aus Thixotropieeffekten, Nachverflüssigung oder Rücksteifen.

In der folgenden Abbildung 35 sind die Kennwerte der Viskosität der beiden entsprechenden Versuche abgebildet. Die Kurvenverläufe sind nahezu identisch wie bei der dynamischen Fließgrenze in Abbildung 34.

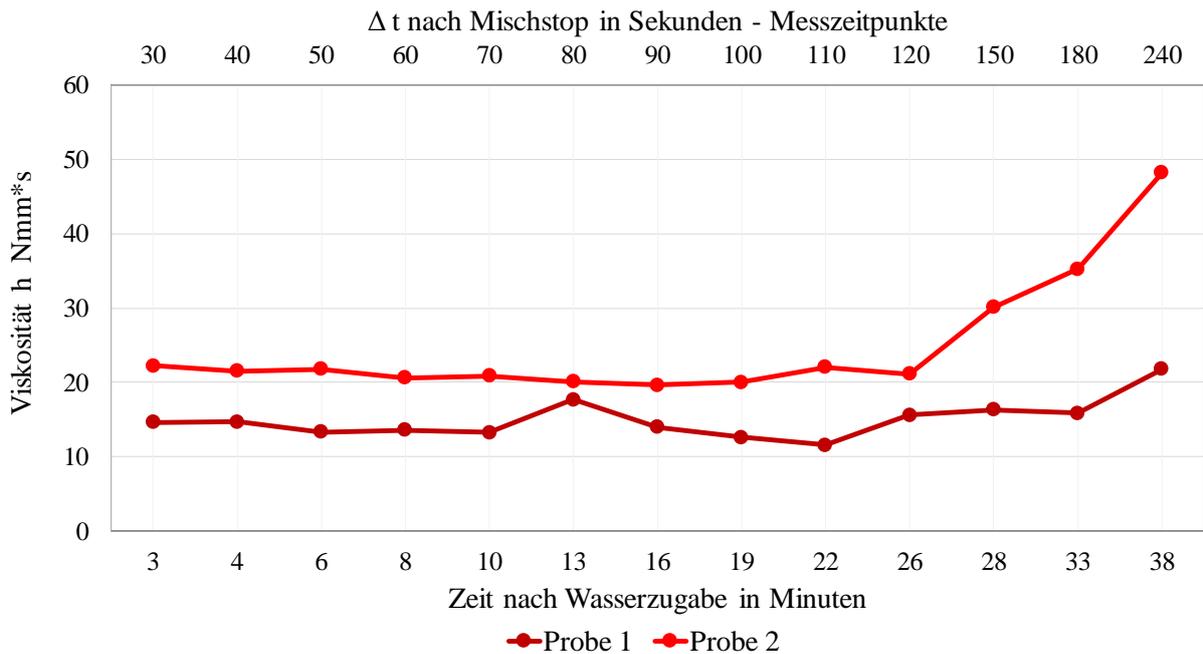


Abbildung 35: Viskosität von zwei Mischungen zu verschiedenen Messzeitpunkten, Versuchsreihe mit Rezeptur R4a, Nassmischzeit 90 s

Aus den Graphen in Abb. 34/35 kann man folgern, dass die Ausgangsstoffe der beiden Mischungen nach dem Mischprozess einen vollständig dispergierten und funktionsfähigen SVB ergaben. Die Ergebnisse zeigen, dass die ersten zehn Messungen rheologische Kennwerte auf einem gleichmäßigen Niveau liefern. Daraus ist ersichtlich, dass keine Einflüsse aus Thixotropie, Depoteffekten oder Rücksteifen vorhanden sind. Erst nach einer Wartezeit von über 120 Sekunden  $\Delta t$  erhöhen sich die rheologischen Kennwerte für die dynamische Fließgrenze und Viskosität.

Diese höheren Messwerte sind auf ein Ansteifen aus Thixotropieeffekten zurückzuführen. Es ist jedoch auch das Gesamalter der Proben zu berücksichtigen. Die letzte Messung erfolgte 38 Minuten nach Wasserzugabe. Somit kann bei den letzten Messergebnissen ein Einfluss aus ersten chemischen Reaktionen des Zements nicht ganz ausgeschlossen werden. Beide Mischungen wurden mit einem w/z-Wert von 0,36 hergestellt. Die Unterschiede in der dynamischen Fließgrenze und Viskosität zeigen Streuungen, die auch bei genauer Probenvorbereitung und Herstellung vorhanden sein können. Diese Unterschiede sind jedoch als sehr gering einzustufen. Dass hier ein leichter Unterschied in der Konsistenz vorliegt und gemessen werden konnte, ist auf die hohe Auflösung und Präzision des Messinstrumentes zurückzuführen.

Die Ergebnisse in den beiden vorangegangenen Abbildungen lassen den Schluss zu, dass bei dieser Mischung der Messzeitpunkt beliebig zwischen 30 und 120 Sekunden nach dem Mischprozess gewählt werden kann.

Für die Festlegung und Verifizierung eines geeigneten Messzeitpunktes wurden weitere Versuchsserien durchgeführt.

Diese Versuche wurden mit der gleichen Rezeptur 4 jedoch aus Charge b durchgeführt (Lieferung aller Ausgangsstoffe sechs Monate nach Charge a). Die Messkonfigurationen (Kugel 50 mm/ Schergeschwindigkeit 1 U/min) wurden beibehalten. Es wurden jedoch weniger Messzeitpunkte bei stärker variierenden Zeitintervallen  $\Delta t$  ermittelt, um mögliche Einflüsse des Zeitfaktors besser erfassen zu können.

Ein weiterer Unterschied zu Abbildung 34/35 ist, dass die beiden Parameter Viskosität und dynamische Fließgrenze des jeweiligen Versuches zusammen in einem Diagramm dargestellt sind. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abb. 36 bis 38 zu sehen.

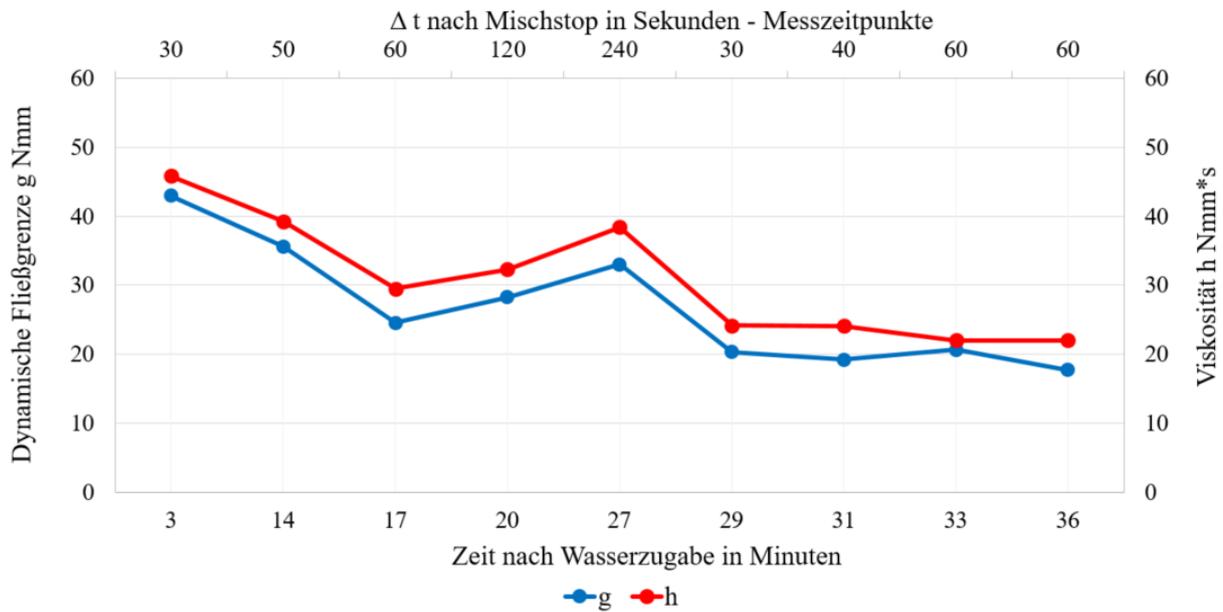


Abbildung 36: Viskosität und dynamische Fließgrenze eines Versuchs der Versuchsreihe R4b bei variierenden Messzeitpunkten. Nassmischzeit 90 s

Die rheologischen Kennwerte in Abbildung 36 belegen durch die ersten drei Messpunkte eine Nachverflüssigung. Die Werte der dynamischen Fließgrenze und der Viskosität verringern sich bei der zweiten und dritten Messung deutlich. Diese Tatsache weist auf einen nicht vollständig dispergierten Frischbeton hin. Dieses Materialverhalten steht im Widerspruch zu den Ergebnissen in Abbildung 34 und 35. Die steifer werdende Konsistenz bei den Messzeitpunkten 120 und 240 Sekunden nach dem Aufmischen müssen aus thixotropen Effekten resultieren.

Der Strukturaufbau durch kolloidale Wechselwirkungskräfte bewirkt ein Ansteifen des Betons, dieser Effekt ist bei dem Messpunkt von 240 Sekunden an den beiden Graphen eindeutig zu sehen. Die sechste Messung bei erneut 30 Sekunden Wartezeit und 29 min Zeit nach Wasserzugabe zeigt wiederum, dass das Ansteifen aus thixotropen Wirkmechanismen reversibel ist. Aus dieser Untersuchungsreihe kann jedoch, infolge der deutlichen Nachverflüssigung kein plausibler Messzeitpunkt abgeleitet oder bestätigt werden. Die zusätzlich eingebrachte Mischenergie von jeweils drei Sekunden und die zusätzliche Zeit sind der Auslöser für die Nachverflüssigung durch das Fließmittel. Daraus folgt, dass die eingebrachte Mischenergie bzw. die Zeit des Herstellungsprozesses nicht ausreichend war, um eine vollständige Dispergierung herbeizuführen.

Um der Nachverflüssigung entgegenzuwirken wurde die Nassmischzeit von 90 s auf 120 s erhöht (Abbildung 37). Es wurde jedoch das Messprofil 2 U/min verwendet, was in absolut größeren Zahlenwerten bei der dynamischen Fließgrenze g und der Viskosität h resultiert. Eine Tendenz bzw. die Wirksamkeit der Mischzeitverlängerung kann trotzdem diskutiert werden.

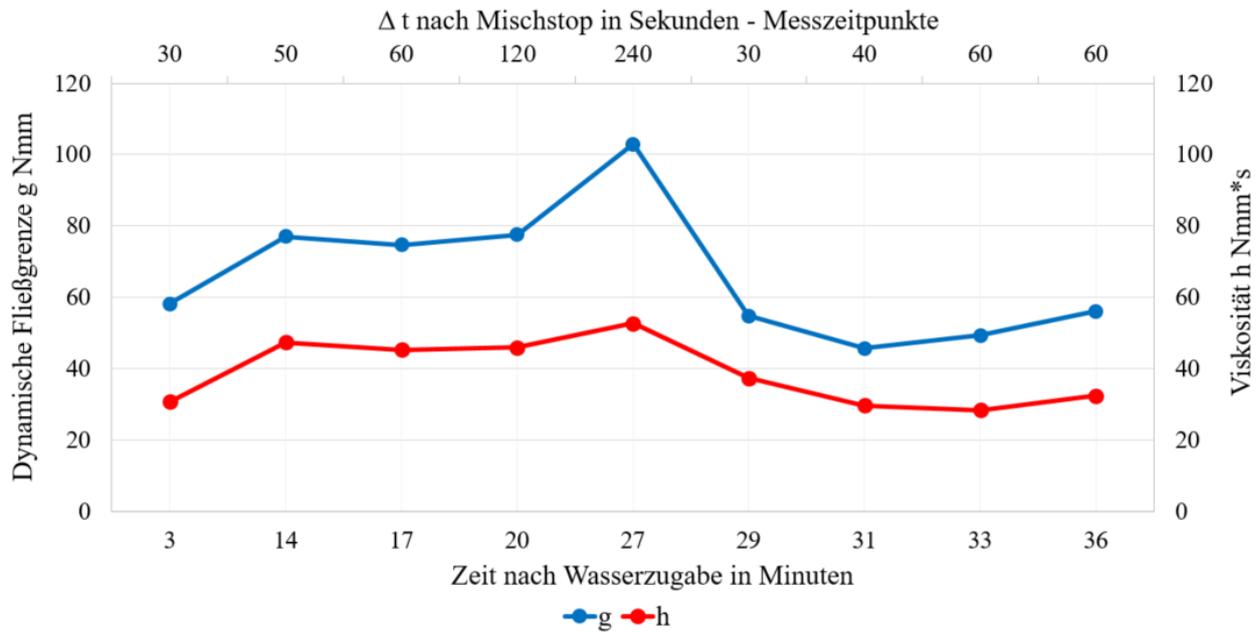


Abbildung 37: Viskosität und dynamische Fließgrenze eines Versuchs der Versuchsreihe R4b mit unterschiedlichen Messzeitpunkten. Nassmischzeit 120 s

Die Graphen in Abbildung 36 und 37 zeigen, dass durch die Verlängerung der Nassmischzeit von 90 auf 120 Sekunden anfangs keine Nachverflüssigung mehr vorliegt. Eine wesentliche Information der Ergebnisse in Abb. 37 ist, dass die erste Prüfung 30 s nach dem Mischprozess, in diesem Fall niedrigere Zahlenwerte für g und h liefert. Dies lässt sich mit dem anfangs starken Entlüftungsprozess begründen. Es wurde beobachtet, dass ein Großteil der Luft, die während des Mischens in den Beton eingebracht wird, nach dem Mischen entweicht. Somit hat der Frischbeton in dieser Phase der Entlüftung eine geringere Viskosität und dynamische Fließgrenze. Dieser Vorgang ist ähnlich wie bei der Verdichtung von konventionellem Rüttelbeton. Während des Rüttelns wird durch die eingebrachte Energie die Viskosität herabgesetzt, somit kann die Luft aus dem Rüttelbeton entweichen. SVB entlüftet selbstständig, analog ist während dieses Vorgangs die Konsistenz niedriger. Die Wiederholungen der rheologischen Messungen zeigen, dass die Zahlenwerte der beiden Parameter g und h bei 50, 60 und 120 Sekunden auf einem gleichmäßigen Niveau bleiben. Die Viskosität und dynamische Fließgrenze sind bei der Messung 27 Minuten Zeit nach Wasserzugabe und 240 Sekunden  $\Delta t$  deutlich höher, was wiederum auf Thixotropie Effekte zurückzuführen ist. Bei genauer Betrachtung der Graphen in Abbildung 37 fällt jedoch auf, dass der Einfluss der Thixotropie „mehr als reversibel“ ist. Die rheologischen Parameter dynamische Fließgrenze g und Viskosität h zeigen bei der Messung 7 (31 Minuten nach Wasserzugabe und  $\Delta t$  40 s) deutlich niedrigere Werte als bei den Prüfungen zwei, drei und vier. Die zusätzlich eingebrachte Mischenergie durch das Aufmischen von drei Sekunden zwischen den einzelnen Messungen und die zusätzliche Zeit bewirken die niedrigere Viskosität und Fließgrenze. Daraus lässt sich ableiten, dass der Beton nach den 120 Sekunden Nassmischzeit noch nicht vollständig dispergiert war. Aus diesem Grund wurde die Nassmischzeit von 120 auf 150 Sekunden weiter erhöht.

In Abbildung 38 ist eine weitere Messreihe mit der Rezeptur 4b zur Erprobung eines geeigneten Messzeitpunktes dargestellt. Es sind neun Messungen mit dem Profil 1 U/min und der der kleinen Kugel mit 50 mm Durchmesser durchgeführt worden. Die rheologischen Kennwerte wurden konstant bei 60 s nach dem Mischende genommen (zwischen jeder Messung wurde für 3 s aufgemischt). Zu beachten sind die verschiedenen Wertebereiche der primären und der sekundären Vertikalachse. Diese Anpassung wurde gewählt, um eine direkte Überlagerung der Graphen zu vermeiden und eine differenzierte und klare Darstellung der beiden Parameter zu erzielen.

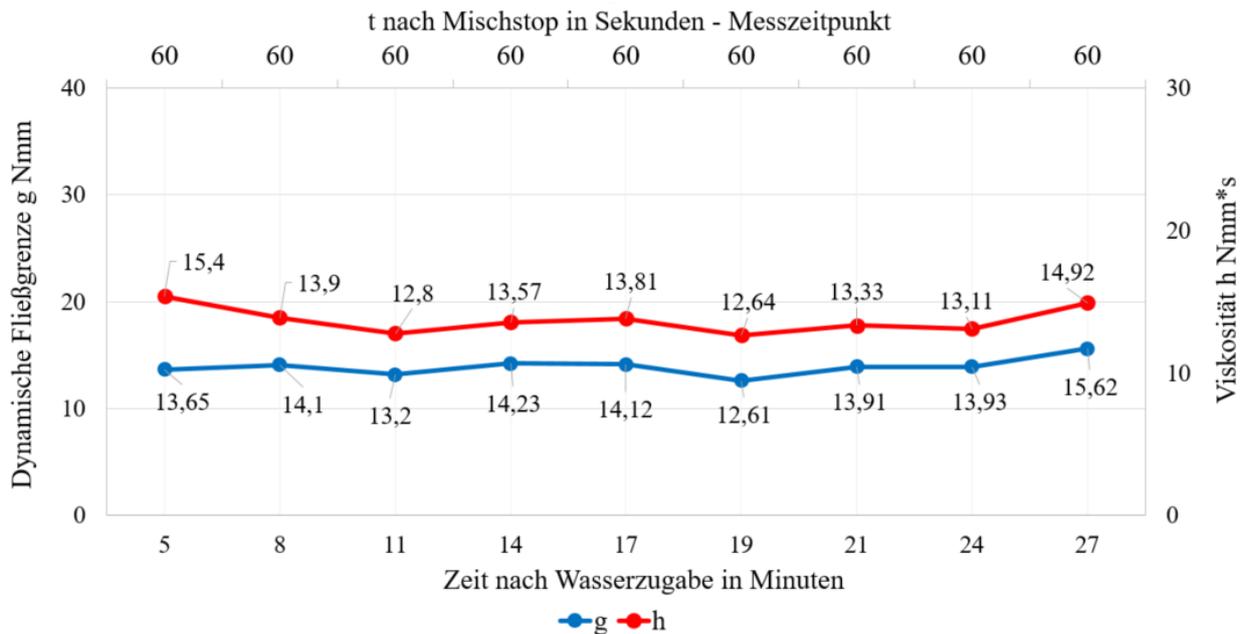


Abbildung 38: Messzeitpunkt Verifizierung durch Reproduzierbarkeit von Messwerten an einer Mischung mit Rezeptur 4b, Nassmischzeit 150 s

Die neun Messpunkte wurden in einem Zeitfenster von 27 Minuten nach Wasserzugabe ermittelt. Die Graphen in Abbildung 38 zeigen, dass unter definierten Randbedingungen die Reproduzierbarkeit von rheologischen Parametern möglich ist. Mit dieser Versuchsführung ist auch die Verarbeitbarkeitszeit  $t_{VB}$  im Fertigteilerwerkbereich, nach der SVB-Richtlinie Punkt 8.4, von mindestens 20 Minuten plausibel nachgewiesen [9].

Die Zahlenwerte der Viskosität h und der dynamische Fließgrenze g sind auf einem relativ gleichmäßigem Niveau. Dieser Kurvenverlauf der beiden Parameter zeigt somit, dass weder eine Nachverflüssigung noch ein Rücksteifen zu verzeichnen ist. Das Frischbetonverhalten aus Abbildung 38 deckt sich prinzipiell mit den Ergebnissen der Abbildung 34 und 35. Um eine gleichbleibende Konsistenz der Rezeptur 4 aus Charge b (wie in Abb.38 gezeigt) zu erreichen, musste im Gegensatz zur Charge a (Abb. 34/35) die Nassmischzeit in zwei Schritten von 90 s auf schließlich 150 s erhöht werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Abbildungen 34 bis 38 wurde der Messzeitpunkt bei 60 Sekunden nach dem Mischprozess festgelegt. Während der 60 Sekunden ist gewährleistet, dass sich der Beton im Mischer ausnivelliert und somit immer ein gleichmäßiges Niveau des Prüf gutes im Mischer vorliegt. Dies ist auch bei den Mischungen mit niedrigeren w/z-Werten mit

Wassermangel der Fall. Ein weiteres Kriterium ist der Entlüftungsprozess, welcher unmittelbar nach dem Mischen ausgeprägt ist. Nach den hier festgelegten 60 Sekunden ist die Entlüftung noch nicht abgeschlossen, es ist jedoch ein Großteil der Luft entwichen, welche durch den Mischprozess eingebracht worden ist.

Die nachfolgend präsentierten Ergebnisse, alle Messpunkte und die einhergehende Erstellung der Kennlinien wurden nach folgendem Messschema erstellt:

- Der Mischer wird nach dem Mischprozess gemäß Tabelle 7 angehalten. Gleichzeitig wird eine Stoppuhr gestartet. Das Rheometer wird exakt 30 Sekunden nach Ende des Mischprozesses in den ruhenden Mischer eingesetzt. Nach weiteren 30 Sekunden wird der Messvorgang ausgelöst. In den 30 Sekunden vom Einsetzen bis zum Start der Messung umfließt der Frischbeton die Kugel vollständig und ist im Mischer ausnivelliert. Lediglich die Untersuchungen zur Darstellung der Einflüsse aus Thixotropie Effekten weichen von diesem Versuchsschema ab.

Diese Diskussion zeigt die Komplexität der Herstellung von SVB. Obwohl es sich in diesem Abschnitt um Untersuchungen der Rezeptur 4 handelt, weisen die Untersuchungsergebnisse der unterschiedlichen Lieferchargen a und b (vgl. R4a Abb. 34/35 und R4b Abb. 36/37/38) deutliche Unterschiede im Materialverhalten auf.

Dieses unterschiedliche Materialverhalten äußerte sich im Bedarf an Mischenergie bzw. Mischzeit, um einen vollständig dispergierten SVB herzustellen.

- Betrachtung und Analyse des Parameters Bingham Fließgrenze und des Wirkmechanismus aus Thixotropie Effekten

In der vorangegangenen Diskussion zur Festlegung eines geeigneten Messzeitpunktes sind die Ergebnisse der Bingham Fließgrenze nicht berücksichtigt worden. Die Begründung für dieses Vorgehen wird hier am Beispiel der Versuchsreihe aus Abbildung 37 geliefert. Das Diagramm in folgender Abbildung 39 zeigt die gemessenen Rohdaten aus Phase 2 der Messung, welche zur Ermittlung der Viskosität in Abbildung 37 zugrunde liegen.

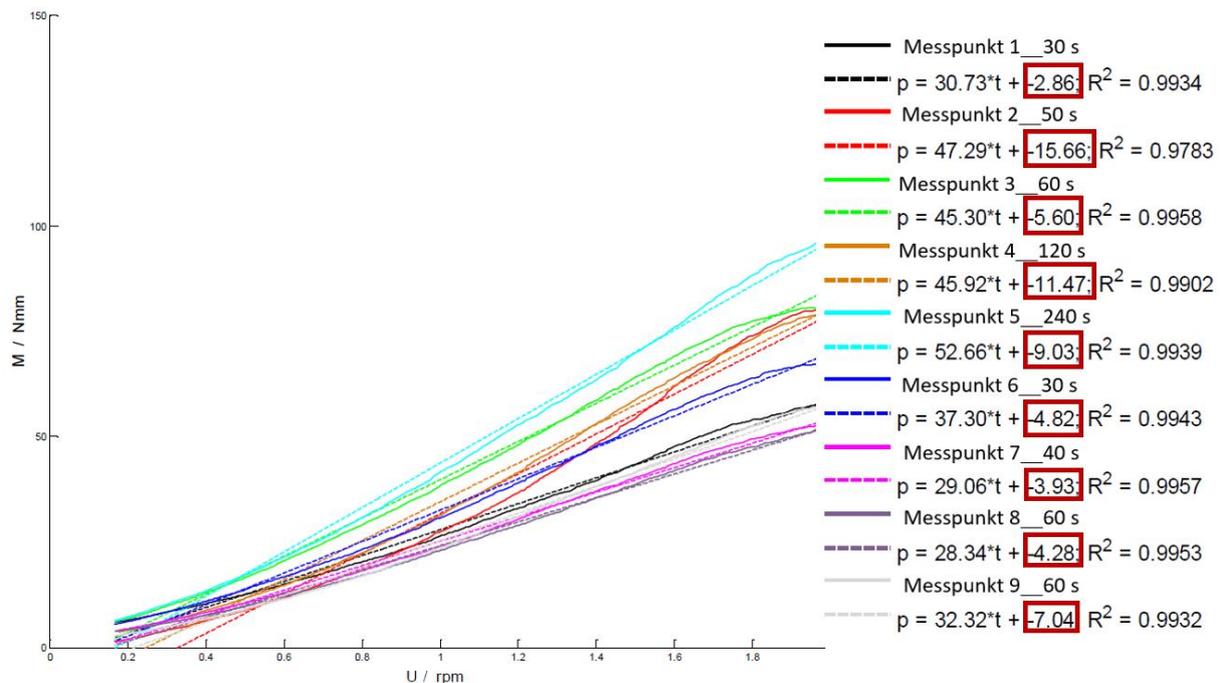


Abbildung 39: Auswertung von neun Messungen aus Phase 2 nach dem Bingham-Modell nach unterschiedlicher Ruhezeit des Betons, Versuchsreihe R4b, Nassmischzeit 120 s, vgl. Abb. 37

Im Diagramm der Abbildung 39 ist zu sehen, dass die Kurven gegen Null und darüber hinaus laufen. Der Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich liegt somit im negativen Bereich. Die Werte der Bingham Fließgrenze sind in der Legende rot eingrahmt und zeigen entsprechend negative Zahlenwerte. Eine negative Fließgrenze ist aus physikalischer Sicht nicht möglich und lässt somit keine Interpretation der Ergebnisse zu. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Berechnung der Viskosität über das lineare Bingham-Modell plausible Ergebnisse liefert. Das Bestimmtheitsmaß aller Messungen liegt über 0,99. Es kann sehr deutlich abgelesen werden, dass beim Messpunkt 5, die 240 Sekunden Ruhezeit des Betons zu einer erhöhten Viskosität führen, was über den türkisenen Graphen oben abgebildet ist. Diese höhere Viskosität bildet das Ansteifen durch thixotrope Wirkmechanismen ab. Dieses Ansteifen des Betons ist reversibel, dass zeigen die folgenden Messungen sechs bis neun.

Das Ergebnis dieser neun Messungen bzw. die Auswertung aus Phase 2 der Messung nach dem Bingham Modell zeigen eine direkte Analogie zu den diskutierten Grundlagenmodellen aus Kapitel 2.2.2. Dieses Ergebnis deckt sich prinzipiell mit der Darstellung aus Abbildung 21 und der weiterführenden These von Sarmiento [37]. Aus dieser Diskussion kann man entnehmen, dass SVB näherungsweise als Newton-Fluid charakterisiert werden kann. Die Kurvenverläufe im Diagramm der Abbildung 39 bestätigen diese Annahme. Dass die Fließgrenze nicht exakt bei null liegt, was einer Newton-Flüssigkeit zugrunde liegt, kann möglicherweise auf die Messtoleranz des hier verwendeten Messprinzips zurückgeführt werden. Weiter muss auch berücksichtigt werden, dass hier rheologische Untersuchungen an Betonen präsentiert werden.

In den Darstellungen zur Ermittlung eines geeigneten Messzeitpunktes zeigte sich auch im Graphen der dynamischen Fließgrenze bei Messung fünf nach 240 Sekunden eine steifere Konsistenz (Abbildung 37). Das Diagramm in folgender Abbildung 40 zeigt die gemessenen Rohdaten zur Bestimmung der dynamische Fließgrenze der neun Messpunkte.

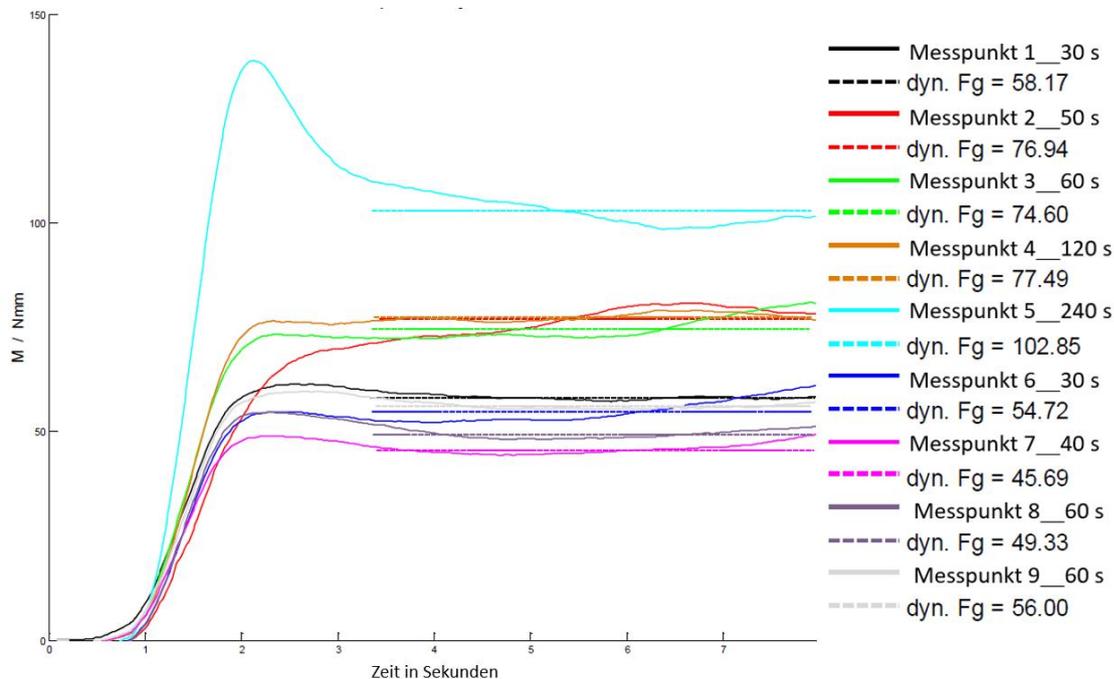


Abbildung 40: Dynamische Fließgrenze aus Phase I von neun Messungen nach unterschiedlichen Ruhezeiten des Betons, Versuchsreihe R4b, Nassmischzeit 120 s, vgl. Abb. 37

Im Diagramm der Abbildung 40 stellt die türkise obere Kurve die Messung fünf nach 240 Sekunden Ruhezeit dar. Diese Kurve zeigt am Anfang einen Peak, der als statische Fließgrenze bezeichnet wird, vgl. Kapitel 2.2.2, Abbildung 19/20. Dieser Peak resultiert aus den 240 Sekunden Ruhezeit des Betons. Infolge thixotroper Wechselwirkungskräfte steift der Beton in dieser Zeit an. Es ist auch klar zu erkennen und abzulesen, dass die Thixotropie statische- sowie dynamische Fließgrenze beeinflusst. Da sich bei dem Messpunkt 6 (erneut bei 30 Sekunden Ruhezeit des Betons) der Zahlenwert der dynamische Fließgrenze im Gegensatz zu Messung 5 (240 Sekunden Ruhezeit des Betons) fast halbiert, kann man davon ausgehen, dass es sich um ein Ansteifen aus Thixotropie handelte. Dieses Ansteifen ist vollkommen reversibel, was durch die Graphen und die dynamische Fließgrenze der Messpunkte sechs bis neun dargestellt ist. Bei diesen Messzeitpunkten zwischen 30 und 60 Sekunden nach dem Aufmischen bildet sich auch keine ausgeprägte statische Fließgrenze aus.

Die Versuchsergebnisse aus den Abbildungen 39 und 40 zeigen, dass mit den rheologischen Parametern Viskosität und dynamische Fließgrenze selbst sehr geringe Änderungen in der Konsistenz plausibel erfasst und dargestellt werden können. Die Ergebnisse der Bingham Fließgrenze lassen aber keine Rückschlüsse auf Änderungen der Konsistenz zu.

➤ Vergleich der rheologischen Kennwerte mit Ergebnissen der herkömmlichen Prüfverfahren  
 Für die Vergleiche der rheologischen Kennwerte mit standardisierten Untersuchungsmethoden wurden die Untersuchungen zur Erstellung von Kennlinien für den Wasseranspruch verwendet. Für die nachfolgend diskutierten Untersuchungen und Ergebnisse wurde der kombinierte Auslaufkegel nach *Kordts* und *Breit* [67] verwendet.

Bei allen Versuchen wurde unmittelbar nach der rheologischen Prüfung Beton aus dem Mischer entnommen und mit dem kombinierten Auslaufkegel geprüft. In den folgenden beiden Abbildungen 41 und 42 sind Ergebnisse einer Versuchsreihe mit der Rezeptur 1 abgebildet.

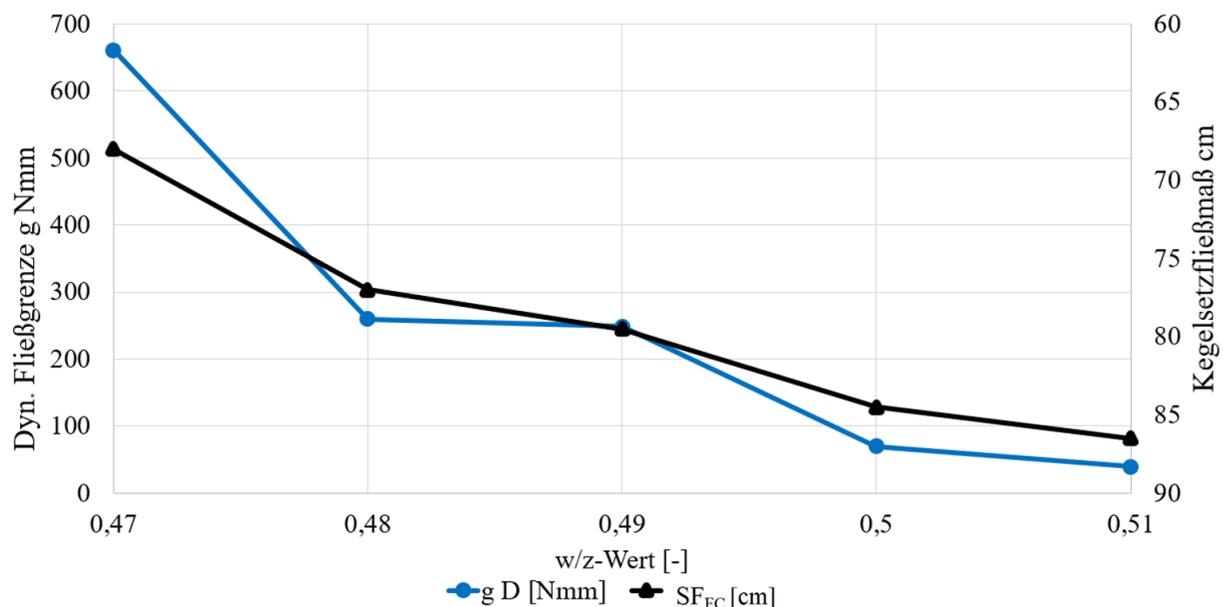


Abbildung 41: Gegenüberstellung der dynamischen Fließgrenze mit dem Kegelsetzfließmaß aus einer Versuchsreihe R1 anhand von Kennlinien über den w/z-Wert aufgetragen

Die fünf untersuchten Mischungen weisen unterschiedliche w/z-Werte auf. Das Inkrement 0,01 w/z entspricht  $\Delta 3,5 \text{ l/m}^3$  Wasser (Zementgehalt  $350 \text{ kg/m}^3$ ). Die Fließmaße zeigen zu erwartende Ergebnisse und werden mit höheren w/z-Werten größer. Die Werte der dynamischen Fließgrenze verringern sich mit steigenden w/z-Wert.

Zur besseren Visualisierung der Zusammenhänge sind die Ergebnisse des Fließmaßes in umgekehrter Reihenfolge aufgetragen, und die Achseneinteilung ist dem Wertebereich angepasst. In der folgenden Abbildung 42 ist die Kegelauslaufzeit der Viskosität gegenübergestellt.

