

CHARAKTERISIERUNG UND MODELLIERUNG DES FLIEßVERHALTENS VON SELBSTVERDICHTENDEM BETON

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Stephan Uebachs
aus Aachen, Deutschland

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Dr.-Ing. E. h. Hans-Wolf Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2016

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

VORWORT

Die wissenschaftlichen Untersuchungen zu der vorliegenden Dissertation wurden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen University durchgeführt. Die Ausarbeitung erfolgte im Anschluss an meine Assistententätigkeit parallel zu meiner Tätigkeit als geschäftsführender Gesellschafter der Brameshuber + Uebachs INGENIEURE GmbH.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Brameshuber für die Betreuung der Arbeit und seine Unterstützung in Form von wertvollen Anregungen und Diskussionen bedanken. Herr Prof. Brameshuber verstarb unmittelbar vor der Einreichung meiner Dissertation plötzlich und unerwartet.

Ebenfalls ein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach, der die weitere fachliche Betreuung der Arbeit übernommen und zum erfolgreichen Abschluss geführt hat. Das Promotionsverfahren konnte dadurch trotz der tragischen Umstände sehr kurzfristig abgeschlossen werden.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Dr.-Ing. E. h. Hans-Wolf Reinhardt, der sich als zweiter Berichter zur Verfügung gestellt und meine Dissertation durch sein reges fachliches Interesse vorangebracht hat.

Danke sagen möchte ich auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ibac für ihre tatkräftige Unterstützung während meiner Tätigkeit dort und bei dem Abschluss meiner Arbeit. Ich habe mich am ibac immer sehr wohl gefühlt! Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den zahlreichen Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeitern für ihr großes Engagement und ihre Inspiration, die zu dem Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Christian Neunzig für seine ständige Anteilnahme und Hilfe, insbesondere in der Endphase der Arbeit.

Meinen Eltern möchte ich danken, dass sie mich auf den Weg gebracht und die Grundlagen für meinen beruflichen Werdegang gelegt haben.

Mein allergrößter Dank gilt jedoch meiner lieben Frau Monika sowie meinen Söhnen Stephan jr. und David, die mich immer unterstützt haben.

Aachen, Dezember 2016

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	Seite
1	EINLEITUNG 9
1.1	Allgemeines 9
1.2	Problemstellung und Zielsetzung 9
2	SUSPENSIONS-RHEOLOGIE VON SELBSTVERDICHTEM BETON..... 13
2.1	Rheologische Grundlagen 13
2.1.1	Allgemeines 13
2.1.2	Rheologische Modelle..... 13
2.1.2.1	Newtonsches Plattenmodell..... 13
2.1.2.2	Fluide, plastische Stoffe und geschwindigkeitsabhängiges Verhalten 15
2.1.2.3	Zeitabhängiges Verhalten 17
2.1.2.4	Hysteresekurven 18
2.2	Prüfverfahren zur Bestimmung der rheologischen Kennwerte von Zementleim, Mörtel und Beton 19
2.2.1	Allgemeines 19
2.2.2	Direkte Verfahren..... 19
2.2.2.1	Allgemeines 19
2.2.2.2	Koaxial-Zylinder-Viskosimeter..... 20
2.2.2.3	Viskomat NT 21
2.2.2.4	Betonrheometer 22
2.2.3	Indirekte Verfahren 23
2.3	Rheologie von Zementleim, Mörtel und Beton 23
2.3.1	Allgemeines 23
2.3.2	Modellvorstellung der Struktur von Zementleim, Mörtel und Beton..... 25
2.3.2.1	Physikalische und chemische Vorgänge..... 25
2.3.2.2	Flockenstruktur im Ruhezustand..... 27
2.3.2.3	Flockenstruktur unter Scherbeanspruchung 30
2.3.2.4	Struktur von Mörtel und Beton 31
2.4	Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleim, Mörtel und Beton 32
2.4.1	Allgemeines 32
2.4.2	Feststoffkonzentration..... 33

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	Seite
2.4.3 Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleimen	35
2.4.4 Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften von Mörtel und Beton.....	41
2.5 Einfluss der Granulometrie auf die rheologischen Eigenschaften von zementgebundenen Baustoffen	48
2.5.1 Allgemeines	48
2.5.2 Kornform	49
2.5.3 Granulometrische Kennwerte.....	49
2.5.3.1 Allgemeines	49
2.5.3.2 Idealsieblinien	50
2.5.4 Einfluss der Granulometrie auf die Rheologie von Zementleim, Mörtel und Beton.....	57
2.6 Einfluss der rheologischen Eigenschaften auf die Füllungseigenschaften von SVB.....	58
2.7 Zusammenfassung Suspensionsrheologie von zementgebundenen Baustoffen.....	60
3 TRIBOLOGIE VON SELBSTVERDICHTENDEM BETON	62
3.1 Allgemeines	62
3.2 Reibungsarten.....	62
3.2.1.1 Reibungszustände	63
3.2.1.2 Tribometer.....	65
3.3 Fluid-Struktur-Interaktion.....	66
3.3.1 Allgemeines	66
3.3.2 Untersuchungen zur Fluid-Struktur-Interaktion	66
3.3.2.1 Untersuchungen an verschiedenen Stoffen und Baustoffen	66
3.3.2.2 Untersuchungen an Rüttelbetonen und SVB	72
3.4 Zusammenfassung Tribologie von Selbstverdichtendem Beton	80
4 NUMERISCHE SIMULATION VON STRÖMUNGSVORGÄNGEN.....	82
4.1 Allgemeines	82

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	Seite
4.2	Ein- und Mehrphasenströmung 82
4.2.1	Allgemeines 82
4.2.2	Modelle zur Beschreibung von Mehrphasenströmungen 83
4.2.3	Numerische Lösungsmethoden 84
4.3	Strömungssimulation von SVB - Literaturergebnisse 84
4.3.1	Allgemeines 84
4.3.2	Strömungssimulation von SVB als Partikelströmung 85
4.3.3	Strömungssimulation von SVB als Fluidströmung 86
4.4	Beurteilung der Literaturergebnisse im Hinblick auf die einzusetzende Methode 87
5	RHEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN 89
5.1	Zielsetzung 89
5.2	Einfluss der Granulometrie auf die rheologischen Eigenschaften von SVB 89
5.2.1	Ausgangsstoffe 89
5.2.2	Untersuchungen 90
5.2.3	Prüfverfahren 92
5.2.3.1	Prüfung der Eigenschaften der Ausgangsstoffe 92
5.2.3.2	Korngrößenverteilung und Kornform 92
5.2.3.3	Indirekte Prüfverfahren zur Ermittlung rheologischer Kenngrößen der SVM 93
5.2.3.4	Direkte Prüfverfahren zur Ermittlung rheologischer Kenngrößen von SVM – Viskomat NT 94
5.2.4	Ergebnisse der Ausgangsstoffprüfung und Aufstellen von Idealsieblinien 97
5.2.4.1	Charakterisierung der Ausgangsstoffe 97
5.2.4.2	Modellsieblinien der Zemente und Flugaschen 98
5.2.4.3	Bestimmung der Kornform 99
5.2.4.4	Idealsieblinien für vergleichende Untersuchungen 100
5.2.5	Korrelation von rheologischen und granulometrischen Kenngrößen 103
5.2.5.1	Einfluss der Änderung von Zementsieblinien 103
5.2.5.2	Einfluss der Sieblinienänderung der Schmelzkammerflugasche FA4 108
5.2.5.3	Einfluss der Sieblinienänderung der Trockenfeuerungsflugasche FA3 114
5.3	Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften 119

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	Seite
5.3.1 Allgemeines	119
5.3.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.....	119
5.3.2.1 Variation des Wasserzementwertes bei konstantem Setzfließmaß	119
5.3.2.2 Variation des Fließmittelgehaltes bei konstantem w/z-Wert.....	121
5.4 Aufstellen eines Partikelabstandsmodells	123
5.5 Zusammenfassung rheologische Untersuchungen	129
6 TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN	131
6.1 Allgemeines	131
6.2 Untersuchungen.....	131
6.2.1 Prüfverfahren	131
6.2.1.1 Allgemeines	131
6.2.1.2 Charakterisierung der Frischmörtel- und Frischbetoneigenschaften.....	131
6.2.1.3 Viskosimeteruntersuchungen und Fließversuche im L-Kasten	132
6.2.1.4 Oberflächeneigenschaften der Modelloberflächen.....	133
6.2.1.5 Tribometerversuche zur Untersuchung der Fluid-Struktur-Interaktion zwischen Mörtel/Beton und Schalung	133
6.2.2 Selbstverdichtende Mörtel und Betone	136
6.2.2.1 Allgemeines	136
6.2.2.2 Ausgangsstoffe	137
6.2.2.3 Mischungszusammensetzung.....	137
6.2.2.4 Frischmörtel- und Frischbetoneigenschaften	138
6.2.3 Versuchsmatrix	139
6.3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.....	140
6.3.1 Tribometerversuche	140
6.3.1.1 Allgemeines	140
6.3.1.2 Einfluss der rheologischen Eigenschaften und des SVB-Typs.....	140
6.3.1.3 Einfluss der Fließgeschwindigkeit	143
6.3.1.4 Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit	145
6.3.1.5 Einfluss des Frischbetondruckes	146
6.3.2 Vergleich von rheologischen und tribologischen Eigenschaften	149
6.4 Tribologisches Modell zur Prognose der Fluid-Struktur-Interaktion.....	153
6.4.1 Allgemeines	153

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	Seite
6.4.2	Messung des Frischbetondrucks 154
6.4.3	Ermittlung der Grundreibung und der Reibungskoeffizienten 155
6.5	Zusammenfassung 158
7	STRÖMUNGSSIMULATION MIT FLUENT 159
7.1	Allgemeines 159
7.2	Durchgeführte Versuche 159
7.3	Überprüfung der Anwendbarkeit von FLUENT 160
7.3.1	Simulation eines Newtonschen Fluids im L-Kasten-Versuch 160
7.3.2	Simulation des Newtonschen Fluids im Setzfließtrichter 161
7.4	Eingangskenngrößen für die Simulation von SVM und SVB 162
7.4.1	Allgemeines 162
7.4.2	Herschel-Bulkley Modell in FLUENT 162
7.5	Simulation des Fließvorganges durch Anpassung der Parameter 165
7.5.1	Simulation des L-Kasten-Versuchs 165
7.5.2	Simulation des Setzfließversuchs 166
7.6	Übertragbarkeit der invers bestimmten rheologischen Parameter des Setzfließversuchs auf den L-Kasten-Versuch 168
7.7	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Strömungssimulation ... 169
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 171
8.1	Allgemeines 171
8.2	Rheologische Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln 171
8.3	Tribologie von Selbstverdichtendem Beton 173
8.4	Strömungssimulation mit FLUENT 175
8.5	Schlussfolgerungen und Nutzen für die Praxis 176
9	LITERATUR 178

INHALTSVERZEICHNIS**Seite**

ANHANG A:	Tabellen.....	A1
ANHANG B:	Bilder	B1
ANHANG C:	Beschreibung der CFD-Software FLUENT	C1

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein innovativer Baustoff, der seit dem Jahr 2001 in Deutschland mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung eingesetzt werden kann. Im Dezember 2004 wurde die Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) bauaufsichtlich eingeführt, so dass somit auch die Herstellung und der Einbau von SVB ohne Zulassung möglich waren. Heute ist SVB in einem gesonderten Teil der europäischen Betonnorm, der DIN EN 206-9, geregelt und wird gemeinsam mit dem Deutschen Anwendungsdokument, der aktuellen DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVBR) eingesetzt. In der neuen Ausgabe der europäischen Betonnorm DIN EN 206-1 (Ausgabe Juli 2014), die bereits veröffentlicht ist, aber in Deutschland noch nicht bauaufsichtlich eingeführt wurde, sind die Regelungen für SVB direkt berücksichtigt, so dass bei bauaufsichtlicher Einführung dieser Norm die DIN EN 206-9 entfällt.

Selbstverdichtender Beton besitzt die Eigenschaft, dass er bis zum Niveaueausgleich entmischungsfrei fließt, die Bauteilschalung selbständig ausfüllt und ohne Aufbringen von Verdichtungsenergie entlüftet. Der Einsatz eines SVB kann bauverfahrenstechnische Vorteile bringen. Bauteile mit komplexer geometrischer Formgebung können in einem Arbeitsgang hergestellt werden und die Betonqualität der Bauteile ist nicht mehr von der Ausführung der Verdichtungsarbeit abhängig. Die Sichtbetoneigenschaften werden verbessert und die Dichtheit der Betondeckungsschicht wird durch den Einsatz eines SVB erhöht. Der Produktionsprozess wird durch den Wegfall des Verdichtens rationalisiert. Außerdem wird durch den Einsatz eines SVB der Geräuschpegel bei der Produktion entscheidend verringert und die Arbeitsbedingungen des Personals erleichtert.

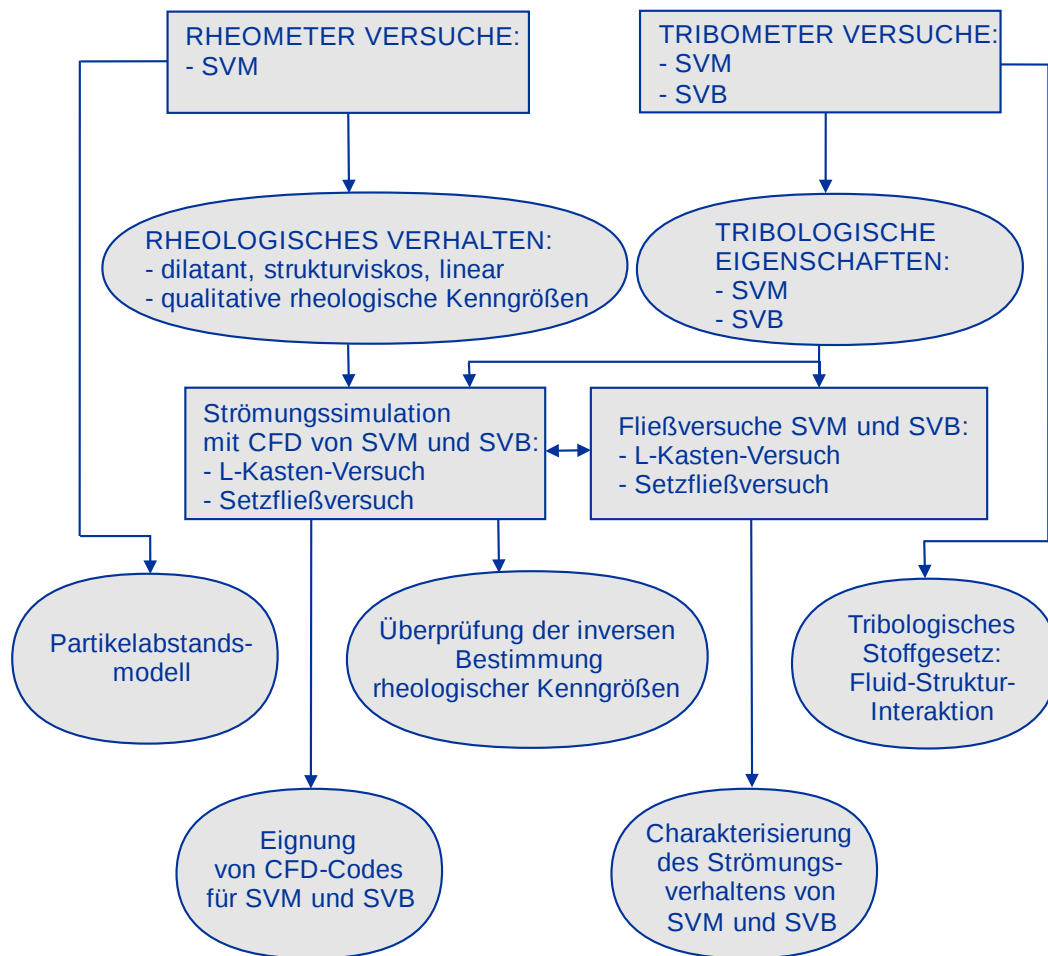
1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Obwohl SVB in Deutschland ein geregelter Baustoff ist, wird er jedoch im Vergleich zu anderen Ländern nur vereinzelt für besondere Einsatzzwecke verwendet. Die fehlende Akzeptanz von SVB hat mehrere Ursachen. Einerseits sind bei dem Einsatz von SVB umfangreichere Maßnahmen zur Qualitätssicherung erforderlich. Der Hauptgrund für die fehlende Akzeptanz ist jedoch, dass der Einsatz dieser Betone in der Praxis häufiger zu unzureichenden Ergebnissen führte, da die Betone im Bauteil keine selbstverdichtenden Eigenschaften aufwiesen bzw. sich die Betone beim Einbau entmischten oder die grobe Gesteinskörnung sedimentierte. Diese Effekte traten auch dann auf, wenn die entsprechenden Betone bei der Abnahme die der Erstprüfung (Eignungsprüfung) entsprechenden

Frischbetoneigenschaften aufwiesen. Es ist somit aufgrund der Ergebnisse von Frischbetonprüfungen alleine nicht möglich, einen problemlosen Einsatz von SVB im Bauteil sicherzustellen. Der Grund dafür ist, dass die Kennwerte aus den Frischbetonprüfungen, die bislang zur Bewertung von SVB herangezogen werden, die tatsächlichen Mechanismen der Fließ- und Entlüftungsvorgänge nicht vollständig beschreiben.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Untersuchung, welche rheologischen Eigenschaften ein SVB bei welchem Bauteil aufweisen muss, um eine hohlraumfreie, entmischungsfreie Verfüllung eines beliebig geformten Bauteils sicherzustellen, ist die numerische Simulation des Strömungsvorganges. Bei der numerischen Modellierung der Frischbetoneigenschaften von SVB sind prinzipiell zwei Ansätze möglich: Die numerische Strömungssimulation sowie verschiedene partikelbasierte Methoden. Bei den partikelbasierten Methoden wird das Fluid als diskrete Partikel modelliert. Bei diesen Verfahren ist jedoch die Partikelanzahl aufgrund des sehr hohen numerischen Aufwandes beschränkt. Deshalb ist mit den zurzeit zur Verfügung stehenden Rechnern lediglich die Simulation von Frischbetonversuchen möglich. Da jedoch zur Vorhersage des Strömungsverhaltens die Simulation von Bauteilen möglich sein soll, wird im Rahmen dieser Arbeit die grundlegende Anwendbarkeit der numerischen Strömungssimulation, auch Computational Fluid Dynamics (CFD) genannt, überprüft. Bei der CFD wird eine numerische Methode auf strömungsmechanischen Ansätzen verwendet und das Fluid als Kontinuum betrachtet. Bei der CFD kann man im Hinblick auf den Anwendungsfall SVB zwischen der Finite Elemente Method (FEM) und der Finite Volume Methode (FVM) unterscheiden. Die FEM wurde bereits für die Simulation des Strömungsvorganges verwendet. Nachteil der kommerziell erhältlichen CFD-Codes auf FEM-Basis ist jedoch, dass die Modellierung einer separaten Phase innerhalb des Fluids, z. B. der groben Gesteinskörnung, nur eingeschränkt möglich ist. Da aber auch Sedimentations- und Blockiervorgänge der groben Gesteinskörnung durch eine numerische Simulation erfasst werden sollen, wird im Rahmen dieser Arbeit die Anwendbarkeit eines CFD-Codes auf FVM-Basis überprüft. Dazu wird der kommerzielle CFD-Code „FLUENT“ verwendet, mit dem die Simulation einer dispersen Mehrphasenströmung prinzipiell möglich ist.

Die besondere Schwierigkeit besteht jedoch darin, dass es bislang nicht möglich ist, rheologische Kennwerte für Mörtel und Betone zu bestimmen. Rheologische Kennwerte sind als Eingabeparameter für die numerische Simulation erforderlich. Mit den zurzeit verfügbaren Rheometern ist die Ermittlung von rheologischen Kennwerten von Beton nicht möglich. Es können nur relative Größen ermittelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit sollen deshalb Lösungsansätze erarbeitet werden, wie rheologische Kennwerte als Eingangsparameter für die numerische Simulation bestimmt werden können (vgl. Bild 1).



Legende:

- Untersuchungen bzw. numerische Simulation
- Ergebnisse der Untersuchungen / Simulationen

SVM: Selbstverdichtender Mörtel
 SVB: Selbstverdichtender Beton
 CFD: Computational Fluid Dynamics

Bild 1: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte und Ziele

Dazu werden in einem ersten Schritt umfangreiche Studien zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften von selbstverdichtenden Mörteln und Betonen durchgeführt. Ziel dieses Teilschrittes ist neben der Ermittlung von rheologischen Kenngrößen die Identifikation eines geeigneten Fließgesetzes zur Beschreibung des Fließverhaltens von selbstverdichtenden Mörteln und Betonen. Außerdem werden umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die rheologischen Eigenschaften von selbstverdichtenden Mörteln durchgeführt, insbesondere zum Einfluss der Sieblinie der Feinststoffe und des

Wassergehalts. Basierend auf diesen Studien wird ein Partikelabstandsmodell zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften in Abhängigkeit von dem wasserinduzierten Abstand der Feststoffpartikel aufgestellt.

Bislang wurden ebenfalls noch keine tribologischen Untersuchungen zur Reibung zwischen SVB und Schalung durchgeführt. Die reibungsinduzierte Schubspannung zwischen SVB und Schalung beeinflusst das Strömungsverhalten und muss ebenfalls bei einer numerischen Simulation berücksichtigt werden. Diese wird im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmt und es wird ein Stoffgesetz für dieses Materialverhalten aufgestellt.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, experimentell den Einfluss der rheologischen und tribologischen Eigenschaften von selbstverdichtenden Mörteln und Betonen auf die selbstverdichtenden Eigenschaften festzustellen, ein geeignetes Modell für das Fließverhalten von SVB zu identifizieren, rheologische und tribologische Kennwerte zu bestimmen und die Anwendbarkeit der numerischen Strömungssimulation zur Beschreibung des Fließverhaltens des Fluids „SVB“ mit dem CFD-Code „FLUENT“ zu überprüfen. Durch Kenntnis des Fließverhaltens in Abhängigkeit der rheologischen Kenngrößen lässt sich der Einsatz von SVB zielorientiert planen, was zu einer höheren Akzeptanz dieses innovativen Baustoffs in der Praxis beitragen soll.

2 SUSPENSIONSRHEOLOGIE VON SELBSTVERDICHTENDEM BETON

2.1 Rheologische Grundlagen

2.1.1 Allgemeines

Die Rheologie ist die Wissenschaft vom Verformungsverhalten und den Fließeigenschaften von Stoffen. Die Rheologie beschreibt den Zusammenhang zwischen einer aufgetragten äußeren Beanspruchung und der daraus resultierenden Verformung /KEC99/. Der Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Verformung wird durch Stoffgesetze erfasst, bei Flüssigkeiten spricht man von Fließgesetzen /FRE01, VAL03/.

Die Flüssigkeitsteilchen werden vereinfacht als imaginäre, parallele Flüssigkeitsschichten abgebildet, die aufgrund einer äußeren Belastung einen Geschwindigkeitsgradienten erzeugen und durch eine Scherspannung ihrer Verformung entgegenwirken. Den Zusammenhang zwischen Scherspannung und Schergeschwindigkeit zeigt die Fließkurve, das Verhältnis von Scherspannung zu Schergeschwindigkeit wird als Viskosität bezeichnet /BAN04/. Die Aufzeichnung solcher Fließkurven erfolgt mit sogenannten Rheometern.

Auf der Baustelle ist die Verarbeitbarkeit von Beton die wichtigste Eigenschaft. Eine sach- und fachgerechte Verarbeitbarkeit des Betons stellt die Voraussetzung für eine hohlraumfreie Verfüllung der Schalung im Hinblick auf eine dauerhafte Konstruktion dar. Zu ihrer Bestimmung sind eine Reihe von einfachen, baustellengerechten Konsistenzprüfverfahren entwickelt worden.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die Grundlagen der Rheologie, die zum Verständnis der Anwendung notwendig sind, gegeben. Anschließend wird auf die Parameter, die die rheologischen Eigenschaften von zementgebundenen Systemen beeinflussen, eingegangen.

2.1.2 Rheologische Modelle

2.1.2.1 Newtonsches Plattenmodell

Die beim Fließen wirksamen Parameter werden in dem Newtonschen Plattenmodell definiert (vgl. Bild 2). Zwischen zwei ebenen, parallelen Platten befindet sich eine Flüssigkeit. An der oberen Platte zieht eine tangentielle Kraft F und führt durch Adhäsionskräfte, die zum Haften an der Platte führen, zum Fließen der Flüssigkeit. Die an der oberen Platte haftenden Fluidmoleküle geben nur einen bestimmten Betrag des Impulses auf die nächste Flüssigkeitsschicht weiter und diese wiederum auf die nächste. Dadurch bildet

sich ein lineares Geschwindigkeitsgefälle in der Flüssigkeitsschicht zwischen den Platten aus /BIN22, FRE01/. Eine laminare Schichtenströmung (vgl. Kapitel 4.1) ist Voraussetzung für die Berechnung rheologischer Größen /BLA02/.

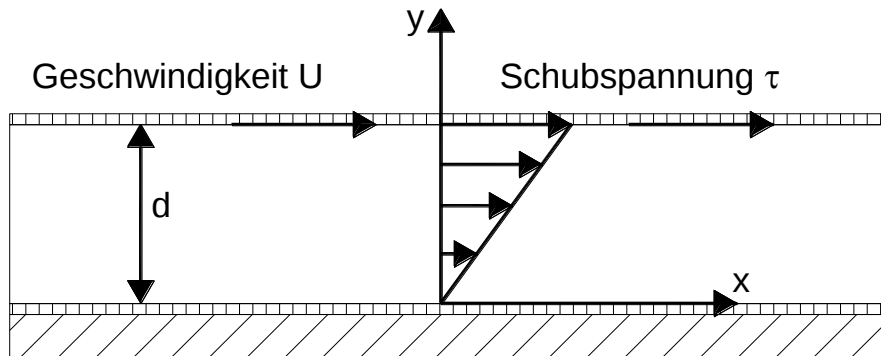


Bild 2: Flüssigkeit zwischen zwei parallelen Platten /FRE01/

Die Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht wird durch ihren inneren Widerstand gegen die Beanspruchung bestimmt. Der Quotient aus der an der beweglichen Platte angreifenden Kraft F und der Grenzfläche A wird als Scherspannung τ bezeichnet (vgl. Gl. (1)) /FRE01/. Die Scherspannung τ , oftmals auch Schubspannung genannt, stellt den Widerstand dar, den eine Substanz einer Bewegung entgegensetzt /BLA02/.

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

mit:

F : Scherkraft
 A : Scherfläche

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ bezeichnet das Geschwindigkeitsgefälle innerhalb der Probe (vgl. Gl. (2)). Je höher das Geschwindigkeitsgefälle ist, desto höher ist auch die Scherbelastung der Probe /BLA02/. Das Geschwindigkeitsgefälle $\dot{\gamma}$ ist definiert als Differentialquotient:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh} \quad (2)$$

mit:

dv : Geschwindigkeitsänderung
 dh : Änderung des Plattenabstandes in horizontaler Richtung

Eine Flüssigkeit befindet sich zwischen zwei parallelen Platten im Abstand d . Die obere Platte bewegt sich mit der Geschwindigkeit U in x -Richtung, so dass die Schergeschwindigkeit als

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{d} \quad (3)$$

definiert werden kann (vgl. Gl. (3)). In jedem Punkt der Flüssigkeit herrscht dann die Schubspannung τ . Die Schubspannung τ kann über die Kraft, die erforderlich ist, um die Platte der Fläche A mit der Geschwindigkeit U zu bewegen, berechnet werden.

2.1.2.2 Fluide, plastische Stoffe und geschwindigkeitsabhängiges Verhalten

Die Fließkurve eines Newtonschen Fluids verläuft linear und durch den Ursprung des Koordinatensystems. Die Scherspannung τ ist proportional zum Geschwindigkeitsgefälle und kann mit der Gleichung

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

beschrieben werden (vgl. Gl. (4)). Die Steigung der Geraden ist die dynamische Viskosität η .

Eine Flüssigkeit verhält sich jedoch selten linear, sondern zeigt oftmals ein geschwindigkeitsabhängiges Verhalten. Nimmt die Viskosität eines Fluids bei steigender Beanspruchung ab, spricht man von strukturviskosem, scherverdünnendem (engl.: shear thinning) Verhalten. Nimmt die Viskosität einer Flüssigkeit hingegen zu, spricht man von dilatantem, scherverdickendem (engl.: shear thickening) Verhalten. Qualitativ kann die Viskosität solcher Fluide über die Steigung der Kurve abgeschätzt werden /WES73/. In diesem Fall spricht man von einer scheinbaren Viskosität η' /WES73/ (vgl. Bild 3 links). Bei Fluiden, die ein dilatantes oder strukturviskoses Verhalten ohne Fließgrenze aufweisen, spricht man auch von sogenannten Power-Law Fluiden.

Ursache für strukturviskoses (pseudoplastisches) Verhalten ist ein anfängliches Verhaken mehrerer Partikel oder Verschlaufen von Makromolekülen, das mit zunehmender Scherrate abnimmt. Auch die Auflösung von Agglomeraten durch die Scherbelastung, die ellipsoide Verformung von kugelförmigen Tropfen oder die Orientierung anisotroper oder naddelförmiger Partikel in Fließrichtung können pseudoplastisches Verhalten hervorrufen.

Diese Vorgänge bewirken eine Abnahme der Wechselwirkung zwischen den Teilchen, wodurch der Fließwiderstand sinkt /RIE01, BRA71/.

Eine Ursache für dilatantes Verhalten ist die Verhakung von verzweigten Molekülen langkettiger Stoffsysteme. Dieses führt zur gegenseitigen Blockierung und Verkantung von Partikeln in Suspensionen, wodurch der Fließwiderstand steigt /RIE01/. Bei Suspensionen tritt mit steigender Scherbelastung ein zunehmender Zerfall von Partikeln auf. Durch die Entstehung mehrerer kleiner Partikel nimmt die spezifische Oberfläche zu und es wird ein größerer Anteil der flüssigen Phase an die Partikel gebunden, wodurch die Beweglichkeit der Partikel abnimmt und die Viskosität steigt. Je höher die Scherbelastung ist, desto mehr Partikel zerfallen und die Scherspannung steigt überproportional mit der Scherrate an /BLA02/.

Als plastischer Stoff wird ein Stoff bezeichnet, wenn er sich unterhalb einer bestimmten Grenzspannung wie ein elastischer Stoff und oberhalb dieser Grenzspannung wie eine Flüssigkeit verhält. Diese Grenzspannung nennt man Fließgrenze. Ein Modell zur Beschreibung einer solchen Fließkurve ist das Bingham-Modell /BIN22/:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

τ_0 ist hierbei die Fließgrenze. Der Tangens des Neigungswinkels der Geraden wird jetzt als plastische Viskosität bezeichnet. Auch bei den plastischen Stoffen gibt es strukturviskoses und dilatantes Verhalten (vgl. Bild 3 rechts).

Zu beachten ist, dass die Viskosität stark temperaturabhängig ist. Die Angabe eines Viskositätswertes ohne Temperatur ist wenig aussagekräftig /VIS04/. Für Flüssigkeiten gilt: Steigt die Temperatur in der Flüssigkeit, sinkt die Viskosität bei gegebener Schergeschwindigkeit. Dieser Vorgang beruht auf dem geringen Abstand der Moleküle in Flüssigkeiten. Dadurch dominieren intermolekulare Wechselwirkungen das Verhalten des Materials. Die Wechselwirkungskräfte zwischen den Molekülen sind so gestaltet, dass sich ein bestimmter Gleichgewichtszustand der Moleküle einstellt. Wird nun bei Flüssigkeiten die Temperatur und damit die thermische Bewegung erhöht, werden durch die stärkere thermische Bewegung der Moleküle die Wechselwirkungskräfte zwischen ihnen leichter überwunden, so dass die innere Reibung der Moleküle, die Viskosität, herabgesetzt wird /RHE01/.

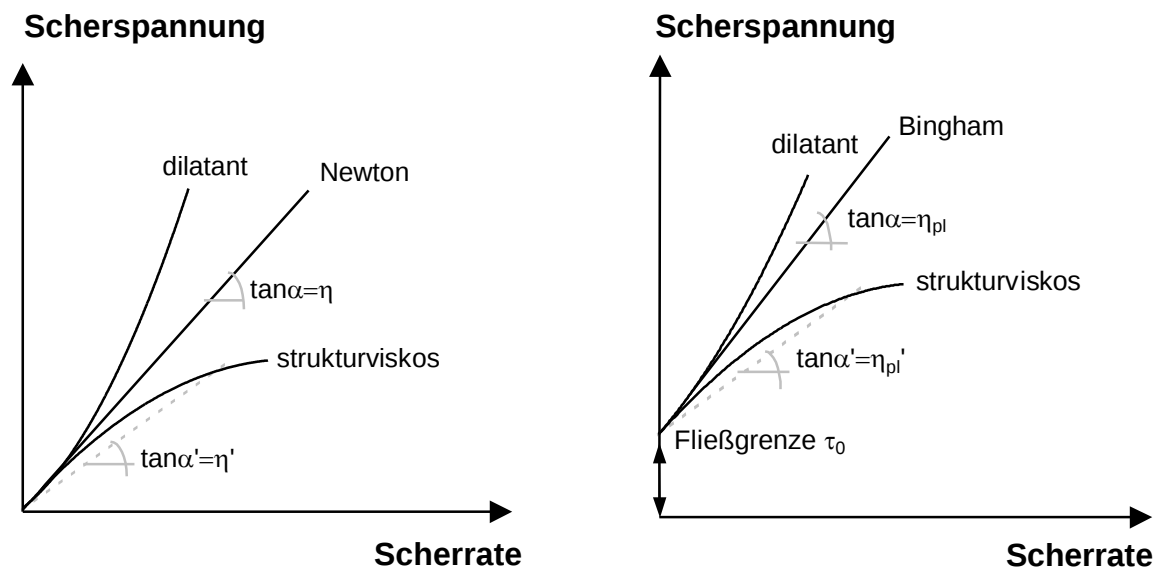


Bild 3: Fließkurven von Flüssigkeiten (links) und plastischen Stoffen (rechts) /WES73/

Auch die rheologischen Eigenschaften eines SVB sind stark temperaturabhängig. Eine maßgebliche Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften erfolgt jedoch durch die temperaturbedingte Wirksamkeit der verwendeten Fließmittel auf Polycarboxylat-Ether (PCE) Basis. In Abhängigkeit vom verwendeten Wirkstoff sind die PCE kälte- oder wärmeempfindlich. Dieses ist bei der praktischen Anwendung zu berücksichtigen. Schmidt /SCH14/ stellte in seinen Untersuchungen fest, dass die Temperatur im Wesentlichen nur die Fließgrenze beeinflusst und nicht die Viskosität. Dieses konnte in eigenen Untersuchungen nicht bestätigt werden /BRA03d, BRA03f, BRA04/ (vgl. auch Kapitel 5.2.1).

2.1.2.3 Zeitabhängiges Verhalten

Flüssigkeiten und plastische Stoffe können ihre rheologischen Eigenschaften unter dem Einfluss einer konstanten Scherrate in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer ändern. Dabei sind nach /BER82/ sowohl reversible als auch bleibende Änderungen der Fließeigenschaften möglich. Man unterscheidet thixotropes und rheopexes Verhalten.

- Thixotropie

Als Thixotropie bezeichnet man den Vorgang, bei dem die Scherspannung τ infolge anhaltender, konstanter Beanspruchung gegen einen Grenzwert abnimmt und nach Entlastung wieder ihren Ausgangswert erreicht /KEC99, LOW13a/ (vgl. Bild 4). Dieser

Phasenwechsel ist i. A. reversibel und lässt sich beliebig oft wiederholen /FRE01/. Beispiele für Stoffe mit reversibler Thixotropie sind z. B. Stützsuspensionen aus Bentonit.

In der Betontechnologie spielt die Hydratation sowie die Strukturbildung eine wichtige Rolle. Bei Entlastung wird sich nicht der gleiche Zustand einstellen, d. h. der Vorgang ist nicht reversibel. Es wird daher der Begriff „Strukturbruch“ verwendet, um den Abfall des Scherwiderstands zu beschreiben.

- Rheopexie

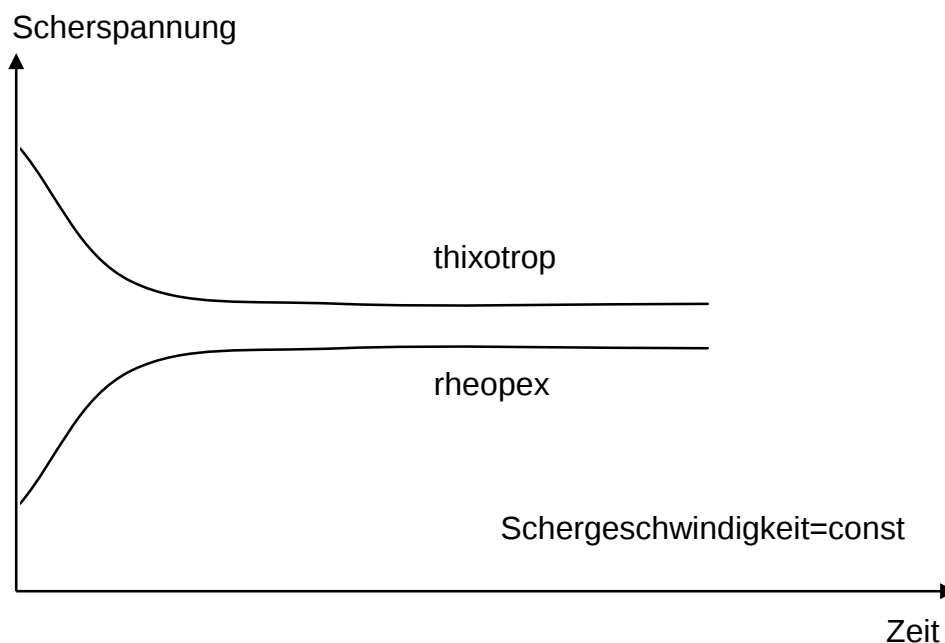


Bild 4: Thixotropes und rheopexes Verhalten

Die inverse Erscheinung zur Thixotropie ist die Rheopexie. Diese beschreibt die Zunahme der Scherspannung τ infolge anhaltender konstanter Belastung gegen einen Grenzwert und die Wiederabnahme bis auf den Ausgangswert nach der Entlastung (vgl. Bild 4). Die Rheopexie ist ebenso wie die Thixotropie reversibel /KEC99/. Rheopexie spielt in der Betontechnologie eine untergeordnete Rolle.

2.1.2.4 Hysteresekurven

Zur Bestimmung der Hysteresekurven in Bild 5 wird die Scherrate bis zu einem willkürlichen Höchstwert gesteigert und anschließend wieder auf Null abgesenkt. Die resultierenden Änderungen der Scherspannungen ergeben eine Fließkurve mit zwei Ästen. Bei einer

Newtonschen Flüssigkeit liegen beide Äste übereinander, andernfalls ergibt sich eine Fläche zwischen den beiden Ästen, die von der Schergeschichte abhängig ist und als ein Maß für den Strukturbruch (vgl. Kapitel 2.3.2.3) angesehen wird /HAC01, KHA02/.

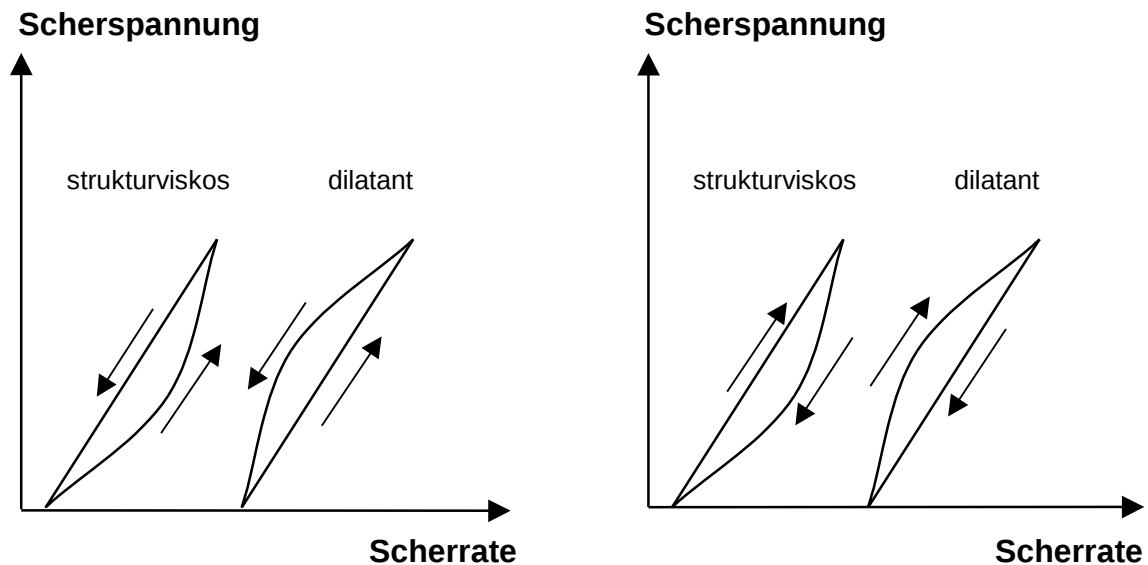


Bild 5: Hysteresekurven bei thixotropem (links) und rheopexem (rechts) Verhalten

2.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der rheologischen Kennwerte von Zementleim, Mörtel und Beton

2.2.1 Allgemeines

Zur Ermittlung von rheologischen Eigenschaften von Mörteln und Betonen können direkte und indirekte Verfahren verwendet werden. Direkte Verfahren sind i. d. R. Rheometerversuche, mit denen rheologische Kennwerte ermittelt werden können. Indirekte Verfahren sind meist Baustellenverfahren, die über die Ermittlung eines bestimmten Kennwertes eine qualitative und zu Werten der Eignungsprüfung vergleichende Aussage zu den rheologischen Eigenschaften des zu untersuchenden Stoffes ermöglichen.

2.2.2 Direkte Verfahren

2.2.2.1 Allgemeines

Das Fließverhalten von SVB wird durch seine rheologischen Kenngrößen beschrieben, die mittels eines Rheometers bestimmt werden können. Für die Messung der Viskosität von zementgebundenen Baustoffen haben sich Zylinder-Rotationsviskosimeter als besonders

geeignet erwiesen, da sie die Voraussetzungen einer stationären, laminaren Schichtenströmung erfüllen /KEC99, REI99/.

Es traten jedoch häufiger Probleme auf. So wurden beispielsweise Entmischungserscheinungen festgestellt, die zur Abnahme der Scherspannung führten /FLA73, BER82/. Ursache dieser Entmischungen waren Wandgleiteffekte und Zonen ungleichmäßiger Schergeschwindigkeitsverteilung infolge niedriger Drehzahl und großer Spaltweiten.

Tattersall /TAT83b/ zeigte, dass es möglich ist, Frischbeton in einer Art Mischer zu untersuchen. Daraus erhält man Ergebnisse in der einer Fließkurve ähnlichen Form, vorausgesetzt, dass die Messungen bei mehr als einer Geschwindigkeit vorgenommen werden (Zwei-Punkt-Messung /HOR91/).

2.2.2.2 Koaxial-Zylinder-Viskosimeter

Es kann zwischen verschiedenen Formen von Rotationsviskosimetern je nach ihrem Aufbau unterschieden werden. Befindet sich die Substanz in einem Messspalt zwischen zwei rotationssymmetrischen und koaxial angeordneten Zylindern, von denen der eine mit zeitlich konstanter oder variabler Winkelgeschwindigkeit rotiert, so handelt es sich um ein Koaxial-Zylinder-Viskosimeter (vgl. Bild 6). Im Koaxial-Zylinder-Viskosimeter herrschen eindeutige Fließbedingungen. Das Material wird einer Scherbeanspruchung zwischen zwei parallelen Flächen unterworfen /BAN92, BAN87/.

Dabei können zwei Grundtypen unterschieden werden. Rotiert die äußere Randfläche des Koaxial-Zylinder-Viskosimeters, so handelt es sich um ein Couette-Rotationsviskosimeter, im anderen Fall um ein Searle-Rotationsviskosimeter /BER79a, BER79b, REU78, WIE81, WES73/.

Weiter gibt es noch das Kegel-Platte- oder Platte-Platte-Viskosimeter, bei denen jeweils die sich dazwischen ergebende Scherbelastung gemessen wird /CAB82, FER92/ sowie Rotationsviskosimeter mit spezieller Kugelgeometrie /LOW13a/.

Verschiedene Autoren modifizierten die Messeinrichtung des Koaxial-Zylinder-Viskosimeters, indem sie den inneren Zylinder des Viskosimeters durch ein Messpaddel ersetzten und dann den Drehwiderstand des Paddels gegen die Suspension ermittelten /BAN92, BER82, FLA73, TAT83b/. Obwohl es sich aufgrund des Mischvorganges nicht um ein reines Scheren zwischen parallelen Flächen handelt, wurde gezeigt, dass das auftretende Drehmoment am Paddel direkt proportional zur Fließgrenze und der plastischen Viskosität des Mörtels ist.

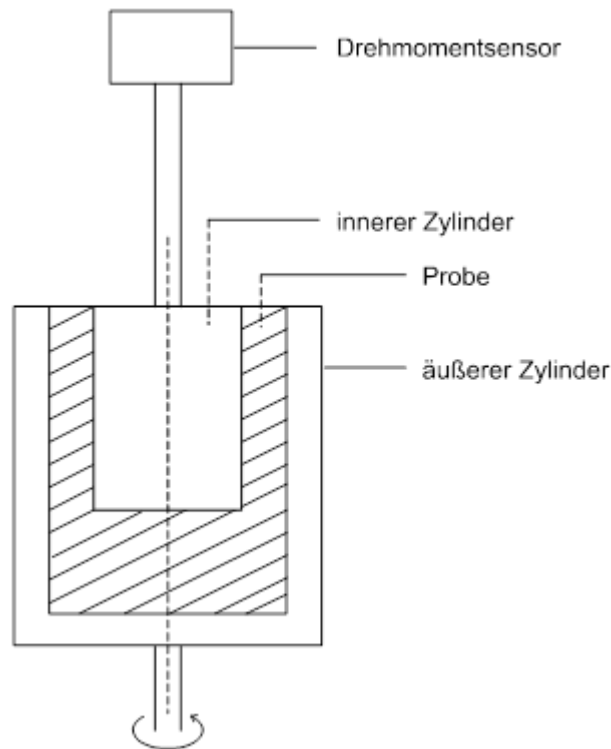


Bild 6: Koaxial-Zylinder-Viskosimeter /BAN87/

Der Nachteil dieser Geometrie besteht darin, dass das Schergefälle nicht genau zu bestimmen ist, weil kein definierter Spalt mehr vorhanden ist. Deshalb stellt das Ergebnis der Messung ein relatives Maß für das Fließverhalten dar. Für vergleichende Untersuchungen ist dieses allerdings kein Nachteil.

2.2.2.3 Viskomat NT

Häufig wird zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften von Zementleimen und -mörteln der Viskomat NT, ein Rotationsviskosimeter mit Paddelgeometrie, verwendet /BAN92, JAM97, KEC99, FRE02, BLA02/. Mit ihm lassen sich Substanzen untersuchen, deren Partikelgröße bis zu 2 mm betragen kann. Dadurch wird auch die Untersuchung von Mörteln möglich. Das Paddel ist so geformt, dass der Mörtel während der Messung permanent gemischt und somit ein Sedimentieren und Entmischen verhindert wird. Ein Abstreifer verhindert ein Ansetzen des Mörtels an der Behälterwand. Da der Viskomat NT schwerpunktmäßig im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, findet sich eine detaillierte Beschreibung in Kapitel 5.2.3.4.

Banfill /BAN90, BAN91, BAN92/ und Hornung /HOR91/ untersuchten mit dem ViscoCorder mit Paddelgeometrie, dem Vorgängermodell des Viskomat, das Fließverhalten von Mörteln

und beschäftigten sich eingehend mit der Kalibrierung des ViscoCorders in physikalische Grundeinheiten. Das Bingham-Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens eines Mörtels vorausgesetzt, führten sie zwei Kalibrierkonstanten ein, damit die Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität η_{pl} mit Hilfe der Konstanten in physikalischen Einheiten ausgedrückt werden können. Nach heutigem Wissensstand ist die Kalibrierung des Viskomat NT für Newtonsche Fluide möglich /GRE04a/. Für Fluide mit Fließgrenze gibt es bislang keine Untersuchungen zur Kalibrierung. Dieses gilt auch für Fluide, die ein nichtlineares Fließverhalten mit oder ohne Fließgrenze aufweisen, wie z. B. Fluide, die nach dem Modell von Ostwald und de Waele oder Herschel & Bulkley beschrieben werden können (vgl. Kapitel 2.3.1). Aufgrund des komplexen rheologischen Verhaltens dieser Fluide ist jedoch nicht zu erwarten, dass eine Kalibrierung des Viskomat NT für diese Anwendungsfälle möglich ist.

2.2.2.4 Betonrheometer

Die Ermittlung von rheologischen Kenngrößen ist auch direkt am Beton möglich. Die am häufigsten verwendeten Betonrheometer sind das BTRHEOM und das Contec 5 Rheometer /FER98, LAR98, LAR99, SED99, HU95, LAR96, LAR97b/. Die Ermittlung rheologischer Kenngrößen mit solchen Betonrheometern ist in der Fachwelt sehr umstritten, da der Einfluss der groben Gesteinskörnung nicht eindeutig geklärt ist. Die qualitative Ermittlung von rheologischen Kenngrößen an stabilen Betonen ist jedoch möglich.

Prinzipiell sind auch Kugelfallviskosimeter für die Bestimmung der dynamischen Viskosität denkbar, jedoch sind diese nur für die Messung der dynamischen Viskosität von Newtonschen Fluiden geeignet /DIN01c/. Bei Fluiden, die entweder wie im Fall selbstverdichtender Mörtel eine Fließgrenze aufweisen oder deren Fließkurve einen nichtlinearen Verlauf zeigt (dilatantes oder strukturviskoses Fluid), ist das Messprinzip zur Bestimmung der absoluten dynamischen Viskosität aufgrund der nicht konstanten Kugelfallzeiten über die Messrohrhöhe nicht direkt möglich /LEA80, CHH92, ROS02/. Bei selbstverdichtenden Mörteln kommt zusätzlich der Einfluss der Thixotropie hinzu, die ebenfalls die Sinkgeschwindigkeit der Kugel beeinträchtigen kann und somit die Bestimmung der dynamischen Viskosität beeinflusst.

Eine Bestimmung der absoluten dynamischen Viskosität direkt am Beton ist aufgrund der oben beschriebenen Problematik ebenfalls nicht möglich. Selbstverdichtende Betone haben zudem ein Größtkorn zwischen 8 und 16 mm. Diese Grobpartikel beeinflussen die Sinkgeschwindigkeit der Kugel und somit die Bestimmung der dynamischen Viskosität. Entsprechende Untersuchungen sind in /BUC04/ beschrieben. Diese zeigen, dass eine absolute dynamische Viskosität mit einem solchen Verfahren nicht bestimmbar, die

Ermittlung von relativen dynamischen Viskositäten zum Vergleich verschiedener Rezepturen aber ansatzweise möglich ist.

2.2.3 Indirekte Verfahren

Neben dem Einsatz von Rheometern kann das rheologische Verhalten von Mörteln und Betonen auch durch indirekte Verfahren beschrieben werden. Diese Konsistenzprüfverfahren, die ebenfalls Rückschlüsse auf die Fließeigenschaften ermöglichen, wurden zur Charakterisierung der Frischbetoneigenschaften auf der Baustelle entwickelt und sind i. d. R. „Ein-Punkt-Versuche“. Sie sind vergleichsweise einfach durchzuführen. Diese Konsistenzprüfverfahren liefern Ersatzkennwerte für eine rheologische Größe.

Zur Beurteilung der Fließgrenze von Beton eignet sich das Ausbreitmaß (Rüttelbeton) bzw. das Setzfließmaß (SVB). Hiermit kann ferner das Zusammenhaltevermögen und die Entmischungsneigung durch Inaugenscheinnahme des ausgebreiteten Betons bewertet werden. Bei SVB eignet sich der Trichterauslaufversuch um die Viskosität abzuschätzen. Die entsprechenden Versuche sind im Versuchsteil dieser Arbeit detailliert beschrieben.

2.3 Rheologie von Zementleim, Mörtel und Beton

2.3.1 Allgemeines

Zementleim weist i. d. R. thixotropes Verhalten mit einer Hysteresekurve auf. Der Belastungsast zeigt eher ein strukturviskoses, der Entlastungsast ein meist dilatantes Verhalten /KOR05/. Da sich die Struktur des Zementleimes durch die Scherbelastung und die beginnende Hydratation kontinuierlich ändert, sind diese Vorgänge nicht reversibel. Eine ausführliche Diskussion über verschiedene Erscheinungsformen von scherspannungs- und zeitabhängigem Verhalten ist z. B. in /KEC99/ zusammengestellt.

Zur Beschreibung der Fließkurven von Zementleimen gibt es eine Vielzahl von rheologischen Modellen. Die Gleichungen bestehen häufig aus einem konstanten (Newtonschen) und einen exponentiellen (nichtlinearen) Teil. Diese Nichtlinearität wird durch die chemische Reaktion des Zementes und die physikalischen Vorgänge verursacht, wenn Zement und Wasser miteinander in Berührung kommen. Außerdem spielen die makroskopischen, interpartikulären Wechselwirkungen eine Rolle.

Mörtel folgt einfacheren Gesetzen als Zementleim. Für das komplizierte Fließverhalten von Leimen ist die Kontaktfläche zwischen Wasser und Zement von Bedeutung, da dort die

Hydratationsprozesse unmittelbar nach Wasserzugabe stattfinden. Durch die Gesteinskörnung im Mörtel kommt es zu einer Verdünnung. Außerdem erfolgt durch die verstärkte Scherung des Zementleimes während des Mischens mit zunehmendem Gesteinskörnungsgehalt ein fast vollständiger Strukturbruch. Die Fließkurve eines Mörtels, der keine selbstverdichtenden Eigenschaften zeigt, kann meist ausreichend genau mit dem Bingham-Modell approximiert werden. Bei weiter steigendem Gehalt an Gesteinskörnung oder zunehmendem Größtkorn nimmt der Einfluss des Leims weiter ab /FRE02, HUS10, GRA15/. Dann nimmt der Einfluss der interpartikulären Wechselwirkung zwischen den Gesteinskörnungspartikeln, insbesondere die Reibung zwischen den Partikeln, zu, was durch eine höhere Fließgrenze gekennzeichnet ist. Niedrige Leimgehalte führen zu einer starken Dispergierung der Leimphase. Trotzdem spielt die Leim- und Mörtelphase im Beton eine wichtige Rolle, da bei Beginn einer Fließbewegung aus dem Ruhezustand heraus die Scherbrüche immer in der Leimphase stattfinden. Gerade der Betoneinbau auf der Baustelle ist durch häufige Wechsel zwischen Ruhephase und Fließphase gekennzeichnet, wie z. B. beim Pumpen mit Kolbenpumpen. Ohne ausreichende Leim- bzw. Feinststoffgehalte kann die innere Reibung und damit die Fließgrenze nicht hinreichend verringert werden und der Betoneinbau wird dadurch erheblich erschwert /FRE02/.

Auch Rüttelbeton kann im Frischbetonzustand als Bingham-Körper beschrieben werden. Bei SVB führt eine Beschreibung mit dem Bingham-Modell zu physikalisch unplausiblen, negativen Fließgrenzen, da diese Betone häufig dilatantes Verhalten aufweisen. Der Grund dafür ist, dass SVB oftmals ein dilatantes Fließverhalten und niedrige Fließgrenzen aufweist. Eine lineare Approximation mit dem Bingham-Modell ergibt oftmals diese negative Fließgrenze. Deshalb schlägt /LAR97a, LAR97b/ vor, das Fließverhalten von Beton mit einem Modell nach Herschel & Bulkley zu approximieren. Das Bingham-Modell bietet jedoch den Vorteil, dass die zwei physikalischen Kenngrößen Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität η_{pl} zur Beschreibung genügen. In Tabelle 1 werden ausgewählte rheologische Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Leimen, Mörteln und Betonen vorgestellt.

Tabelle 1: Modelle zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens /KEC99, YAH03/

Referenz	Modell	Verhalten
Newton	$T = \eta \cdot \dot{\gamma}$	linear
Ostwald & de Waele	$T = k \cdot \dot{\gamma}^n$	$n > 1$ dilatant $n < 1$ viskoplastisch
Bingham	$T = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$	linear mit Fließgrenze
Herschel & Bulkley	$T = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$	$n > 1$ dilatant $n < 1$ viskoplastisch
Robertson-Stiff	$T = A (\dot{\gamma} + B)^n$	$n > 1$ dilatant $n < 1$ viskoplastisch
Vom Berg	$T = \tau_0 + b \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{c} \right)$	viskoplastisch
Eyring	$T = a \cdot \sinh^{-1} (b \cdot \dot{\gamma})$	pseudoplastisch
Casson	$T = \tau_0 + \eta_{\infty} \cdot \dot{\gamma} + 2 \left(\sqrt{\tau_0 \cdot \mu_{\infty}} \right) \cdot \sqrt{\dot{\gamma}}$	viskoplastisch
De Kee	$T = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \cdot e^{-\alpha \cdot \dot{\gamma}}$	$\alpha > 0$ viskoplastisch $\alpha < 0$ dilatant
Yahia und Khayat	$T = \tau_0 + \eta_{\infty} \cdot \dot{\gamma} + 2 \left(\sqrt{\tau_0 \cdot \mu_{\infty}} \right) \sqrt{\dot{\gamma} \cdot e^{-\alpha \cdot \dot{\gamma}}}$	$\alpha > 0$ viskoplastisch $\alpha < 0$ dilatant

Zum Verständnis des Fließverhaltens wird im nächsten Kapitel die Struktur von Zementleim, Mörtel und Beton beschrieben.