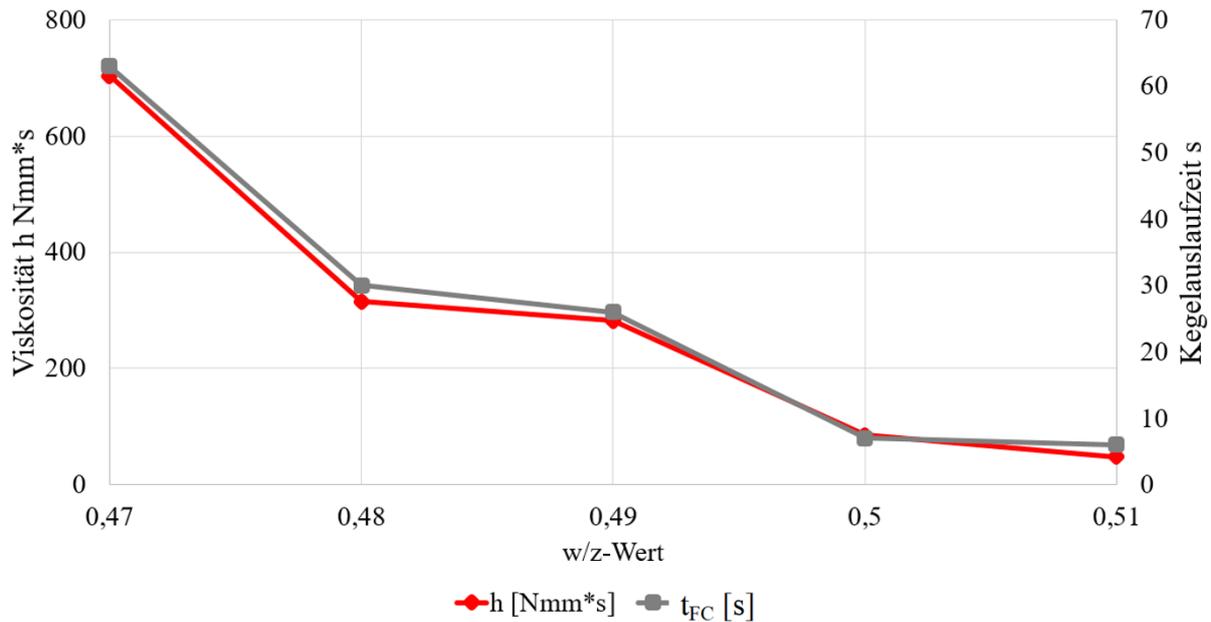


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Viskosität und der Kegelauslaufzeit aus Versuchen mit Rezeptur 1 anhand von Kennlinien über den w/z-Wert

Der variierende w/z-Wert, also der unterschiedlich wirksame Wassergehalt, wirkt sich erwartungsgemäß auf die Kegelauslaufzeit aus. Diese ist bei höherem Wassergehalt entsprechend niedriger. Diese Änderung der Kegelauslaufzeit wird über den rheologischen Kennwert Viskosität ebenbürtig abgebildet.

Die Graphen der beiden letzten Diagramme 41/42 zeigen bei der Mischung mit  $w/z = 0,49$  einen Knick. Dies muss kritisch betrachtet werden. Die Ergebnisse dieser untersuchten Mischung reihen sich nicht im Sinne einer fallenden Funktion zu den anderen Messpunkten ein. Dies kann nur auf eine Ungenauigkeit in der Probenherstellung zurückgeführt werden. Die genaue Ortung des Fehlers bei der Herstellung dieser Probe ist im Nachhinein nicht ohne weiteres möglich. Wahrscheinlich ist eine Abweichung in der Ermittlung der Gesteinsfeuchte bei einer der drei Fraktionen die Ursache. Eine geringe Abweichung der gemessenen Feuchte von der realen um 0,5 % z. B. bei der Körnung 8/16 bewirkt eine Änderung im wirksamen Wassergehalt von  $2,95 \text{ l/m}^3$ . Ein Fehler in der Einwaage der Feststoffe ist auszuschließen, da hier größter Wert auf Präzision gelegt wurde. Die Einwaagen wurden fortlaufend kontrolliert. Ein Fehler bei der Versuchsdurchführung mit einer der Prüfmethode ist ebenfalls auszuschließen, da sich in allen Graphen bzw. Kennwerten eine Abweichung zur designierten Zielkonsistenz zeigt. Mit der Rezeptur 1 wurden grundlegende Fragestellungen bearbeitet. Versuche zur Aussteuerung wurden nicht durchgeführt.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der herkömmlichen Prüfmethode und den rheologischen Kennwerten belegen, dass Unterschiede in den Verarbeitungseigenschaften durch variierende w/z-Werte rheologisch eindeutig nachgewiesen werden können. Diese Tatsache wird hier an einem weiteren Vergleich dieser Art mit der Rezeptur 3b gezeigt. Bei dieser Rezeptur mit einem Zementgehalt von  $410 \text{ kg/m}^3$  bewirkt das Inkrement von  $\Delta 0,01$  w/z eine Änderung von  $4,1 \text{ l/m}^3$  Wasser. Der Sollwassergehalt ist mit  $180,4 \text{ l/m}^3$  einem w/z-Wert von 0,44 zuzuordnen.

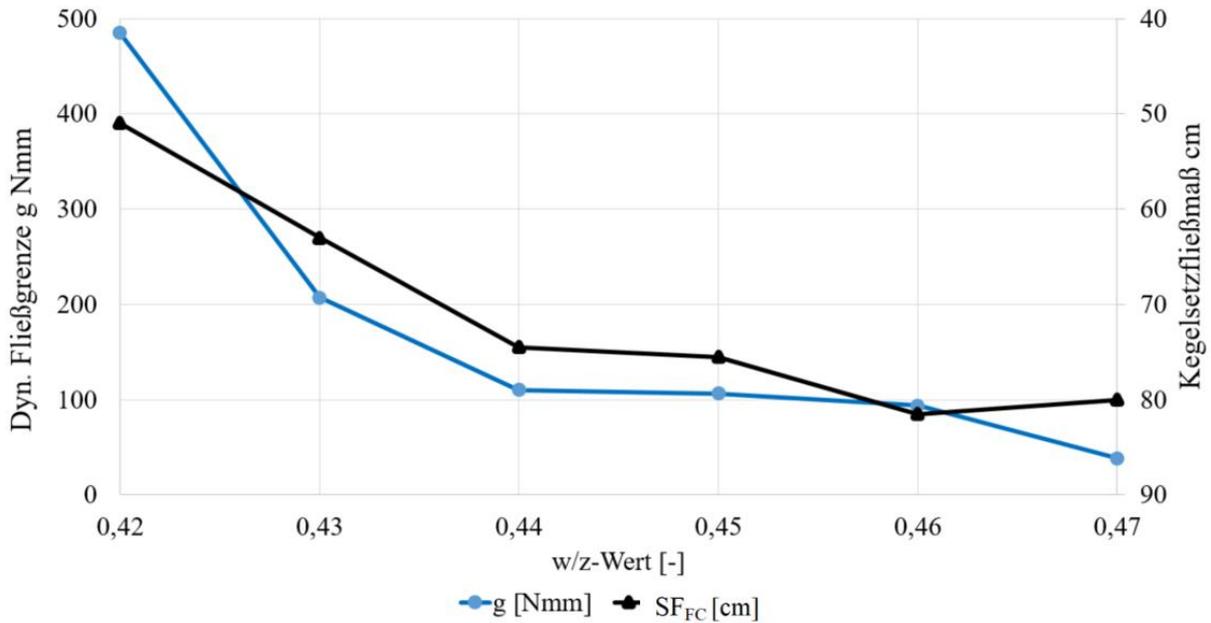


Abbildung 43: Gegenüberstellung der dynamischen Fließgrenze mit dem Kegelsetzfließmaß aus Untersuchungen mit der Rezeptur 3b anhand von Kennlinien über den variierenden w/z-Wert

Erwartungsgemäß wird das Setzfließmaß mit steigendem w/z-Wert größer. Im Gegenzug verringert sich die dynamische Fließgrenze.

Das Setzfließmaß in Abbildung 43 zeigt bei w/z 0,47 ein abweichendes Ergebnis. Dies ist auf eine trockene bzw. nicht angefeuchtete Ausbreitplatte zurückzuführen.

Das Diagramm der folgenden Abbildung 44 zeigt Ergebnisse derselben Versuchsreihe über die Kegelauslaufzeit und den Parameter Viskosität.

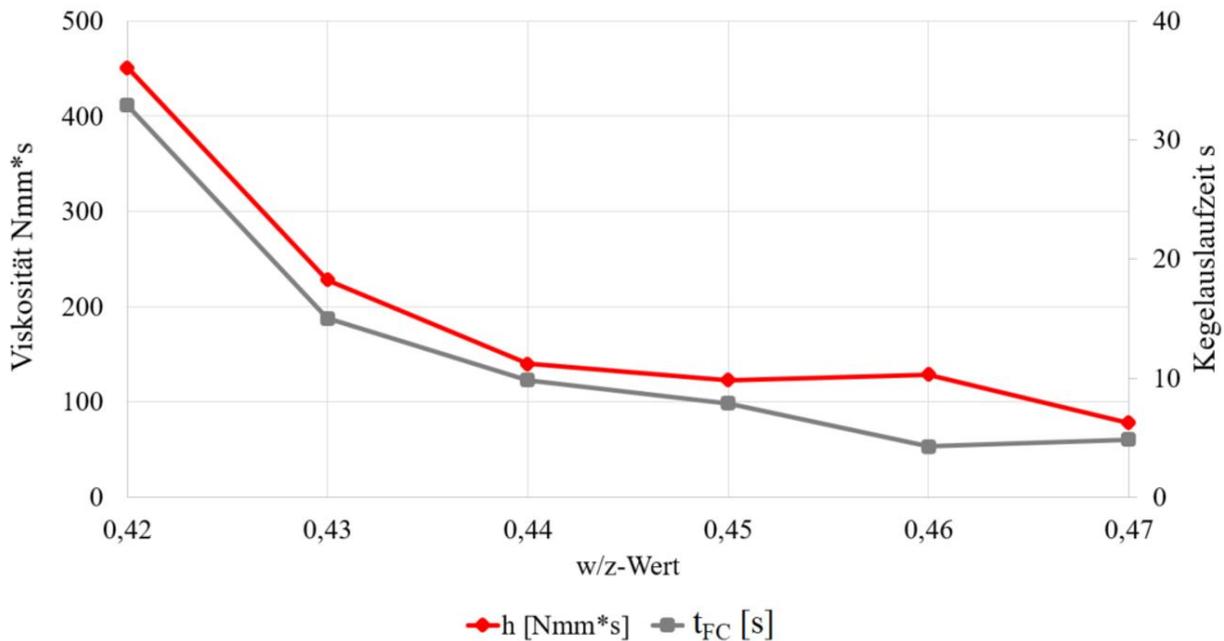


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Viskosität und Kegelauslaufzeit mit der Rezeptur R3b anhand von Kennlinien über den variierenden w/z-Wert

Die Ergebnisse bzw. Kennlinien in Abbildung 44 zeigen, dass die variierende Konsistenz infolge unterschiedlicher w/z-Werte mit der Kegelauslaufzeit und der Viskosität abgebildet werden können. Der Wert für die Viskosität bei w/z 0,46 zeigt jedoch eine Unstetigkeit in der Kennlinie auf. Trotz des zusätzlichen Wassergehaltes von 4,1 l/m<sup>3</sup> wurde eine höhere Viskosität ermittelt als bei w/z 0,45. Dies steht im Widerspruch mit den Ergebnissen der Kegelauslaufzeit, dem Setzfließmaß und der dynamischen Fließgrenze. Der Graph der Kegelauslaufzeit zeigt bei w/z 0,47 ebenfalls eine Unstetigkeit, dies deckt sich prinzipiell mit dem Ergebnis des Setzfließmaßes aus Abbildung 43. Man muss in diesem Fall davon ausgehen, dass weder die Auslaufplatte noch der Auslaufkegel angefeuchtet wurden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass über die rheologischen Prüfungen im Mischer Unterschiede im wirksamen Wassergehalt, hier über den w/z-Wert ausgedrückt, realistisch festgestellt werden können. Das gilt für die beiden Parameter dynamische Fließgrenze und Viskosität. Werte der dynamischen Fließgrenze bilden unterschiedliche wirksame Wassergehalte analog zum Fließmaß ab. Die Zahlenwerte der Viskosität stellen unterschiedlich wirksame Wassergehalte gleichwertig wie die Auslaufzeit dar.

In den hier gezeigten Vergleichen sind alle vier verwendeten Kennwerte relative Messgrößen. Das Setzfließmaß und die Auslaufzeit sind nach *Brameshuber* rheologische Ersatzverfahren. Die rheologischen Messwerte sind nach DIN EN ISO 3219 Relativwerte, da das Rheometer ein nicht genormtes Relativmesssystem ist. In den Diagrammen der Abbildungen 41 bis 44 sind zum Teil direkte Übereinstimmungen einzelner Punkte der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden vorhanden. Diese sind zufällig. Die ermittelten Trends sollten sich jedoch decken, was mit den gezeigten Ergebnissen bestätigt werden konnte.

Die rheologische Bestimmung der Verarbeitungseigenschaften im Mischer erfolgt früher und schneller als durch die genormten Versuche oder durch den kombinierten Auslaufkegel. Die rheologischen Kennwerte sind jeweils aus dem Durchschnitt von mehreren Hundert elektronisch aufgenommenen Messpunkten berechnet. Einflüsse aus personalabhängigen Faktoren wie Reaktionszeit bei der Zeitnahme der Auslaufzeit, der Grad der Feuchte auf der Fließplatte oder dem Auslaufmedium sind ebenfalls ausgeschlossen.

## 4.4 Erstellung einer Wissensdatenbank für einen SVB am Beispiel der Rezeptur 3b und Diskussion der ermittelten rheologischen Kennwerte

### 4.4.1 Allgemeines

Alle nachfolgend diskutierten Ergebnisse wurden mit dem Messinstrument RheoCT 2 erstellt. Die Wissensdatenbank enthält zwei Kennlinien für den Wasseranspruch. Die zwei Kennlinien sind durch die dynamische Fließgrenze  $g$  und die Viskosität  $h$  bei unterschiedlichen  $w/z$ -Werten definiert. Die Wissensdatenbank ist durch jeweils zwei Kennlinien für zusätzliches Fließmittel und Stabilisierer ergänzt. Vorrangig werden über die einzelnen Kennlinien erst die ermittelten rheologischen Parameter diskutiert, also die dynamische Fließgrenze, Bingham Fließgrenze und die Viskosität nach dem Bingham-Modell. Zu allen Versuchsserien werden die Rohdaten präsentiert, welche aus den rheologischen Konsistenzprüfungen im Mischer resultieren. Es werden grundlegend alle drei ermittelten rheologischen Parameter beleuchtet und verglichen. Diskutiert werden die einzelnen Parameter auf Präzision und die Möglichkeiten der genauen Erfassung und Darstellung unterschiedlicher Verarbeitungseigenschaften. Die Diskussion wird um die Darstellungen der rheologischen Kennwerte in Form von Rheogrammen erweitert. Am Ende des Kapitels wird die Wissensdatenbank mit den relevanten Eingangsparametern nochmals zusammenfassend dargestellt und diskutiert.

### 4.4.2 Erstellung von Kennlinien für den Wasseranspruch

Die zwei folgenden Abbildungen 45/46 zeigen die Ergebnisse rheologischer Untersuchungen von sechs verschiedenen Mischungen der Rezeptur 3b. Variiert wurde der  $w/z$ -Wert. Der designierte  $w/z$ -Wert liegt bei 0,44. Mit den fünf weiteren Mischungen wurden gezielt schrittweiser Wasserüberschuss oder Wassermangel erzeugt.

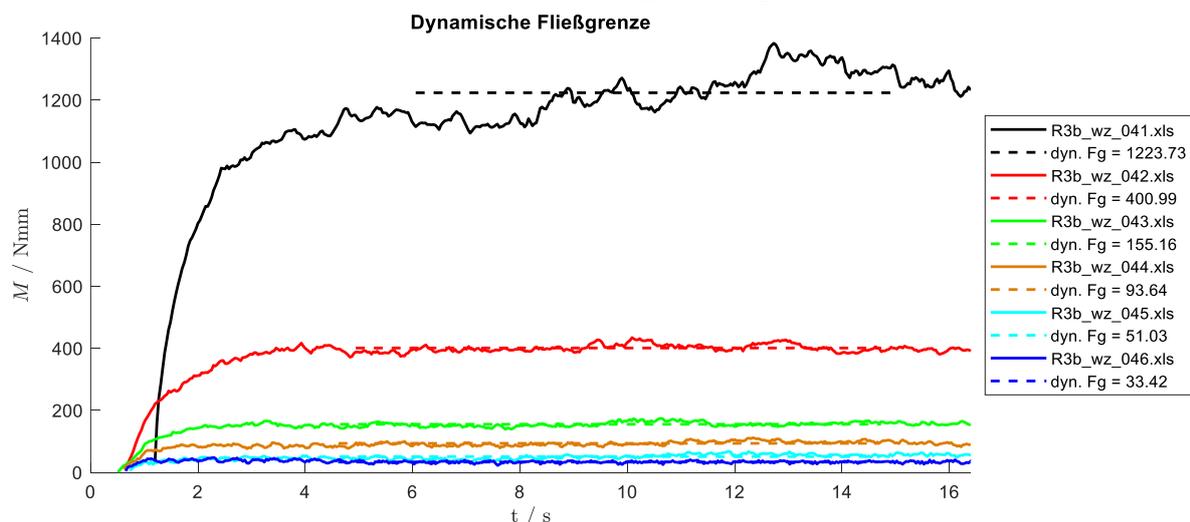


Abbildung 45: Drehmoment über die Zeit von sechs Mischungen der Rezeptur 3b,  $w/z$ -Werte von 0,41 bis 0,46. Ergebnisse aus Phase 1 der Messung

Das Wasserdefizit von  $-\Delta 12,3 \text{ l/m}^3$  bei  $w/z$  0,41 (schwarzer Graph) resultiert in einer extrem hohen dynamischen Fließgrenze von 1223,73 Nmm (Abb. 45). Prinzipiell ist bei dieser Betonzusammensetzung kein funktionierender SVB mehr vorhanden. Der Beton ist zu steif und entlüftet kaum mehr. Die schwarze Messkurve zeigt im Gegensatz zu den anderen Graphen

einen stark streuenden Wertebereich während der konstanten Scherung auf. Durch die Hereinnahme dieser Prüfung (Mischung w/z = 0,41) weist der Wertebereich der y-Achse eine hohe Spreizung auf. Dadurch ist die visuelle Differenzierung der anderen Messergebnisse eingeschränkt. Für die weitere Diskussion ist die Erfassung dieser gezielt hergestellten starken Abweichung im w/z-Wert jedoch sinnvoll.

Auch im Diagramm der folgenden Abbildung 46 verursacht die Darstellung des Graphen der Mischung w/z 0,41 eine starke Spreizung der Ergebnisse. Die Graphen der Ergebnisse kleiner dem w/z-Wert 0,42 (roter Graph) zeigen Schnittpunkte mit der x-Achse auf (Nulldurchgang), d. h. sie laufen mit abnehmender Schergeschwindigkeit zum Teil in einen negativen Bereich. Dass dieses Verhalten bei SVB vorhanden sein kann, wurde in Abb. 39 gezeigt und diskutiert. Die Diskussion über den Parameter Bingham Fließgrenze wird in diesem Kapitel vertieft.

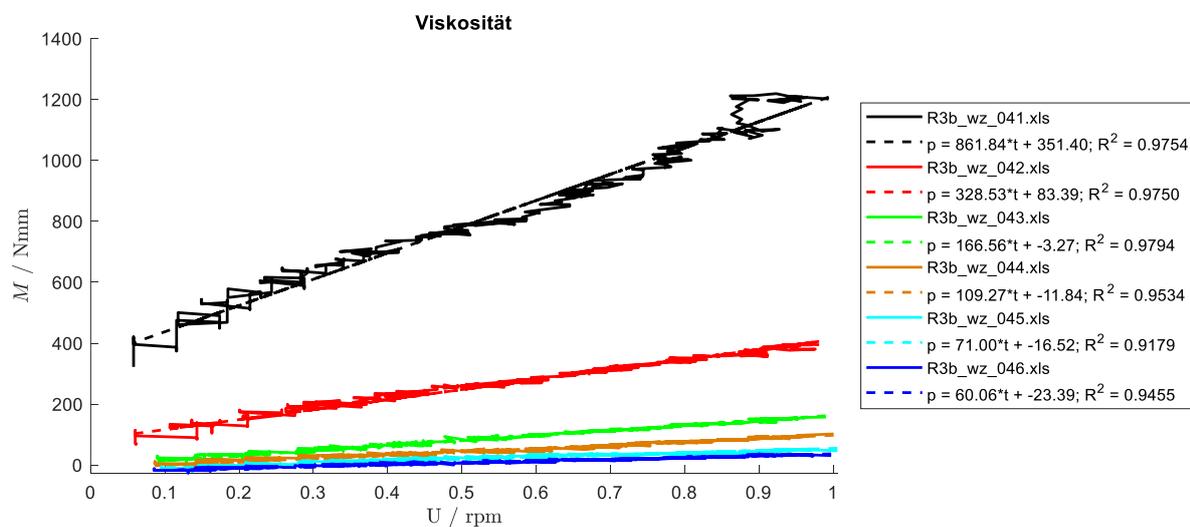


Abbildung 46: Drehmoment bei fallender Scherrate, wenn gemäß Messprofil aus Abbildung 29 Phase 2 geprüft wird. Eingezeichnet (gestrichelte Ausgleichsgerade) und ausgewertet (Legende) ist dann die Geradengleichung, aus der Viskosität und Bingham Fließgrenze abzulesen sind, Rezeptur 3b

Durch die große Spreizung bzw. die große Bandbreite der unterschiedlichen w/z-Werte und den daraus resultierenden stark variierenden wirksamen Wassergehalten können auch die Grenzen der Rezeptur 3b in Bezug auf die Konsistenz aufgezeigt werden. Diese Untersuchungen erlauben auch eine Diskussion über die Funktionalität des Messinstruments und der Prüfmethode bei höchst unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften (starke Stagnation bei w/z 0,41 und Sedimentation bei w/z 0,46).

- Beurteilung der Konsistenz über die dynamische Fließgrenze und Bingham Fließgrenze bei unterschiedlichen w/z-Werten

Das folgende Diagramm in der Abbildung 47 zeigt die Zahlenwerte der dynamischen Fließgrenze aus Abbildung 45 und die Werte der Bingham Fließgrenze aus Abbildung 46 in Form von Graphen. Die Ergebnisse sind über den w/z-Wert der jeweiligen Mischung aufgetragen.

Der grüne Graph für die Bingham Fließgrenze ist im Diagramm zusätzlich mit Zahlenwerten hinterlegt.

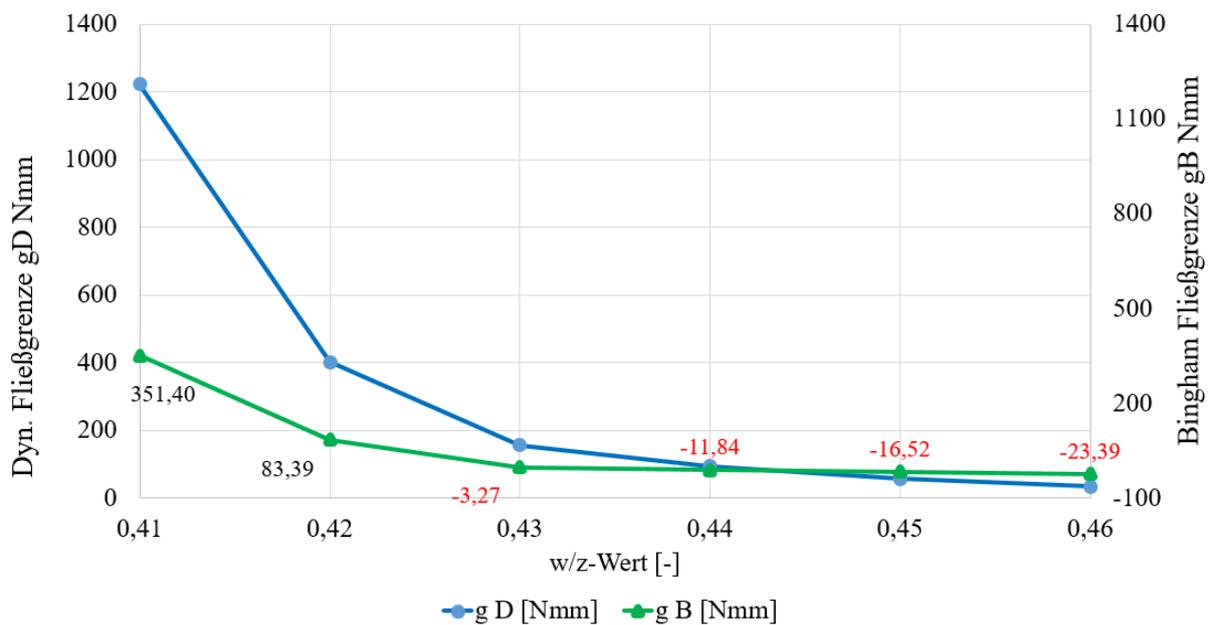


Abbildung 47: Kennlinien über den w/z-Wert mit der Rezeptur 3b, Vergleich dynamische Fließgrenze  $g_D$  und Bingham Fließgrenze  $g_B$

Die Formensprache der beiden Graphen ist prinzipiell plausibel. Bei den w/z-Werten kleiner 0,44, was einen schrittweisen Wassermangel von  $4,1 \text{ l/m}^3$  darstellt, zeigen beide Kennwerte einen deutlichen Anstieg. Der Wasserüberschuss verändert die Konsistenz in geringerem Maße, da eine Wassersättigung eintritt. Die Werte für die Bingham Fließgrenze sind allerdings ab dem Messpunkt w/z 0,42 negativ. Eine negative Fließgrenze lässt aus physikalischer Sicht keine Beurteilung der Konsistenz zu.

Die generell sehr geringe Bingham Fließgrenze von SVB, die gegen Null konvergiert, erlaubt mit dem hier verwendeten Rheometer und Messprofil keine genaue Bestimmung dieses Parameters. Es muss berücksichtigt werden, dass es sich immer um einen extrapolierten Wert handelt. Über die dynamische Fließgrenze werden jedoch infolge der unterschiedlichen w/z-Werte die Unterschiede in der Konsistenz plausibel und gut erfasst.

- Beurteilung der Konsistenz über die dynamische Fließgrenze und Viskosität bei unterschiedlichen w/z-Werten

In der folgenden Abbildung 48 sind dieselben Ergebnisse der dynamischen Fließgrenze wie in Abbildung 47 zu sehen. Diese sind hier nochmals zur direkten Gegenüberstellung mit der Viskosität aufgetragen.

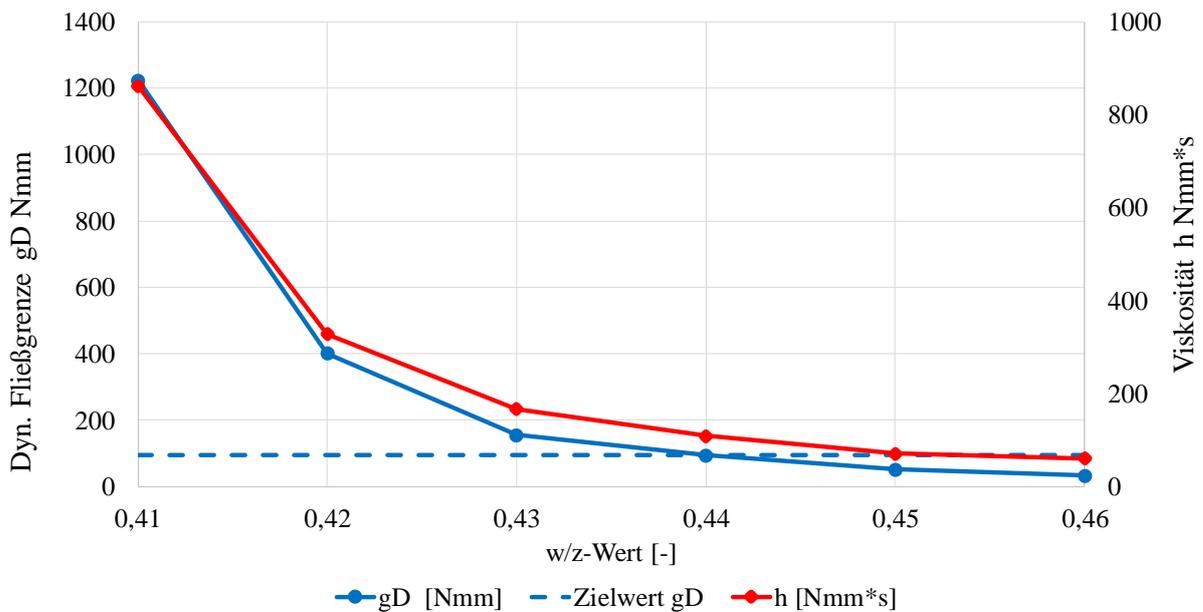


Abbildung 48: Kennlinien über den w/z-Wert mit den Parametern dynamische Fließgrenze und Viskosität der Rezeptur 3b

Im Diagramm der Abbildung 48 ist zusätzlich der Zielwert für g als waagrechte gestrichelte Linie abgebildet. Der Zielwert hat den Betrag von 95 Nmm und liegt bei der idealen Konsistenz mit dem w/z-Wert 0,44 (Wassergehalt 180,4 l/m<sup>3</sup>).

Der Verlauf beider Graphen ist plausibel. Steigende w/z-Werte bewirken eine niedrigere dynamische Fließgrenze und Viskosität. Dass sich die Messpunkte beim w/z-Wert 0,41 fast decken ist Zufall. Die Wertebereiche der dynamischen Fließgrenze auf der primären Vertikalachse und der Viskosität auf der sekundären Vertikalachse sind den Messergebnissen angepasst.

Die folgende Abbildung 49 zeigt ein Rheogramm. Die Eingangswerte dieser Darstellung sind identisch mit den Werten aus Abbildung 48.

Diese Darstellung wird in der Baustoffrheologie oft gewählt, um Einflüsse oder Änderungen der Konsistenz über die rheologischen Kennwerte aufzuzeigen. Da sich über den variierenden w/z-Wert überproportional fallende Graphen einstellen (Abbildung 48), sind die einzelnen Messpunkte auf der Geraden nicht gleichmäßig verteilt.

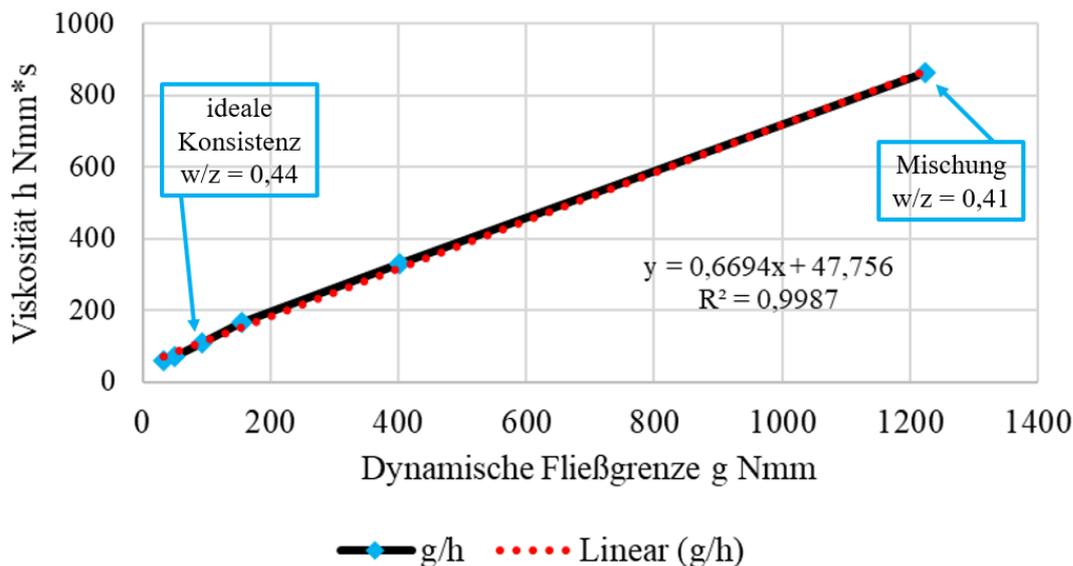


Abbildung 49: Rheogramm mit den Kennwerten dynamische Fließgrenze  $g_D$  und Viskosität  $h$  bei w/z-Werten von 0,41 bis 0,46, Inkrement 0,01 w/z, Rezeptur 3b

Die Darstellung in Form eines Rheogramms, liefert eine erweiterende Diskussionsgrundlage. In diesem Fall wird der Einfluss eines steigenden Wassergehalts rein über zwei rheologische Parameter dargestellt.

Die Messpunkte von w/z 0,41 bis 0,44 sind einzeln auf der Geraden erkennbar. Die Werte von w/z 0,45 bis 0,47 bilden in dem Graphen unten links eine Punktwolke. Eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Konsistenz ist nicht in dem Maße gewährt wie in der Abbildung 48.

Aus den vorangegangenen Abbildungen 47 bis 49 und der einhergehenden Diskussion kann man ableiten, dass unterschiedliche Wassergehalte mit den rheologischen Parametern dynamische Fließgrenze und Viskosität gut abgebildet werden können. Bei dem Kennwert Bingham Fließgrenze ist mit dem hier verwendeten Messsystem für SVB keine realistische Beurteilung der Konsistenz möglich, da zum Teil negative Zahlenwerte ermittelt wurden (Abb. 46/47).

#### 4.4.3 Erstellung von Kennlinien für zusätzliches Fließmittel

Ausgangspunkt zur Erstellung von Kennlinien für Zusätzliches Fließmittel ist in diesem Beispiel eine Mischung mit einem w/z-Wert von 0,41. Die Reduzierung des designierten w/z-Wertes um 0,03 resultiert in einem Wasserdefizit von 12,3 l/m<sup>3</sup>. Der standardmäßige Fließmittelgehalt von 1,80 M.-% v. Z. ist in der Probe enthalten.

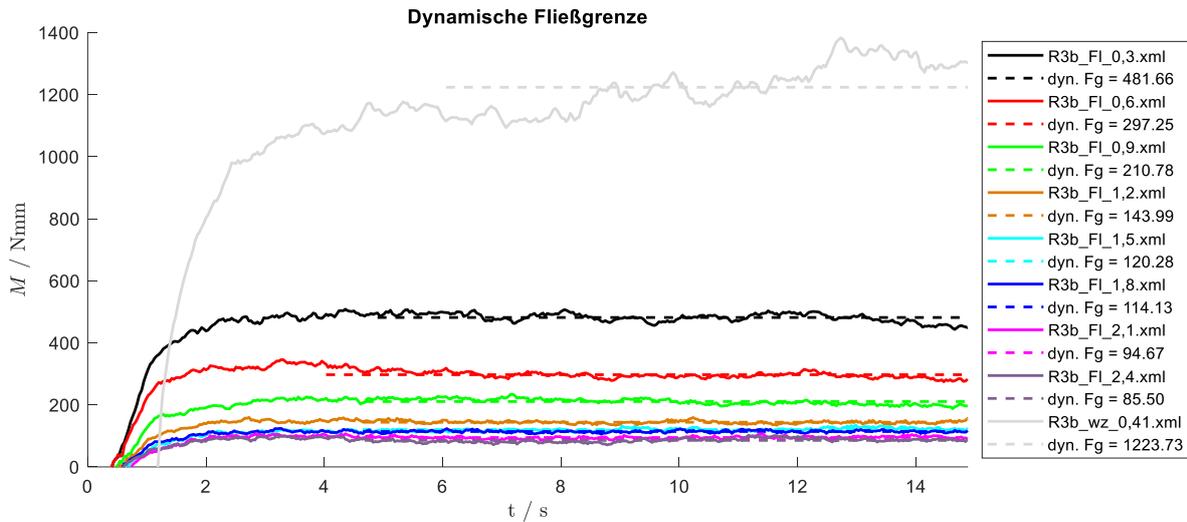


Abbildung 50: Drehmoment über die Zeit von neun Messungen. Ergebnisse aus Phase 1 der Messung. Die eingezeichnete gestrichelte Linie markiert den Bereich, aus dessen Mittelwert die dynamische Fließgrenze (siehe Legende) resultiert. Rezeptur 3b

Die einzelnen Graphen bzw. die daraus jeweils ermittelte dynamische Fließgrenze im Diagramm der Abbildung 50 beschreiben die Ausgangskonsistenz und die Verflüssigung durch schrittweise Zudosierung von Fließmittel in 0,3 M.-% v. Z. Schritten. Die Fließmittelmenge entspricht bei dem Probenvolumen von 40 l 49,2 g FM. Die nachträgliche Fließmittelzugabe bewirkt erwartungsgemäß eine Verflüssigung des Betons. Die Verringerung der dynamischen Fließgrenze bildet diese Verflüssigung ab.

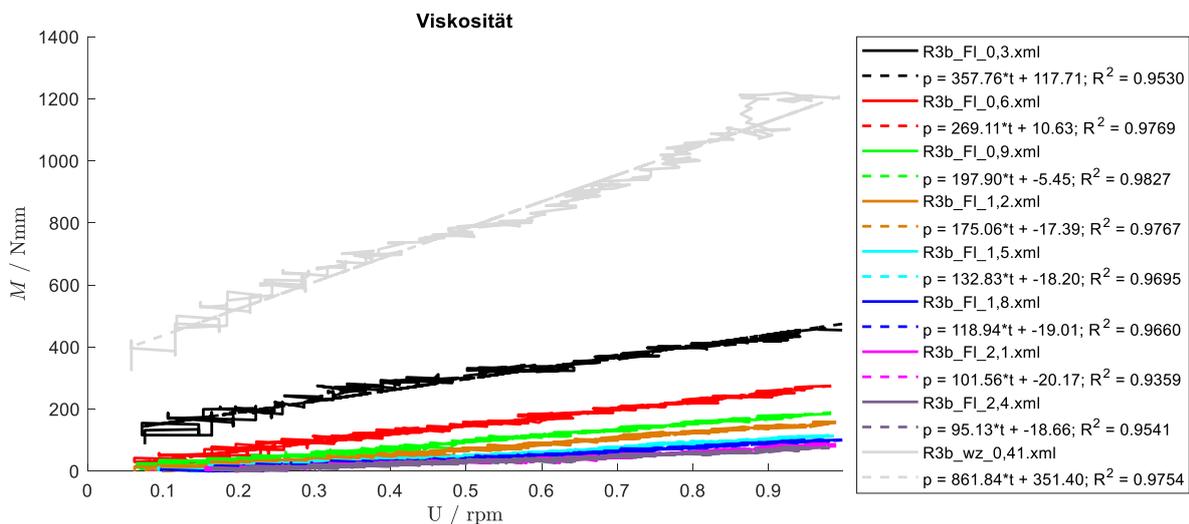


Abbildung 51: Drehmoment über fallende Scherrate bei steigendem Fließmittelgehalt aus Phase 2 der Messung. Eingezeichnet (gestrichelte Ausgleichsgerade) und ausgewertet (Legende) ist dann die Geradengleichung, aus der Viskosität und Bingham Fließgrenze abzulesen sind. Rezeptur 3b

Das Diagramm in Abbildung 51 zeigt analog zu Abbildung 50 die Erfassung der Konsistenz einer zu steifen Mischung bei einer anschließenden schrittweisen Fließmittelzugabe. Nach der

Theorie des Bingham-Modells liefert diese Auswertung die Bingham Fließgrenze und die Viskosität.

Ab der zusätzlichen Menge Fließmittel von 1,20 M% v. Z. ist ein Sättigungsbereich erkennbar, welcher in den Darstellungsformen der Abbildungen 50 und 51 eine eingeschränkte visuelle Beurteilung unterschiedlicher Konsistenz zur Folge hat.

Die Möglichkeiten einer genauen Erfassung der Konsistenz über die drei ermittelten rheologischen Parameter wird in den folgenden Unterpunkten diskutiert.

- Beurteilung der Konsistenz mit den Kennwerten dynamische Fließgrenze und Bingham Fließgrenze bei steigendem Fließmittelgehalt

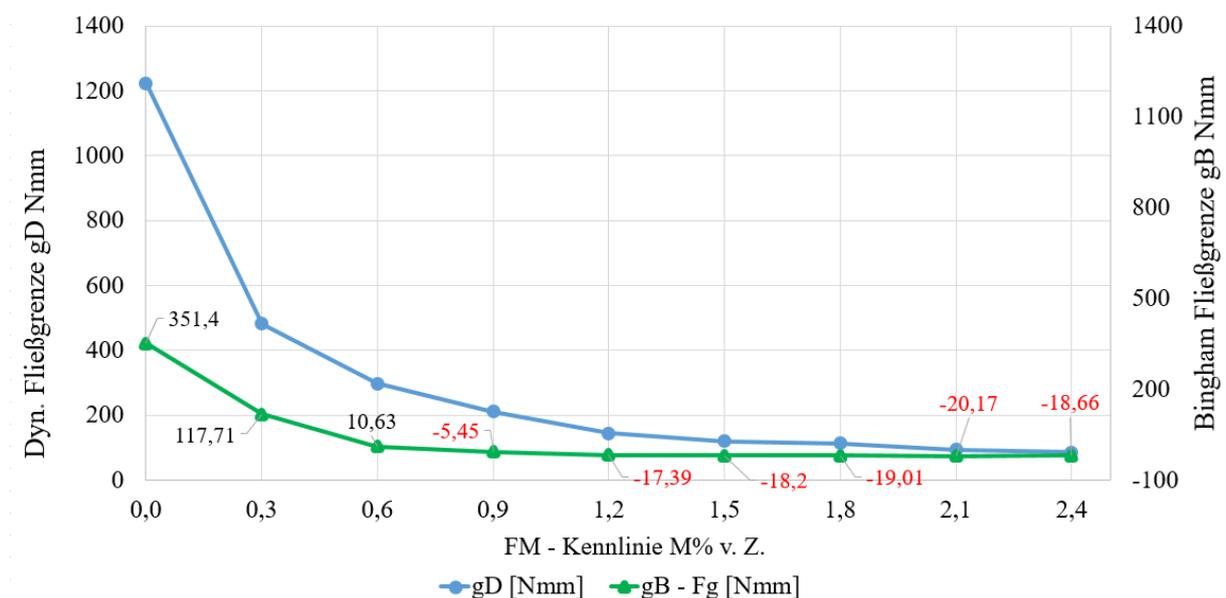


Abbildung 52: Kennlinien für zusätzliches Fließmittel der Rezeptur 3b, Vergleich dynamische Fließgrenze  $g_D$  mit Bingham Fließgrenze  $g_B$

Wie zu erwarten, stellt sich durch die schrittweise Nachdosierung von Fließmittel eine Verflüssigung des Betons ein. Die Form der beiden Graphen ist auch in diesem Fall plausibel. Allerdings liefert die Beurteilung über das Bingham-Modell mit der Bingham Fließgrenze ab einer zusätzlichen Fließmitteldosierung von 0,6 M.-% v. Z. negative Zahlenwerte. Diese Ergebnisse können nicht interpretiert werden. Mit dem Kennwert dynamische Fließgrenze ist über den gesamten Konsistenzbereich eine plausible Erfassung und Darstellung der Änderungen in der Konsistenz möglich.

- Beurteilung der Konsistenz bei steigendem Fließmittelgehalt über die dynamische Fließgrenze und Viskosität

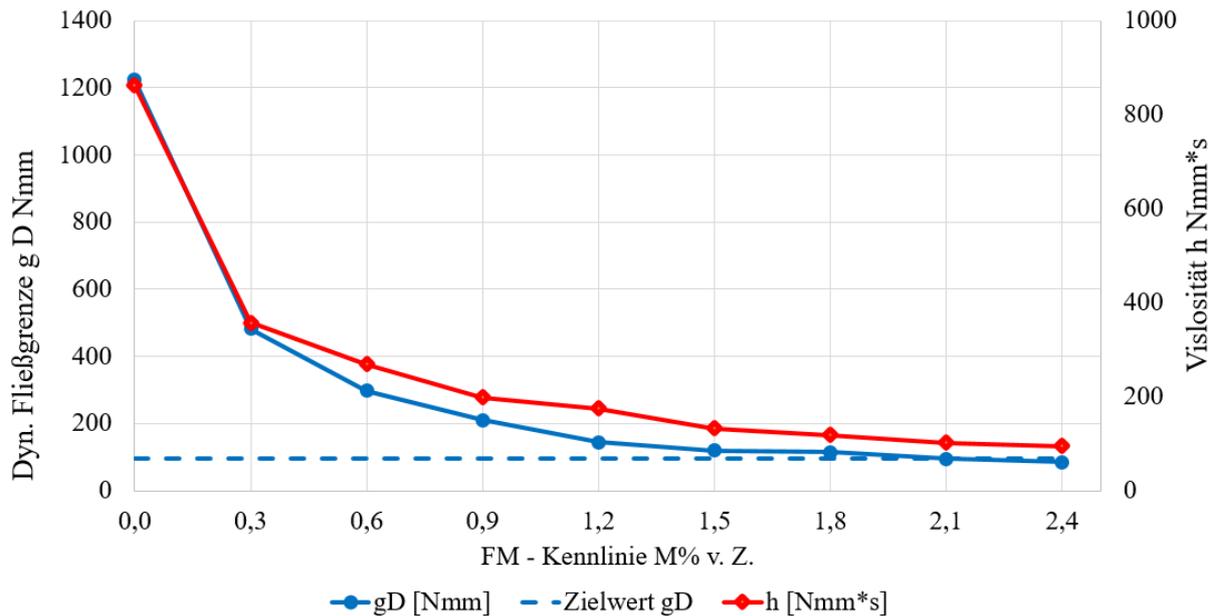


Abbildung 53: Kennlinien für zusätzliche Fließmittel, Vergleich dynamische Fließgrenze und Viskosität. Die waagrecht gestrichelte Linie stellt den Zielwert der dynamischen Fließgrenze dar, Rezeptur 3b

In Abbildung 53 sind die unterschiedlichen Wertebereiche der primären und der sekundären vertikalen Achse zu beachten. Dass die Messpunkte bei 0,0 und 0,3 M.-% v. Z. zusätzlichem Fließmittel nahezu deckungsgleich sind, ist der hier gewählten Skalierung geschuldet. Eine Grundsatzdiskussion über mögliche rheologische Wirkmechanismen von unterschiedlichem Fließmittelgehalt ist im Kapitel 2.1.4 geführt.

In der folgenden Abbildung 54 sind die Ergebnisse aus Abbildung 53 in einer weiteren möglichen Darstellungsform als Rheogramm präsentiert.

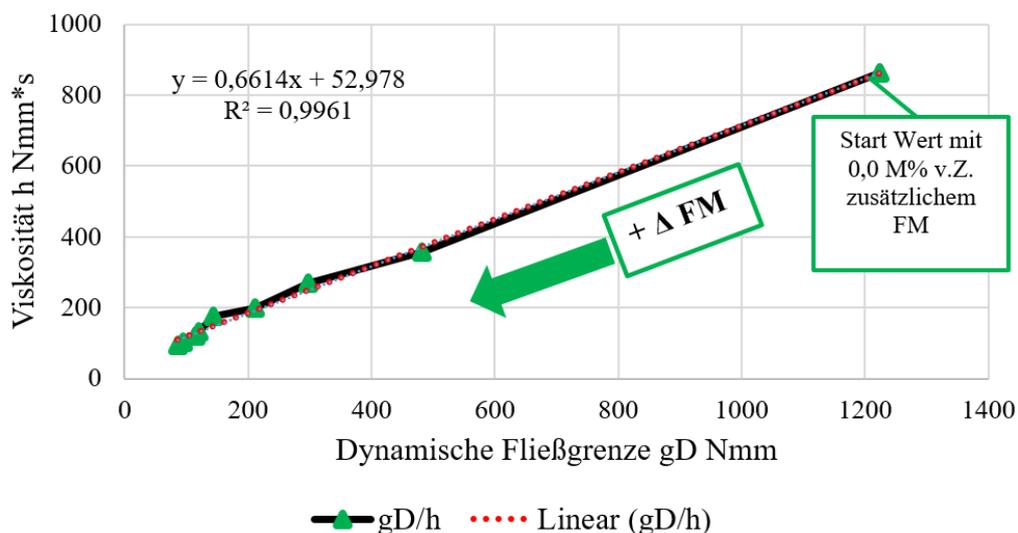


Abbildung 54: Wirkmechanismus von zusätzlichem Fließmittel auf dynamische Fließgrenze und Viskosität dargestellt in einem Rheogramm, Rezeptur 3b

Die Wirkung des zusätzlichen Fließmittels erzeugt im Diagramm der Abbildung 53 zwei überproportional fallende Graphen. Daher sind die Messpunkte in Abbildung 54 nicht gleichmäßig auf der Geraden verteilt.

Vielmehr erzeugt der Sättigungsbereich ab etwa 1,20 M.-% v. Z. zusätzlichem Fließmittel eine Punktwolke unten links in dem Rheogramm.

Zusammenfassend kann man bei den Ergebnissen zur Erstellung von Kennlinien für zusätzliches Fließmittel folgende Schlüsse ziehen:

- Anhand der Ergebnisse zur Erstellung einer Kennlinie für zusätzliches Fließmittel wurde in Abbildung 52 gezeigt, dass mit dem Parameter Bingham Fließgrenze keine aussagekräftigen Ergebnisse zu erzielen sind.
- Die Ergebnisse der dynamischen Fließgrenze und der Viskosität zeigen, dass sich die Zudosierung von Fließmittel auf beide Parameter auswirkt. Zusätzliches Fließmittel verringert die dynamische Fließgrenze und die Viskosität.
- Dass Fließmittel auch Einfluss auf die Viskosität ausübt, wurde z. B. von *Fleischmann* [24] und *Wüstholtz* [21] gezeigt. Die Ergebnisse in vorliegender Arbeit decken sich mit den Erkenntnissen dieser Autoren.

#### 4.4.4 Erstellung von Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer

Die Ausgangsmischung zum Generieren von Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer basiert auf einem w/z-Wert von 0,47 (Rezeptur 3b). Bei diesem w/z-Wert stellt sich ein Wasserüberschuss von  $12,3 \text{ l/m}^3$  ein. Mit visueller Beurteilung und haptischer Prüfung im Mischer wurde bei dieser Mischung Sedimentation festgestellt. Eine Zudosierung von Stabilisierer über die Zielkonsistenz hinaus ist prinzipiell nicht notwendig, da der Beton dann wieder zu steif wird. Diese weitere Nachdosierung dient der Verbreiterung der Datenbasis und erlaubt die Darstellung und Diskussion der Wirkmechanismen von nachträglich zugegebenem und untergemischtem Stabilisierer.

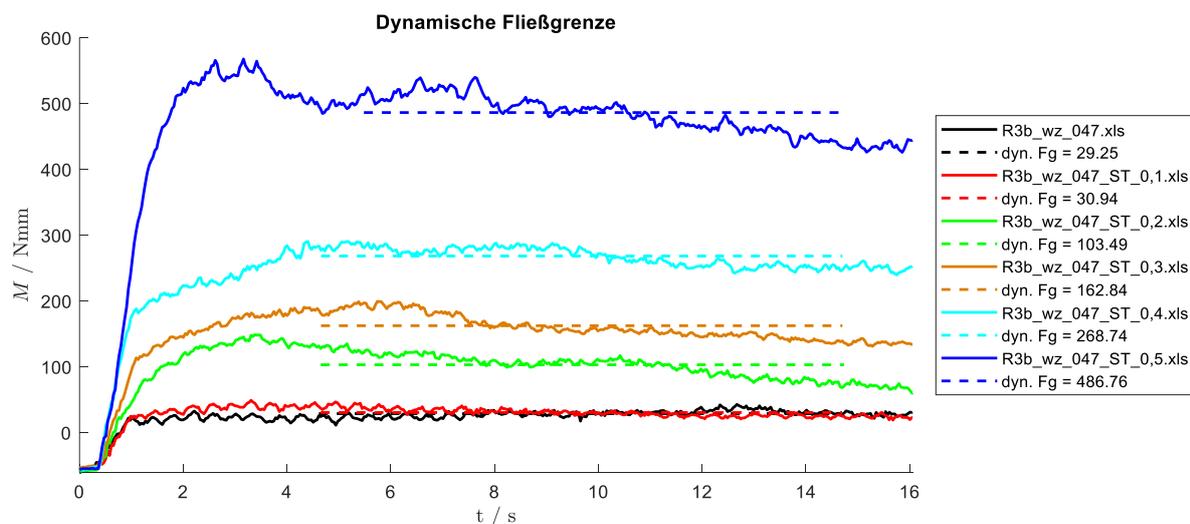


Abbildung 55: Drehmoment über die Zeit von sechs Messungen an einer anfänglich zu flüssigen Mischung bei steigendem Stabilisierergehalt, Rezeptur 3b

Die Zudosierung von 0,1 M.-% v. Z. Stabilisierer (roter Graph) bewirkt kaum eine Änderung gegenüber der Ausgangskonsistenz (schwarzer Graph). Die erneute Zugabe von 0,1 M.-% v. Z. zeigt Wirkung (grüner Graph). Der Beton erreicht eine stabile Konsistenz und sedimentiert nicht mehr. Diese Aussage basiert auf visueller Beurteilung und haptischer Prüfung. Die Stabilität muss an diesem Punkt vorhanden sein, da die dynamische Fließgrenze 103,49 Nmm beträgt und somit über dem Zielwert von 95 Nmm liegt.

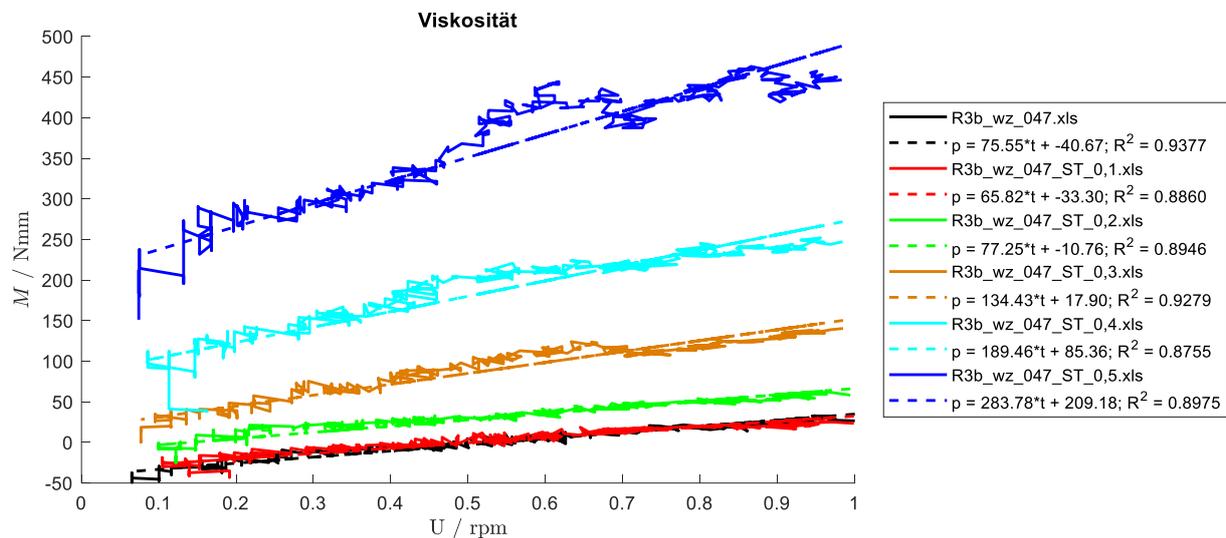


Abbildung 56: Drehmoment über fallende Scherrate aus Phase 2 der Messung. Eingezeichnet (gestrichelte Ausgleichsgerade) und ausgewertet (Legende) ist dann die Geradengleichung, aus der Viskosität und Bingham Fließgrenze abzulesen sind, Rezeptur 3b

Die Ergebnisse in Abbildung 56 zeigen prinzipiell, dass die Konsistenzänderung durch zusätzlichen Stabilisierer über die Viskosität erfasst werden kann. Jedoch zeigen auch hier die ersten drei Prüfungen bei sehr niedriger Konsistenz einen Schnittpunkt mit der x-Achse. Dies führt zwangsläufig zu negativen Werten für die Bingham Fließgrenze. In den weiteren Unterkapiteln werden die Möglichkeiten einer differenzierten Darstellung der Konsistenzänderung infolge eines steigenden Stabilisierergehaltes diskutiert. Dazu werden die ermittelten rheologischen Kennwerte zur Beurteilung der Konsistenz aus den Abbildungen 55/56 verglichen und auf ihre Aussagekraft diskutiert.

- Beurteilung der Konsistenz mit den rheologischen Parametern dynamische Fließgrenze und Bingham Fließgrenze bei steigendem Stabilisierergehalt

Im Diagramm der Abbildung 57 ist zu sehen, dass die ermittelten Werte der Bingham Fließgrenze bei den ersten drei Ergebnissen negative Zahlenwerte aufweisen. Diese Ergebnisse lassen aus physikalischer Sicht mit diesem Parameter keine Beurteilung der Konsistenz zu.

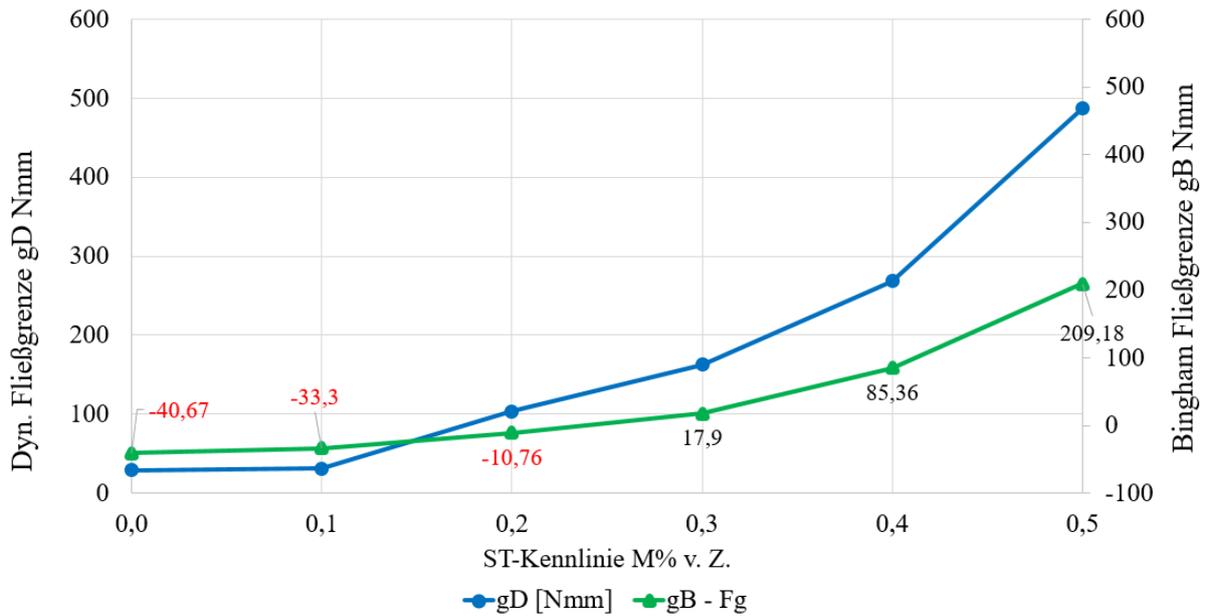


Abbildung 57: Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer der Rezeptur 3b, Vergleich dynamische Fließgrenze mit Bingham Fließgrenze, Inkrement 0,1 M.-% v. Z. Stabilisierer

Die wesentliche Erkenntnis aus dem Ergebnis in Abbildung 57 ist, dass die steifer werdende Konsistenz durch zusätzlichen Stabilisierer mit dem Parameter dynamische Fließgrenze plausibel erfasst werden kann.

- Beurteilung der Konsistenz über dynamische Fließgrenze und Viskosität bei steigendem Stabilisiergehalt

Der Graph der dynamischen Fließgrenze ist in der folgenden Abbildung 58 identisch dem in Abbildung 57. Zusätzlich ist mit der gestrichelten Linie die angestrebte Konsistenz, definiert über die dynamische Fließgrenze, als Zielwert eingetragen.

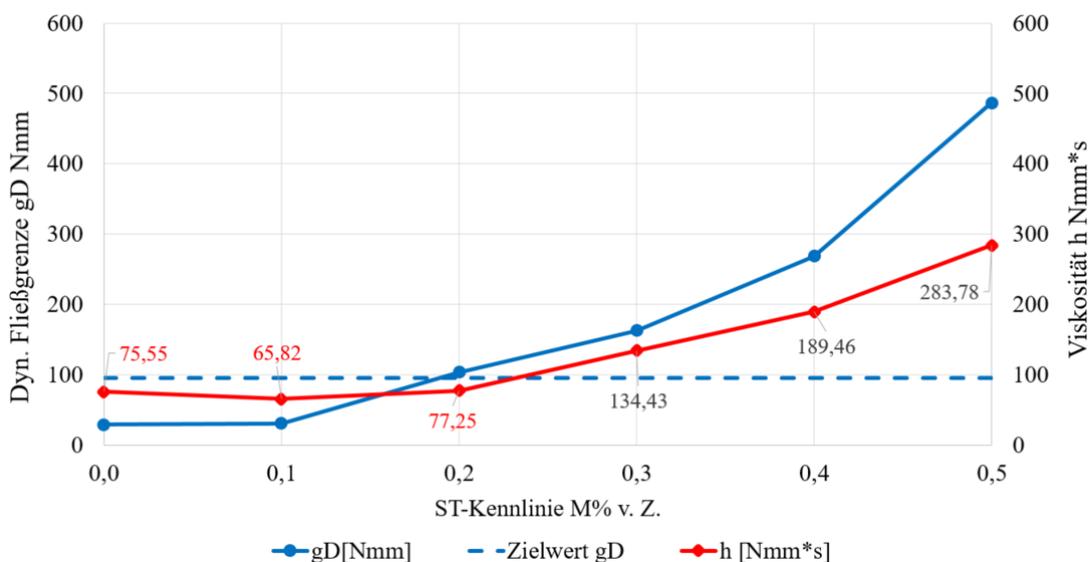


Abbildung 58: Beurteilung der Konsistenz über die dynamische Fließgrenze und Viskosität bei steigendem Stabilisiergehalt, Rezeptur 3b

Der Verlauf der Graphen in Abb. 58 belegt, dass sich der zusätzliche Stabilisierer neben der dynamischen Fließgrenze auch auf die Viskosität auswirkt. Die Zahlenwerte der Viskosität liefern jedoch in den ersten drei Punkten ein diffuses Bild. Die Zugabe von 0,1 M.-% v. Z. Stabilisierer bewirkt eine niedrigere Viskosität. Die zweite Zugabe bewirkt einen unwesentlichen Anstieg über den Startwert hinaus. Im Gegensatz dazu zeigt der Graph der dynamischen Fließgrenze einen deutlichen Anstieg nach der zweiten Zugabe (über den Zielwert hinaus). Hier ist ein wesentlicher Unterschied in der Erfassung der Konsistenz erkennbar. Eine Veränderung in den Verarbeitungseigenschaften wird in diesem Fall mit dem Kennwert dynamische Fließgrenze eindeutig besser erfasst als mit dem Kennwert Viskosität. Diese Tatsache zeigte sich auch in anderen, hier nicht dargestellten, Versuchsserien.

Die Wirkungsweise dieses Zusatzmittels mit stabilisierender Wirkung wird in der folgenden Abbildung 59 über die Parameter dynamische Fließgrenze und Viskosität in einem Rheogramm nochmals dargestellt.

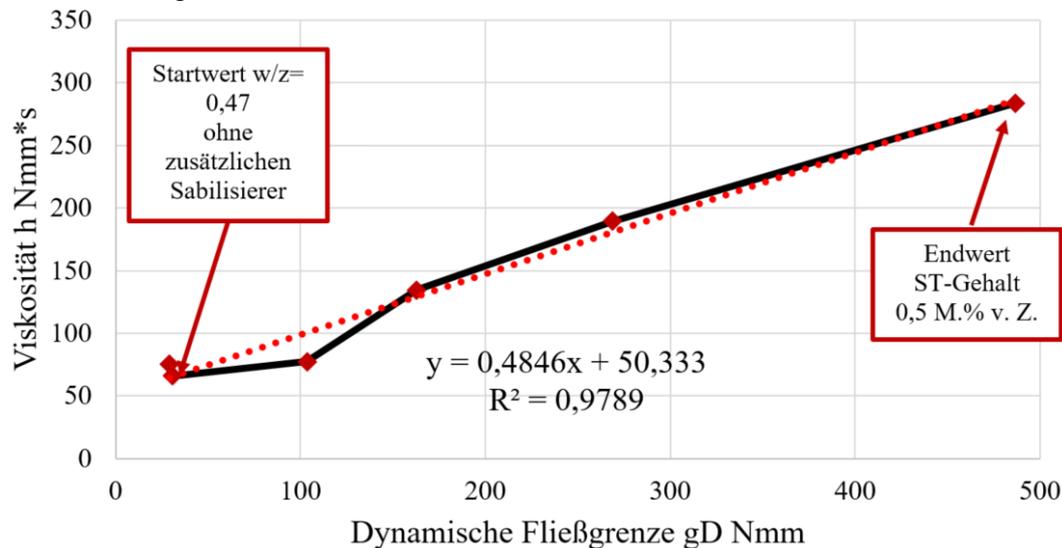


Abbildung 59: Wirkungsweise von zusätzlichem Stabilisierer auf die rheologischen Parameter dynamische Fließgrenze und Viskosität in einem Rheogramm, Rezeptur 3b

Da bei der Erstellung einer Kennlinie für zusätzlichen Stabilisierer kein Sättigungsbereich vorhanden ist, liegen die Punkte auf der Geraden nahezu gleichmäßig verteilt. Eine Ausnahme bilden die ersten zwei Punkte, da hier die Zugabe von 0,1 M.-% v. Z. Stabilisierer kaum Wirkung zeigte. Aus den beiden zuletzt gezeigten Abbildung 58 und 59 lässt sich klar belegen, dass in diesem Fall der zusätzliche Stabilisierer die dynamische Fließgrenze und die Viskosität erhöht.

#### 4.4.5 Vergleich der möglichen Präzision von dynamischer Fließgrenze und Viskosität

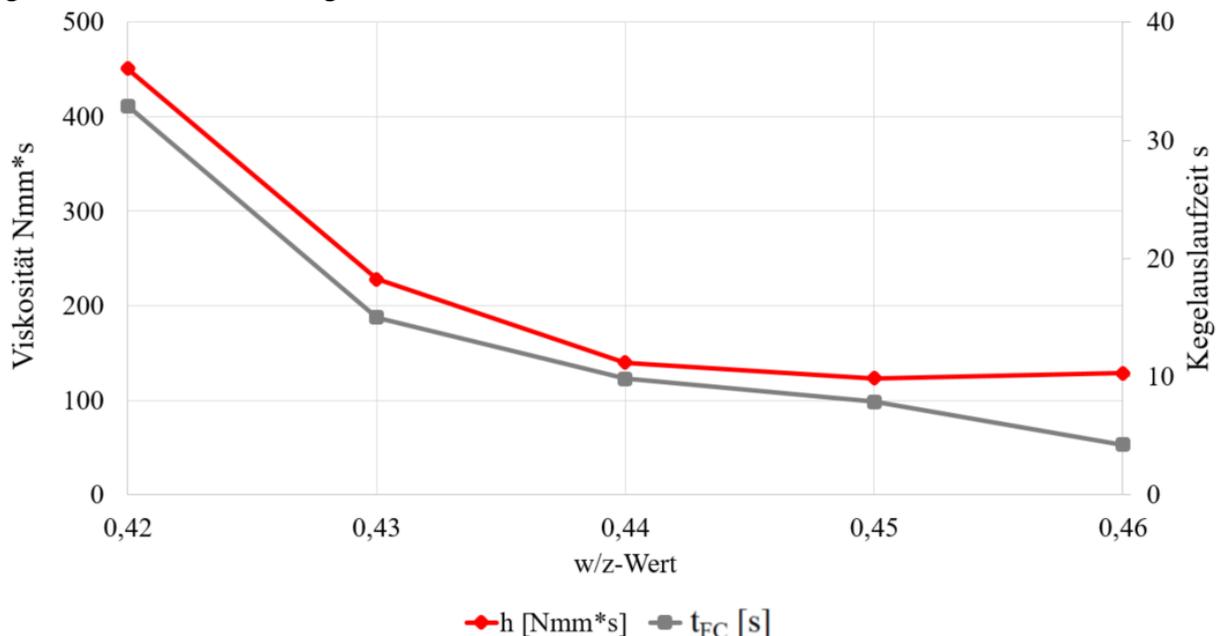
Im Verlauf der umfangreichen rheologischen Untersuchungen mit verschiedenen SVB-Rezepturen konnte der Kennwert dynamische Fließgrenze als ein zuverlässiger Parameter zur Erfassung der Konsistenz ermittelt werden. Mit der Viskosität ließen sich überwiegend aussagekräftige Zahlenwerte bzw. Graphen generieren. Im Detail sind bei der Ermittlung der Viskosität jedoch, wenn auch selten, nicht plausible Ergebnisse ermittelt worden. Eine solche Ausnahme wird in diesem Abschnitt betrachtet.

Die Messwerte in Tabelle 9 sind Teil einer Prüfreihe zur Erstellung von Kennlinien für den Wasseranspruch. Eine vollständige grafische Abbildung dieser entsprechenden Versuchsreihe ist in den Diagrammen der Abbildungen 43 und 44 zu sehen.

*Tabelle 9: Gegenüberstellung aller relevanten Ergebnisse zur Erfassung der Konsistenz bei unterschiedlich wirksamen Wassergehalten (Kennlinien für Rezeptur 3b)*

Wasser	w/z-Wert	gD	h	Kegelsetzfließmaß	Kegelauslaufzeit
l/m <sup>3</sup>	-	[Nmm]	[Nmm*s]	SF <sub>FC</sub> [cm]	t <sub>FC</sub> [s]
172,2	0,42	484,80	450,74	51,00	32,91
176,30	0,43	207,04	228,05	63,00	15,01
180,40	0,44	110,11	140,04	74,50	9,82
184,50	0,45	106,38	123,14	75,50	7,87
188,60	0,46	93,55	128,76	81,50	4,27

Die rot hinterlegten Werte der Tabelle 9 in der Spalte für die Viskosität h zeigen nicht plausible Zahlenwerte. Eine ungenaue oder fehlerhafte Probenherstellung kann in diesem Fall ausgeschlossen werden. Das zeigen die Ergebnisse der dynamischen Fließgrenze, der Kegelauslaufzeit und des Setzfließmaßes. Die Mischung mit dem w/z-Wert von 0,46 enthält 4,1 l/m<sup>3</sup> mehr Wasser als die mit einem w/z-Wert von 0,45. Dies resultiert in einer niedrigeren dynamischen Fließgrenze, einer geringeren Kegelauslaufzeit und einem größeren Setzfließmaß. Nach beton-technologischem Basiswissen und gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen müsste bei der Mischung mit dem w/z-Wert von 0,46 mit 4,1 Liter zusätzlichem Wasser im Gegensatz zu dem w/z-Wert 0,45 auch die Viskosität niedriger sein. Dies ist jedoch in dem hier diskutierten Ergebnis bei einer Messung nicht der Fall. Diese Unstimmigkeit ist in dem Diagramm der folgenden Abbildung 60 nochmals grafisch dargestellt. Der rote Graph bildet die Viskosität h ab. Trotz eines höheren Wassergehalts bei einem w/z-Wert von 0,46 steigt der Graph an. Im Gegensatz dazu fällt die Kegelauslaufzeit deutlich ab.



*Abbildung 60: Viskosität und Kegelauslaufzeit vs. w/z-Wert. Rezeptur 3b*

In der vorliegenden Arbeit ist die nachgewiesene und zuverlässige Erfassung der Verarbeitungseigenschaften von SVB ein elementarer Bestandteil. Eine Abweichung oder ein Ausreißer in den Messergebnissen, wie in Tabelle 9 und der Abbildung 60 gezeigt, erlaubt keine präzise Beurteilung der Konsistenz. Wie eingangs beschrieben, sind solche unplausiblen Ergebnisse für die Viskosität selten festgestellt worden. Dennoch sind diese Ausnahmen vorhanden und somit problematisch für den Anspruch einer präzisen Erfassung der Konsistenz von SVB. Aus diesen Zusammenhängen ergaben sich Entscheidungen für das weitere Vorgehen, die im folgenden Kapitel erörtert werden.

#### 4.4.6 Zusammenfassung zur Erstellung einer Wissensdatenbank und Bewertung der rheologischen Parameter

In den vorangegangenen Diskussionen wurden rheologische Kennwerte, die aus unterschiedlichen Messmethoden resultieren, verglichen. Eine Gegenüberstellung der Viskosität und der dynamischen Fließgrenze zeigte, dass die Wirkmechanismen der variierenden Komponenten Wasser, Fließmittel und Stabilisierer mit beiden Parametern rheologisch erfasst und abgebildet werden können.

Zur Ermittlung von rheologischen Kennwerten wird in wissenschaftlichen Arbeiten vielfach das Bingham-Modell verwendet. Eine solche Prüfung wird auch als Zweipunktversuch bezeichnet, da sich daraus die zwei rheologischen Kennwerte Bingham Fließgrenze und Viskosität berechnen lassen. Dies stellt prinzipiell einen erheblichen Vorteil in der Erfassung der Konsistenz dar. Mit dem hier verwendeten Messprofil werden diese zwei Parameter in Phase 2 der Messung, einer abfallenden Rampe, erfasst.

Zusammenfassend ist an diesem Punkt festzustellen, dass mit dem hier verwendeten Messsystem über den Parameter Bingham Fließgrenze keine ausreichende Differenzierung unterschiedlicher Konsistenzen möglich ist. Vielmehr zeigt sich, dass dieser Parameter bei den hier untersuchten Selbstverdichtenden Betonen gegen null konvergiert und zum Teil auch negative Werte nahe null erzeugt. Diese Tatsache deutet darauf hin, dass die hier untersuchten Betone besser mit dem Modell einer Newtonschen Flüssigkeit zu beschreiben sind. Daher wurde die Bingham Fließgrenze auch nicht zur weiteren Beurteilung der Konsistenz herangezogen.

Im Kapitel 2 wurden Zusammenhänge diskutiert, die bei SVB von einem Newton-Fluid ausgehen. Die Ergebnisse vorliegender Arbeit belegen diese These. Diese Tatsache ist z. B. in Kap. 4.3, Abbildung 39 und der einhergehenden Diskussion gezeigt.

Letztlich muss man auch berücksichtigen, dass es sich bei dem Kennwert Bingham Fließgrenze immer um einen linear extrapolierten Modell-Wert des einfachsten linearen Modells für Suspensionen mit Fließgrenze handelt. Die Schwächen dieses Modells sind bekannt. Diese Tatsache belegt folgendes Zitat nach *Mezger* aus [50]:

„Die *Bingham Fließgrenze* beschreibt den Übergang vom Ruhe- zum Fließzustand jedoch nur **relativ ungenau**. Deshalb sollte dieses Modell nur für sehr, sehr einfache Qualitätskontrollen verwendet werden.“

Die Erfassung und Beurteilung der Konsistenz von SVB stellt aber keine einfache Qualitätskontrolle dar. Vielmehr handelt es sich um komplexe Zusammenhänge und Wirkmechanismen. Für eine angemessene und präzise Erfassung der Konsistenz muss ein Modellparameter verwendet werden, der die maximal mögliche Präzision aufweist.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass mit dem rheologischen Parameter dynamische Fließgrenze eine sehr solide und zuverlässige Erfassung und Beschreibung variierender Verarbeitungseigenschaften möglich ist. Die Ermittlung dieses Kennwertes basiert auf der für die SVB-Verarbeitung typischen langsamen Fließgeschwindigkeit. Die dynamische Fließgrenze wird durch eine konstante Scherung ermittelt. Infolge der geringen Schergeschwindigkeit kann sich auch bei einer grobdispersen Suspension wie frischem SVB, unter laminaren Bedingungen, ein stationärer Scherprozess einstellen.