2.3.2 Modellvorstellung der Struktur von Zementleim, Mörtel und Beton

2.3.2.1 Physikalische und chemische Vorgänge

- Kräfte im Wasserfeststoffgemisch

Wird ein Haufwerk in eine Suspension überführt, entstehen aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers und der Adhäsion zwischen Zwickelwasser und Kornoberfläche Anziehungskräfte, die einen Zusammenhalt einzelner Körner bewirken. Diese Kapillarkräfte wirken größtenteils bei Korngrößen zwischen 0,1 und 1 mm, treten also nicht bei Zementleimen auf, wohl aber bei steifen Mörteln und bei Frischbeton. Sie sind kurz vor Erreichen des Mindestwassergehaltes am größten. Ist die Suspension gesättigt, sind diese Kräfte nicht mehr wirksam und andere Kräfte gewinnen an Bedeutung /HA109/. Wirkt keine äußere Scherbelastung mehr auf die Suspension ein, also direkt nach dem Mischen, kommt es aufgrund der Brownschen Teilchenbewegung und der Gewichtskraft zu einer Annäherung der Teilchen, bis diese in den Wirkungsbereich der interpartikulären Kräfte kommen.

Die interpartikulären Kräfte können anziehend oder abstoßend sein. Die Abstoßungskräfte sind elektrostatischen Ursprungs und führen zu einer Dispersion der Teilchen /HAI09, LOW13a/. Ladungsträger lagern sich auf der Partikeloberseite als starre Schicht an, während die restlichen Ladungsträger sich als diffuse Doppelschicht in unmittelbarer Nähe des Partikels in der Lösung verteilen /STE24/ (vgl. Bild 7).

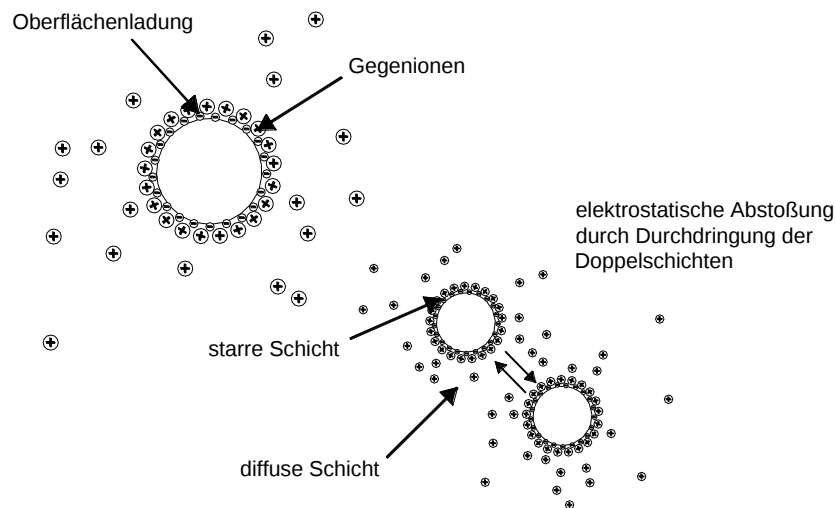


Bild 7: Schematische Darstellung der diffusen Doppelschicht nach /STE24/

Die Van-der-Waalsschen Anziehungskräfte hingegen bewirken eine Agglomeration. Bei diesen Anziehungskräften handelt es sich um eine nicht-chemische Bindungsform zwischen Molekülen und Atomen infolge eines Dipolmomentes.

Diese Wechselwirkungen zwischen anziehenden und abstoßenden Kräften lassen sich durch die DLVO-Theorie (Derjaugin-Landau-Verwey-Overbeek Theorie) beschreiben /HAI09/. Nähern sich zwei Partikel in einer Suspension einander an, beginnen die diffusen Doppelschichten sich gegenseitig zu beeinflussen und abzustoßen. Die Abstoßungsenergie nimmt exponentiell mit der Entfernung ab /TAT83b/. Gleichzeitig wirken die Anziehungskräfte, die invers proportional zum Quadrat des interpartikulären Abstands sind. Durch Addition der Anziehungs- und Abstoßungspotenzialkurve erhält man die resultierende Potenzialenergiekurve, die die Wechselwirkung zwischen den Partikeln beschreibt. Bei kleineren Partikelabständen überwiegt die Anziehungskraft und es kommt zu einer Agglomeration der Partikel, während bei einem mittleren Abstand die Abstoßungsenergie überwiegt und es zu einer Dispersion kommt /POW68, BER87, TAT83a, TAT83b/. Inwieweit diese Theorie auf grobdisperse Systeme wie z. B. SVM übertragen werden kann, ist in der Literatur nicht eindeutig bestimmt.

- Einfluss der Hydratation auf die Rheologie

Portlandzementklinker besteht im Wesentlichen aus den Klinkerphasen Tricalciumsilicat (C_3S), Dicalciumsilicat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrit (C_4AF), sowie aus Calciumsulfat ($CaSO_4$), das zur Regelung des Erstarrungsverlaufs zugesetzt wird. Nach der Wasserzugabe erfolgen Reaktionen, bei denen Hydratphasen gebildet werden.

Die erste Phase der Hydratation ist für die Rheologie die wichtigste. Unmittelbar nach der Wasserzugabe bilden die Calciumaluminat mit dem Calciumsulfat Ettringit. Bei einem sulfatoptimierten System sollten diese ersten Reaktionsprodukte auf den Zementpartikeln zu keiner Gefügebildung führen und damit die rheologischen Eigenschaften nur durch die Wasserbindung beeinflussen /KOR05, LOW13a/. Der Einfluss der ersten Hydratationsprodukte auf die Fließeigenschaften ist aber noch umstritten. So zeigen andere Untersuchungen, dass sowohl die Fließgrenze τ_0 als auch die Viskosität η durch eine Änderung der Mikrostruktur zunehmen. Durch die Hydratation werden die Partikel stärker gebunden als durch die Oberflächenkräfte allein /TAT83a, TAT83b/.

Das Fließverhalten von Zementleimen kann aber unabhängig von den Oberflächenkräften und der Hydratation mit der Flockenstruktur beschrieben werden. Dadurch können Vorgänge bei Zementleimen wie z. B. der Strukturbruch ohne genaue Kenntnis über die die Flockenstruktur beeinflussenden Kräfte erklärt werden. Die Flockenstruktur bietet eine gute Möglichkeit der Veranschaulichung des Fließverhaltens von Zementleimen, wenn auch der Einfluss verschiedener Parameter auf die Ausbildung der Flockenstruktur noch nicht endgültig geklärt ist (z. B. Wassergehalt, Partikeloberfläche, Hydratationsfortschritt).

2.3.2.2 Flockenstruktur im Ruhezustand

Direkt nach dem Mischen bildet sich in Zementsuspensionen aufgrund der Agglomeration der Zementpartikel eine Flockenstruktur, die je nach Konzentration, Mischintensität und Mischdauer unterschiedlich sein kann.

/POW68/ unterscheidet zwischen vereinzelt auftretenden „Zusammenballungen“ von Partikeln (floculated state) in verdünnten Suspensionen und durchgehenden Netzwerken (flocculent state) in konzentrierten Suspensionen (vgl. Bild 8).

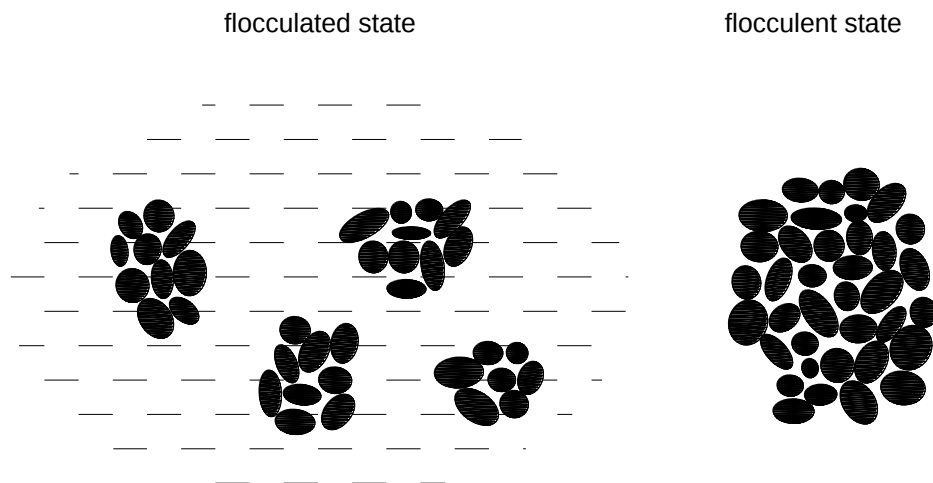


Bild 8: Zusammenballungen von Partikeln in verdünnten und konzentrierten Suspensionen nach /POW68/

In verdünnten Suspensionen setzen sich die vereinzelt Flocken ab, während dieses in konzentrierten Suspensionen behindert ist. /POW68/ bestimmte einen w/z -Wert von 0,4 als Grenzwert zwischen einer verdünnten und einer konzentrierten Suspension.

/HEL80/ beschreibt den Zementleim als eine durchgehende Flocke mit einer ungleichmäßigen Partikelverteilung und damit bereichsweise unterschiedlicher Dichte. Die Zementpartikel werden als Kugeln angenommen (vgl. Bild 10). Die Hohlräume zwischen den größeren Partikeln werden mit kleineren Partikeln und Wasser ausgefüllt. Dabei haftet das Wasser fest an der Oberfläche der Partikel. Durch Division des Wasservolumens durch die spezifische Oberfläche des Zementes ergibt sich die Wasserfilmdicke. /POW68/ und /HEL80/ gingen beide davon aus, dass der Hohlraumgehalt zwischen den Partikeln ein Minimum annimmt und die Dicke des Wasserfilms um die Zementpartikel mit dem w/z -Wert zunimmt, wodurch der Partikelabstand erhöht wird.

/LEG94/ erklärt die Flockenbildung durch elektrostatische Kräfte infolge unterschiedlicher Oberflächenpotenziale (vgl. Bild 9). Da die Partikel sich nur an ihren Ecken berühren, wirken die kohäsiven Van-der-Waalsschen Kräfte nur punktuell an den Verbindungsstellen und es entsteht eine gelenkige Verbindung.

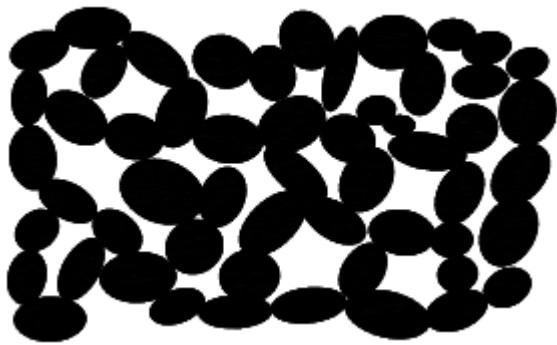


Bild 9: Flockenmodell nach /LEG94/

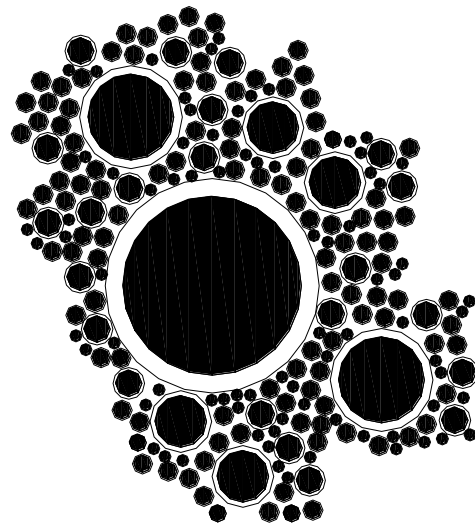


Bild 10: Zementleimmodell nach /HEL80/

Diese Modellvorstellung widerspricht den obigen Annahmen, dass der Hohlraumgehalt ein Minimum einnimmt. Stattdessen können mit abnehmender Partikelgröße größere Wassermengen an die Partikel angelagert werden.

hoher Wassergehalt

geringer Wassergehalt

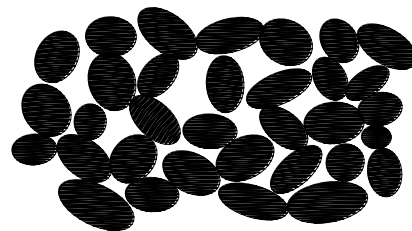
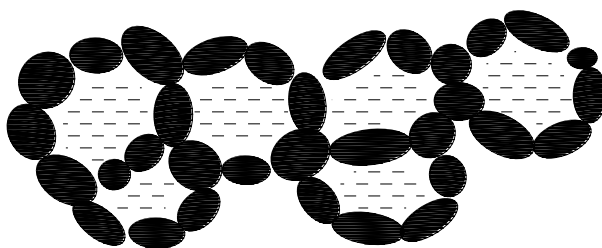


Bild 11: Flockenstruktur mit hohem und geringem Wassergehalt nach /KEC99/

/KEC99/ entwickelte eine Modellvorstellung, die mit der Struktur von Tonmineralgelen vergleichbar ist. Bei den Tonmineralgelen bauen sich dreidimensionale Strukturen auf, deren Hohlräume mit Flüssigkeit gefüllt sind. Die Flockenstruktur wird durch den Hohlraumgehalt und die Anzahl der Kontaktpunkte geprägt (vgl. Bild 11).

Der Hohlraumgehalt und die Anzahl der Kontaktpunkte werden durch den Wassergehalt beeinflusst. Bei ausreichendem Wasserangebot stellt sich ein maximaler Hohlraumgehalt ein. Die Anzahl der Kontaktpunkte ist von der Partikelgrößenverteilung abhängig. Bei niedrigen w/z-Werten ergibt sich ein kleinerer Hohlraumgehalt. Die Partikel liegen dann grundsätzlich näher beieinander und somit erhöht sich die Anzahl der Kontaktpunkte.

2.3.2.3 Flockenstruktur unter Scherbeanspruchung

Werden die Flockenstrukturen einer Scherbelastung ausgesetzt, verformen sie sich bis zu einem gewissen Grad elastisch und zerbrechen bei weiterer Belastung. Die Zerstörung der Flockenstruktur wird als Strukturbruch bezeichnet /TAT55/. Der Scherwiderstand nimmt infolge des Aufbrechens der agglomerierten Zementpartikel ab, bevor die Hydratation erneut eine Struktur bildet.

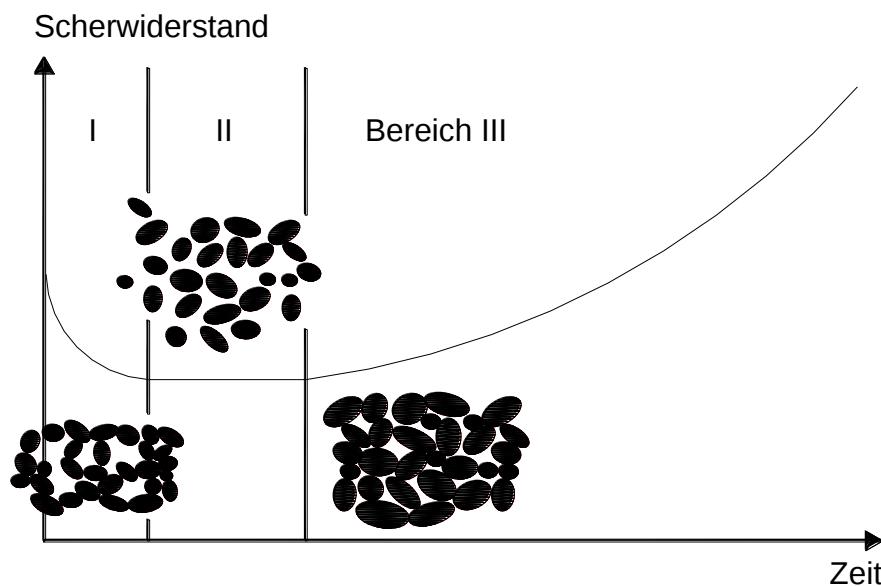


Bild 12: Scherwiderstand infolge konstanter Scherbelastung nach /KEC99/

Es entsteht ein System aus einzelnen, nicht miteinander verbundenen Agglomeraten und Partikeln. Diese Partikel streben eine erneute Verflockung an, was zu zwei gegenläufigen Effekten führt: Die erneute Flockenbildung infolge der interpartikulären Anziehungskräfte und die Zerstörung der Agglomerate durch die Scherbeanspruchung. Hinzu kommt die einsetzende Hydratation. Aufgrund der Überlagerung dieser drei Effekte stellt sich oftmals der in Bild 12 dargestellte Verlauf ein.

Es können drei Bereiche unterschieden werden. Im ersten Bereich ist die Strukturzerstörung größer als der Wiederaufbau und der Scherwiderstand fällt stark ab. Mit zunehmender Anzahl einzelner Flocken wird der Abfall geringer, bis sich eine Art Gleichgewichtszustand zwischen Strukturaufbau und -abbau einstellt, dargestellt durch den Bereich II. Im Bereich III führt dann die einsetzende Hydratation zu einer Zunahme der Bindungskräfte und damit zu einem Anstieg des Scherwiderstandes /KEC99/.

2.3.2.4 Struktur von Mörtel und Beton

Anders als bei Leimen muss bei Mörtel und Beton der Einfluss der Gesteinskörnung als zusätzliche Feststoffphase berücksichtigt werden. Hier bieten sich verschiedene Betrachtungsweisen an:

- Das Wasser wird als flüssige Phase betrachtet, Zement, Gesteinskörnung und Betonzusatzstoffe als Feststoffphase.
- Der Bindemittelleim bildet die flüssige Phase, die gesamte Gesteinskörnung die Feststoffphase.
- Der Mörtel bildet die flüssige Phase und nur die grobe Gesteinskörnung die Feststoffphase.

Die für das Fließverhalten maßgeblichen Parameter sind im Mörtel und Beton andere als im Leim. Zwischen den Partikeln der Gesteinskörnung wirken überwiegend Kräfte infolge innerer Reibung und Kohäsion, die wesentlich von der Korngröße und -verteilung, der Oberflächenbeschaffenheit der Teilchen sowie dem Wasser- bzw. Leimgehalt in der Mischung abhängen. Die innere Reibung setzt sich aus Festkörper- und Flüssigkeitsreibung zusammen. Die Festkörperreibung wird nur bei Kontakt zwischen den Teilchen wirksam. Ist eine ausreichende Verdünnung durch Wasser oder Leim gegeben, ist die Anzahl der Kontaktstellen während einer Scherbeanspruchung gering und die Reibungskräfte infolge Festkörperreibung werden bedeutungslos. Bild 13 zeigt den Übergang von Festkörper- zu Flüssigkeitsreibung.

Je höher der Leimgehalt ist, umso geringer ist die Interaktion der Gesteinskörnung, und das Fließverhalten wird im Wesentlichen von der Leimviskosität beeinflusst. Während einer Scherbewegung entstehen Reibungskräfte zwischen Leim und Gesteinskörnung, die der Flüssigkeitsreibung zuzuordnen sind. Je weicher ein Mörtel ist, desto größer wird der Anteil der Flüssigkeitsreibung an der gesamten inneren Reibung. Je steifer der Mörtel und je geringer dessen Leimanteil ist, umso stärker beeinflusst die Gesamtkorngrößen-

verteilung den Hohlraumgehalt und die Festkörperreibung und damit das Fließverhalten /FRE02/.

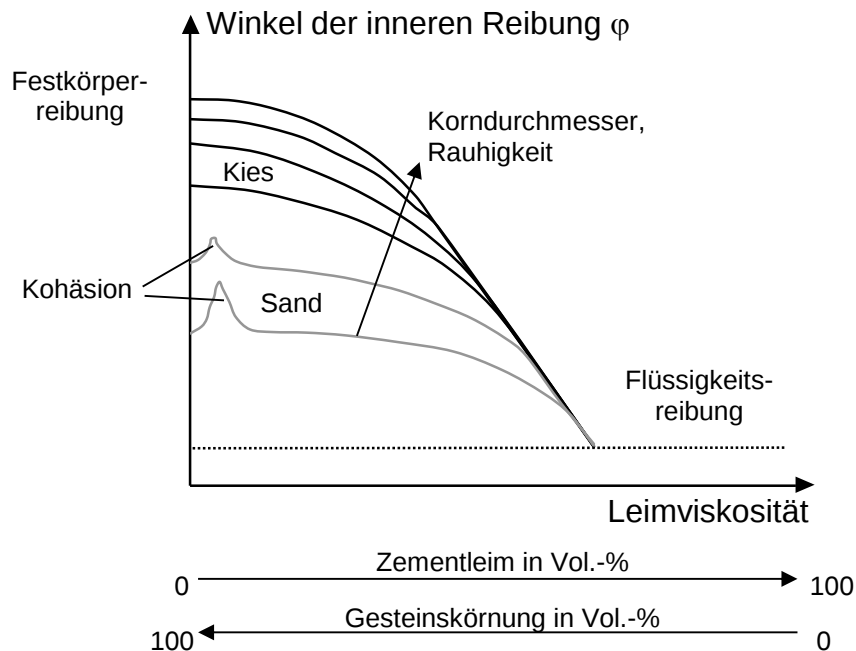


Bild 13: Übergangsbereich zwischen Festkörper- und Flüssigkeitsreibung in Abhängigkeit von Korndurchmesser und Oberflächenrauigkeit bei Mörteln /FRE02/

2.4 Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleim, Mörtel und Beton

2.4.1 Allgemeines

Aus den vorangegangenen Modellvorstellungen geht hervor, dass der Wassergehalt einen signifikanten Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften von Leim, Mörtel und Beton hat.

Die Feststoffkonzentration (Wasser/Feststoff-Verhältnis) in einem Fluid beeinflusst die rheologischen Eigenschaften maßgeblich. In der Betontechnologie wird diese Feststoffkonzentration üblicherweise durch den Wasserzementwert (w/z -Wert) oder, bei der Verwendung von Betonzusatzstoffen, den Wasserbindemittelwert (w/b -Wert) ausgedrückt (vgl. Gl. (6)).

Die Feststoffkonzentration wird entweder in Massen- oder in Volumenanteilen angegeben. Bei rheologischen Untersuchungen ist es von Vorteil, das Mischungsverhältnis von Wasser zu Feststoff in Volumenanteilen anzugeben, da auf diese Weise der Einfluss der

unterschiedlichen Stoffdichten unberücksichtigt bleibt. Für einen Zementleim wird die Feststoffkonzentration folgendermaßen definiert:

$$\phi = \frac{V_Z}{V_Z + V_W} = \frac{1}{1 + \omega \cdot \frac{\rho_Z}{\rho_W}} \quad (6)$$

mit:

ϕ :	Volumenverhältnis
V_Z :	Zementvolumen
V_W :	Wasservolumen
ρ_Z :	Dichte des Zementes
ρ_W :	Dichte des Wassers
ω :	Wasserzementwert

2.4.2 Feststoffkonzentration

Die Feststoffkonzentration bestimmt den Partikelabstand und somit auch die Kräfte, die zwischen den Partikeln überwunden werden müssen. Sie nimmt damit entscheidenden Einfluss auf die Fließgrenze und die Viskosität.

Zementleim, Mörtel und Beton sind hochkonzentrierte Suspensionen ($w/b \leq 0,4$) mit sehr fein abgestimmter Korngrößenverteilung in einer sehr großen Spannweite der Korngröße von wenigen μm bis einigen mm.

Die Viskosität η kann als Funktion des Feststoffanteils ϕ und der Viskosität η_F der flüssigen Phase beschrieben werden. Bezieht man die Viskosität der Suspension η auf die Viskosität der flüssigen Phase, erhält man die relative Viskosität η_{rel} (vgl. Gl. (7)):

$$\eta_{\text{rel}} = \frac{\eta}{\eta_F} \quad (7)$$

Schon Einstein entwickelte 1906 ein Modell zur Beschreibung der Viskosität, allerdings nur für eine stark verdünnte Suspension mit einer maximalen Volumenkonzentration bis zu 3 %:

$$\eta = \eta_F (1 + [\eta] \phi) \quad (8)$$

$[\eta]$ ist ein dimensionsloser Parameter und wird als intrinsische Viskosität bezeichnet. Für Kugeln beträgt sie 2,5. Abweichungen davon führen zu Werten größer als 2,5 /EIN06/. Je

mehr die Form von einer idealen Kugel abweicht, umso stärker wirkt sich die Form auf die Viskosität aus. Besonders bei hohen Feststoffkonzentrationen ist ein überproportionaler Anstieg der Viskosität zu erkennen. Dies liegt an der Festkörperreibung. Die Festkörperreibung gewinnt zum einen mit zunehmender Feststoffkonzentration an Bedeutung, ist aber auch umso höher, je mehr die Partikelform von der idealen Kugelgestalt abweicht. Die maximal mögliche Feststoffkonzentration $\phi_{\max}$ ist abhängig von der Kornform, der Korngrößenverteilung und der Lagerungsdichte der Partikel.

Mooney führte die relative Feststoffkonzentration $\phi/\phi_{\max}$ ein, um diese Partikelinteraktionseffekte zu berücksichtigen (vgl. Gl. (9)) /FER99/. Die relative Viskosität ergibt sich dann zu

$$\eta_{\text{rel}} = \frac{\eta}{\eta_F} = \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}}\right) \quad (9)$$

Nach Krieger-Dougherty ergibt sich folgendes Modell:

$$\eta_{\text{rel}} = \frac{\eta}{\eta_F} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-[\eta]\phi_{\max}} \quad (10)$$

Die beiden Parameter intrinsische Viskosität $[\eta]$ und relative Feststoffkonzentration $\phi/\phi_{\max}$ sind die maßgeblichen Parameter des Modells (vgl. Gl. (10)) /HAC01/.

Zur Initiierung einer Fließbewegung müssen die Reibungskräfte überwunden werden. Handelt es sich bei der flüssigen Phase nun um Wasser, wird die Fließgrenze der Suspension nur durch die Reibung zwischen den Partikeln bestimmt, die eine Funktion der relativen Feststoffkonzentration ist:

$$\tau_0 = f\left(\frac{\phi}{\phi_{\max}}\right) \quad (11)$$

Handelt es sich bei der flüssigen Phase um Leim, so muss auch noch die Fließgrenze der flüssigen Phase überwunden werden.

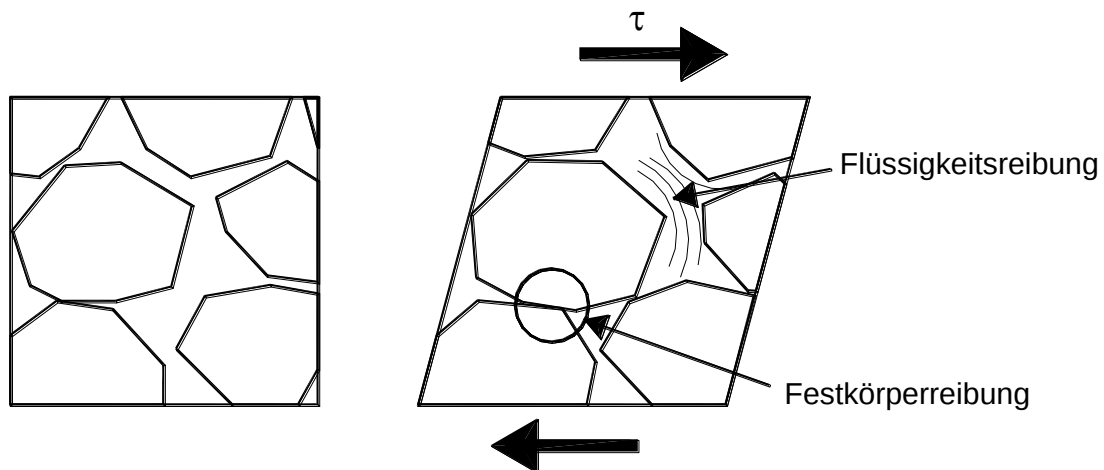


Bild 14: Übergangsbereich zwischen Festkörper- und Flüssigkeitsreibung bei einer hohen Feststoffkonzentration nach /FER98/

Betrachtet man das Bingham-Modell, steht τ_0 für den Festkörperanteil und der Term $\mu \cdot \dot{\gamma}$ für die Flüssigkeitsreibung (vgl. auch Bild 14).

Bei Partikeln unterschiedlicher Größe ist die Funktion f von der Verteilung der Partikel abhängig:

$$\tau_0 = f\left(\frac{\phi_1}{\phi_1^*}, \frac{\phi_2}{\phi_2^*}, \dots, \frac{\phi_n}{\phi_n^*}\right) \quad (12)$$

Bei einer Änderung der Größe und Oberflächenrauheit der Partikel ändert sich auch die Anzahl der Kontakte und somit die Kräfte zwischen den Partikeln, die die Fließfähigkeit beeinflussen (vgl. Gl. (12)). Zur Berechnung der Packungsdichte existieren eine Reihe analytischer Modelle, wie z. B. /AIM67, FER98, STO86/.

2.4.3 Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleimen

Der Festkörperreibungsanteil kann als Funktion der Feststoffkonzentration oder des Abstandes der Zementpartikel untereinander beschrieben werden. Anstelle des Kornabstandes kann auch die Wasserfilmdicke auf den Zementpartikeln herangezogen werden, weil diese bei gleicher Korngröße und/oder korngößenunabhängiger Wasserfilmdicke gerade dem halben Partikelabstand entspricht. Hierzu ist das Hohlraumvolumen des Zementes durch Wasser zu füllen, bevor sich ein schmierender Wasserfilm um die

Feinststoffpartikel bilden kann. /BOM73/ idealisiert die Zementkörner als Kugeln und nimmt eine gleichmäßige Wasserfilmdicke um die Körner an (vgl. Bild 15).

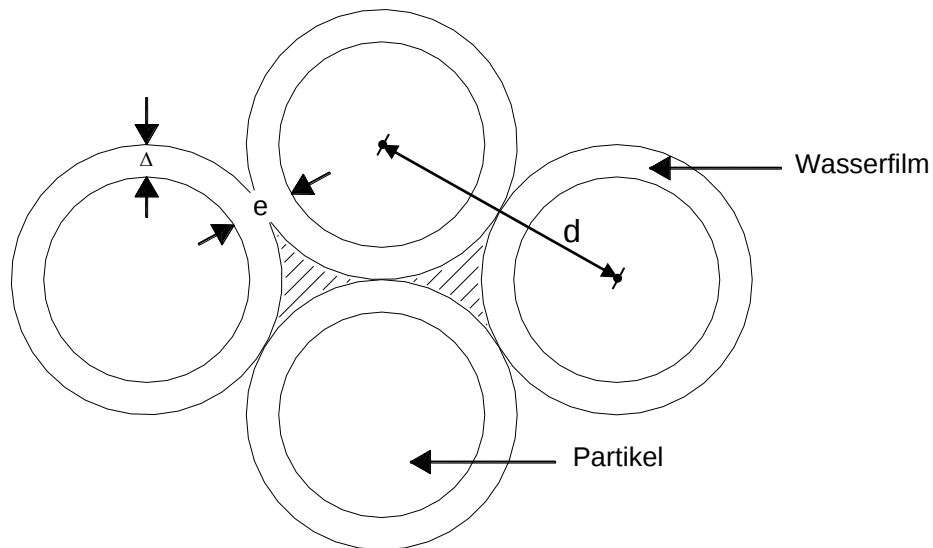


Bild 15: Wasserfilmdicke nach /BOM73/

Gemäß /BOM73/ ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$e = 2\Delta = 2 \frac{V_1}{S} \quad (13)$$

mit:

- e: kleinster intergranularer Abstand
- Δ: Wasserfilmdicke
- V₁: Volumen des Wasserfilms
- S: spezifische Oberfläche der Kugeln

Das Volumen des Wasserfilms V₁ ergibt sich durch Subtraktion des Wassers im Hohlraum von dem Gesamtwasservolumen:

$$V_1 = V_2 - V_3 \quad (14)$$

mit:

- V₂: Gesamtes Wasservolumen
- V₃: Wasser im Hohlraum zwischen den Kugeln

Werden für das Wasservolumen der Flüssigkeitsgehalt L und für das Volumen zwischen den Kugeln die Konstante 0,37 als Hohlraumgehalt, den zufällig verteilte Kugeln annehmen, eingesetzt, erhält man:

$$e = 2\Delta = 2 \frac{V_1}{S} = 2 \frac{V_2 - V_3}{S} = 2 \frac{\frac{mL}{\rho_W} - 0,37 \frac{m}{\rho_Z}}{mS} = 2 \frac{\frac{L}{\rho_W} - 0,37 \frac{1}{\rho_Z}}{S} \quad (15)$$

mit:

L : Flüssigkeitsgehalt

B : Hohlraumgehalt, für Kugeln gleicher Größe ungefähr 0,37

Unter Verwendung der Dichten von Zement ($\rho_Z \cong 3.150 \text{ kg/m}^3$) und Wasser ($\rho_W = 1.000 \text{ kg/m}^3$) und Ansatz des w/z -Werts anstelle des Flüssigkeitsgehalts L ergibt sich ein mittlerer Partikelabstand von:

$$d = 2 \cdot 10^4 \cdot \frac{\omega - 0,12}{S} \quad [\mu\text{m}] \quad (16)$$

mit:

ω : Wasserzementwert [-]

S : spezifische Oberfläche von Zement nach Blaine [cm^2/g]

Bei einem w/z -Wert von 0,4, der nach Powers die Grenze zwischen einer konzentrierten und einer nichtkonzentrierten Suspension ist (vgl. Kapitel 2.3.2.2), ergibt sich nach /BOM73/ ein mittlerer Partikelabstand d von:

$$d = 2 \cdot 10^4 \cdot \frac{\omega - 0,12}{S} = 1,79 \mu\text{m} \quad (17)$$

mit:

ω : Wasserzementwert (hier: $w/z = 0,4$)

S : spezifische Oberfläche (Blaine) von Zement ($S = 3.125 \text{ cm}^2/\text{g}$)

Da Zemente gleicher Feinheit häufig einen voneinander abweichenden Wasseranspruch haben, der auf eine unterschiedliche chemisch-mineralogische Zusammensetzung zurückzuführen ist, führte Rendchen /REN76/ einen Differenz-Wasserzementwert ($w-w_a$) ein. Der Wasseranspruch w_a ist die Wassermenge, die zur Erzielung der Normsteife nach DIN EN 196-1:2005-05 /DIN05a/ erforderlich ist. Damit wird bei der Berechnung des Fließ-

verhaltens die chemisch-mineralogische Zusammensetzung indirekt einbezogen. Aufbauend auf Arbeiten von /KAI68/ und /BON78/ entwickelte Rendchen für die Viskosität von Zementleimen eine Potenzfunktion mit den Eingangsgrößen w/z-Wert, Wasseranspruch und spezifische Oberfläche:

$$\eta_{pl} = 0,571 \left(\frac{w}{z} - w_a \right)^{-1,141} \cdot O_{spez}^{0,32} - 0,757 \quad (18)$$

/KAI68/ führte die Abstandsgröße δ' als Maß für die Verteilung der Zementpartikel in Suspensionen ein:

$$\delta' = \frac{\left(\frac{w}{z} \right)^2}{O_{spez}} \cdot 10^4 \quad (19)$$

Wählt man den um den Wasseranspruch w_a verminderten w/z-Wert $(w-w_a)$, so erhält man die indirekte Abstandsgröße δ'_i :

$$\delta'_i = \frac{\left(\frac{w}{z} - w_a \right)^2}{O_{spez}} \cdot 10^4 \quad (20)$$

Damit reduziert sich die Gleichung für die Viskosität auf eine abhängige Größe:

$$\eta_{pl} = 12,660 \cdot \delta_i'^{-0,565} - 1,012 \quad (21)$$

/FLA73/ suchte nach einer Möglichkeit zur quantitativen Erfassung rheologischer Eigenschaften von Zementleimen und untersuchte dazu auch den Einfluss des w/z-Wertes auf die rheologischen Eigenschaften. Bild 16 zeigt die ermittelten Scherwiderstände in Abhängigkeit der Drehgeschwindigkeit. Im Gegensatz zu den üblichen Darstellungen der Fließkurven sind bei der Darstellung von Flatten die Achsen vertauscht.

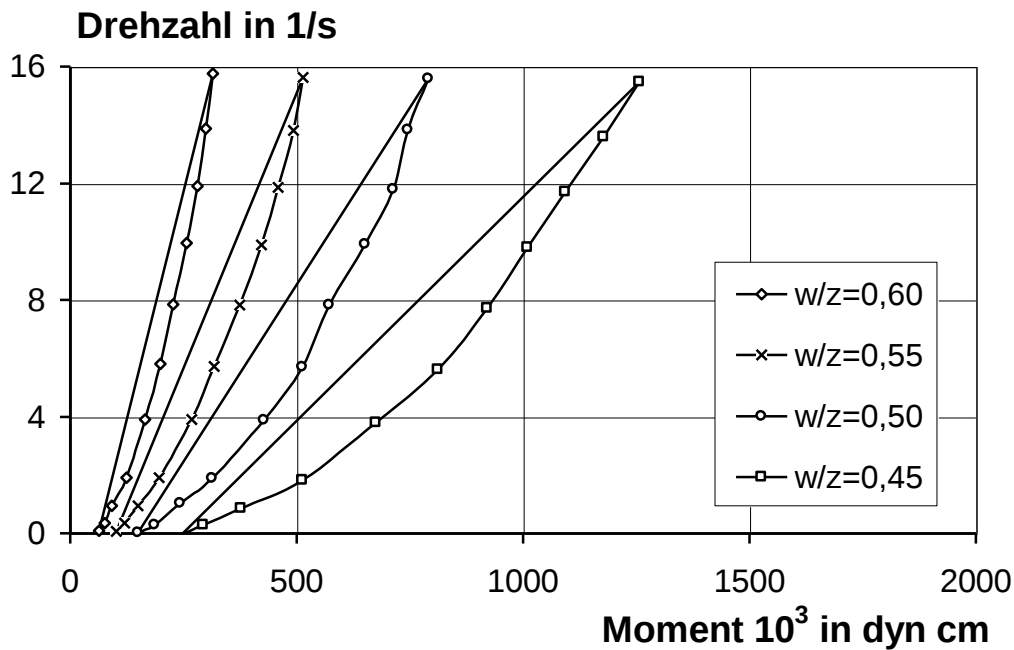


Bild 16: Fließkurven von Zementleimen bei unterschiedlichen w/z-Werten /FLA73/

Die Kurven sind gekrümmt und stimmen unabhängig von der Zementart überein. Die Krümmung wird mit steigendem w/z-Wert geringer, die Kurven nähern sich einem gradlinigen Verlauf. Die Belastungskurve zeigt einen strukturviskosen Verlauf, die Entlastungskurven sind jeweils gradlinig und bilden mit der Belastungskurve eine Hysteresis, die mit steigendem w/z-Wert kleiner wird. /FLA73/ stellt einen exponentiellen Zusammenhang der Form

$$\tau_0 = a_1 \cdot e^{\left(-b_1 \cdot \frac{w}{z}\right)} \quad (22)$$

$$\eta_f = a_2 \cdot e^{\left(-b_1 \cdot \frac{w}{z}\right)} \quad (23)$$

zwischen den Scherspannungen und den Kehrwerten der Fließkurvenneigungen am Belastungsast als Funktion der w/z-Werte fest.

/BER79a, BER79b/ bestätigte die oberen Ansätze der exponentiellen Abhängigkeit der rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität von der Feststoffkonzentration. Er fand Zusammenhänge, die den Einfluss der spezifischen Oberfläche durch einen Potenzansatz hinzunehmen:

$$\tau_0 = P_1 \cdot e^{P_2 \cdot C_v} \cdot S_{VB}^{P_3} \quad (24)$$

$$\eta_{pl} = P_1 \cdot e^{P_2 \cdot C_v} \cdot S_{VB}^{P_3} \quad (25)$$

mit:

τ_0 : Fließgrenze in N/mm²

η_{pl} : Plastische Viskosität in Ns/mm²

C_v : Feststoffkonzentration des Zementleimes ($\frac{V_z}{V_z + V_w}$)

S_{VB} : spezifische Oberfläche nach Blaine in g/cm²

P1-P3: Gleichungsparameter (P1 und P2 für den Strukturbruch, P3 für die zeitabhängige Spannungszunahme; Parameter sind für die verschiedenen Kenngrößen τ_0 und η_{pl} unterschiedlich)

Auch /KEC99/ untersuchte den Einfluss des w/z-Wertes auf die Fließkurven. In Bild 17 sind die Fließkurven von Zementleimen mit unterschiedlichen w/z-Werten dargestellt.

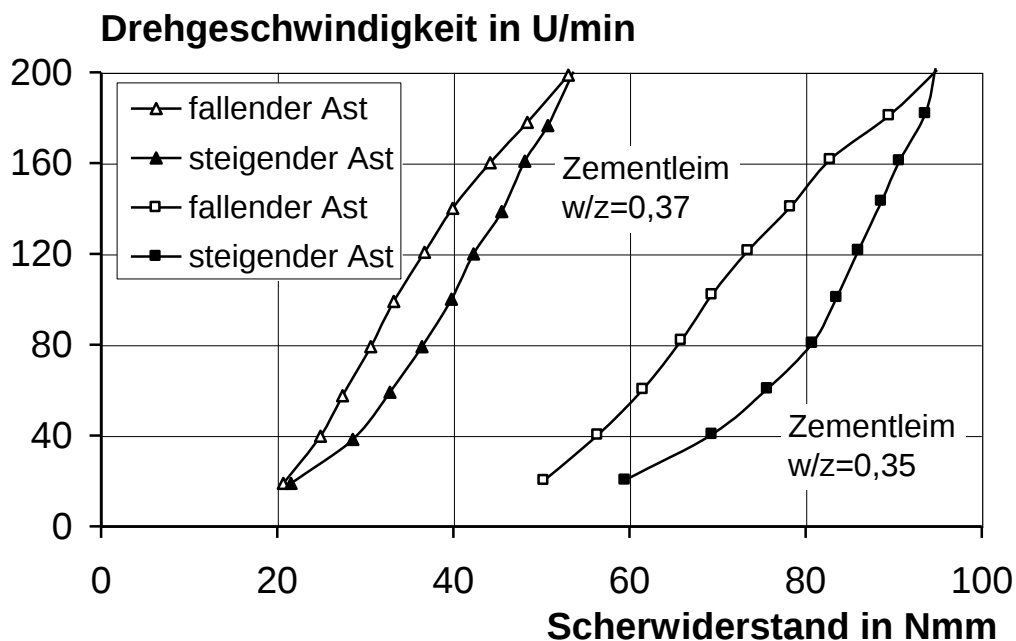


Bild 17: Vergleich der Fließkurven infolge unterschiedlicher w/z-Werte /KEC99/

Die Belastungsäste zeigen beide strukturviskoses Verhalten, während die Entlastungsäste im unteren Bereich ebenfalls Strukturviskosität, im oberen aber Dilatanz zeigen. Grundsätzlich sind die Scherwiderstände bei höheren Wassergehalten niedriger. Gleichzeitig nimmt die Hysterese ab. Auch der Verlauf der Fließkurve ist steiler. Hier zeigt sich die Auswirkung des w/z-Wertes auf den Partikelabstand. Der Scherwiderstand wird

geringer, da weniger Kontaktpunkte bestehen, die Bindungen werden jedoch schneller zerstört, da die Struktur instabiler ist.

/FRE02/ untersuchte den Einfluss von Steinkohlenflugasche auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und Mörtel mit dem Viskomat NT und diskutiert die durch dieses Prüfverfahren erhaltenen Größen, die relative Fließgrenze g und die relative Viskosität h (vgl. auch Kapitel 5.2.3.4). Man spricht in diesem Zusammenhang von relativen Größen g und h , da mit dem Viskomat NT aufgrund des Messprinzips keine absoluten Größen für Fließgrenze und Viskosität ermittelbar sind. Er stellte erwartungsgemäß fest, dass mit zunehmendem Wassergehalt beide Größen abnehmen. Eine Änderung des Wassergehalts wirkt sich bei steiferen Konsistenzen stärker aus als bei weicheren. Sowohl die Fließgrenze als auch die Viskosität von Zementleimen folgen mit zunehmendem Wassergehalt einem exponentiellen Verlauf, der sich asymptotisch gegen Null (relative Fließgrenze) bzw. gegen die Viskosität von Wasser (relative Viskosität) annähert.

Die Ursache für den erwarteten Abfall der Viskositäten und Fließgrenzen bei steigendem w/z -Wert erklärt /FRE02/ damit, dass je nach w/z -Wert der Mischung und Zementart der Zustand der vollständigen Dispergierung bei weichen Konsistenzen sehr schnell bei schon geringer Scherbeanspruchung erreicht wird. Oder er stellt sich im umgekehrten Falle bei steifen Leimen unter Umständen gar nicht ein, wenn die Beanspruchung zu gering ist.

2.4.4 Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften von Mörtel und Beton

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen an Mörtel und Betonen zum Einfluss der Feststoffkonzentration auf die rheologischen Eigenschaften wurden fast ausnahmslos mit sogenannten Ein-Punkt-Verfahren durchgeführt. Entsprechend den unter 2.3.2.4 aufgeführten Definitionen der Fest- und Flüssigphase wird hier ein Überblick über die Modelle gegeben.

Bei /FER98/ besteht die Feststoffphase aus allen Feststoffpartikeln, d. h. Zement, Betonzusatzstoff und Gesteinskörnung. Die flüssige Phase bildet das Wasser. /FER98/ hält es nicht für zulässig, eine Trennung zwischen Leim und Gesteinskörnung vorzunehmen, da die Größe der größten Zementpartikel den feinsten Sandkörnern entspricht und ihr Beitrag zum Fließverhalten nicht verschieden ist, solange die Hydratation vernachlässigt wird. Das Modell baut auf einem Modell von /CHA94/ auf, das die plastische Viskosität in Abhängigkeit von der relativen Konzentration der Feststoffpartikel betrachtet.

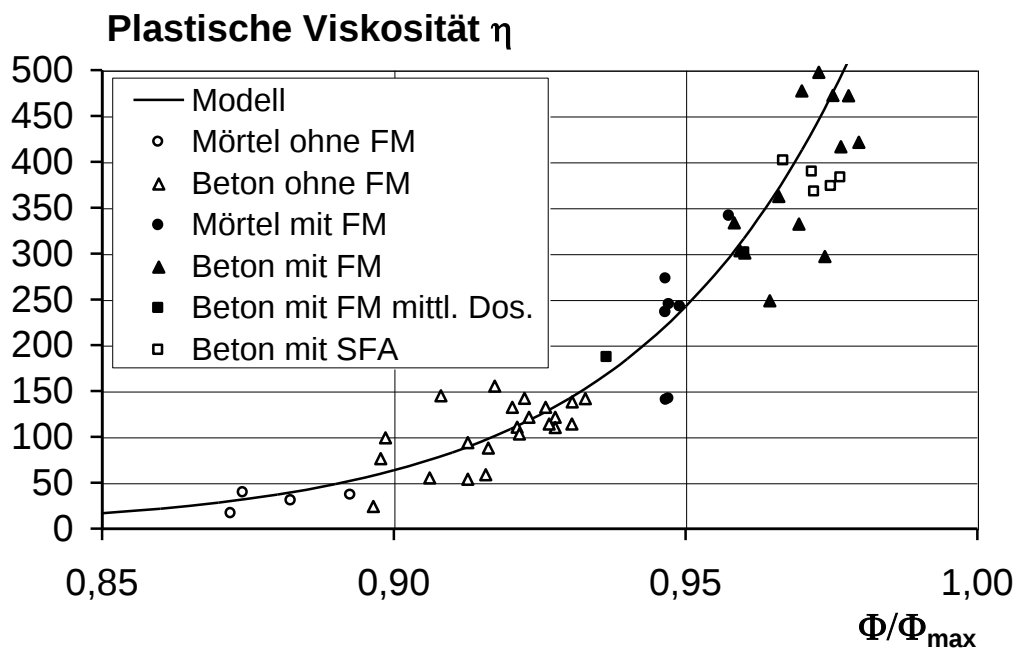


Bild 18: Plastische Viskosität von Mörteln und Betonen als Funktion ihrer Feststoffkonzentration /FER98/

Wird die relative Viskosität über die relative Feststoffkonzentration aufgetragen (vgl. Bild 18), erhält man einen exponentiellen Verlauf und findet zur Abschätzung der plastischen Viskosität von Beton folgende halbempirische Gleichung:

$$\eta_{pl} = \exp \left(26,75 \left(\frac{\phi}{\phi_{max}} - 0,7448 \right) \right) \quad (26)$$

Dieser Verlauf war für alle Versuche gleich, unabhängig davon, ob es sich um Mörtel- oder Betonversuche handelte, Fließmittel oder Zusatzstoffe hinzugefügt wurden oder nicht.

Wird die Fließgrenze genauso wie die plastische Viskosität über die Feststoffkonzentration aufgetragen, ergibt sich kein solcher Zusammenhang. Hier wurde es erforderlich, die Kornabstufung zu berücksichtigen. Bei der Verwendung von Fließmittel sind größere Feststoffkonzentrationen möglich, weil der Wasseranspruch der Feststoffphase sinkt. Es ergibt sich eine geringere Fließgrenze /FER98/.

/KRE87/ charakterisiert den Leim als flüssige Phase und die gesamte Gesteinskörnung als Feststoffphase (vgl. Bild 19). Dem Leim wird eine füllende, eine schmierende und eine klebende Wirkung zugeschrieben.

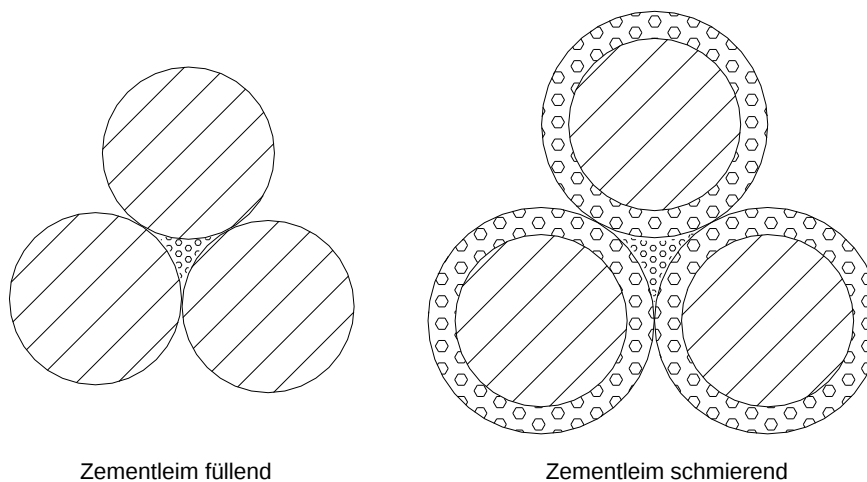


Bild 19: Prinzipielle Darstellung der Leimschichtdicke um die Gesteinskörnung nach /KRE87/

Erst nach dem Füllen der Hohlräume setzt die schmierende Wirkung des Leimes ein, da sich dann eine Leimschicht zwischen den Partikeln ausbildet. Neben der Schmierwirkung werden die Partikel aufgrund der Oberflächenkräfte des Wasser-Feststoff-Gemisches zusammengehalten. Die beschriebene schmierende Wirkung des Leimes hängt neben den rheologischen Eigenschaften des Leimes unmittelbar von der Dicke der Leimschicht zwischen der Gesteinskörnung ab. Zur Berechnung der Leimschichtdicke wird die nach der Hohlraumfüllung verbliebene Leimmenge rechnerisch gleichmäßig auf die Gesteinskörnungsoberfläche verteilt.

/BUI02/ berechnet den mittleren Partikelabstand (vgl. Bild 20) mit folgender Formel:

$$D_{SS} = D_{av} \left\{ \sqrt[3]{1 + \frac{V_P - V_{oid}}{V_C - V_P}} - 1 \right\} \quad (27)$$

mit:

- D_{SS} : Durchschnittlicher Partikelabstand bei Annahme einer Kugelgestalt
- V_P : Leimvolumen
- V_{oid} : Hohlraumgehalt in verdichteter Gesteinskörnung
- V_C : Volumen des Betons
- D_{av} : Durchschnittspartikelgröße

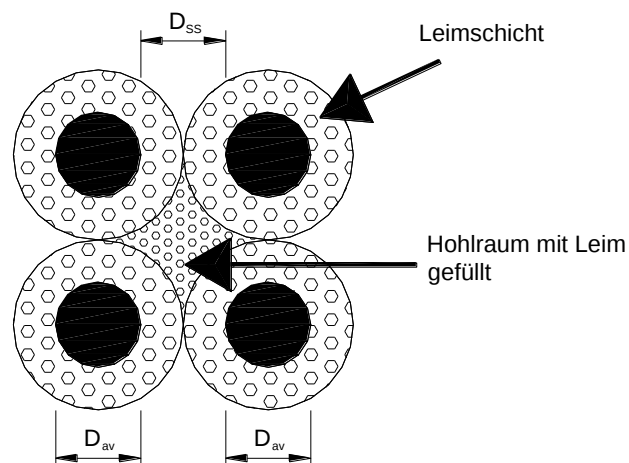


Bild 20: Gesteinskörnung als Kugel idealisiert mit dem Abstand D_{ss} und der Durchschnittspartikelgröße D_{av} nach /BUI02/

Die Durchschnittspartikelgröße D_{av} ergibt sich aus:

$$D_{av} = \frac{\sum d_i m_i}{\sum m_i} \quad (28)$$

mit

d_i : Durchschnittliche Größe der Kornfraktion i

m_i : Massendurchgang der Kornfraktion i

Dieses Partikelmodell hat den Nachteil, dass die Gesteinskörnung als Kugel idealisiert wird und so keine Effekte aus der Kornform einfließen. /BUI02/ stellt einen Zusammenhang zwischen dem Partikelabstand und der relativen Viskosität her, doch wird dieser hier nicht aufgeführt, da er die relative Viskosität mit dem Bingham-Modell berechnet. Daraus resultieren negative Fließgrenzen, die physikalisch nicht möglich sind.

/OH99/ geht von einer variablen Leimschichtdicke auf der Gesteinskörnung aus (vgl. Bild 21).

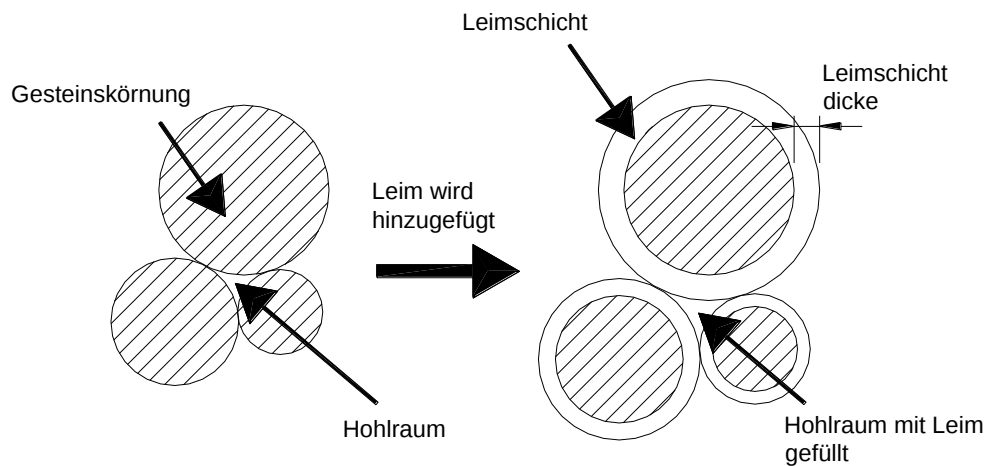


Bild 21: Variable Leimschichtdicke auf der Gesteinskörnung nach /OH99/

Bild 22 zeigt einen Beton mit einer abgestuften Partikelverteilung, um die Reibung gering zu halten (Bild 22 links). Die Gesteinskörnung ist mit dem Zementleim überzogen. Würde man die Gesteinskörnung verdichten und das überschüssige Leimvolumen herauspressen, entstünden zwei Schichten (Bild 22 Mitte). Die obere Schicht wird durch den reinen Zementleim gebildet, die untere Schicht besteht aus der verdichteten Gesteinskörnung mit gerade ausreichend Leim zur Füllung der Hohlräume.

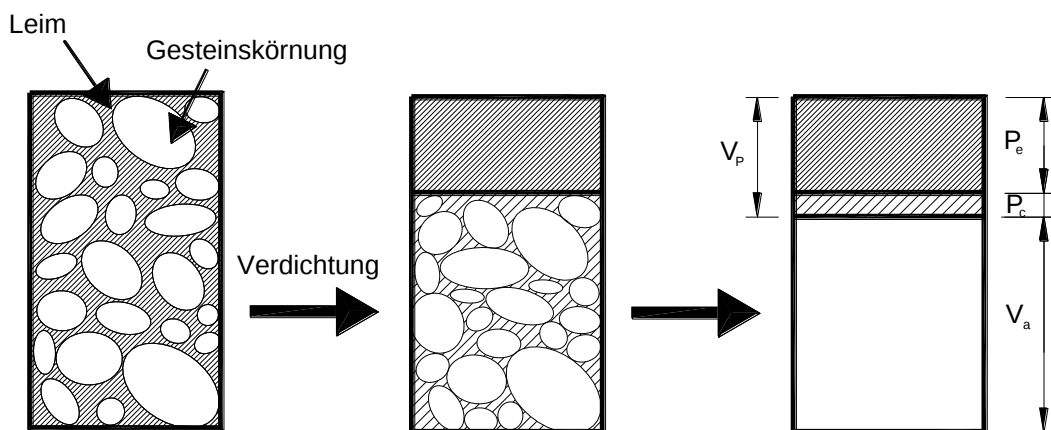


Bild 22: Darstellung des Überschussleims P_e nach /OH99/ (V_p : Gesamtleimvolumen; V_a : Gesteinskörnungsvolumen; P_c : Kompaktleim)

Gemäß /OH99/ ergibt sich für die relative Dicke des Überschussleims Γ :

$$\Gamma = \frac{P_e}{\sum_i^n \eta_i \cdot s_i \cdot D_{Pi}} \quad (29)$$

mit:

- P_e : Überschussleim, der Leimschicht um Gesteinskörnung ausbildet. Ermittelt durch Subtraktion des Kompaktleims P_c vom Gesamtleim (Bild 22 rechts)
- η_i : Anzahl der Partikel
- s_i : Oberfläche der Partikel der Größe x
- D_{Pi} : Fiktiver Korndurchmesser des Partikels

Werden die Ergebnisse für die relative Fließgrenze η_{rel} und für die relative Viskosität τ_{rel} aus den Versuchen über die relative Dicke des Überschussleims Γ in ein Diagramm eingetragen, erhält man folgende halbempirische Gleichungen:

$$\eta_{rel} = 0,0705 \cdot \Gamma^{-1,69} + 1; \quad \tau_{0rel} = 0,0525 \cdot \Gamma^{-2,22} + 1 \quad (30)$$

Es ergibt sich sowohl für die Fließgrenze als auch die Viskosität ein exponentieller Zusammenhang (vgl. Gl. (30) und Bild 23).

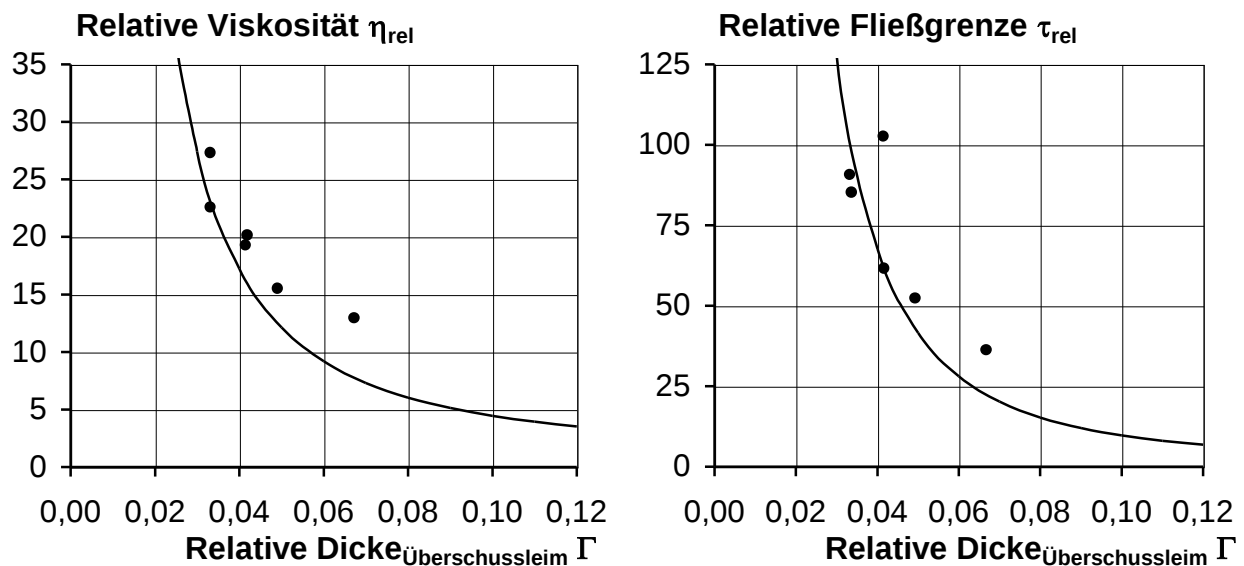


Bild 23: Relative Viskosität η_{rel} und relative Fließgrenze τ_{rel} in Abhängigkeit von der relativen Dicke des Überschussleims Γ /OH99/

Im Gegensatz zu den vorigen Modellen charakterisiert /NIE02/ den Beton durch die flüssige Bingham-Phase S (Mörtel) und die Feststoffphase P (grobe Gesteinskörnung).

Die Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität η_{pl} des Betons werden auf die Fließgrenze τ_S und die plastische Viskosität η_S des Mörtels zurückgeführt /NIE02/:

$$\tau_0 = \tau_S(1 + \gamma_\infty c); \quad \eta_{pl} = \eta_S \frac{1 + \gamma_\infty c}{1 - c} \quad (31)$$

mit:

c : Volumenkonzentration der Partikel in der Suspension

γ_∞ : Geometriefunktion zur Beschreibung der flüssigen und festen Phase

Im Gegensatz zu /LAR99/ hat dies den Vorteil, dass die beiden Kenngrößen unabhängig von der Fließmitteldosierung modelliert werden können (vgl. Gl. (31)).

	Suspension		Partikelpackung	
	verdünnt	konzentriert	flüssigkeitsgesättigt	ungesättigt
Suspensions- und Partikelströmung				
Fließfunktion				
Würfelzellenpackungsmodell				
Partikelabstand	$\frac{a}{d} > 1$	$0 < \frac{a}{d} < 0,2$	$\frac{a}{d} = 0$ Kontakt	$-0,01 < \frac{a}{d} < 0$ Kontakt-abplattung
Partikelvolumenanteil	$\varphi_i < 0,066$	$0,3 < \varphi_i < \frac{\pi}{6}$	$\varepsilon_{s,0} = \frac{\pi}{6}$ Porensättigungsgrad $S = 1$	$\varepsilon_s > \frac{\pi}{6}$ $S < 1$
Partikelreibung	$\varphi_i = 0$	$\varphi_i = 0$	$\varphi_i \geq 0$	$\varphi_i > 30^\circ$

Bild 24: Das Fließen einer Partikeldispersion sowie einer nassen oder feuchten Partikelpackung /TOM01/

In Bild 24 ist eine Übersicht von Suspensionen und Partikelpackungen sowie deren Fließfunktionen dargestellt. Darüber hinaus sind Formeln zum Partikelabstand und -volumenanteil sowie zur Partikelreibung angegeben. Hier wurde eine Abgrenzung zwischen der

Partikelkonzentration von Suspensionen und Partikelpackungen und dem daraus resultierenden Würfelpackungsmodell vorgenommen /TOM01/.

Mit dem Fließverhalten von Suspensionen mit Newtonschen und nicht-Newtonschen Matrixfluiden sowie kompakten Füllstoffen haben sich in der Vergangenheit bereits viele Wissenschaftler beschäftigt. Gute Übersichten zum jeweils aktuellen Forschungsstand der Suspensionsrheologie liefern die Arbeiten von Goodwin J. W. 1975, Metzner A. B. 1985 sowie Mewis J. und Spaul A. J. B. 1976 /HOC97/.

/HUS10/ beschäftigte sich mit den Fließeigenschaften von Mehlkorntyp-SVB unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Dabei wurde ebenfalls der Einfluss der Leimschichtdicke in Abhängigkeit von der Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung und der Sphärizität des Korngemisches betrachtet. Die erforderliche Leimmenge zur Herstellung eines SVB wurde theoretisch hergeleitet und als Anhaltswert für die Mischungskonzeption angegeben.

2.5 Einfluss der Granulometrie auf die rheologischen Eigenschaften von zementgebundenen Baustoffen

2.5.1 Allgemeines

Die Granulometrie beschäftigt sich mit der Korngrößenverteilung und der Kornform für Stoffe bzw. Stoffgemische. Beide haben einen entscheidenden Einfluss auf die Verarbeitbarkeit von zementgebundenen Baustoffen und beeinflussen direkt den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Zusammenhang zwischen Partikelabstand und rheologischen Eigenschaften. Bei einer dichten Packung von sphärischen Partikeln ist mit einem optimierten rheologischen Verhalten zu rechnen, weil das Wasser aus den Zwickeln rheologisch zur Vergrößerung des Partikelabstandes zur Verfügung steht und somit die Reibung herabsetzt.

Die Bestimmung der Menge an Teilchen einer bestimmten Korngruppe erfolgt nach der Anzahl, dem Volumen oder der Masse der Teilchen. Für die granulometrische Optimierung ist die Kenntnis der Volumenverteilung von Bedeutung, da die verwendeten Stoffe nicht gravimetrisch, sondern volumetrisch ausgetauscht werden.

2.5.2 Kornform

Körner lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Man unterscheidet u. a. natürliche und gebrochene Körner, runde und eckige, kugelförmige, kubische, gedrungene, längliche und plattige Körner, Körner mit glatter oder mit rauer Oberfläche /WES93/.

Die Kornform beeinflusst die Frischmörteleigenschaften entscheidend. Runde Körner verbessern die Fließeigenschaft des Mörtels, gebrochene Körner verschlechtern sie. Dieser Sachverhalt lässt sich auf den sogenannten Kugellagereffekt zurückführen, d. h. runde Körner rollen aufeinander ab, während zwischen gebrochenen Körnern, aufgrund der Ecken und Kanten des Kornes und seiner rauen Oberfläche, größere Reibung vorliegt, wodurch sich die Fließeigenschaft des Mörtels verschlechtert. Es ist zweckmäßig, zwischen Gestalt, Rundheit und Rauigkeit zu unterscheiden, wobei die Grenzen zwischen den drei Komponenten fließend sind.

2.5.3 Granulometrische Kennwerte

2.5.3.1 Allgemeines

Die in dem vorangegangenen Kapitel erläuterten granulometrischen Größen Kornform und Korngrößenverteilung beeinflussen den Wasseranspruch, also die zur Erzielung einer bestimmten Konsistenz des Frischbetons erforderliche Wassermenge, bzw. Partikelabstand.

Der Wasseranspruch ist ein charakteristischer Wert für die Korngrößenverteilung und die Kornform eines Stoffes bzw. eines Gemisches. Dabei haben „günstige, ideale Sieblinien“ einen niedrigeren Wasseranspruch als ungünstige. Sie weisen daher bessere Verarbeitbarkeitseigenschaften auf. Modellvorstellungen von Idealsieblinien werden in Kapitel 2.5.3.2 dargestellt.

Die in der Betontechnologie etablierten Verfahren zur Bestimmung des Wasseranspruchs sind:

- β_P -Wert nach Okamura,
- Wasseranspruch nach Puntke und
- Prüfung der Normsteife.

Der Partikelabstand steht in engem Zusammenhang mit der Verarbeitbarkeit von SVB. Bei kleinem Partikelabstand ist die Schubspannung zwischen den Körnern groß, der SVB

schlecht verarbeitbar. Bei fließfähigem SVB ist die Schubspannung gering, dieses lässt auf einen höheren Partikelabstand schließen (vgl. Bild 25). Der Partikelabstand steht auch in direktem Zusammenhang zur optimalen Packungsdichte, denn bei einer optimalen Packung sind alle Zwickelräume mit Feststoffen gefüllt. Das dadurch frei werdende Wasser steht dann rheologisch zur Verbesserung der Fließfähigkeit zur Verfügung. Das freie Wasser lagert sich um die Partikel herum an und vergrößert so den Partikelabstand.

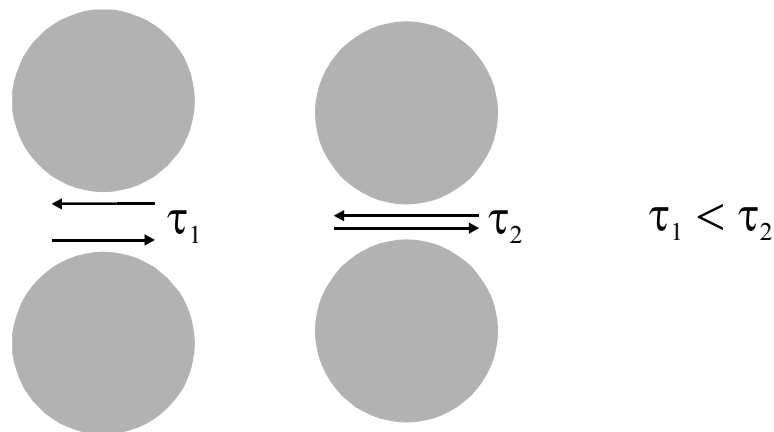


Bild 25: Schubspannung τ zwischen zwei Körnern, abhängig vom Partikelabstand

Bis heute gibt es kein Prüfverfahren, mit dem Partikelabstände für Betone bzw. Mörtel gemessen oder berechnet werden können. Jedoch deutet ein niedriger Wasseranspruch bei gleichem Wassergehalt auf einen großen Partikelabstand hin und umgekehrt.

2.5.3.2 Idealsieblinien

Unter Idealsieblinien versteht man Sieblinien von Stoffen mit Körnern unterschiedlicher Durchmesser, die hohlraumfrei zusammengesetzt sind. Kugeln eines gleichen Durchmessers, die eng beieinander liegen, schließen eine Lücke (Zwickel) ein. In diese Lücke passt eine Kugel mit kleinerem Durchmesser, in die dadurch entstehenden Zwickel passen wiederum noch kleinere Kugeln (vgl. Bild 26). Wenn alle Zwickelräume mit Körnern gefüllt sind, spricht man von der „dichtesten Packung“.

In der Betontechnologie werden optimale Sieblinien von Betonen angestrebt, da dadurch die Zementleimmenge reduziert und somit die Herstellungskosten gesenkt werden können. Jedoch hat die dichte Packung auch einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften. Bei dichtesten Packungen sind alle Zwickel mit Feststoffen gefüllt. Das dadurch aus den Zwickelräumen verdrängte Wasser steht rheologisch zur Verbesserung der

Fließeigenschaften zur Verfügung, indem es sich um die Feststoffe anlagert und auf diese Weise den Partikelabstand vergrößert.

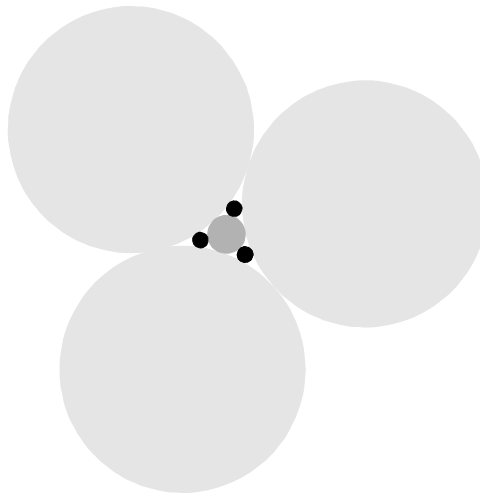


Bild 26: Ideale dichteste Packung von Kugeln im zweidimensionalen Raum

Die Modelle, die sich mit der dichtesten Packung beschäftigen, wurden entweder empirisch, d. h. aus Versuchsreihen, ermittelt oder aus theoretischen Überlegungen berechnet. Die bekanntesten Modelle wurden entwickelt von:

- Fuller (Fuller-Parabel)
- Fuller & Thompson
- Andreasen & Andersen
- Furnas
- Funk & Dinger

Die für SVB bzw. selbstverdichteden Mörtel anwendbaren Modelle werden nachfolgend beschrieben

- Fuller-Parabel

Die einfachste und bekannteste Idealsieblinie ist die Fuller-Parabel. Fuller stellte bei vergleichenden Auswertungen von Betonversuchen fest, dass die Kornverteilung einer Gesteinskörnung dann die besten Ergebnisse bringt, wenn die Sieblinie im linearen Maßstab der Form einer Parabel folgt (vgl. Bild 27). Diese Sieblinie lässt sich mathematisch in Abhängigkeit vom Größtkorn beschreiben /FUL07, HUM59, PUN90, WES93/:

$$A = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,5} \quad (32)$$

mit:

- A prozentualer Durchgang durch das Sieb mit der Siebweite d
- d beliebiger Korndurchmesser zwischen 0 und D
- D Größtkorndurchmesser des Korngemenges

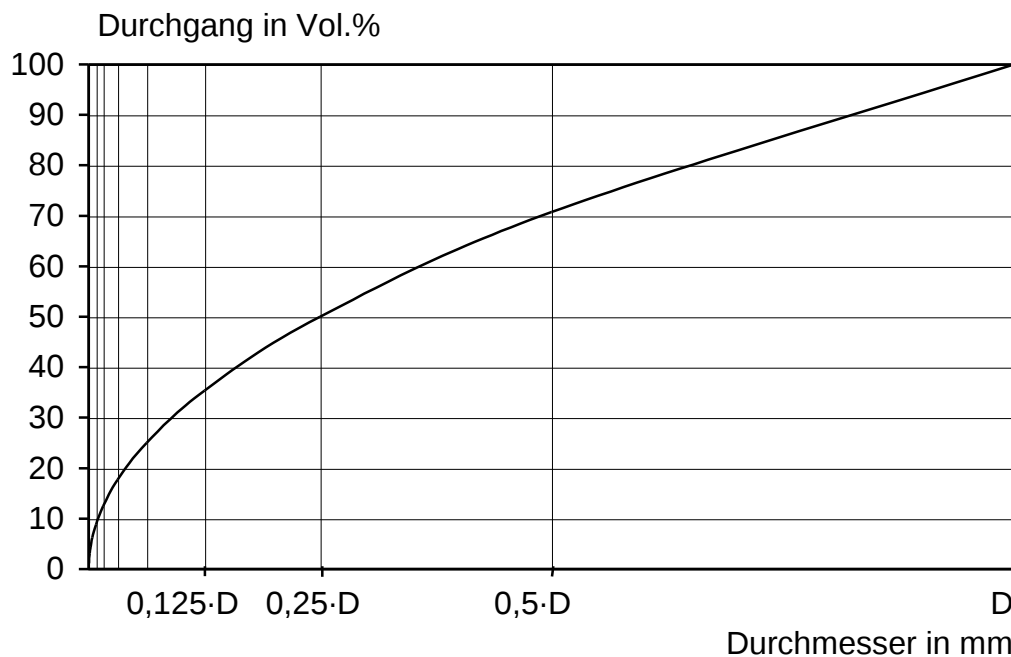
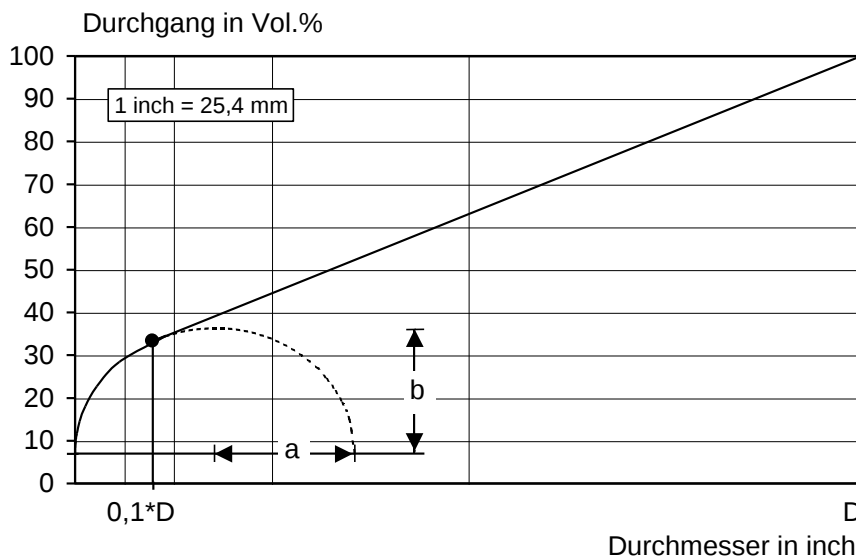


Bild 27: Fuller-Parabel in Abhängigkeit vom Größtkorn D (linearer Maßstab)

Diese nach Fuller benannte Parabel gilt nur für Gesteinskörnungen, jedoch nicht für Zement oder Gemische aus Zement und Gesteinskörnung /FUL07, PUN90, HUM59/. Als Idealsieblinie für Mörtel oder Betone ist sie somit nicht geeignet. In weiteren Untersuchungen entwickelte Fuller Sieblinien für Gemische aus Gesteinskörnungen und Zement.

- Fuller & Thompson

Die Idealsieblinie nach Fuller & Thompson folgt einer Kombination aus Ellipse im Feinkornbereich und einer tangential anschließenden Geraden bis zum Größtkorn, linearer Maßstab vorausgesetzt /FUL07, PUN90, HUM59/. Diese Sieblinie gilt für Gemische aus Zement und Gesteinskörnung. In Bild 28 ist eine Sieblinie, die sich aus Ellipse und Gerade zusammensetzt, abgebildet. Die Formeln zur Berechnung der Siebdurchgänge sind ebenfalls in Bild 28 dargestellt. Dabei ist der Korndurchmesser in Anlehnung an Fuller in „inch“ angegeben.



$$y_{\text{Ellipse}} = \frac{b}{a} \sqrt{2ax - x^2} + 7$$

mit $x = d - 0,0027$

$$a = 0,04 + 0,16 D$$

$$b = 26,4 + 1,3 D$$

$$y_{\text{Gerade}} = \frac{100 - y_1}{D - x_1} (x - x_1) + y_1$$

mit $y_1 = y_{\text{Ellipse}} \text{ bei } \frac{D}{10}$

$$x_1 = \frac{D}{10}$$

Bild 28: Ideale Sieblinie nach Fuller & Thompson für runde, natürliche Gesteinskörnung mit einem Größtkorn von $D = 2,55$ inch einschließlich Zement /FUL07, PUN90/

Nach Fuller können die Konstanten a und b in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien variieren. Eine Tabelle für drei verschiedene Gesteinskörnungen ist in /FUL07/ und in /HUM59/ angegeben.

Die in Bild 28 dargestellte Sieblinie hat sich in der Praxis nicht durchgesetzt /PUN90/. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich in dem hohen Rechenaufwand. Die Siebdurchgänge müssen für jeden Durchmesser mit den in Bild 28 angegebenen Formeln berechnet werden.

Fuller erkannte, dass die Form der besten Korngrößenverteilung eines Korngemenges unabhängig vom Größtkorn ist und sich daher mit einer einzigen Gleichung beschreiben lässt. Diese Gleichung enthält den Größtkorndurchmesser als einzige Variable. Eine Formulierung dieser Gleichung wird jedoch in /FUL07/ nicht angegeben. Die Korngrößendurchmesser d werden in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser D beschrieben. Dabei ist die Abszisse so geteilt, dass ausgehend vom Größtkorn der nächst kleinere Durchmesser jeweils halb so groß ist wie der nächst größere. Dieses entspricht den in der Betontechnologie genormten Kornabstufungen mit den entsprechenden Maschen- bzw. Quadratlochweiten /PUN90/.

Mit den Formeln aus Bild 28 lassen sich, abhängig von Ellipse und Gerade, die Durchgänge berechnen, indem für x jeweils die Größen $1/2 \times D$, $1/4 \times D$, $1/8 \times D$ bis $1/512 \times D$ eingesetzt werden (vgl. Bild 29). Bei einer Siebweite von $1/833,3 \times D$ ergibt sich ein Siebdurchgang von 7 Vol.-%. Dies ist der kleinste Wert, der mit der Formel für die Ellipse

berechnet werden kann. Daraus ist erkennbar, dass für eine dichte Packung nach Fuller & Thompson mindestens 7 Vol.-% feine Körner aus Zement und/oder Sand benötigt werden /FUL07, PUN90/.

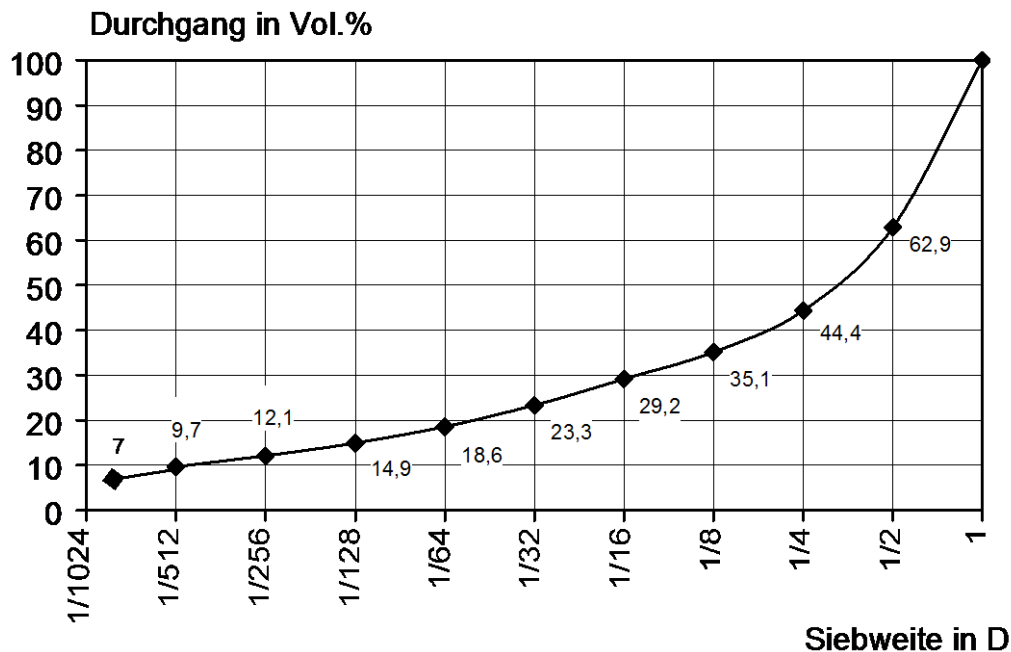


Bild 29: Ideale Sieblinie nach Fuller & Thompson für Gesteinskörnung einschließlich Zement für ein variables Größtkorn D im halblogarithmischen (lg 2) Maßstab /FUL07, PUN90/

- Andreasen & Andersen

Andreasen & Andersen entwickelten aus theoretischen Überlegungen heraus eine Formel zur Bestimmung von optimalen Sieblinien. Diese basiert auf dem Ähnlichkeitsprinzip und geht von einer kontinuierlichen Verteilung der Korngrößen aus. Diese optimalen Sieblinien lassen sich in Abhängigkeit vom Größtkorn und vom Exponenten n beschreiben /AND30/.

Für $n = 0,5$ erhält man als Sonderfall die Fuller-Parabel. Diese wird nach /AND30/ für eine in der Praxis brauchbare Lösung angesehen, sie stellt aber nicht die ideale Lösung dar. Andreasen stellte in Experimenten fest, dass der Exponent n für dichteste Packungen zwischen $1/3$ und $1/2$ liegt.

Nach /HUM59, WES93/ liegt das Optimum für runde, natürliche Körner bei $n \approx 0,4$ und für eckige, gebrochene Körner bei ungefähr 0,3. Diese Werte gelten nach /HUM59/ nur für die Gesteinskörnung allein, d. h. ohne Zement.

$$A = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (33)$$

mit:

- A prozentualer Durchgang durch das Sieb mit der Siebweite d
- d beliebiger Korndurchmesser zwischen 0 und D
- D Größtkorndurchmesser des Korngemenges
- n Exponent zur Berücksichtigung der Kornform

Die Formel nach Andreasen ist allgemeingültiger als die Fuller-Parabel, sie berücksichtigt aber nicht das Kleinstkorn, d. h. fraktionierte Korngemische mit einem definierten Kleinstkorndurchmesser werden nicht erfasst. Abhilfe schafft das Modell von Funk & Dinger.

- Furnas

Furnas entwickelte aus theoretischen Überlegungen heraus eine Formel zur Bestimmung von optimalen Sieblinien. Furnas geht dabei von einer diskreten Verteilung der Korngrößen aus. Die mathematische Beschreibung lautet /FUR31/:

$$A = 100 \cdot \frac{r^{\lg d} - r^{\lg D_s}}{r^{\lg D_L} - r^{\lg D_s}} \quad (34)$$

mit:

- A Durchgang durch das Sieb mit der Siebweite d
- d beliebiger Korndurchmesser zwischen 0 und D_L
- D_L Größtkorndurchmesser des Korngemenges
- D_s Kleinstkorndurchmesser des Korngemenges
- r Verhältnis der Anzahl von Partikeln, die auf aufeinanderfolgenden Sieben liegen

Diese Formel hat sich nicht durchgesetzt, da die Berechnung der einzelnen Siebdurchgänge aufwendig ist, das Ergebnis aber von den Ergebnissen nach Andreasen & Andersen bzw. nach Funk & Dinger kaum abweicht.

- Funk & Dinger

Funk & Dinger stellten fest, dass die Modelle nach Andreasen & Andersen bzw. Furnas ähnliche Ergebnisse liefern, obwohl sie von unterschiedlichen Voraussetzungen ausgehen. Andreasen & Andersen gehen von einer kontinuierlichen Korngrößenverteilung aus, berücksichtigen aber das Kleinstkorn nicht. Furnas dagegen berücksichtigt das Kleinstkorn, geht jedoch von einer diskreten Korngrößenverteilung aus (vgl. Gl. (34)).

Aus dieser Erkenntnis heraus leiteten Funk & Dinger eine Formel für optimale Sieblinien von Andreasen & Andersen ab. Diese wurde in Anlehnung an Furnas um einen Term, der das Kleinstkorn berücksichtigt, ergänzt /FUN94/:

$$A = 100 \cdot \frac{d^n - D_{\min}^n}{D^n - D_{\min}^n} \quad (35)$$

mit:

A	Durchgang durch das Sieb mit der Siebweite d
d	beliebiger Korndurchmesser zwischen 0 und D
D	Größtkorndurchmesser des Korngemenges
$D_{\min}$	Kleinstkorndurchmesser des Korngemenges
n	Verteilungsmodul

Für $D_{\min} = 0$ erhält man die Formel von Andreasen & Andersen, setzt man zusätzlich $n = 0,5$ ein, so erhält man die Fuller-Parabel (vgl. Gl (32)).

Der Exponent n, auch Verteilungsmodul genannt, ist der gleiche wie der Exponent nach Andreasen & Andersen. Dieser sollte nach Andreasen & Andersen zwischen $1/3$ und $1/2$ liegen. Nach Funk & Dinger liegt das aus Modellen berechnete Optimum bei $n = 0,37$. Dieser Wert konnte in Versuchen an Betonen bestätigt werden.

- Vergleich der Idealsieblinien

Die Fuller-Parabel gilt nur für Gesteinskörnungen. Für Gemische aus Gesteinskörnung, Zement und Betonzusatzstoffen sollte eine Sieblinie nach Fuller & Thompson, Andreasen & Andersen, Furnas oder Funk & Dinger verwendet werden. Für SVB bzw. dessen selbstverdichtende Mörtel (SVM) bietet sich die Verwendung der Idealsieblinie nach Funk & Dinger an, da diese das gesamte Kornband abbildet und die gleichen Ergebnisse liefert wie die Idealsieblinie nach Furnas und Andreasen & Andersen. Neben den diskutierten Idealsieblinien haben weitere Forscher versucht, ideale Sieblinien bzw. optimale Packungsdichten zu berechnen. Es ergaben sich dabei jedoch keine wesentlichen Verbesserungen bzw. signifikante neue Erkenntnisse /FUN94, PUN90/.

Die diskutierten Idealsieblinien wurden entweder empirisch, d. h. aus Versuchsreihen, ermittelt oder aus theoretischen Überlegungen abgeleitet. Dabei gehen die Autoren von der Vorstellung einer optimalen, dichtesten Packung aus. Bislang nicht untersucht wurde, ob eine der Idealsieblinien auch für ein optimales rheologisches Verhalten die ideale Sieblinie darstellt, oder ob eine hiervon abweichende ideale Sieblinie ermittelt werden kann. Im

Hinblick auf eine zielgerichtete Anwendung von SVB wäre darüber hinaus von Interesse, ob granulometrische Kenngrößen identifiziert werden können, die mit den rheologischen Eigenschaften der SVM bzw. SVB korrelieren.

2.5.4 Einfluss der Granulometrie auf die Rheologie von Zementleim, Mörtel und Beton

Eine systematische Untersuchung des Einflusses der Granulometrie auf die Rheologie von SVB wurde bislang nicht durchgeführt. Die bisherigen Arbeiten zu diesem Thema beschränken sich größtenteils auf die Untersuchung des Einflusses der Kornform bei Zementleimen, Mörteln und Betonen. Dabei wird zwischen natürlichen (runden, kugelförmigen) und gebrochenen bzw. gemahlenen Stoffen unterschieden /HUS10/.

Werden Anteile gebrochener Körner gegen kugelige Körner ausgetauscht, so verbessern sich die rheologischen Eigenschaften. Dieses wird auf den Kugellagereffekt zurückgeführt, d. h. kugelige Körner rollen leicht aneinander vorbei, während zwischen gebrochenen Körnern größere Reibung vorliegt. Je stärker die Kornform von der Kugel abweicht und je größer die Oberfläche der Körner ist, desto höher sind die innere Reibung und der Anstieg der rheologischen Parameter (Fließgrenze und Viskosität) /SYB88, SYB90, WAL95, ROS84, YAH99/.

Anzumerken ist, dass in den Arbeiten von /ROS84, WAL95/ die Stoffe nach Masseanteilen ausgetauscht wurden. Dieses führt beim Austausch von Stoffen mit unterschiedlicher Dichte zu Fehlern in der Stoffraumrechnung.

In /ROS84/ wurde das Mehlkorn von Mörteln volumetrisch ausgetauscht. Dabei wurde erwartungsgemäß festgestellt, dass Mehlkorn mit gerundeter Oberflächenstruktur eine bessere Verarbeitbarkeit zeigt als Mehlkorn aus gebrochenen Körnern. Als Maß zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit wurde das Ausbreitmaß verwendet. Je größer dieses ist, desto besser lässt sich der Mörtel verarbeiten.

Sybertz /SYB88, SYB90/ untersuchte, welchen Einfluss die Granulometrie von Flugasche hat. Dabei stellte er fest, dass Flugaschen aus Schmelzkammerfeuerung wegen ihrer runden Kornform bessere Verarbeitbarkeitseigenschaften zeigen als Flugaschen aus Trockenfeuerung. Bei diesen sind neben runden Körnern viele unregelmäßig geformte Körner vorhanden. Dadurch verschlechtert sich die Verarbeitbarkeit. Mit steigender Feinheit nimmt die verflüssigende Wirkung der Flugasche zu. Durch Sichten der Flugasche lässt sich ebenfalls ein verflüssigender Effekt erzielen. Weiterhin wurde festgestellt, dass der

stabilisierende Effekt der Flugasche umso größer ist, je mehr sich die Korngrößenverteilung der Flugasche von der des Zements unterscheidet.

Der Einfluss unterschiedlicher Sande auf die rheologischen Eigenschaften von selbstverdichtenden Mörteln (SVM) wurde von /BAG01/ untersucht. Dazu wurden fünf natürliche und fünf gebrochene Sande untersucht, die paarweise die gleichen Sieblinien, aber unterschiedliche Kornformen hatten. Es wurde festgestellt, dass bei gleicher Sieblinie trotz unterschiedlicher Kornform (natürlich oder gebrochen) die Fließkurven nahezu identisch sind. Weiterhin wurde festgestellt, dass mit feiner werdenden Sieblinien (bei gleicher Kornform) die rheologischen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität zunehmen. /BAG01/ stellte fest, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Körner keinen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften der SVM hatte. Die SVM zeigten dilatantes Verhalten, welches mit kleiner werdenden w/z -Werten zunahm. Untersucht wurden überwiegend sehr leimreiche Rezepturen, so dass der Effekt der Kornform dadurch nicht dominant war. Dieser Aspekt wurde dort jedoch nicht diskutiert.

Bei Untersuchungen von Zement-Flugasche-Gemischen stellte /LEE02/ fest, dass die Verarbeitbarkeit verbessert wird, je breiter die Korngrößenverteilung der Stoffe ist. Dabei haben die Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit der Körner kaum Einfluss. Mögliche Gründe für die Feststellungen diskutiert /LEE02/ nicht, diese Fragestellungen werden jedoch ebenfalls wie bei /BAG01/ mit der Verwendung von sehr leimreichen Rezepturen zu begründen sein.

2.6 Einfluss der rheologischen Eigenschaften auf die Füllungseigenschaften von SVB

Bei dem Einsatz von SVB ist von besonderer Bedeutung, inwieweit der SVB bei welchen rheologischen Eigenschaften in der Lage ist, eine Schalung lediglich unter Einwirkung des Eigengewichts vollständig und ohne Entmischung/Sedimentation zu füllen. Vor allem die bis heute vorhandene Unkenntnis der erforderlichen rheologischen Kennwerte von SVB und deren Einfluss auf strömungsmechanische Eigenschaften ist die Ursache für z. T. auftretende Probleme bei dessen Einsatz. Es existieren nur empirische Erkenntnisse, wie die in der Praxis indirekt durch Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit beschriebenen rheologischen Kenngrößen des SVB, die die Fließvorgänge bei der Befüllung eines Bauteiles beeinflussen und die selbstverdichtende Eigenschaft der eingesetzten Mischungen sicherstellen.

Mit dieser Fragestellung befassten sich verschiedene Autoren. In /OZA86/ sind Versuche beschrieben, bei denen mit Hilfe von Trichterauslaufzeiten und Setzfließmaßen rheologische Kenngrößen bestimmt wurden, um so Rückschlüsse auf die Selbstverdichtbarkeit zu ziehen. Auf Basis der Versuchsergebnisse wurde eine Klassifizierung von fließfähigen Betonen zum zielgerichteten Praxiseinsatz erstellt, die jedoch nicht in die praktische Anwendung übernommen wurden. Seitdem sind eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt worden, unter anderem auch im Rahmen eines Brite Euram Projektes. Dazu erfolgte eine Überprüfung der Eignung von SVB hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften phänomenologisch entweder mit reinen Laboruntersuchungen /MAT94, NAG96, KHA99, YAH99, BAR00, LI01/ oder im Rahmen von Modellbetonagen /HEN00/ und/oder Betonagen auf der Baustelle /NAN89, OKA96, INO01, BRA01a, BRA01b, BRA01c, CON02/. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass im Einzelfall eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Mischung möglich ist, jedoch eine allgemeingültige Regel, wann ein SVB mit bestimmten rheologischen Eigenschaften ein Bauteil mit beliebiger geometrischer Formgebung selbstverdichtend füllt, bislang nicht aufgestellt werden kann /KRÜ99, DAF01a, BRA02/.

Die Erkenntnisse der Literatur spiegeln sich auch in den Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften wider, die in den Regelwerken festgelegt sind. So werden z. B. in der niederländischen Richtlinie keine Anforderungen an die Konsistenz gestellt /CUR02/. In anderen Regelwerken werden die Anforderungen anwendungsbezogen oder mischungsbezogen definiert. So werden in der japanischen Richtlinie die SVB hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit in drei Klassen eingestuft, ohne konkrete Werte für erforderliche Frischbetoneigenschaften (Setzfließmaß, Trichterauslaufzeit, Blockierneigung, Sedimentation) zu nennen: SVB der Klasse 1 sind für engbewehrte Bauteile mit komplexer geometrischer Formgebung, SVB der Klasse 3 für geometrisch einfache Bauteile mit niedrigem Bewehrungsgehalt geeignet. SVB der Klasse 2 sind für alle anderen Bauteile einzusetzen. Die Eignung muss aber im Großversuch nachgewiesen werden /JSC99, NAW98/. In den Richtlinien der Österreichischen Bautechnik Vereinigung /ÖBV12/ sowie des US-amerikanischen Precast/Prestressed Concrete Institute /PCI03/ sowie der Richtlinie der EFNARC /EFN01/ bzw. der European Project Group /EPG05/, einer Arbeitsgruppe der europäischen Betonausgangsstoff- und Betonhersteller, sind grobe Anhaltswerte für die erforderliche Konsistenz, teilweise bauteilbezogen, angegeben. In der Vorgängerausgabe der DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ aus dem Jahr 2003 /DAF03/ zu der alten DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01a, DIN01b/ sowie in der schwedischen Richtlinie /SIL02/ sind die erforderlichen Frischbetoneigenschaften mischungsbezogen definiert, die im Rahmen einer (erweiterten) Erstprüfung nachgewiesen werden müssen. In der DIN EN 206-9 /DIN10/, die gemeinsam mit der aktuellen Fas-

sung der Deutschen SVB-Richtlinie /DAF12/ die Betonnormen /DIN05d, DIN08/ um Regelungen zum SVB ergänzt, sind Empfehlungen zu einer Klasseneinteilung für bestimmte Bauteile in Abhängigkeit von rheologischen Eigenschaften gegeben.

Alle genannten Regelwerke haben gemeinsam, dass sie hinsichtlich der erforderlichen Frischbetoneigenschaften keine verbindlichen Kennwerte für einen zielorientierten Einsatz von SVB geben. Die Beschreibung der erforderlichen Frischbetoneigenschaften misslang bisher, weil die genaue Kenntnis der Mechanismen der Fließ- und Entlüftungsvorgänge sowie die des Transports und der Sedimentation der groben Gesteinskörnung im Mörtel unbekannt sind. Die Erklärung dieser Vorgänge könnte über eine Modellierung erfolgen. In der Literatur finden sich Ansätze zu einer Modellierung der Frischbetoneigenschaften von SVB. Dabei kann man unterscheiden zwischen einer Modellierung von Teilsystemen, wie z. B. die Modellierung des Bindemittelleims, und der Modellierung des Gesamtsystems SVB (vgl. Kapitel 4).

2.7 Zusammenfassung Suspensionsrheologie von zementgebundenen Baustoffen

Bei Untersuchungen an Zementsuspensionen hat sich gezeigt, dass diese eine Flockenstruktur aufbauen. Zementpartikel sind bereits in trockenem Zustand agglomeriert. Diese Agglomerate werden bei Kontakt mit Wasser von diesem umschlossen und beginnen zu reagieren. Beim Mischen werden die Agglomerate je nach Mischintensität und Mischdauer aufgebrochen und nähern sich nach Abschluss des Mischvorgangs aufgrund der Brownschen Teilchenbewegung, der Gewichtskraft und der Van-der-Waalsschen Kräfte wieder an, bis sie einen Gleichgewichtszustand erreicht haben. Dabei entsteht eine Flockenstruktur, die je nach vorherigem Dispersionsgrad entweder fein oder grob ist. Diese Flockenstruktur ist für die rheologischen Eigenschaften von Zementleim verantwortlich. Infolge der Verdünnung durch die Gesteinskörnung ist das Verhalten von Mörtel und Beton einfacher und kann mit dem Bingham-Modell beschrieben werden. Die zur Beschreibung der Fließeigenschaften wichtigen Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität können mit einem Rheometer erfasst werden.

Entscheidender Einflussfaktor auf die Fließgrenze und die Viskosität ist der w/z-Wert. Durch den größeren Wassergehalt ist der Zusammenhalt der Agglomerate geringer, da mehr Wasser eingeschlossen ist und infolgedessen weniger Kontaktpunkte zwischen den Partikeln bestehen. Während der rheologischen Messung stellt sich ein geringerer Partikelabstand ein und der Widerstand gegenüber der Scherung wird entsprechend ge-

ringer. Somit fällt mit einer Erhöhung des Wassergehaltes der Scherwiderstand grundsätzlich ab.

Zur Erklärung dieses Fließverhaltens gibt es eine Reihe halbempirischer und analytischer Modelle, die auf der Feststoffkonzentration oder dem Partikelabstand basieren. Sie unterscheiden sich durch die Betrachtungsweise des Mehrphasengemisches Beton.

Die Fließgrenze τ_0 des Bingham-Modells wird durch den Festkörperreibungsanteil beschrieben und die Viskosität η durch die Flüssigreibung. Welche Phase des Betons der Flüssigphase und welche der Festkörperphase zugeschrieben wird, wird nicht einheitlich bewertet. Drei Betrachtungsweisen wurden erläutert. Charakterisierung der Flüssigphase und der Festkörperphase durch

- Wasser und Gesteinskörnung
- Leim und Gesteinskörnung ausschließlich des Mehlkorns
- Mörtel und grobe Gesteinskörnung.

Die Größen Fließgrenze τ_0 und Viskosität η lassen sich durch eine Funktion, die eine potentielle oder exponentielle Form hat, in Abhängigkeit des Wasser/Feststoffverhältnisses darstellen.

Die Korngrößenverteilung und Kornform von Stoffen bzw. Stoffgemischen (Granulometrie) haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit von zementgebundenen Baustoffen und somit insbesondere auch für selbstverdichtende Mörtel und Betone.

Abweichend vom Bingham-Körper zeigt SVB oftmals ein dilatantes, selten auch strukturviskoses Fließverhalten. Wann ein SVB in Abhängigkeit vom Wassergehalt welches Verhalten zeigt, ist noch nicht systematisch untersucht worden.

Außerdem ist bislang nicht bekannt, welche rheologische Eigenschaft des SVB für die Verfüllung eines Bauteiles erforderlich ist. Systematische Untersuchungen zu dieser Fragestellung sind bislang nicht durchgeführt worden. Zur Klärung dieser Fragestellung könnte eine numerische Strömungssimulation beitragen.

3 TRIBOLOGIE VON SELBSTVERDICHTENDEM BETON

3.1 Allgemeines

Reibung, Schmierung, Verschleiß und Grenzflächenwirkung zwischen Feststoffen und/oder Fluiden wird unter dem Begriff der Tribologie zusammengefasst, wobei oftmals die Verminderung von Verschleißerscheinungen im Vordergrund steht /CZI76, CZI77/. Für die Beschreibung von Fließvorgängen und deren numerische Simulation ist die Reibung zwischen SVB und Schalhaut von Interesse, da diese sowohl bei der Beschreibung/Bewertung von Fließvorgängen, aber auch als Eingangsgröße für die numerische Simulation von Bedeutung ist.

Die tribologischen Fragestellungen wurden bereits seit einigen Jahrhunderten von zahlreichen Forschern im Hinblick auf die unterschiedlichsten Aspekte untersucht. Das heute in zahlreichen Ingenieurwissenschaften noch angewendete Gesetz wurde von Charles Augustin Coulomb (1736-1806) erarbeitet:

$$R = \mu \cdot N \quad (36)$$

mit

R	Reibungskraft
μ	Reibungskoeffizient
N	Normalkraft

Coloumb stellte fest, dass die Reibungskraft proportional zur Normalkraft ist (vgl. Gl. (36)). Dabei ist der Reibungskoeffizient unabhängig von der Größe der Berührungsfläche und der Geschwindigkeit, jedoch abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit bzw. deren Rauigkeit /STE94, VOG40/.

3.2 Reibungsarten

Es sind zwei Grundarten der Reibung zu unterscheiden. Bei einer Ruhe- bzw. Haftreibung bewegen sich zwei berührende Körper nicht relativ zueinander, d. h. die auftretenden äußeren Kräfte bzw. Momente können die Haftreibung nicht überwinden. Wird diese überwunden, setzen sich die Körper in Bewegung. Nun wird die Reibung als Bewegungs- bzw. Gleitreibung bezeichnet. Der Haftreibungskoeffizient μ_h ist hierbei größer als der Gleitreibungskoeffizient μ_g .

Bewegungsreibung lässt sich nochmals in verschiedene Reibungsarten unterteilen. Bei einer rein geradlinigen, fortschreitenden Bewegung der Körper tritt Gleitreibung auf. Sobald Körper aufeinander abrollen und dabei nicht gleiten, spricht man von Rollreibung. Der Rollreibungskoeffizient μ_r ist in der Regel kleiner als der Gleitreibungskoeffizient μ_g . Eine Kombination von Roll- und Gleitreibung stellt die sogenannte Wälzreibung dar [STE94].

3.2.1.1 Reibungszustände

Reibungszustände beziehen sich auf die Bewegungsreibung. Hier sind vier Zustände zu nennen: Trockenreibung, Grenzreibung, Mischreibung und Flüssigkeitsreibung (Fluidreibung).

Bei Versuchen mit geschmierten Lagern beobachtete Richard Stribeck (1861-1950) bei Änderungen der Geschwindigkeit ein Minimum des Reibungskoeffizienten. Er stellte fest, dass der Reibungskoeffizient zusätzlich abhängig von der Viskosität des Schmiermittels und der einwirkenden Normalkraft ist. Diese Abhängigkeiten werden in der Stribeck-Kurve dargestellt (vgl. Bild 30).

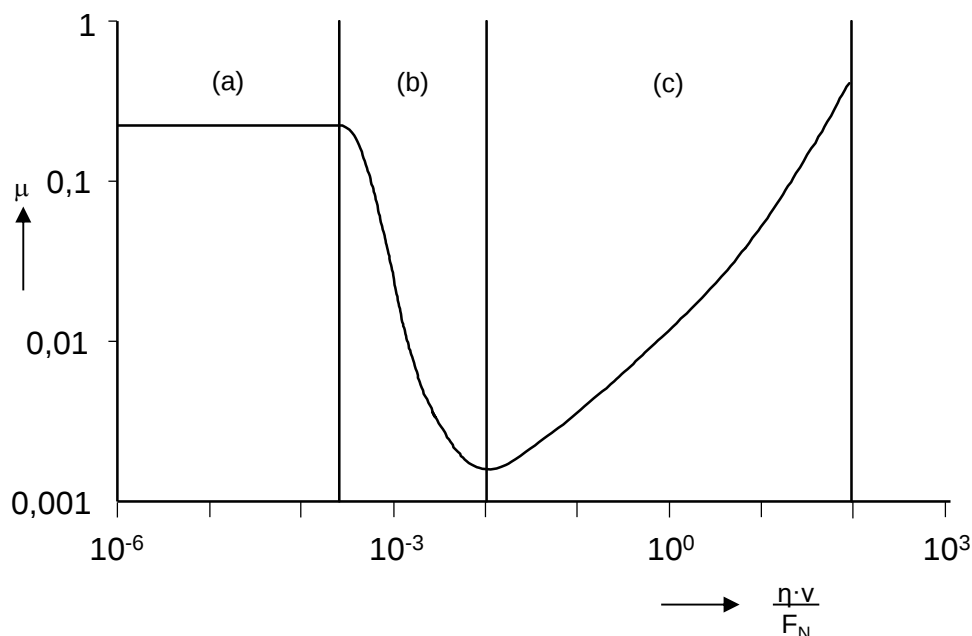


Bild 30: Stribeck-Kurve [GÖT70]

Der horizontale Verlauf (a) der Kurve folgt dem Coulomb'schen Gesetz der Trockenreibung $\mu = R/N$. Der weitere Verlauf der Kurve (b) bis zum Minimum der Reibung

entspricht einer Form der Grenz- bzw. Mischreibung. Der anschließend ansteigende Kurvenverlauf (c) kann mit den Gesetzmäßigkeiten der Flüssigkeitsreibung beschrieben werden.

$$\mu = f\left(\frac{\eta \cdot v}{F_N}\right) \quad (37)$$

mit

η	Viskosität
v	Geschwindigkeit
F_N	Normalkraft

Während es für die Bereiche der Trockenreibung und Flüssigkeitsreibung physikalische Gesetzmäßigkeiten gibt, sind im Bereich der Mischreibung keine bekannt /GÖT70, STE94/.

- Trockenreibung

Die Trockenreibung stellt eine reine, ungeschmierte und absolut trockene Reibung dar. Trockenreibung ist somit nur bei einem Vakuum zwischen den beiden Körpern möglich. Die Körper berühren einander infolge ihrer mikrogeometrischen Oberflächenstruktur (vgl. Bild 31). Die gesamte Flächenpressung wird über diese Berührungspunkte abgetragen. Bei Überschreiten der Druckfestigkeit des Materials gibt das weichere Material nach. Es kommt zum Verschleiß.

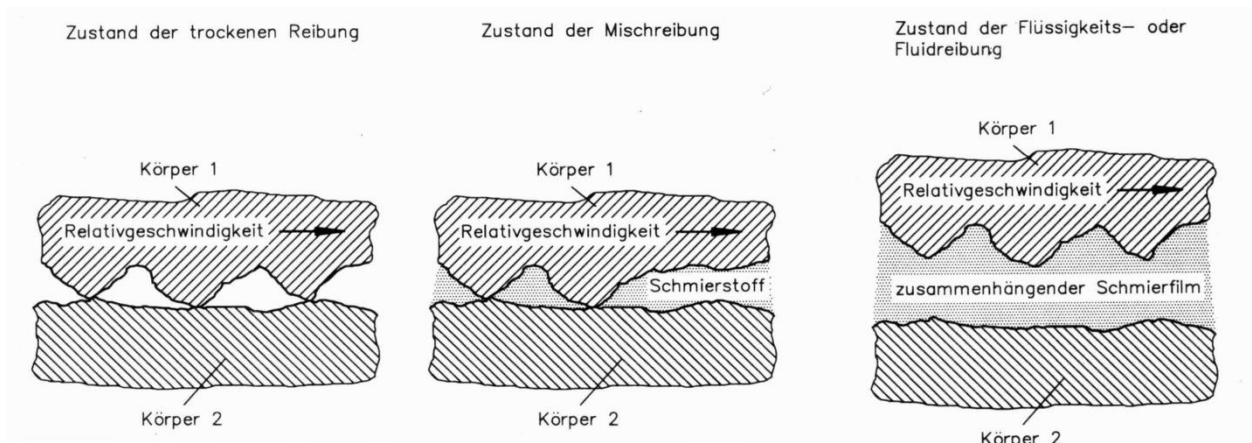


Bild 31: Reibungszustände /STE94/

- Grenzreibung

Grenzreibung liegt vor, wenn die Oberflächen nicht absolut trocken und sauber sind. Die Kleinstteile und Fluide, z. B. Luft oder Wasser- und Fettrückstände, leisten keinen nennenswerten Beitrag zur Kraftübertragung zwischen den beiden Oberflächen. Umgangssprachlich wird die Grenzreibung als Trockenreibung verstanden, die aber nur unter Laborbedingungen auftritt.

- Mischreibung

Der Übergang zwischen Grenzreibung und Fluidreibung wird als Mischreibung bezeichnet. Zwischen den beiden Körpern befindet sich zwar ein Schmierstoff, dieser bildet aber keinen zusammenhängenden Schmierfilm aus. Die Oberflächen berühren sich partiell und unterbrechen so den Schmierfilm (vgl. Bild 31). Die Normalkraft wird über diese Berührungspunkte und über den hydrodynamischen Staudruck des fluiden Schmierstoffs abgetragen.

- Flüssigkeitsreibung bzw. Fluidreibung

Ist der Schmierfilm zusammenhängend und nicht unterbrochen, handelt es sich um den Zustand der Fluidreibung (vgl. Bild 31). Um diesen Zustand zu erreichen, muss die kleinste Schmierfilmdicke mindestens den Betrag der Rautiefe R_z aufweisen. Dann wird der Verschleiß minimiert. Die komplette Normalkraft und Tangentialkraft wird über das Fluid übertragen. Somit reiben nicht die beiden Körper gegeneinander, sondern das Fluid wird geschert /STE94/.

3.2.1.2 Tribometer

Tribometer dienen der Charakterisierung des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Werkstoffen, mit dem z. B. die auftretende Reibungskraft zwischen zwei Medien gemessen werden kann. Je nach Aufgabenstellung werden die zu untersuchenden Materialpaarungen rotatorisch oder translatorisch belastet. Dabei können unterschiedliche Parameter variiert werden, wie z. B. Kraft, Relativgeschwindigkeit, Schmierung, Temperatur. Die unterschiedlichen Arten der zum Einsatz kommenden Tribometer werden je nach Verwendungszweck, Reibungsart und zu untersuchenden Werkstoffen/Medien entsprechend modifiziert.

Um ein Tribometer zur Messung der Reibung zwischen SVB und der Schalung zu entwickeln, muss berücksichtigt werden, dass es sich beim SVB um ein hochgefülltes disperses Fluid handelt (Wasseranteil i. d. R. ≤ 20 Vol.-%), welches an einer festen Struktur vorbei gleitet, rutscht oder wälzt. Zur Entwicklung eines solchen Tribometers werden bereits durchgeführte Versuche, die sich auch mit dieser oder einer ähnlichen Problemstellung befassen, herangezogen.

3.3 Fluid-Struktur-Interaktion

3.3.1 Allgemeines

Die Fluid-Struktur-Interaktion beschreibt die Wechselwirkungen zwischen einer Flüssigkeit (Fluid) und einem Festkörper (Struktur). Im Besonderen sind die verschiedenen Arten der Reibung zwischen diesen beiden Medien zu betrachten. Im Rahmen dieser Arbeit steht der SVB für das Fluid und die Schalung für die Struktur.

Die Fluid-Struktur-Interaktion kann näherungsweise mit Computerprogrammen, die auf der Basis der Finite-Volumen-Methode arbeiten, simuliert oder unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode gelöst werden /WAL99/. Bei den Fluiden handelt es sich dabei meist um Wasser, Luft oder Stoffe mit vergleichbaren rheologischen Eigenschaften. Diese können, genau wie die Struktur, gut charakterisiert werden. Die Charakterisierung der Interaktion des Fluids und der Struktur ist jedoch schwer möglich. Es gibt Ansätze, diese beiden Stoffe numerisch zu koppeln /WAL99/.

Da es sich beim SVB nicht um ein reines Fluid wie Wasser oder Luft, sondern um ein Fluid-Festkörper-Gemisch handelt, werden im Folgenden experimentelle Untersuchungen, die sich mit der Reibung zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten bzw. konsistenten Stoffen befassen, aufgeführt.