Nach der Theorie des Bingham-Modells konnten auch in der Mehrzahl der hier diskutierten Resultate aussagekräftige Ergebnisse über den Kennwert Viskosität erzielt werden.

Das lineare Fließverhalten zur Bestimmung der Viskosität lieferte bei der Ermittlung der Kennlinie über den  $w/z$ -Wert und für zusätzliches Fließmittel befriedigende Resultate. Bei der Ermittlung für zusätzlichen Stabilisierer sind aber auch Ergebnisse mit diffusem Charakter aufgetreten. Die Ungenauigkeiten sind nicht ausgeprägt, aber vorhanden.

Eine mögliche Erklärung der unterschiedlichen Genauigkeit der Parameter dynamische Fließgrenze und Viskosität kann auf Grundlage des Scherprozesses (Messprofil) gegeben werden. Die Viskosität ist das Resultat einer verzögerten Scherbewegung mit dem Endpunkt null. Ein stationärer Scherprozess stellt sich infolge der abnehmenden Schergeschwindigkeit nicht in dem Maße wie bei der konstanten Scherung ein. Das Bestimmtheitsmaß der Graphen zur Ermittlung der Viskosität lag jedoch bei allen Messungen zur Erstellung der Kennlinie für Wasseranspruch und der Kennlinie für zusätzliche Fließmittel zwischen 0,94 und 0,98. Bei den Untersuchungen zur Erstellung der Kennlinie für zusätzliche Stabilisierer liegt das Bestimmtheitsmaß zwischen 0,88 bis 0,94. Dies zeigt prinzipiell, dass der Modellparameter Viskosität bzw. die Steigung der Geraden auf relativ genauen Werten basieren. Der lineare Charakter bei der Berechnung der Viskosität ist mit der hier eingesetzten Messmethodik immer vorhanden. Das Bestimmtheitsmaß nahe 1 zeigt auch, dass eine Bestimmung der Fließgrenze und Viskosität nach der Herschel/Bulkley Modellfunktion nicht sinnvoll ist. Für diese Anwendung müsste zusätzlich der Herschel/Bulkley-Index (Hochzahl  $p$ ) bestimmt werden. Dabei gilt:  $p < 1$  für scherverdünnendes,  $p > 1$  für scherverdickendes und  $p = 1$  für Bingham-Verhalten [50]. Ob das Material scherverdickende oder scherverdünnende Eigenschaften aufweist, kann mit der hier verwendeten Prüfmethode nur optisch an den Messkurven zur Ermittlung der Viskosität nachgewiesen werden. Da sich ausnahmslos bei allen Ergebnissen ein nahezu hundertprozentiges lineares Fließverhalten einstellte, was einem Bingham Verhalten entspricht, wurden dazu keine weiteren Untersuchungen durchgeführt.

Für vorliegende Untersuchungen wurde der Beton maximal mit 1 U/min geschert (Ausnahme Abb. 37), das entspricht 0,0166 1/s Umdrehungen. Der Winkel, der bei einer Messung zurückgelegt wird, ist 140°. Dies ist im Vergleich zu den allermeisten Messsystemen bzw. Rheometern verschwindend gering. *Feys et al.*, zum Beispiel, verwendeten bei ihren Untersuchungen ein Rotationsrheometer (ConTec viscometer 5) und ermittelten rheologische

Parameter bei 0,2 bis 1,0 1/s, was 12 bis 60 U/min entspricht [56]. Dies verdeutlicht den Unterschied in der Messmethodik und den daraus möglichen und ableitbaren Erkenntnissen.

Auf Grundlage der Kennwerte dynamischen Fließgrenze und Viskosität wurde die Erstellung von rheologischen Kennlinien für eine Rezeptur gezeigt (Abb. 48/53/58).

Diese Ergebnisse werden hier nochmals übersichtlich und komprimiert dargestellt. Die ermittelten Rohdaten aus Schergeschwindigkeit und Scherwiderstand sind bei gegebenem w/z-Wert oder gegebener Zusatzmitteldosierung erfasst. Die daraus abgeleiteten/berechneten Messpunkte bzw. Kennlinien sind Elemente einer systematisch erstellten Wissensdatenbank. Das Programm zur Aussteuerungsberechnung kann eine eingelesene Wissensdatenbank in Tabellenform und als Graphen anzeigen. Die folgende Tabelle 10 zeigt die komplette Wissensdatenbank der Rezeptur 3b in Tabellenform. In den Tabellen wird statt des Terminus „Kennlinie“ der Begriff „Messreihe“ verwendet. Die Messreihen sind mit dem w/z-Wert bzw. dem zusätzlichen Zusatzmittelgehalt und den entsprechenden Werten für  $g_D$  und  $h$  definiert.

*Tabelle 10: Wissensdatenbank in Zahlenwerten, definiert durch jeweils drei Kennlinien (=Messreihen), beschrieben durch dynamische Fließgrenze  $g_D$  in Nmm und Viskosität  $h$  in Nmm\*s, Rezeptur 3b*

Betontyp: SVB  
 Zielwert dynamische Fließgrenze  $g_{Ziel}$  [Nmm]: 95  
 Zielwert relative Viskosität  $h_{Ziel}$  [Nmm\*s] : 105

w/z-Messreihen:			Stabilisierer-Messreihen:				Fließmittel-Messreihen:			
w/z [-]	$g_D$ [Nmm]	$h$ [Nmm*s]	w/z [-]	ST [-]	$g_D$ [Nmm]	$h$ [Nmm*s]	w/z [-]	FM [-]	$g_D$ [Nmm]	$h$ [Nmm*s]
0.41	1223.73	861.84	0.47	0.00	28.75	75.55	0.41	0.00	1223.73	861.84
0.42	400.99	328.53	0.47	0.10	30.94	65.82	0.41	0.30	481.66	357.76
0.43	155.16	166.56	0.47	0.20	105.10	77.25	0.41	0.60	297.25	269.11
0.44	93.64	109.27	0.47	0.30	162.84	134.43	0.41	0.90	210.78	197.90
0.45	56.32	75.88	0.47	0.40	268.74	189.46	0.41	1.20	143.99	175.06
0.46	33.42	60.06	0.47	0.50	486.76	283.78	0.41	1.50	120.28	132.83
							0.41	1.80	114.13	118.94
							0.41	2.10	94.67	101.56
							0.41	2.40	85.50	95.13

Die Zielkonsistenz weist eine dynamische Fließgrenze  $g_D$  von 95 Nmm auf, der Zielwert der Viskosität  $h$  liegt bei 105 Nmm\*s.

Die folgende Abbildung 61 zeigt einen Plot der Eingangswerte aus Tabelle 10 in Form von Graphen. Diese Darstellung kann dem Ersteller einer Wissensdatenbank zur Plausibilitätskontrolle dienen. Die Berechnung und Darstellung etwaiger Korrekturmaßnahmen zur Optimierung einer abweichenden Konsistenz erfolgt anhand der Graphen in den Diagrammen.

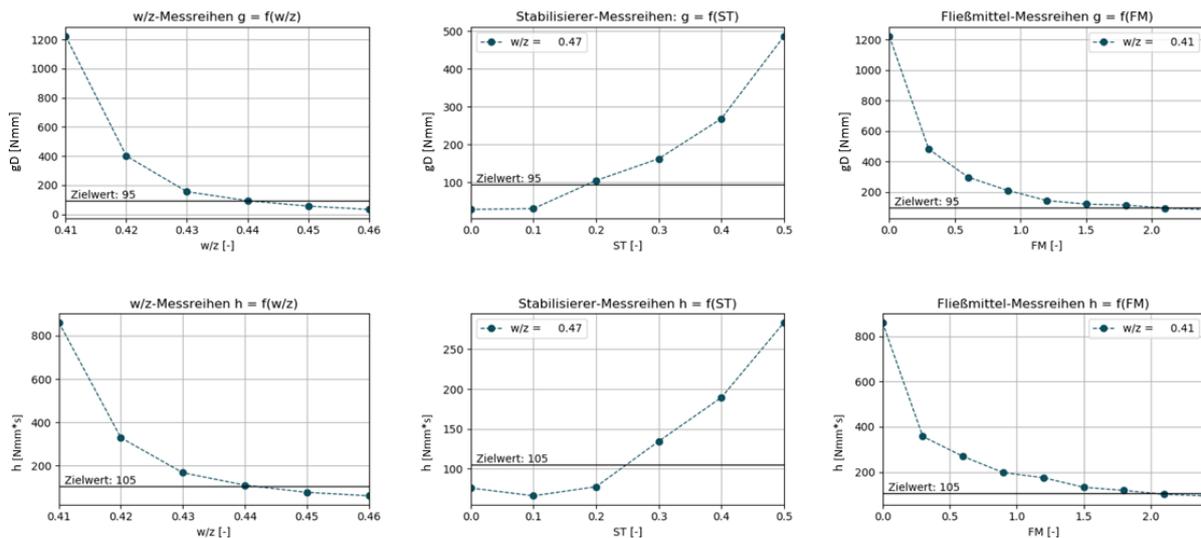


Abbildung 61: Grafische Darstellung einer Wissensdatenbank mit Kennlinien für Wasseranspruch ( $w/z$ -Messreihen links), Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer (Stabilisierer-Messreihen Mitte) und Kennlinien für zusätzliches Fließmittel (Fließmittel-Messreihen, rechts) Rezeptur 3b

Die Diagramme in Abbildung 61 zeigen oben die Kennlinien der dynamischen Fließgrenze  $g_D$  und unten die Kennlinien mit der Viskosität  $h$ .

Wie gezeigt, erfolgte die Erfassung der Konsistenz in den hier diskutierten Arbeiten über zwei Parameter. Dieses Vorgehen ist der Tatsache geschuldet, dass in den einschlägigen Normen und Richtlinien zwei separate Kenngrößen diskutiert werden. Über die rheologischen Ersatzverfahren Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit wird nach der SVB-Richtlinie des DAfStb für eine Rezeptur ein Verarbeitungsfenster definiert und die Konsistenz beurteilt [9]. DIN EN 206 [15] und die Europäischen Richtlinien für SCC [7] legen über das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit Konsistenzklassen für SVB fest.

Diese Klassifizierung über zwei Prüfungen liegt dem Bingham-Modell zugrunde, welches auf dem Vorhandensein einer messbaren Bingham Fließgrenze und Viskosität basiert.

Prinzipiell kann die Beurteilung der Konsistenz und die Berechnung zur Aussteuerung über die linearen Zusammenhänge, wie in den Rheogrammen präsentiert (Abb. 49/54/59), erfolgen. Dieses Vorgehen würde dem Anspruch gerecht, zwei Werte vollständig integriert zu haben, allerdings mit dem Nachteil, dass die beiden Werte keinem geschlossenen Modell zugrunde liegen.

In Tabelle 9 und Abbildung 60 wurde gezeigt, dass bei der Bestimmung der Viskosität unkalkulierbare Streuungen der Messwerte festgestellt worden sind. Bei einer Aussteuerung über Rheogramme würde man solche Ungenauigkeiten in Kauf nehmen und eine Fehlerfortpflanzung akzeptieren.

Wie bereits oben diskutiert, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die rheologische Charakterisierung von SVB hier näherungsweise besser mit dem Newtonschen Modell, einer Flüssigkeit ohne Fließgrenze, korreliert als mit einem Bingham-Körper.

Die hier diskutierten Erkenntnisse haben zur Entscheidung geführt, die dynamische Fließgrenze als Hauptsteuerparameter zu wählen.

Eine Festlegung dieser Art ist auch in DIN EN 206 gegeben und im Kapitel 2.2.3 gezeigt. Dort wird das Setzfließmaß als Maß für die Konsistenz definiert. Die Festlegung auf die dynamische Fließgrenze als Hauptsteuerparameter zur Optimierung der Konsistenz ist prinzipiell ein äquivalenter Schritt, wenn eine Bingham Fließgrenze nicht herangezogen werden kann.

Die Berechnung der Menge einer benötigten Komponente zur Korrektur abweichender Frischbetoneigenschaften kann nach vorliegenden Erkenntnissen am besten über den Kennwert dynamische Fließgrenze umgesetzt werden. Die Versuchsserien zum Nachweis der Funktionalität des Systems sind über Berechnungen mit dem Parameter dynamische Fließgrenze erfolgt (siehe Diskussion in Kap. 4.6).

Es ist möglich, dass mit der Optimierung des Messprofils die Präzision der Messergebnisse für die Viskosität weiter verbessert werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch keine weiteren Veränderungen im Messprofil vorgenommen.

Abschließend wird in diesem Abschnitt der Begriff dynamische Fließgrenze betrachtet. Diese Bezeichnung fand hier Anwendung, da dieser Begriff für die entsprechende Prüfmethode und das resultierende Ergebnis in vielen vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten definiert und verwendet wurde, vgl. z. B. *Cheng* [54], *Lowke* [14], *Sarmiento* [37] und *Fleischmann* [24]. Diese Bezeichnung hat sich für das Ergebnis einer konstanten Scherung etabliert. Das Ergebnis einer konstanten Scherung des Betons lässt aber letztlich keine eindeutige Feststellung einer physikalischen Fließgrenze zu.

Der Wert der „*dynamischen Fließgrenze*“ hängt von der Schergeschwindigkeit, der Form und Größe des Schermediums sowie der Art des Rheometers ab. Gemessen wird ein Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit. Dieses Widerstandsmoment ist direkt vom inneren Reibungswiderstand des Materials abhängig. Der Begriff Viskosität ist in der DIN EN 206 als Fließwiderstand von Frischbeton nach Beginn des Fließens definiert. Somit ist ersichtlich, dass das gemessene Widerstandsmoment letztlich ein Fließwiderstand ist. Dieser wird durch die innere Reibung des gescherten Materials bei einer erzwungenen Scherung auf den Scherkörper erzeugt.

Daraus muss man folgern, dass es sich bei der dynamischen Fließgrenze um die Erfassung einer Form von Viskosität handelt. Diese Annahme spiegelt sich in den Ergebnissen dieser Arbeit wider. Im Kapitel 4.4 zeigen alle Gegenüberstellungen der dynamischen Fließgrenze und der Viskosität, einschließlich die Zusammenhänge in den Rheogrammen, eine Analogie. Die Variation der Konsistenz, infolge unterschiedlicher w/z-Werte und Zusatzmittelgehalte erzeugt durch die rheologischen Prüfungen eine nahezu identische Formensprache der Graphen für dynamische Fließgrenze und Viskosität. Letztlich ist nur ein Unterschied in den Einheiten und den Wertebereichen vorhanden.

Die vorliegende Arbeit hatte nicht das Ziel, neue rheologische Bezeichnungen oder Kenngrößen mit den entsprechenden Einheiten zu definieren oder zu etablieren. Nach Ansicht des Verfassers ist jedoch der Begriff dynamische Fließgrenze aus physikalischer Sicht nicht ganz optimal. Vielmehr stellt dieser rheologische Parameter ein sehr gutes Maß für die

Konsistenz dar. Die Konsistenz ist ein Begriff, der die Verarbeitbarkeit als Ganzes erfasst. Daher könnte man den Begriff Konsistenzmaß oder Konsistenzparameter für SVB verwenden.

#### 4.5 Erstellung eines Algorithmus zur Aussteuerung

Die Basis des hier diskutierten Algorithmus ist die Wissensdatenbank einer SVB-Rezeptur. Die Wissensdatenbank einer Rezeptur enthält jeweils drei Kennlinien der dynamischen Fließgrenze und der Viskosität. Die Kennlinien beschreiben die Konsistenz einer SVB-Rezeptur bei unterschiedlichen Wasser-, Fließmittel- und Stabilisierergehalten. Im Kapitel 4.4 wurden die rheologischen Kennwerte verglichen und diskutiert. Aus dieser Diskussion wurde die dynamische Fließgrenze als Hauptsteuerparameter abgeleitet. Somit wird die Beurteilung der Konsistenz auf Grundlage einer Kennlinie getroffen, die eine fallende Funktion (im Falle von Stabilisierer steigend) beschreibt. Es wird jedoch zwischen den Messpunkten linear interpoliert. Die Form dieser Graphen ist immer sehr ähnlich, jedoch unterscheiden sich die Wertebereiche des idealen w/z-Wertes und der zugehörigen rheologischen Kennwerte. Somit ist klar, dass es keine generelle Kennlinie gibt, die auf alle SVB-Rezepturen angewendet werden kann. Jede Rezeptur hat bei einem bestimmten w/z-Wert ihre definierten Eigenschaften und erfüllt somit die Anforderungen an Festigkeitsklasse, Expositionsklasse (Dauerhaftigkeit) und Verarbeitbarkeit (Konsistenz). In der folgenden Abbildung 62 ist das Grundprinzip der Berechnung zur Aussteuerung dargestellt. Der blaue Graph bildet eine Kennlinie für den Wasseranspruch der Rezeptur 3b ab.

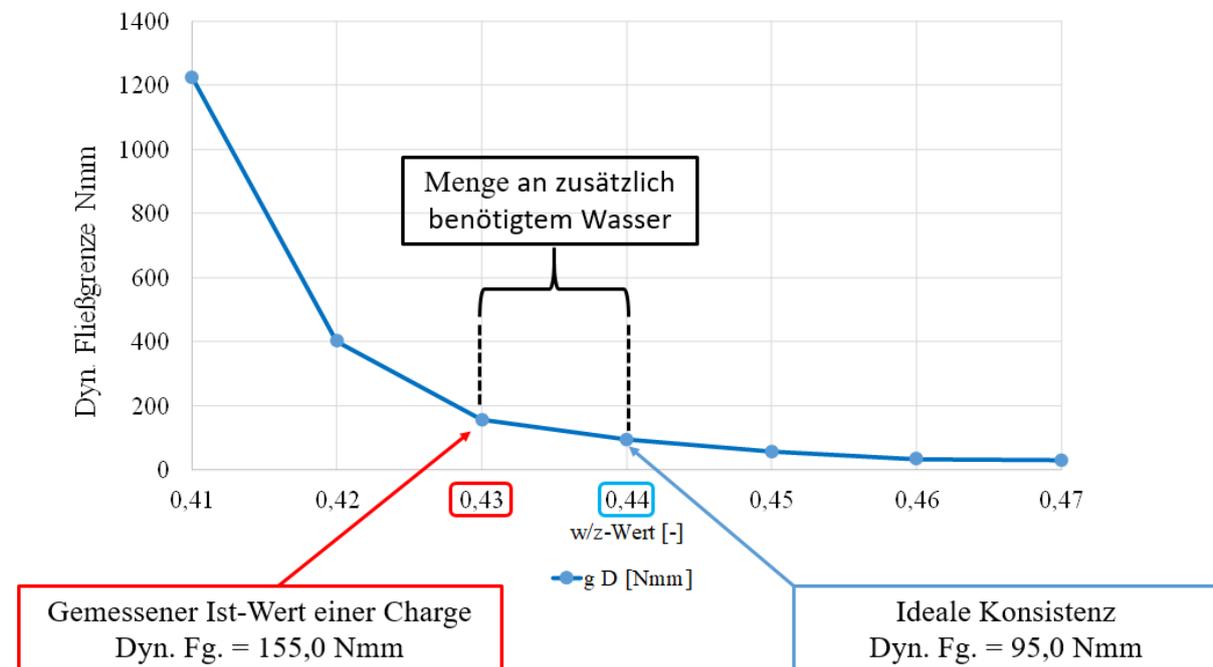


Abbildung 62: Exakte Berechnung einer Wassermenge anhand von zwei Messpunkten mit den zugehörigen w/z-Werten, Rezeptur 3b

Hier wird grundsätzlich vorausgesetzt, dass der Prüfer das Chargenvolumen und den entsprechenden Zementgehalt der geprüften Mischung kennt. Diese Daten sind essenziell zur Berechnung einer Korrekturmaßnahme bzw. der exakten Menge einer erforderlichen Komponente. Die Rezeptur 3b enthält standardmäßig 410,0 kg/m<sup>3</sup> Zement.

Die angestrebte Konsistenz der Rezeptur 3b ist bei einem w/z-Wert von 0,44 auf der Abszisse festgelegt. Dies entspricht einem wirksamen Wassergehalt von 180,4 l/m<sup>3</sup>. Auf der Ordinate ist der Betrag der dynamischen Fließgrenze an diesem Punkt 95,0 Nmm.

Die dynamische Fließgrenze einer geprüften Charge weist hier beispielsweise den Betrag von 155,0 Nmm auf. Das bedeutet, dass diese Mischung infolge Wassermangels zu steif ist. Durch die gemessene dynamische Fließgrenze von 155,0 Nmm ist es möglich, auf den entsprechenden w/z-Wert der Mischung zu schließen. Auf der Kennlinie existiert genau ein Punkt mit demselben Betrag von 155 Nmm. Dieser Punkt liegt in diesem Beispiel bei dem w/z-Wert 0,43. Der Zielwert mit der idealen Konsistenz ist bekannt bzw. vom Ersteller der Wissensdatenbank festgelegt. Über die Differenz der w/z-Werte 0,44 und 0,43 wird  $\Delta w/z$  berechnet.

Die geprüfte Betoncharge in Abbildung 62 hat zum Beispiel ein Volumen von 1 m<sup>3</sup>. Somit sind alle Daten zur Berechnung der fehlenden Wassermenge vorhanden.

Die Berechnung der zusätzlich benötigten Wassermenge erfolgt über die Multiplikation von  $\Delta w/z$  mit der Zementmenge. Diese einfache Berechnung ist wie folgt dargestellt:

$$0,01 \Delta w/z * 410 \text{ kg Zement} = 4,10 \text{ l Wasser}$$

Die berechnete Wassermenge von 4,10 l Wasser muss der Mischung nachträglich zugegeben und anschließend untergemischt werden. Über eine Kontrollmessung lassen sich die Wirksamkeit und der Erfolg der Korrekturmaßnahme überprüfen.

Die hier gezeigte Rechenoperation zur Korrektur der Verarbeitungseigenschaften bzw. Konsistenz ist als Anweisung in Form eines Algorithmus umgesetzt worden.

Das System zur Aussteuerung der Konsistenz ist so ausgelegt, dass bei zu steifer Konsistenz parallel zu einer exakten Menge an Wasser auch eine genau berechnete Menge an Fließmittel angegeben wird. Diese wird über die Kennlinie für zusätzliches Fließmittel berechnet. Das Prinzip der Berechnung ist identisch wie bei der Aussteuerung mit Wasser. Anhand der Kennlinie für zusätzliches Fließmittel wird bei zu steifer Konsistenz über die M.-% v. Z. das zusätzlich erforderliche Fließmittel berechnet, um die ideale Konsistenz einzustellen.

Diese mögliche Aussteuerung mit Fließmittel stellt eine Alternative zur Aussteuerung mit Wasser dar. Welche Anweisung ausgeführt wird, liegt letztendlich beim Anwender.

Die Aussteuerungsberechnung einer Mischung, die zu flüssig ist, erfolgt mit Stabilisierer. Die Berechnung der zusätzlich benötigten Menge an Stabilisierer erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie beim Fließmittel über die zusätzlichen M.-% v. Z. Diese Kennlinie hat gegenüber den Wasser- und Fließmittelkennlinien eine ansteigende Form.

#### 4.6 Untersuchungen und Nachweise zur Funktion der Korrekturmaßnahmen mit dem Aussteuerungssystem

In diesem Kapitel werden Versuche zur Aussteuerung verschiedener SVB-Rezepturen diskutiert. Es werden Laboruntersuchungen präsentiert, bei denen Mischungen zu steifer Konsistenz mittels Wasser und alternativ mit Fließmittel korrigiert wurden. Es wurden auch Mischungen gezielt zu flüssig (Wasserüberschuss) hergestellt. In diesem Fall erfolgte eine nachträgliche Korrektur mit Stabilisierer. Die Korrektur der Konsistenz erfolgte bei allen

Versuchen über die Berechnung einer Komponente mit dem Aussteuerungssystem über eine Wissensdatenbank und den Algorithmus. Als Steuerparameter diente hier die dynamische Fließgrenze. Durch eine erneute Prüfung mit dem Rheometer konnte nach der Korrektur die Wirksamkeit der Maßnahme bewertet und diskutiert werden.

Für eine umfassend plausible Darstellung werden in dem ersten Beispiel die Rohdaten der einzelnen Messungen zur Diskussion herangezogen. In den folgenden zwei Abbildungen 63/64 sind Ergebnisse zweier Prüfungen einer Mischung der Rezeptur R3b zu sehen. Die zwei Messungen sind jeweils über die Kennwerte dynamische Fließgrenze und Viskosität abgebildet. In diesem Versuch wurde eine Mischung mit einem w/z-Wert von 0,42 hergestellt. Die Ziel-Konsistenz stellt sich bei w/z 0,44 ein. In den Legendeneinträgen ist das Datum (04.09.2019) und die Uhrzeit der jeweiligen Messung abgebildet. Diese werden vom System automatisch erfasst und bei jeder Messung abgespeichert. Die Legende enthält zusätzlich die Rezeptbezeichnung und den w/z-Wert, mit dem die Mischung hergestellt wurde.

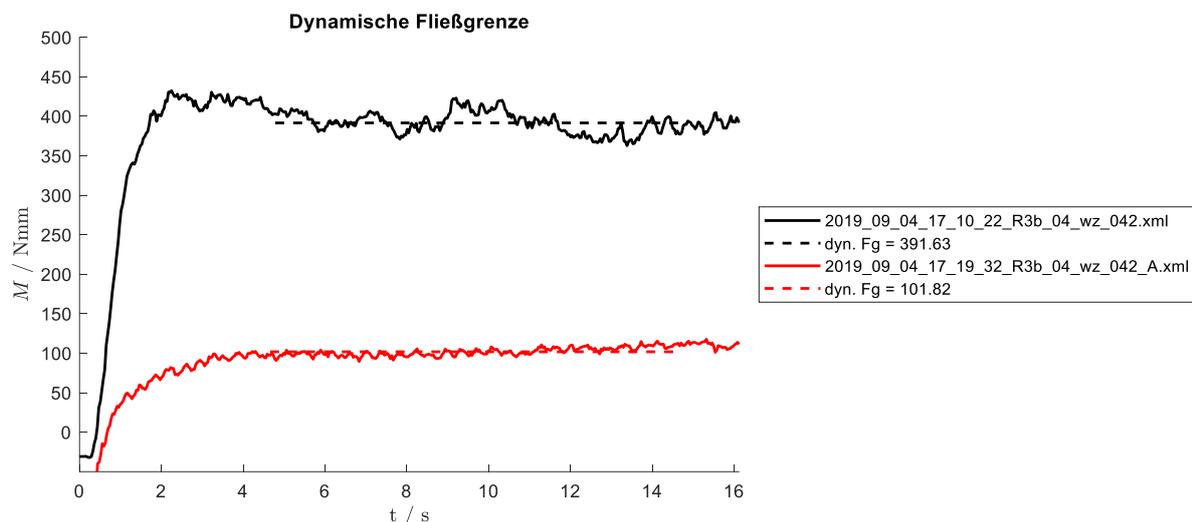


Abbildung 63: Drehmoment über die Zeit einer geprüften Mischung (schwarzer Graph) und der ausgereinigten Mischung (roter Graph), Messwerte aus Phase 1 (konstante Scherung 1 U/min), Rezeptur 3b

Die dynamische Fließgrenze beträgt bei der Ausgangsmischung mit Wassermangel 391,63 Nmm. Nach der Aussteuerung liegt  $g_D$  bei 101,82 Nmm.

Aus dem Legendeneintrag ist zu entnehmen, dass die erste Messung um 17:10 Uhr erfolgte. Die Messung nach der Aussteuerung erfolgte um 17:19 Uhr. Während dieser Zeit wurde das Rheometer gereinigt und die exakte Menge des erforderlichen Wassers berechnet, abgewogen, zugegeben, für 30 Sekunden untergemischt und erneut geprüft.

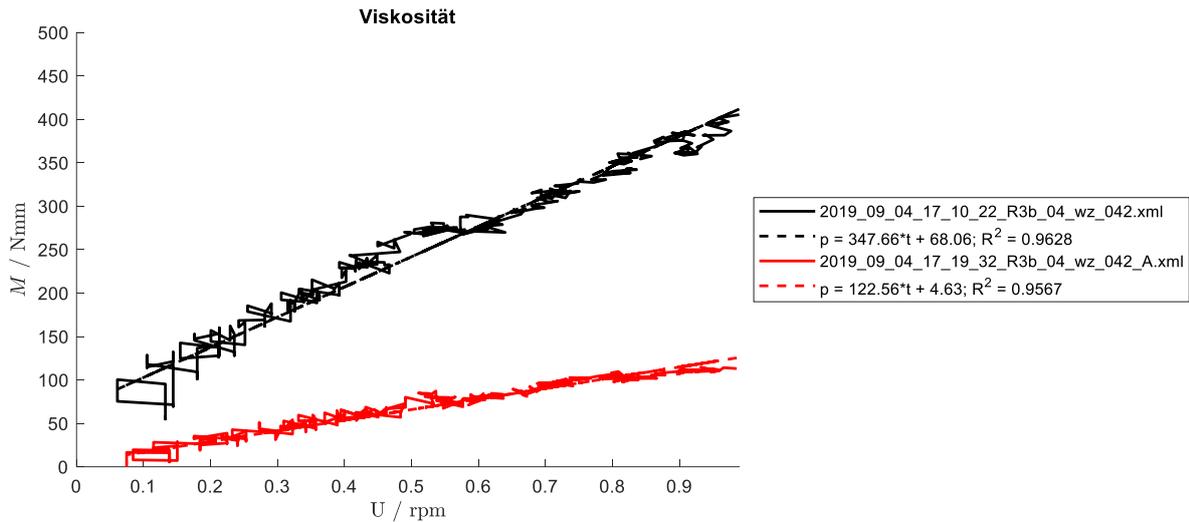


Abbildung 64: Drehmoment über Scherrate aus Phase 2 der Messung. Die Auswertung der Ausgleichsgeraden liefert die Geradengleichung (Legende), aus der die Viskosität und Bingham Fließgrenze abzulesen sind. Viskosität eines SVB mit Wassermangel (schwarzer Graph) und Viskosität der angesteuerten Mischung (roter Graph), Rezeptur 3b

In folgender Abbildung 65 ist das Prozedere der Berechnung abgebildet, um in den Abbildungen 63/64 von der schwarzen Kurve (Istwert) auf die Rote Kurve (Zielwert) zu gelangen. Der Istwert beträgt 391,63 Nmm. Dieser Punkt liegt nahezu auf dem Punkt der zuvor erstellten Kennlinie bei w/z 0,42 (400,99 Nmm; siehe Tabelle 10/Abbildung 61).

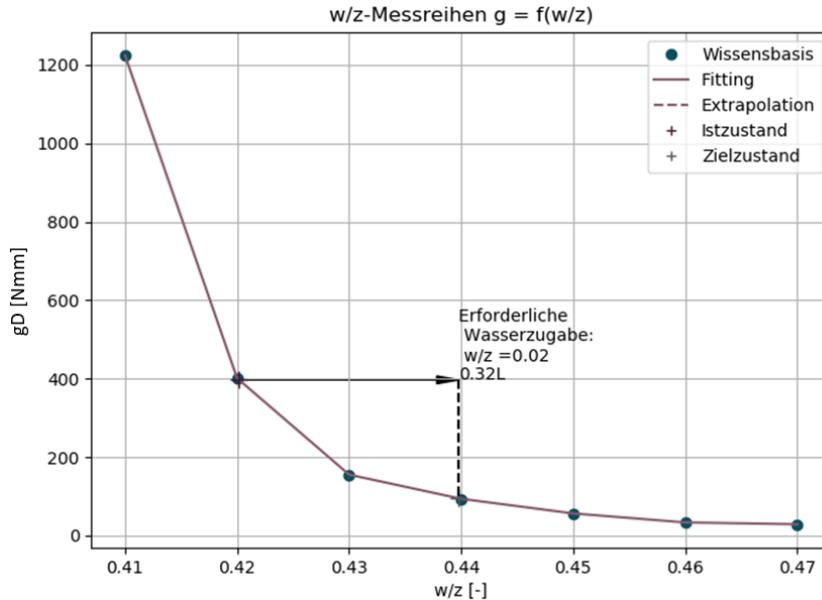


Abbildung 65: Automatisch berechnete Wassermenge durch gemessene dynamische Fließgrenze (391,63 Nmm) und Zielwert (95 Nmm), Rezeptur 3b

Der Algorithmus berechnet anhand der Kennlinie und dem Istzustand (391,63 Nmm) über den w/z-Wert die zusätzlich benötigte Wassermenge. Hier ist der Unterschied 0,02 w/z. Bei dem Mischungsvolumen von 40 l ist bei dieser Rezeptur 16,4 kg Zement enthalten. Das Programm rechnet mit mehr Nachkommastellen als angezeigt. Das zusätzlich erforderliche Wasser wird mit einer Menge von 0,32 l angegeben (Abb. 65). Diese 0,32 l (entspricht 8,2 l / m<sup>3</sup>) Wasser

wurden der Mischung zugegeben und untergemischt. Die nächste Abbildung 66 zeigt die Kontrollmessung nach der Aussteuerung, welche den roten Graphen in Abbildung 63 und 64 generiert hat.

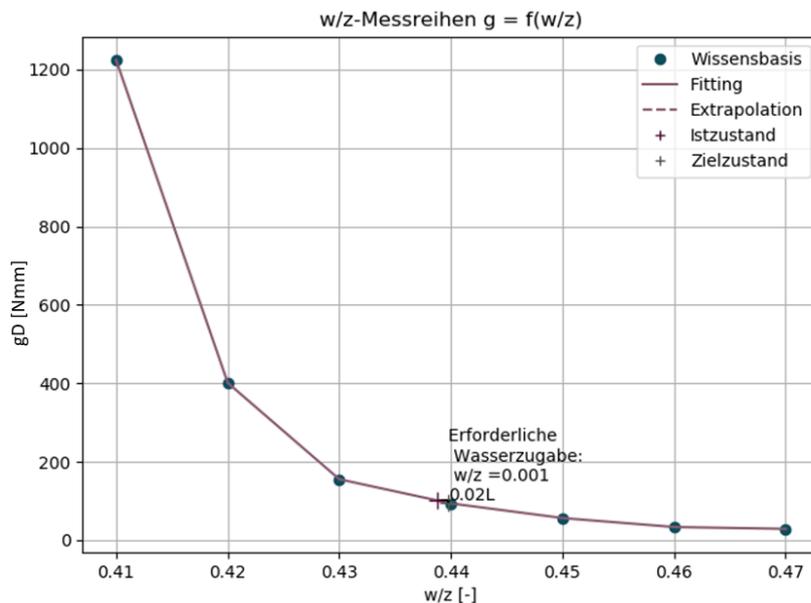


Abbildung 66: Ausgesteuerte Mischung mit optimaler Konsistenz, Rezeptur 3b

Die Kontrollmessung liefert eine dynamische Fließgrenze von 101,82 Nmm. Dieser Wert liegt um 6,82 Nmm über dem Zielwert. Daher gibt das Programm weitere 0,02 l Wasser zur Nachdosierung vor (entspricht 0,5 l/m<sup>3</sup>). Dieser Vorschlag wurde hier nicht umgesetzt. Das Untermischen von 20 g Wasser auf 40 Liter Beton ist nicht zielführend. Die zusätzliche Zeit und Mischenergie hätten mehr Einfluss auf die Konsistenz als die 20 g zusätzlichen Wassers. Die Kontrollmessung in Abbildung 66 zeigt prinzipiell eine gelungene Aussteuerung. Eine abweichende Verarbeitbarkeit wurde anhand einer Berechnung mit dem Algorithmus und einer Kennlinie korrigiert. In vorliegender Arbeit wurden bewusst keine Zielbereiche im Sinne eines Verarbeitungsfensters definiert. Vielmehr werden exakt formulierte Punkte diskutiert. Dies erlaubt auch eine Betrachtung der erreichbaren Genauigkeiten im vorliegendem Kontext.

Grundsätzlich ist zu hinterfragen, ob rheologischen Kennwerte mit Nachkommastellen zu einer sinnhaften Diskussion führen. Prinzipiell sind Zahlen nach dem Komma nicht notwendig, da die maximalen Genauigkeiten mit ganzen Zahlen ausreichend genau beschrieben werden (siehe Anhang Tabelle 15 und Abbildung 94 bis 96). In der vorliegenden Arbeit wurde immer mit zwei Stellen nach dem Komma gearbeitet und daher im Vorgehen als auch in den Darstellungen beibehalten.

Für die weitere Diskussion werden die einzelnen ermittelten Graphen nicht mehr gezeigt und die Untersuchungen anhand der entsprechenden Kennlinien diskutiert. Die Diagramme der zwei folgenden Abbildungen 67/68 des zweiten Beispiels zeigen eine Aussteuerung mit der Rezeptur R4c.

Die entsprechende Wissensdatenbank zur Rezeptur R4c ist im Anhang in Tabelle 14 und Abbildung 91 einzusehen. Die Rezeptur 4c hat ihre designierten Eigenschaften bei einem w/z-Wert von 0,36. Dieser Beton hat einen Zementgehalt von 520 kg/m<sup>3</sup>. Die Zielkonsistenz ist an

diesem Punkt über die Kennlinie für Wasseranspruch mit  $g = 90,11$  Nmm definiert. Die getestete Mischung wurde mit Wassermangel hergestellt. Der Eingangswert der ersten Prüfung lieferte eine dynamische Fließgrenze von 213 Nmm (Istzustand).

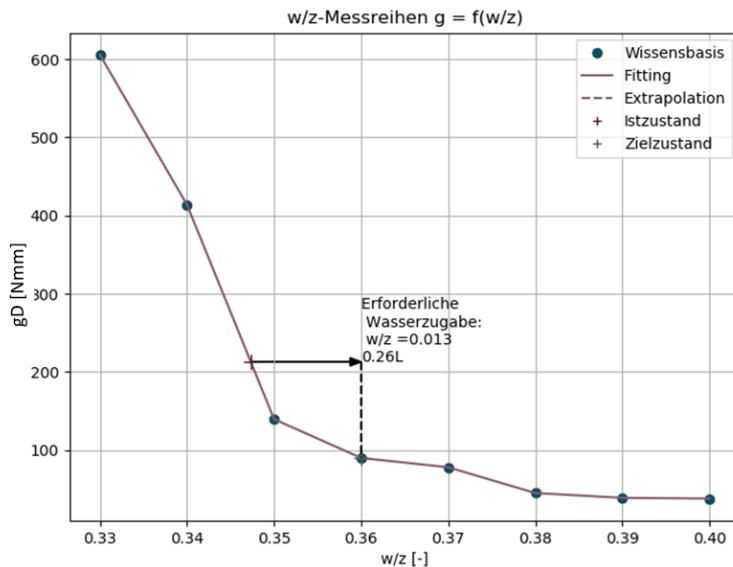


Abbildung 67: Automatisch berechnete zusätzliche Wassermenge einer Mischung der Rezeptur R4c, Zielkonsistenz 90,11 Nmm bei  $w/z = 0,36$

Der Algorithmus berechnete anhand des Istwertes von 213 Nmm und des Zielwertes die zusätzlich benötigte Wassermenge über  $\Delta w/z = 0,013$  mit 0,26 l (entspricht  $6,5 \text{ l/m}^3$ ). Diese 0,26 l Wasser wurden der 40 l Mischung zugegeben und für 30 Sekunden untergemischt. Das Diagramm in der nächsten Abbildung 68 zeigt das Ergebnis der Kontrollmessung.

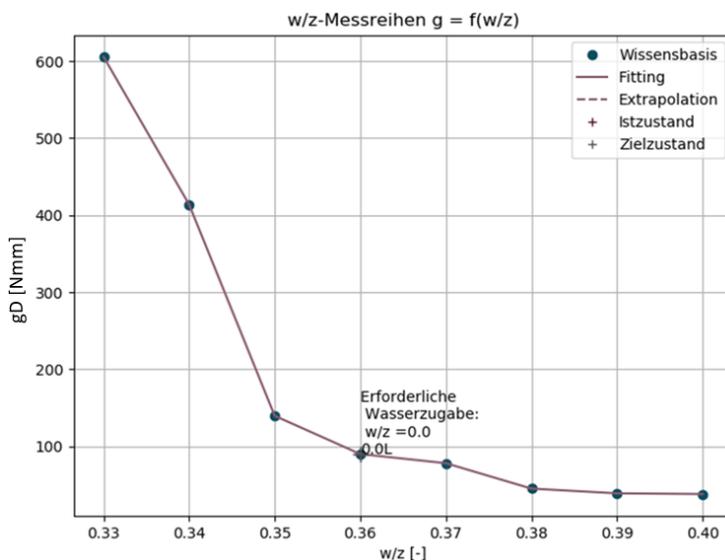


Abbildung 68: Optimale Konsistenz durch Aussteuerung mit Wasser nach Kennlinie, Rezeptur 4c

Durch die nachträgliche Zugabe der berechneten 0,26 l Wasser wurde eine dynamische Fließgrenze von 90,26 Nmm eingestellt. Die Zielkonsistenz liegt bei 90,11 Nmm. Dieses Ergebnis zeigt eine perfekte Korrektur der Konsistenz. Das Programm zur Aussteuerung zeigt

dies durch die Kontrollmessung in Abbildung 68 über die erforderliche Wasserzugabe von 0,0 l Wasser.

In diesen und weiteren, hier nicht wiedergegebenen Versuchsserien, konnte gezeigt werden, dass die Aussteuerung mit Wasser über die dynamische Fließgrenze gut funktioniert.

➤ Aussteuerung mit Fließmittel

Im Zuge der Untersuchungen zur Aussteuerung mit Fließmittel wurde festgestellt, dass mit der Fließmittelkennlinie aus Abbildung 53, Kap. 4.4.3 (Rezeptur 3b) bei geringen Abweichungen zu hohe Zugabemengen an Fließmittel berechnet wurden. Diese Tatsache erforderte eine Anpassung der Vorgehensweise. Die Hintergründe der nicht optimalen Berechnung und die Strategie zur Behebung der Problematik werden hier betrachtet.

Das Diagramm der folgenden Abbildung 69 zeigt die Berechnung einer erforderlichen Fließmittelmenge bei einer zu steifen Konsistenz infolge Wassermangels. Die Mischung wurde mit einem w/z-Wert von 0,43 hergestellt (Zielwert ist 0,44). Der Wassermangel von 4,1 l/m<sup>3</sup> bewirkt die steifere Konsistenz. Der Grundgehalt an Fließmittel ist in der Mischung enthalten. Der Istwert für g<sub>D</sub> beträgt in diesem Fall 214 Nmm. Dieser deckt sich jedoch nicht mit dem Wert der Kennlinie für den Wasseranspruch. Der Wert aus der Kennlinie beträgt bei einem w/z = 0,43, 155 Nmm (Tab. 10, Abb. 61). Dieses Ergebnis zeigt, dass die Reproduzierbarkeit einer gleichbleibenden Konsistenz auch im Labor eine Herausforderung darstellt. Die abweichende Konsistenz ist auf einen höheren Mehlkorngehalt zurückzuführen. Bei der Rezeptur R3 wurden Brechsand und Marmorsplitt als Zuschlag verwendet. Die grobe Gesteinskörnung hatte einen hohen Anteil an abschlämmbaren Feinteilen. Die Arbeiten wurden im Sommer durchgeführt. Die Zuschläge waren trocken. Die Versuche zur Aussteuerung fanden am Ende der Versuchsreihe statt. Durch die fortlaufende Entnahme der Gesteinskörnung kam es zu einer Feinteilverfrachtung (steigender Mehlkorngehalt). Der höhere Mehlkorngehalt verursachte einen höheren Wasseranspruch und resultierte letztlich in der steiferen Konsistenz.

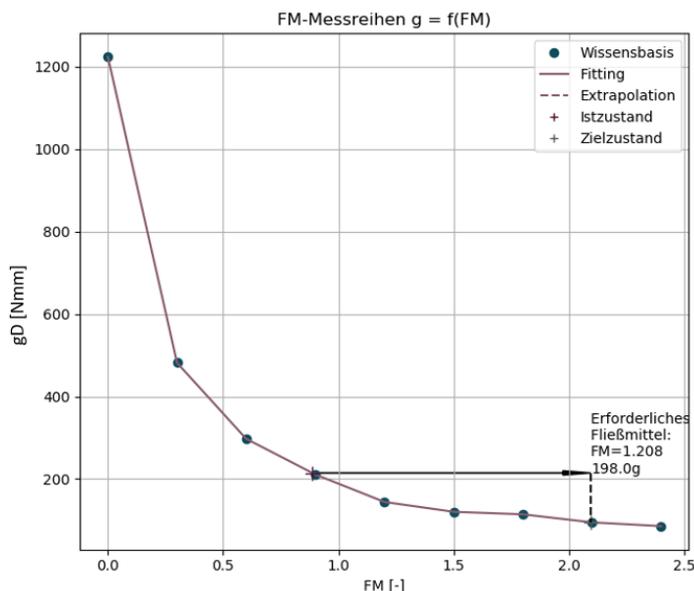


Abbildung 69: Aussteuerungsberechnung anhand einer Fließmittelkennlinie (Start w/z = 0,41), Rezeptur 3b, vgl. Abbildung 53

Das Programm ordnet dem Istzustand mit den gemessenen 214 Nmm den äquivalenten Punkt auf der Kennlinie zu. Das Programm berechnet durch  $\Delta$  1,208 M.-% v. Z., 198 g/40 l Beton zusätzliches Fließmittel (entspricht  $4,95 \text{ kg/m}^3$ ), um die ideale Konsistenz einzustellen. Analog bietet die Berechnung über die Kennlinie für Wasseranspruch eine Lösung mit zusätzlichem  $0,2 \text{ l/40 l}$  Beton Wasser an (entspricht  $5,0 \text{ l/m}^3$ , siehe Abbildung 70). Der Vergleich 198 g FM und  $0,2 \text{ l}$  Wasser zeigt eindeutig eine Diskrepanz auf. Die fast gleiche Menge an Wasser und Fließmittel für dieselbe Korrektur ist nicht plausibel.

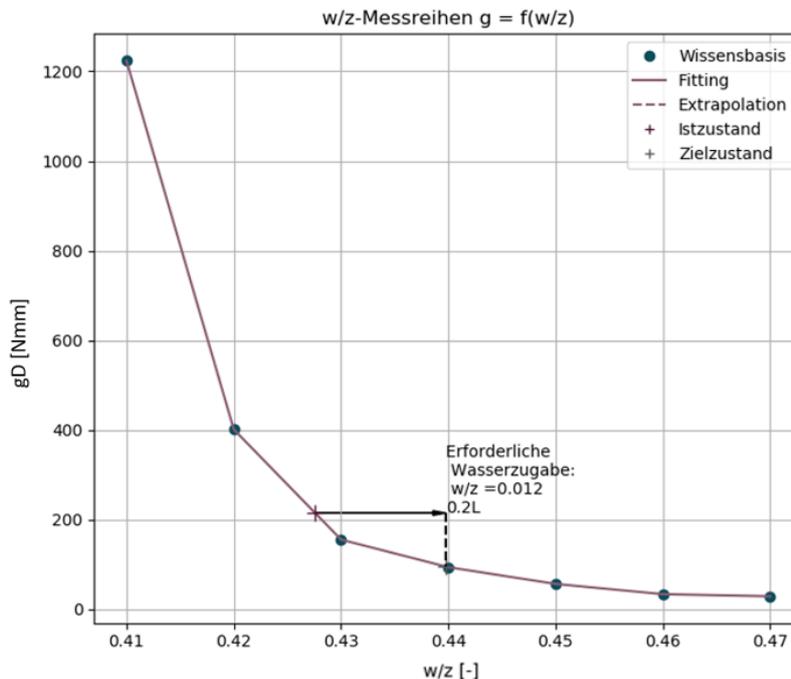


Abbildung 70: Berechnung der Aussteuerung mit Wasser als parallele Lösung zur Aussteuerung mit Fließmittel aus Abb. 69, Rezeptur 3b

Der Aussteuerungsvorschlag mit Wasser in Abbildung 70 bietet eine plausible Lösung zur Verbesserung der Konsistenz. Diese lässt sich über die Menge Zement der Mischung (16,4 kg) multipliziert mit  $\Delta w/z = 0,012$  nachvollziehen. Somit ist gezeigt, dass die Berechnung der Menge an Fließmittel kein zufriedenstellendes Ergebnis sein kann. Die stark überhöhte Menge an Fließmittel ist auf die Form der Kennlinie für Fließmittel zurückzuführen. Bei der Erstellung der Kennlinie für Fließmittel wurde eine Ausgangsmischung mit einem extremen Wasserdefizit von  $12,3 \text{ l/m}^3$  verwendet. Die Spreizung dieser Kennlinie ist sehr groß. Eine geringe Abweichung der Konsistenz lässt sich mit dieser Kennlinie nicht korrekt aussteuern. Für eine geringe Abweichung der Konsistenz muss eine Kennlinie für zusätzliches Fließmittel auch feiner abgestimmt sein.

Diese Schlussfolgerung kann mit dem Diagramm der folgenden Abbildung 71 erklärt werden.

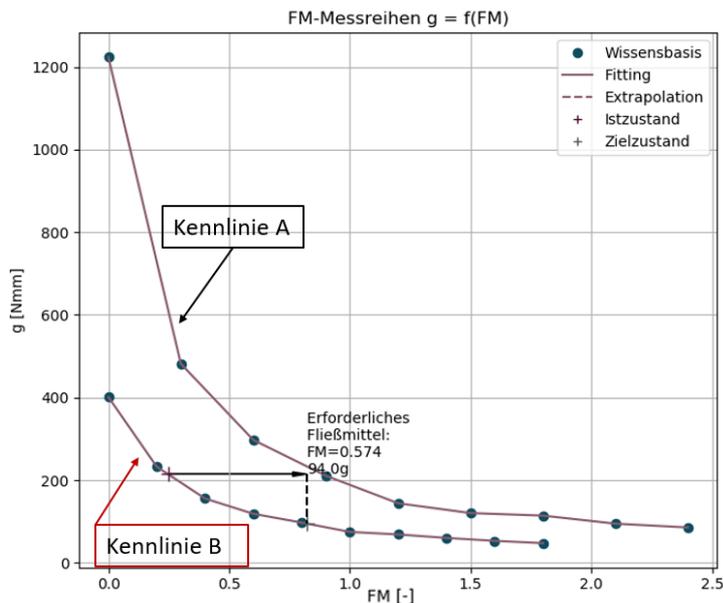


Abbildung 71: Ergänzung der Wissensdatenbank durch eine zweite Kennlinie B für zusätzliches Fließmittel, Rezeptur R3b

Die zweite Kennlinie B beruht auf einer Mischung mit einem w/z-Wert von 0,42. Das Inkrement der Fließmittelzugabe betrug 0,2 M.-% v. Z. Die obere Kennlinie A in Abbildung 71 ist mit w/z = 0,41 erstellt und mit 0,3 M.-% v. Z. Fließmittel schrittweise verdünnt worden. Infolge der unterschiedlichen Eingangskonsistenz ergeben sich die zwei völlig unterschiedlichen Graphen bzw. Kennlinien A und B. Bei demselben Istzustand von  $g = 214$  Nmm wird mit der unteren Kennlinie B 94,0 g/40 l Beton zusätzlich erforderliches Fließmittel berechnet. Die Berechnung mit der oberen Kennlinie A ergibt eine Menge von 198,0 g FM/40 l Beton (siehe Abbildung 69).

Die Aussteuerung mit den 94,0 g FM/40 l Beton wurde umgesetzt. Diese bewirkte jedoch eine leichte Übersteuerung. Es wurde eine dynamische Fließgrenze von 75 Nmm gemessen. Der Istzustand (schwarzer Graph) und der Zielzustand (roter Graph) sind in der nächsten Abbildung 72 zu sehen.

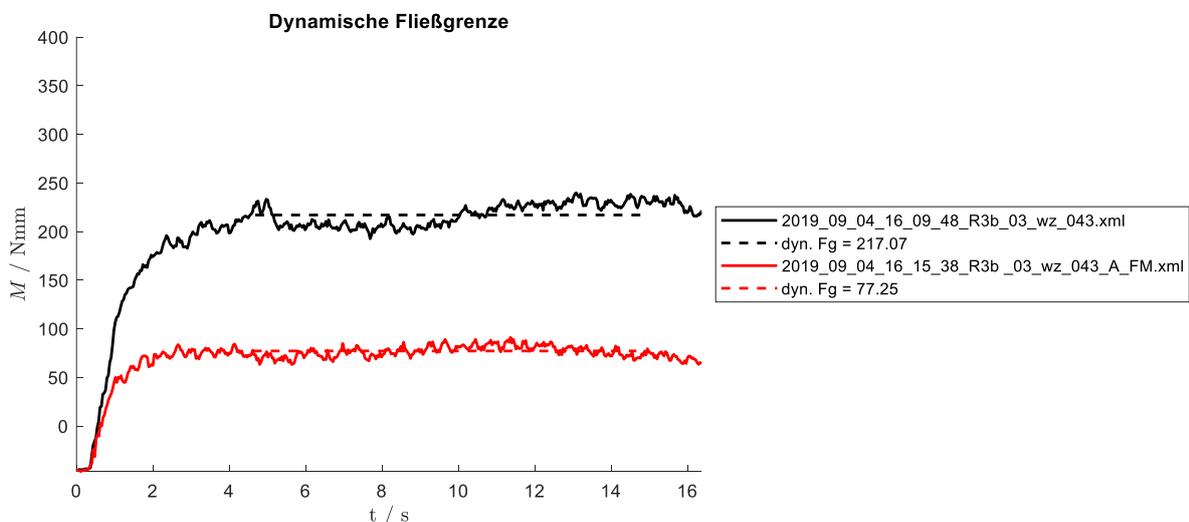


Abbildung 72: Istzustand und Zustand nach der Korrektur mit Fließmittel mit dynamischer Fließgrenze der Kennlinie B, Rezeptur 3b, w/z = 0,43

Der Zielwert für  $g$  liegt bei 95 Nmm. Durch die Korrektur mit Fließmittel ist der Zielwert unterschritten worden und liegt bei 75,25 Nmm. Augenscheinlich zeigte der Beton noch keine Anzeichen von Sedimentation durch das Übersteuern bzw. der niedrigeren dynamischen Fließgrenze.

Das Übersteuern wurde in einem weiteren Versuch näher beleuchtet. Das Ergebnis ist im folgenden Abschnitt dargestellt.

Zur genauen Untersuchung der Aussteuerung mit Fließmittel wurde eine Mischung mit einem  $w/z$ -Wert von 0,42 hergestellt. Daraus resultiert ein Wassermangel von  $8,2 \text{ l/m}^3$ .

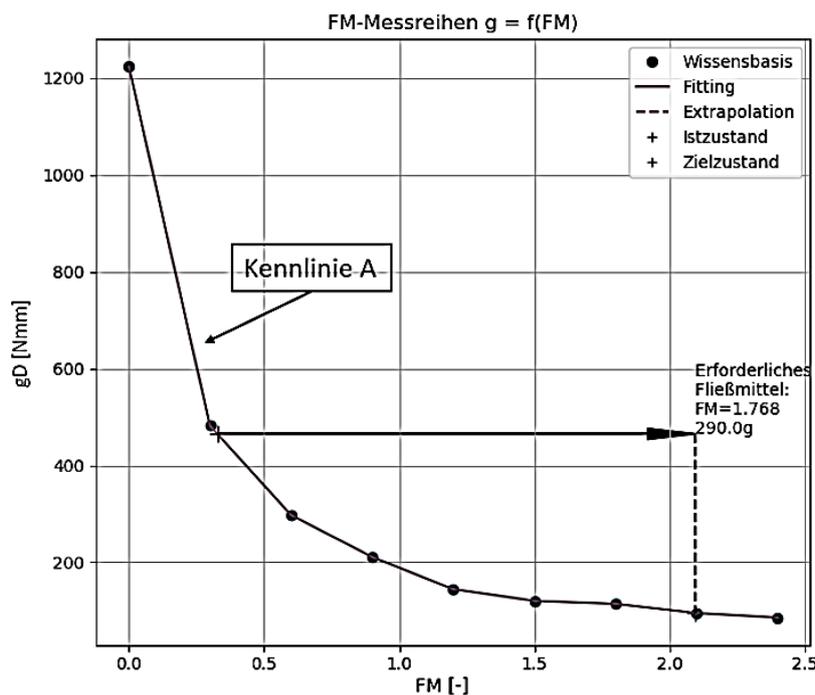


Abbildung 73: Berechnung der Aussteuerung mit Fließmittel einer Mischung der Rezeptur 3b,  $w/z = 0,42$ , Istwert  $gD = 473,65$ ,  $\Delta 1,768 \text{ M.-% v. Z. FM}$  entspricht 290 g FM auf 40 l Beton

In Abbildung 73 ist die Kennlinie A zu sehen. Anhand dieser Kennlinie war in vorangegangenem Beispiel keine zielführende Aussteuerung möglich. Die ermittelte Menge von 198 g FM (Abb. 69) war in etwa gleich der Menge an zusätzlichem Wasser (Abb. 70). Der Istwert in Abbildung 73 beträgt 473,65 Nmm. Dieser Eingangswert liegt über dem Wertebereich der Kennlinie B aus Abbildung 71. Da in dem Programm noch keine Funktion zur Extrapolation hinterlegt war, konnte anhand der Kennlinie B keine Aussteuerung berechnet werden. Daher wurde die Kennlinie A mit dem größeren Wertebereich verwendet. Die Menge des zusätzlich erforderlichen Fließmittels ist dem Diagramm in Abbildung 73 zu entnehmen und beträgt 290,0 g/40 l Beton. Diese Menge wurde der Mischung zugegeben und für 60 Sekunden untergemischt.

Für die folgende Diskussion des Ergebnisses wurde eine erweiterte Darstellungsform gewählt.

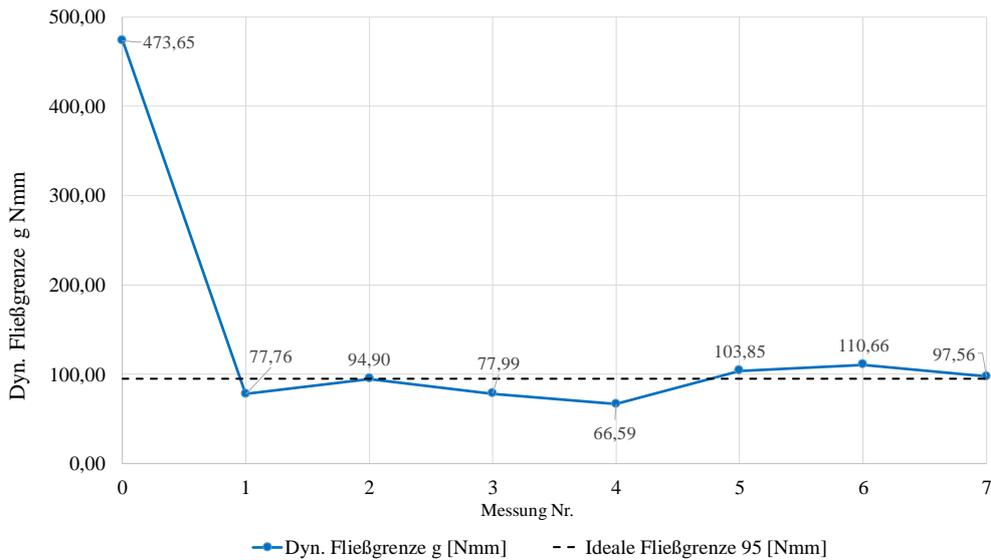


Abbildung 74: Aussteuerung mit 290,0 g Fließmittel nach Anweisung aus Abbildung 73

Durch das Untermischen der 290,0 g/40 l fällt die dynamische Fließgrenze unter den Zielwert von 95 Nmm auf 75,47 Nmm. Dieses Ergebnis zeigt eine leichte Übersteuerung wie bei dem vorangegangenen Versuch. In Abbildung 74 sind nach der Kontrollmessung Nr.1 noch die Ergebnisse von weiteren sechs Messungen zu sehen. Zwischen den weiteren Prüfungen im Mischer wurde für jeweils drei Sekunden aufgemischt. Das Ergebnis in Abbildung 74 zeigt, dass die Konsistenz von SVB und Beton im Allgemeinen kein stationärer Zustand ist. Aus diesem Ergebnis kann man jedoch schließen, dass die Aussteuerung mit Fließmittel den Beton in einen guten Verarbeitungsbereich bringen kann. Dies gilt auch, wenn sich der Zielwert von 95,0 Nmm nicht direkt nach dem Aussteuerungsprozess eingestellt hat. Das Diagramm in der folgenden Abbildung 75 zeigt die gemessenen Rohdaten, die dem Graphen in Abbildung 74 zugrunde liegen. Die sieben Graphen nach der Aussteuerung zeigen prinzipiell einen Zielbereich.

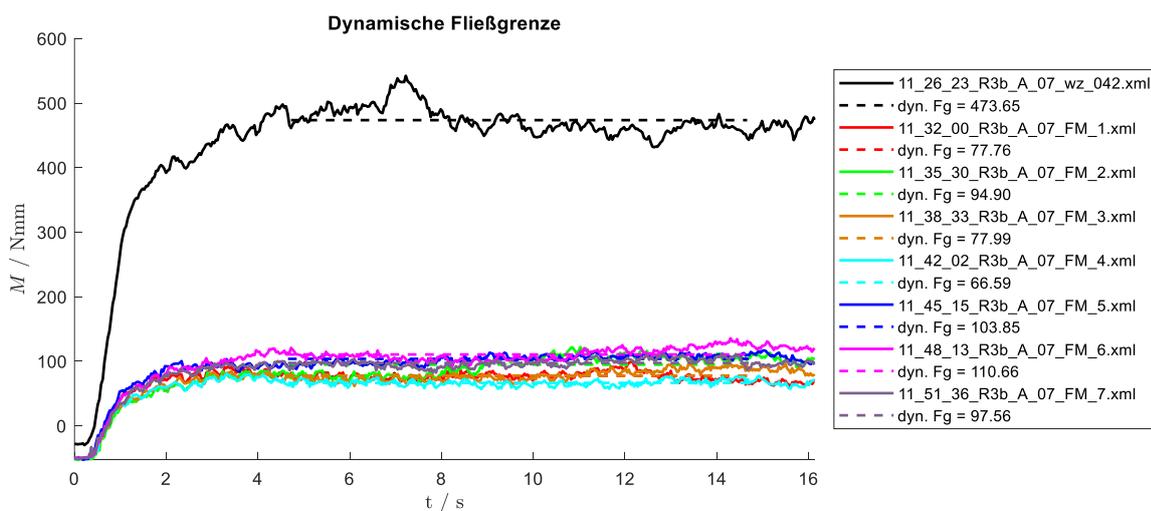


Abbildung 75: Drehmoment über die Zeit von acht Messungen, Rezeptur 3b, w/z = 0,42 (schwarzer Graph, Istwert  $g = 473,65$  Nmm), Aussteuerung mit 290 g FM, weitere sieben Kontrollmessungen

Die Aussteuerung abweichender Konsistenz mit Fließmittel wird in einer weiteren Untersuchung mit der Rezeptur R4c gezeigt. Die entsprechende Wissensdatenbank dieser Rezeptur ist im Anhang der Tabelle 14 und Abbildung 91 zu entnehmen. Die Rezeptur R4c weist die angestrebten Frisch- und Festbetoneigenschaften bei dem w/z-Wert 0,36 auf. Für die Erzeugung einer abweichenden Konsistenz wurde eine Mischung mit Wasserdefizit hergestellt. Im Diagramm der folgenden Abbildung 76 wurde die initial hergestellte Konsistenz durch die dynamische Fließgrenze mit 187,42 Nmm erfasst. Die angestrebte Konsistenz ist bei 90,11 Nmm definiert. Die Berechnung der Aussteuerung über die Kennlinie für zusätzliches Fließmittel ergibt durch  $\Delta$  0,51 M.-% v. Z. die Menge von 106,0 g zusätzlichen Fließmittel, um die angestrebte Konsistenz der 40 l Probe einzustellen.

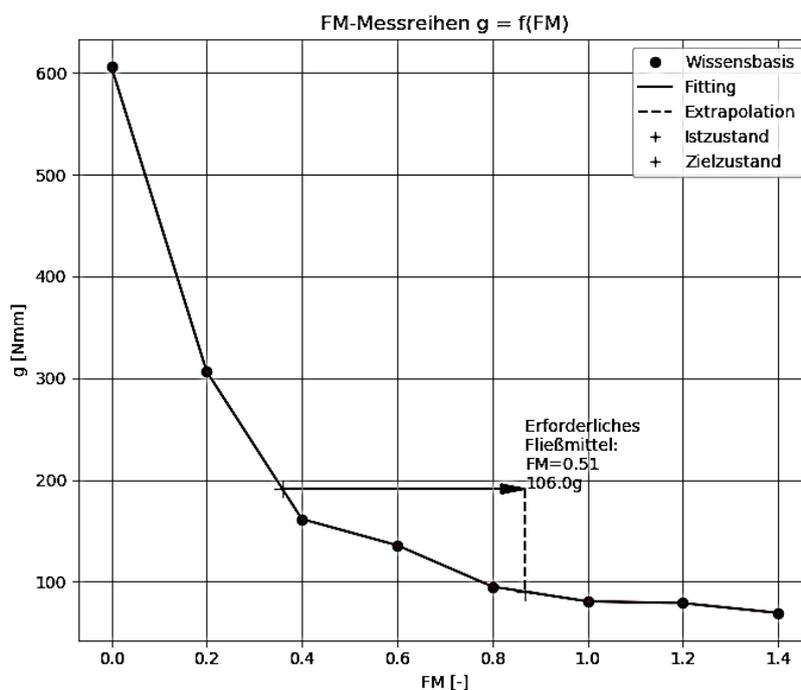


Abbildung 76: Kennlinie für zusätzliches Fließmittel der Rezeptur R4c, Berechnung der erforderlichen Fließmittelmenge anhand des Istzustandes von 187,42 Nmm und festgelegtem Zielzustand von 90,11 Nmm

Die erforderlichen und berechneten 106 g Fließmittel wurden der Mischung zugegeben und für 60 Sekunden untergemischt. Der Erfolg dieser Korrekturmaßnahme wird mit der folgenden Abbildung 77 evaluiert. Das Programm zur Berechnung der Aussteuerung gibt bei zu steifer Konsistenz immer wahlweise die zwei Möglichkeiten über zusätzliches Wasser oder Fließmittel an. Da die ideale Konsistenz immer über die Kennlinie des wirksamen Wassergehalts bzw. den entsprechenden w/z-Wert definiert ist, wird hier die Kontrolle der Korrekturmaßnahme mit den 106 g Fließmittel über die Kennlinie für Wasser beurteilt.

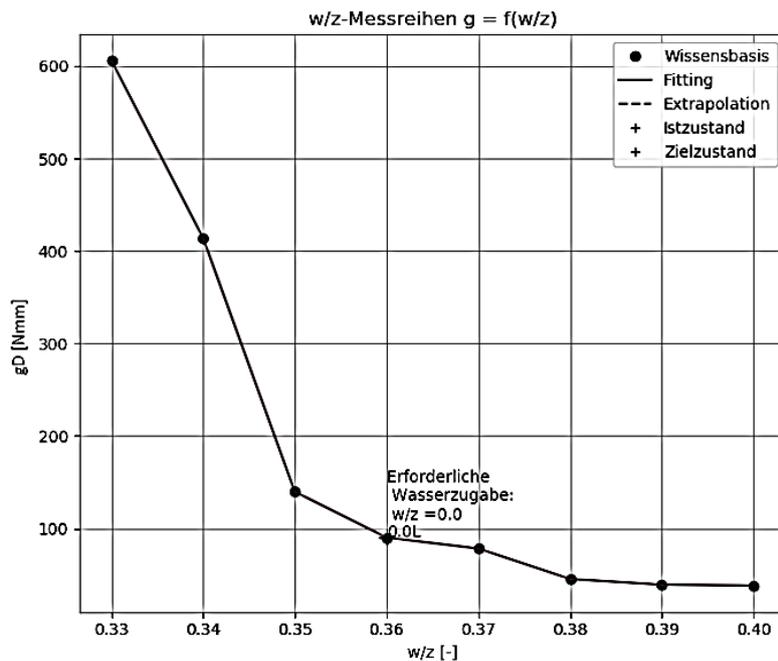


Abbildung 77: Erfolgreiche Korrektur der Konsistenz mit Fließmittel. Rezeptur 4c

Durch die Zugabe des Fließmittels stellt sich eine dynamische Fließgrenze von 89,91 Nmm ein. Das liegt ziemlich genau bei der Zielkonsistenz von  $g = 90,11$  Nmm. Das Programm gibt die erforderliche Wasserzugabe mit 0,0 l Wasser an. Daraus folgt, dass der Beton die Bedingungen der angestrebten Konsistenz erfüllt.

Die mögliche alternative Berechnung der Aussteuerung mit zusätzlichem Wasser ist im Anhang Abbildung 92 zu sehen. Die Rohdaten zur Ermittlung von Ist- und Zielzustand sind in Abbildung 93 einzusehen.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die Aussteuerung mit Fließmittel genauso gut funktioniert wie mit Wasser. Allerdings muss bei Erstellung bzw. bei Verwendung der Kennlinie für zusätzliches Fließmittel darauf geachtet werden, dass der Konsistenzbereich bzw. die Spreizung der Kennlinie nicht zu groß ist. Geringe Abweichungen der Konsistenz bedürfen für eine gelungene Aussteuerung mit Fließmittel eine fein abgestimmte Kennlinie, die auch auf einer geringen Abweichung basiert. Größere Abweichungen in den Verarbeitungseigenschaften müssen mit einer Kennlinie ausgesteuert werden, die auch auf einer starken Abweichung basiert. Die Vorgehensweise wurde in den ersten zwei Beispielen in diesem Kapitel dargelegt.

#### ➤ Aussteuerung mit Stabilisierer

Für die Untersuchungen mit Stabilisierer ist weniger Aufwand betrieben worden als für die Untersuchungen zum wirksamen Wassergehalt.

Das folgende Ergebnis soll zeigen, inwieweit eine zu flüssige SVB Konsistenz anhand von einer Kennlinie für zusätzlichen Stabilisierer mit dem Aussteuerungssystem korrigiert werden kann.

Den Ausgangspunkt der folgenden Ergebnisse liefert eine Mischung der Rezeptur 3b mit Wasserüberschuss. Der Istwert der zu flüssigen Mischung wurde anhand der dynamischen

Fließgrenze mit 29,41 Nmm ermittelt. Bei dieser Konsistenz wurde durch visuelle Beurteilung und haptische Prüfung starke Sedimentation festgestellt.

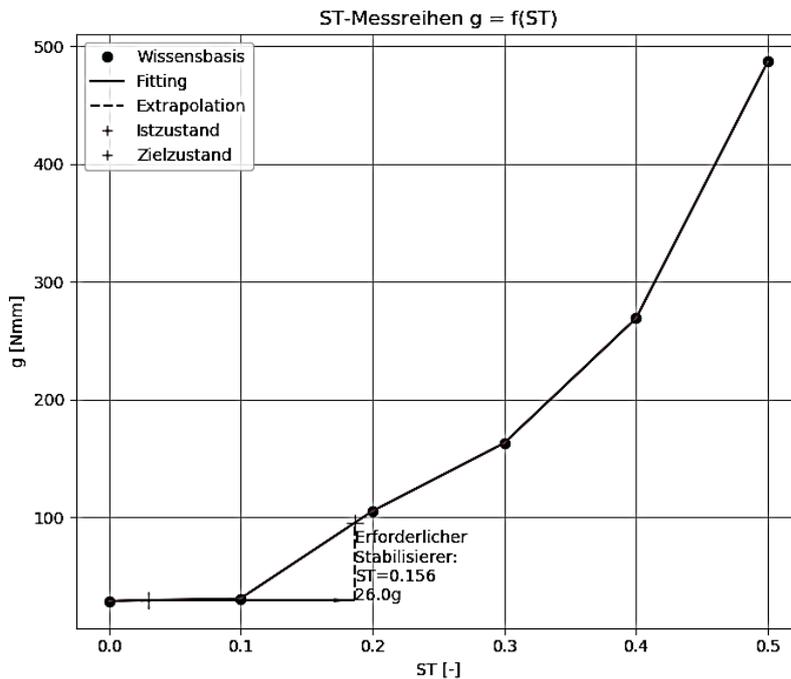


Abbildung 78: Berechnung einer exakten Menge Stabilisierer über Istzustand und Zielzustand,  $\Delta$  M.-%. v. Z.  $ST = 0,156$ , Rezept 3b, Kennlinie für zusätzlichen ST, siehe Abbildung 58

Über den Istwert 29,41 Nmm und den Zielwert 95 Nmm berechnet der Algorithmus anhand der Kennlinie für zusätzlichen Stabilisierer in diesem Fall 26,0 g Stabilisierer (entspricht 0,640  $\text{kg/m}^3$ ). Diese 26,0 g ST wurden der 40 l Mischung zugegeben und für 90 Sekunden untergemischt.

Ein Vergleich von Istzustand (schwarzer Graph) und Zustand nach der Aussteuerung (roter Graph) ist dem folgenden Diagramm in Abbildung 79 zu entnehmen.