3.3.2 Untersuchungen zur Fluid-Struktur-Interaktion

3.3.2.1 Untersuchungen an verschiedenen Stoffen und Baustoffen

Janssen entwickelte ein Modell, um den Getreidedruck in Silos zu berechnen. Diese Silodrucktheorie entspricht im Wesentlichen den noch heute gültigen Regelungen in DIN 1055-6:2005-03 /DIN05b/. Sie wurde auch für so genannte Halbflüssigkeiten, wie beispielsweise Zement, trockenen Kies oder sonstige Schüttgüter verwendet, bis Noack /NOA23/ dieses Druckgesetz zur Auswertung von Versuchsergebnissen zum Schalungs-

druck erstmals auf Gussbeton übertrug. Die Herleitung der Silodruckgleichung erfolgte an einem differentiellen Scheibenelement in der Schalung (vgl. Bild 32).

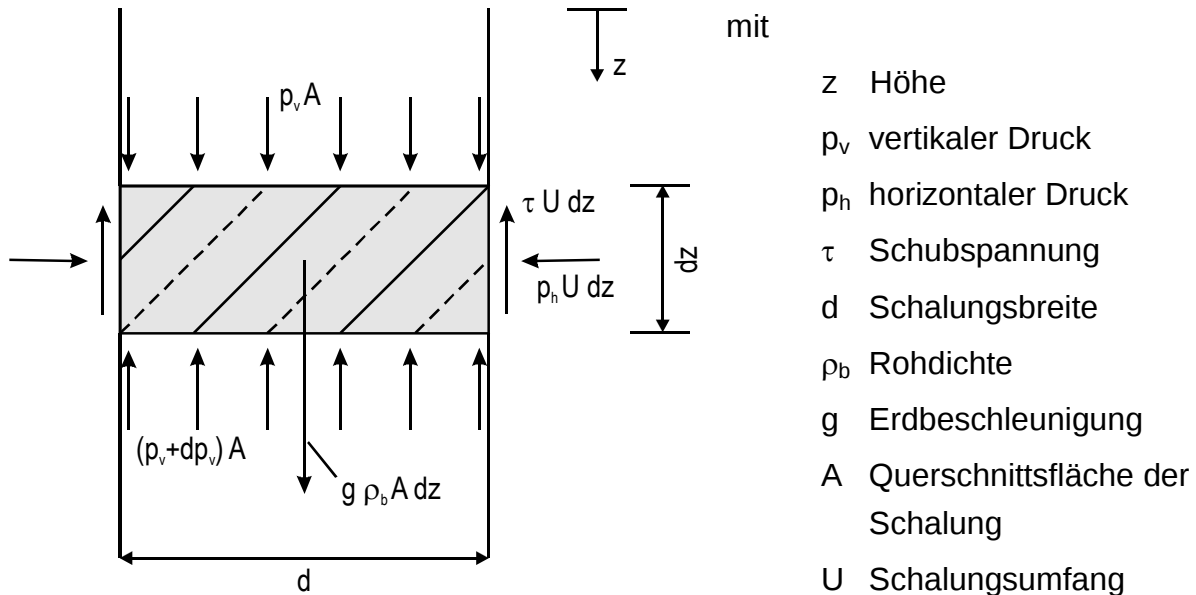


Bild 32: Spannungszustand im Scheibenelement nach /JAN95/

Die Aufstellung des vertikalen Kräftegleichgewichts führt zu folgender Differentialgleichung:

$$A \cdot p_v + \rho_b \cdot g \cdot A \cdot dz = A \cdot (p_v + dp_v) + \tau \cdot U \cdot dz \quad (38)$$

Die Schubspannung τ (Wandreibung) hängt von dem herrschenden horizontalen Druck sowie vom Reibungsbeiwert ab (vgl. Gl. (39)).

$$\tau(z) = \mu \cdot p_h(z) = \mu \cdot \lambda \cdot p_v(z) \quad (39)$$

Den horizontalen Druck errechnete Janssen aus Wichte und Erdbeschleunigung; den Reibungsbeiwert ermittelte er experimentell. Der experimentellen Bestimmung der Reibungsbeiwerte zwischen SVB und der Schalung widmen sich /DJE02, VAN01a, PRO05/ (vgl. Kapitel 3.3.2.2).

Zur Berechnung der Lasten in Silozellen nach der Theorie von Janssen sind gemäß DIN 1055-6 /DIN05b/ noch heute Versuchsergebnisse heranzuziehen. Es wird jedoch

explizit darauf hingewiesen, dass zwischen den Versuchsergebnissen und dem tatsächlichen Verhalten des Gutes im Silo signifikante Unterschiede bestehen können. Der Wandreibungskoeffizient ist experimentell in dem in Bild 33 dargestellten Versuchsaufbau zu bestimmen. Das Silogut wird in einer Scherzelle über eine Wandprobe geschoben. Für σ ist die maximal auftretende Horizontallast zugrunde zu legen. Die Reibungskraft F wird bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 0,04 mm/s ermittelt.

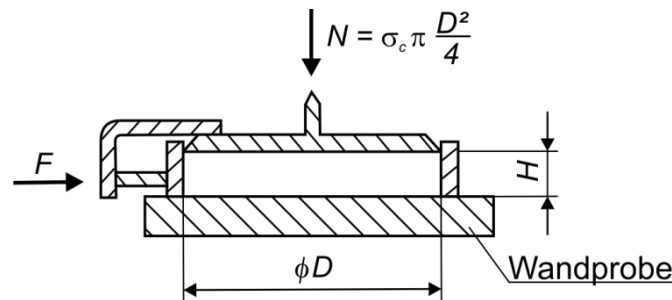


Bild 33: Scherzelle zur Messung der Wandreibung /DIN05b/

Djelal beschäftigte sich in /DJE01/ mit der Reibung zwischen einem Ton-Wassergemisch und dem Stahlgehäuse einer Tonziegelformmaschine. Bei der Herstellung von Tonziegeln oder Steinen wird das Ton-Wassergemisch durch eine Düse in eine Form gepresst. Dies geschieht mittels einer Endlosschraube, die das Gemisch befördert. Die Reibung zwischen Gemisch und Wand ist insofern von Bedeutung, da mit steigender Reibung mehr Kraft und/oder Produktionszeit benötigt werden. Bei Kenntnis der genauen Fluid-Struktur-Interaktion kann der Produktionsprozess entsprechend optimiert werden.

Die Reibung wird anhand eines Tribometers gemessen, der dem von /DJE02/ ähnelt (vgl. Bild 39). Es wird die Kraft ermittelt, die notwendig ist, um eine Stahlplatte zwischen zwei Zylindern mit 70 mm Durchmesser hindurchzuziehen. Die Zylinder werden mit dem Ton-Wassergemisch gefüllt. Es kann ein variabler Druck von 0 bis 10 bar auf die Füllung und somit auf die Platte ausgeübt werden, die mit einer Geschwindigkeit von 0 bis 30 mm/s gezogen wird. Die auftretende Reibungskraft wird mit einer 30 kN Kraftmessdose gemessen. Die gemessene Reibungskraft setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Aus der Reibungskraft der Zylinder auf der Stahlplatte und der Reibungskraft des Ton-Wassergemischs auf der Stahlplatte. Die Stahlplatte wird in unterschiedlichen Rauigkeiten gefertigt. Oberflächenrauigkeiten können durch den sogenannten Rc-Wert charakterisiert werden, der die mittlere Höhe der Profile, wie z. B. von Mikrorillen, einer zu beurteilenden Oberfläche darstellt. Durch eine Aufrauung mit Mikrorillen können Rc-Werte von 0,2 μm für die polierte Platte und 40 μm für die raueste Platte erreicht werden. Diese Mikrorillen werden in Zugrichtung und quer zur Zugrichtung aufgebracht.

In Bild 34 ist die Reibungskraft über die Strecke in Abhängigkeit vom Wassergehalt aufgetragen. Bei niedrigerem Wassergehalt des Tons muss eine größere Reibungskraft überwunden werden. Bei einem Wassergehalt von 28 M.-% nimmt die Reibungskraft im Verlauf der Strecke einen konstanten Wert an, wohingegen bei 38 M.-% die Kraft stetig ansteigt.

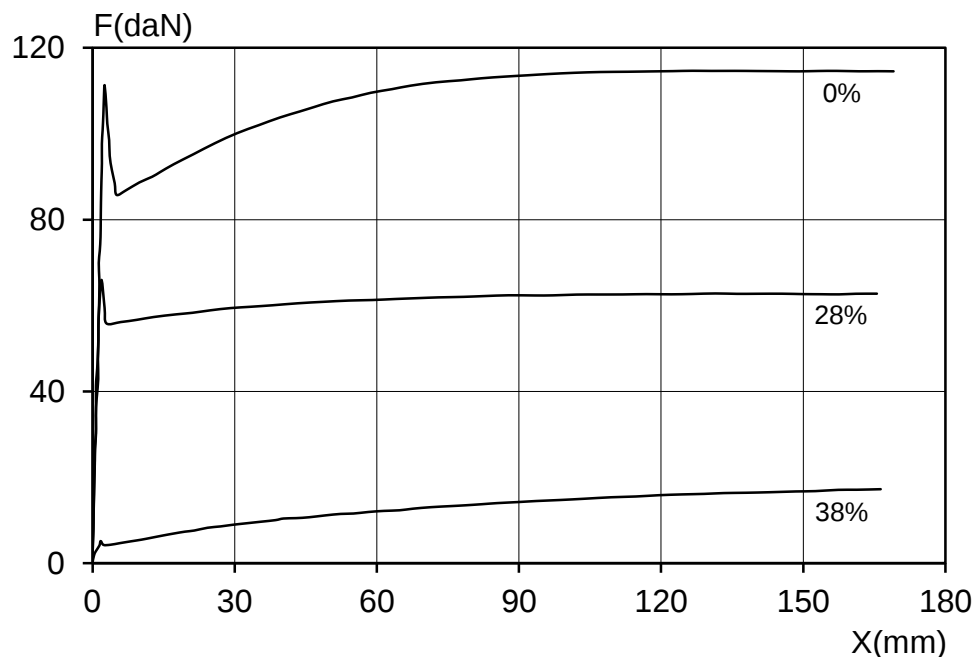


Bild 34: Reibungskraft F in Abhängigkeit vom Wassergehalt /DJE01/

Der Einfluss der Geschwindigkeit wurde mit einem Wassergehalt von 38 M.-% und einer Normalkraft von 102 N getestet. In Bild 35 ist die Reibungskraft über den Weg in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgetragen. Es wurde festgestellt, dass die Reibungskraft bei höheren Geschwindigkeiten abnahm.

Um den Einfluss der Normalkraft zu beurteilen, wurden Versuche mit 38 M.-% Wassergehalt und einer Geschwindigkeit von 5 mm/s durchgeführt. In Bild 36 ist die Reibungskraft über den Weg in Abhängigkeit von der Normalkraft aufgetragen. Die Normalkraft betrug 140, 1.020 und 2.730 N. Je größer die Normalkraft war, desto größer war erwartungsgemäß auch die Reibungskraft. Jedoch ist bei einer Normalkraft von 2.730 N ein stetiger Anstieg der Reibungskraft zu erkennen, im Gegensatz zu den beiden niedrigeren Normalkräften, die sich auf einem annähernd konstanten Niveau halten.

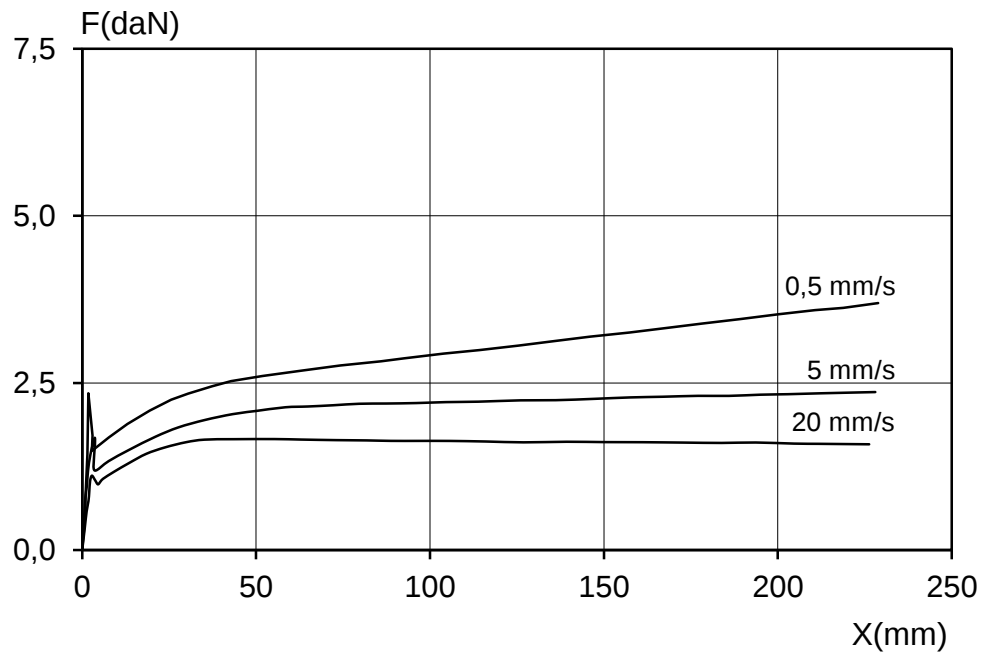


Bild 35: Reibungskraft F in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit /DJE01/

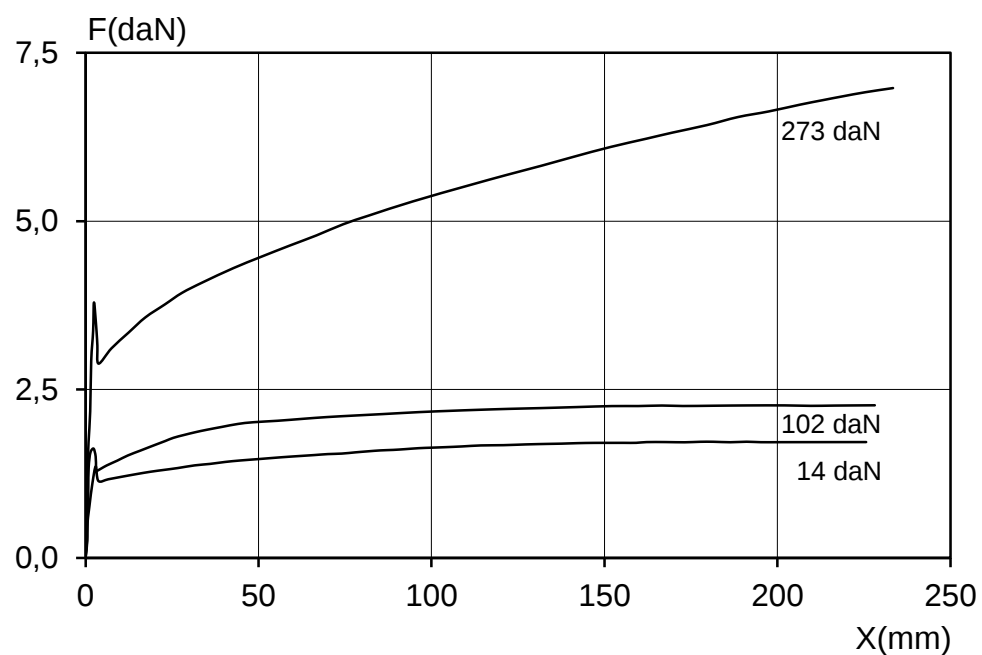


Bild 36: Reibungskraft F in Abhängigkeit von der Normalkraft /DJE01/

Der stetige Anstieg der Reibungskräfte bei hohem Druck, niedriger Geschwindigkeit und hohem Wassergehalt wurde mit einem Wasserverlust der Probe im Kontaktbereich Probe-Platte erklärt. Es wurde ein Wasserfilm beobachtet, der sich auf der Stahlplatte bildete. Jedoch kann dieses auch bei niedrigeren Drücken auftreten. Ein Erklärungsansatz, der die

Bewegungsfreiheit der Kaolinplättchen und somit die Art der Reibung (Gleitreibung, Rollreibung) bei erhöhten Drücken berücksichtigt, wäre hier zu wählen.

Nach den Veränderungen an den oben genannten Parametern wurden die Rauheiten der Stahlplatten im Bereich von $0,2\text{ }\mu\text{m}$ bis $40\text{ }\mu\text{m}$ verändert. Trägt man in einem Diagramm die Reibungskraft über die Rauheit auf, erhält man ansteigende Kurven mit einem anfänglichen Minimum bei $1,2\text{ }\mu\text{m}$. Dieses Minimum wird mit der vergleichbaren Größenordnung der Rauheit und dem Durchmesser der Kaolinplättchen erklärt.

In Bild 37 wird der Reibungskoeffizient in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Normalkraft gezeigt. Die Ergebnisse wurden bei einer Rauigkeit von $1,2\text{ }\mu\text{m}$ und einer Geschwindigkeit von 5 mm/s erzielt.

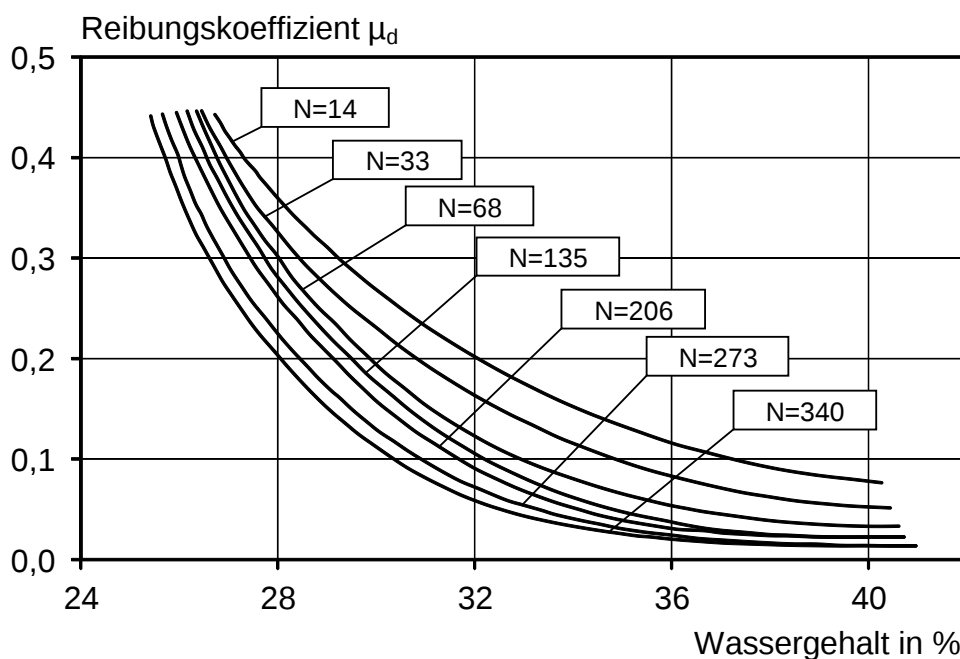


Bild 37: μ_d in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von der Normalkraft /DJE01/

Djelal erkannte Abhängigkeiten der Reibung vom Wassergehalt, der Normalkraft, der Geschwindigkeit und den Oberflächeneigenschaften. Diese Erkenntnisse wurden in weiterführenden Untersuchungen auf SVB übertragen.

3.3.2.2 Untersuchungen an Rüttelbetonen und SVB

Specht untersuchte die Reibungskraft des Frischbetons auf verschiedenen Schalungsoberflächen /SPE72/. Specht wählte als Versuchsaufbau (vgl. Bild 38) eine an den Ecken aufgehängte Tischplatte, auf der eine Schalungsfläche rutschfest verspannt war. Auf die Schalungsoberfläche wurde ein hohler Pyramidenstumpf gestellt. In diesen Stumpf wurde Beton gefüllt. Auf den Beton konnte eine variable Last aufgebracht werden. Die mit Beton gefüllte Schalung wurde mit einer Geschwindigkeit von 15 bis 20 mm/s über die Schalungsoberfläche gezogen und das Kraft-Zeit-Diagramm aufgestellt. In Leerversuchen wurde die Reibungskraft, die entsteht, wenn ein nicht gefüllter Pyramidenstumpf über die Schalungsoberfläche gezogen wird, ermittelt. Die Versuche wurden mit verschiedenen mit Schalöl behandelten Oberflächen durchgeführt (vgl. Tabelle in Bild 38). Die R_z -Werte wurden mittels Tastschnittverfahren jeweils mit zwei verschiedenen, voneinander unabhängigen Geräten bestimmt, was die Streuung der R_z -Werte erklärt.

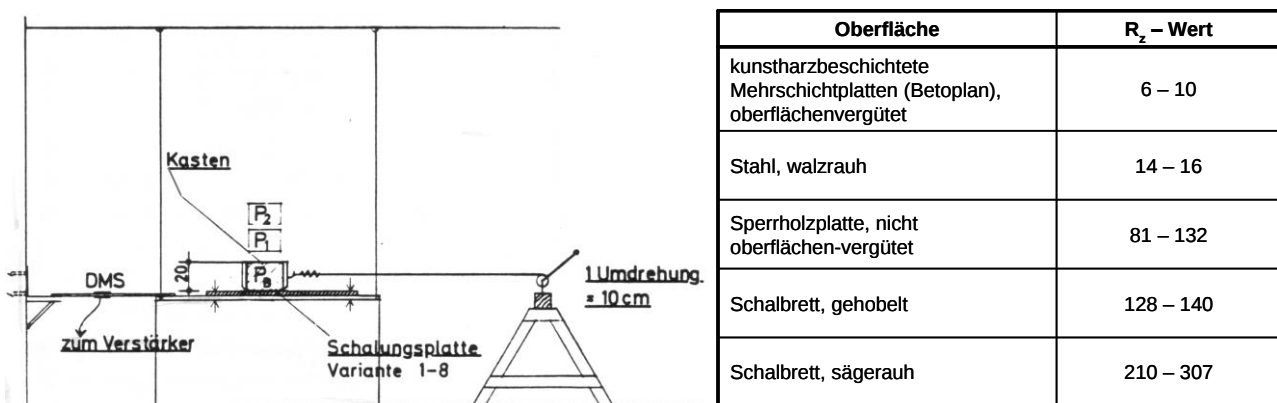


Bild 38: Versuchsaufbau nach Specht und verwendete R_z -Werte /SPE72/

Specht erkannte, dass er durch die Auswahl einer pyramidenstumpfförmigen Schalungsform dann bessere Ergebnisse erzielte, wenn er die Reibungskraft der Leerversuche nicht von der gemessenen Reibungskraft abzog. Dies führte er auf den Auftrieb der Schalung durch den eingefüllten Beton zurück. Somit ist seine Versuchsauswertung kritisch zu betrachten, da er nicht zwischen der Grundreibung des Systems und der gemessenen Reibungskraft unterscheidet.

Specht stellte fest, dass bei nicht verdichtetem Beton die Haftreibungskraft nur geringfügig höher oder gleich groß ist wie die Gleitreibungskraft. Im Gegensatz dazu konnte er eine höhere Haftreibungskomponente bei verdichtetem Beton beobachten. Des Weiteren zeigte sich, dass mit Erhöhung der Normalkraft durch Aufbringen einer Last der Gleitreibungsbeiwert μ nicht proportional zu dieser ansteigt. Bei allen Betonen konnte Specht über den

gesamten Gleitweg eine annähernd konstante Reibungskraft messen, die in etwa gleich groß war. Bei allen Versuchen zeigte sich ein positiv proportionaler Zusammenhang zwischen dem R_z -Wert und dem Reibungsbeiwert /SPE72/.

Specht untersuchte zwar verschiedene Oberflächen und Drücke, berücksichtigte aber nicht die Reibungskraft bei Leerversuchen. Außerdem waren bestimmte Versuchsrandbedingungen so gewählt, dass Sie zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führen können, wie z. B. eine manuelle Wegsteuerung.

In /DJE02, DJE04/ sind Versuche zur Reibung zwischen SVB und einer Stahlplatte beschrieben. Der Versuchsaufbau basiert dabei auf den Untersuchungen in /DJE01/ (vgl. Bild 39). Aufgrund des Größtkorns des SVB wurden die Durchmesser der Zylinder auf 120 mm Durchmesser vergrößert (vgl. Bild 40). Der maximale aufbringbare Druck betrug 1.700 kPa (kN/m^2) und die Zuggeschwindigkeit konnte zwischen 0 bis 300 mm/s variiert werden. Es sollte untersucht werden, inwieweit unterschiedliche Farbgebung und Lunckerbildung an der Betonoberfläche auf die Fluid-Struktur-Interaktion zurückzuführen sind. Daher wurden Versuche ohne und mit drei verschiedenen Schalöltypen durchgeführt.

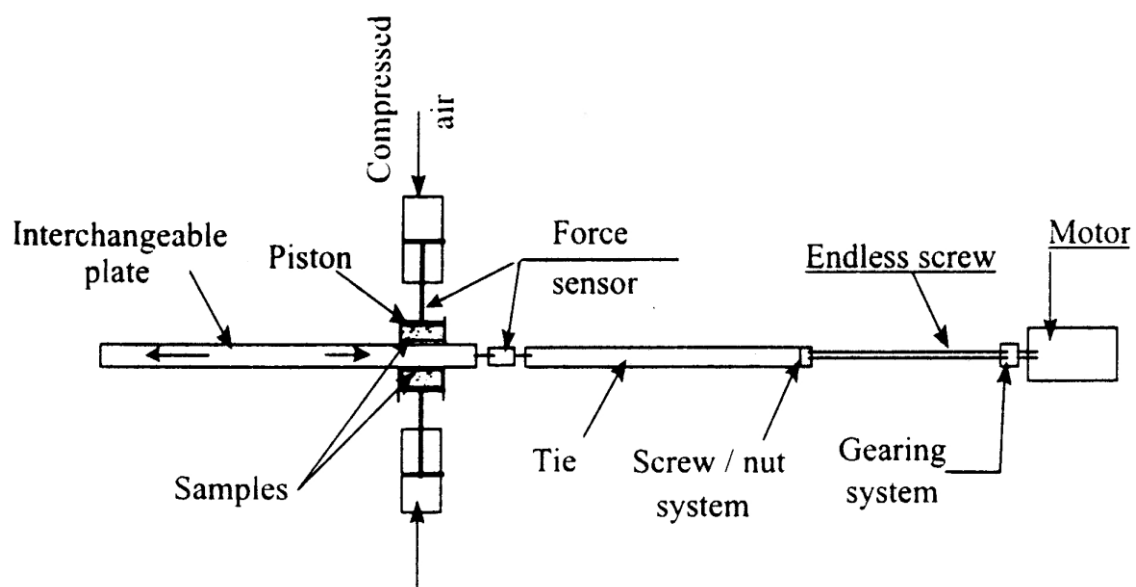


Bild 39: Skizze des Tribometers (Draufsicht) /DJE02/

Die gemessene Reibungskraft setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Zum einen aus der Reibungskraft der Zylinder auf der Stahlplatte und des Systems, die in Leerversuchen gemessen wird, und zum anderen aus der Reibungskraft, die der SVB einbringt.

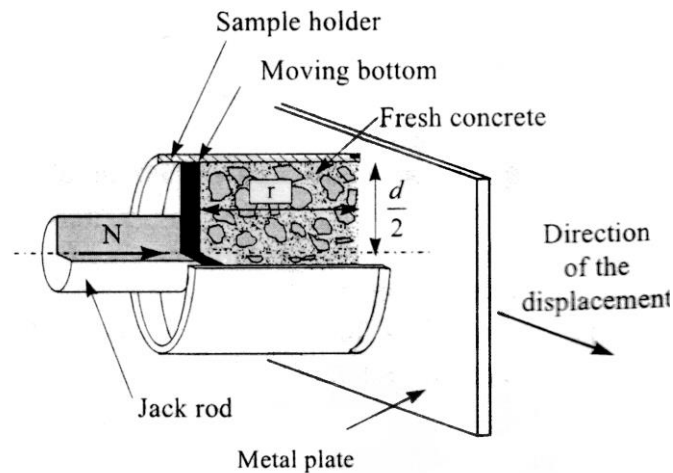


Bild 40: Zylinder an Metallplatte /DJE04/

Der hier verwendete SVB (B 35, heute in etwa: C30/37) hatte einen Wasserbindemittelwert von 0,41. Die Frischbetonrohddichte betrug 2.300 kg/m^3 bei einem Setzfließmaß von 700 mm. Es wurden Stahlplatten mit zwei Rauigkeiten verwendet: $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ ($R_z = 2,3 \mu\text{m}$) und $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ ($R_z = 13,6 \mu\text{m}$). Es wurden drei auf Raps- und Sojaöl basierende Schalöle verwendet: Ein reines Öl (32V); ein Öl-Wasser-Gemisch (31E) und ein Öl gemischt mit Lösungsmittel (30S).

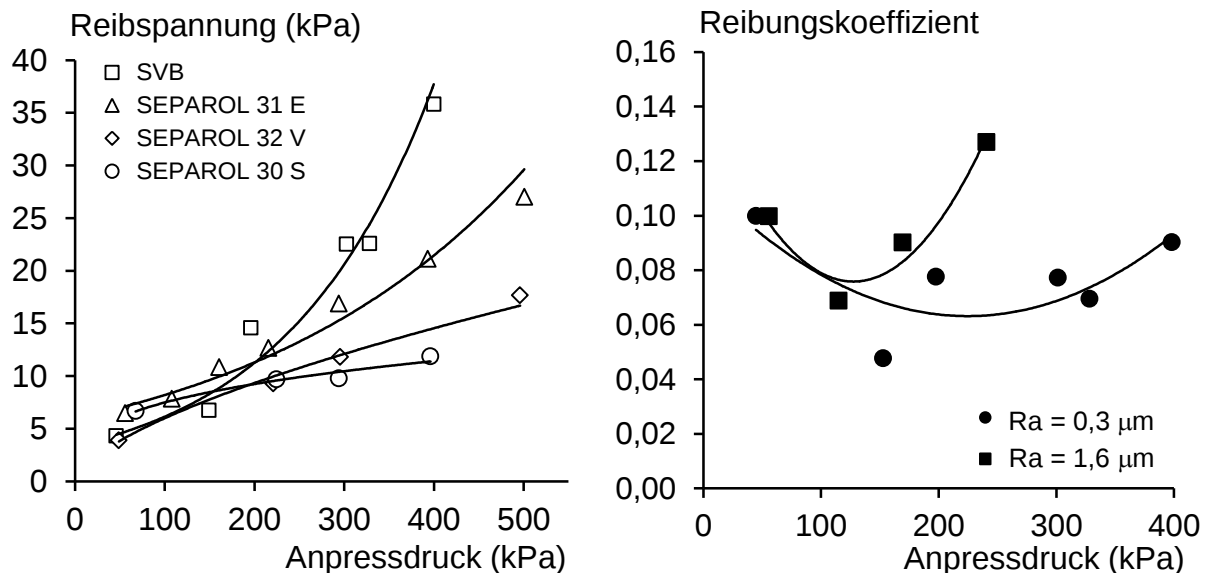


Bild 41: Reibung bei unterschiedlichen Drücken /DJE02, DJE04/, Zuggeschwindigkeit: 2,5 mm/s; Bild links: $R_a = 0,3 \mu\text{m}$

Die Ergebnisse der Tribometerversuche bei unterschiedlichen Drücken sind in Bild 41 dargestellt. Bei SVB ohne Schalöl besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Normalkraft und Reibungskraft. Der Reibungskoeffizient nimmt bei steigendem Druck zuerst ab

und steigt bei weiterer Druckerhöhung wieder an. Das Coulomb'sche Reibungsgesetz $R = \mu \cdot N$ kann hier keine Anwendung finden. Schalöl verringert erwartungsgemäß den Reibungskoeffizient bzw. die Reibungskraft. Dabei wurden deutliche Unterschiede bei den verschiedenen Schalölen ermittelt.

Das Abfallen und wieder Ansteigen des Reibungskoeffizienten bei Versuchen ohne Schalöl ist gemäß Djelal auf einen Film aus Zementleim zurückzuführen, der sich zwischen dem SVB und dem Stahl aufbaut (vgl. Bild 42). Bei Erhöhung des Druckes kann sich kein Zementleimfilm mehr ausbilden, was zu einer Interaktion zwischen der Gesteinskörnung und der Stahlplatte führt. Das stärkere Ansteigen des Reibungskoeffizienten bei geringeren Drücken wird auf die erhöhte Rauheit zurückgeführt.

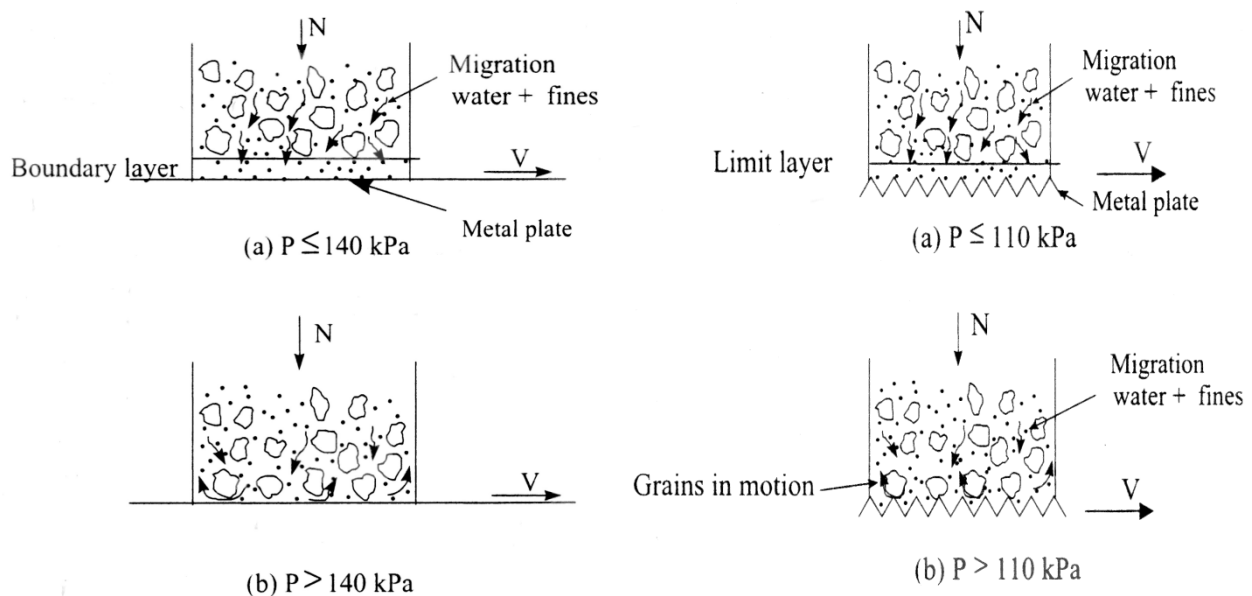


Bild 42: Skizze Interaktion SVB-Stahl /DJE04/

Es ist nicht bekannt, ob zur Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten die tatsächliche Grundreibung des Versuchsaufbaus (Reibung der Zylinder ohne Beton) sowie der Einfluss des Zementleimfilms zwischen dem Zylinder und der Stahlplatte berücksichtigt wurden.

In Bild 43 wird der Einfluss der Geschwindigkeit, mit der die Stahlplatte gezogen wird, auf den Reibungskoeffizienten dargestellt. Die Geschwindigkeit hat bei der glatteren Oberfläche keinen Einfluss auf die Reibung. Bei der raueren sind deutliche Unterschiede sichtbar. Im Niederdruckbereich, in dem sich der Zementleimfilm ausbilden kann, hat sie keinen Einfluss. Der Reibungskoeffizient steigt aber überproportional bei Drücken größer 110 kPa und geringen Geschwindigkeiten unterhalb von ca. 25 mm/s an. Der höchste Wert von $\mu = 0,19$ zeigt sich beim höchsten Druck (240 kPa) und der geringsten

Geschwindigkeit (1 mm/s). Bei höheren Geschwindigkeiten (50 mm/s und 100 mm/s) nimmt der Reibungskoeffizient hingegen nur noch einen Wert von $\mu = 0,07$ an. Es ist anzumerken, dass zur Verifizierung des Kurvenverlaufs Messwerte zwischen 10 und 50 mm/s fehlen.

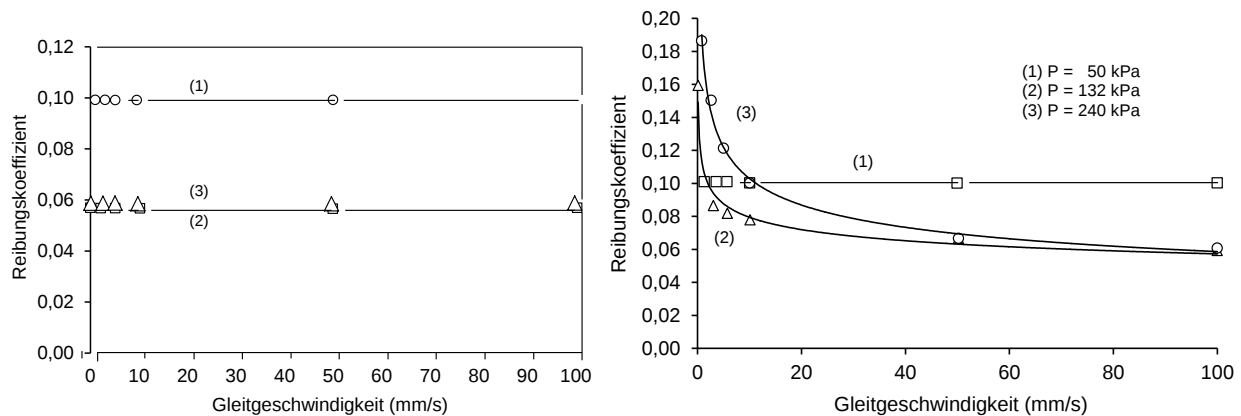


Bild 43: Reibungskoeffizient bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten /DJE04/, $Ra = 0,3 \mu m$ (links) und $Ra = 1,6 \mu m$ (rechts)

Außerdem wurde eine Versuchsreihe bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten mit zwei Schalölen durchgeführt. Bei glatterer Oberfläche tritt der gleiche Effekt wie bei Versuchen ohne Schalöl und rauere Oberfläche auf. Es ergeben sich höhere Werte für den Reibungskoeffizienten bei geringen Geschwindigkeiten. Die Werte für niedrige Geschwindigkeiten sind deutlich geringer als bei den Versuchen ohne Schalöl.

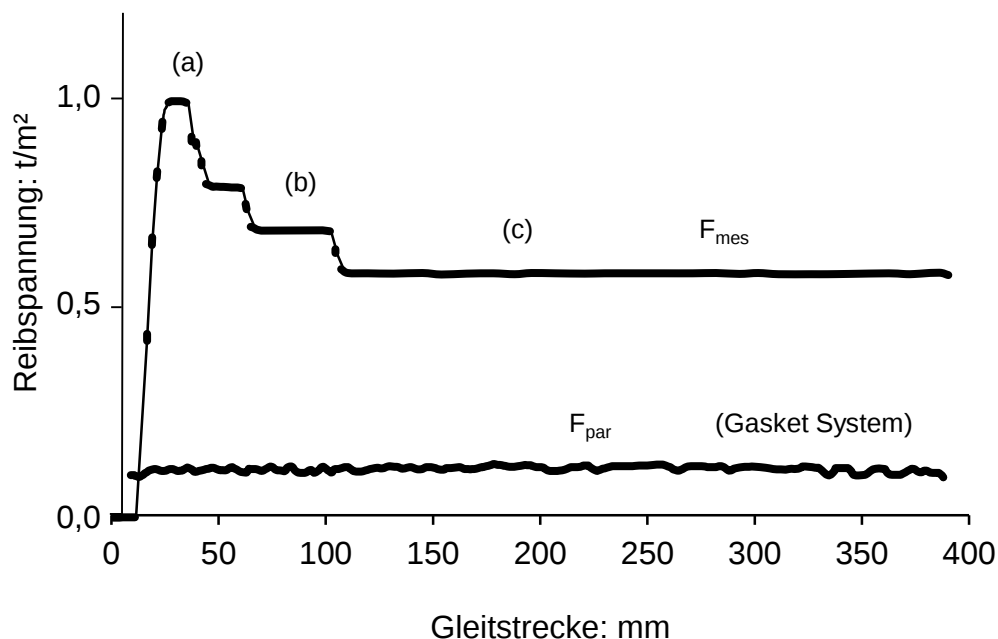


Bild 44: Schubspannung-Weg Diagramm /VAN04/, Ziehgeschwindigkeit von 5 mm/s und Druck von 250 kN/m^2 (obere Kurve) sowie Leerversuch (untere Kurve)

Der gleiche Tribometerversuch wie in /DJE02, DJE04/ wird von Vanhove in /VAN01a, VAN01b, VAN04/ mit SVB durchgeführt. Unter Verwendung der gleichen Untersuchungsmaterialien und Hilfsmittel sowie unter Betrachtung vergleichbarer Parametergrößen zeigen sich folgende Ergebnisse, die in Bild 44 und Bild 45 zusammengefasst dargestellt werden.

Der untere Kurvenverlauf stellt die Messdaten eines Leerversuches dar. Der erste Verlaufsabschnitt (a) des Schubspannung-Weg Diagramms (vgl. Bild 44) der oberen Kurve entspricht gemäß /VAN04/ einer Haftreibung. In Abschnitt (b) erfolgt eine Abnahme der Schubspannung in Folge des Schalöls. Der letzte Kurvenabschnitt (c) zeigt den Verlauf der Gleitreibung.

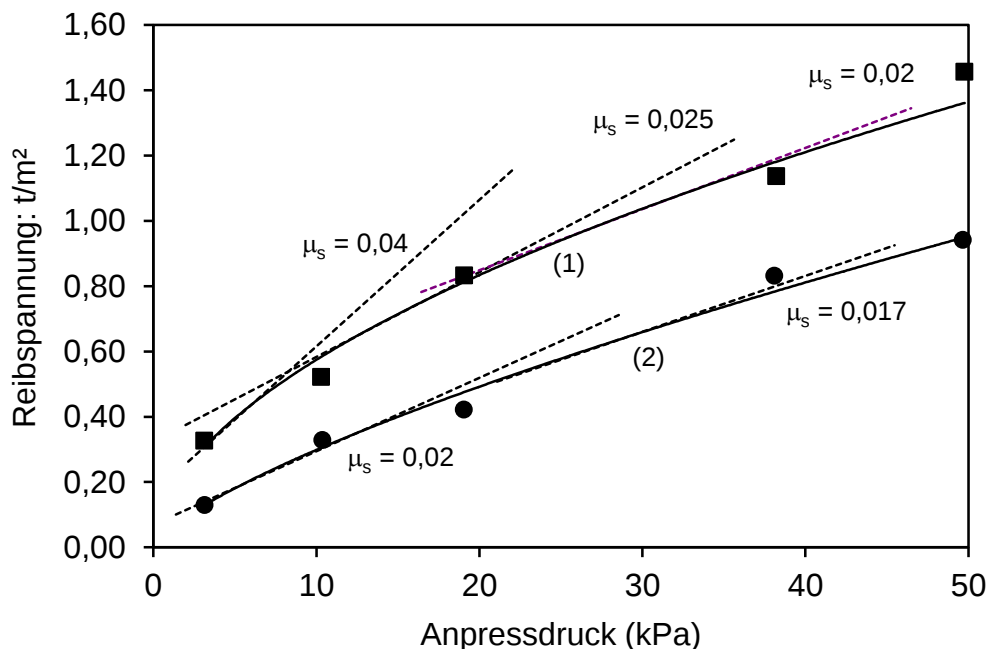


Bild 45: Gegenüberstellung Schubspannung - Normalspannung /VAN01b/

Beim Auftrag der Schubspannung über die Normalspannung in Bild 45 bestätigt sich der nicht proportionale Anstieg der Schub- zur Normalspannung, der bei allen zuvor erwähnten Versuchsreihen und Untersuchungen zu beobachten war. Die obere Kurve (1) stellt den Haftreibungsbeiwert dar und die untere Kurve (2) den Gleitreibungsbeiwert.

In /PRO05, GRA05/ beschäftigte sich Proske mit der Reibung zwischen Schalung und SVB mit dem Ziel, ein neues Konzept zur Berechnung des Schalungsdrucks bei SVB zu erarbeiten. Er untersuchte den Schalungsdruck an 4,3 m hohen Stützen mit einem Grundriss von $0,3 \cdot 0,3 \text{ m}^2$. Der Schalungsdruck wurde mittels einer Kraftmessdose bei 1 m, 2 m, 3 m und 4 m von der Oberkante der Stütze gemessen. Es wurden folgende

Parameter variiert: die Betoniergeschwindigkeit von 12,5 m/h bis zu praxisunüblichen 160 m/h, der Bewehrungsgrad (mit und ohne Bewehrung) und die Viskosität (Setzfließmaße von 610 mm, 710 mm und 750 mm).

Bei Variation der Betoniergeschwindigkeit und einem Setzfließmaß von 750 mm kam es nur bei 12,5 m/h zu einer Verminderung des Schalungsdrucks. Ansonsten stellte sich ein annähernd hydrostatischer Betondruck ein. In einer Versuchsreihe mit konstanter Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h war zu erkennen, dass es bei niederviskoserem SVB und bei bewehrten Stützen zu einer Abnahme des Drucks kam (vgl. Bild 46). Die Unterschiede zeigten sich ab einer Betonierdauer von ca. 4 min. Dies entspricht bei der gewählten Betoniergeschwindigkeit von 25 m/h einer Füllhöhe von ca. 1,65 m. Bis dahin wiesen alle untersuchten Varianten annähernd hydrostatischen Betondruck auf.

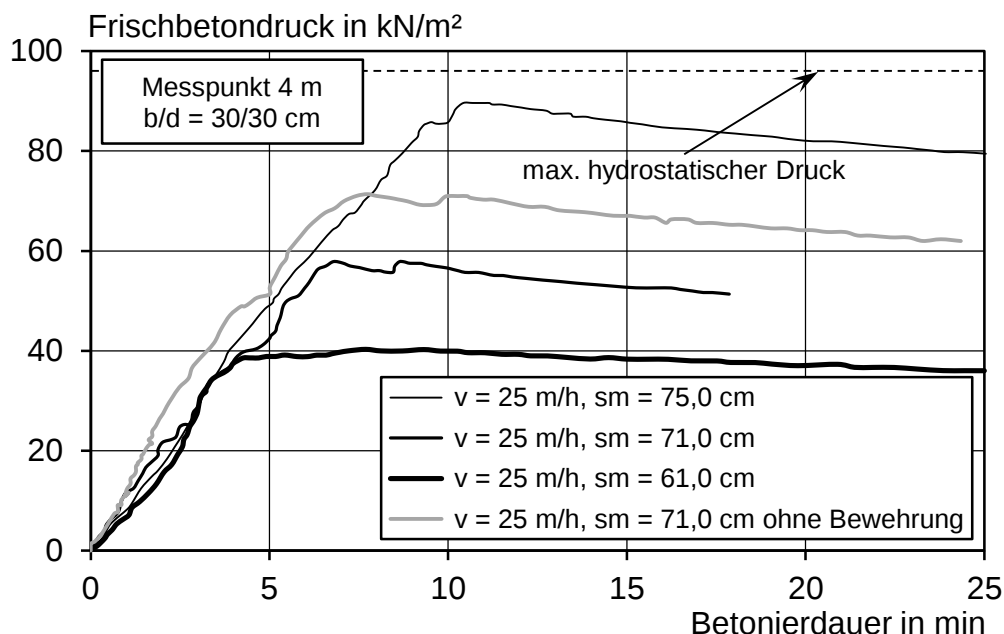


Bild 46: Schalungsdruck in 4 m von Oberkante Stütze /PRO05/

Diese Druckabnahme ist, laut Proske, hauptsächlich auf die Reibung zwischen dem SVB und der Schalungs- und Bewehrungsoberfläche zurückzuführen. Es ist anzumerken, dass die niedrigere Viskosität und damit die niedrigere innere Reibung ebenfalls einen starken Einfluss auf den Schalungsdruck hat. Bei niedriger Viskosität ist eine Schalungsdruckabnahme zu verzeichnen /BRA03b, BRA03e/.

Zur Ermittlung der Parameter Schalungsdruck und Reibungskraft diente folgender Versuchsaufbau /GRA05/. Ein Kubus mit den Maßen 0,25 • 0,25 • 0,25 m³ wurde mit SVB gefüllt und mit einer Auflast beansprucht, um variable Drücke zu erzielen. Mittels Kraft-

messdosen war es möglich, den Schalungsdruck zu erfassen. Die Reibungskraft wurde mittels eines in den Beton eingelassenen Schalungsschwertes ($6 \cdot 100$ mm) gemessen, das aus dem Beton ausgezogen wurde.

Proske versuchte das zeitabhängige Verhalten dieser beiden Parameter zu beschreiben. Er untersuchte den Zeitraum vom Betonieren bis zur Erstarrung des SVB. Er traf die Annahme, dass die Reibungskraft zu Beginn und der Schalungsdruck am Erstarrungsende gleich Null sind, was in der Praxis nicht immer so auftreten wird. Des Weiteren ging er davon aus, dass die Reibungskraft nur aktiviert werden kann, wenn Bewegung vorliegt. Es ist aber zu vermuten, dass im Ruhezustand sogar eine höhere Reibungskraft vorliegt, da der Haftreibungskoeffizient größer als der Gleitreibungskoeffizient ist (vgl. Kapitel 3.2). Er erhielt so vom Beginn bis zum Erstarrungsende ansteigende Reibungswerte. Dies ist jedoch nicht auf den Einfluss der Reibung zurückzuführen. Während des Ansteifens kommt es durch aufwachsende Hydratphasen zu einem Anhaften des Betons an dem Schwert. Das Abreißen des Schwerts von dem Beton ist der hier gemessene Effekt. Somit sind die Ergebnisse für die Charakterisierung der Fluid-Struktur-Interaktion nicht relevant.

In der Literatur finden sich z. T. sehr widersprüchliche Aussagen zum Schalungsdruck bei der Verwendung von SVB. Selbst bei Rüttelbeton ist die Thematik des Schalungsdrucks noch immer nicht eindeutig geklärt. Die maßgeblichen Einflüsse auf den Schalungsdruck von SVB sind die Befüllungsart, der Bewehrungsgrad, die rheologischen Eigenschaften des SVB, der Schalungsquerschnitt und die Betoniergeschwindigkeit /BRA03a/.

Für eine fließende Betonierfront aus SVB sind relevante Betonierhöhen von unter einem Meter anzusetzen. Für diese Höhen kann von einem hydrostatischen Frischbetondruck ausgegangen werden. Dieses wird auch in den bereits veröffentlichten SVB-Richtlinien aus Deutschland, Österreich, Schweden und den Niederlanden festgeschrieben /DAF01b, DAF03, CUR02, ÖVB02, SWE02/.

Bei eigenen Untersuchungen wurde jedoch festgestellt, dass eine Abminderung des hydrostatischen Betondrucks vorgenommen werden kann /BRA03a/. Dazu wurden eigene Untersuchungen zum Schalungsdruck von SVB an einer 3,3 m hohen, 0,24 m breiten und 3,75 m langen Modellwand aus Rahmenschalelementen durchgeführt. Bild 47 zeigt die Abminderung des Schalungsdruckes bei einer Betonage von oben mit einer Betoniergeschwindigkeit von 10 m/h.

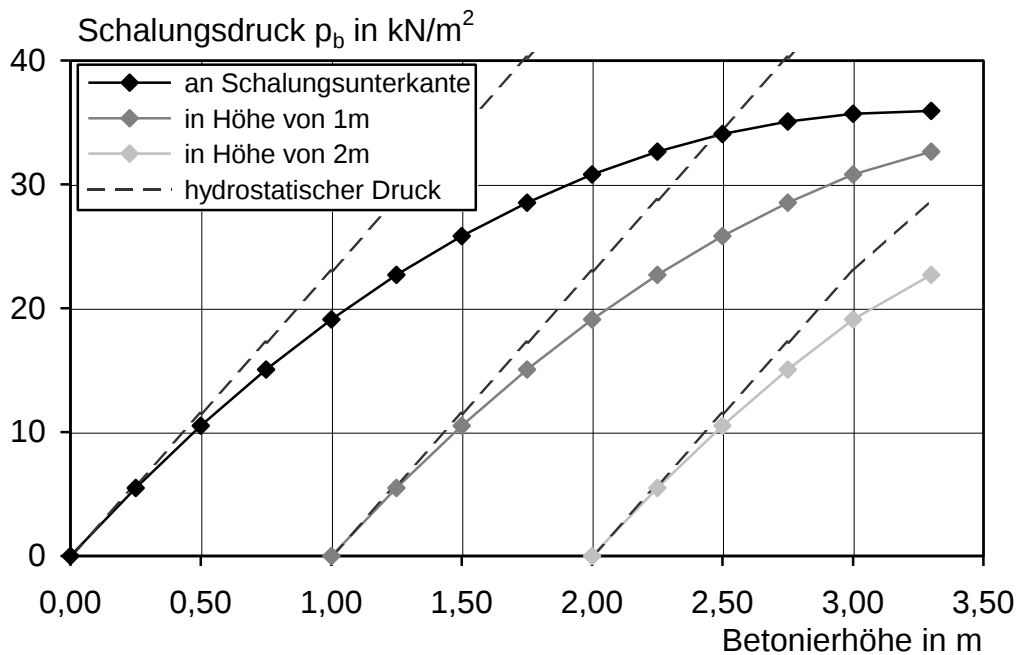


Bild 47: Schalungsdruck in verschiedenen Schalungshöhen in Abhängigkeit von der Betonierhöhe (SVB-Betonage von oben, $v_b = 10 \text{ m/h}$, $s_m = 750 \text{ mm}$) /BRA03a/

In den Versuchen zur Reibungsermittlung zwischen SVB und der Schalung /DJE02, DJE04, VAN01a, VAN01b, VAN04, GRA05, BRA03a/ werden für die Fluid-Struktur-Interaktion relevante Einflussfaktoren untersucht, wie die Normalkraft, die Oberfläche, die Geschwindigkeit und der Einfluss des Schalöls. Die Zielsetzung dabei war, den Reibungskoeffizienten im Hinblick auf den Schalungsdruck zu bestimmen. Daher sind die gewählten Randbedingungen wie der Normaldruck nicht in den Bereichen angesiedelt, die in der Praxis im Befüllungsvorgang für eine Fließfront aus SVB auftreten. In den Untersuchungen wurden Drücke von 50 bis 1.700 kPa (50 bis 1.700 kN/m²) verwendet. In der Praxis, ausgehend von einer maximalen Schütthöhe des Betons von 1 m, wirken Drücke zwischen 0 und 24 kN/m² auf die Schalung an den Stellen, an denen der SVB vorbeifließt.

3.4 Zusammenfassung Tribologie von Selbstverdichtendem Beton

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass die Ermittlung der Reibung zwischen SVB und der Schalung unabdingbar zur Beschreibung der Fluid-Struktur-Interaktion ist. Es treten verschiedene Reibungsarten und -zustände auf. Rheologisch kann von der inneren Reibung gesprochen werden, die auftritt, wenn das Fluid geschert wird. Tribologisch sind folgende Reibungsarten und -zustände für die nachfolgend beschriebenen eigenen

experimentellen Versuche von Bedeutung. Da es sich bei SVB um ein hochgefülltes disperses Fluid handelt, tritt nach Überwindung der Haft- bzw. Ruhereibung, der Scherung des Mörtels, Mischreibung auf. Hierbei ist der Mörtel das Fluid bzw. der Schmierstoff. Die grobe Gesteinskörnung wird beim Kontakt mit der Schalung eine Wälzreibung hervorrufen, da sie an der Schalung vorbei gleitet, reibt und auch abrollt.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Reibung zwischen Betonen und der Schalung zeigten, dass sowohl die Schalungsoberfläche als auch die rheologischen Eigenschaften des Betons, die Fließgeschwindigkeit und der Frischbetondruck Auswirkungen auf die Reibung haben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sollen in den folgenden Untersuchungen diese Einflussfaktoren auf ihre Relevanz hin überprüft werden.

Der Ansatz von Stribeck, den Reibungskoeffizienten als funktionalen Zusammenhang der Viskosität und der Geschwindigkeit darzustellen, kann für einen Ansatz der Beschreibung der Fluid-Struktur-Interaktion herangezogen werden. Es ist möglich, eine funktionale Beschreibung der Abhängigkeiten der genannten Einflussfaktoren auf den Reibungskoeffizienten zu ermitteln.

Die bisherigen Versuchsaufbauten sind unter der Prämisse entwickelt worden, den Schalungsdruck näher beschreiben zu können. Daher werden Untersuchungen mit höheren Drücken durchgeführt als bei Fließvorgängen von SVB auftreten. Somit ist zur Ermittlung tribologischer Kennwerte von SVB mit der Schalhaut ein geeigneter Tribometer zu entwickeln, mit dem die Einflussfaktoren, bei Bedingungen wie sie beim Fließen von SVB herrschen, überprüft werden können. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass in den vorgestellten Versuchen die Grundreibung des Tribometers nicht richtig erfasst werden konnte. Dieses ist erforderlich um aus den gemessenen Reibungskräften die effektiven Reibungskoeffizienten ermitteln zu können.

4 NUMERISCHE SIMULATION VON STRÖMUNGSVORGÄNGEN

4.1 Allgemeines

Eine Strömung ist eine Bewegung von Flüssigkeiten oder Gasen. Mit ihr beschäftigt sich die Strömungsmechanik, die oft auch als Fluidmechanik bezeichnet wird. Strömungsvorgänge werden allgemein durch Geschwindigkeit, Druck, Dichte, Viskosität und Temperatur als Funktion von Ort und Zeit beschrieben.