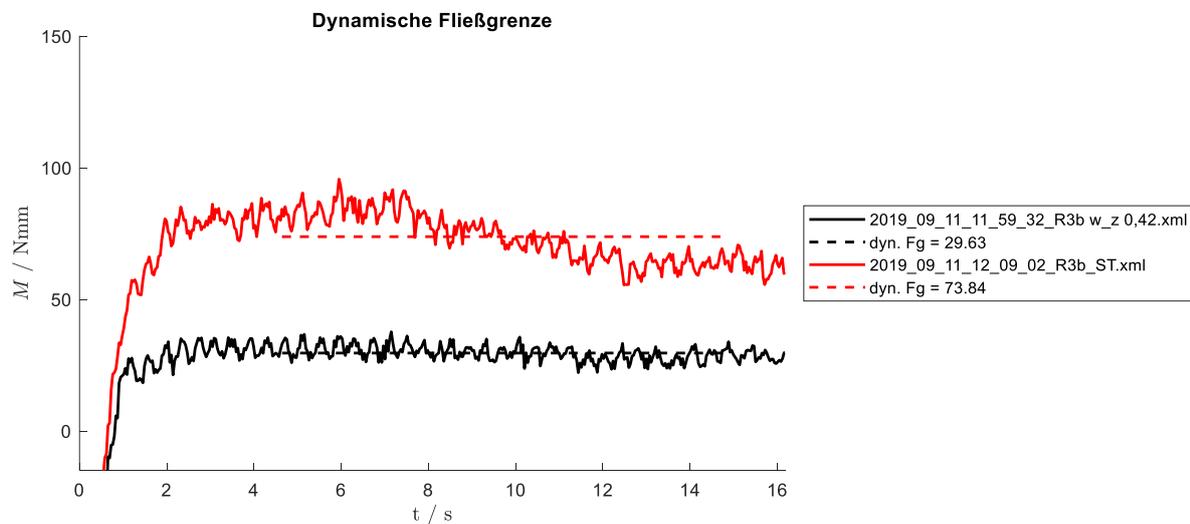


Abbildung 79: Dynamische Fließgrenze eines zu flüssigen SVB (schwarzer Graph) und nach der Aussteuerung (roter Graph) mit Stabilisierer, Rezeptur 3b

Die Zielkonsistenz von 95 Nmm hat sich nach der Aussteuerung (73,84 Nmm) nicht eingestellt. Durch haptische Prüfung und visueller Beurteilung war die Mischung jedoch stabil und zeigte keine Anzeichen von Sedimentation. Dieses Ergebnis zur Aussteuerung mit Stabilisierer spiegelt die Erfahrungen aus vorliegender Arbeit wider. Punktgenaue Aussteuerungen, wie sie mit Wasser oder Fließmittel überwiegend erreicht wurden, sind mit Stabilisierer nicht immer realisiert worden. Grund dafür könnte sein, dass es sich bei den hier verwendeten Rezepturen um Mehlkorntypen handelte. Diese beinhalten standardmäßig keinen Stabilisierer. Voruntersuchungen zu Abstimmung zwischen Fließmittel, Stabilisierer und den verschiedenen Zementen sind nicht durchgeführt worden. Zur Aussteuerung wurde hauptsächlich ein Stabilisierer verwendet, der nicht von denselben Herstellern der Fließmittel stammte. Dieses Produkt zeigte jedoch bei allen Rezepturen eine klare, physikalisch messbare Wirkung. Das heißt, dass eine zu flüssige Konsistenz durch Wasserüberschuss wieder in eine stabile Konsistenz gebracht werden konnte. Dies wurde mit den Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer dokumentiert.

Hier sollte grundsätzlich nur das technisch Machbare dargestellt werden. Mischungen, die zielgerichtet zu flüssig hergestellt wurden und bereits zum Sedimentieren neigten, konnten überwiegend in eine stabile Konsistenz eingestellt werden.

#### 4.7 Untersuchungen zur Beurteilung der Verarbeitbarkeitszeit, Liegezeit vs. Thixotropie und Frischbeton Temperatur

##### ➤ Nachweis der Verarbeitbarkeitszeit $t_{VB}$

Die Verarbeitbarkeitszeit ist ein grundlegendes Kriterium, welches eingehalten werden muss. Nur durch die Gewährleistung der designierten Verarbeitungseigenschaften über den vorgeschriebenen Zeitraum können gute Resultate am Endprodukt erzielt werden.

Das Diagramm in Abbildung 80 zeigt zweimal ein Frischbetonverhalten der Rezeptur 3a über die Zeit mit dem Kennwert dynamische Fließgrenze  $g_D$ . Der blaue Graph zeigt ein deutliches frühes Rücksteifen. Für diese Mischung wurde der Wasser- und Zusatzmittelgehalt nach der Werksrezeptur verwendet:

- w/z-Wert = 0,47
- Fließmittelgehalt = 1,45 M.-% v. Z.
- Entlüftergehalt = 0,6 M.-% v. Z.

Thixotropie Effekte können das Ansteifen nicht verursacht haben. Zwischen jeder Messung wurde für 3 Sekunden aufgemischt. Die Anforderung an die Verarbeitbarkeitszeit  $t_{VB} \geq 20$  Minuten im Fertigteilwerk [9] ist bei der Mischung mit dem blauen Graphen nicht erfüllt. Verarbeitungsprobleme im Werk sind zu erwarten. Auch im Labor konnten mit diesen Frischbetoneigenschaften keine zielsicheren Untersuchungen durchgeführt werden.

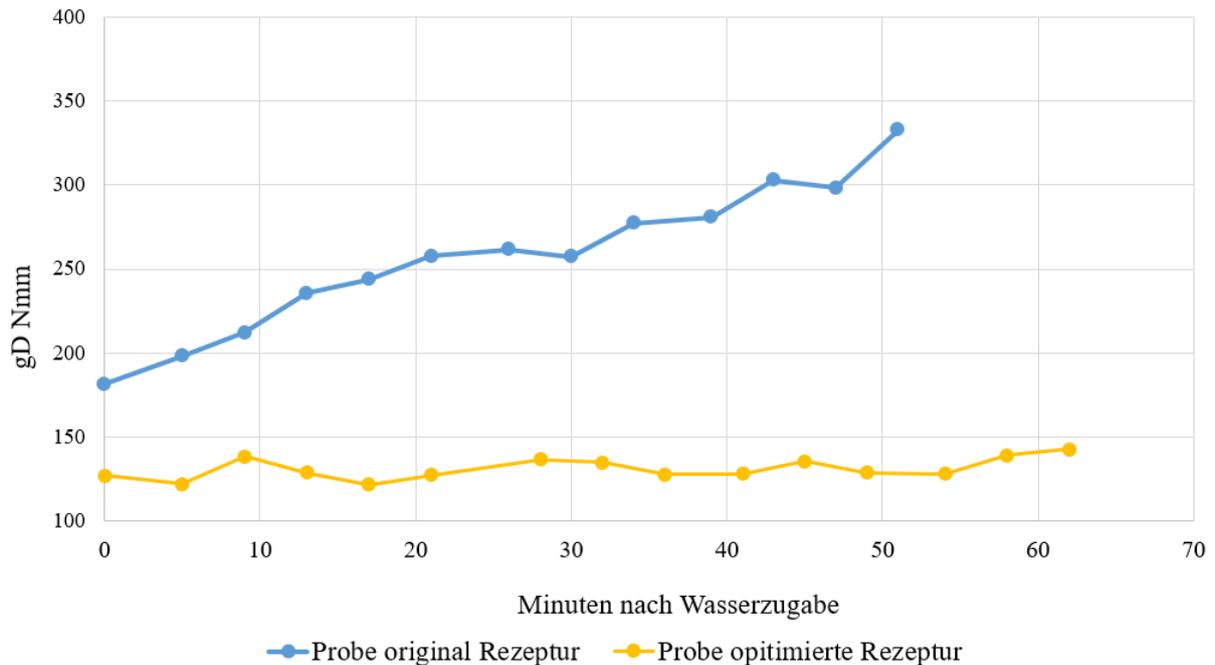


Abbildung 80: Frischbetonverhalten (dynamische Fließgrenze  $g_D$ ) der Rezeptur 3a über die Zeit, blauer Graph original Rezeptur nach Werk, gelber Graph Rezeptur nach Optimierung mit höherem Zusatzmittelgehalt

Um das Frischbetonverhalten zu optimieren, wurden die Zusatzmittelgehalte angehoben und der Wassergehalt leicht gesenkt:

- w/z-Wert = 0,46
- Fließmittelgehalt = 1,80 M.-% v. Z.
- Entlüftergehalt = 1,5 M.-% v. Z.

Durch die Erhöhung des Fließmittelgehaltes von 1,45 auf 1,8 M.-% v. Z. und die Erhöhung des Entlüftergehaltes von 0,6 auf 1,5 M.-% v. Z. wurde der SVB verarbeitbar bzw. konnte seine Konsistenz über 60 Minuten lang auf einem konstanten Niveau halten (gelber Graph in Abbildung 80). Mit diesem Frischbetonverhalten ist die Verarbeitbarkeitszeit  $t_{VB}$  erfüllt. Dieses Verhalten bzw. die Optimierung zeigen auch, dass SVB mit einem gewissen Fließmittelüberschuss hergestellt werden muss.

#### ➤ Darstellung thixotroper Einflüsse infolge Liegezeit

Bei der Herstellung und Verarbeitung von Beton spielt die Zeit in jeglicher Hinsicht eine Rolle. Bei einer ungewollten Wartezeit bzw. Liegezeit, in der frischer Beton keiner Scherbeanspruchung ausgesetzt ist, kann ein Ansteifen infolge kolloidaler Wechselwirkungskräfte (Thixotropie) die Frischbetoneigenschaften enorm verändern. Eine genaue Beurteilung dieser Wirkmechanismen ist aus betontechnologischer und baupraktischer Sicht von Interesse. In Kapitel 2 wurden die Erkenntnisse und Ansätze von *Sarmiento* [37] und *Lowke* [14] zu diesem Teilaspekt diskutiert. Die Diagramme in den folgenden beiden Abbildungen 81/82 zeigen Untersuchungsergebnisse mit den Rezepturen 3b und 4c. Zentraler Punkt dieser Untersuchungen ist die Erfassung und Darstellung thixotroper Effekte.

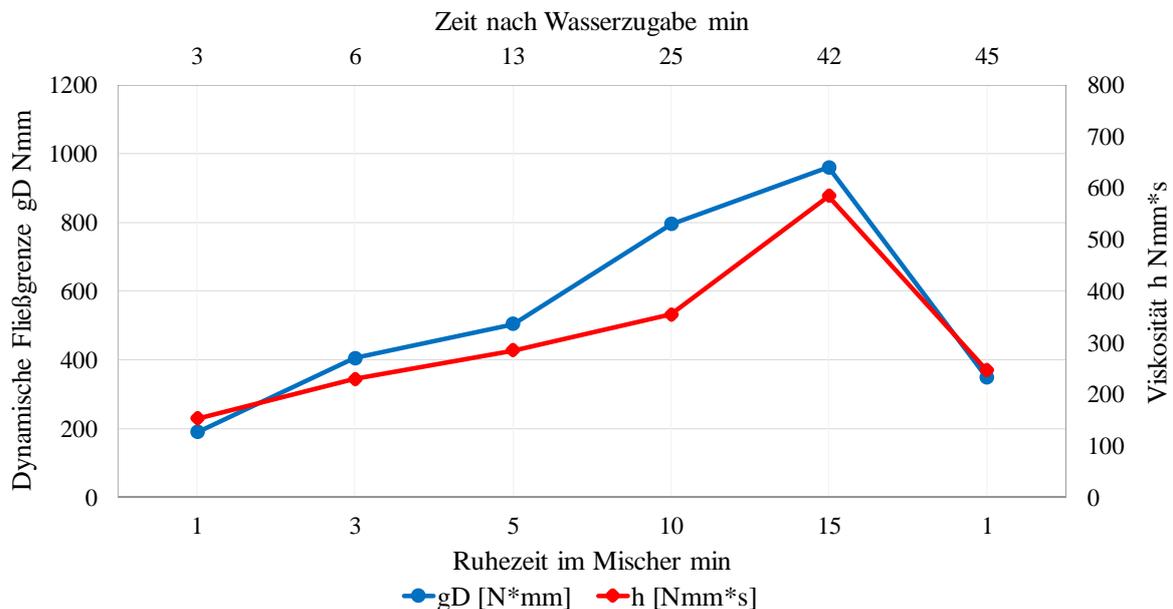


Abbildung 81: Auswirkung thixotroper Effekte auf rheologische Kennwerte infolge steigender Ruhezeitzeit im Mischer mit der Rezeptur 3b

Im Diagramm von Abbildung 81 sind die dynamische Fließgrenze und Viskosität einer Mischung nach unterschiedlichen Ruhezeiten bzw. Liegezeiten des SVB im Mischer eingetragen. Das Rheometer wurde bei allen Messungen 30 Sekunden nach dem Mischen eingesetzt (nach jeder Messung wurde für drei Sekunden aufgemischt). In der horizontalen primären Achse ist die jeweilige Ruhezeit angegeben, nach der der Messvorgang gestartet wurde. In der horizontalen sekundären Achse ist die Gesamtzeit nach der Wasserzugabe der untersuchten Mischung angetragen, wodurch das Alter der Probe charakterisiert ist. Die dynamische Fließgrenze und die Viskosität werden infolge längerer Liegezeiten höher. Das hat zur Folge, dass die designierten Verarbeitungseigenschaften eingebüßt werden.

Die dynamische Fließgrenze hat sich nach einer Liegezeit von drei Minuten mehr als verdoppelt. Damit sind das Formfüllungsvermögen und die Selbstentlüftung nahezu zum Erliegen gekommen. Die weiteren Messpunkte nach 5/10/15 und erneut nach einer Minute dienen dem Erkenntnisgewinn. Nach einer Liegezeit von 15 Minuten verfünffachte sich die dynamische Fließgrenze. Die letzte Messung bei erneut einer Minute Ruhezeit nach dem Aufmischen zeigt, dass das Ansteifen infolge Thixotropie bis zu einem gewissen Grad reversibel ist. Bei dem letzten Messpunkt nach erneut einer Minute, muss auch die Zeit nach der Wasserzugabe von 45 Minuten als Belastungsgeschichte der Mischung berücksichtigt werden. Somit ist es plausibel, dass sich bei dem letzten Messpunkt nicht die Ausgangswerte der ersten Messung einstellen.

Folgend ist in Abbildung 82 eine Untersuchung zum Einfluss aus thixotropen Effekten mit einer Mischung der Rezeptur 4c dargestellt.

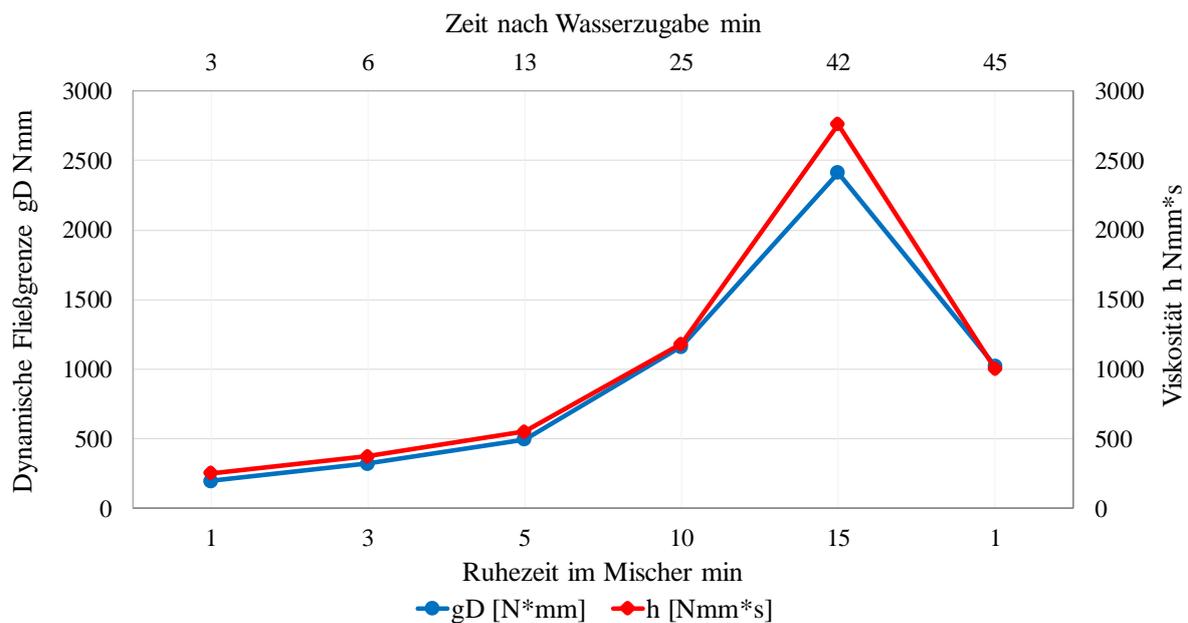


Abbildung 82: Auswirkung thixotroper Effekte auf rheologische Kennwerte infolge Ruhezeit im Mischer bei der Rezeptur 4c

Die Untersuchung zur Wirkung thixotroper Effekte mit der Rezeptur 4c in Abbildung 82 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie bei der Untersuchung der Rezeptur 3b in Abbildung 81. Der Anstieg der dynamischen Fließgrenze ist nach drei Minuten mit dem 1,6-fachen nicht ganz so stark. Der Betrag der dynamischen Fließgrenze war aber nach einer Liegezeit von 15 Minuten um mehr als das Zwölfwache höher als bei der ersten Prüfung. Bei der letzten Messung nach erneut einer Minute Ruhezeit blieben Fließgrenze und Viskosität um das Fünffache höher als die Ausgangswerte.

Die Ergebnisse in den Abbildungen 81 und 82 zeigen das instationäre Verhalten der rheologischen Kennwerte infolge Thixotropie. Der Frischbeton dieser Mischungen steift selbst in einer kurzen Ruhezeit von drei Minuten an und verliert somit seine erforderlichen Frischbetoneigenschaften. Die Ergebnisse zeigen auch, dass dieses Verhalten bei den zwei diskutierten Rezepturen unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

Diese Frischbetoneigenschaft kann durch ungewollte Liegezeiten die Produktionsprozesse und die Qualität der Endprodukte negativ beeinflussen. Andererseits ist ein solches Materialverhalten nach dem Einbringen des Betons zur Sicherstellung der Sedimentationsstabilität förderlich. Dies darf aber nicht zu ausgeprägt sein, um die Entlüftungsphase nicht frühzeitig zu stoppen.

Für die hier diskutierten Zusammenhänge bzw. Ergebnisse wurde kein Beton aus dem Mischer entnommen. Dies zeigt den Vorteil von rheologischen Untersuchungen direkt im Mischer. Die so gewonnenen Erkenntnisse können helfen, Produktionsprozesse zu optimieren oder Arbeitsabläufe entsprechend zu planen.

➤ Untersuchungen zu möglichen Temperatureinflüssen auf die Verarbeitbarkeit

Aus der Literatur z. B. *Brameshuber et al.* [32] und dem Regelwerk ZTV-ING – Teil 3 Massivbau – Abschnitt 1 Beton, Pkt. 3.3 (6) [75] geht hervor, dass die Wirkung von PCE-Fließmittel von der Temperatur beeinflusst wird. Dies wurde durch Untersuchungen mit der Rezeptur 4c stichprobenartig näher beleuchtet. Zu diesem Zweck wurden vier Mischungen mit gekühlten Ausgangsstoffen hergestellt. Die Gegenüberstellung einer Kennlinie für Wasseranspruch bei normalen Laborbedingungen (Frischbetontemperatur = 24° C) und den Mischungen mit gekühlten Ausgangsstoffen (Frischbetontemperatur = 18° C bis 20° C) ist in folgender Abbildung 83 zu sehen.

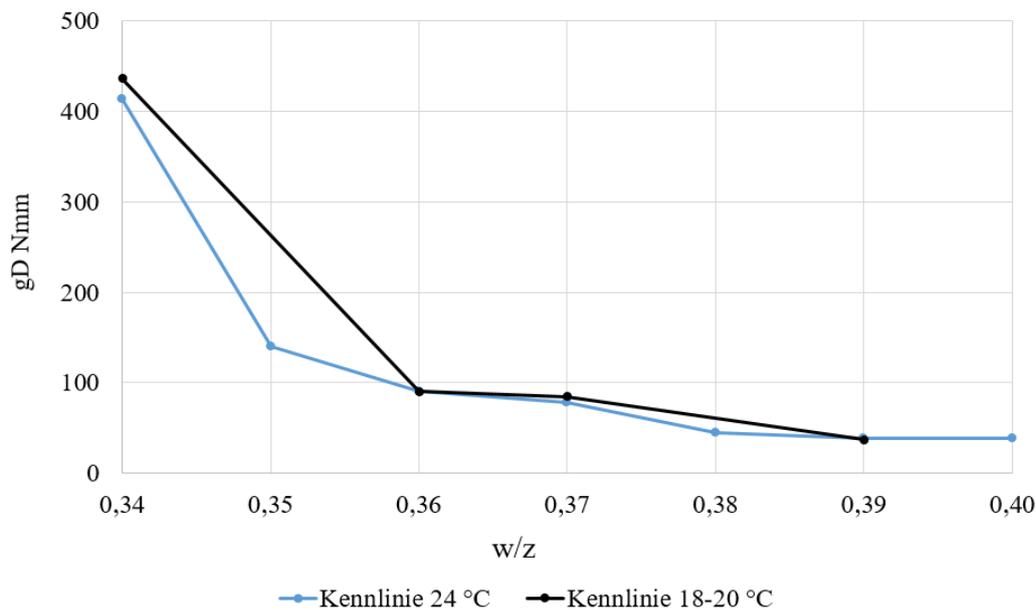


Abbildung 83: Kennlinie für Wasseranspruch unter Laborbedingungen (blauer Graph) und Kennlinie mit niedrigerer Frischbetontemperatur (schwarzer Graph), Rezeptur 4c

Von den Mischungen mit den gekühlten Ausgangsstoffen wurden nur vier hergestellt. Trotzdem ist eine plausible Gegenüberstellung möglich. Alle vier Punkte, die den schwarzen Graphen definieren, zeigen annähernd die gleiche dynamische Fließgrenze wie die Mischungen bei normaler Frischbetontemperatur unter Laborbedingungen. Das Ergebnis in Abbildung 83 zeigt, dass ein Unterschied in der Frischbetontemperatur von vier bis sechs Grad Celsius, im Temperaturbereich um 20 °C, bei dieser Rezeptur keinen wesentlichen Unterschied bei der dynamischen Fließgrenze verursacht.

## 5 Zusammenfassung

In vorliegender Arbeit wurde eine neue Methode zur zeitnahen Erfassung und Beurteilung der Verarbeitungseigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) untersucht. Aufbauend auf einer exakten Erfassung der Verarbeitungseigenschaften bzw. Konsistenz wurden die Möglichkeiten der automatischen Berechnung und Korrektur abweichender Frischbetoneigenschaften aufgezeigt. Dazu bedurfte es einer neuen Herangehensweise. Anstelle von Verarbeitungsbereichen wurden Zielpunkte definiert, die mit Korrekturmaßnahmen angesteuert wurden.

Nach *Khrapko* [73] ist die SVB-Technologie im Stahlbetonbau der größte Durchbruch der letzten Jahrzehnte. Der Wegfall der Verdichtungsarbeiten bietet wesentliche technische, soziale und ökonomische Vorteile. Die Europäischen Richtlinien für SVB [7] sind ein regelrechtes Plädoyer für die Verwendung dieses Hochleistungsbetons. Neben der besseren Sichtbetonqualität im Vergleich zu Rüttelbeton ist die erhöhte Dauerhaftigkeit ein wichtiges Merkmal des SVB. Diese Technologie wird jedoch im deutschsprachigen Raum bis heute kaum eingesetzt.

Eine der hauptsächlichen Herausforderungen bei der Anwendung der SVB-Technologie liegt in der sicheren Gewährleistung der speziellen charakteristischen Frischbetoneigenschaften. Ein gut eingestellter SVB fließt nahezu bis zum völligen Niveaueausgleich bis in die letzten Ecken der Schalung und umschließt vollständig die Bewehrung. Dabei entlüftet der SVB in dem Maße wie ein vollständig verdichteter Rüttelbeton. Einerseits hat der Selbstverdichtende Beton eine sehr hohe Fließfähigkeit aufzuweisen, andererseits muss der Beton auch eine ausreichend hohe Viskosität haben, um seine Homogenität zu bewahren.

Um eine wirtschaftliche Herstellung zu ermöglichen, ist es notwendig, dass der SVB im frischen Zustand auch ein hohes Maß an Robustheit aufweist. Durch die Robustheit können auch bei natürlich vorkommenden Schwankungen in der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und Toleranzen im Dosiervorgang die erforderlichen Frischbetoneigenschaften aufrechterhalten werden.

In einer Literatursichtung zum Thema SVB, insbesondere der Entwicklung und Robustheit, wurden die Einflussfaktoren aus der Zusammensetzung und den äußeren Einflüssen beleuchtet.

Daraus bzw. aus den Praxis-Erfahrungen geht hervor, dass geringe Änderungen in der Qualität und Quantität der Ausgangsstoffe die designierten Frischbetoneigenschaften stören können. Dabei spielt der wirksame Wassergehalt bei sonst konstanten Mischungsbestandteilen eine entscheidende Rolle. Die wirksame Wassermenge beeinflusst die Fließgrenze und Viskosität und somit die essenziellen Verarbeitungseigenschaften. Die aktuell am Markt vorhandenen Feuchtemesssysteme für Sande weisen üblicherweise Toleranzen von ein bis zwei Prozent auf. Die Feuchte der groben Gesteinskörnung muss durch Darrversuche bestimmt werden. Eine Abweichung in der Sandfeuchte von 1 %, kann bei einem Sandgehalt von  $750 \text{ kg/m}^3$  eine Abweichung von  $\pm 7,5 \text{ Wasser l/m}^3$  verursachen.

Selbst moderne Mischanlagen, eine gute Qualitätskontrolle und eine robuste SVB-Rezeptur können unter den genannten baupraktischen Gesichtspunkten keine Garantie für eine reibungslose und stetige SVB-Produktion geben. Die heute gängigen und genormten Prüfverfahren zur Beurteilung der Konsistenz wie Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit (sowie als Alternative der

Kombinierte Auslaufkegel) können verlässliche Informationen über die Verarbeitbarkeit liefern. Infolge des zeitlichen Aufwandes sind diese Prüfmethode jedoch nur bedingt für die Qualitätskontrollen in einer laufenden Produktion geeignet.

SVB ist ein komplexes System. Es liegt in der Natur von komplexen Systemen, dass geringe Änderungen einzelner Faktoren die Funktion des Systems wesentlich stören können. Fakt ist jedoch, dass sich bei der Betonherstellung mehrere Variable zeitgleich ändern können und es auch tun. Um die komplexen Zusammenhänge besser untersuchen zu können, entwickelten Wissenschaftler wie z. B. *Tattersall* in den 1970er-Jahren rheologische Prüfmethode für Betone.

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen zur Rheologie von SVB wurde in vorliegender Arbeit ein neuer Ansatz zur zeitnahen Erfassung der Konsistenz entwickelt:

- Die Systematik der Prüfung von SVB im Betonmischer ist neu. Man misst mit einem langsam laufenden Kugelrheometer in einer kurzen Mischpause die Konsistenz des ruhenden, frisch hergestellten Betons. Mit der langsamen Schergeschwindigkeit wird die Kraft, welche auf den Scherkörper wirkt, unter laminaren Bedingungen präzise ermittelt. Das gekürzte Messprofil ist in zwei Phasen eingeteilt. In Phase 1 wird der Beton bei konstanter Geschwindigkeit geschert. Damit wird die wirksame Kraft über die Zeit aufgezeichnet. Aus dem Bereich, in dem sich ein stationäres Fließen durch Gleichgewicht aus Scherbelastung und Widerstandsmoment einstellt, lässt sich die dynamische Fließgrenze berechnen. In Phase 2 des Messprofils wird die Kraft über die abfallende Schergeschwindigkeit aufgezeichnet. Durch eine Ausgleichsgerade wird eine Geradengleichung erstellt. Aus dieser Geradengleichung lässt sich nach dem Model von *Eugene C. Bingham* die Viskosität und die Bingham Fließgrenze bestimmen.
- Es wurde gezeigt, dass die Ergebnisse dieser rheologischen Prüfungen den der heute gängigen Prüfverfahren für SVB in der Genauigkeit ebenbürtig sind. Dadurch wurde nachgewiesen, dass die Ergebnisse in Form von rheologischen Kennwerten schnell aussagekräftige Informationen über unterschiedliche Konsistenz liefern können.
- Durch die Untersuchungen zum optimalen Messzeitpunkt wurde gezeigt, dass der Mischprozess bewertet und auch optimiert werden kann. Durch Wiederholung von Prüfungen kann die Verarbeitbarkeitszeit  $t_{VB}$  beurteilt und nachgewiesen werden. Durch dieses Vorgehen wurde auch bewiesen, dass die Ergebnisse einzelner Messungen bei gleicher Konsistenz auch immer reproduzierbare Ergebnisse liefern. Als beste Steuergröße wurde die dynamische Fließgrenze identifiziert.

Neben der frühen, schnellen und genauen Erfassung der Konsistenz zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit im zweiten Teil einen weiteren Ansatz:

- Dieser Teil beschreibt die Generierung einer systematisch erstellten Wissensdatenbank, die Informationen in Form von rheologischen Kennlinien enthält. Idealerweise wird die Bandbreite der Konsistenz abgebildet, die in der Praxis durch Schwankungen im wirksamen Wassergehalt entstehen kann.
- Systematische Entwicklung von rheologischen Kennlinien
  - Durch die systematische Erstellung von Kennlinien für den wirksamen Wassergehalt, hier über den w/z-Wert formuliert, kann der angestrebte Verarbeitungspunkt einer SVB-Rezeptur zahlenmäßig definiert werden. Durch die Variation des w/z-Wertes der einzelnen Probemischungen können Bereiche erfasst werden, in denen der Beton stagniert oder sedimentiert. Solche Bereiche werden durch Zahlen für rheologische Kennwerte ebenfalls genau beschrieben.
  - Außerdem ist die Verarbeitbarkeit bei abweichendem Wassergehalt in Kombination mit Betonzusatzmitteln beleuchtet worden. Es sind gezielt Mischungen mit Überschuss und Mangel des wirksamen Wassergehalts hergestellt worden. Bei zu steifen Mischungen wurde der SVB durch schrittweise Zudosierung von Fließmittel in eine gute Verarbeitbarkeit gebracht. Mischungen, die zu flüssig hergestellt wurden und bereits zum Sedimentieren neigten, wurden durch zusätzlichen Stabilisierer in einen stabilen Zustand gesteuert. Die Punkte der einzelnen Messungen bilden Kennlinien für zusätzliches Fließmittel und Stabilisierer. Diese Daten ermöglichen die Korrektur einer zu steifen Mischung, wahlweise mit Wasser oder Fließmittel.
  - Bei der Festlegung und Verwendung von Kennlinien für zusätzliches Fließmittel muss darauf geachtet werden, dass der Grad der Abweichung der zu korrigieren ist, auch durch eine entsprechend fein abgestimmte Kennlinie abgedeckt wird, siehe Diskussion Abb. 69 bis Abb. 75.
- Anhand der systematisch erstellten Kennlinien sind die ermittelten rheologischen Kennwerte dynamische Fließgrenze, Bingham Fließgrenze und Viskosität diskutiert worden. Die einzelnen Parameter wurden auf deren Aussagekraft und deren Genauigkeit in der Darstellung unterschiedlicher Verarbeitungseigenschaften untersucht. Die Bingham Fließgrenze ist bei SVB generell sehr niedrig und konvergiert in der Regel gegen null. In [39] wurden mit Fließmittel hergestellte Feinstoffleime als Newton-Flüssigkeit definiert. Aufbauend auf diesen Annahmen charakterisierte *Sarmiento* SVB als Newton-Fluid [37]. Die Ergebnisse vorliegender Arbeit bestätigen diese Festlegungen. Mit dem hier verwendeten Messsystem konnte die Bingham Fließgrenze nicht ausreichend genau bestimmt werden. Daher wurde dieser Parameter nicht weiterverwendet. Es wurde gezeigt, dass mit dem Parameter dynamische Fließgrenze eine variierende Konsistenz zielsicher und präzise erfasst werden kann. Daher wurde dieser Kennwert als Hauptsteuerparameter gewählt. Außerdem wurde gezeigt, dass die dynamische Fließgrenze bei SVB mit der Viskosität nach Bingham korreliert und sogar verlässlicher als diese zu bestimmen ist. SVB mit einer sehr niedrigen Fließgrenze nach Bingham, die gegen null konvergiert, kann daher als Newtonsche Flüssigkeit nach einem Parameter angesteuert werden

- Zum Aufbau der Wissensdatenbank einer spezifischen SVB-Rezeptur wurden die rheologischen Parameter dynamische Fließgrenze und Viskosität eingesetzt. Mit diesen beiden Kennwerten sind in einer Wissensdatenbank jeweils drei Kennlinien zur Beschreibung der Konsistenz bei unterschiedlichen Wasser- und Zusatzmittelgehalten hinterlegt.
- Der Aufbau eines neuen Algorithmus wurde vorgestellt. Die Funktionsweise beruht auf einfachen Rechenoperationen. Der Algorithmus kann einen Istwert mit dem Zielwert (angestrebte Konsistenz) einer Wissensdatenbank vergleichen. Bei Abweichungen von der angestrebten Konsistenz berechnet der Algorithmus über eine entsprechende Kennlinie die Art und Menge jener Komponente, die zudosiert werden muss, um die angestrebte Konsistenz einzustellen.
- Versuche zur Aussteuerung abweichender Frischbetoneigenschaften, durch automatisch berechnete Korrekturanweisungen, zeigten zufriedenstellende Resultate.

Auf die Hard- und Software des Systems wird in dieser Arbeit nicht vertieft eingegangen. Die Rezeptentwicklung von SVB wird nicht thematisiert. Die rheologischen Untersuchungen wurden ausschließlich an Betonen durchgeführt.

Im Gegensatz zu den Einpunkt - Frischbetonversuchen bietet die hier vorgestellte Systematik Vorteile für weitere Forschungsaufgaben. Fragestellungen zur Verarbeitbarkeit, zur Robustheit und zu Einflüssen aus der Zeit, der Temperatur und der Thixotropie können effektiver, genauer und schneller bearbeitet und beantwortet werden. Grundsätzlich sind auch Möglichkeiten aufgezeigt worden, die die Herstellung von Hochleistungsbeton wie SVB beherrschbarer machen. Wenn das entwickelte Aussteuerungssystem später in Betonwerken erfolgreich eingesetzt wird, kann die Qualität angehoben und der Ausschuss bei der SVB-Produktion verringert werden.

## Literatur

- [1] Brameshuber, W.: Selbstverdichtender Beton. In: Schriftenreihe Spezialbetone, Nr. 5, Verlag Bau + Technik; Düsseldorf, 2004.
- [2] Okamura, H.; Ouchi, M.: Self-compacting high performance concrete. *Prog Struct Eng Mater* 1998; 1: 378–383. doi:10.1002/pse.2260010406
- [3] Okamura, H.; Ouchi, M.: Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 1, No. 1, 5-15, Japan Concrete Institute, 2003.
- [4] Okamura, H.; Ozawa, K.; Ouchi, M.: Self-Compacting High Performance Concrete. *Structural Engineering International* 4/96, doi:10.1680/stco.2000.1.1.3.
- [5] Ozawa, K.; Maekawa K.; Okamura H.: Development of High Performance Concrete. *Journal of The Faculty of Engineering, the University of Tokyo* 1992; Vol. XLI: 381–439.
- [6] Ouchi, M.; Hibino, M.; Okamura, H.: Effect of Superplasticizer on Self-Compactability of Fresh Concrete. *Transportation Research Record* 1997; 1574: 37–40. doi:10.3141/1574-05.
- [7] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC: Europäische Richtlinie für SCC: Festlegung, Produktion und Anwendung, 2005, deutsche Übersetzung 2006.
- [8] Breitenbücher, R.: Selbstverdichtender Beton in der Praxis, Philipp Holzmann Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH, Neu-Isenburg.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie für Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ergänzung zu DIN-1/DIN 1045-2/07.01, Beuth Verlag.
- [10] DIN EN 197-1:2011-11, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2011. Beuth Verlag.
- [11] Höveling, H.: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB). Dissertation, Universität Hannover, Institut für Baustoffe, 2006.
- [12] Kubens, S.: Interaction of cement and admixtures and its effect on rheological properties. Dissertation, Bauhausuniversität Weimar, 2010.
- [13] Marquardt, I.: Ein Mischungskonzept für Selbstverdichtenden Beton auf Basis der Volumenkenngößen und Wasseransprüche der Ausgangsstoffe. Dissertation, TH Rostock, 2001.
- [14] Lowke, D.: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone – Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen. Dissertation, TU München, 2013.
- [15] DIN EN 206: 2021-06, Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021. Beuth Verlag.

- [16] DIN 1045-2:2008-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag.
- [17] Mazanec, O.: Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen. Dissertation TU München, 2013.
- [18] Kordts, S.: Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften Selbstverdichtender Betone. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005.
- [19] Ostheeren, K.; Ludwig, H.-M.: Kornformeinflüsse des Mehlkorns auf die rheologischen Eigenschaften selbstverdichtender Mörtel. Fachtagung Recycling R 13, Weimar, 2013.
- [20] Uebachs, S.; Brameshuber, W.: Influence of the granulometry of the binder and the sand on the rheological properties of self-compacting concretes. Hanley Wood, 2005.
- [21] Wüstholtz, T.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Dissertation, TU Stuttgart, 2005.
- [22] Huß, A.: Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Dissertation, TU Stuttgart, 2010.
- [23] Thielen, G.; Spanka, G.; Grube, H.: Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel. Beton – Verlag Bau und Technik, S. 61-68, 1998.
- [24] Fleischmann, F.: Ein Beitrag zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem Kugel-Messsystem. Dissertation, RUB, 2015.
- [25] Heidelberg Cement; Betontechnische Daten <https://www.betontechnische-daten.de/de/node/1750>; Stand: 25.10.2021.
- [26] Tauscher, F.: Verwendung von Selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 53, 2006.
- [27] Breit, W.; Grube, H.; Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton - Technologie und Anwendung. Der Prüflingenieur 37, 2000.
- [28] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkmechanismen verflüssigender Beton-zusatzmittel. Verein Deutscher Zementwerke. Betontechnische Berichte: 2001-2003 = Concrete technology reports: 2001-2003. Düsseldorf: VBT, Verlag Bau + Technik; 2004.
- [29] König, G.; Tue, N. V.; Zink, M.: Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2001.
- [30] Schmidt, W.: Effektivität von Stabilisierern - Einfluss des Feststoffvolumenanteils und Wechselwirkungen mit Fließmitteln. Schleibinger Testing Systems – 23. Konferenz 2014;

[http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologische\\_Messungen\\_an\\_mineralischen\\_Baustoffen:23.\\_Konferenz; Stand: 26.10.2021](http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologische_Messungen_an_mineralischen_Baustoffen:23._Konferenz; Stand: 26.10.2021).

- [31] Khayat, K. H.: Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview. *Cement and Concrete Composites* 1998; 20: 171–188. doi:10.1016/S0958-9465(98)80006-1.
- [32] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: The Influence of the Temperature on the rheological properties of Self-Compacting Concrete. 3<sup>rd</sup> International symposium on Self Compacting Concrete, Iceland, August 2003.
- [33] Chopin, D.; de Larrard, F.; Cazacliu, B.: Why do HPC and SCC require a longer mixing time? *Cement and Concrete Research* 2004; 34: 2237–2243. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.012.
- [34] Lowke, D.; Schiessl, P.: Effect of mixing energy on fresh properties of SCC. 2005. <https://www.researchgate.net/publication/259867644>.
- [35] Schießl, P.; Mazanec, O.; Lowke, D.: SCC and UHPC — Effect of Mixing Technology on Fresh Concrete Properties. In: Grosse CU, Hrsg. *Advances in Construction Materials* 2007. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007: 513–522.
- [36] Baumert, C.: Rheometrische Mischprozessführung Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer zur Herstellung von Hochleistungsbeton mit definierten rheologischen Eigenschaften. Dissertation, TU Darmstadt, 2012.
- [37] Sarmiento, D.: Entwicklung von Selbstverdichtenden Betonen mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau. Dissertation, RUB, 2011.
- [38] Bornemann, R.: Untersuchungen zur Modellierung des Frisch- und Festbetonverhaltens erdfeuchter Betone. Kassel University 2005.
- [39] Verein Deutscher Zementwerke e.V, (Hrsg.) *Zement Taschenbuch*. 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2008.
- [40] DIN 1342-1:2003-11, Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe. Beuth Verlag.
- [41] DIN 1342-2:2003-11, Viskosität - Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten. Beuth Verlag.
- [42] DIN 1342-3:2003-11, Viskosität - Teil 3: Nicht newtonsche Flüssigkeiten. Beuth Verlag.
- [43] DIN 13343:1994-04, Linear-viskoelastische Stoffe; Begriffe, Stoffgesetze, Grundfunktionen. Beuth Verlag.
- [44] DIN 53019-1:2008-09, Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 1: Grundlagen und Messgeometrie. Beuth Verlag.
- [45] DIN 53019-2:2001-02, Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 2: Viskosimeterkalibrierung und Ermittlung der Messunsicherheit. Beuth Verlag.

- [46] DIN 53019-3:2008-09, Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 3: Messabweichungen und Korrekturen. Beuth Verlag.
- [47] DIN 53019-4:2016-10, Rheometrie - Messung von Fließeigenschaften mit Rotationsrheometern- Teil 4: Oszillationsrheologie. Beuth Verlag.
- [48] DIN EN ISO 3219-1:2021-08, Rheologie - Teil 1: Begriffe und Formelzeichen für die Rotations- und Oszillationsrheometrie (ISO 3219-1:2021); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 3219-1:2021. Beuth Verlag.
- [49] DIN EN ISO 3219-2:2021-08, Rheologie - Teil 2: Allgemeine Grundlagen der Rotations- und Oszillationsrheometrie (ISO 3219-2:2021); Deutsche Fassung EN ISO 3219-2:2021. Beuth Verlag.
- [50] Mezger, T.: Das Rheologie Handbuch: für Anwender von Rotations- und Oszillationsrheometern. 5. vollständig überarbeitete Auflage. Hannover: Vincentz; 2016.
- [51] DIN-Fachbericht 143:2005-04, Moderne rheologische Prüfverfahren Teil 1: Bestimmung der Fließgrenze, Grundlagen und Ringversuch. Beuth Verlag.
- [52] DIN SPEC 91143-2:2012-09, Moderne rheologische Prüfverfahren - Teil 2: Thixotropie\_- Bestimmung der zeitabhängigen Strukturänderung - Grundlagen und Ringversuch; Text Deutsch und Englisch. Beuth Verlag.
- [53] Tattersall, G.H.: The rationale of a two-point workability test. Magazine of Concrete Research 1973; 25: 169–172. doi:10.1680/mac.1973.25.84.169.
- [54] Cheng, .C-H.: Yield stress: A time-dependent property and how to measure it. Rheologica Acta 25: 542–554. 1985, doi:10.1007/BF01774406.
- [55] Roussel, N.: Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes. Cement and Concrete Research 2005; 35: 1656–1664. doi:10.1016/j.cemconres.2004.08.001.
- [56] Feys, D.; Wallevik, J.; Yahia, A.; et al.: Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers. Materials and Structures 2012; 46. doi:10.1617/s11527-012-9902-6.
- [57] Ferraris, C. F.; Martys, N. S.: 3 - Concrete rheometers. In: Roussel N, Understanding the Rheology of Concrete. Woodhead Publishing; 2012: 63–82.
- [58] Tyrach, J.: Rheologische Charakterisierung von zementären Baustoffsystemen. Dissertation, Technische Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.
- [59] DIN EN 12350-5:2019-09, Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2019. Beuth Verlag.
- [60] DIN EN 12350-3:2019-09, Prüfung von Frischbeton - Teil 3: Vébé-Prüfung; Deutsche Fassung EN 12350-3:2019. Beuth Verlag.
- [61] Reiners, J.; Müller, C.; Penttilä J. et al.: Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe. Concrete Technology Reports 2013 -2015.

- [62] Heidelberger Newsletter Technik 18, Temperatur Schwankungen. Okt. 2013  
[https://www.heidelbergcement.de/de/system/files\\_force/asset/document/18\\_newsletter\\_technik\\_okt2013.pdf?download=1](https://www.heidelbergcement.de/de/system/files_force/asset/document/18_newsletter_technik_okt2013.pdf?download=1).
- [63] DIN EN 12350-9: 2010-12, Prüfung von Frischbeton – Teil 9: Selbstverdichtender Beton - Auslauftrichterversuch; Deutsche Fassung EN 12350-9:2010. Beuth Verlag.
- [64] DIN EN 12350-10: 2010-12, Prüfung von Frischbeton – Teil 10: Selbstverdichtender Beton - L-Kasten-Versuch; Deutsche Fassung EN 12350-10:2010. Beuth Verlag.
- [65] DIN EN 12350-11: 2010-12, Prüfung von Frischbeton - Teil 11: Selbstverdichtender Beton - Bestimmung der Sedimentationsstabilität im Siebversuch; Deutsche Fassung EN 12350-11:2010. Beuth Verlag.
- [66] DIN EN 12350-12: 2010-12, Prüfung von Frischbeton Teil 12: Selbstverdichtender Beton – Blockierring-Versuch; Deutsche Fassung EN 12350-12:2010. Beuth Verlag.
- [67] Kordts, S.; Breit, W.; Kombiniertes Prüfverfahren zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB – Auslaufkegel. Concrete Technology Reports 2004-2006.
- [68] Garrecht, H.; Baumert, C.: Rheology-Based Mixing Prozess to ensure uniform workability of demanding concrete mixes. Otto-Graf-Journal Vol. 18, 2019.
- [69] Setzer, M. J.: Control of consistency in computer aided concrete manufacture. In: Wierig H. J.: Properties of Fresh Concrete: Proceedings of the International RILEM Colloquium. CRC Press; 1990.
- [70] Visco Probe 1. CONVI Goes new ways. Consistency measuring equipment for concrete mixers - PDF Free Download. . Im Internet: <https://docplayer.net/100932679-Visco-probe-1-convi-goes-new-ways-consistency-measuring-equipment-for-concrete-mixers.html>; Stand: 10.11.2021.
- [71] Wallevik, J. E.; Wallevik, O. H.: Analysis of shear rate inside a concrete truck mixer. Cement and Concrete Research 2017; 95: 9–17. doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.007.
- [72] Mirwald, T.; Paric, I.: Beitrag zur zeitnahen Aussteuerung von Selbstverdichtendem Beton im Betonmischer unter Zuhilfenahme der Messwerte des Kugelrheometers. Masterarbeit, OTH Regensburg; 2015.
- [73] Khrapko M. Self Compacting Concrete – a Solution for Technology Hungry Concrete Construction, [http://www.cbecon.co.nz/pdf/1351314102\\_Self%20Compacting%20Concrete%20-%20a%20Solution%20for%20Technology-Hungry.pdf](http://www.cbecon.co.nz/pdf/1351314102_Self%20Compacting%20Concrete%20-%20a%20Solution%20for%20Technology-Hungry.pdf)
- [74] Stark J, Wicht B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013.
- [75] BASt – Publikationen - ZTV-ING, Teil 1 – 9, ARS 25/2013, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013/12.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Notwendigkeit für Selbstverdichtenden Beton nach Okamura und Ouchi [3].....	4
Abbildung 2:	Vergleich der Mischungszusammensetzung zwischen konventionellem Beton und Selbstverdichtendem Beton nach Okamura und Ouchi [3] .....	5
Abbildung 3:	Methoden zum Erreichen von selbstverdichtenden Eigenschaften nach Okamura und Ouchi [3].....	5
Abbildung 4:	Unterschied der Robustheit SVB gegenüber Normalbeton [8].....	7
Abbildung 5:	Kumulativer Hohlraumgehalt in Abhängigkeit vom Scherwiderstand der Mehlkornhaufwerke in Suspension nach Kordts [18] .....	11
Abbildung 6:	Einfluss der Packungsdichte auf den Fließmittelbedarf nach Osterheeren et al. [19].....	12
Abbildung 7:	Ideale Kornverteilungskurven nach Fuller & Thompson und Funk & Dinger [20].....	12
Abbildung 8:	Einfluss variierender Sandgehalte unterschiedlicher Sandsieblinien auf den Wasseranspruch nach Punktke, [11] .....	13
Abbildung 9:	Modell der Leimschichtdicke mit Darstellung des Überschussleims $V_{Leim,Ü}$ und der Idealisierung der Leimschichtdicke $d_{Leim}$ , ergänzt aus Wüstholtz [21] nach Huß [22] .....	15
Abbildung 10:	Trichterauslaufzeit des Betons (a) sowie Setzfließmaß (b) über der Körnungsziffer der Sieblinie nach Wüstholtz [21] .....	15
Abbildung 11:	Anwendungsmöglichkeiten von Fließmitteln aus [25].....	17
Abbildung 12:	Einfluss von Zugabewasser (links) und von Fließmittel (rechts) auf die rheologischen Eigenschaften von Zement und Mehlkorn-suspensionen nach Kordts [18] .....	17
Abbildung 13:	Variation des Fließmittelgehaltes nach Wüstholtz [21].....	18
Abbildung 14:	Variation des Fließmittelgehaltes nach Wüstholtz [21].....	19
Abbildung 15:	Einfluss der Mischzeit auf das Setzfließmaß nach Lowke und Schießl [34].....	22
Abbildung 16:	Zwei-Platten-Modell mit vereinfachter schematischer Darstellung der Grundgrößen eines Rotationsversuches aus DIN EN ISO 3217-2 [49].....	25
Abbildung 17:	Hobartmischer mit vorgeschaltetem Wattmeter nach Tattersall (1973) [53] .....	28
Abbildung 18:	Ermittlung von Fließkurven mit den rheometrischen Kennwerten $g$ und $h$ nach Kordts, [18] .....	29
Abbildung 19:	Entwicklung der Scherspannung $\tau$ bei konstanter Scherrate (links) und statische Fließgrenze $\tau_{OS}$ (rechts) aus Lowke [14] nach Cheng [54].....	30

Abbildung 20:	Gleichgewichtsscherspannung nach verschiedenen Ruhezeiten über die Zeit bei niedriger Scherrate (0,5 s <sup>-1</sup> ) nach Roussel [55] .....	30
Abbildung 21:	Rheometrische Verhalten von Mehlkorn/Wasser-Suspensionen; ohne Fließmittel (Bingham-Körper), und mit Fließmittel (Newton-Flüssigkeit) aus [39].....	31
Abbildung 22:	Verarbeitungsfenster definiert durch Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit [9].....	35
Abbildung 23:	Auswertung des Rampenprofils links, Auswertung des Stufenprofils rechts [24] .....	39
Abbildung 24:	Die Ergebnisse zeigen, dass die dynamische Fließgrenze unterschiedliche Wassergehalte messtechnisch gut erfassen kann [24].....	39
Abbildung 25:	Die Bingham-Viskosität bildet unterschiedliche Wassergehalte analog zur Trichterauslaufzeit ab [24] .....	40
Abbildung 26:	Schematische Darstellung (links) und Abbildung des RheoCT mit Konsole für einen Intensivmischer (Hersteller Eirich) im Labor (rechts) .....	41
Abbildung 27:	Die Messkugel bzw. der Scherkörper befindet sich in der Startposition. Die Messung erfolgt von oben gesehen in einer 140° Linksdrehung .....	41
Abbildung 28:	Getestete Scherprofile in der Arbeit Mirwald / Paric[72].....	42
Abbildung 29:	Messprofil mit 1 U/min für den Einsatz im Mischer .....	49
Abbildung 30:	Modifiziertes Kugelmesssystem (Betonrheometer) mit der Bezeichnung RheoCT2, Links: Werkeinsatz in einem Planetenmischer .....	50
Abbildung 31:	Geschwindigkeitsprofil (roter Graph) und Widerstandsmoment (blauer Graph) über die Zeit .....	58
Abbildung 32:	Bestimmung der dynamischen Fließgrenze aus dem Drehmoment-Zeit-Diagramm, erstellt mit Phase 1 des Geschwindigkeitsprofils.....	59
Abbildung 33:	Fließkurve erstellt mit dem Bingham-Modell aus Phase 2 des Messprofils, die wesentliche Größe ist die Viskosität.....	59
Abbildung 34:	Dynamische Fließgrenze von zwei Betonproben zu verschiedenen Messzeitpunkten, Versuchsserie mit Rezeptur R4a, Nassmischzeit 90 s .....	61
Abbildung 35:	Viskosität von zwei Mischungen zu verschiedenen Messzeitpunkten, Versuchsreihe mit Rezeptur R4a, Nassmischzeit 90 s .....	61
Abbildung 36:	Viskosität und dynamische Fließgrenze eines Versuchs der Versuchsreihe R4b bei variierenden Messzeitpunkten. Nassmischzeit 90 s .....	63
Abbildung 37:	Viskosität und dynamische Fließgrenze eines Versuchs der Versuchsreihe R4b mit unterschiedlichen Messzeitpunkten. Nassmischzeit 120 s .....	64

Abbildung 38:	Messzeitpunkt Verifizierung durch Reproduzierbarkeit von Messwerten an einer Mischung mit Rezeptur 4b, Nassmischzeit 150 s.....	65
Abbildung 39:	Auswertung von neun Messungen aus Phase 2 nach dem Bingham-Modell nach unterschiedlicher Ruhezeit des Betons, Versuchsreihe R4b, Nassmischzeit 120 s, vgl. Abb. 37 .....	67
Abbildung 40:	Dynamische Fließgrenze aus Phase 1 von neun Messungen nach unterschiedlichen Ruhezeiten des Betons, Versuchsreihe R4b, Nassmischzeit 120 s, vgl. Abb. 36.....	68
Abbildung 41:	Gegenüberstellung der dynamischen Fließgrenze mit dem Setzfließmaß aus einer Versuchsreihe R1 anhand von Kennlinien über den w/z-Wert aufgetragen.....	69
Abbildung 42:	Gegenüberstellung der Viskosität und der Kegelauslaufzeit aus Versuchen mit Rezeptur 1 anhand von Kennlinien über den w/z-Wert.....	70
Abbildung 43:	Gegenüberstellung der dynamischen Fließgrenze mit dem Setzfließmaß aus Untersuchungen mit der Rezeptur 3b anhand von Kennlinien über den variierenden w/z-Wert.....	71
Abbildung 44:	Gegenüberstellung der Viskosität und Kegelauslaufzeit mit der Rezeptur R3b anhand von Kennlinien über den variierenden w/z-Wert.....	71
Abbildung 45:	Drehmoment über die Zeit von sechs Mischungen der Rezeptur 3b, w/z-Werte von 0,41 bis 0,46. Ergebnisse aus Phase 1 der Messung .....	73
Abbildung 46:	Drehmoment bei fallender Scherrate, wenn gemäß Messprofil aus Abbildung 28 Phase 2 geprüft wird. Eingezeichnet (gestrichelte Ausgleichsgerade) und ausgewertet (Legende) ist dann die Geradengleichung, aus der Viskosität und Bingham Fließgrenze abzulesen sind, Rezeptur 3b.....	74
Abbildung 47:	Kennlinien über den w/z-Wert mit der Rezeptur 3b, Vergleich dynamische Fließgrenze $g_D$ und Bingham Fließgrenze $g_B$ .....	75
Abbildung 48:	Kennlinien über den w/z-Wert mit den Parametern dynamische Fließgrenze und Viskosität der Rezeptur 3b.....	76
Abbildung 49:	Rheogramm mit den Kennwerten dynamische Fließgrenze $g_D$ und Viskosität $h$ bei w/z-Werten von 0,41 bis 0,46, Inkrement 0,01 w/z, Rezeptur 3b .....	77
Abbildung 50:	Drehmoment über die Zeit von neun Messungen. Ergebnisse aus Phase 1 der Messung. Die eingezeichnete gestrichelte Linie markiert den Bereich, aus dessen Mittelwert die dynamische Fließgrenze (siehe Legende) resultiert. Rezeptur 3b .....	78
Abbildung 51:	Drehmoment über fallende Scherrate bei steigendem Fließmittelgehalt aus Phase 2 der Messung. Eingezeichnet (gestrichelte Ausgleichsgerade) und ausgewertet (Legende) ist dann die Geradengleichung, aus der Viskosität und Bingham Fließgrenze abzulesen sind. Rezeptur 3b.....	78

Abbildung 52:	Kennlinien für zusätzliches Fließmittel der Rezeptur 3b, Vergleich dynamische Fließgrenze $g_D$ mit Bingham Fließgrenze $g_B$ .....	79
Abbildung 53:	Kennlinien für zusätzliche Fließmittel, Vergleich dynamische Fließgrenze und Viskosität. Die waagrecht gestrichelte Linie stellt den Zielwert der dynamischen Fließgrenze dar, Rezeptur 3b.....	80
Abbildung 54:	Wirkmechanismus von zusätzlichem Fließmittel auf dynamische Fließgrenze und Viskosität dargestellt in einem Rheogramm .....	80
Abbildung 55:	Drehmoment über die Zeit von sechs Messungen an einer anfänglich zu flüssigen Mischung bei steigendem Stabilisiergehalt, Rezeptur 3b.....	81
Abbildung 56:	Drehmoment über fallende Scherrate aus Phase 2 der Messung. Eingezeichnet (gestrichelte Ausgleichsgerade) und ausgewertet (Legende) ist dann die Geradengleichung, aus der Viskosität und Bingham-Fließgrenze abzulesen sind, Rezeptur 3b.....	82
Abbildung 57:	Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer der Rezeptur 3b, Vergleich dynamische Fließgrenze mit Bingham Fließgrenze, Inkrement 0,1 M.-% v. Z. Stabilisierer.....	83
Abbildung 58:	Beurteilung der Konsistenz über die dynamische Fließgrenze und Viskosität bei steigendem Stabilisiergehalt, Rezeptur 3b.....	83
Abbildung 59:	Wirkungsweise von zusätzlichem Stabilisierer auf die rheologischen Parameter dynamische Fließgrenze und Viskosität in einem Rheogramm, Rezeptur 3b .....	84
Abbildung 60:	Viskosität und Kegelauslaufzeit vs. w/z-Wert. Rezeptur 3b .....	85
Abbildung 61:	Grafische Darstellung einer Wissensdatenbank mit Kennlinien für Wasseranspruch (w/z-Messreihen links), Kennlinien für zusätzlichen Stabilisierer (Stabilisierer-Messreihen Mitte) und Kennlinien für zusätzliches Fließmittel (Fließmittel-Messreihen, rechts), Rezeptur 3b .....	89
Abbildung 62:	Exakte Berechnung einer Wassermenge anhand von zwei Messpunkten mit den zugehörigen w/z-Werten, Rezeptur 3b.....	91
Abbildung 63:	Drehmoment über die Zeit einer geprüften Mischung (schwarzer Graph) und der ausgesteuerten Mischung (roter Graph), Messwerte aus Phase 1 (konstante Scherung 1 U/min), Rezeptur 3b .....	93
Abbildung 64:	Drehmoment über Scherrate aus Phase 2 der Messung. Die Auswertung der Ausgleichsgeraden liefert die Geradengleichung (Legende), aus der die Viskosität und Bingham Fließgrenze abzulesen sind. Viskosität eines SVB mit Wassermangel (schwarzer Graph) und Viskosität der ausgesteuerten Mischung (roter Graph), Rezeptur 3b. ....	94
Abbildung 65:	Automatisch berechnete Wassermenge durch gemessene dynamische Fließgrenze (391,63 Nmm) und Zielwert (95 Nmm), Rezeptur 3b.....	94
Abbildung 66:	Ausgesteuerte Mischung mit optimaler Konsistenz, Rezeptur 3b.....	95

Abbildung 67:	Automatisch berechnete zusätzliche Wassermenge einer Mischung der Rezeptur R4c, Zielkonsistenz 90,11 Nmm bei $w/z = 0,36$ .....	96
Abbildung 68:	Optimale Konsistenz durch Aussteuerung mit Wasser nach Kennlinie, Rezeptur 4c .....	96
Abbildung 69:	Aussteuerungsberechnung anhand einer Fließmittelkennlinie (Start $w/z = 0,41$ ), Rezeptur 3b, vgl. Abbildung 52 .....	97
Abbildung 70:	Berechnung der Aussteuerung mit Wasser als parallele Lösung zur Aussteuerung mit Fließmittel aus Abb. 68, Rezeptur 3b.....	98
Abbildung 71:	Ergänzung der Wissensdatenbank durch eine zweite Kennlinie B für zusätzliches Fließmittel, Rezeptur R3b.....	99
Abbildung 72:	Istzustand und Zustand nach der Korrektur mit Fließmittel mit dynamischer Fließgrenze der Kennlinie B, Rezeptur 3b, $w/z = 0,43$ .....	99
Abbildung 73:	Berechnung der Aussteuerung mit Fließmittel einer Mischung der Rezeptur 3b, $w/z = 0,42$ , Istwert $g_D = 473,65$ , $\Delta 1,768$ M.-% v. Z. FM entspricht 290 g FM auf 40 l Beton .....	100
Abbildung 74:	Aussteuerung mit 290,0 g Fließmittel nach Anweisung aus Abbildung 72 .....	101
Abbildung 75:	Drehmoment über die Zeit von acht Messungen, Rezeptur 3b, $w/z = 0,42$ (schwarzer Graph, Istwert $g = 473,65$ Nmm), Aussteuerung mit 290 g FM, weitere sieben Kontrollmessungen .....	101
Abbildung 76:	Kennlinie für zusätzliches Fließmittel der Rezeptur R4c, Berechnung der benötigten Fließmittelmenge anhand des Istzustandes von 187,42 Nmm und festgelegtem Zielzustand von 90,11 Nmm .....	102
Abbildung 77:	Erfolgreiche Korrektur der Konsistenz mit Fließmittel. Rezeptur 4c.....	103
Abbildung 78:	Berechnung einer exakten Menge Stabilisierer über Istzustand und Zielzustand, $\Delta$ M.-% v. Z. $ST = 0,156$ , Rezept 3b, Kennlinie für zusätzlichen ST, siehe Abbildung 57.....	104
Abbildung 79:	Dynamische Fließgrenze eines zu flüssigen SVB (schwarzer Graph) und nach der Aussteuerung (roter Graph) mit ST. Rezeptur 3b .....	104
Abbildung 80:	Frischbetonverhalten (dynamische Fließgrenze $g_D$ ) der Rezeptur 3a über die Zeit, blauer Graph original Rezeptur nach Werk, gelber Graph Rezeptur nach Optimierung mit höherem Fließmittelgehalt .....	106
Abbildung 81:	Auswirkung thixotroper Effekte auf rheologische Kennwerte infolge steigender Ruhezeit im Mischer mit der Rezeptur 3b.....	107
Abbildung 82:	Auswirkung thixotroper Effekte auf rheologische Kennwerte infolge Ruhezeit im Mischer bei der Rezeptur 4c.....	108
Abbildung 83:	Kennlinie für Wasseranspruch unter Laborbedingungen (blauer Graph) und Kennlinie mit niedrigerer Frischbetontemperatur (schwarzer Graph). Rezeptur 4c .....	109
Abbildung 84:	Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 1 .....	126
Abbildung 85:	Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 2.....	126

Abbildung 86:	Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 3 aus Charge b .....	127
Abbildung 87:	Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 4 aus Charge a .....	127
Abbildung 88:	Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 4 aus Charge b .....	128
Abbildung 89:	Sieblinien der Rezeptur 4 aus Charge a und b .....	128
Abbildung 90:	Reaktionsstadien des $C_3S$ im Vergleich zu Portlandzement aus [71].....	130
Abbildung 91:	Wissensdatenbank der Rezeptur R4 c in Form von Graphen .....	132
Abbildung 92:	Alternative Aussteuerung mit Wasser zur Berechnung mit Fließmittel aus Abbildung 75 Rezeptur 4c.....	132
Abbildung 93:	Dynamische Fließgrenze mit Istzustand einer Mischung der Rezeptur R4 c bei w/z 0,34 (schwarzer Graph) und nach der Aussteuerung als Zielzustand (roter Graph) vgl. Abbildung 76 und 77.....	133
Abbildung 94:	Grafische Darstellung der Fehlerbetrachtung für den maximalen Messbereich aus Tabelle 15 .....	135
Abbildung 95:	Fehlerbetrachtung für den niedrigviskosen Bereich aus Tabelle 15 .....	135
Abbildung 96:	Fehlerbetrachtung und Darstellung der maximal möglichen Genauigkeit des Rheometers im niedrigviskosen Bereich.....	136

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Klassifizierung der Zusatzstoffe entsprechend der Reaktions-eigenschaft mit Wasser aus den Europäischen Richtlinien für SCC [7].....	10
Tabelle 2:	Vergleich unterschiedlicher Fließmittelgehalte (je drei Messungen) nach Fleischmann [24].....	19
Tabelle 3:	Setzfließmaßklassen aus EN 206 .....	34
Tabelle 4:	Viskositätsklassen- $t_{500}$ aus EN 206 .....	34
Tabelle 5:	Viskositätsklassen- $t_v$ aus EN 206.....	34
Tabelle 6:	Vier unterschiedliche SVB-Rezepturen, die für vorliegende Forschungsarbeiten verwendet wurden. Es wurde kein Luftporenbeton eingesetzt Der Luftgehalt der verschiedenen Rezepturen variierte zwischen 0,5 und 1,5%.....	46
Tabelle 7:	Eingesetztes Mischprogramm in vorliegenden Untersuchungen des Labor-Intensiv-Mischers.....	57
Tabelle 8:	Auszug aus den Messpunkten einer Messung .....	58
Tabelle 9:	Gegenüberstellung aller relevanten Ergebnisse zur Erfassung der Konsistenz bei unterschiedlich wirksamen Wassergehalten (Kennlinien für Rezeptur 3b).....	85
Tabelle 10:	Wissensdatenbank in Zahlenwerten, definiert durch jeweils drei Kennlinien (=Messreihen), beschrieben durch dynamische Fließgrenze $g_D$ in Nmm und Viskosität $h$ in Nmm*s. Rezeptur 3b.....	88
Tabelle 11:	Einwaage Genauigkeit der verwendeten Waagen.....	129
Tabelle 12:	Feuchteverteilung in den Gebinden der einzelnen Zuschlagfraktionen der Rezeptur R2, fünf Tage nach Anlieferung .....	130
Tabelle 13:	Stadium eins bis drei sind für die Verarbeitungszeit die entscheidenden Phasen [79].....	131
Tabelle 14:	Wissensdatenbank der Rezeptur R4 c in Zahlenwerten.....	131
Tabelle 15:	Betrachtung der Messgenauigkeit des Rheometers nach Oliver Teubert (Konstrukteur des Instruments).....	134

## Anhang

Folgend sind die Sieblinien-Analysen der verwendeten Rezepturen aus der Tabelle 6 dargestellt. Die Siebversuche wurde nach DIN EN 933-1 mit Prüfsieben nach DIN ISO 3310-1 durchgeführt. Die grafische Darstellung erfolgt gemäß DIN EN 12620 und DIN 1045-2. Um die ermittelten Sieblinien besser einordnen zu können, sind diese den Regelsieblinien A, B und C gegenübergestellt.

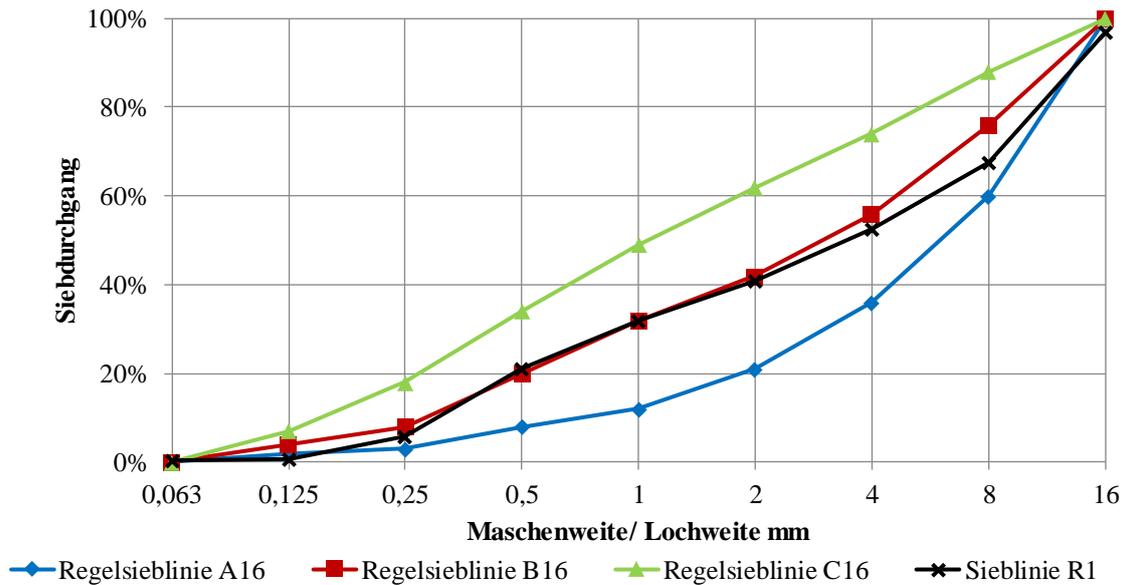


Abbildung 84: Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 1

Signifikant in Abbildung 84 ist, dass der Anteil der Mehlkornfeinen Bestandteile unter der Regelsieblinie A liegt.

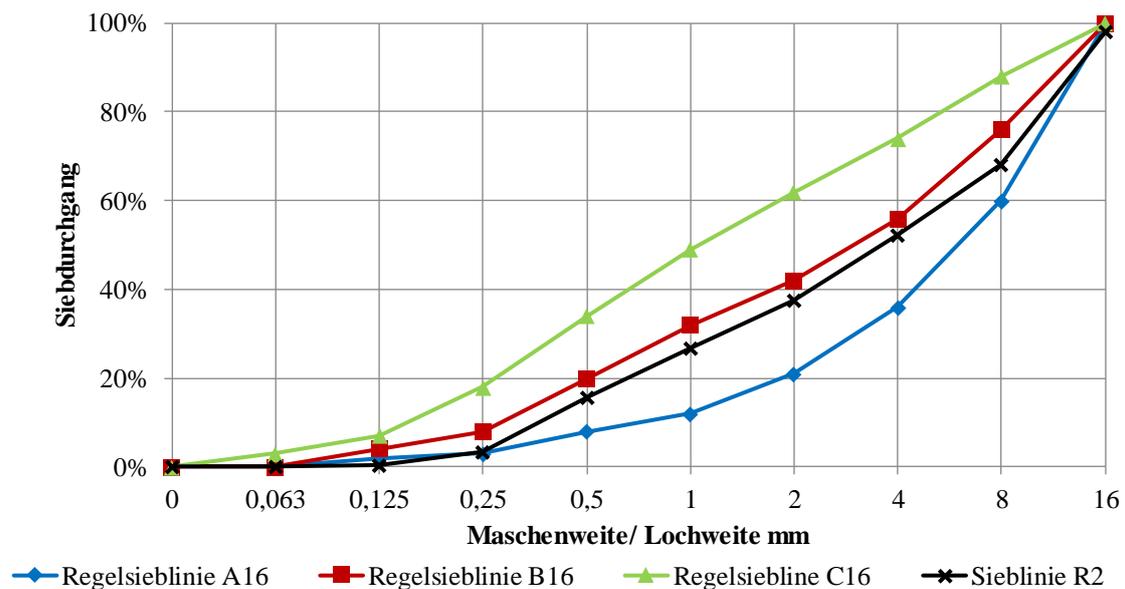


Abbildung 85: Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 2

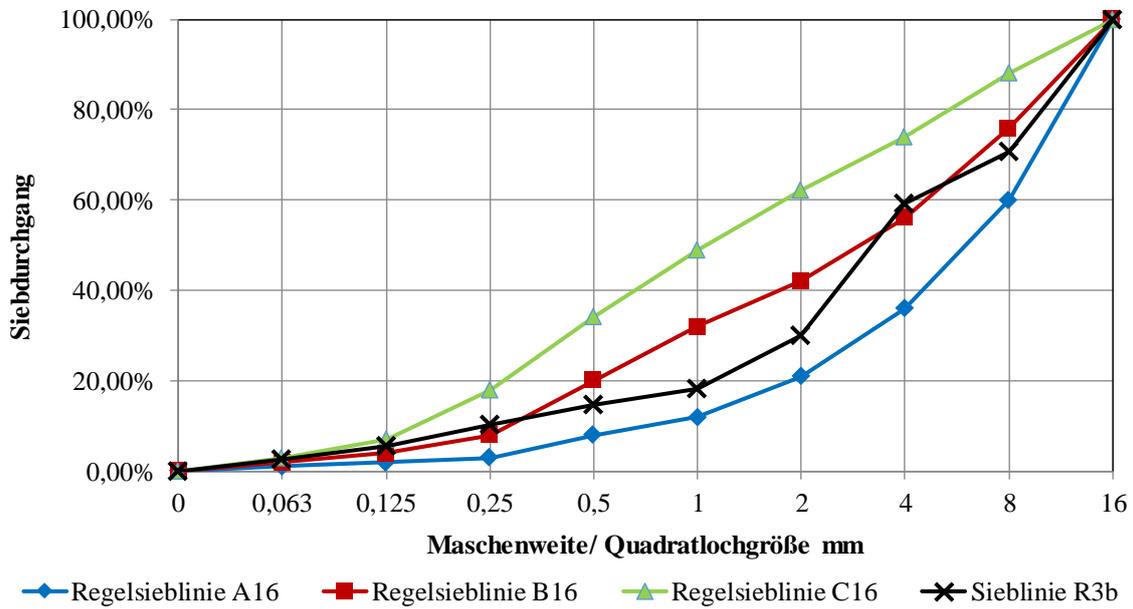


Abbildung 86: Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 3 aus Charge b

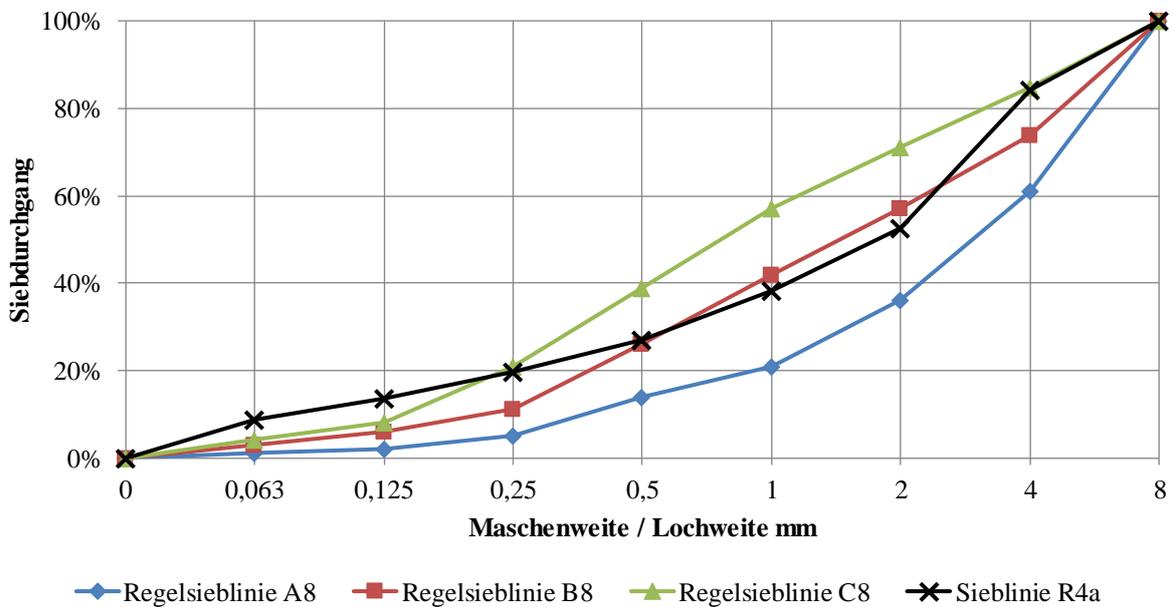


Abbildung 87: Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 4 aus Charge a

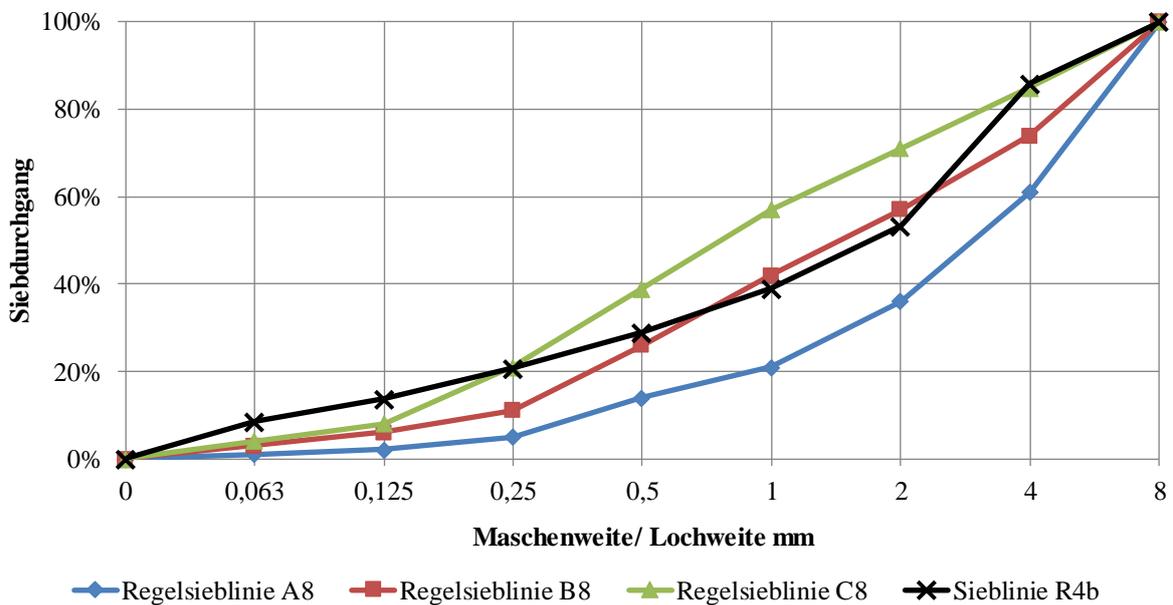


Abbildung 88: Sieblinie der Gesteinskörnung nach der Rezeptur 4 aus Charge b

In der Literatur werden Abweichungen in den Verarbeitungseigenschaften auch auf die natürliche Schwankungsbreite in der Zusammensetzung der Gesteinskörnungen zurückgeführt. Vor diesem Hintergrund ist in der folgenden Abbildung 89 ein Vergleich der gelieferten Gesteinskörnungen der Rezeptur 4 aus Charge a und b dargestellt.