Bei Strömungsvorgängen werden laminare und turbulente Strömungen unterschieden. Gleiten die Schichten einer Flüssigkeit aneinander vorbei, ohne sich gegenseitig zu stören, d. h. ohne Wirbel zu verursachen, spricht man von einer laminaren Strömung bzw. laminaren Schichtenströmung /KUC95, VIS04, BRO02, STÖ04/. Reißen die Stromlinien ab, z. B. wenn die Strömungsgeschwindigkeit zu groß wird, entstehen Wirbel und damit Kräfte, die entgegen der Bewegungsrichtung wirken. Es tritt eine sogenannte turbulente Strömung auf. Ihr Strömungswiderstand ist viel größer als der einer laminaren Strömung. Dabei erfolgt die Abgrenzung durch die Reynoldszahl Re /STE02, BRA71, VAL03, KIN04/. Es gibt unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der Reynoldszahl. Verschiedene Berechnungsverfahren sind in /BRA71, SCH97, SCH01, STE02, ZÜR03/ zusammengestellt. Strömungsvorgänge von SVB oder deren Basismörtel SVM zeigen fast ausschließlich ein laminares Strömungsverhalten.

Die allgemeine mathematische Beschreibung der Strömungsdynamik basiert auf den physikalischen Erhaltungsgleichungen für Masse (Kontinuität), Impuls und Energie /SCH01/. Diese Gleichungen, die der Beschreibung von Bewegungen dienen, werden als Bilanzgleichungen bezeichnet und können sowohl nach der Eulerschen als auch nach der Lagrangeschen Betrachtungsweise aufgestellt werden /BRO02/. Eine umfassende Beschreibung der für eine numerische Strömungssimulation erforderlichen strömungsmechanischen Grundlagen ist in /FRA02, OER03, SCH01, BRO02/ enthalten.

4.2 Ein- und Mehrphasenströmung

4.2.1 Allgemeines

Man unterscheidet Einphasenströmungen, also Strömungen von Ein-Fluid Substanzen, und Mehrphasenströmungen. Unter Mehrphasenströmung wird die Koexistenz von zwei oder mehr Phasenanteilen innerhalb eines Strömungsgebietes verstanden. Als Phase treten Aggregatzustände (fest, flüssig und gasförmig) auf, die in ein- oder mehrkomponentigen Stoffsystemen simultan auftreten können /FRA02, OER03/. Als disperse Mehrphasenströmung werden Gemische bezeichnet, in denen eine Phase in

kontinuierlicher Form vorliegt (dies kann ein Gas oder eine Flüssigkeit sein) und die übrigen Phasenanteile in diskreter Form als disperse Phase vorliegen.

Die numerische Berechnung von Zweiphasenströmungen ist gegenüber der Berechnung einphasiger Strömungen mit einem erheblich höheren numerischen Aufwand verbunden. Wegen der oft großen Komplexität dieser Strömungen muss bei der Modellierung ihrer Eigenschaften eine große Anzahl von Parametern berücksichtigt werden.

4.2.2 Modelle zur Beschreibung von Mehrphasenströmungen

Die für die Beschreibung von Mehrphasenströmungen am häufigsten angewandten Modelle sind das Euler-Euler-Modell und das Euler-Lagrange-Modell /FRA02, OER03, SCH01/.

Beim Euler-Lagrange-Modell wird von einer kontinuierlich vorliegenden, gasförmigen oder flüssigen Phase (homogenes Fluid, Euler-Phase) sowie einer oder mehrerer dispers verteilter Phasen (Lagrange-Phasen) in Form von festen Partikeln, Flüssigkeitstropfen oder Gasphasen ausgegangen. Für die Euler-Phase gelten die Grundgleichungen der Strömungsmechanik. Dagegen wird die dispers verteilte Phase in Lagrange-Darstellung betrachtet, d. h. als eine Menge von Einzelpartikeln aufgefasst, die in der kontinuierlichen Phase verteilt sind. Jedes Partikel hat seine Identität und wird auf seiner zeitabhängigen Bahn durch den Raum verfolgt. Für jedes Partikel der dispers verteilten Phasen werden die Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und Energie angewendet. Zwischen den beiden Phasen kommt es zu Impuls-, Massen- und Energieaustausch. Diese Austauschmechanismen stellen die Phasenwechselwirkungen dar, d. h. dass die Bewegung der kontinuierlichen Phase die der Partikel beeinflusst. Ebenso beeinflusst die Bewegung der Partikel die der kontinuierlichen Phase. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes ist es kaum möglich die Bewegung eines jeden in der realen Strömung vorhandenen Partikels auch tatsächlich zu berechnen. Deshalb sollte die disperse Phase einen Volumenanteil von 10 % nicht überschreiten, weil andernfalls selbst bei laminaren Strömungen, wie sie beim Fließvorgang mit SVB vorherrschen, eine sehr hohe Rechenleistung erforderlich ist.

Im Gegensatz zum Euler-Lagrange-Modell wird bei dem Euler-Euler-Modell die dispers verteilte Phase nicht in Form von Einzelpartikeln, sondern ebenfalls als Kontinuum betrachtet. Es existieren keine scharfen Phasengrenzflächen und keine eindeutige Identität jedes Partikels. Für beide Phasen gelten die Grundgleichungen der Strömungsmechanik. Die Euler-Euler-Methode eignet sich für hohe Partikelbeladungen und Volumenkonzentrationen der dispersen Phase.

Ein Sonderfall des Euler-Euler-Modells ist das Phasenanteil-Modell, auch unter dem Namen „Volume of Fluid“ (VOF) bekannt. Bei diesem Modell ergibt sich für jede Phase eine eigene Kontinuitätsgleichung, allerdings werden alle Phasen von denselben Impulstransportgleichungen beschrieben, d. h. sie teilen sich ein gemeinsames Geschwindigkeitsfeld.

Eine detaillierte Beschreibung der strömungsmechanischen Grundlagen zu Mehrphasenströmungen ist in /FRA02, OER03, SCH01/ enthalten.

4.2.3 Numerische Lösungsmethoden

Geeignete Diskretisierungsmethoden, mit der die Differentialgleichungen in ein System algebraischer Gleichungen überführt werden, sind die Finite-Differenzen-Methode (FDM), die Finite-Volumen-Methode (FVM) und die Finite-Elemente-Methode (FEM) /FER02/. Finite-Elemente-Methoden besitzen die höchste Flexibilität, da sie auf flexiblen unstrukturierten Netzen beruhen, jedoch ist in diesen Netzen die Genauigkeit beschränkt. Finite-Volumen-Methoden basieren meistens auf strukturierten Netzen, die keine besonderen Anforderungen erfüllen müssen /FER02, OER03/.

Neben den strömungsmechanischen Ansätzen, bei dem das zu simulierende Medium als Fluid betrachtet wird, besteht die Möglichkeit, die Strömung von SVB als Partikelströmung zu beschreiben. In der Literatur zur Strömungssimulation von Partikeln bzw. Schüttgütern sind dabei die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und die Finite-Elemente-Methode (FEM) /BÖH02/ beschrieben.

4.3 Strömungssimulation von SVB - Literaturergebnisse

4.3.1 Allgemeines

In der Literatur werden sowohl Strömungssimulationen, bei der der SVB als Fluidströmung als auch als Partikelströmung betrachtet wird, beschrieben. Die Partikelströmung wird auch als Granulatströmung bezeichnet. Bei den Partikelmethoden kommen dabei die Distinct Element Method (DEM) sowie die Dissipative Particle Dynamics (DPD) zum Einsatz. Bei der Beschreibung des Fließvorganges als eine Fluidströmung werden die in Kapitel 4.2 dargestellten Modelle herangezogen. Eine Zusammenfassung der für die Strömungssimulation von SVB verwendeten Methoden und Anwendungsbeispiele ist in /ROU14/ gegeben.

4.3.2 Strömungssimulation von SVB als Partikelströmung

Bei der numerischen Modellierung der Fließeigenschaften von SVB gibt es zurzeit zwei Ansätze, bei denen der Beton als Partikelsystem modelliert wird. Petersson führte eine numerische Modellierung mit Hilfe der Distinct Element Method (DEM) /PET01, PET03/, Martys mit Hilfe von Dissipative Particle Dynamics (DPD) /MAR02/ durch.

Bei der DEM wird der Beton als Partikelsystem (Granulatströmung) modelliert, wobei aber die Modellierung bis zu einer Größe des Mehlkorns aufgrund der Vielzahl der Partikel und der dann erforderlichen Rechenleistungen nur eingeschränkt möglich ist. Im Rahmen der Untersuchungen von Petersson /PET01, PET03/ wurden zur Begrenzung der Partikelanzahl die Partikel in zwei Kategorien unterteilt: Partikel kleiner als 4 mm wurden dem Mörtel, Partikel mit einer Größe von 4 bis 16 mm wurden der Gesteinskörnung zugerechnet. Die DEM ermöglicht es, dass der Weg des einzelnen Gesteinskorns während des Fließvorganges beobachtet und sogar Sedimentationsvorgänge des groben Gesteinskorns simuliert werden können. Petersson simulierte mit diesem Verfahren einen Setzfließmaß- und einen L-Kasten-Versuch /PET01, PET03/. Er korrelierte die numerische Darstellung der Fließvorgänge mit Videoaufnahmen von den entsprechenden Laborversuchen und stellte eine gute Übereinstimmung fest. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die sehr hohe erforderliche Rechenleistung, die die Simulation einer Betonage eines Bauteiles unmöglich macht.

Die in /MAR02/ durchgeführten Simulationen werden mit Hilfe der Dissipative Particle Dynamics (DPD) durchgeführt. Die DPD beruht auf der Grundlage der zellulären Automaten. Dabei wird die fluide Phase durch eine Anhäufung von Partikeln erfasst und die Interaktionen der Partikel werden berücksichtigt, so dass die Bewegung der Partikel mit den Grundgleichungen der Hydrodynamik übereinstimmen. Die Bewegung der Festkörper wird modelliert, indem eine Teilmenge der Fluidpartikel zusammengefügt wird, um so individuelle Gesteinskörnungen abzubilden. Nach Ermittlung der Körperkräfte wird die Partikelbewegung mit den Euler-Gleichungen modelliert. Die Simulationen umfassten die Umströmung von Bewehrungsstäben und das Verhalten von SVB in einem Betonrheometer. Allerdings wurden die Ergebnisse der numerischen Simulation nicht validiert. Inwiefern diese Simulationen Rechenleistung benötigen, wird in /MAR02/ nicht ausgeführt. Ob die bei der Betonage eines Bauteils auftretenden Strömungsvorgänge simuliert werden können, bleibt unklar.

4.3.3 Strömungssimulation von SVB als Fluidströmung

Gram führte Strömungssimulationen /GRA15/ mit der CFD-Software openFOAM durch und simulierte das Strömungsverhalten in einer sogenannten Rheo-Box, einer modifizierten L-Box (vgl. Kapitel 6.2.1.3), mit dem Ziel, rheologische Kenngrößen zu ermitteln. Die so ermittelten rheologischen Kenngrößen wurden mit Ergebnissen verglichen, die mit einem Betonrheometer ConTec-4 SCC Viscometer ermittelt wurden. Die Autorin stellt eine vergleichsweise gute Übereinstimmung fest, führt aber aus, dass die Ergebnisse der Strömungsversuche nicht die Genauigkeit zeigen wie ein Rotationsviskosimeter unter Laborbedingungen /GRA15/. Dabei sei angemerkt, dass mit einem Betonrheometer die Ermittlung absoluter rheologischer Kenngrößen nicht möglich ist. Es wurde das Bingham-Modell verwendet. Inwieweit der Beton tatsächlich ein Bingham'sches Fließverhalten zeigte, ist nicht bekannt. Außerdem wurden die Wandreibungseffekte, die einen großen Einfluss bei der Modellierung des Strömungsvorganges haben, nicht berücksichtigt. Die Wandrauigkeiten sind nicht bekannt. Einen weiteren Einfluss hat die numerische Definition des Startvorganges der Fließbewegung. Gram wählte eine sofortige Öffnung des Schiebers, was jedoch in der Realität nicht der Fall ist und ebenfalls einen Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation hat.

In weiteren Untersuchungen ermittelte die Autorin in der Rheo-Box inverse rheologische Parameter an Zementleimen mit unterschiedlichen Gesteinsmehlen als Füller /GRA15/. Die Rheo-Box wurde entsprechend verkleinert und wies eine Fließlänge von 350 mm bei einer Breite von 25 mm und einer Höhe von 50 mm auf. Auch hier wurde das Bingham-Modell verwendet, was oftmals das Fließverhalten von Zementleimen gut beschreibt. Ein Einfluss der Wandreibung wurde auch hier nicht berücksichtigt. Einerseits sind die Wandreibungseffekte aufgrund der fehlenden Gesteinskörnung nicht so ausgeprägt wie bei Betonen, andererseits haben diese jedoch aufgrund der geringen Spaltweite von lediglich 25 mm einen Einfluss auf den Fließvorgang. Die Wandrauigkeiten sind nicht bekannt. Die Autorin empfiehlt den Versuch bzw. die Methodik für den qualitativen Vergleich der rheologischen Eigenschaften von Zementleimen, was zweifelsfrei gut möglich ist.

In /LOW13b, ILL14/ sind Strömungssimulationen von ultrahochfestem Beton (UHPC) mit der CFD-Software Flow 3D[®] beschrieben. UHPC weist üblicherweise ein verhältnismäßig kleines Größtkorn der Gesteinskörnung auf und kann auch maximal 0,5 mm betragen. Welches Größtkorn die untersuchten UHPC aufwiesen, ist nicht bekannt. Als Fließgesetz wurde das Potenzgesetz von Ostwald und de Waele verwendet (vgl. Kapitel 2.3.1, Tabelle 1), d. h. die Fließgrenze des UHPC wurde nicht berücksichtigt. Es wurde das Fließverhalten in einer modifizierten L-Box untersucht. Die Fließlänge betrug 1200 mm bei einer Breite und Höhe von jeweils 50 mm. In /ILL14/ wird ausgeführt, dass die mit CFD

ermittelten Fließstrecken sich mit zunehmender Zeit und damit kleiner werdenden Scherraten gegenüber den im Experiment ermittelten Scherraten unterscheiden. Die Autorin führt dies darauf zurück, dass die Fließgrenze bei den CFD-Simulationen nicht berücksichtigt wurde und deshalb die Simulationen mit dem Fließgesetz von Herschel & Bulkley (vgl. Kapitel 2.3.1, Tabelle 1) wiederholt werden sollen /ILL14/. Zusätzlich ist jedoch anzumerken, dass bei den Simulationen die Wandreibung offensichtlich nicht berücksichtigt wurde. Die Wandrauigkeit des verwendeten Fließkanals ist nicht bekannt. Auch im Fall UHPC mit einem vergleichsweise geringen Größtkorn sind die Wandreibungseffekte weniger ausgeprägt als bei einem konventionellen Beton mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung von beispielsweise 8 oder 16 mm. Auch ist der anstehende Frischbetondruck vergleichsweise gering. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Wandreibungseffekte aufgrund des vergleichsweise schmalen Fließkanals einen Einfluss auf den Strömungsvorgang haben und deshalb bei der Strömungssimulation zu berücksichtigen sind.

4.4 Beurteilung der Literaturergebnisse im Hinblick auf die einzusetzende Methode

Die Sichtung der Literatur ergibt, dass die numerische Simulation der Strömungsvorgänge von SVB als Partikelströmung mit einem großen numerischen Aufwand verbunden ist. Die Beschreibung des kontinuierlichen Systems SVB erfordert eine extrem große Anzahl von Partikeln. Dieses ist auch der Fall, wenn lediglich eine kurze Fließstrecke simuliert werden soll. Die Simulation des Strömungsvorganges von ganzen Bauteilen scheint bei der zurzeit möglichen Rechenleistung nicht möglich. Deshalb erscheint es sinnvoll, CFD-basierte Verfahren heranzuziehen. Durch eine Einteilung des SVB in flüssige (selbstverdichtender Mörtel bis zu einem Größtkorn von 2 mm) und feste Phasen (grobe Gesteinskörnung) können dann auch Sedimentationsprozesse der Gesteinskörnung untersucht werden. Der Strömungsvorgang wird dann als disperse Mehrphasenströmung beschrieben. Die numerische Simulation der Strömungsvorgänge von SVB als disperse Mehrphasenströmung ist bislang noch nicht realisiert worden.

Zur Beschreibung der Strömungsvorgänge einer dispersen Mehrphasenströmung stehen mehrere Modelle zur Verfügung. Davon kommt für SVB das Euler-Lagrange Modell und das Euler-Euler Modell in Frage /FRA02, OER03, SCH01/ (vgl. Kapitel 4.2.2).

Beim Euler-Lagrange Modell soll der Anteil der dispersen Phase 10 Vol.-% nicht überschreiten (vgl. Kapitel 4.2.2). Außerdem ist die Anwendung dieses Modells nur dann sinnvoll, wenn für die zu verfolgenden Teilchen hinsichtlich Geschwindigkeit und

Bewegungsrichtung Anfangs- und Randbedingungen definiert werden können. Diese Bedingungen können bei der Betonage mit SVB jedoch nur grob abgeschätzt werden.

Da es bei dem Euler-Euler-Modell keine Volumeneinschränkung für die disperse Phase gibt, was eine realitätsnähere Abbildung von SVB ermöglicht, scheint dieses Modell zur Modellierung des Fließverhaltens von SVB besser geeignet. Da das Euler-Euler-Modell jedoch zwei kontinuierliche (fluide) Phasen betrachtet, muss das Modell für die Modellierung von dispersen Mehrphasenströmungen angepasst werden.

Für die Modellierung werden rheologische Kenngrößen als Eingangsparameter benötigt. Diese können für selbstverdichtende Mörtel und Betone jedoch nicht ermittelt werden (vgl. Kapitel 2.2.2.3 und 2.2.2.4). Jedoch kann mit Viskometeruntersuchungen ermittelt werden, ob die selbstverdichtenden Basismörtel eines Betons ein strukturviskoses, lineares oder dilatantes Fließverhalten aufweisen, so dass das entsprechende rheologische Modell für die CFD-Simulationen verwendet werden kann. Entsprechende Untersuchungen sind in Kapitel 5 beschrieben.

Zur Durchführung von numerischen Strömungssimulationen ist auch die Kenntnis der Interaktion von Mörtel bzw. Beton und Schalung von Bedeutung, da die Reibung zwischen diesen Medien den Fließvorgang maßgeblich beeinflusst. Die entsprechenden Versuche sind in Kapitel 6 beschrieben.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Eignung der Strömungssimulationssoftware FLUENT für die numerische Simulation der Strömungsvorgänge von SVB überprüft. Zur Überprüfung der prinzipiellen Anwendbarkeit geschieht dies, indem zunächst die fluiden Phasen selbstverdichtender Mörtel und selbstverdichtender Beton in einem einfachen Versuch als Einphasenströmung simuliert werden. Auf Basis dieser Simulationen ist es dann möglich zu beurteilen, ob FLUENT auch für die Simulation von Mehrphasenströmungen anwendbar ist, d. h. wenn die Simulation als Einphasenströmung misslingt, wird dieses auch nicht als Mehrphasenströmung möglich sein. Die durchgeführten Simulationen werden anhand praktischer Experimente validiert. Im Kapitel 7 werden die durchgeführten Versuche beschrieben und analysiert und darauf aufbauend die numerischen Simulationen vorgestellt.

5 RHEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

5.1 Zielsetzung

Im Rahmen der rheologischen Untersuchungen sollen gezielt Einflussfaktoren auf die rheologischen Eigenschaften ermittelt werden. Insbesondere wird der Einfluss der Temperatur, der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften untersucht. Die Untersuchungen erfolgen an selbstverdichtenden Mörteln (SVM), welche die Basismörtel von SVB darstellen. Es werden SVB des Mehlkorntyps untersucht, die einen Mehlkorngelhalt von rund 600 kg/m^3 aufweisen. Das Mehlkorn setzt sich dabei üblicherweise aus dem Bindemittel (Zement und Betonzusatzstoff) und dem Mehlkorn der Gesteinskörnung zusammen. Bei Mehlkorntyp-SVB entspricht der Volumenanteil des SVM bis zu 60 % des Betonvolumens, so dass die rheologischen Eigenschaften des Mörtels die des SVB maßgeblich beeinflussen.

Von besonderem Interesse ist die Kenntnis des rheologischen Verhaltens dieser Mörtel, d. h. ob sie ein lineares, strukturviskoses oder dilatantes Verhalten aufweisen. Außerdem wird ein Partikelabstandsmodell entwickelt, mit dessen Hilfe bereits beim Mischungsentwurf das rheologische Verhalten der entsprechenden Rezeptur abgeschätzt werden kann. Die Kenntnis dieser rheologischen Eigenschaft ist auch im Hinblick auf die numerische Strömungssimulation von Bedeutung, weil auf dieser Basis das in dem CFD-Code anzuwendende rheologische Modell ausgewählt werden kann.

5.2 Einfluss der Granulometrie auf die rheologischen Eigenschaften von SVB

5.2.1 Ausgangsstoffe

Für die Versuche kamen zwei handelsübliche Portlandzemente (CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R) und ein handelsüblicher Hochofenzement (CEM III/A 32,5 N NW/NA) mit dem gleichen Klinker zum Einsatz (gemäß /DIN04c/). Weiterhin wurden vier verschiedene Flugaschen gemäß /DIN05c/ in das Versuchsprogramm aufgenommen. Da in Deutschland nur noch Flugaschen aus Trockenfeuerungen produziert werden, wurden 3 Trockenfeuerungsflugaschen und eine Schmelzkammerflugasche verwendet. Die Schmelzkammerflugasche wurde in das Versuchsprogramm aufgenommen um den Einfluss der Kornform ebenfalls zu untersuchen. Die Schmelzkammerflugasche sowie eine Trockenfeuerungsflugasche lagen zusätzlich in durch Windsichtung getrennten Fraktionen vor.

Als Gesteinskörnung wurden ein quarzitischer Rheinkies und -sand gemäß DIN EN 12620: 2003-04 /DIN03/ und DIN V 20000-103:2004-04 /DIN04a/ verwendet. Die Kornzusammen-

setzung des Gesteinskörnungsgemisches für die SVB lag genau im Bereich zwischen A16 und B16 gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 /DIN05d, DIN08/.

Als Betonzusatzmittel wurde ein hochwirksames Fließmittel auf Polycarboxylat-Ether-Basis (PCE) gemäß DIN EN 934-2:2002-02 /DIN02/ verwendet. Da PCE vergleichsweise temperaturempfindlich sind (vgl. Kapitel 2.1.2.2), wurde im Rahmen von Vorversuchen ein entsprechendes Fließmittel (PCE 4) ausgewählt, so dass bei der Frischbetontemperatur, bei denen die Rheometerversuche durchgeführt wurden (20 °C), das Nachverflüssigungsverhalten möglichst gering war und somit die Frischbetoneigenschaften gezielt eingestellt werden konnten und reproduzierbar waren (vgl. Bild 48 und Bild 49).

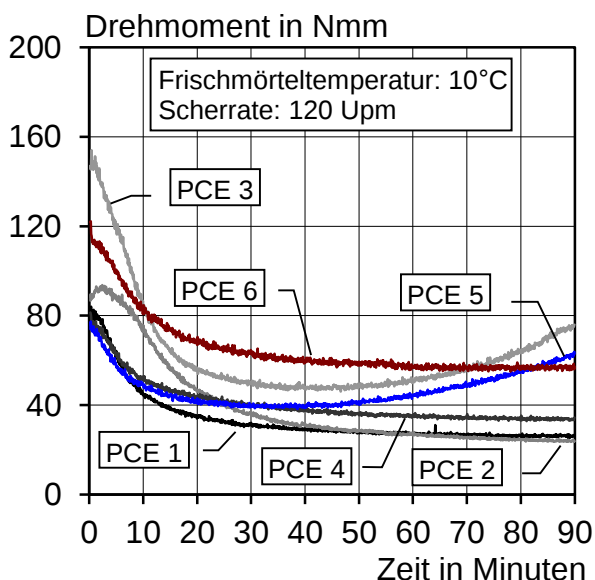


Bild 48: Zeitabhängiges rheologisches Verhalten verschiedener PCE /BRA03c, BRA03f/

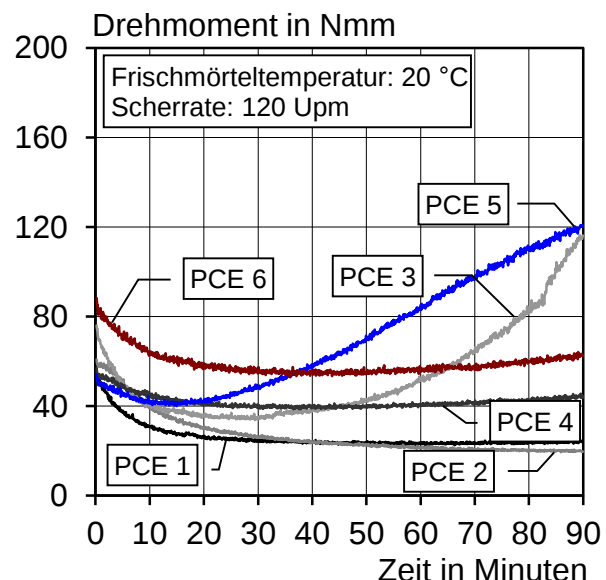


Bild 49: Zeitabhängiges rheologisches Verhalten verschiedener PCE /BRA03c, BRA03f/

5.2.2 Untersuchungen

In diesem Arbeitsschritt werden zunächst alle eingesetzten Ausgangsstoffe hinsichtlich Kornrohdichte, Korngrößenverteilung und Kornform sowie chemisch-mineralogischen Eigenschaften charakterisiert. Anschließend erfolgt an den entwickelten Rezepturen die Ermittlung granulometrischer und rheologischer Kenngrößen. Da in solchen Mischungen die Art und der Volumenanteil des Mehlkorns eine signifikante Rolle spielen, werden als Parametervariation die Zementart und -feinheit sowie die Betonzusatzstoffart und -feinheit untersucht.

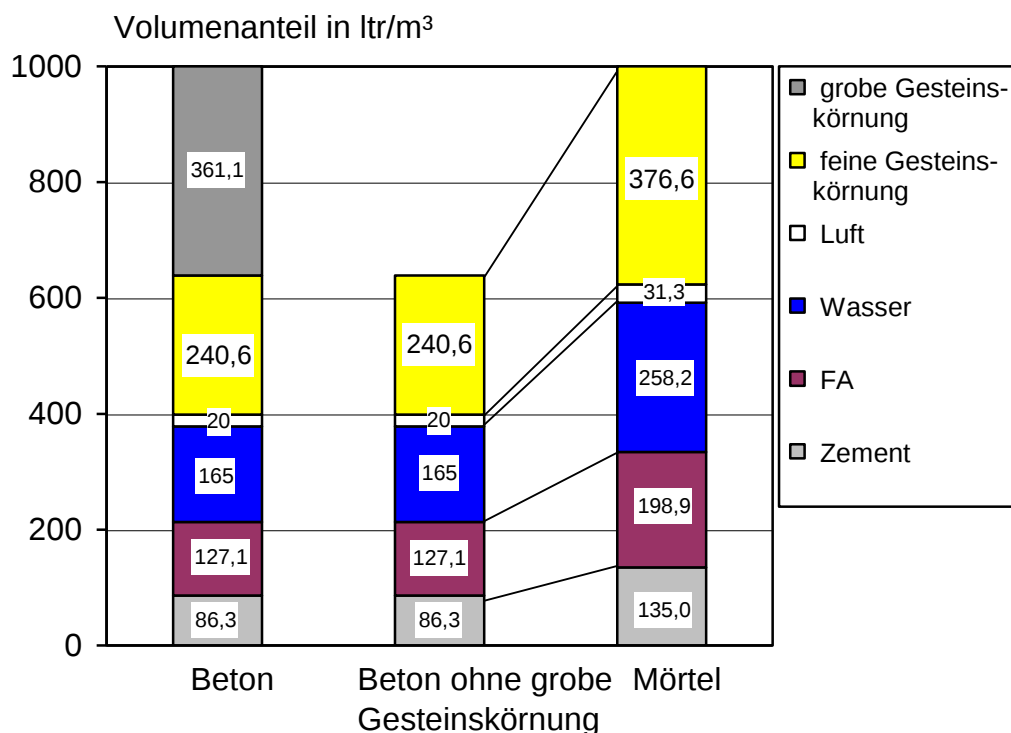


Bild 50: Schema zur Berechnung einer Mörtelrezeptur aus einer Betonrezeptur

Die rheologischen Untersuchungen dieser SVM erfolgen mit einem Rheometer. Dabei werden die Sieblinien der SVM gezielt verändert und die Auswirkungen auf das rheologische Verhalten untersucht /UEB05, BRA06/. Die Basis für die Untersuchungen bildet ein Mehlkorntyp-SVB (SVB1) mit einer in Deutschland häufig zum Einsatz kommenden höheren Viskosität, aus dem ein SVM extrahiert wird. Dazu wird der Volumenanteil der groben Gesteinskörnung ($> 2 \text{ mm}$) herausgerechnet und durch die restlichen Stoffe anteilmäßig ersetzt. Der Fließmittelgehalt wird so gewählt, dass das Setzfließmaß die Zielgröße $sm = 270 \text{ mm}$ erreicht. Dieser Mehlkorntyp-SVM stellt den Ausgangspunkt für alle weiteren Untersuchungen dar und wird im weiteren Verlauf SVM1 genannt. In Bild 50 ist dieses Vorgehen graphisch dargestellt. Die für die Untersuchungen verwendeten Stoffe, deren Benennungen und eine kurze Charakterisierung sind in den Tabellen A1 und A2 im Anhang A zusammengestellt. Aus diesen Ausgangsstoffen ergibt sich die in den Tabellen A9 bis A13, Anhang A, dargestellte Prüfmatrix.

In Tabelle A3, Anhang A, ist die Mischungszusammensetzung der SVM für die Untersuchung des Einflusses der Granulometrie dargestellt. Dabei werden nicht die Massenanteile, sondern die Volumenanteile der Komponenten angegeben. In den Versuchen werden durch Austausch einzelner Fraktionen die Sieblinien gezielt variiert. Dabei werden die Volumenanteile konstant gehalten. Der volumetrische Austausch ist Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit bei granulometrischen Sieblinienoptimierungen. Die zugehörigen

Ergebnisse der direkten und indirekten Prüfverfahren sind in den Tabellen A14 bis A24, Anhang A, zusammengestellt.

5.2.3 Prüfverfahren

5.2.3.1 Prüfung der Eigenschaften der Ausgangsstoffe

Die Ausgangsstoffe wurden hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften geprüft. Die Ergebnisse (inkl. der geltenden Normen) sind in den Tabellen A4 bis A7, Anhang A, dargestellt. Besonderes Augenmerk lag auf der Bestimmung der Dichten der Ausgangsstoffe. Diese wurden mit dem Pyknometerverfahren nach /DIN99/ für Füller bzw. /DIN04b/ für Gesteinskörnungen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A8, Anhang A, zusammengestellt.

5.2.3.2 Korngrößenverteilung und Kornform

- Siebung

Die Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung (Sand) wurde mittels Maschinensiebung auf einer Planprüfsiebmaschine bestimmt. Die Sieblinien sind in Bild B1 im Anhang B dargestellt. Es wurde ein Siebsatz aus Maschensieben von 0,063; 0,09; 0,1; 0,125; 0,25; 0,5; 1 und 2 mm benutzt.

- Luftstrahlsiebung

Die Sieblinien der Zemente und Flugaschen wurden für die Korndurchmesser $> 40 \mu\text{m}$ durch Luftstrahlsiebung bestimmt. Dazu wurden die Siebgrößen 40, 50, 63, 90, 100, 125 und $200 \mu\text{m}$ verwendet.

- Lasergranulometrie

Das Verfahren der Lasergranulometrie wurde verwendet, um die Sieblinien der Zemente, Flugaschen und Kalksteinmehle zu ermitteln. Die Messung wurde als Nassdispergierung durchgeführt, d. h. die Proben werden in Isopropanol dispergiert. Das Lasergranulometer kann Sieblinien mit Hilfe unterschiedlicher Algorithmen auswerten. Für die Darstellung der Sieblinien wird eine modellunabhängige Volumenverteilung gewählt.

- Mikroskopie

Die Zemente, Flugaschen, Kalksteinmehle und die feine Gesteinskörnung wurden unter einem Durchlichtmikroskop auf ihre Kornform untersucht. Eine Probe von weniger als 1 g wurde auf ein Glasplättchen mit einer Trägerflüssigkeit aufgebracht und unter dem Lichtmikroskop betrachtet. Die visuelle Beschreibung der Kornform dient dem qualitativen Vergleich der Ausgangsstoffe. Dabei werden die Körner der Stoffe nach natürlicher, gerundeter und gebrochener, gedrungener Kornform unterschieden. Eine Betrachtung der Oberflächenbeschaffenheit (Mikrorauigkeit) konnte nicht durchgeführt werden. Deren Einfluss ist allerdings vernachlässigbar im Vergleich zum Einfluss der Kornform (Makrorauigkeit), die hier untersucht wird.

- Wasseranspruch nach Puntke W_P [Vol.-%]

Das Verfahren zur Bestimmung des Wasseranspruchs nach Puntke wird in /DAF03/, Anhang P.2, und in /PUN90/ beschrieben. Der Wasseranspruch der SVM wurde ohne die Zugabe von Fließmittel bestimmt.

Im Allgemeinen wird der Wasseranspruch nach Puntke durch Aufstoßen des Bechers (von Hand) bestimmt. Eigene Versuche haben gezeigt, dass dadurch der Sättigungspunkt oft überschritten wird, da zu viel Wasser hinzudosiert wird. Aus diesem Grund wurde hier der Versuch auf einem Vibrationstisch nach /DIN05a/ durchgeführt. Damit lässt sich der Sättigungspunkt genauer bestimmen, was auch bereits in eigenen Versuchen mit Glaskugeln gezeigt wurde.

5.2.3.3 Indirekte Prüfverfahren zur Ermittlung rheologischer Kenngrößen der SVM

Im Rahmen der Untersuchungen wurden das Setzfließmaß s_m und die Trichterauslaufzeit t_{Tr} als indirekte Prüfverfahren zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften herangezogen. Die Prüfungen wurden in Anlehnung an /DAF03/, Anhang M, durchgeführt. Die indirekten Messverfahren gleichen im Prinzip denen für SVB und unterscheiden sich nur durch die Abmessungen des Setztrichters (Haegermann-Trichter) und des Mörtel-V-Trichters (vgl. Bild 51). Für einen leicht verarbeitbaren SVM mit hoher Sedimentationsstabilität und guten selbstverdichtenden Eigenschaften sollte das Setzfließmaß ca. 270 mm betragen. Die Trichterauslaufzeit sollte 3 bis 10 Sekunden betragen. Die genannten Zahlen stellen Erfahrungswerte dar.

Das Setzfließmaß wird 6 Minuten und die Trichterauslaufzeit 11 Minuten nach Wasserezugabe bestimmt.

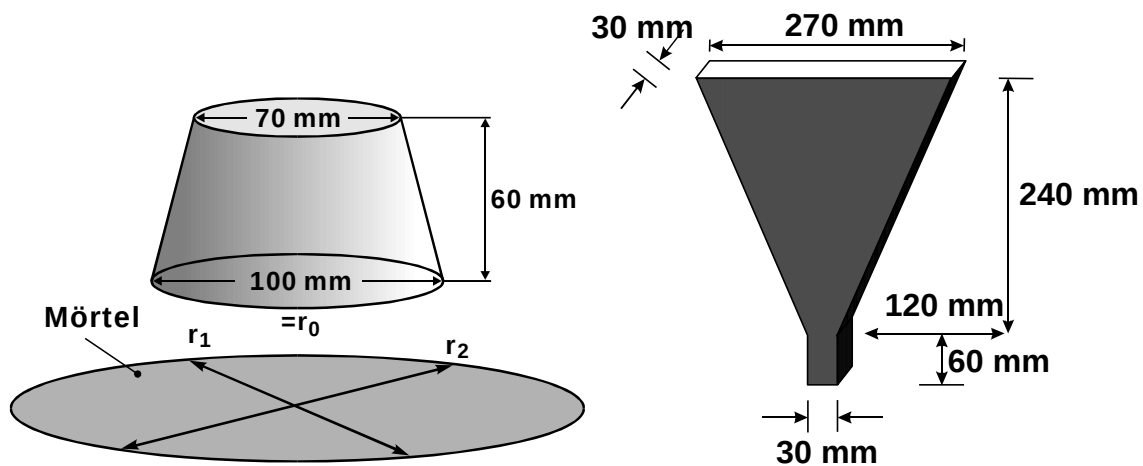


Bild 51: Setzfließmaß und Trichterauslaufversuch für SVM

5.2.3.4 Direkte Prüfverfahren zur Ermittlung rheologischer Kenngrößen von SVM – Viskomat NT

Um die für die Darstellung von Fließkurven notwendigen rheologischen Kennwerte ermitteln zu können, wurde das Rotationsviskosimeter Viskomat NT (vgl. Bild 52) eingesetzt.

Der Viskomat NT ist ein Rotationsviskosimeter mit Paddelgeometrie. Mit ihm lassen sich Substanzen untersuchen, deren Partikelgröße bis zu 2 mm betragen kann. Dadurch wird die Untersuchung von Mörteln möglich. Das Paddel ist so geformt, dass der Mörtel während der Messung permanent gemischt und somit ein Sedimentieren und Entmischen verhindert wird. Ein Abstreifer verhindert ein Ansetzen des Mörtels an der Behälterwand.

Der Viskomat NT arbeitet nach dem Couette-System, d. h. eine feste Messzelle (Paddel) taucht in einen rotierenden Probenbehälter (vgl. Bild 52). Der Viskomat NT ermittelt die Messgrößen Drehzahl und Drehmoment, die mit den rheologischen Größen Scherrate und Scherspannung korrelieren. Gleichzeitig werden die Zeit und die Temperatur aufgezeichnet. Die Temperatursensoren sind dabei im Messpaddel integriert. Dadurch wird die Temperaturmessung möglich, ohne die Strömungsverhältnisse zu beeinflussen. Über einen externen Kryostaten erfolgt die Temperierung der Mörtel.

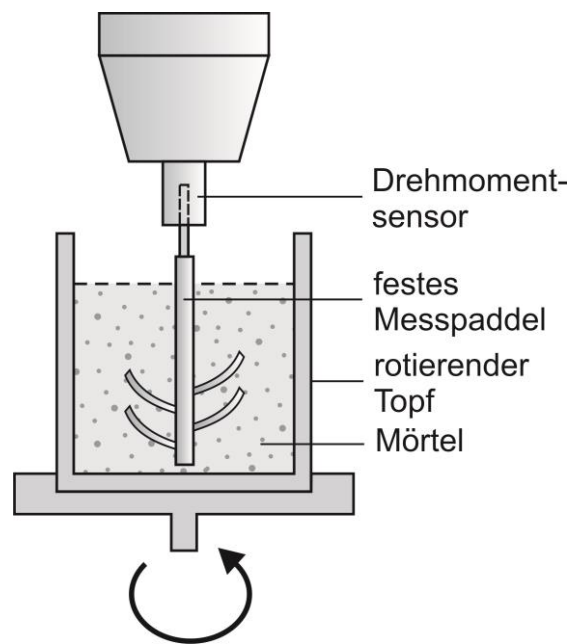


Bild 52: Prinzipskizze des Viskomats NT

Eine Bestimmung der absoluten rheologischen Kenngrößen ist nicht möglich, da aufgrund der im Viskomat NT verwendeten Paddelgeometrie keine abgescherte Fläche definiert und daher das Schergefälle nicht genau bestimmt werden kann (vgl. Kapitel 2.2.2.3). Das Ergebnis der Messung ist daher ein relatives Maß für das Fließverhalten. Vergleichende Untersuchungen sind dennoch möglich, solange die Randbedingungen dieselben sind (gleiches Paddel, gleiche Temperatur, gleiche Scherrate).

Mit dem Viskomat NT können Versuche mit konstantem oder mit variablem Scherprofil durchgeführt werden. Ein konstantes Scherprofil bildet die Grundlage für Ein-Punkt-Messungen. Bei einer vorgegebenen, konstanten Schergeschwindigkeit wird das Drehmoment über die Zeit gemessen. Dadurch lassen sich Vorgänge, wie z. B. Strukturbruch und Hydratation, in Abhängigkeit von der Zeit darstellen.

Voraussetzungen für die Ermittlung von Fließkurven sind sogenannte Zwei-Punkt-Messungen, d. h. es sind mindestens zwei unterschiedliche Schergeschwindigkeiten notwendig, um eine Fließkurve abbilden zu können. Der Viskomat NT ist in der Lage, variable Profile (Rampenprofile, vgl. Bild 53) zu verwenden, d. h. die Schergeschwindigkeit nimmt linear ab (oder zu). Dadurch stehen beliebig viele Messwerte zur Konstruktion der Fließkurve zur Verfügung, und der Verlauf der Fließkurve wird genauer abgebildet. Durch Regression lässt sich die Fließkurve mathematisch beschreiben. Dieses ist bei SVM entweder nach Bingham (lineares Verhalten) oder nach Herschel-Bulkley (dilatantes Verhalten) möglich (vgl. Bild 54).

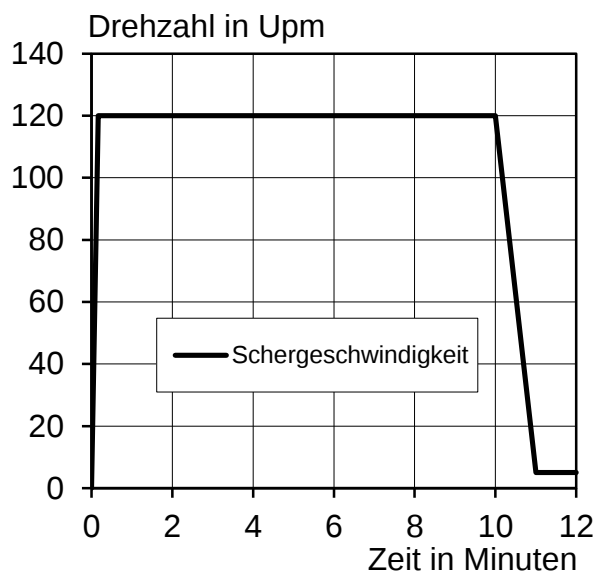


Bild 53: Variables Scherprofil für den Viskomat NT

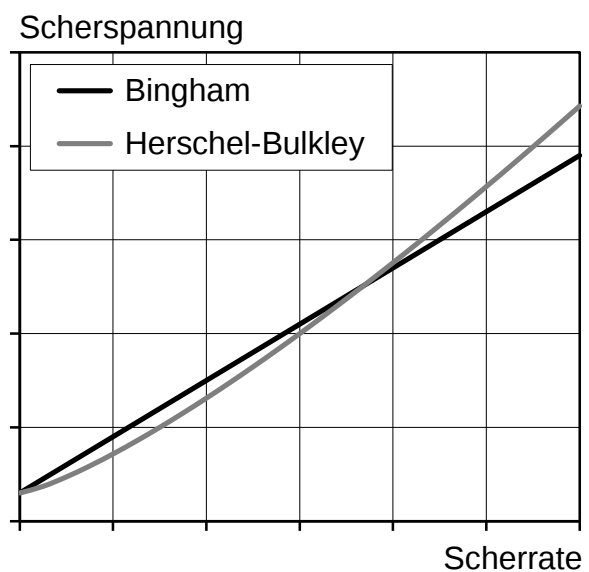


Bild 54: Qualitativer Verlauf von Fließkurven für SVM: linear (Bingham) bzw. dilatant (Herschel-Bulkley)

Für SVM ist die 10-minütige Scherung der Probe mit 120 Upm (Umdrehungen pro Minute) notwendig, um den Strukturbruch hervorzurufen und diesen verfälschenden Einfluss auf die Fließkurven sicher ausschließen zu können. Aus diesem Grund wird in der Bionntechnologie häufig der abfallende Ast ausgewertet [BRA04].

Die mathematische Beschreibung von Fließkurven wurde in Kapitel 2 erläutert. Die Formulierung nach Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$) ist allgemeingültig. Durch den Fließindex n ist sowohl strukturviskoses ($n < 1$) als auch dilatantes ($n > 1$) Fließverhalten darstellbar. Das Bingham-Modell ($\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$) entspricht einem Sonderfall der Herschel-Bulkley Beziehung mit $n = 1$. Fließkurven von SVM, deren Auswertungen nach Bingham mit einem hohen Bestimmtheitsmaß ($R^2 > 0,99$) zu Gleichungen mit positiven Fließgrenzen ($\tau_0 > 0$) führen, können mit ausreichender Genauigkeit als Bingham-Körper betrachtet werden. Bei negativen Fließgrenzen oder Bestimmtheitsmaßen $\leq 0,99$ erfolgt die Auswertung nach Herschel-Bulkley.

Obwohl sich aufgrund der Geometrie des Messtopfes und -paddels keine ideale rotationsymmetrische Scherfläche einstellt und der Schervorgang somit in einem dreidimensionalen Störbereich abläuft, sind die gemessenen Drehmomente direkt proportional zur Fließgrenze und Viskosität des untersuchten Prüfguts [TAT83a]. Es handelt sich jedoch nicht um absolute physikalische Größen. Die relativen Größen für das Bingham-Modell werden deshalb durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$T = g + h \cdot N \quad (40)$$

Die Größen g und h werden als relative Fließgrenze in $\text{N}\cdot\text{mm}$ bzw. relative Viskosität in $[\text{Nmm}\cdot\text{min}]$ bezeichnet und können direkt aus der oberen Gleichung berechnet werden (vgl. Gl. (40)).

Für die Herschel & Bulkley-Approximation werden die mit dem Modell berechneten Werte relative Fließgrenze F und relative Viskosität V genannt. Die relative Viskosität V ist eine mittlere Viskosität, die als Steigung der Herschel & Bulkley-Funktion bei einer Drehgeschwindigkeit $N = 60 \text{ Upm}$ durch die erste Ableitung gebildet wurde. Die Drehgeschwindigkeit $N = 60 \text{ Upm}$ wurde ausgewählt, weil diese einer mittleren Scherbeanspruchung entspricht, in etwa der des Betons beim Einfüllen in ein Bauteil.

5.2.4 Ergebnisse der Ausgangsstoffprüfung und Aufstellen von Idealsieblinien

5.2.4.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Die chemisch-mineralogischen Zusammensetzungen der Zemente sind in Tabelle A4, Anhang A, gegenübergestellt. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen ist erkennbar, dass die Zemente Z1 und Z2 in ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung gleich sind und sich nur in ihrer Mahlfineinheit unterscheiden. Eine Änderung der Frischmorteleigenschaften bei dem Austausch dieser Zemente ist somit im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen zurückzuführen. Beim Zement Z3 handelt es sich um einen Hochofenzement, der sich in seiner Zusammensetzung signifikant von den Portlandzementen Z1 bzw. Z2 unterscheidet, und daher nur punktuell für vergleichende Untersuchungen eingesetzt wird.

Die Dichten der Ausgangsstoffe sind in Tabelle A8, Anhang A, dargestellt. Bei den Flugaschen FA3, FA4 und den fraktionierten Flugaschen FA3.1, FA3.3, FA3.3, FA4.1, FA4.2 und FA4.3 fällt auf, dass die Dichten kleiner werden, je gröber die Sieblinien der Stoffe sind. Dieses wird auf den Anteil an Hohlkugeln (Cenospheren) und unverbrannten Kokspartikeln zurückgeführt. Cenospheren und Kokspartikel haben geringere Dichten als die restlichen Körner. Beide sind, unabhängig von der Art der Feuerung, überwiegend in den Korngruppen mit größeren Korndurchmessern vorzufinden (vgl. /SYB88/). Die Dichte der Flugaschen nimmt von FA3.1 (sehr feine Fraktion) über FA3.2 (feine Fraktion), FA3 bis hin zu FA3.3 (grobe Fraktion) von 2.470 kg/m^3 bis auf 2.080 kg/m^3 deutlich ab. Gleiches gilt für FA4.1, FA4.2, FA4 und FA4.3, bei denen die Dichte von 2.510 kg/m^3 bis auf 2.360 kg/m^3 abnimmt. Die lichtmikroskopischen Untersuchungen ergaben, dass die

Flugasche FA4 aus der Schmelzkammerfeuerung erwartungsgemäß eine deutlich kugeligere Kornform aufwies als die Flugaschen aus der Trockenfeuerung.

5.2.4.2 Modellsieblinien der Zemente und Flugaschen

Die Berechnungen der Modellsieblinien erfolgen alle nach dem gleichen Prinzip. Da die Luftstrahlsiebung eine sehr genaue Messmethode darstellt, werden die Siebdurchgänge für die Korngrößendurchmesser 40 μm , 50 μm , 63 μm , 90 μm , 100 μm , 125 μm und 200 μm aus den Luftstrahlsiebungen übernommen. Die Anteile $< 40 \mu\text{m}$ werden aus den Messungen des Lasergranulometers übernommen und mit einem Faktor so multipliziert, dass die Verläufe der Sieblinien stetig sind.

In Bild 55 sind die Modellsieblinien der Zemente Z1, Z2 und Z3 abgebildet. Der Zement Z1 ist ein grober, Z2 ein feiner Zement. Der Zement Z3 ist gröber als Z2 und feiner als Z1.

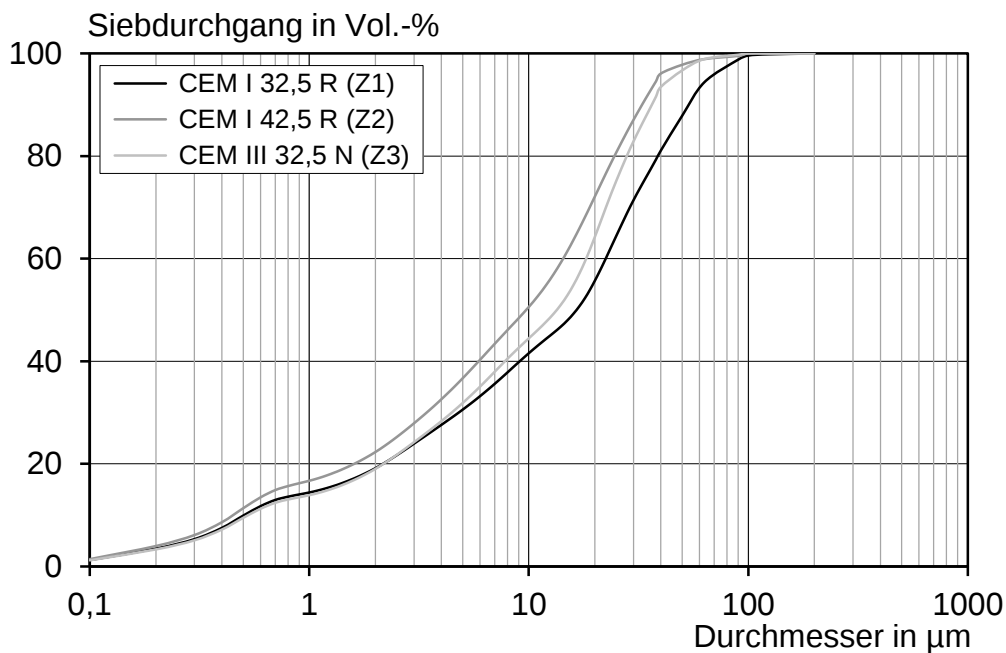


Bild 55: Modellsieblinien der Zemente Z1, Z2 und Z3

In Bild 56 sind die Modellsieblinien der Flugaschen FA1, FA2, FA3 und FA4 abgebildet. Im Bereich der Korndurchmesser $> 40 \mu\text{m}$ ist die Flugasche FA1 die feinste, gefolgt von der Flugasche FA4, Flugasche FA2 ist die gröbste. Die Sieblinie der Flugasche FA1 ist enggestuft, die Sieblinien der beiden anderen Flugaschen weitgestuft.

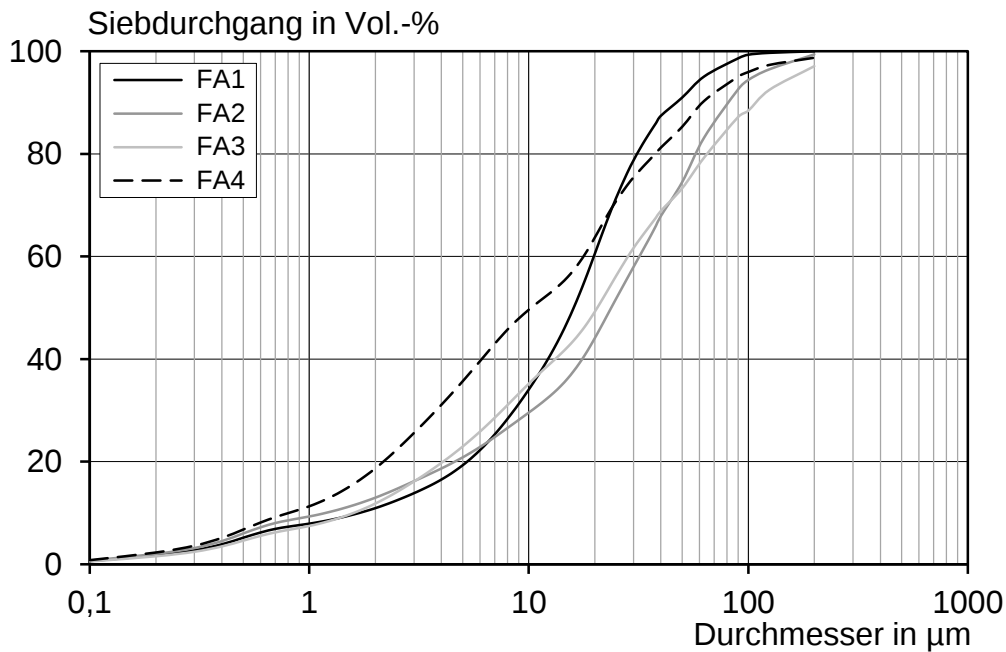


Bild 56: Modellsiebblinien der Flugaschen FA1, FA2, FA3 und FA4

Die Modellsiebblinien der fraktionierten Flugaschen sind in den Bildern B2 und B3, Anhang B, dargestellt.

5.2.4.3 Bestimmung der Kornform

- Kornform der Zemente

Unter einem Durchlichtmikroskop wurde die Kornform der Ausgangsstoffe visuell beurteilt (vgl. Kapitel 5.2.3.2). Dabei werden die Körner einerseits nach gebrochener und natürlicher Kornform unterschieden, andererseits werden die Stoffe qualitativ nach den Anteilen gerundeter, kugelig oder gedrungener und unregelmäßig geformter Körner beurteilt.

Zement ist ein Rohstoff, der herstellungsbedingt aus gebrochenen Körnern besteht. Dieses bestätigt sich bei der Betrachtung der Zemente Z1, Z2 und Z3 unter dem Lichtmikroskop. Die Kornform der Zementkörner ist für alle Korndurchmesser gleich. Alle Körner haben gebrochene, unregelmäßige Kornformen. Runde, kugelförmige Körner sind nicht vorhanden. Die Zemente wurden zusätzlich bei der Reaktion mit Wasser beobachtet. Die Betrachtung fand sowohl 1 Minute als auch 5 Minuten nach Wasserzugabe statt. Eine Änderung der Kornform bzw. der Oberflächenbeschaffenheit konnte unter dem Mikroskop nicht beobachtet werden.

- Kornform der Flugaschen

Die vorliegenden Flugaschen stammen aus Trockenfeuerungen (FA1, FA2, FA3) bzw. aus Schmelzkammerfeuerungen (FA4). Es ist bekannt, dass Flugaschen aus Schmelzkammerfeuerungen für alle Korndurchmesser fast ausschließlich aus runden, kugelförmigen Körnern bestehen /SYB88/. Dieses konnte auch bei der Betrachtung von FA4 festgestellt werden. Flugaschen aus Trockenfeuerung enthalten sowohl kugelige als auch unregelmäßig geformte Körner. Dabei sind Körner mit kleinen Durchmessern ausschließlich kugelförmig. Je größer die Korndurchmesser werden, desto höher ist der Anteil unregelmäßig geformter Körner /SYB88/. Dieses wird durch die visuelle Betrachtung der Trockenfeuerungsflugaschen bestätigt. Die fraktionierten Flugaschen FA3.1 und FA3.2 sowie FA4.1 und FA4.2 bestehen zum Großteil aus Körnern mit kleinen Durchmessern, deren Form fast ausschließlich kugelförmig ist. In Flugaschen sind stets Cenospheren und Kokspartikel vorhanden, unabhängig von der Art der Feuerung. Cenospheren sind Hohlkugeln, die überwiegend große Durchmesser haben. Kokspartikel sind porös und haben gedrungene, unregelmäßige Kornformen. Sie tauchen ebenfalls nur in den groben Korngruppen auf /SYB88/. Dieses konnte bei den Flugaschen FA3, FA3.3, FA4 und FA4.3 bestätigt werden. Dabei ist vor allem in den fraktionierten Flugaschen FA3.3 und FA4.3 der Anteil an Kokspartikeln sehr hoch.

- Kornform der Sande

Die verwendeten Sande bestehen überwiegend aus natürlicher Gesteinskörnung. Die Sande stammen alle aus dem gleichen Naturvorkommen und haben daher, unabhängig von den Korngruppen und Korndurchmessern, die gleiche runde Kornform. Die punktuell verwendeten Brechsande zeigen erwartungsgemäß eine gedrungene, kantige Kornform.