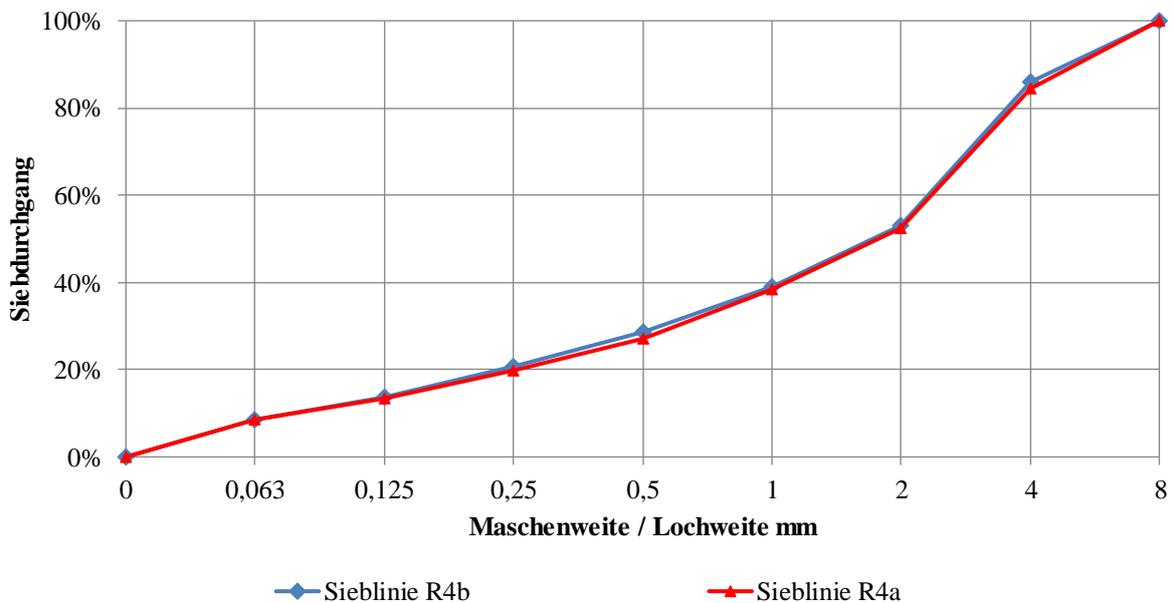


Abbildung 89: Sieblinien der Rezeptur 4 aus Charge a und b

Ein Vergleich der Zusammensetzung von Gesteinskörnungen in Abbildung 88 zeigt, dass man von einer nahezu identischen Zusammensetzung sprechen kann. Dieses Ergebnis zeugt von ei-

ner guten Qualitätskontrolle. Somit ist die notwendige Anpassung der Mischzeit aus den entsprechenden Chargen R4a und b nicht auf Schwankungen in der Zusammensetzung der Gesteinskörnungen zurückzuführen (siehe Diskussion in Kap. 4.1.2 und 4.3 Abschnitt Messzeitpunkt).

Signifikant ist der Unterschied beim Anteil der Mehlkornfeinen Fraktionen der verschiedenen Rezepturen. Bei den Gesteinskörnungen der Rezepturen 1 und 2 kamen gewaschener Donausand und Kies zum Einsatz. Somit ist bei diesen Sieblinien Abbildung 84 und 85 der Anteil der Mehlkornfeinen Bestandteile sogar unter der Regelsieblinie A. Der Mehlkornanteil und somit der erforderliche Leimanteil werden jedoch durch den Zusatzstoff und den Zement gedeckt.

Bei der Rezepturen 3 sind alle drei Gesteinsfraktionen aus gebrochenem Marmorgestein. Bei der Rezeptur 4 ist der Sand aus gebrochenem Material. Daraus ergeben sich in den entsprechenden Sieblinien der Abbildungen 86, 87 und 88 die hohen Anteile an mehlkornfeinen Bestandteilen, welche sogar über der Regelsieblinie C liegen.

Mit den eingesetzten Waagen im Labor ließen sich zielgerichtete und feine Abstufungen in der Konsistenz bzw. den Verarbeitungseigenschaften von Selbstverdichtenden Betonen generieren.

*Tabelle 11: Einwaage Genauigkeit der verwendeten Waagen*

	<b>Ausgangsstoff</b>	<b>Genauigkeit</b>
<b>Waage 1</b>	Gesteinskörnungen, Zusatzstoffe, Zement	20 g
<b>Waage 2</b>	Wasser	1 g
<b>Waage 3</b>	Zusatzmittel	0,01 g

Tabelle 12: Feuchteverteilung in den Gebinden der einzelnen Zuschlagfraktionen der Rezeptur R2, fünf Tage nach Anlieferung

Schicht	Masse (feucht+S.)	Masse (Schale)	Masse (feucht)	Masse (tr.+S.)	Masse (trocken)	Masse (Wasser)	Feuchte-%
0/4-1	1,000	0,117	0,883	0,987	0,870	0,013	1,472
0/4-2	1,040	0,116	0,924	1,013	0,897	0,027	2,922
0/4-3	1,030	0,131	0,899	0,996	0,865	0,034	3,782
0/4-4	1,015	0,137	0,878	0,968	0,831	0,047	5,353

Schicht	Masse (feucht+S.)	Masse (Schale)	Masse (feucht)	Masse (tr.+S.)	Masse (trocken)	Masse (Wasser)	Feuchte-%
4/8-1	1,783	0,133	1,650	1,775	1,642	0,008	0,485
4/8-2	1,789	0,118	1,671	1,756	1,638	0,033	1,975

Schicht	Masse (feucht+S.)	Masse (Schale)	Masse (feucht)	Masse (tr.+S.)	Masse (trocken)	Masse (Wasser)	Feuchte-%
8/16-1	4,002	0,623	3,379	3,969	3,346	0,033	0,977
8/16-2	4,000	0,622	3,378	3,945	3,323	0,055	1,628
8/16-3	4,078	0,614	3,464	4,013	3,399	0,065	1,876

In Tabelle 12 ist die Feuchteverteilung der einzelnen Gesteinsfraktionen in den Big Bags abgebildet. Mit der Schicht 1 ist die Feuchte im oberen Bereich des Gebindes erfasst. Beim Sand ist die Feuchte in vier Schichten ermittelt worden. Die Schicht vier ist direkt über dem Boden des Gebindes. Diese Zusammenhänge zeigen, dass eine exakte Bestimmung der Feuchte nicht ohne weiteres möglich ist. Daher wurden die einzelnen Gesteinsfraktionen für jeden Versuchstag homogenisiert. Erst dieser Arbeitsschritt erlaubte eine ausreichend genaue Bestimmung der Feuchte.

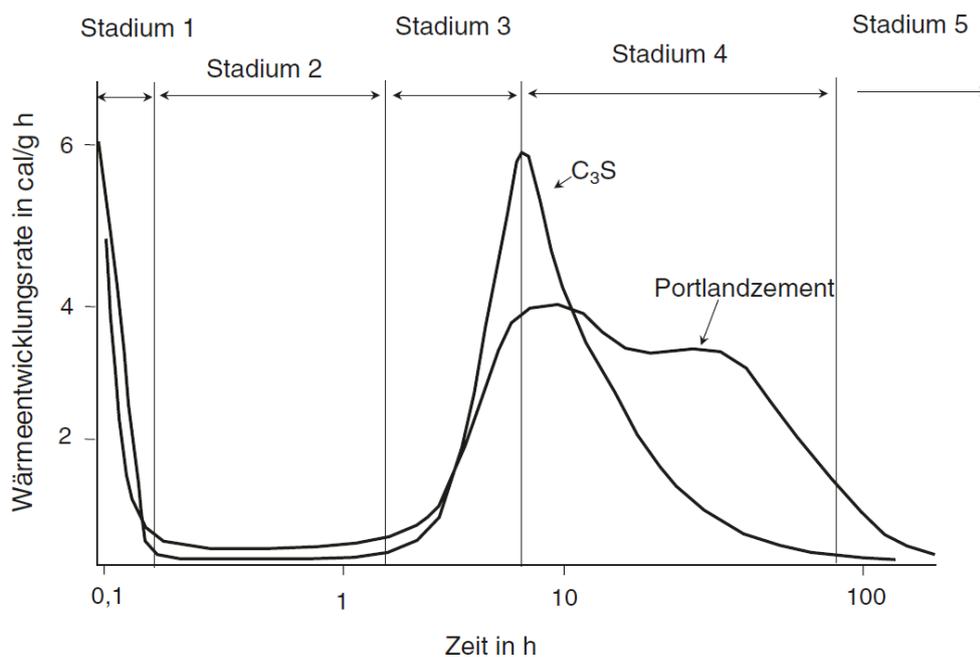


Abbildung 90: Reaktionsstadien des  $C_3S$  im Vergleich zu Portlandzement aus [74]

Tabelle 13: Stadium eins bis drei sind für die Verarbeitungszeit die entscheidenden Phasen [74]

Stadium	Reaktionskinetik	chemische Prozesse	Einfluss auf die Betoneigenschaften	
1	Anfangshydrolyse	chemisch kontrollierte, schnelle Reaktion	Beginn der Hydrolyse, Inlösungsgehen von Ionen	Anstieg des pH-Werts der wässrigen Lösung auf $\geq 12,3$
2	dormante Periode	keimbildungskontrolliert, langsame Reaktion	kontinuierliche Lösung von Ionen	bestimmt das erste Ansteifen
3	Accelerationsperiode	chemisch kontrollierte, schnelle Reaktion	Beginn der Bildung von Hydratationsprodukten	bestimmt das späte Ansteifen und die Erstarrungsentwicklung

In der folgenden Tabelle 14 und Abbildung 91 ist eine komplette Wissensdatenbank der Rezeptur R4c abgebildet.

Tabelle 14: Wissensdatenbank der Rezeptur R4 c in Zahlenwerten

w/z-Messreihen:			Stabilisierer-Messreihen:				Fließmittel-Messreihen:			
w/z [-]	gD [Nmm]	h [Nmm*s]	w/z [-]	ST [-]	gD [Nmm]	h [Nmm*s]	w/z [-]	FM [-]	gD [Nmm]	h [Nmm*s]
0.33	605.60	708.60	0.40	0.00	36.00	15.09	0.33	0.00	605.60	708.61
0.34	413.85	449.91	0.40	0.20	44.49	2.99	0.33	0.20	306.41	309.57
0.35	139.70	86.32	0.40	0.40	203.88	53.21	0.33	0.40	161.50	144.14
0.36	90.11	71.64	0.40	0.60	519.93	177.61	0.33	0.60	135.74	87.58
0.37	78.25	59.72	0.40	0.80	558.76	236.31	0.33	0.80	95.16	54.58
0.38	45.30	30.80					0.33	1.00	80.64	54.23
0.39	39.13	17.69					0.33	1.20	78.92	46.09
0.40	36.00	15.09					0.33	1.40	69.32	41.75

Die designierten Festbeton- und Frischbetoneigenschaften dieser Rezeptur liegen bei dem w/z-Wert 0,36. Somit ist die ideale Konsistenz über die w/z-Messreihe bzw. Kennlinie für Wasseranspruch mit  $g_D = 90,11$  Nmm und  $h = 71,64$  Nmm\*s definiert.

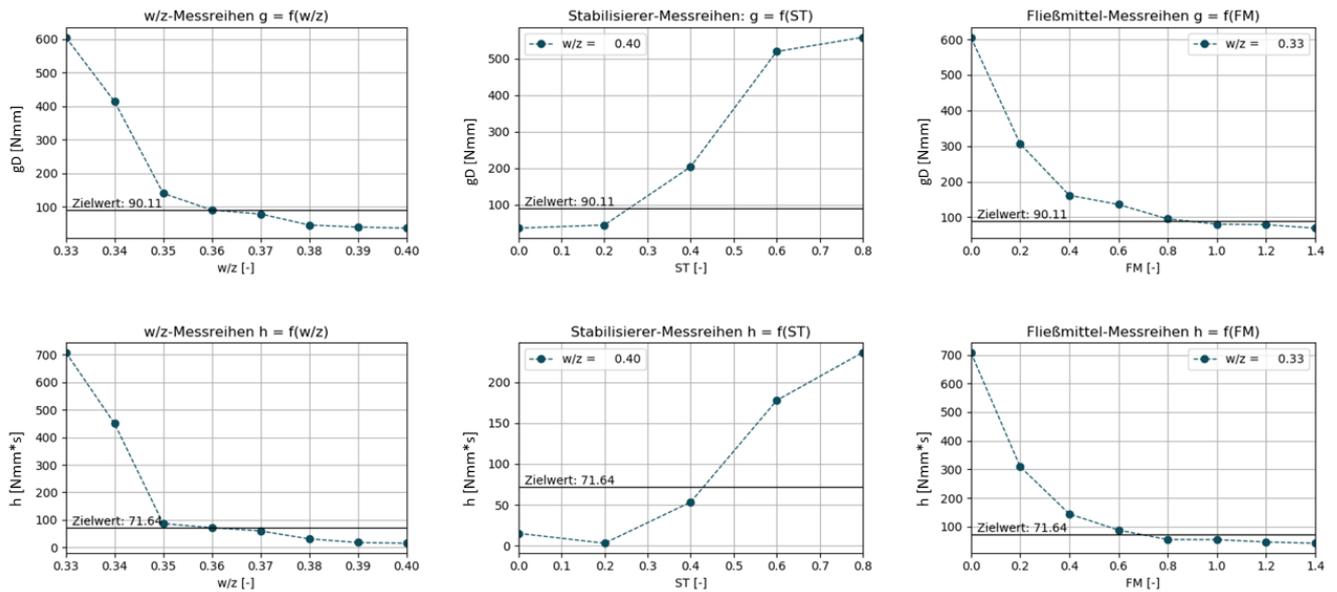


Abbildung 91: Wissensdatenbank der Rezeptur R4 c in Form von Graphen

Die Zahlen und der Graph der Kennlinie für zusätzlichen Stabilisierer zeigt auch in dieser Wissensdatenbank ein nicht plausibles Messergebnis. Die Zudosierung von 0,2 M.-% v. Z. ST bewirkt eine Reduzierung der Viskosität von 15,09 Nmm\*s auf 2,99 Nmm\*s. Gleichzeitig steigt der Wert der Dynamischen-Fließgrenze von 36,0 auf 44,49 Nmm. Dieses Ergebnis zeigt eine direkte Analogie zu der Kennlinie für zusätzliche Stabilisierer mit der Rezeptur R3b (vgl. Abbildung 61).

Das Programm zur Aussteuerung gibt bei zu steifer Konsistenz immer die Wahlmöglichkeit zwischen einer genau berechneten Menge an Wasser oder Fließmittel. Somit ist eine zusätzliche Plausibilitätskontrolle durch den Vergleich der beiden Vorschläge möglich.

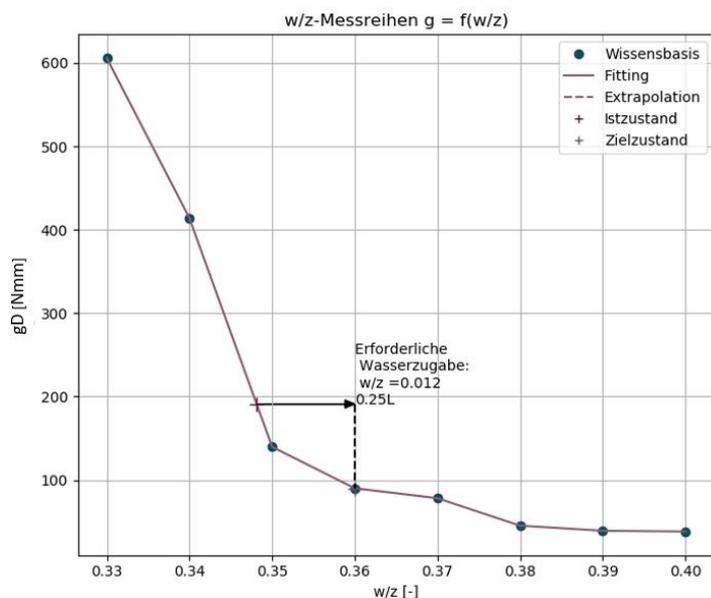


Abbildung 92: Alternative Aussteuerung mit Wasser zur Berechnung mit Fließmittel aus Abbildung 76 Rezeptur 4c

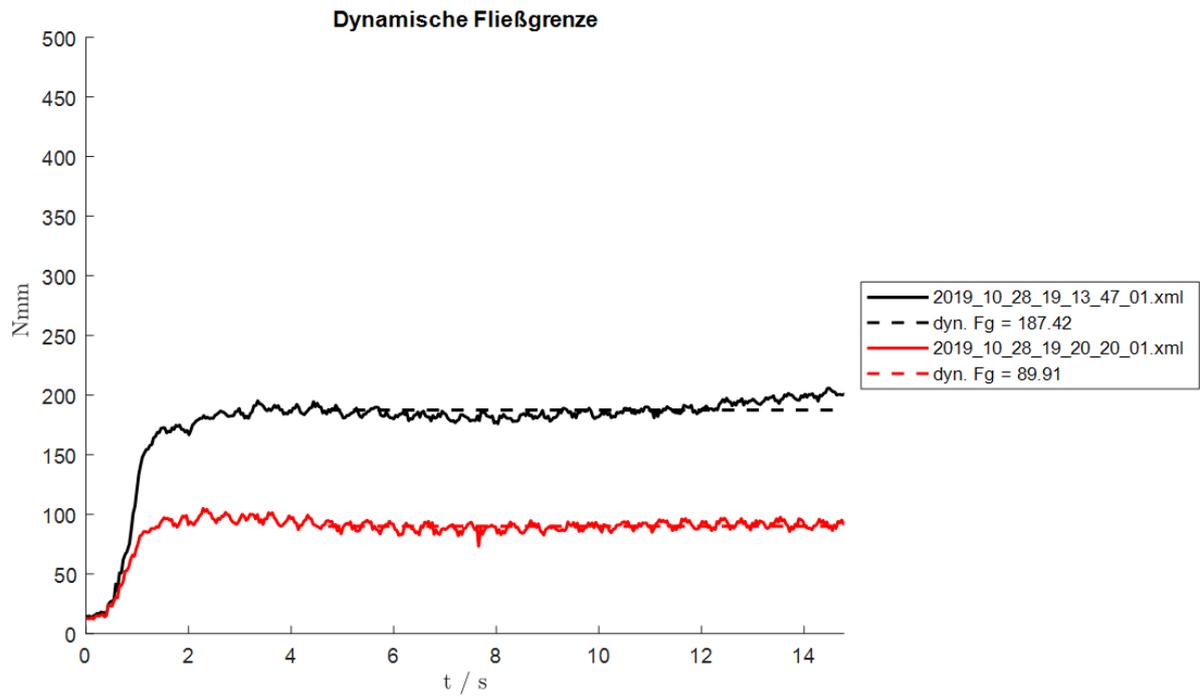


Abbildung 93: Dynamische Fließgrenze mit Istzustand einer Mischung der Rezeptur R4 c (schwarzer Graph) und nach der Aussteuerung als Zielzustand (roter Graph) vgl. Abbildung 76 und 77

Tabelle 15: Betrachtung der Messgenauigkeit des Rheometers nach Oliver Teubert (Konstrukteur des Instruments)

Mindestanforderung für Messbereich und zulässige Fehler						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
zul. Fehler ±	<b>0,05 Nmm</b>	<b>0,50 Nmm</b>	<b>5,00 Nmm</b>	<b>25,00 Nmm</b>	<b>50,00 Nmm</b>	<b>100,00 Nmm</b>
Fehler ±%	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %	5,00 %

Fehler aus Drehmomentkalibrierung mit Abgleichvorrichtung Schwerkraft						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Fehler ±	0,12 Nmm	0,25 Nmm	0,5 Nmm	1 Nmm	1,4 Nmm	2 Nmm
Fehler ±%	12,00 %	2,50 %	0,50 %	0,20 %	0,14 %	0,10 %

Fehler aus Stirnfläche, Messunsicherheit ±0,05 mm bei Ø90 mm A = 6362 mm <sup>2</sup> , ΔA = 14 mm <sup>2</sup> , Δ = 022 %						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Fehler ±	0,00 Nmm	0,02 Nmm	0,22 Nmm	1,10 Nmm	2,20 Nmm	4,40 Nmm
Fehler ±%	0,22 %	0,22 %	0,22 %	0,22 %	0,22 %	0,22 %

Fehler aus Weg (Hebellänge) R = 109, ±0,15 mm, Δ = ±0,14 %						
Messwert	1	10	100	500	1000	2000
Fehler ±	0,0014 Nmm	0,014 Nmm	0,14 Nmm	0,7 Nmm	1,4 Nmm	2,8 Nmm
Fehler ±%	0,14 %	0,14 %	0,14 %	0,14 %	0,14 %	0,14 %

Fehler aus Weg durch Verformung Messeinrichtung während Messung						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Fehler ±	0,00 Nmm	0,03 Nmm	0,25 Nmm	1,25 Nmm	2,50 Nmm	5,00 Nmm
Fehler ±%	0,25 %	0,25 %	0,25 %	0,25 %	0,25 %	0,25 %

Fehler aus Winkelmessung und Drehzahlmessung						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Fehler ±	0,0027 Nmm	0,027 Nmm	0,27 Nmm	1,35 Nmm	2,7 Nmm	5,4 Nmm
Fehler ±%	0,27 %	0,27 %	0,27 %	0,27 %	0,27 %	0,27 %

Fehler aus 0-Abgleich						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Fehler ±	0,05 Nmm	0,05 Nmm	0,05 Nmm	0,05 Nmm	0,05 Nmm	0,05 Nmm
Fehler ±%	5,00 %	0,50 %	0,05 %	0,01 %	0,01 %	0,00 %

Fehler aus Temperaturunterschied ±10°C k-Faktor + 0-Punktdrift DMS-Sensor						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Fehler ±	0,0024 Nmm	0,024 Nmm	0,24 Nmm	1,12 Nmm	2,4 Nmm	4,8 Nmm
Fehler ±%	0,24 %	0,24 %	0,24 %	0,22 %	0,24 %	0,24 %

Gesamtfehler						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Gesamtfehler ±	<b>0,18 Nmm</b>	<b>0,41 Nmm</b>	<b>1,67 Nmm</b>	<b>6,57 Nmm</b>	<b>12,65 Nmm</b>	<b>24,45 Nmm</b>
Fehler ±%	18,12 %	4,12 %	1,67 %	1,31 %	1,27 %	1,22 %

Wiederholgenauigkeit						
Messwert	1,00 Nmm	10,00 Nmm	100,00 Nmm	500,00 Nmm	1000,00 Nmm	2000,00 Nmm
Wiederholgenau	<b>0,06 Nmm</b>	<b>0,13 Nmm</b>	<b>0,81 Nmm</b>	<b>3,77 Nmm</b>	<b>7,65 Nmm</b>	<b>15,25 Nmm</b>
Fehler ±%	5,76 %	1,26 %	0,81 %	0,75 %	0,77 %	0,76 %

Die grau hinterlegten Tabellen zeigen konstruktionsbedingte Abweichungen aus der Herstellung der Messinstrumente und des Scherkörpers. Die grün hinterlegten Tabellen zeigen mögliche Abweichungen aus dem Messprozess und der erreichbaren Präzision. Der Gesamtfehler ist aus den beiden genannten Einflussfaktoren zusammengesetzt. Die Wiederholgenauigkeit zeigt

die maximal erreichbare Präzision eines Rheometers auf. Die folgenden Diagramme zeigen die zu erzielenden Genauigkeiten bei unterschiedlichen Messbereichen.

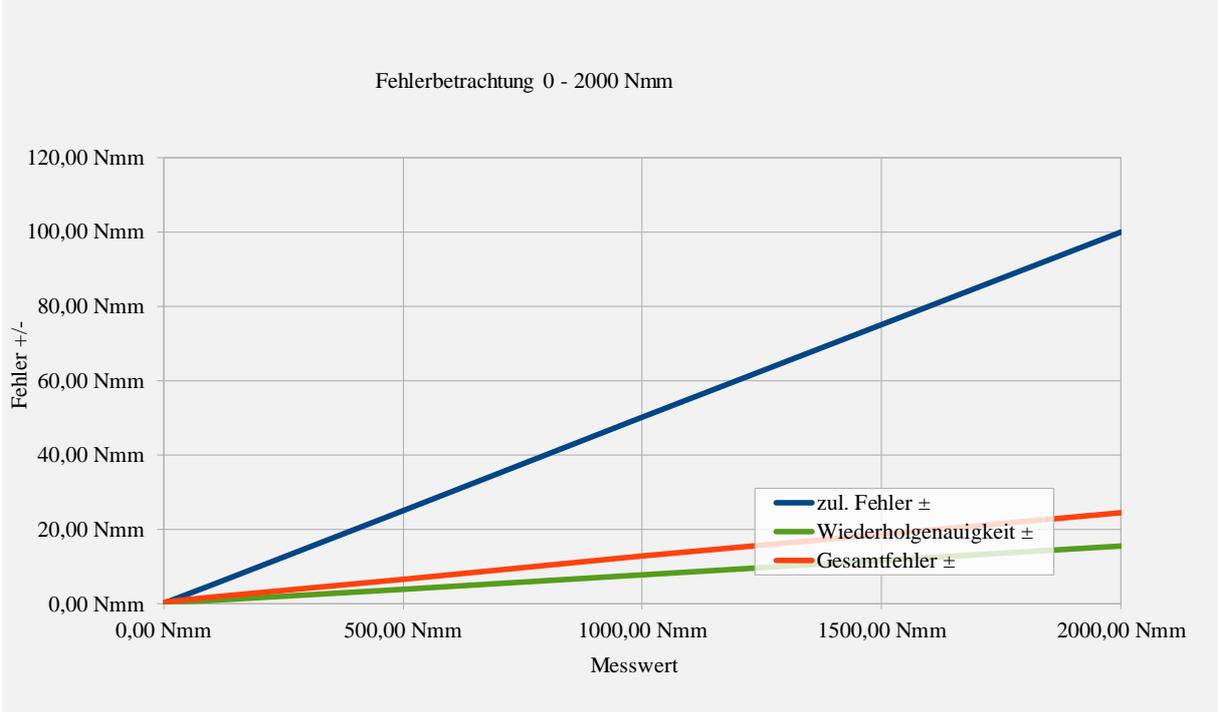


Abbildung 94: Grafische Darstellung der Fehlerbetrachtung für den maximalen Messbereich aus Tabelle 15

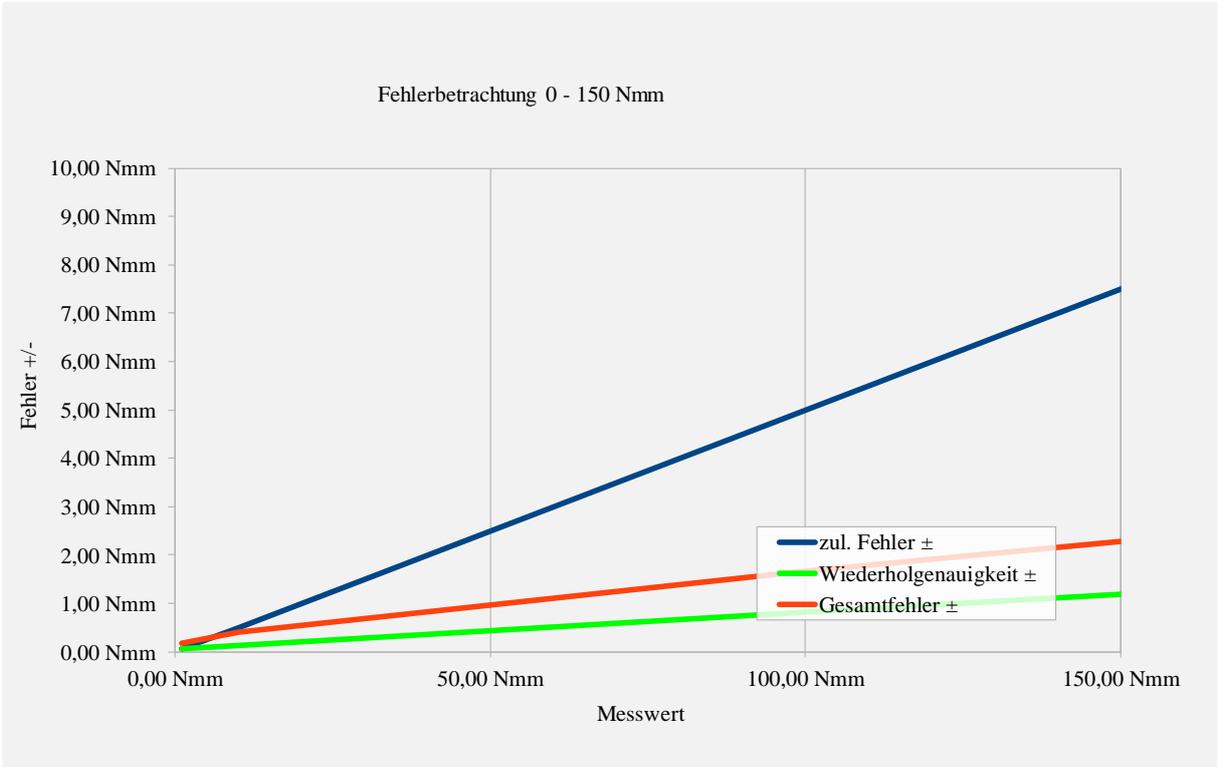


Abbildung 95: Fehlerbetrachtung für den niedrigviskosen Bereich aus Tabelle 15

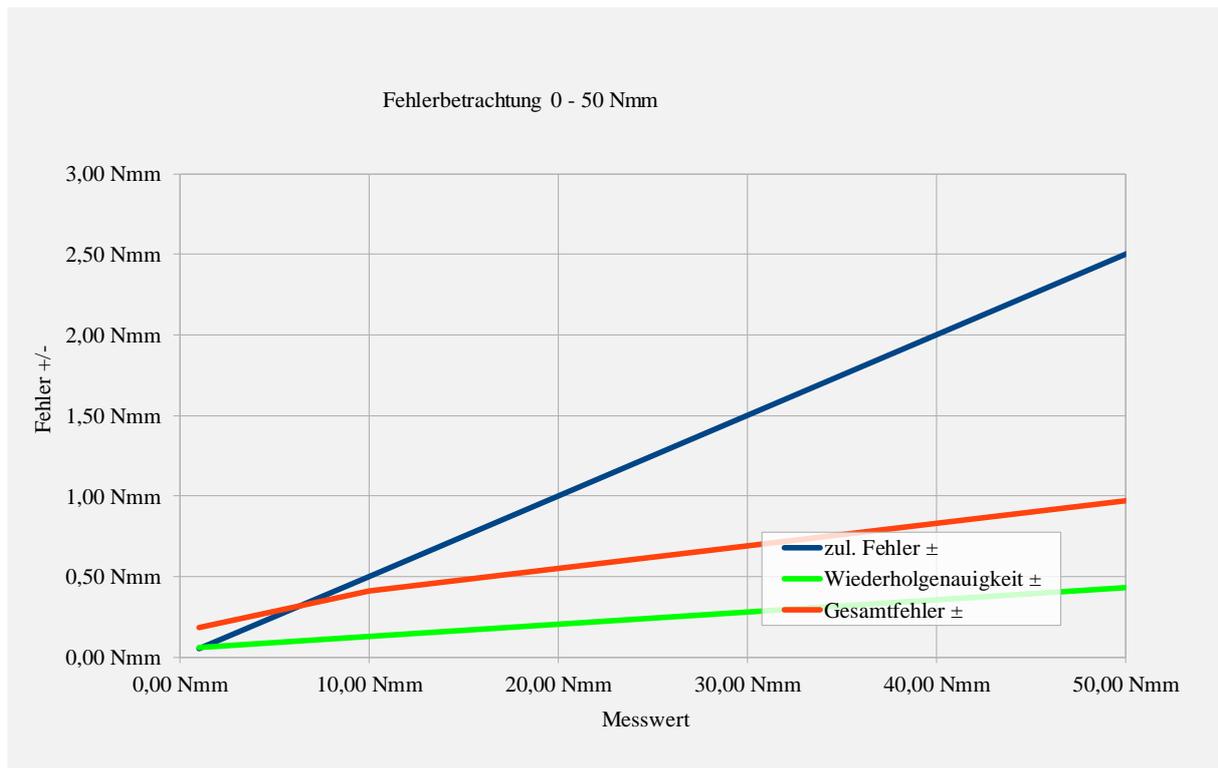


Abbildung 96: Fehlerbetrachtung und Darstellung der maximal möglichen Genauigkeit des Rheometers im niedrigviskosen Bereich.

Die hier diskutierten möglichen Fehler zeigen, dass die Erfassung der Konsistenz von Selbstverdichtenden Beton mit einer hohen Präzision erfolgt.

# Lebenslauf

## *Persönliche Daten*

Name: Ivan Parić  
Geburtsdatum/ -ort: 24.08.1974 in Moosburg a. d. Isar

## *Berufliche Tätigkeit*

08/2022 – Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH, Buchbach  
Betontechnologe

04/2014 – 03/2020 Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

02/2010 – 10/2012 Hochschule Regensburg, SHK im Fachbereich Geotechnik  
Entwicklung und Herstellung von Spezialwerkzeugen und  
Geräten

03/2011 – 07/2011 Hochschule Regensburg, Tutor für Baubetrieb 1

08/1994 – 09/2008 Selbständig  
Trockenbau, Bausanierung, Messebau, Industriemontagen

02/1993 – 08/1993 SÜD-Chemie AG, Werk Moosburg  
Automobilmechaniker  
Kfz – Instandhaltung, Unfallstandsetzung

## *Studium*

03/2016 – 03/2023 Doktorand/Zweithörer, Ruhr Universität Bochum

10/2012 – 08/2015 Studiengang Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt „Bauen  
im Bestand“, Hochschule Regensburg  
Abschluss: Master of Engineering

10/2008 – 09/2012 Studiengang Bauingenieurwesen, Hochschule Regensburg  
Abschluss: Bachelor of Engineering

## *Schulbildung*

09/1995 – 07/1997 Staatliche Fachoberschule Freising  
Abschluss: Fachhochschulreife

## *Berufsausbildung*

09/1989 – 02/1993 SÜD-Chemie AG, Werk Moosburg  
Abschluss: Automobilmechaniker