5.2.4.4 Idealsieblinien für vergleichende Untersuchungen

- Wahl einer möglichen Idealsieblinie für SVM

Die Sieblinien der untersuchten SVM werden mit den in Kapitel 2.5.3.2 beschriebenen Idealsieblinien verglichen. Dabei werden die Idealsieblinien von Fuller & Thompson und Funk & Dinger verwendet (vgl. Bild 57). Für beide Gleichungen wird ein Größtkorn von 1000 μm angesetzt und für die Formel nach Funk & Dinger zusätzlich ein Kleinstkorn von 0,1 μm sowie ein Exponent von $n = 0,37$ zur Berücksichtigung der Kornform. Der Anteil $> 1000 \mu\text{m}$ stellt das Überkorn dar, der Anteil $< 0,1 \mu\text{m}$ das Unterkorn. Die Formel nach

Andreasen & Andersen wird nicht benutzt, da sie einem Sonderfall der Gleichung nach Funk & Dinger (ohne Berücksichtigung des Kleinstkorns) entspricht.

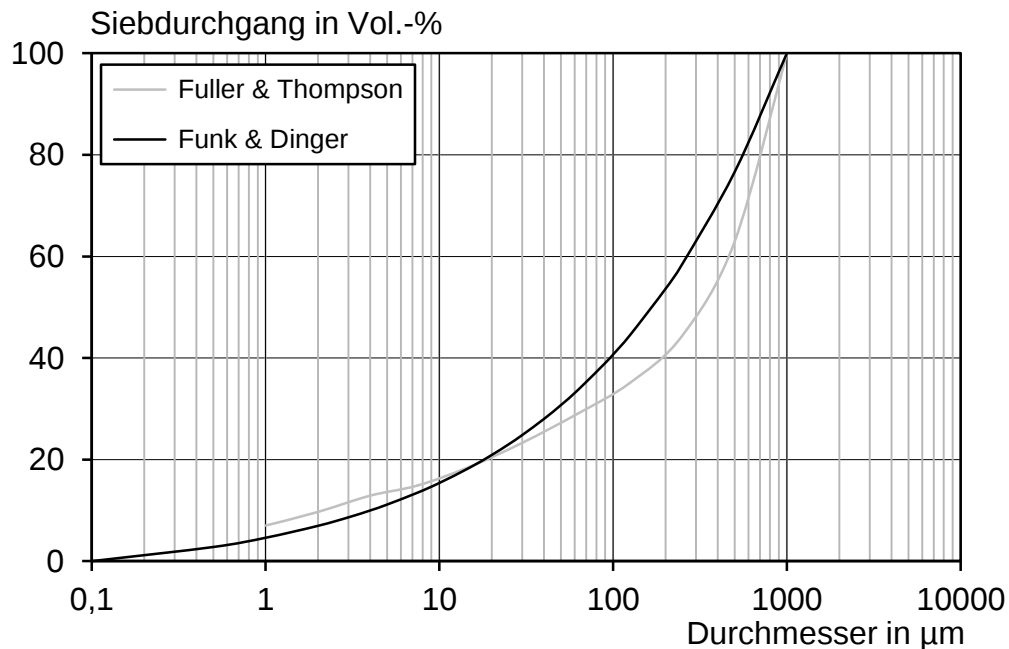


Bild 57: Vergleich der Idealsieblinie nach Fuller & Thompson (mit $D = 1000 \mu\text{m}$) und Funk & Dinger (mit $D = 1000 \mu\text{m}$, $d = 0,1 \mu\text{m}$ und $n = 0,37$)

Eine Auswertung der Sieblinien der SVM zeigt, dass diese näher an der Idealsieblinie nach Funk & Dinger als an der Idealsieblinie nach Fuller & Thompson liegen. In den Bildern 58 und 59 ist dieses beispielhaft für verschiedene SVM dargestellt. Daher werden die granulometrischen Kenngrößen mit den Idealsieblinien nach Funk & Dinger verglichen.

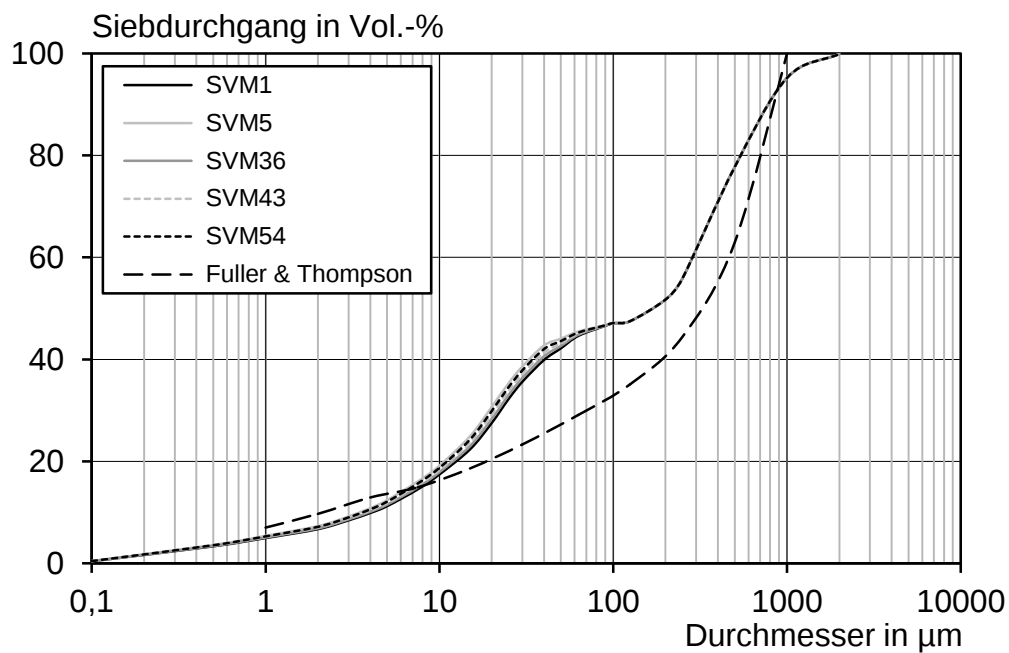


Bild 58: Sieblinien der SVM1, 5, 36, 43 und 54 im Vergleich mit der Idealsieblinie nach Fuller & Thompson

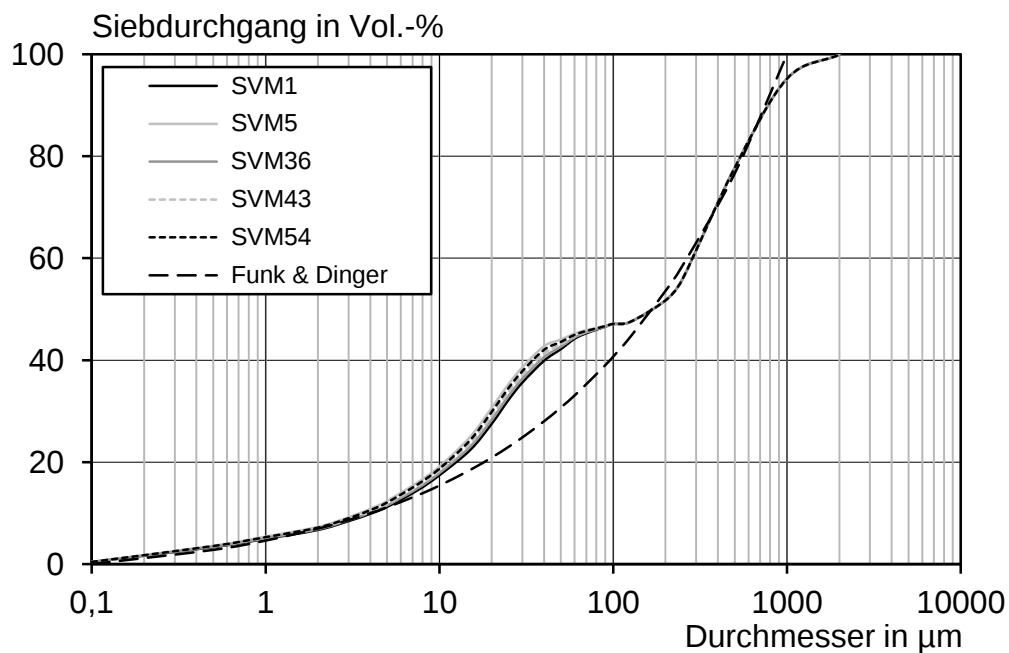


Bild 59: Sieblinien der SVM1, 5, 36, 43 und 54 im Vergleich mit der Idealsieblinie nach Funk & Dinger

- Granulometrische Kenngrößen

Um die SVM mit den rheologischen Kenngrößen und mit den Idealsieblinien nach Funk & Dinger (bzw. Fuller & Thompson) vergleichen zu können, werden an dieser Stelle

Kenngrößen definiert, die zur Charakterisierung der Sieblinien verschiedener SVM geeignet sind.

Es wird davon ausgegangen, dass die Idealsieblinie nach Funk & Dinger für SVM ein optimales rheologisches Verhalten liefert. Je näher die Sieblinie eines SVM an der Sieblinie von Funk & Dinger liegt, desto besser ist die Verarbeitbarkeit des SVM, je weiter sich die Sieblinie von der Sieblinie nach Funk & Dinger entfernt, desto mehr verschlechtert sich die Verarbeitbarkeit des SVM. Bei gleicher Kornform konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden, die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

Eine beliebige Sieblinie liegt umso näher an der Idealsieblinie von Funk & Dinger, je kleiner die Differenz zwischen den Siebdurchgängen der einzelnen Korngrößendurchmesser ist. Werden diese Differenzen der Siebdurchgänge quadriert und anschließend aufsummiert, so erhält man die Summe der Fehlerquadrate. An dieser Stelle wird der einfacheren, verständlicheren Darstellung wegen der Begriff „Siebliendifferenz“ definiert. Je kleiner dieser Wert ist, desto näher liegt die Sieblinie eines SVM an der Idealsieblinie von Funk & Dinger. Die Siebliendifferenz stellt somit eine granulometrische Kenngröße dar. Mit dieser können Zusammenhänge zwischen der Granulometrie und dem rheologischen Verhalten von SVM untersucht werden.

5.2.5 Korrelation von rheologischen und granulometrischen Kenngrößen

5.2.5.1 Einfluss der Änderung von Zementsieblinien

An den Mischungen SVM1, 5, 36, 43 und 54 wird der Einfluss einer Änderung der Zementsieblinien auf die rheologischen Eigenschaften untersucht. Die Sieblinien dieser SVM sind in Bild 59 dargestellt. SVM1 besteht aus Zement mit grober Sieblinie (Z1), SVM5 aus Zement mit feiner Sieblinie (Z2). Bei SVM36 wurden 25 Vol.-%, bei SVM43 50 Vol.-% und bei SVM54 75 Vol.-% des Zements Z1 gegen Zement Z2 ausgetauscht.

Da die Sieblinien eng beieinander liegen, sind zur besseren Unterscheidung in Bild B4, Anhang B, die Zementsieblinien dieser SVM separat aufgeführt.

Die durch Messung mit dem Viskomat NT ermittelten Fließkurven sind in Bild 60 und Bild B5, Anhang B, dargestellt. In diesen sind zusätzlich die gemäß Herschel-Bulkley (vgl. Kapitel 2.3.1) ermittelten Fließkurven (gestrichelte Graphen) mit den zugehörigen Funktionsgleichungen inklusive des Bestimmtheitsmaßes abgebildet.

Die Diagramme zeigen, dass SVM1 ein niederviskoser Mörtel ist. Mit zunehmender Feinheit der Sieblinie steigt die Viskosität des Mörtels. SVM5 besitzt die ungünstigsten Verarbeitungseigenschaften.

Die Fließkurven zeigen alle ein dilatantes Fließverhalten. Dieses ist auf die Reibung zwischen den Körnern zurückzuführen. Die eingesetzte Flugasche (FA3) stammt aus einer Trockenfeuerung und enthält daher eine große Anzahl unregelmäßig geformter Körner (vgl. Kapitel 5.2.4.1). Dadurch nimmt bei steigender Beanspruchung die Reibung zwischen den Körnern überproportional zu. Dieses Verhalten wird als dilatantes Kornscheren bezeichnet.

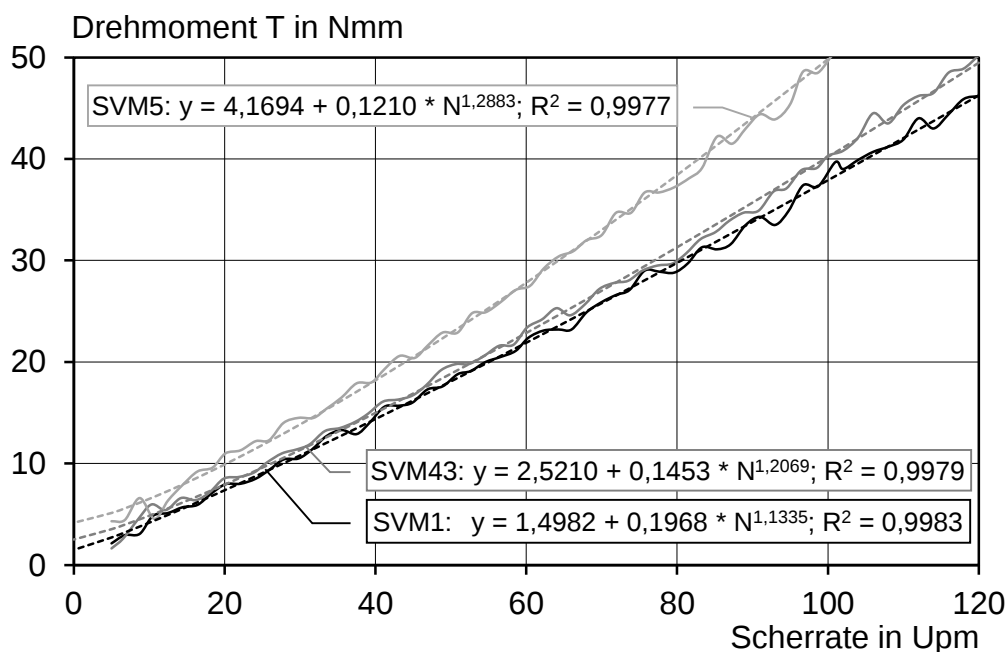


Bild 60: Fließkurven aus den Messwerten und aus der polynomischen Regression der SVM1, SVM5 und SVM43

Der Vergleich der Fließkurven von SVM1 und SVM5 zeigt, dass SVM mit guten Verarbeitungseigenschaften hergestellt werden können, indem ein grober Zement gemeinsam mit einer feinen Flugasche eingesetzt wird (SVM1). Ein feiner Zement in Kombination mit einer feinen Flugasche (SVM5) zeigt ein deutlich schlechteres rheologisches Verhalten. Dies ist damit zu begründen, dass der Anteil der Körner im Bereich zwischen $10\ \mu m$ und $63\ \mu m$ höher und dadurch die Gesamtsieblinie nicht optimal abgestimmt ist. Somit kann das Zwickelwasser nicht aus den Zwickelräumen verdrängt werden, infolgedessen verschlechtern sich die rheologischen Eigenschaften des SVM. Dazu kommt der höhere

Wasseranspruch des SVM5 im Vergleich zu dem SVM1 aufgrund der Verwendung eines Zements mit einer höheren Feinheit (vgl. Kapitel 5.2.4).

Ein Vergleich zwischen granulometrischen und rheologischen Kenngrößen liefert weitere Aufschlüsse. Bild 61 zeigt den Vergleich zwischen der Siebliniendifferenz und den rheologischen Kenngrößen Viskosität bzw. Trichterauslaufzeit. Die Viskosität wurde aus der Gleichung nach Herschel-Bulkley berechnet. Die Viskosität stellt die Steigung des Graphen an der Stelle 60 Upm dar. Bild 61 zeigt, dass mit sinkender Siebliniendifferenz die Viskosität und die Trichterauslaufzeit abnehmen. Mit kleiner werdender Siebliniendifferenz liegen die Sieblinien näher an der Idealsieblinie nach Funk & Dinger. Die Zwickelräume werden besser mit Feststoffen gefüllt, das dadurch verdrängte Wasser lagert sich um die Körner und vergrößert so den Partikelabstand. Dadurch wird die innere Reibung reduziert und die Viskosität, die die innere Reibung während des Fließvorgangs beschreibt, kleiner. Gleiches gilt für die Trichterauslaufzeit. Die Zusammenhänge deuten an, dass es ganz offensichtlich eine Grenze der Siebliniendifferenz gibt, aus der eine minimale Viskosität resultiert, im vorliegenden Fall bei ca. 0,38 Nmm · min.

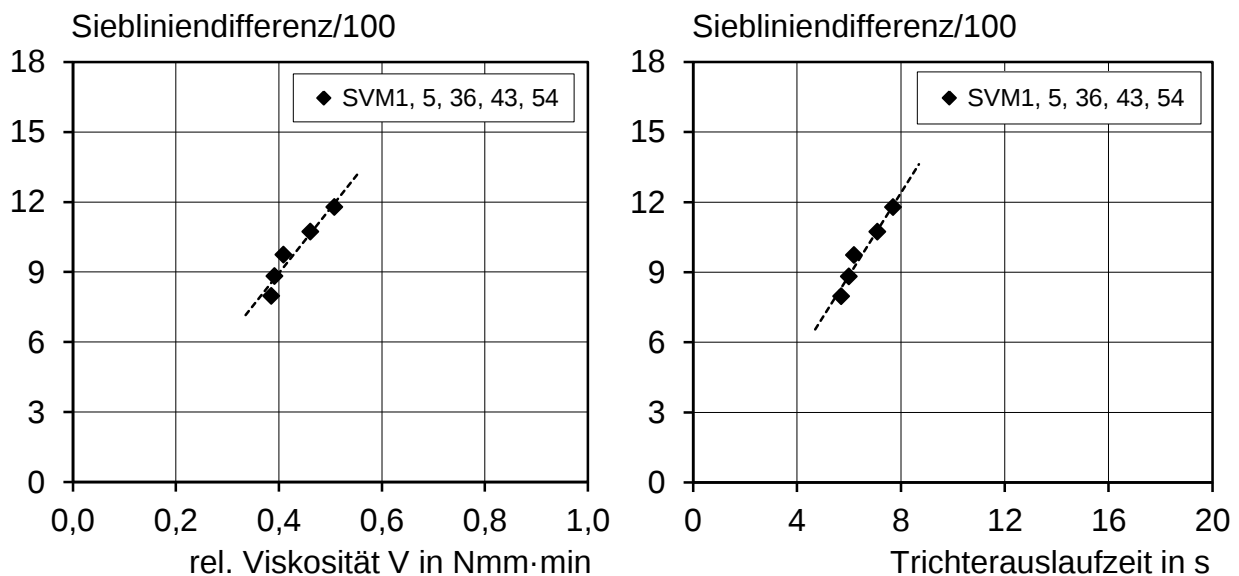


Bild 61: Vergleich der Siebliniendifferenz mit der relativen Viskosität bzw. der Trichterauslaufzeit (SVM1, 5, 36, 43 und 54)

Zwischen Viskosität und Trichterauslaufzeit, die beide von der inneren Reibung während des Fließvorgangs abhängen, besteht demzufolge ebenfalls eine hohe Korrelation (vgl. Bild B10, Anhang B), was bereits ebenfalls in /BRA04/ festgestellt wurde.

Mit kleiner werdender Siebliniendifferenz verringert sich die Fließgrenze, gleichzeitig nimmt das Setzfließmaß zu (vgl. Bild 62). Ursache hierfür ist ebenfalls eine bessere Sieblinie.

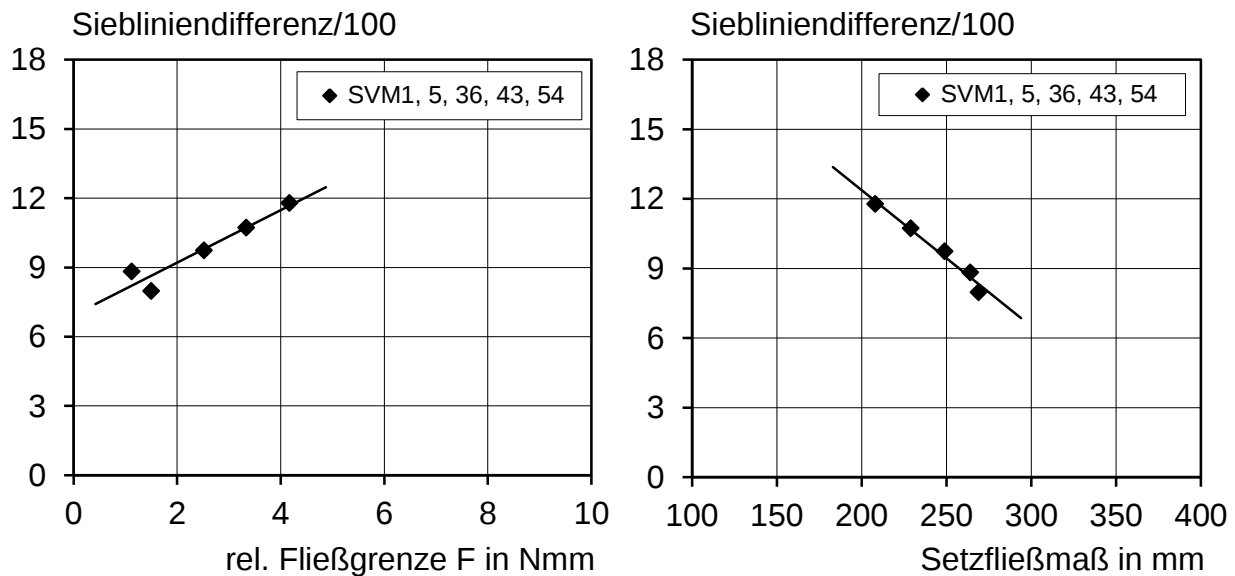


Bild 62: Vergleich der Siebliniendifferenz mit der relativen Fließgrenze bzw. dem Setzfließmaß (SVM1, 5, 36, 43 und 54)

Der oben beschriebene Zusammenhang zwischen Siebliniendifferenz und dem aus den Zwickelräumen verdrängten Wasser lässt sich durch die Bestimmung des Wasseranspruchs nach Puntke veranschaulichen. Je niedriger die Siebliniendifferenz ist, desto höher ist die Packungsdichte, d. h. der Anteil an Zwickelräumen wird geringer. Somit steht mehr Wasser rheologisch zur Verfügung. Aus diesem Grund wird der Wasseranspruch geringer, je kleiner die Siebliniendifferenz ist (vgl. Bild 63 links).

Die Frischmörteltemperatur zeigt ebenfalls eine starke Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung (vgl. Bild 63 rechts). Die Ausgangsstoffe der SVM hatten vor dem Mischen eine Temperatur von 20 °C. Der Anstieg der Frischmörteltemperatur setzt sich zusammen aus der Hydratationswärme und der durch den Mischvorgang eingebrachten Energie. Da die Zemente chemisch gesehen als ähnlich anzusehen sind, wird die Hydratationswärme zumindest in den ersten Minuten ungefähr gleich sein. Daher wird der Anstieg der Frischmörteltemperatur auf den Mischvorgang zurückgeführt. Die Frischmörteltemperatur steigt bei einer optimierten Sieblinie aufgrund des zur Verfügung stehenden Zwickelwassers und des damit verbundenen größeren Partikelabstands weniger stark an.

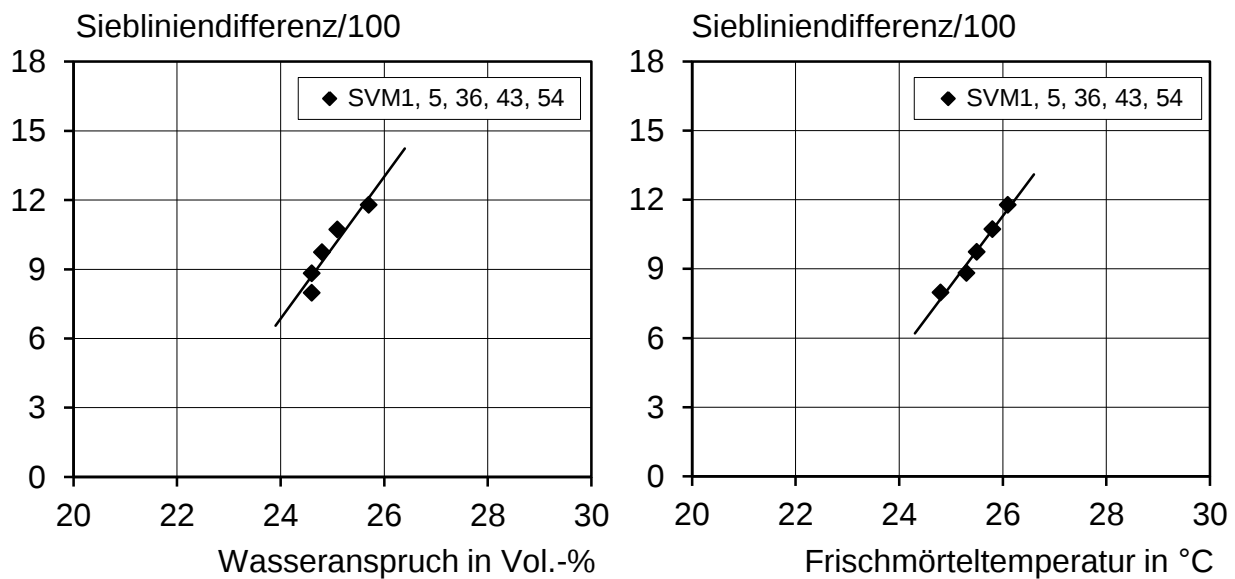


Bild 63: Vergleich der Siebliniendifferenz mit dem Wasseranspruch bzw. der Frishmörteltemperatur (SVM1, 5, 36, 43 und 54)

Beim Vergleich des Wasseranspruchs W_P mit den aus indirekten Versuchen ermittelten rheologischen Kenngrößen s_m und t_{Tr} ist ein linearer Zusammenhang festzustellen. Der Wassergehalt wurde bei allen Versuchen konstant gehalten. Je niedriger der Wasseranspruch einer Mischung ist, desto mehr freies Wasser steht zur Verbesserung der Fließigenschaften zur Verfügung (vgl. Bild 64).

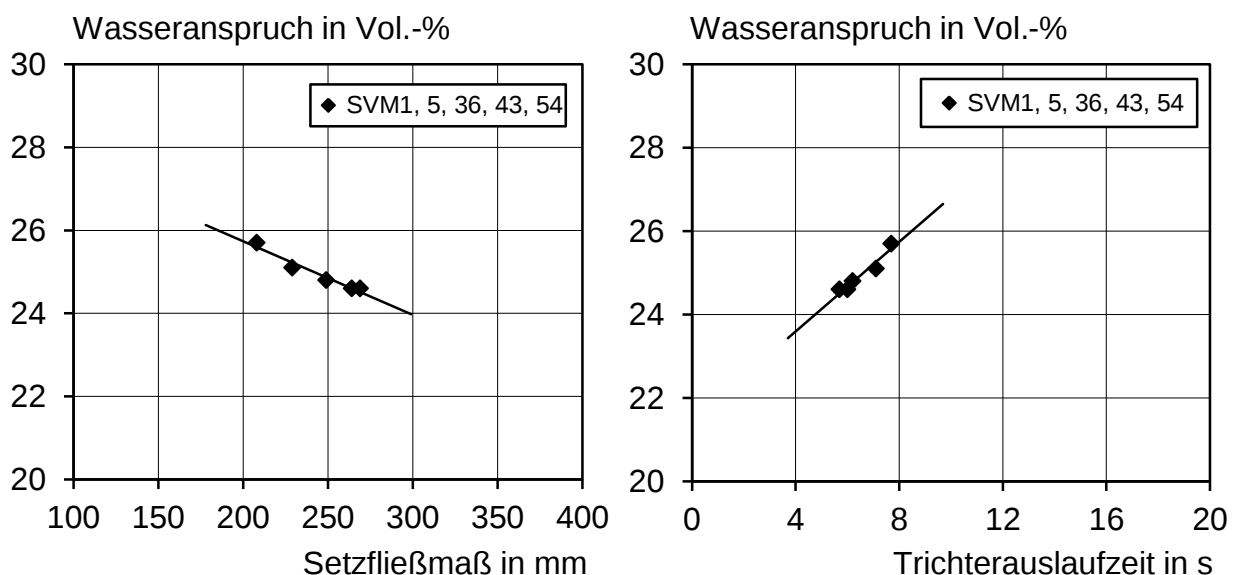


Bild 64: Vergleich des Wasseranspruchs mit dem Setzfließmaß und der Trichterauslaufzeit (SVM1, 5, 36, 43 und 54)

Die Kenngrößen $F - s_m$, $t_{Tr} - s_m$, $T - s_m$, $\dot{\gamma} - s_m$, $\dot{\gamma} - W_P$, $T - t_{Tr}$, $T - W_P$ und $\dot{\gamma} - T$ zeigen ebenfalls eine gute Korrelation (vgl. Bilder B6 bis B11, Anhang B).

Die in diesem Kapitel analysierten Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass die rheologischen Eigenschaften von SVM in direktem Zusammenhang zu der Granulometrie stehen. Je näher eine Sieblinie an der Idealsieblinie nach Funk & Dinger liegt, desto besser sind die rheologischen Eigenschaften des SVM. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass ein SVM aus feinem Zement und feiner Flugasche schwer, ein SVM aus grobem Zement und feiner Flugasche dagegen gut verarbeitbar ist. Beim Einsatz einer Trockenfeuerungsflugasche liegt ein dilatantes Fließverhalten vor.

5.2.5.2 Einfluss der Sieblinienänderung der Schmelzkammerflugasche FA4

An den Mischungen SVM7 und SVM16 bis SVM23 wurde der Einfluss einer Änderung der Sieblinien einer Schmelzkammerflugasche auf die rheologischen Eigenschaften untersucht. SVM7 wurde durch eine geeignete Fließmitteldosierung auf ein Setzfließmaß von 270 mm eingestellt. SVM16 bis SVM23 enthalten die gleiche Menge Fließmittel, sie unterscheiden sich aber in der Zusammensetzung des Flugascheanteils.

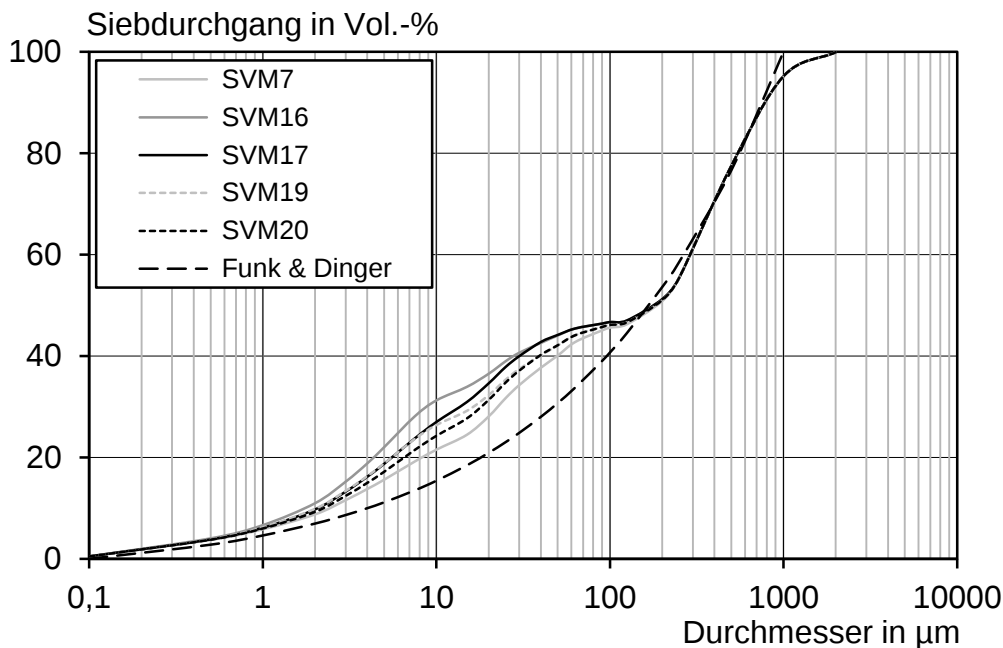


Bild 65: Sieblinien der SVM7, SVM16, SVM17, SVM19 und SVM20 im Vergleich mit der Idealsieblinie nach Funk & Dinger

Die Sieblinien der SVM7, SVM16, SVM17, SVM19, SVM20 und die Idealsieblinie nach Funk & Dinger sind in Bild 65 dargestellt. Diese Sieblinien wurden ausgewählt, weil sie eine deutliche Abstufung zeigen. Die Sieblinien der übrigen SVM dieser Serie sind in Bild B11, Anhang B, abgebildet. Zur besseren Unterscheidung sind in den Bildern B12 und B13, Anhang B, die Zement- und Flugascheanteile separat dargestellt. SVM16 hat die feinste, SVM18 die gröbste Sieblinie.

Die durch Messung mit dem Viskomat NT ermittelten Fließkurven sind in Bild 66 und Bild B14, Anhang B, dargestellt. In diesen sind zusätzlich die gemäß Bingham bzw. Herschel & Bulkley (vgl. Kapitel 2.3.1, Tabelle 1) ermittelten Fließkurven (gestrichelte Linien) mit den zugehörigen Funktionsgleichungen, inklusive des Bestimmtheitsmaßes, abgebildet.

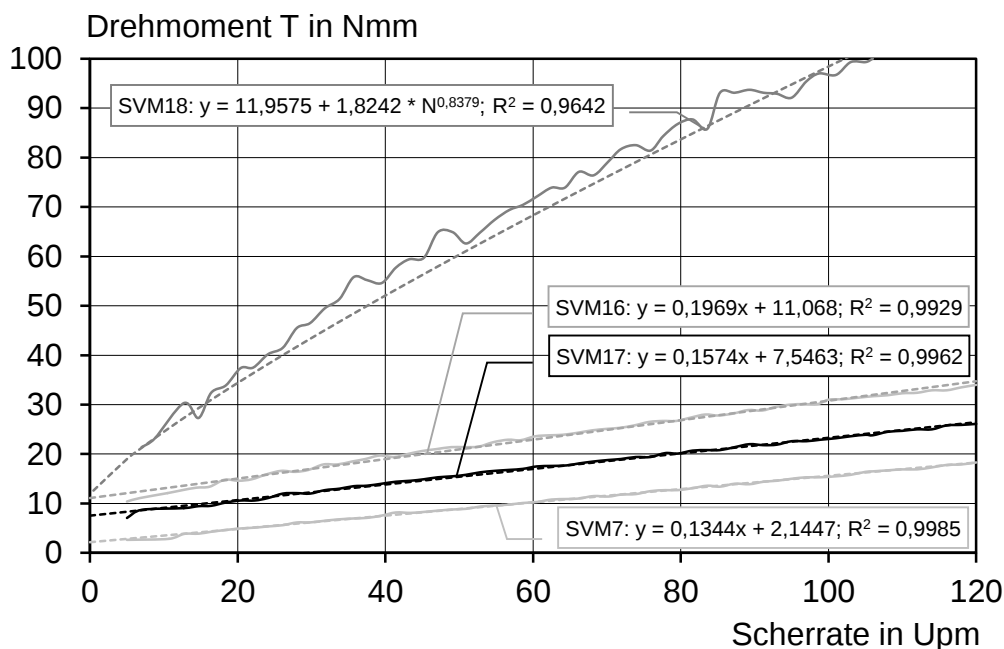


Bild 66: Fließkurven aus den Messwerten und aus der linearen bzw. polynomischen Regression der SVM7, SVM16, SVM17 und SVM18

Der Vergleich der Fließkurven zeigt, dass alle SVM Bingham-Körper sind, mit Ausnahme von SVM18. Dieser wurde mit Flugasche FA4.3 hergestellt, die einen vergleichsweise hohen Anteil an Kokspartikeln enthält. Diese Kokspartikel absorbieren neben Wasser vermutlich einen großen Teil des Fließmittels. Dadurch verschlechtern sich die rheologischen Eigenschaften, insbesondere die Viskosität und die obere Grenzscher-spannung nehmen stark zu. Die Fließkurve von SVM18 zeigt ein strukturviskoses Verhalten, wie es häufig bei Mörteln (nicht SVM) beobachtet wird. SVM18 erreicht ein

Setzfließmaß von 150 mm und weist demzufolge keine selbstverdichtenden Eigenschaften auf. Aus diesem Grund wird SVM18 für die Berechnungen der in diesem Kapitel diskutierten Korrelationen nicht berücksichtigt.

Alle SVM (bis auf SVM18) zeigen ein lineares Fließverhalten, das auf die Kornform zurückgeführt wird. Die eingesetzten Flugaschen enthalten viele runde, kugelförmige Körner, da sie durch Schmelzkammerfeuerungen entstehen. Dadurch ist die Reibung zwischen den Körnern gering, und es kommt nicht zum dilatanten Kornscheren, welches z. B. bei SVM1, SVM5, SVM36, SVM43 und SVM54 beobachtet wurde (vgl. Kapitel 5.2.5). Auffallend sind die kleinen Steigungen der Fließkurven, d. h. es handelt sich hier um niederviskose SVM.

Bild 67 zeigt den Vergleich zwischen der Siebliniendifferenz und den rheologischen Kenngrößen rel. Fließgrenze bzw. Setzfließmaß. Die zuvor gezeigten Zusammenhänge werden in der Tendenz vollumfänglich bestätigt. Allerdings zeigen die Absolutwerte, dass infolge zusätzlich veränderter Parameter (Kornform, Zusammensetzung) etwas veränderte Beziehungen entstehen. Ebenfalls gibt es eine gute Korrelation zwischen der Siebliniendifferenz und dem Wasseranspruch bzw. der Frischmörteltemperatur (vgl. Bild 68).

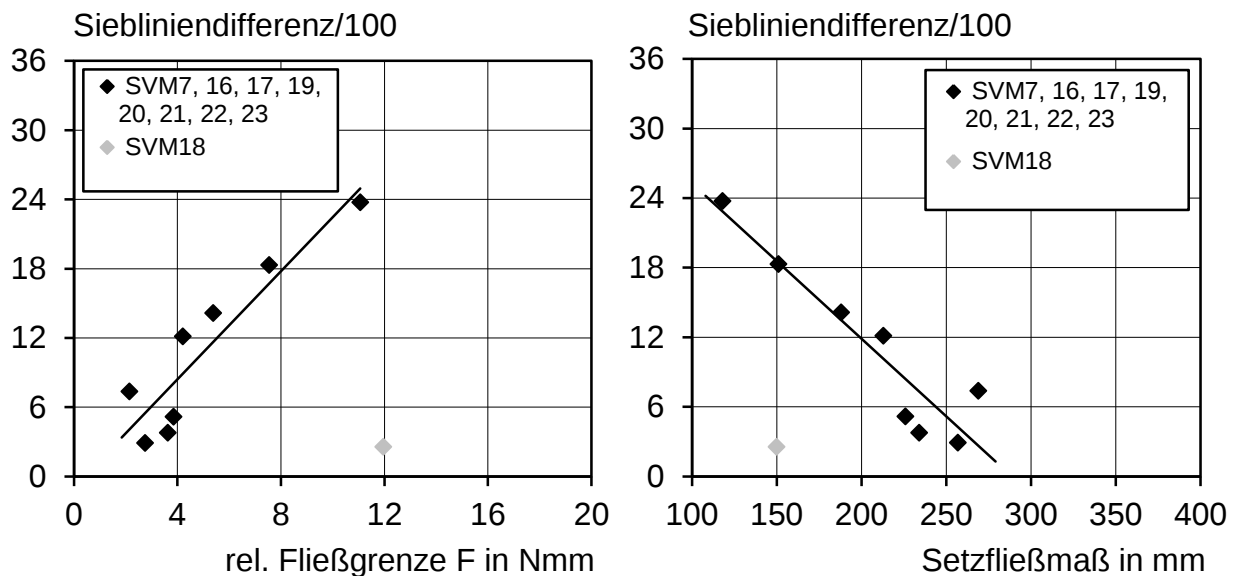


Bild 67: Vergleich der Siebliniendifferenz mit der relativen Fließgrenze bzw. dem Setzfließmaß (SVM7, SVM16 bis SVM23)

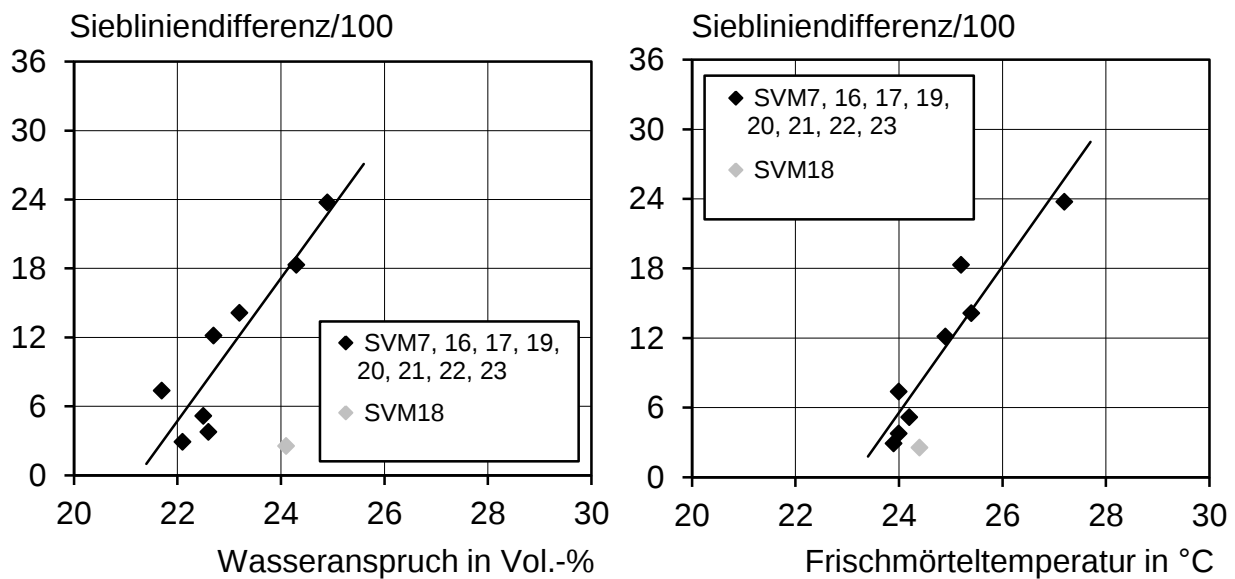


Bild 68: Vergleich der Siebliendifferenz mit dem Wasseranspruch bzw. der Frischmörteltemperatur (SVM7, SVM16 bis SVM23)

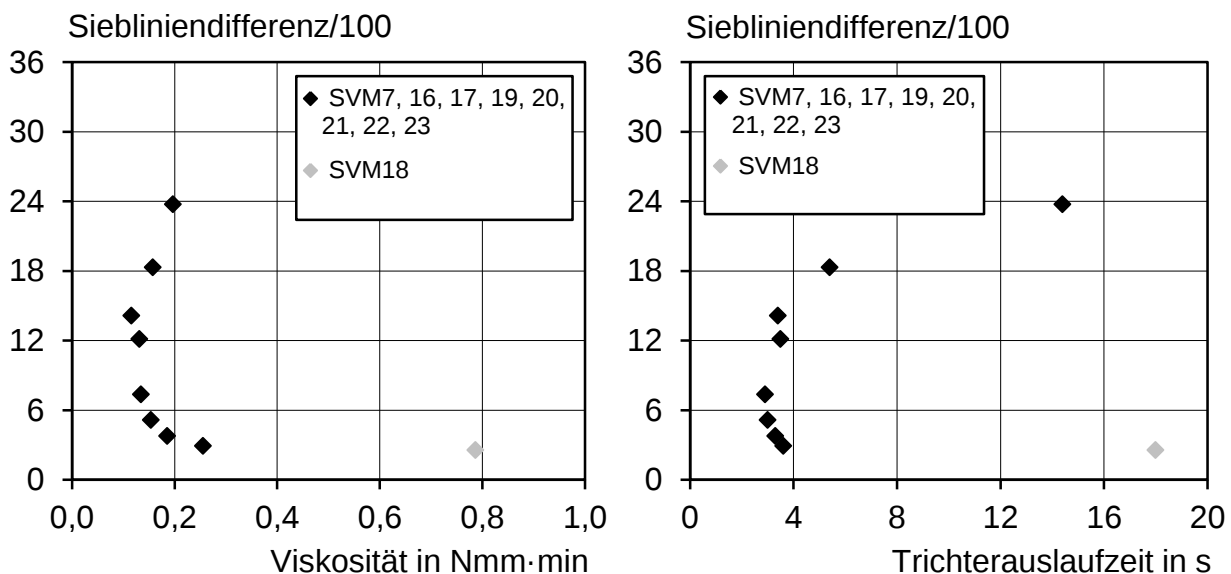


Bild 69: Vergleich der Siebliendifferenz mit der Viskosität bzw. der Trichterauslaufzeit (SVM7, SVM16 bis SVM23)

Beim Vergleich der Siebliendifferenz mit der Viskosität bzw. der Trichterauslaufzeit kann keine direkte Korrelation beobachtet werden (vgl. Bild 69). Begründet werden kann das durch die sehr kleinen Messwerte, die eine Differenzierung nicht zulassen. Die Viskositäten liegen zwischen 0,12 und 0,26. Bei der Trichterauslaufzeit befinden sich die gemessenen Werte (bis auf drei Werte) zwischen 2,9 und 3,6 Sekunden. Die Trichterauslaufzeit wird mit der Stoppuhr nach Augenmaß bestimmt, wodurch Abweichungen von $\pm 0,5$ s nicht zu vermeiden sind. So kann es besonders bei schnell

fließenden SVM zu Ungenauigkeiten in den Versuchsergebnissen und damit zu unbrauchbaren Korrelationen mit anderen Kenngrößen kommen. Auch hier gilt natürlich, dass sich zusätzliche Parameter, wie z. B. die Kornform, auswirken und die klaren Zusammenhänge, wie zuvor dargestellt, dadurch gestört werden.

Der Vergleich der Ergebnisse in Bild 61 und Bild 69 deutet darauf hin, dass bei niedrigen relativen Viskositäten höhere Siebliniendifferenzen möglich sind als bei großen. Der Grund dafür ist, dass bei niedrigen Viskositäten in der Regel mehr (rheologisch wirksames) Wasser zur Verfügung steht und somit der Abstand zwischen den Feststoffpartikel größer ist. Dadurch wird die Reibung zwischen den Feststoffpartikeln herabgesetzt und der Einfluss der Siebliniendifferenz auf die rheologischen Eigenschaften ist geringer.

Bild 70 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen Setzfließmaß und Wasseranspruch bzw. Frischmörteltemperatur. Die untersuchten SVM haben den gleichen Wassergehalt. Je besser eine Sieblinie abgestuft ist, desto mehr Wasser wird aus den Zwickelräumen verdrängt. Dieses steht dann zur Verbesserung der Fließeigenschaft zur Verfügung.

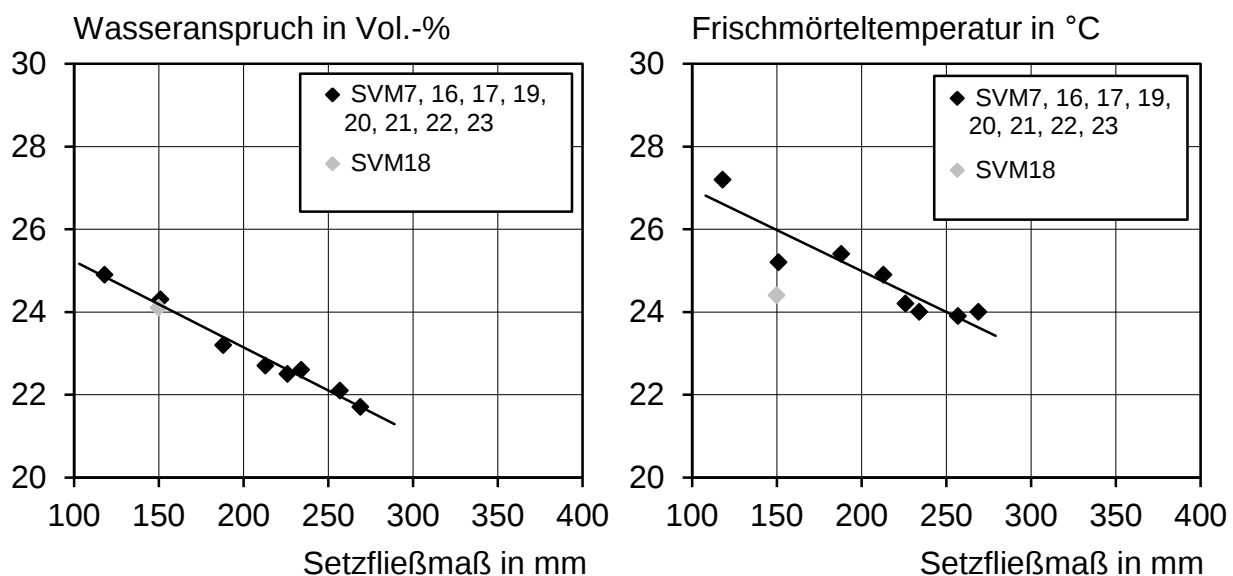


Bild 70: Vergleich des Wasseranspruchs bzw. der Frischmörteltemperatur mit dem Setzfließmaß (SVM7, SVM16 bis SVM23)

Bild 71 zeigt eine gute Korrelation zwischen Fließgrenze und Wasseranspruch bzw. Fließgrenze und Setzfließmaß. Bei SVM mit niedrigem Wasseranspruch steht mehr freies Wasser zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften zur Verfügung. Dadurch ist die Fließgrenze kleiner und das Setzfließmaß größer.

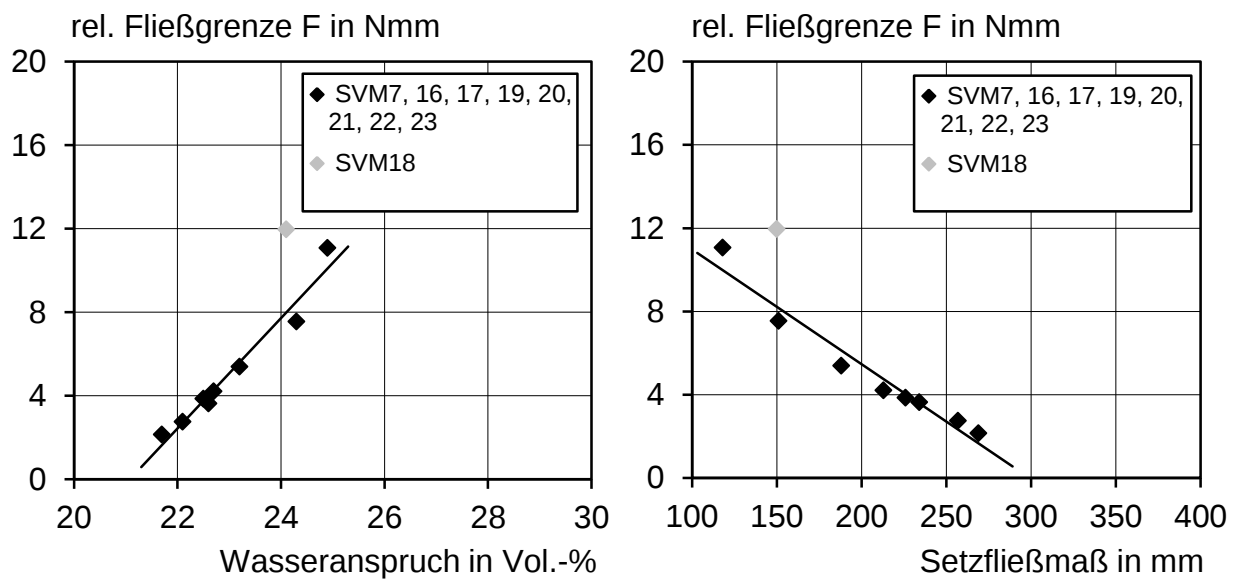


Bild 71: Vergleich der relativen Fließgrenze mit dem Wasseranspruch bzw. dem Setzfließmaß (SVM7, SVM16 bis SVM23)

Die Frischmörteltemperatur und der Wasseranspruch sowie die Frischmörteltemperatur und die Fließgrenze zeigen ebenfalls einen linearen Zusammenhang (vgl. Bild 72). Wie oben gezeigt, steht der Wasseranspruch in direktem Zusammenhang zur Fließgrenze (vgl. Bild 71). Daher korreliert die Fließgrenze auch mit der Frischmörteltemperatur.

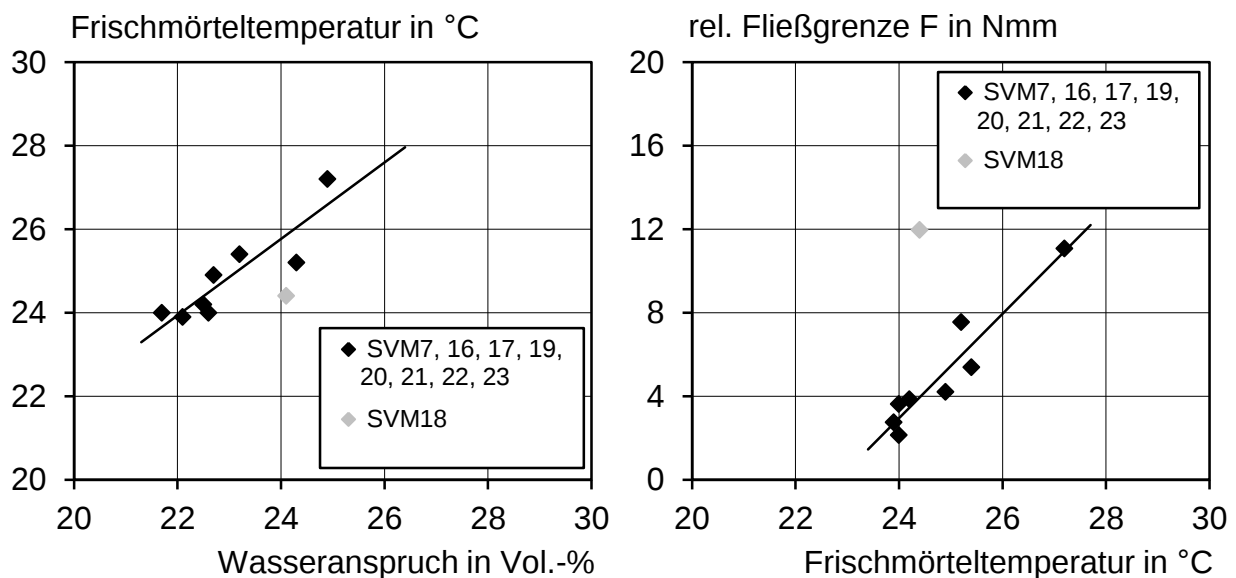


Bild 72: Vergleich der Frischmörteltemperatur mit dem Wasseranspruch bzw. der relativen Fließgrenze mit der Frischmörteltemperatur (SVM7, SVM16 bis SVM23)

Zwischen den restlichen Größen ($\dot{\gamma}$ - t_{Tr} , τ - t_{Tr} , $\dot{\gamma}$ - sm , W_P - t_{Tr} , T - t_{Tr} , $\dot{\gamma}$ - W_P , $\dot{\gamma}$ - T) konnten keine Korrelationen festgestellt werden. Die Ursachen liegen zum einen in den bereits erwähnten Unterschieden in der Kornform und in der Zusammensetzung (Anteil an Kokspartikeln), zum anderen an den niedrigen Werten für Viskosität und Trichterauslaufzeit, die eine Differenzierung unmöglich machen. Die zugehörigen Diagramme sind in den Bildern B15 bis B18, Anhang B, dargestellt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigt, dass die Idealsieblinie nach Funk & Dinger ein besseres rheologisches Verhalten bringt, d. h. je näher die Sieblinie eines SVM an der Sieblinie nach Funk & Dinger liegt, desto besser ist der SVM verarbeitbar. Des Weiteren wurde gezeigt, dass SVM, die mit einer Flugasche aus Schmelzkammerfeuerung hergestellt wurden, hinsichtlich des Fließverhaltens Bingham-Körpern entsprechen.

Bei den Mischungen, die mit dem feineren Zement hergestellt wurden, wurden die Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt (vgl. Bilder B19 bis B34, Anhang B).

5.2.5.3 Einfluss der Sieblinienänderung der Trockenfeuerungsflugasche FA3

An den Mischungen SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38 wird der Einfluss einer Änderung der Sieblinien von Trockenfeuerungsflugaschen auf die rheologischen Eigenschaften untersucht. SVM9 wurde durch eine geeignete Fließmitteldosierung auf ein Setzfließmaß von 270 mm eingestellt. SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38 enthalten die gleiche Menge an Fließmittel, sie unterscheiden sich aber in der Zusammensetzung des Flugascheanteils. Die Mischungen wurden mit dem gröberen Portlandzement hergestellt. Die Sieblinien der SVM sind in Bild 73 und Bild B35, Anhang B, dargestellt. Zur besseren Unterscheidung sind in den Bildern B36 und B37, Anhang B, die Anteile der Zement- und Flugaschesieblinien separat dargestellt. SVM32 hat die feinste, SVM38 die gröbste Sieblinie.

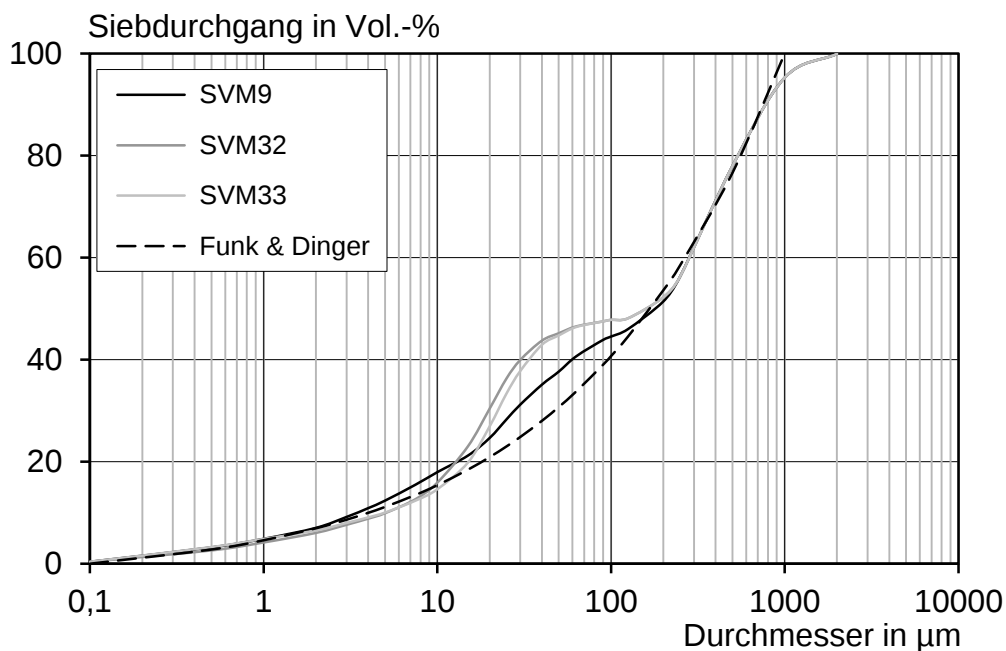


Bild 73: Sieblinien der SVM9, SVM32 und SVM33 im Vergleich mit der Idealsieblinie nach Funk & Dinger

Die durch Messung mit dem Viskomat NT ermittelten Fließkurven sind in Bild 74 und Bild B38, Anhang B, dargestellt. In diesen sind zusätzlich die Fließkurven gemäß Bingham bzw. Herschel-Bulkley (gestrichelte Linien) mit den zugehörigen Funktionsgleichungen inklusive des Bestimmtheitsmaßes abgebildet.

Die SVM zeigen mit Ausnahme von SVM37 und SVM38 ein dilatantes Fließverhalten. SVM9 ist sehr leicht dilatant und lässt sich mit dem Bingham-Modell beschreiben. Die Kokspartikel absorbieren vermutlich einen Teil des Fließmittels, wodurch die Fließeigenschaft des SVM verschlechtert wird. Die SVM37 und SVM38 enthalten ebenfalls einen vergleichsweise hohen Anteil an Kokspartikeln. Dadurch zeigen diese SVM ein strukturviskoses Fließverhalten. Die Setzfließmaße dieser Mörtel sind so gering (vgl. Tabellen A19 bis A24, Anhang A), dass es sich um keine selbstverdichtenden Mörtel handelt. Somit zeigen diese SVM ein (strukturviskoses) Fließverhalten, welches typisch ist für Mörtel, die keine selbstverdichtenden Eigenschaften aufweisen. Wegen des verfälschenden Einflusses der SVM37 und SVM38 gehen diese in die Berechnung der Korrelationen nicht ein.

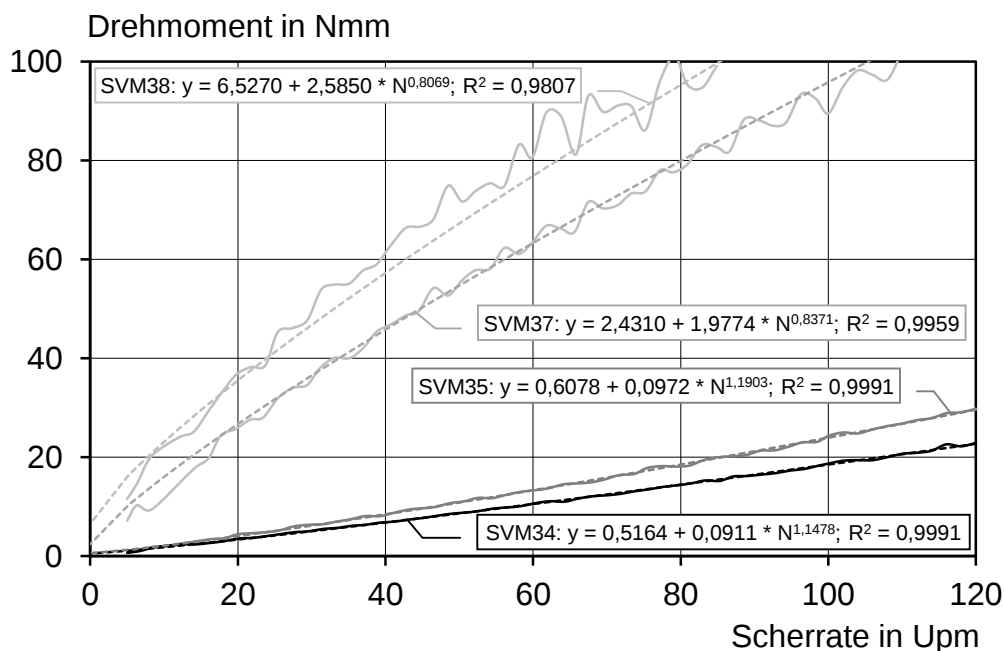


Bild 74: Fließkurven, aus den Messwerten und aus der polynomischen Regression der SVM34, SVM35, SVM37 und SVM38

Im Vergleich mit SVM9 zeigen die Fließkurven der mit FA3.1 bzw. FA3.2 hergestellten Mörtel (SVM32 und SVM33) deutlich niedrigere Viskositäten. Vergleicht man die Sieblinien dieser Mörtel, so wird eher ein schlechteres Fließverhalten erwartet. FA3.1 und FA3.2 sind so fein, dass sie ausschließlich kugelförmige Körner enthalten, wie zusätzliche Untersuchungen im Durchlichtmikroskop zeigten. Diese Körner haben die Wirkung eines „Kugellagers“, dadurch verbessern sich die Fließeigenschaften. Somit ist gezeigt, dass eine granulometrische Sieblinienoptimierung nur möglich ist, wenn die Korngrößenverteilung und die Kornform berücksichtigt werden.

Bild 75 zeigt den Vergleich zwischen der Siebliniendifferenz und den rheologischen Kenngrößen Fließgrenze bzw. Setzfließmaß. Je kleiner die Siebliniendifferenz ist, desto geringer ist das Setzfließmaß. Dies steht in direktem Widerspruch zu den in Kapitel 5.2.5.2 beschriebenen Effekten. Die Ursache liegt, wie oben bereits erwähnt, in der Kornform. Je größer die Siebliniendifferenz ist, d. h. je weiter die Sieblinien von der Idealsieblinie nach Funk & Dinger entfernt sind, desto geringer sollte das Setzfließmaß sein. Die SVM mit den fraktionierten Flugaschen FA3.1 bzw. FA3.2 enthalten nur kugelförmige Körner (vgl. Kapitel 5.2.4.3). Der dadurch auftretende Kugellagereffekt hat eine verflüssigende Wirkung auf die SVM. Daher ergibt sich der in Bild 75 dargestellte Zusammenhang. Aus dem gleichen Grund besteht vermutlich auch zwischen der Siebliniendifferenz und der Fließgrenze kein linearer Zusammenhang. In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass die Auswer-

tungen von SVM37 und SVM38 stark von den anderen Ergebnissen abweichen. Dieses wird auf den hohen Anteil an Kokspartikeln in der Mischung zurückgeführt (s. o.).

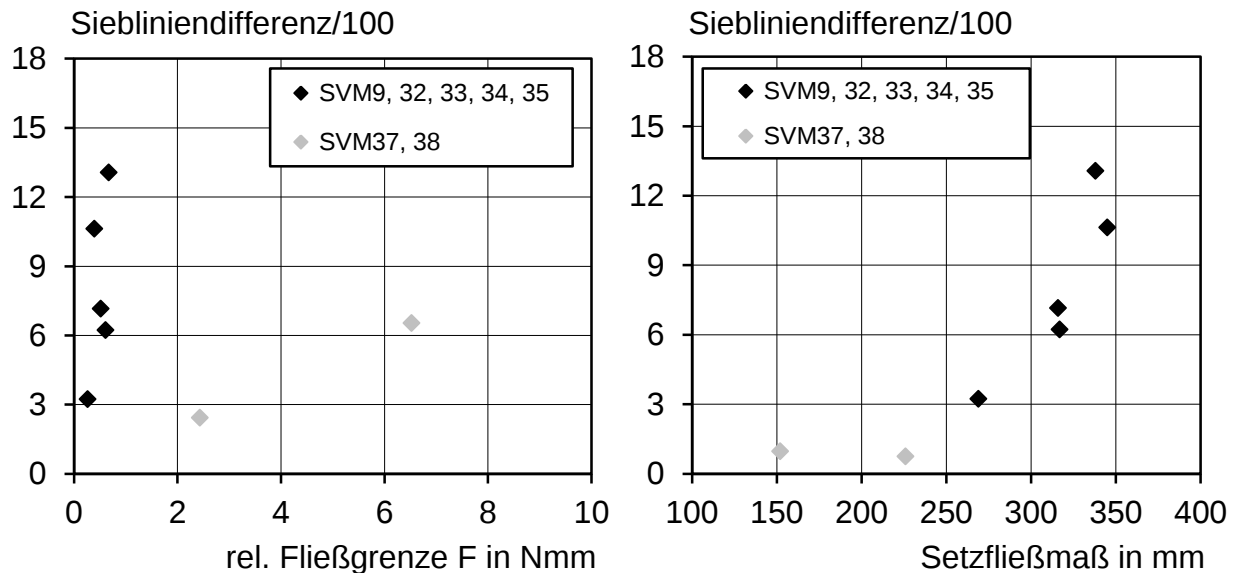


Bild 75: Vergleich der Siebliniendifferenz mit der relativen Fließgrenze bzw. dem Setzfließmaß (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

Der oben beschriebene Sachverhalt zeigt sich auch beim Vergleich der Siebliniendifferenz mit dem Wasseranspruch bzw. der Frischmörteltemperatur (vgl. Bild 76). Mit größer werdender Siebliniendifferenz wird weniger Wasser aus den Zwickelräumen verdrängt. Dadurch verringert sich der Partikelabstand, und es entsteht mehr Reibungswärme beim Mischvorgang. Gleichzeitig haben die SVM mit größerer Siebliniendifferenz höhere Anteile an kugelförmigen Körnern. Zwischen diesen herrscht weniger Reibung, wodurch die Frischmörteltemperatur weniger stark ansteigt. Beide Effekte (schlechtere Sieblinien bei gleichzeitig günstigerer Kornform) überlagern sich, daher sind die gemessenen Frischmörteltemperaturen bei allen Mischungen nahezu identisch. Gleiches gilt für den Vergleich der Siebliniendifferenz mit dem Wasseranspruch nach Puntke. Dieser ist ebenfalls von der Korngrößenverteilung und der Kornform abhängig.

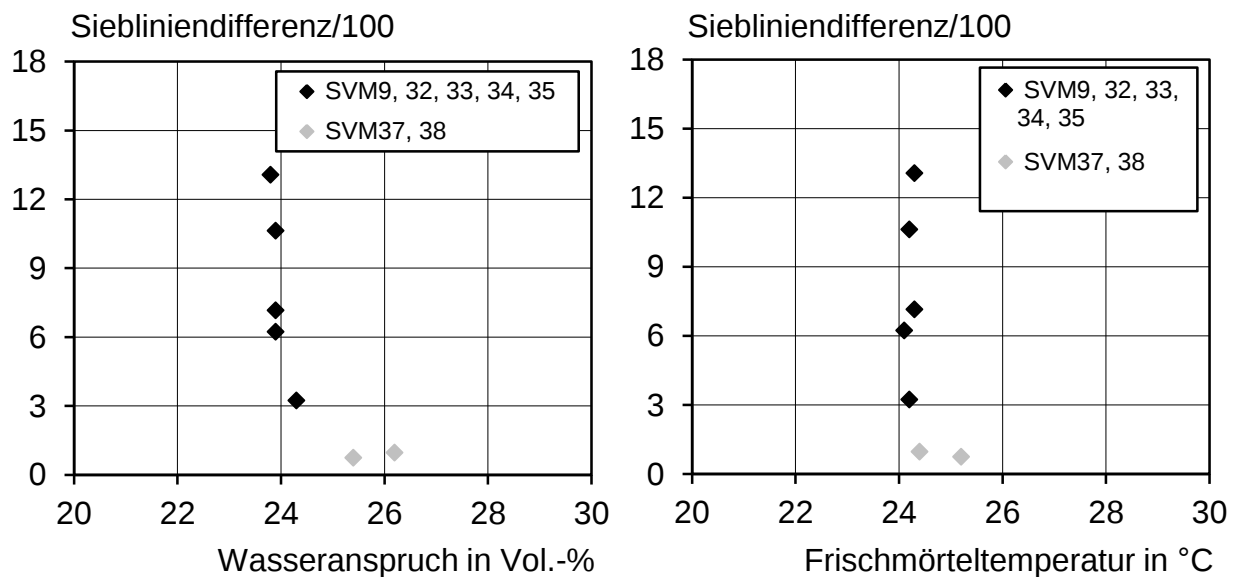


Bild 76: Vergleich der Siebliniendifferenz mit dem Wasseranspruch bzw. der Frischmörteltemperatur (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

Beim Vergleich der Siebliniendifferenz mit der Viskosität bzw. der Trichterauslaufzeit kann jedoch ein tendenzieller Zusammenhang beobachtet werden (vgl. Bild 77).

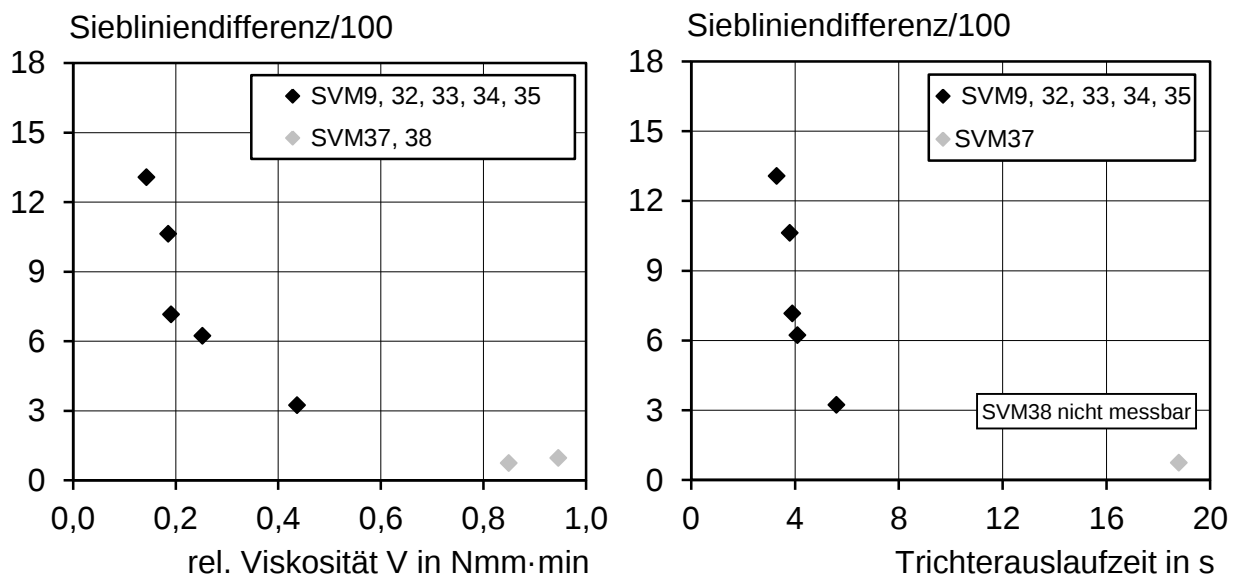


Bild 77: Vergleich der Siebliniendifferenz mit der relativen Viskosität bzw. der Trichterauslaufzeit (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

Die Diagramme, die Kenngrößen aus direkten und indirekten Prüfungen zeigen, sind in den Bildern B39 bis B45, Anhang B, dargestellt. In Bild B46, Anhang B, ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Viskosität und der Trichterauslaufzeit zu erkennen. Dieser

Zusammenhang wurde bereits in zahlreichen Untersuchungen beobachtet (u. a. /BRA04/ bzw Kapitel 5.2.5.2).

5.3 Einfluss des Wassergehaltes auf die rheologischen Eigenschaften

5.3.1 Allgemeines

Im vorangegangenen Kapitel wurde untersucht, wie durch die Optimierung der Sieblinie der Wasseranspruch reduziert wird und das so frei gewordene Wasser dann rheologisch zur Verfügung steht, den Partikelabstand vergrößert und die Fließeigenschaften beeinflusst. Im Rahmen dieses Kapitels wird der Einfluss des Wassergehalts bzw. des Wasserzementwerts näher untersucht und der Einfluss auf das Fließverhalten analysiert. Zusätzlich wird der Einfluss der Variation des Fließmittelgehaltes auf die rheologischen Eigenschaften untersucht.

5.3.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

5.3.2.1 Variation des Wasserzementwertes bei konstantem Setzfließmaß

Zur Untersuchung des Einflusses des Wasserzementwertes auf die rheologischen Eigenschaften des SVM wurde der Wassergehalt bzw. der Wasserzementwert variiert, aber durch eine Anpassung der Fließmitteldosierung ein Setzfließmaß von 270 mm eingehalten. Eine Anpassung des Fließmittelgehalts war erforderlich um eine Vergleichbarkeit der Mischungen zu gewährleisten. Bei den untersuchten Mischungen wurde sichergestellt, dass kein Sedimentieren bzw. Entmischen auftritt. Die Fließkurven wurden mit dem Modell nach Herschel & Bulkley approximiert um Fließgrenze, Viskosität und Kurvenform zu bestimmen. Bild 78 zeigt die Fließkurven ausgewählter Proben der Mischungen SVM50 bis SVM56 bei gleichbleibender Konsistenz und wegen der besseren Übersichtlichkeit die Vergrößerung der höheren w/z-Werte.

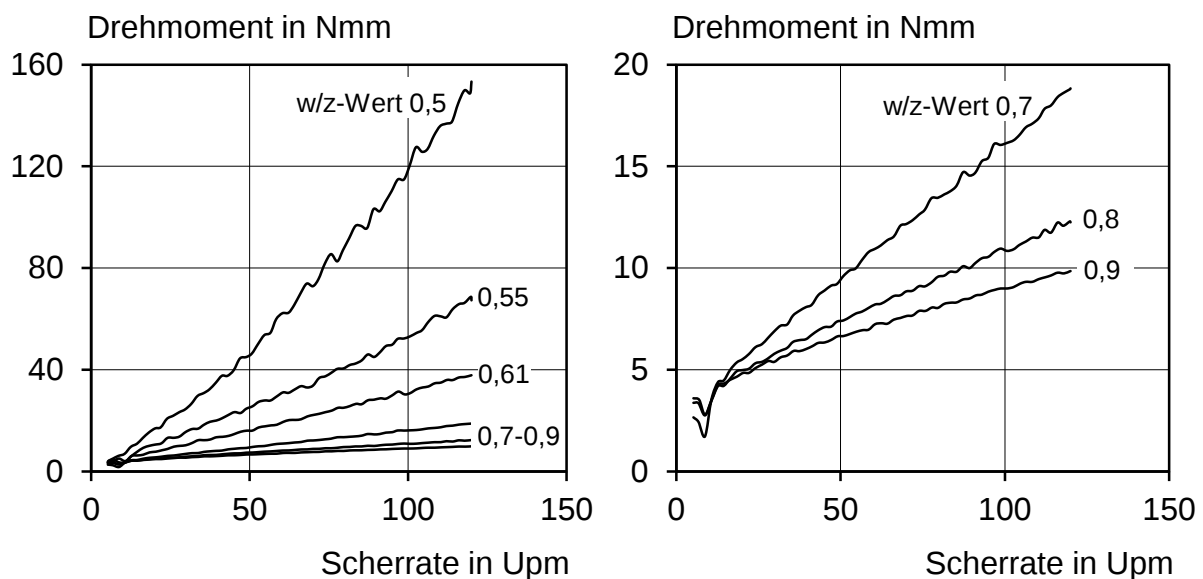


Bild 78: Fließkurven SVM50 bis SVM56 bei w/z-Werten von 0,5 bis 0,9 (links) und Vergrößerung der höheren w/z-Werte (rechts) bei konstantem Setzfließmaß

Die Ausgangsmischung mit einem w/z-Wert von 0,61 ist ein Bingham-Körper. Im Gegensatz dazu ist das Verhalten bei w/z-Werten von 0,5 und 0,55 dilatant und bei w/z-Werten ab 0,7 strukturviskos (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht über die Herschel & Bulkley Approximation von SVM50 bis SVM56 bei konstantem Setzfließmaß

w/z-Wert	0,50	0,55	0,61	0,70	0,80	0,90
SVM	50	51 a, b	52 bzw 53	54 a, b	55 a-d	56 a-d
HBA: $T = g + k \cdot N^n$	$T = 2,48 + 0,23 \cdot N^{1,36}$	$T = 3,24 + 0,17 \cdot N^{1,24}$	$T = 2,51 + 0,20 \cdot N^{1,08}$	$T = 1,42 + 0,29 \cdot N^{0,85}$	$T = 2,10 + 0,30 \cdot N^{0,74}$	$T = 2,01 + 0,45 \cdot N^{0,60}$
Verhalten	dilatant		Bingham	strukturviskos		

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Feststellungen in dem vorangegangenen Kapitel und von anderen Forschern. Bei niedrigen w/z-Werten füllt das Wasser gerade die Zwischenräume der Feststoffpartikel. Das Wasser reicht bei niedrigen Schergeschwindigkeiten gerade aus, um die Bewegung der Gesteinskörnung zu „schmieren“. Bei höheren Schergeschwindigkeiten wird die vorher dichte Packung aufgelockert und das Volumen der Probe dehnt sich aus. Dadurch steht aber nicht mehr genügend Wasser zur Verfügung, um als Gleitschicht zwischen den Körnern zu wirken, der wasserinduzierte Partikelabstand ist zu gering. Durch die verstärkte Festkörperreibung ist der Scherwiderstand auf die Scherbelastung nun höher.

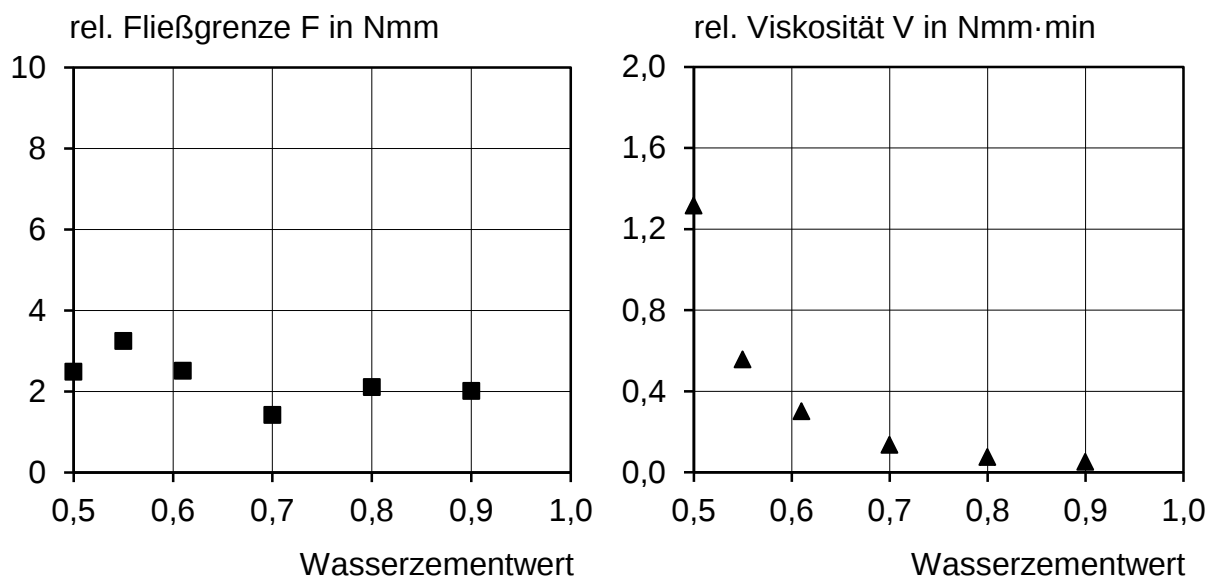


Bild 79: Relative Fließgrenze F (links) und relative Viskosität V (rechts) von SVM50 bis SVM56 bei w/z-Werten von 0,5 bis 0,9 bei konstantem Setzfließmaß

In Bild 79 ist erneut die relative Fließgrenze F (links) und die relative Viskosität V (rechts) über die w/z-Werte aufgetragen. Die Fließgrenze verändert sich nur geringfügig, die Viskosität nimmt bei steigendem w/z-Wert erwartungsgemäß ab. Die Fließgrenze bleibt gleich, weil das Setzfließmaß bei allen Mischungen durch das Fließmittel auf ca. 270 mm eingestellt wurde. Fließgrenze und Setzfließmaß korrelieren miteinander und hängen beide vom Fließmittel ab. Die Viskosität ist vom Wassergehalt abhängig, deswegen sinkt diese bei steigendem w/z-Wert.

Um einen Einfluss des Fließmittels auf die Viskosität gänzlich ausschließen zu können, werden im nächsten Kapitel die Fließkurven aus Untersuchungen bei gleichem w/z-Wert aber unterschiedlichem Fließmittelgehalt verglichen.

5.3.2.2 Variation des Fließmittelgehaltes bei konstantem w/z-Wert

In Bild 80 sind die Fließkurven für SVM53 bei einem w/z-Wert von 0,61 und variierenden Fließmittelgehalten angegeben. Die Fließmittelgehalte nehmen von unten nach oben zu, die Fließkurven sind lediglich parallel verschoben. Der Fließmittelgehalt beeinflusst also fast ausschließlich die Fließgrenze, kaum aber die Viskosität.

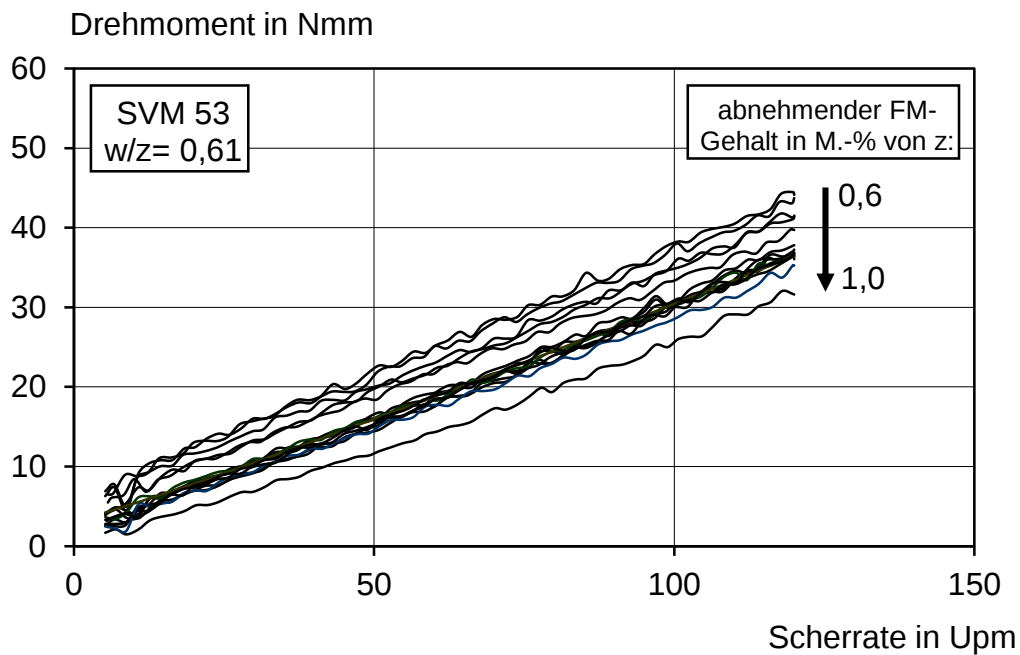


Bild 80: Darstellung der Fließkurven SVM53 bei unterschiedlichem Fließmittelgehalt

In Bild 81 sind die relative Fließgrenze F (links) und die relative Viskosität V (rechts) in Abhängigkeit von dem Fließmittelgehalt dargestellt. Während die Fließgrenze mit zunehmendem Fließmittelgehalt abnimmt, bleibt die Viskosität im Wesentlichen unbeeinflusst.

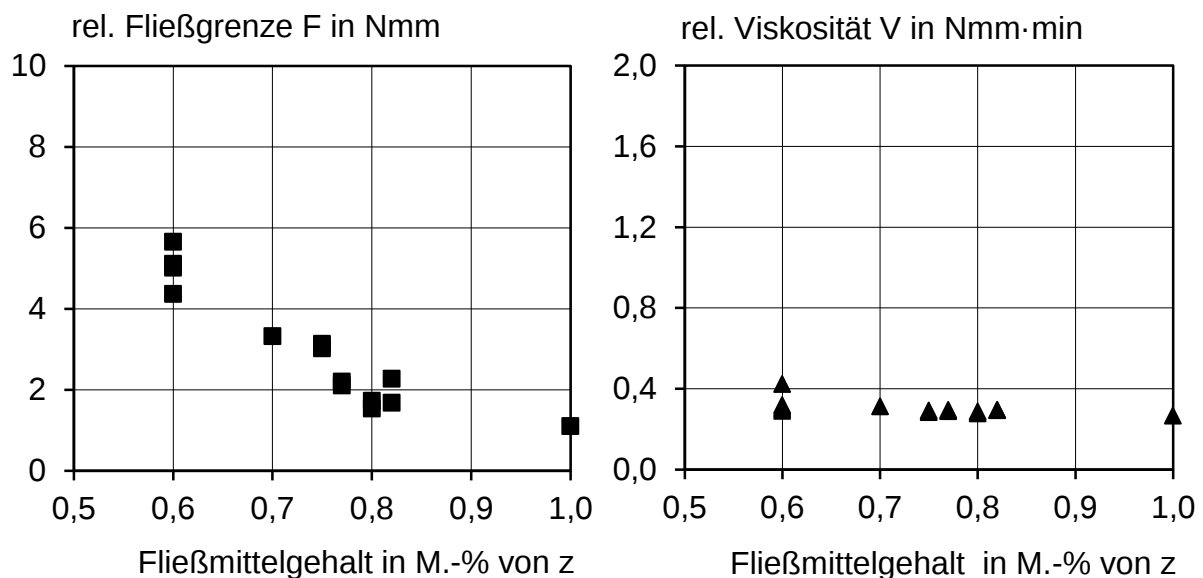


Bild 81: Darstellung relative Fließgrenze F (links) und relative Viskosität V (rechts) von SVM53 bei unterschiedlichem Fließmittelgehalt

5.4 Aufstellen eines Partikelabstandsmodells

Der Wassorzement- und Wasserbindemittelwert bzw. die volumenbezogene Feststoffkonzentration C_V sind als Größen zur groben, qualitativen Beschreibung der Konsistenz von selbstverdichtendem Beton bzw. der daraus extrahierten selbstverdichtenden Mörtel grundsätzlich geeignet. Jedoch geben diese keinen detaillierteren Hinweis auf das zu erwartende rheologische Verhalten der Rezeptur. Aufgrund der Erkenntnisse der Literaturauswertung bietet sich dazu der Partikelabstand an. Der Partikelabstand ist grundsätzlich vergleichbar mit der Feststoffkonzentration. Ist ein geringer Anteil Feststoffpartikel in der Betonmischung, sind die Partikelabstände groß, wird der Feststoffanteil erhöht, werden die Partikelabstände kleiner.

In den Versuchen, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurden, zeigte die Viskosität der Mörtel eine Korrelation zur Feststoffkonzentration. Die Viskosität ausgewählter Mörtel wurde nun mit den Partikelmodellen nach /OH99/ und /BUI02/ ausgewertet (vgl. Kapitel 2.4.4). /BUI02/ berechnet den Partikelabstand, /OH99/ hingegen die Leimschichtdicke. Dabei entspricht der Partikelabstand nach /BUI02/ in etwa der doppelten Leimschichtdicke nach /OH99/.

Um die Mörtel miteinander zu vergleichen und die Fließkurvenform (dilatant, linear oder strukturviskos) analysieren zu können, ist ein Zusammenhang zwischen der Viskosität und der Leimschichtdicke auf dem Gesteinskorn herzustellen.

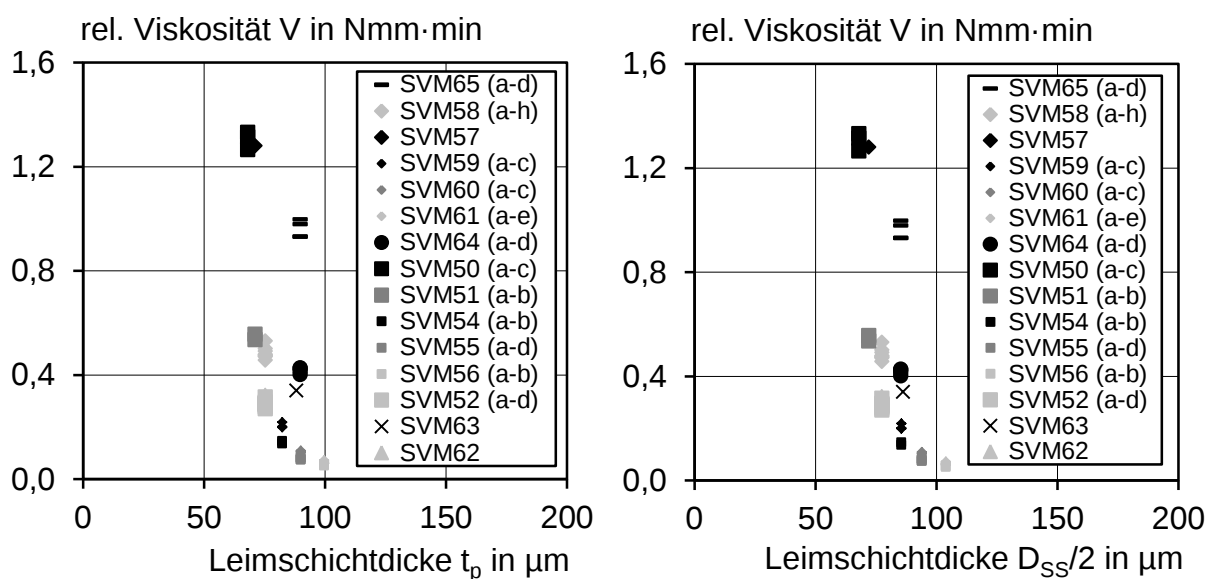


Bild 82: Relative Viskosität V in Abhängigkeit der Leimschichtdicke nach /OH99/ (links) und /BUI02/ (rechts)

In Bild 82 ist die Viskosität ausgewählter Mörtel in Abhängigkeit der Leimschichtdicken nach /OH99/ und /BUI02/ dargestellt. Es lässt sich analog zu den Feststoffkonzentrationen ein exponentieller Zusammenhang zwischen der Viskosität des Mörtels und der Leimschichtdicke feststellen. Allerdings korrelieren die relative Viskosität und die Leimschichtdicke nicht gut, die Werte streuen signifikant. Es muss also nach einer geeigneteren Größe als der Leimschichtdicke zur Abbildung des Fließverhaltens gesucht werden.

Bei /OH99/ und /BUI02/ wird die Viskosität des Mörtels als eine Funktion des Reibungsanteils der flüssigen Phase Leim und der festen Phase Gesteinskörnung, ausgedrückt durch den Partikelabstand, abgebildet:

$$V_{\text{Mörtel}} = f(V_{\text{Leim}} + d_{\text{Gesteinskörnung}}) \quad (41)$$

Wird in den Versuchen der w/z-Wert verändert, werden auch die Eigenschaften des Leims verändert. Wird mehr Wasser hinzugefügt, wird zwar die Leimschichtdicke größer, der Leim aber auch weicher. Somit ändern sich die rheologischen Eigenschaften des Leims. Um nur die Leimschichtdicke zu erhöhen und trotzdem die gleichen Eigenschaften des Leims zu erhalten, müsste der Leimgehalt der Mischung erhöht werden.

Aus diesem Grund wäre es von Vorteil, in einem neu zu entwickelnden Modell die Viskosität des Mörtels unabhängig von der Viskosität des Leims darzustellen. Deswegen wird vorgeschlagen, die flüssige Phase nur durch das Wasser zu formulieren und die feste Phase durch alle Feststoffpartikel, d. h. durch den Zement, den Betonzusatzstoff und die Gesteinskörnung. Die Reibungsgesetze sind dann sehr einfach, da die Viskosität des Wassers gleich bleibt. Die Reibung ist dann nur noch vom Partikelabstand oder anders ausgedrückt vom Wasserfilm auf dem Partikel abhängig:

$$V_{\text{Mörtel}} = f(V_{\text{Wasser}} + d_{(\text{Zement}+\text{Flugasche}+\text{Gesteinskörnung})}) \quad (42)$$

Wird der Wasserfilm unendlich groß, nähert sich die Viskosität des Mörtels der Viskosität von Wasser (vgl. Gl. (42)). Wird der Wasserfilm unendlich klein, liegt ein Festkörper vor.

Für ein solches Modell muss zunächst die Wasserfilmdicke berechnet werden (vgl. /BOM73/). Das Modell von /BOM73/ beschreibt die Wasserfilmdicke auf einem Zementkorn. Nach /BOM73/ ist das Zementkorn durch eine Kugel idealisiert, um die sich der Wasserfilm bildet (vgl. auch Kapitel 2.4.3). Damit nimmt er eine monodisperse Suspension an, auch wenn dieses nicht zutreffend ist, da Zement nicht aus einer Korngröße besteht, sondern eine ausgeprägte Korngrößenverteilung aufweist.

Das neue Modell kann wie folgt beschrieben werden: Alle Gesteinskörnungen sind zu einem Gesteinskorn mit einer Gesamtoberfläche zusammengefasst. Die Größen der Oberflächen (Zement z + Betonzusatzstoff, hier Flugasche FA + Gesteinskörnung gk) sind bekannt aus den Eingangsprüfungen. Auf dieser Oberfläche bildet das Wasser einen Film.

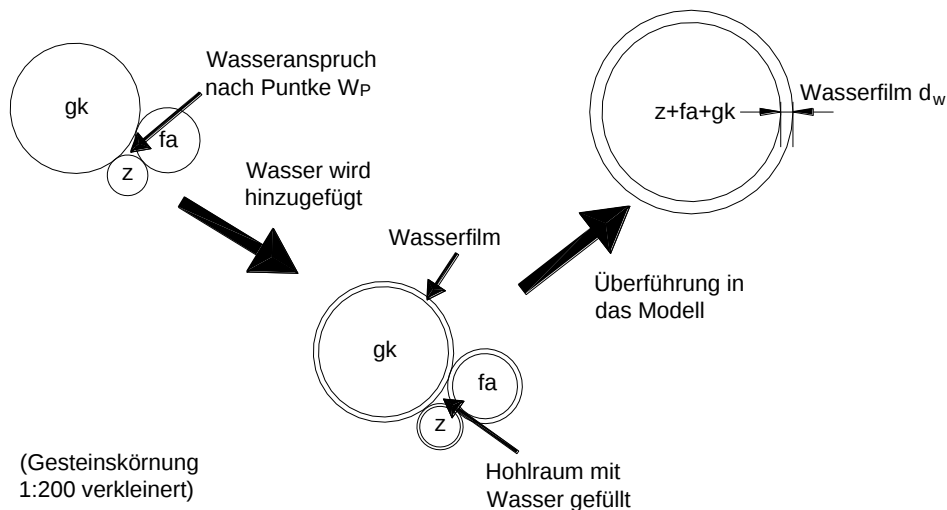


Bild 83: Modell der mittleren Wasserfilmdicke d_w

Die Dicke dieses Wasserfilms kann berechnet werden, indem vom Gesamtwassergehalt das Wasser abgezogen wird, das zum Ausfüllen der Hohlräume nötig ist. Dieses Wasser ist also rheologisch nicht wirksam. Das Wasser zum Ausfüllen der Hohlräume kann über den Wasseranspruch nach Punkte W_P berechnet werden. Damit ist auch der Einfluss der Kornform erfasst, da W_P genau der Punkt ist, an dem alle Oberflächen benetzt und alle Hohlräume gerade ausgefüllt sind. Jede weitere Zugabe von Wasser vergrößert diesen Wasserfilm. Die Wassermenge, die den Wasserfilm vergrößert, ist also die Gesamtwassermenge abzüglich des Wasseranspruchs nach Punkte. Da die Oberfläche des einzelnen Gesteinskorns sehr groß ist, kann der mittlere Wasserfilm auf dem Korn berechnet werden, indem das Volumen des rheologisch wirksamen Wassers durch die Größe der Oberfläche geteilt wird:

$$d_w = \frac{V_{\text{rheo}}}{O_{\text{ges}}} \quad (43)$$

mit:

d_w : mittlerer Wasserfilm

V_{rheo} : Volumen des rheologisch wirksamen Wassers

O_{ges} : Gesamtoberfläche

und

$$V_{\text{rheo}} = V_{\text{Wges}} - V_{\text{H}} \quad (44)$$

mit:

V_{Wges} : Volumen des gesamten Wassers

V_{H} : Hohlraumgehalt der Trockenmischung

und

$$V_{\text{H}} = W_{\text{P}} \cdot V_{\text{Z+fa+gk}} \quad (45)$$

mit:

W_{P} Wasseranspruch nach Puntke

$V_{\text{Z+fa+gk}}$ Volumen der Trockenmischung

und

$$O_{\text{ges}} = \sum O_{\text{Z}} + O_{\text{fa}} + O_{\text{gki}} \quad (46)$$

mit:

O_{Z} spezifische Oberfläche Zement

O_{fa} spezifische Oberfläche Flugasche

O_{gki} spezifische Oberfläche der einzelnen Gesteinskörnungen gk_i

Die nach /OH99/ und /BUI02/ sowie im Rahmen dieser Arbeit berechneten Wasserfilmdicken sind vergleichend in Tabellen A25 bis A30, Anhang A, gegenübergestellt.

Nachdem die Dicke des Wasserfilms d_{W} durch diesen Ansatz berechnet wurde, kann die relative Viskosität V in Abhängigkeit des interpartikulären Abstandes d_{P} , der der doppelten Wasserfilmdicke entspricht, dargestellt werden. In Bild 84 sind alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten selbstverdichtenden Mörtel dargestellt.

Es zeigt sich lediglich eine grobe Tendenz (vgl. auch Bild B47, Anhang B). Beachtet werden muss jedoch, dass die Konsistenzen der dargestellten SVM mit Setzfließmaßen von 100 mm bis 410 mm sehr stark variieren. Interessant ist, dass über den gesamten Konsistenzbereich eine gute Korrelation zwischen der relativen Viskosität und der Trichterauslaufzeit besteht (vgl. auch Bild B48, Anhang B).

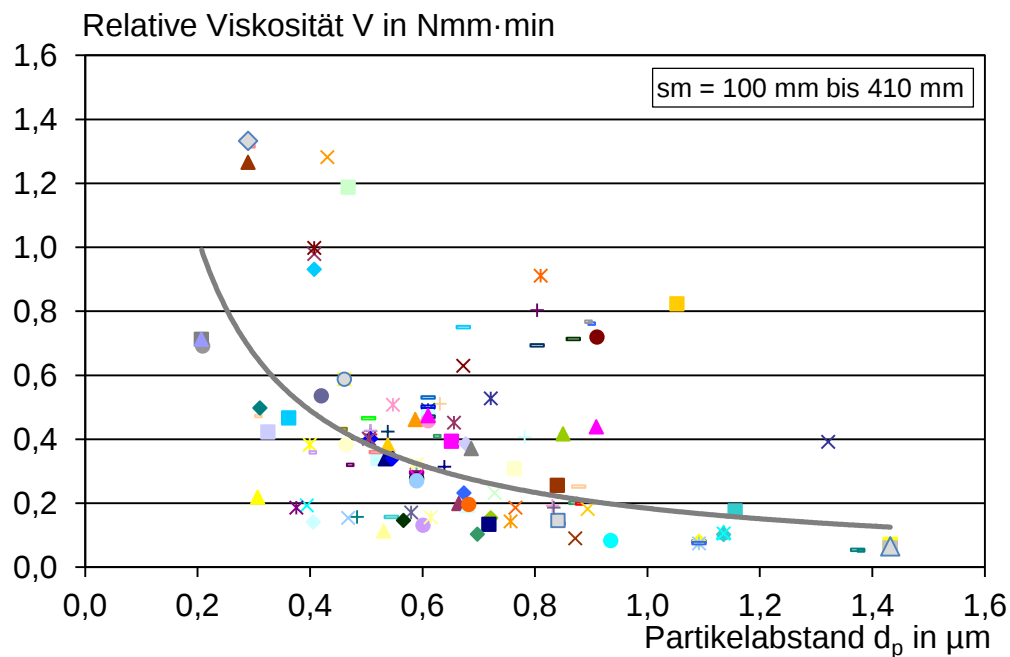


Bild 84: Relative Viskosität V in Abhängigkeit des mittleren Partikelabstands d_p (Legende vgl. Bild B55, Anhang B)

Stellt man die Kennwerte für einen im Rahmen dieser Arbeit angestrebten Zielwertbereich von einem Setzfließmaß $sm = 270 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ zusammen, so ergibt sich der im folgenden Bild 85 dargestellte Zusammenhang.

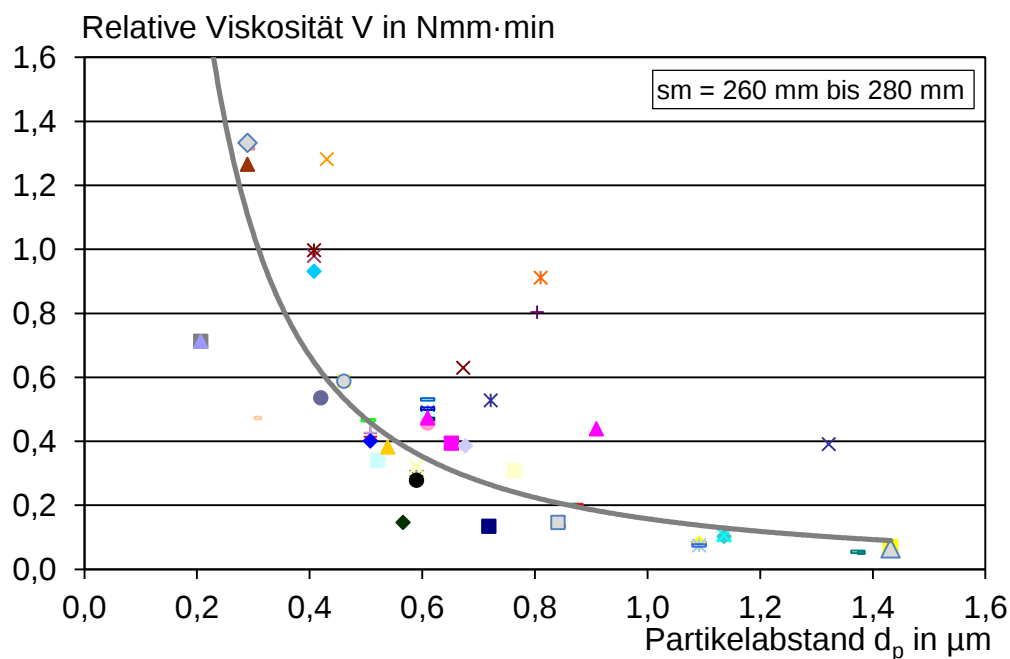


Bild 85: Relative Viskosität V in Abhängigkeit des mittleren Partikelabstands d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 260 \text{ mm}$ bis 280 mm (Legende vgl. Bild B55, Anhang B)

Es zeigt sich ein potentieller Zusammenhang der Form

$$V = a \cdot d_w^{-b} \quad (47)$$

zwischen der relativen Viskosität V und der Feststoffkonzentration, diesmal ausgedrückt durch den Partikelabstand d_p .

Die Ergebnisse in Bild 85 deuten darauf hin, dass der minimale Partikelabstand, bei dem ein Fließen des SVM noch möglich ist, bei ca. 0,2 bis 0,3 μm liegt. Unterhalb von Partikelabständen von ca. 0,6 μm steigt die Viskosität stark an.

Nun können auch die Mörtel eingeordnet werden, die mit den Modellen nach Oh und Bui nicht erklärt werden konnten, weil die Veränderung der Mörtelzusammensetzung über die Änderung der Oberfläche der Gesteinskörnung in die Wasserfilmdicke einfließt.

Die Fließgrenze kann nicht durch ein Abstandsmodell beschrieben werden, weil die Fließgrenze bei den Betonen stark durch das Fließmittel beeinflusst wird. Das Fließmittel trennt die Teilchen nur voneinander bzw. bildet eine Gleitebene aus, ohne deren Abstand zu ändern.

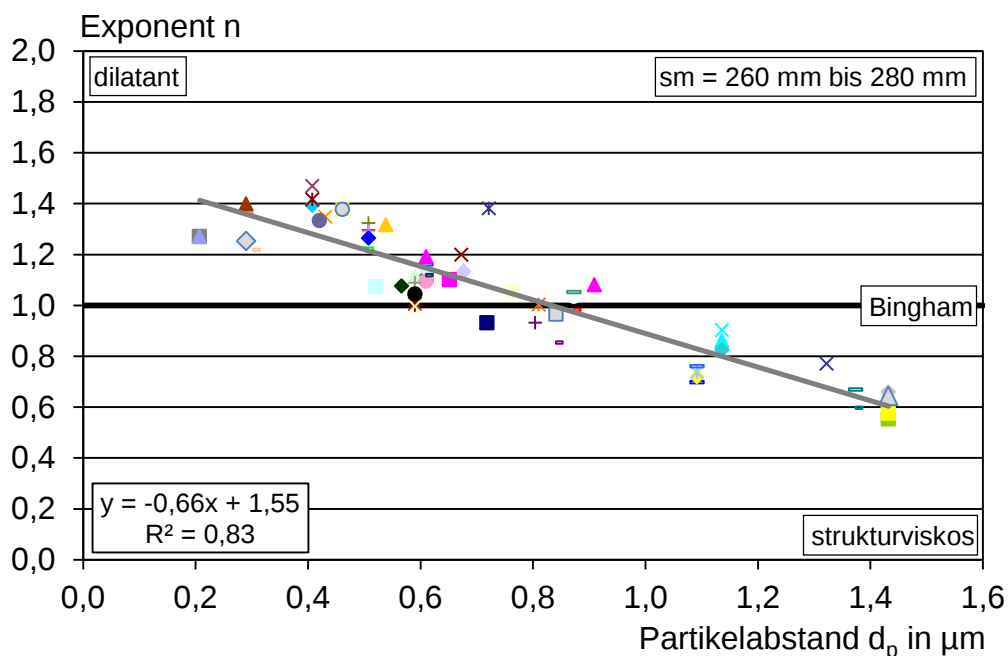


Bild 86: Fließkurvenform in Abhängigkeit von dem mittleren Partikelabstand d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 260 \text{ mm bis } 280 \text{ mm}$ (Legende vgl. Bild B55, Anhang B)

Wenn die Wasserfilmdicke um die Teilchen zunimmt und somit der Partikelabstand steigt, verringern sich die interpartikulären Kräfte und der Kornreibungsanteil nimmt ab. Aus diesem Grund sollte es auch möglich sein, die Form der Fließkurve durch den Wasserfilm zu bestimmen. Dazu wird in Bild 86 die Größe des Exponenten n der Herschel & Bulkley Approximation, der die Form der Fließkurve bestimmt, über den mittleren Partikelabstand d_p aufgetragen.

Das Fließverhalten eines Bingham-Körpers stellt sich bei einem mittleren Partikelabstand d_p von ca. $0,8 \mu\text{m}$ ein. Wird der mittlere Partikelabstand kleiner, wird das Verhalten dilatant, wird er größer, wird das Verhalten strukturviskos. So kann das Fließverhalten schon beim Betonentwurf vorausgesagt werden.

Betrachtet man einen Setzfließbereich von 250 bis 300 mm ist das Modell auch noch anwendbar (vgl. Bilder B49 und B50, Anhang B). Bei Setzfließmaßen unterhalb von 250 mm bzw. größer als 300 mm sind mit dem Modell keine Zusammenhänge mehr zu erkennen (vgl. Bilder B51 bis B54, Anhang B). Unterhalb von einem Setzfließmaß von 250 mm liegt kein selbstverdichtender Mörtel mehr vor. Bei Setzfließmaßen größer als 300 mm kommt es bei SVM, die aus SVB extrahiert wurden, oftmals schon zu Entmischungserscheinungen, so dass eine Untersuchung mit dem Viskomat nicht mehr möglich ist. Außerdem sind oftmals die Wassergehalte und damit die Partikelabstände so hoch, dass die daraus resultierenden sehr niedrigen Viskositäten nicht mehr differenziert werden können.

5.5 Zusammenfassung rheologische Untersuchungen

Die Untersuchungen zeigen insgesamt, dass SVM mit einem hohen Anteil an sphärisch geformten Körnern rheologisch einem Bingham-Körper entsprechen. Dies wurde bei der Verwendung von Schmelzkammer-Flugasche festgestellt. Bei einem hohen Anteil von kantigeren Körnern, wie Flugaschepartikel aus der Trockenfeuerung oder aber vor allem Kalksteinmehlen zeigen die SVM in Abhängigkeit von dem Wassergehalt überwiegend ein dilatantes Verhalten.

Es wurde festgestellt, dass die SVM ein optimiertes rheologisches Verhalten zeigen, wenn die Sieblinien möglichst nahe an der Idealsieblinie nach Funk & Dinger liegen. Der Abstand zwischen den Feststoffpartikeln und dem Wasseranspruch, welcher ein indirekter Parameter für den Partikelabstand ist, bildet einen direkten Zusammenhang zur Korngrößenverteilung und zur Kornform. Bei einer Idealsieblinie sind alle Kornzwischen-

räume mit Feststoffpartikeln gefüllt. Das Wasser, das aus diesen Kornzwischenräumen verdrängt wird, umhüllt die Körner und vergrößert den Abstand zwischen den Partikeln.

SVM, die hinsichtlich der Sieblinie der Idealsieblinie nach Funk & Dinger entsprechen, zeigen tendenziell bessere rheologische Eigenschaften als solche nach dem Modell von Fuller & Thompson. Als eine granulometrische Kenngröße zur Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung auf das rheologische Verhalten wurde die „Siebliniendifferenz“ definiert. Diese wurde aus der Differenz der Siebdurchgänge zwischen der tatsächlichen Sieblinie und der Sollsieblinie berechnet.

Außerdem wurde nachgewiesen, dass ein feiner Zement stets mit einem gröberen Betonzusatzstoff, ein gröberer Zement jedoch mit einem feineren Betonzusatzstoff kombiniert werden sollte, da sich in diesem Fall die Sieblinien optimal ergänzen.

Auf den Anwendungsfall SVB übertragen, belegen die Ergebnisse, dass eine sorgfältige Auswahl der Ausgangsstoffe und eine granulometrische Optimierung der Feinstoffe die Herstellung von SVB mit guten Fließeigenschaften ermöglichen.

Der Wassergehalt beeinflusst die Viskosität der selbstverdichtenden Mörtel. Mit höherem Wassergehalt nimmt die Viskosität ab. Das Fließmittel hingegen beeinflusst im Wesentlichen nur die Fließgrenze der selbstverdichtenden Mörtel.

Das aufgestellte Partikelmodell zeigt für einen selbstverdichtenden Mörtel mit einem Setzfließmaß von 260 bis 280 mm einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem wasserinduzierten Partikelabstand der Feststoffpartikel und der relativen Viskosität. Außerdem zeigt dieses Modell, dass bei Partikelabständen $< 0,8 \mu\text{m}$ ein dilatantes und bei Partikelabständen $> 0,8 \mu\text{m}$ ein strukturviskoses Verhalten des selbstverdichtenden Mörtels zu erwarten ist. Bei einem Partikelabstand von rund $0,8 \mu\text{m}$ zeigen die Mörtel ein Bingham'sches Fließverhalten. Für das Partikelmodell wurden bislang nur SVM herangezogen, die mit Flugasche als Betonzusatzstoff hergestellt wurden. Das Modell ist für andere Betonzusatzstoffe wie z. B. Kalksteinmehl zu überprüfen. Eigene Untersuchungen deuten darauf hin, dass SVM mit Kalksteinmehl in Abhängigkeit vom Wassergehalt kein grundsätzlich abweichendes rheologisches Verhalten zeigen wie SVM, die mit Flugasche hergestellt wurden /BRA04/.

6 TRIBOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

6.1 Allgemeines

Die Verfülleigenschaften eines SVB in einer vorgegebenen Schalung werden maßgeblich von dessen Fließeigenschaften bestimmt. Die Fließeigenschaften werden von den rheologischen Eigenschaften des SVB sowie von der Reibung zwischen SVB und Schalung, der so genannten Fluid-Struktur-Interaktion, beeinflusst. Im Hinblick auf die numerische Simulation des Strömungsvorganges von SVB müssen dementsprechend neben der Kenntnis der rheologischen Eigenschaften auch Eingangsparameter zu den tribologischen Eigenschaften des betrachteten Systems Beton/Schalung vorliegen.

Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit ein entsprechender Tribometer entwickelt und an sechs SVB sowie deren Basismörtel systematisch der Einfluss verschiedener Faktoren auf das tribologische Verhalten untersucht.

6.2 Untersuchungen

6.2.1 Prüfverfahren

6.2.1.1 Allgemeines

Zur Untersuchung der Fließeigenschaften von Stabilisierertyp-SVB im Vergleich zu Mehlkorntyp-SVB wurden zunächst je zwei Stabilisierertyp-SVB und zwei Mehlkorntyp-SVB entworfen und anschließend zur Charakterisierung der Mischungen ausgewählte Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt. Zur Untersuchung des Einflusses der tribologischen Eigenschaften auf das Fließverhalten wurden entsprechende Tribometerversuche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Tribometerversuche werden zur Identifikation von Einflussparametern mit rheologischen Eigenschaften der SVB und der entsprechenden selbstverdichtenden Mörtel (SVM) korreliert.

6.2.1.2 Charakterisierung der Frischmörtel- und Frischbetoneigenschaften

Bei den untersuchten SVM wurde das Setzfließmaß mit dem Haegermann-Trichter sowie die Auslaufzeit aus dem Mörtel-Auslauftrichter bestimmt (vgl. Kapitel 5.2.3.3).

Zur Charakterisierung der Betone wurden die Konsistenz und die Frischbetonrohichte bestimmt. Es wurden das Setzfließmaß s_m und die Setzfließzeit t_{500} gemäß /DAF03/ unmittelbar nach Mischende ermittelt. Zusätzlich wurde die Trichterauslaufzeit t_{Tr} gemäß

/DAF03/ bestimmt. Die Frischbetonrohddichte wurde gemäß /DIN00/ ermittelt. Abweichend von /DIN00/ wurde der mit SVB gefüllte Luftporentopf nicht gerüttelt. Die Sedimentationsstabilität, d. h. die Beurteilung der Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung, erfolgte mit dem Frischbetonverfahren gemäß /DAF03/.

6.2.1.3 Viskosimeteruntersuchungen und Fließversuche im L-Kasten

Mit dem Viskomat NT (vgl. Kapitel 5.2.3.4) wurden die Messgrößen Drehzahl und Drehmoment für die vier unterschiedlichen SVM ermittelt. Mit diesen Messgrößen können Fließkurven erstellt werden, aus denen relative Viskositäten abgeleitet werden können. Dies ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der Viskositäten der SVM auf die Fluid-Struktur-Interaktion.

Für die Fließversuche wurde der L-Kasten-Versuch verwendet (vgl. Bild 87) /DIB03/. In dem mit den Modelloberflächen glatt-benetzend und rau-benetzend ausgekleideten L-Kasten wurden Versuche mit den SVB und den entsprechenden SVM durchgeführt. Hierdurch kann der Einfluss der Rauigkeit der Oberfläche erfasst werden.

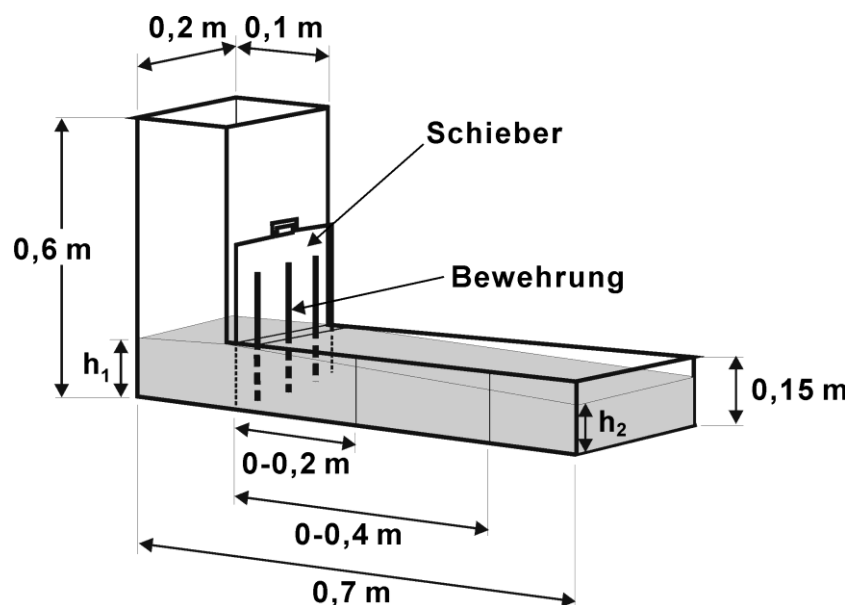


Bild 87: L-Kasten-Versuch nach /DIB03/

Da die Fließversuche auch zur Validierung der numerischen Simulationen herangezogen wurden (vgl. Kapitel 7), und weil der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die Fluid-Struktur-Interaktion gelegt wurde, wurden die Versuche ohne Bewehrungsstäbe durchgeführt. Die Umströmung der Stäbe erschwert die Interpretation der Ergebnisse im Hinblick

auf die Fluid-Struktur-Interaktion und dient primär zur Beurteilung der Blockierneigung der SVB, die im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert untersucht wurde.

Bei den L-Kasten-Versuchen wurde die Fließzeit von 200 mm bis 400 mm für eine glatt- und rau-benetzende Modelloberfläche für jeden SVB bzw. SVM ermittelt. Außerdem wurde die Zeit bis zum Erreichen des Endes des L-Kastens bestimmt sowie das Selbstnivellierungsvermögen beurteilt.

6.2.1.4 Oberflächeneigenschaften der Modelloberflächen

Die Rauigkeiten der Modelloberfläche für die Tribometer- und L-Kasten-Versuche wurden mittels Tastschnittverfahren in Mehrfachbestimmungen ermittelt /DIN98a, DIN98b/.

Durch Randwinkelmessungen wurde die Benetzbarkeit der Modelloberflächen überprüft. Es wurde ein Wassertropfen auf die Oberfläche aufgebracht und anschließend der Winkel zwischen Festkörper und Flüssigkeit bestimmt. Eine Oberfläche gilt als nicht benetzend, wenn der Randwinkel größer als 90° ist. Wenn der Tropfen die Oberfläche jedoch benetzt, ist der Randwinkel kleiner als 90° .

6.2.1.5 Tribometerversuche zur Untersuchung der Fluid-Struktur-Interaktion zwischen Mörtel/Beton und Schalung

Für die Untersuchung der tribologischen Eigenschaften zwischen SVB und der Schalung gibt es bislang kein Tribometer, mit dem Untersuchungen beim Strömungsvorgang unter Berücksichtigung der vorherrschenden, verhältnismäßig niedrigen Betondrücke durchgeführt werden können. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der vorliegenden Erkenntnisse aus der Literatur ein geeignetes Tribometer für vergleichsweise niedrige Betondrücke entwickelt, mit welchem die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Fluid-Struktur-Interaktion (vgl. Kapitel 3) untersucht werden können.

Die bereits in der Literatur beschriebenen Tribometer (vgl. Kapitel 3), mit denen Reibungskoeffizienten bzw. Schubspannungen zwischen Beton und Schalung erfasst wurden, waren jeweils zur Untersuchung des Schalungsdrucks entwickelt worden, wo Frischbetondrücke bis zu 500 kN/m^2 auftreten können. Bei Fließvorgängen von SVB kann von einem Maximaldruck von 24 kN/m^2 bei einer Fließfronthöhe von einem Meter ausgegangen werden. Folglich wurden die tribologischen Einflussfaktoren auf die Fluid-Struktur-Interaktion zwischen SVB und Schalung nicht ausreichend für die Beschreibung von Fließvor-

gängen untersucht. Eine realitätsnähere und genauere Analysemöglichkeit maßgeblicher Kennwerte der Fluid-Struktur-Interaktion sollte mittels der im Folgenden beschriebenen Versuchsanordnung gegeben werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Tribometer besteht aus einem quadratischen Hohlquerschnitt mit den Abmessungen $l \cdot b \cdot h = 200 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm} \cdot 1150 \text{ mm}$ (vgl. Bild 88). In einem Abstand von 100 mm vom Boden befinden sich mittig auf gegenüberliegenden Seiten zwei vertikale, mit Dichtungen versehene Öffnungen, durch die eine 100 mm breite, 2 mm dicke und 500 mm lange Metallplatte, das sogenannte Schwert, durchgezogen wird. Das Schwert wurde sehr dünn gewählt und vertikal angeordnet, damit ein gleichmäßiger Betondruck seitlich auf die Oberfläche wirkt.

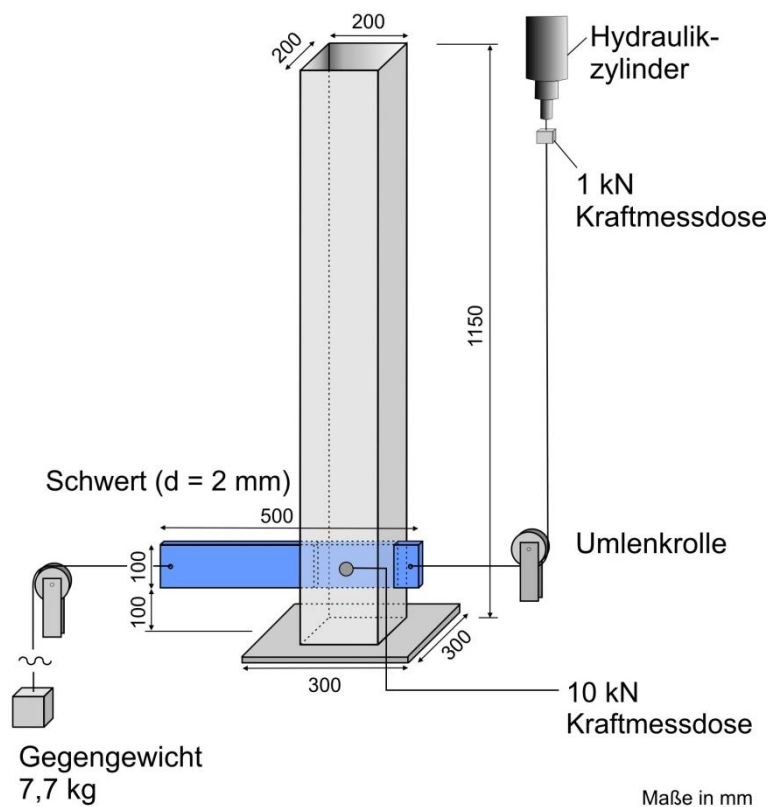


Bild 88: Prinzipskizze des Tribometers

Mit dem Hydraulikzylinder wird über ein Stahlseil das Schwert durch den mit Beton bzw. Mörtel gefüllten Hohlkasten gezogen. Ein Gegengewicht spannt das Seil vor und während des Versuches. In Höhe des Schwertmittelpunkts wurde eine Kraftmessdose zur Erfassung des Frischbetondrucks in die Schalung integriert. Während des Versuchs werden der Zylinderweg, die Zugkraft und die zugehörige Zeit sowie der Frischbetondruck aufgezeichnet.

In Analogie zum L-Kasten-Versuch wurden drei Modelloberflächen für das Schwert untersucht: glatt-benetzend (g-b), rau-benetzend (r-b) und glatt-nichtbenetzend (g-nb). Für den Oberflächentyp g-b wurde Edelstahl mit einem R_z -Wert von $3,7\text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Für die glatt-nichtbenetzende Variante wurde das Edelstahlschwert mit einem handelsüblichen Regenabweiser für Windschutzscheiben beschichtet. Die Rauigkeit nach dem Tastschnittverfahren /DIN98a, DIN98b/ blieb durch diese Modifikation mit einem R_z -Wert von $3,6\text{ }\mu\text{m}$ unverändert. Die Benetzbarkeit wurde mittels Randwinkelmessungen überprüft. Bei Randwinkeln über 90° ist die Oberfläche als nicht-benetzend definiert. Der Typ g-nb entsprach einem Winkel von $94,1^\circ$ einer nicht-benetzenden, die Typen g-b ($31,6^\circ$) und r-b ($58,3^\circ$) einer benetzenden Oberfläche. Als Modellrauigkeit r-b wurde eine Oberfläche mit einem R_z -Wert von ca. $300\text{ }\mu\text{m}$ verwendet, was dem R_z -Wert einer sägerauen Holzschalung entspricht (vgl. Kapitel 3). Bei einer präzisen Durchführung des Versuches zeigte sich eine gute Reproduzierbarkeit.

Die Versuchsergebnisse wurden in Kraft-Weg-Diagramme überführt, d. h. es wurde die gemessene Zugkraft des Schwertes über den zurückgelegten Weg aufgetragen. Ein typischer Kurvenverlauf eines Tribometerversuches ist in Bild 89 dargestellt. Vergleichbare Kurvenverläufe erzielte auch Vanhove in seinen Versuchen (vgl. Kapitel 3).

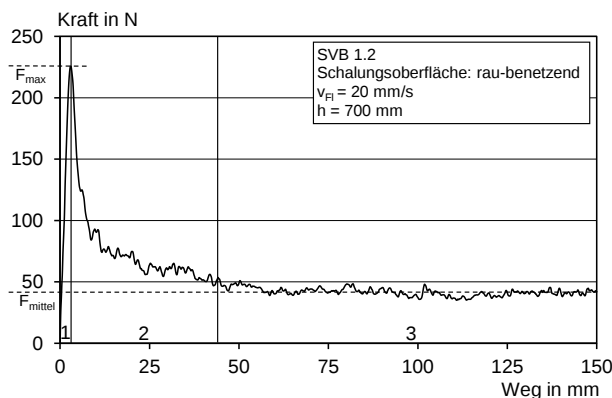


Bild 89: Prinzipieller Kurvenverlauf eines Tribometerversuchs am Beispiel des Versuchs R6

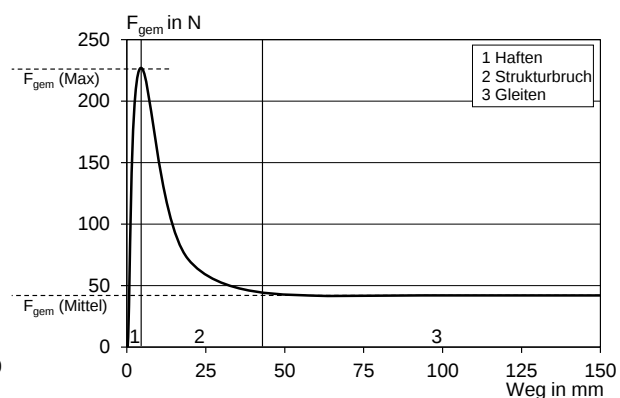


Bild 90: Idealisierter Kurvenverlauf eines Tribometerversuchs

Auffällig ist ein anfänglich starker Anstieg der gemessenen Kraftwerte, was auf ein Überwinden der Haftreibung (Beton- bzw. Mörtel-Schwert) zurückgeführt werden kann. Jedoch treten auch andere Reibungsarten und Zustände auf.

Wird der SVB als ein Zweiphasenmodell mit dem Mörtel als fluide Phase und der groben Gesteinskörnung als disperse Phase betrachtet, ist eine Differenzierung der Reibungs-

zustände möglich. Der starke Anstieg bis zu einem maximalen Kraftwert ist auf ein Haften des Mörtels am Schwert zurückzuführen, wodurch eine Fluidscherung entsprechend dem rheologischen Modell (Bingham, Herschel-Bulkley) erfolgt (vgl. Kapitel 2.3.1, Tabelle 1). Mit Erreichen des Maximums (Fließgrenze des Fluids) findet ein Aufbruch des bestehenden Gefüges statt. Beide Phasen befinden sich in einem Grenzzustand zwischen Haften und Gleiten. Es kommt zu Übergängen von Haftreibung in Roll- bzw. Gleitreibung. Als Reibungszustand ist von einer Misch- bzw. Fluidreibung auszugehen.

Nach der Überwindung der Haftreibung und des Aufbrechens des Betongefüges fallen die gemessenen Kraftwerte ab und pendeln sich auf einem niedrigeren Niveau ein (vgl. Bild 89), was einem Zustand der Gleitreibung entspricht. Der Beton bzw. Mörtel haftet nicht mehr am Schwert und rutscht, rollt bzw. gleitet entlang der Schwertoberfläche. Aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse wurde für die Gleitreibung der Zugweg von 40 mm bis 150 mm festgelegt.

Die Einteilung der einzelnen Reibungsphasen erfolgt somit in die Abschnitte Haften ($F_{\text{gem(Max)}}$), Aufbrechen der Struktur des Betongefüges und Gleiten ($F_{\text{gem(Mittel)}}$). Dies ist in Bild 90 in einem idealisierten Kurvenverlauf dargestellt. Im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse wurden die Zugkräfte in Scherspannungen umgerechnet.

Bei einigen Versuchen wurde ein Verhaken oder Einklemmen einzelner grober Gesteinskörner an dem Austritt des Schwertes festgestellt, welches im Kurvenverlauf in Form eines starken Anstiegs der Kraft zu erkennen war. Diese Ausreißer wurden bei der Auswertung nicht in dem berechneten Mittelwert berücksichtigt.

6.2.2 Selbstverdichtende Mörtel und Betone

6.2.2.1 Allgemeines

Um den Einfluss der rheologischen Eigenschaften des SVB zu ermitteln, kamen unterschiedliche SVB zum Einsatz. Es sollten zum einen zwei unterschiedliche Partikelbeladungen (Gesteinskörnungsgehalte) und zum anderen zwei unterschiedliche Viskositäten geprüft werden. Deshalb wurden jeweils zwei SVB des Mehlkorntyps und zwei des Stabilisierertyps mit unterschiedlichen Gehalten an grober Gesteinskörnung untersucht. Durch unterschiedliche Wassergehalte wurde die Viskosität der Betone so modifiziert, dass sie jeweils eine vergleichsweise hohe und eine niedrige Viskosität aufwiesen. Um den Einfluss des Größtkorns zu ermitteln, wurde der Mehlkorntyp zusätzlich in einer Variante mit einem Größtkorn von 8 mm und einem Größtkorn von 16 mm untersucht. Des

Weiteren wurden von jedem SVB die entsprechenden Basismörtel (SVM) mit in die Untersuchungen aufgenommen.

6.2.2.2 Ausgangsstoffe

Für die Untersuchungen wurden die gleichen Ausgangsstoffe verwendet wie bei den rheologischen Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.2.1). Bei der groben Gesteinskörnung handelte es sich um einen Rheinkies gemäß DIN EN 12620:2003-04 /DIN03/ und DIN V 20000-103 /DIN04a/ mit einem Größtkorn von 8 und 16 mm. Bei den SVB des Stabilisierertyps (SVB3 und SVB4) wurde zusätzlich ein organisches Betonzusatzmittel der Wirkstoffgruppe „Stabilisierer“ verwendet.

6.2.2.3 Mischungszusammensetzung

Alle untersuchten SVB weisen einen Zementgehalt von 270 kg/m^3 auf. Der Mehlkorntyp (SVB1 und SVB2) hat im Gegensatz zum Stabilisierertyp (SVB3 und SVB4) einen Flugaschegehalt von 300 kg/m^3 . Der Stabilisierertyp weist einen Flugaschegehalt von 180 kg/m^3 auf. Die niederviskosen Mischungszusammensetzungen (SVB2 und SVB4) haben einen Wassergehalt von 200 kg/m^3 , die höherviskosen (SVB1 und SVB3) einen von 165 kg/m^3 .

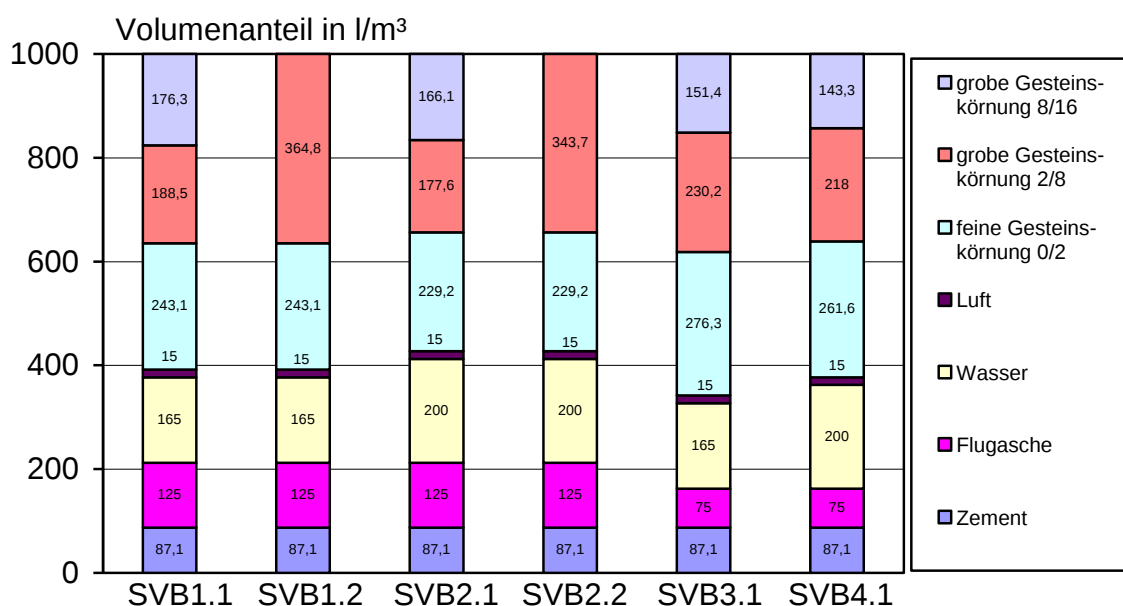


Bild 91: Stoffraumanteile der untersuchten SVB

Die Mischungszusammensetzungen der sechs untersuchten Betone sind in den Tabellen A31, A32 und A33, Anhang A, zusammengestellt. Die SVB mit einem Größtkorn von 16 mm wurden mit „1“, die mit einem Größtkorn von 8 mm mit „2“ bezeichnet. Die Stabilisierertyp-SVB weisen eine um ca. 51 l höhere Partikelbeladung (ca. 18 l an grober und ca. 33 l an feiner Gesteinskörnung) im Vergleich zu den Mehlkorntypen auf (vgl. Bild 91). Die Mischungszusammensetzung der selbstverdichtenden Basismörtel SVM1 bis SVM4 ergibt sich aus der Extraktion der Mörtelphase aus den jeweiligen SVB (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Mischungszusammensetzungen der SVM sind in den Tabellen A34 und A35, Anhang A, aufgeführt. SVM1 und SVM2 wurden auch bei den rheologischen Untersuchungen mit einbezogen (vgl. Kapitel 5). Da es sich bei SVM3 und SVM4 um Basismörtel von Stabilisierertyp-SVB handelt, wurden diese dort nicht betrachtet.

6.2.2.4 Frischmörtel- und Frischbetoneigenschaften

Das Setzfließmaß sm wurde bei allen SVB durch Aussteuern mit Fließmittel auf 710 mm eingestellt, was im Bereich der in Deutschland zum Einsatz kommenden SVB liegt. Die höherviskosen SVB weisen erwartungsgemäß eine höhere Setzfließzeit t_{500} und Trichterauslaufzeit t_{Tr} als die niederviskosen SVB auf. Des Weiteren ist die Frischbetonrohddichte der niederviskosen Betone aufgrund ihres höheren Wassergehaltes geringer. Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Frischbetoneigenschaften der Selbstverdichtenden Betone

Prüfgröße	Einheit	SVB1.1	SVB1.2	SVB2.1	SVB2.2	SVB3.1	SVB4.1
Setzfließmaß sm	mm	710	710	710	710	710	710
Setzfließzeit t_{500}	s	6	7	2	3	5	2
Trichterauslaufzeit t_{Tr}		13	14	6	7	12	4
Frischbetonrohddichte	kg/m ³	2.336	2.343	2.297	2.309	2.353	2.317

Das Setzfließmaß sm wurde bei allen SVM durch Anpassung des Fließmittelgehaltes auf 290 mm eingestellt. Die Trichterauslaufzeit der höherviskoserer SVM war erwartungsgemäß höher als bei den niederviskosen. Die Ergebnisse der Frischmörtelprüfungen der SVM sind Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Frischmörteleigenschaften der Selbstverdichtenden Mörtel

Prüfgröße	Einheit	SVM1	SVM2	SVM3	SVM4
Setzfließmaß sm	mm	290	290	290	290
Trichterauslaufzeit t_{Tr}	s	7	3	5	2
Frischmörtelrohddichte	kg/m ³	2163	2169	2092	2095

6.2.3 Versuchsmatrix

Eine Übersicht der durchgeführten Tribometerversuche wird in Tabelle 5 unter Berücksichtigung der zu untersuchenden Einflussparameter gegeben. Die Zuggeschwindigkeit v betrug je nach Versuchsdurchführung 10, 20 und 30 mm/s. Diese Geschwindigkeiten wurden gewählt, da diese im Bereich der Fließgeschwindigkeiten von SVB beim Befüllen einer Schalung liegen (vgl. Kapitel 3.3.2). Aufgrund der Angaben in der Literatur beeinflussen höhere Geschwindigkeiten gerade bei den untersuchten niedrigen Druckhöhen die Reibung zwischen Beton und Schalung nicht, was in den Versuchen jedoch noch nachzuweisen war. Die Modelloberfläche war rau-benetzend, glatt-benetzend oder glatt-nichtbenetzend ausgebildet. Die Frischbetondruckhöhe h des entsprechenden SVB-Typs variierte von 100 bis 700 mm. Diese Höhen wurden gewählt, um realitätsnahe Fließfronthöhen des SVB abzubilden.

Tabelle 5: Übersicht über die durchgeführten Tribometerversuche

v in mm/s	10	20				30
h in mm	300	100	300	500	700	300
SVM1	-	0+	0+	0+	0+	-
SVM2	-	0+	0+	0+	0+	-
SVM3	-	0+	0+	0+	0+	-
SVM4	-	0+	0+	0+	0+	-
SVB1.1	-	0+	0+	0+	0+	-
SVB1.2	0+	0+	0+Δ	0+	0+	0+
SVB2.1	-	0+	0+	0+	0+	-
SVB2.2	0	0+	0+	0+	0+	0
SVB3.1	0+	0+	0+	0+	0+	0+
SVB4.1	0+	0+	0+Δ	0+	0+	0+

Oberflächen: o = glatt-benetzend, Δ = glatt-nichtbenetzend
 + = rau-benetzend, - = kein Versuch

6.3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

6.3.1 Tribometerversuche

6.3.1.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die Einflussfaktoren rheologische Eigenschaften (SVB-Typ), Geschwindigkeit, Schwertoberfläche und Normalkraft (Füllhöhe) (vgl. Kapitel 3.4) unter Zuhilfenahme von Mittelwertvergleichen analysiert. Die Ergebnisse der Tribometerversuche sind für jeden Versuch graphisch in den Bildern B56 bis B124, Anhang B, dargestellt. Die Ergebnisse aller Tribometerversuche sind in Tabelle A36, Anhang A, zusammengestellt. Eine vergleichende Zusammenstellung findet sich in Bild B125 bis Bild B140, Anhang B.

6.3.1.2 Einfluss der rheologischen Eigenschaften und des SVB-Typs

Untersucht wurden mögliche Unterschiede zwischen sechs SVB-Typen und deren Basis-mörtel (vgl. Kapitel 6.2.2). Es wurden sowohl Mehlkorntypen (SVB1, SVB2) als auch Stabilisierertypen (SVB3, SVB4) als höherviskoses (SVB1, SVB3) und niederviskoses (SVB2, SVB4) System mit einem Größtkorn von 8 mm (.1) und 16 mm (.2) betrachtet. Die Mischungen unterschieden sich somit sowohl rheologisch als auch hinsichtlich der Volumenanteile an Gesteinskörnung und bilden die Spannweite der in Deutschland zum Einsatz kommenden SVB ab.

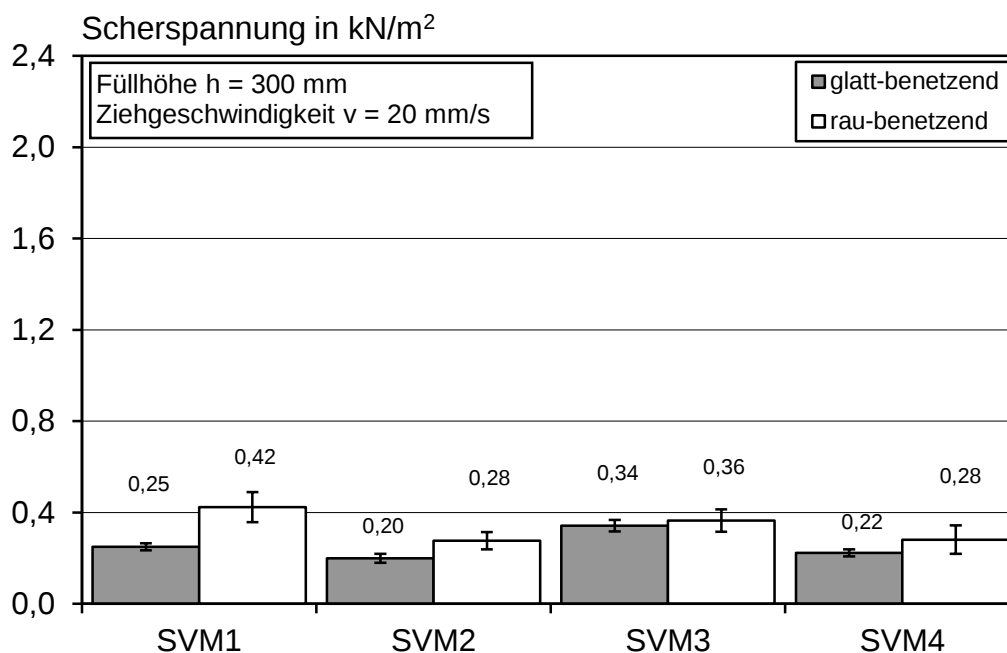


Bild 92: Scherspannungen der SVM-Typen bei unterschiedlichen Modelloberflächen

In Bild 92 sind für die untersuchten SVM die Scherspannungswerte der Einzelversuche mit ihren jeweiligen Standardabweichungen sowohl für eine glatt-benetzende als auch für eine rau-benetzende Oberfläche bei einer Füllhöhe von 300 mm und einer Zuggeschwindigkeit des Schwertes von 20 mm/s für die Reibungsphase „Gleiten“ dargestellt. Insgesamt sind die auftretenden Scherspannungen und die Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen verhältnismäßig gering.

Die Scherspannungen waren für alle SVM bei einer rau-benetzenden Modelloberfläche höher als bei einer glatt-benetzenden, was in Kapitel 6.3.1.4 gesondert diskutiert wird. Die niederviskosen SVM wiesen unabhängig von der Oberfläche geringere Scherspannungen auf als die höherviskosen. Die Viskosität hängt von den Partikelabständen im Fluid ab (vgl. Kapitel 5.4). Da bei den höherviskosen Systemen der Wassergehalt geringer und somit auch der Partikelabstand kleiner ist, ergibt sich eine größere innere Reibung, die eine höhere Scherspannung verursacht.

Bei den Stabilisierertypen (SVM3 und SVM4) treten bei einer glatt-benetzenden Oberfläche höhere Scherspannungen auf als bei den Mehlkorntypen (SVM1 und SVM2). Dies gilt für den Vergleich der SVM mit der gleichen Viskosität. Bei der rau-benetzenden Oberfläche wurde dies nicht beobachtet.

Da die Stabilisierertypen einen höheren Anteil an feiner Gesteinskörnung aufweisen, ist demnach weniger Zementleim vorhanden, der eine „schmierende“ Wirkung zwischen Gesteinskorn und Modelloberfläche bewirken kann. Deshalb wurden bei den SVM des Stabilisierertyps zunächst höhere Scherspannungen erwartet. Offensichtlich hat die geringe Differenz des Gesteinskörnungsanteils beim Mörtel nur einen untergeordneten Einfluss auf die Fluid-Struktur-Interaktion.

In Bild 93 sind die entsprechenden Versuche mit den SVB dargestellt. Zunächst wird deutlich, dass im Vergleich zu den SVM bei der glatt-benetzenden Modelloberfläche höhere und bei der rau-benetzenden Modelloberfläche deutlich höhere Scherspannungen auftreten. Offensichtlich hat die Reibung zwischen den groben Gesteinskörnern und der Modelloberfläche insbesondere bei rauen Oberflächen einen großen Einfluss auf die Fluid-Struktur-Interaktion.

Im Gegensatz zum SVM sind beim SVB die Scherspannungen der Stabilisierertypen größer als die Mehlkorntypen vergleichbarer Viskosität. Weiterhin weisen die höherviskosen SVB-Typen grundsätzlich höhere Scherspannungen auf als die entsprechenden niederviskoseren SVB-Typen. Außerdem sind die Scherspannungen für alle SVB-Typen bei rau-benetzender Schwertoberfläche höher als bei glatt-benetzender Oberfläche.

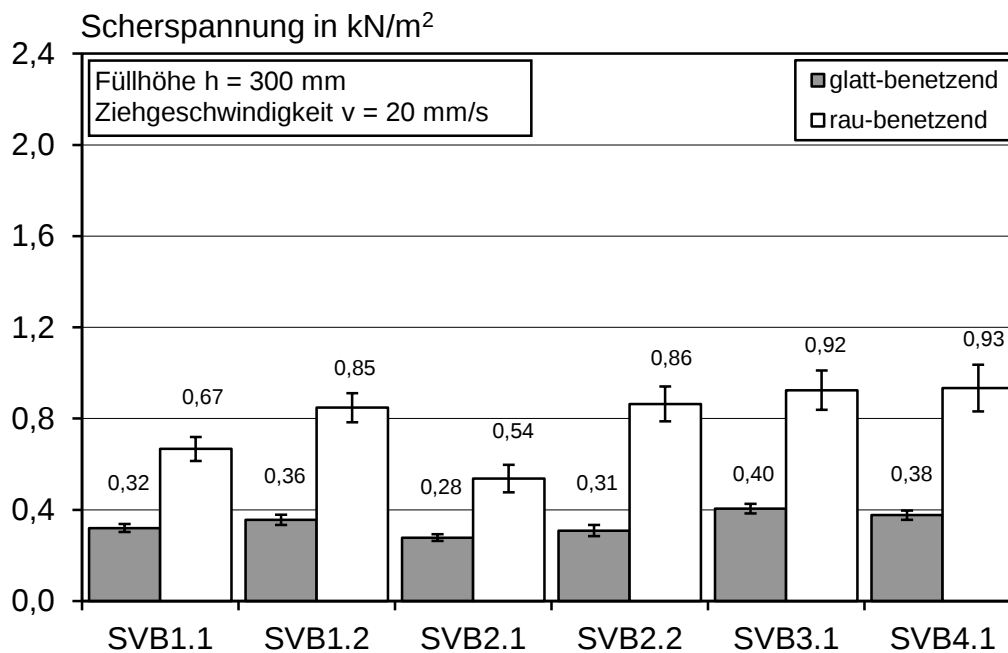


Bild 93: Scherspannungen der SVB-Typen bei unterschiedlichen Modelloberflächen

Eine Betrachtung der unterschiedlichen Viskositäten bei den Versuchen mit einer glatt-benetzenden Oberfläche zeigt, dass die Scherspannung bei höherviskosen Systemen höher ist als bei den vergleichbaren niederviskosen Systemen. Bei einer rau-benetzenden Oberfläche ist dies nur bei SVB1.1 und dem vergleichbaren niederviskosen Typ SVB2.1 zu beobachten. Beim Vergleich von SVB1.2 mit SVB2.2 und SVB3.1 mit SVB4.1 ist dahingegen keine Aussage zu treffen, da die Mittelwerte annähernd gleich sind. Die höhere Viskosität der SVB bewirkt aufgrund einer größeren inneren Reibung eine größere Scherspannung.

Der Vergleich von Stabilisierertypen und Mehlkorntypen zeigt, dass bei gleicher Modelloberfläche jeweils der Stabilisierertyp eine größere Scherspannung aufweist als der Mehlkorntyp. Dies kann durch den höheren Gesteinskörnungsanteil der Stabilisierertypen erklärt werden (vgl. Kapitel 6.2.2.3, Bild 91). Somit steht weniger Zementleim, der eine schmierende Wirkung hat, zur Verfügung, bzw. es bestehen mehr direkte Kontaktpunkte von Gesteinskörnern mit der Struktur, was zu einer höheren Scherspannung führt.

Der Einfluss des Größtkorns wurde mit Mehlkorntyp-SVB mit einem Größtkorn von 8 mm (.2) und 16 mm (.1) untersucht. Bei vergleichbarer Viskosität zeigt sich sowohl bei glatt- als auch bei rau-benetzender Oberfläche, dass bei einem Größtkorn von 8 mm eine höhere Scherspannung auftritt als bei den Mischungen mit 16 mm. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Gesteinskörnung mit 8 mm Größtkorn bei

gleichbleibendem Volumengehalt eine größere Oberfläche aufweist und sich dadurch zwischen den Körnern bzw. zwischen Korn und Struktur (Modelloberfläche) mehr Interaktionen und somit eine größere Reibung einstellt.

Die Untersuchungen zeigen, dass sowohl die Viskosität als auch die Mischungszusammensetzung bzw. die Korngrößenverteilung einen Einfluss auf die Reibung haben und somit das Strömungsverhalten direkt und indirekt beeinflusst wird.

6.3.1.3 Einfluss der Fließgeschwindigkeit

Der Einfluss der Fließgeschwindigkeit des SVB in der Schalung wurde durch die Variation der Ziehgeschwindigkeit des Schwertes im Tribometerversuch untersucht. In Bild 94 sind die Ergebnisse für die Reibungsphase „Gleiten“ bei einer konstanten Füllhöhe von 300 mm für die Mischungen SVB1.2, 2.2, 3.1 und 4.1 bei einer glatt-benetzenden Oberfläche dargestellt. Die Untersuchungen wurden zunächst nur am Beton durchgeführt, da dort etwaige Unterschiede aufgrund des höheren Scherspannungsniveaus eindeutiger feststellbar sind.

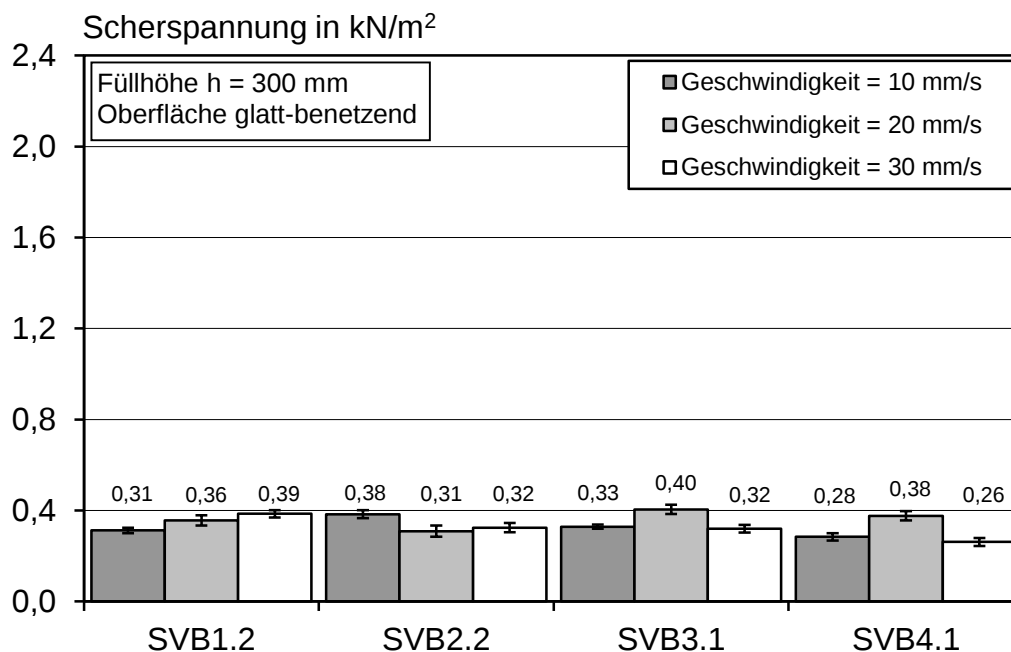


Bild 94: Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Fluid-Struktur-Interaktion bei glatt-benetzender Oberfläche

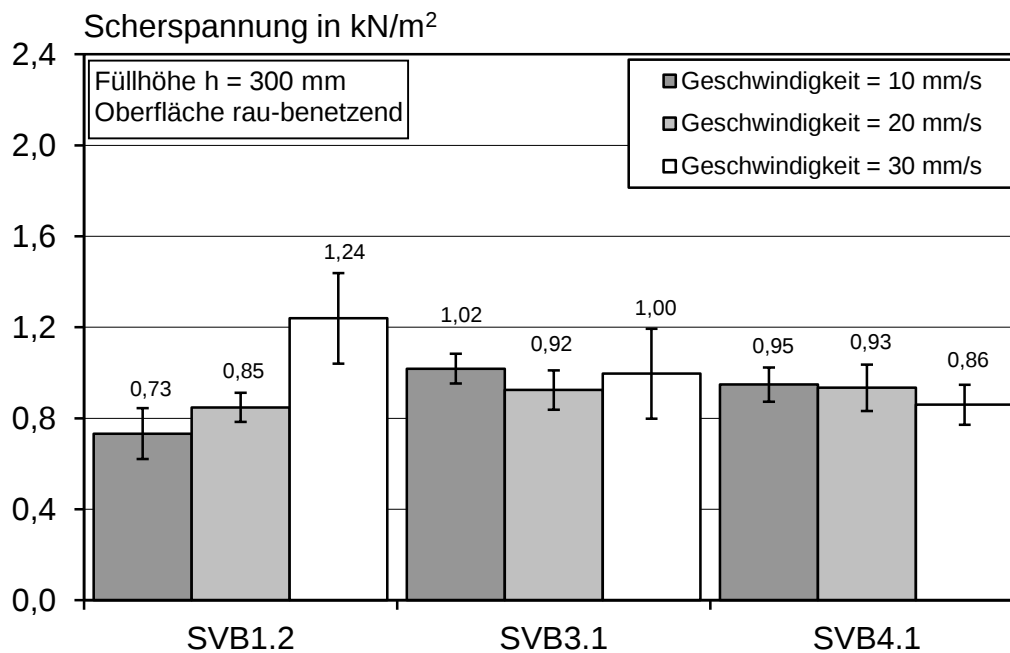


Bild 95: Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Fluid-Struktur-Interaktion bei rau-benetzender Oberfläche

Es ist zu erkennen, dass die Fließgeschwindigkeit keinen maßgebenden Einfluss auf die Scherspannung zwischen Schalung und Beton hat. Der SVB-Typ 1.2 zeigt mit steigender Geschwindigkeit einen Anstieg der Scherspannung. Im Unterschied dazu liefern die SVB Typen 3.1 und 4.1 das Maximum der Kraft bei einer Geschwindigkeit von 20 mm/s, das Minimum bei 30 mm/s. Die maximale Kraft wird beim SVB2.2 bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/s erreicht, die minimale bei 20 mm/s.

Bei der Verwendung einer rau-benetzenden Oberfläche lässt sich ebenfalls kein eindeutiger Einfluss der Geschwindigkeit auf die Scherspannung ableiten (vgl. Bild 95). Generell sind die Werte im Vergleich zur glatten Oberfläche deutlich höher und die gezeigten Tendenzen ähnlich.

Demnach lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die Fließgeschwindigkeit einen untergeordneten Einfluss auf die Fluid-Struktur-Interaktion ausübt, unabhängig von der Rauigkeit der Schalhaut. Dieses bestätigen die Untersuchungen von Djelal, bei denen für niedrige Normaldrücke auch kein Einfluss der Ziehgeschwindigkeit beobachtet wurde (vgl. Kapitel 3.3.2). Ein signifikanter Einfluss der Fließgeschwindigkeit wurde erst bei hohen Drücken von mehr als 50 kN/m^2 festgestellt.

6.3.1.4 Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit

Zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit, Benetzbarkeit) wurden Untersuchungen mit SVM und SVB durchgeführt.

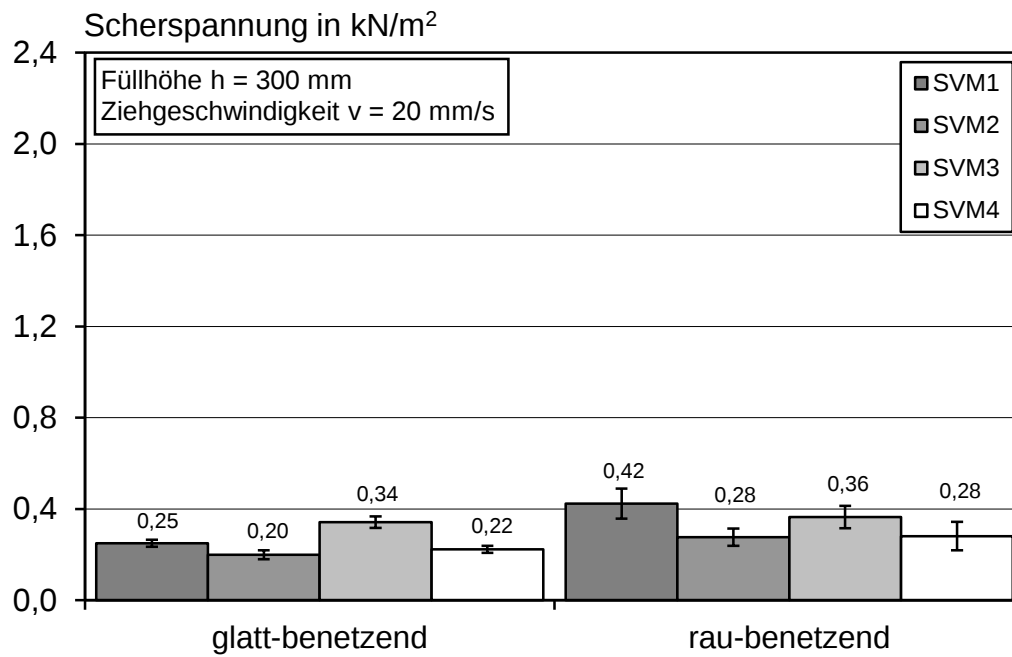


Bild 96: Scherspannungen der SVM-Typen bei unterschiedlicher Oberfläche

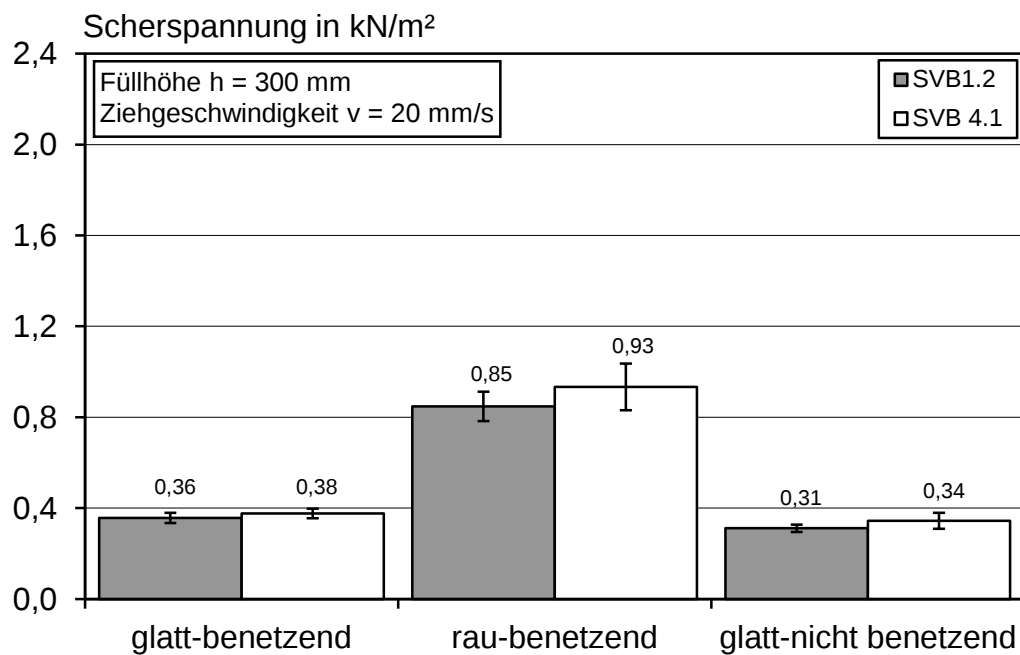


Bild 97: Scherspannungen der SVB-Typen bei unterschiedlicher Oberfläche

In Bild 96 sind die Ergebnisse der SVM für eine konstante Ziehgeschwindigkeit von 20 mm/s und eine Füllhöhe von 300 mm dargestellt. Bei einer rau-benetzenden Oberfläche ergeben sich generell höhere Scherspannungen als bei einer glatt-benetzenden. Dies gilt sowohl für den Mehlkorntyp als auch für den Stabilisierertyp. Die Streuung der Daten bei den Versuchen mit einer rau-benetzenden Oberfläche ist wesentlich größer als bei einer glatt-benetzenden (vgl. Bilder B134 bis B140, Anhang B).

In Bild 97 sind die entsprechenden Ergebnisse für SVB dargestellt. Es wurden die Mittelweltergebnisse für die Reibungsphase „Gleiten“ über die unterschiedlichen Modelloberflächen aufgetragen. Die Benetzbarkeit der Oberfläche scheint auf die Scherspannung keinen Einfluss auszuüben. Im Gegensatz dazu hat die Rauigkeit wie beim SVM einen sehr großen Einfluss.

In den Untersuchungen von Djelal und Vanhove wurde ebenfalls ein Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit festgestellt (vgl. Kapitel 3.3.2.2, Bild 41). Die rauere Oberfläche wies auch eine höhere Scherspannung auf, die aber erst bei deutlich höheren Drücken festzustellen war. Die beiden Rauigkeiten, die in diesen Versuchen untersucht wurden, sind, übertragen auf die hier durchgeführten Tribometerversuche, im Bereich der glatten Modelloberfläche anzusiedeln. Für den geringsten Druck von 50 kN/m² wurde für beide Oberflächen der gleiche Reibungskoeffizient angegeben. Untersuchungen mit zu den im Rahmen dieser Arbeit vergleichbaren Rauigkeiten führte Proske durch (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Dieser erkannte aber keine Einflüsse der Oberflächenrauheit, was vermutlich auf die wesentlich höheren Frischbetondrucke zurückzuführen war, die den Oberflächeneinfluss überlagert haben.

6.3.1.5 Einfluss des Frischbetondruckes

Der Einfluss des Frischbetondrucks auf die Fluid-Struktur-Interaktion wurde über die Variation der Füllhöhe im Tribometer sowohl mit SVM als auch mit SVB untersucht. In Bild 98 sind die Scherspannungen mit einer rau-benetzenden Modelloberfläche und einer konstanten Geschwindigkeit von 20 mm/s für die SVM dargestellt. Die Scherspannungen steigen erwartungsgemäß mit steigendem Frischbetondruck an, was auch bei den Versuchen mit glatt-benetzender Oberfläche beobachtet wurde (Bild B131, Anhang B). Grundsätzlich ergaben sich bei einer rau-benetzenden Oberfläche höhere Scherspannungen als bei einer glatt-benetzenden (vgl. Kapitel 6.3.1.4).

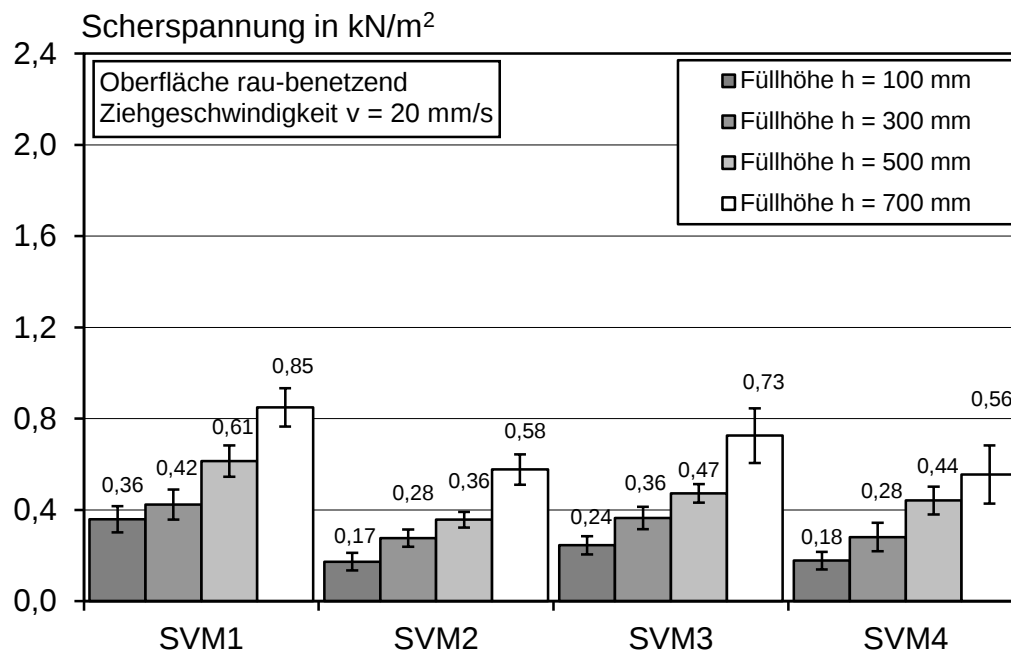


Bild 98: Scherspannungen im Tribometerversuch bei verschiedenen Frischbetondrücken bei der Untersuchung der SVM

Die Ergebnisse der Versuche mit SVB bei einer konstanten Geschwindigkeit von 20 mm/s und einer glatt-benetzenden Oberfläche für Füllhöhen von 300 mm und 500 mm werden in Bild 99 dargestellt. Dabei zeigt sich ebenfalls, dass mit steigendem Frischbetondruck tendenziell eine Zunahme der Scherspannung zu beobachten ist.

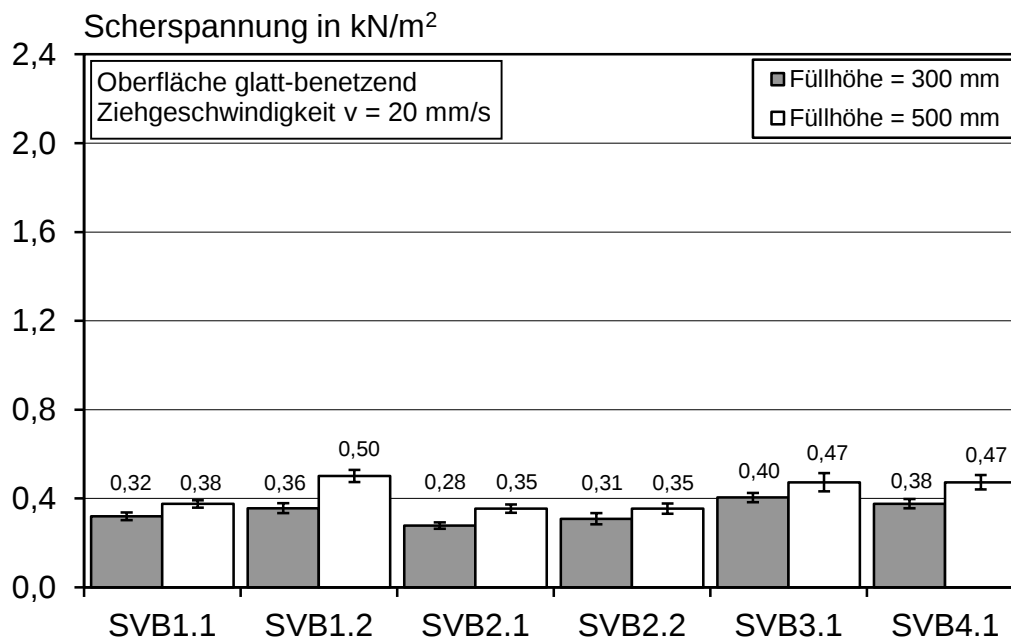


Bild 99: Scherspannungen im Tribometerversuch bei verschiedenen Frischbetondrücken bei der Untersuchung der SVB

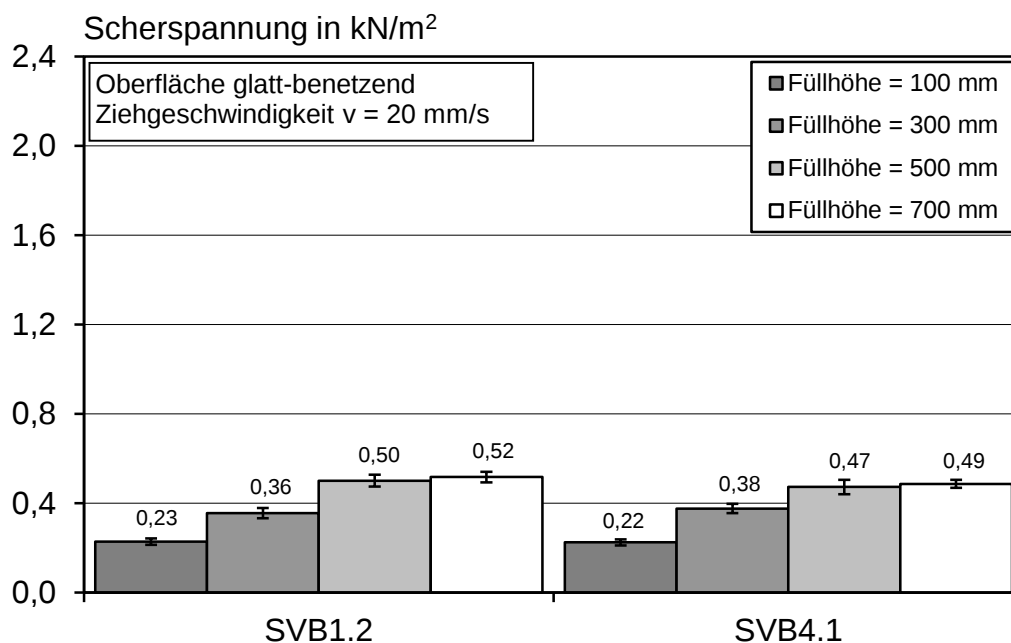


Bild 100: Scherspannungen im Tribometerversuch bei verschiedenen Frischbetondrücken bei der Untersuchung der SVB

Bei den SVB1.2 und 4.1 wurden zusätzlich die Füllhöhen 100 und 700 mm untersucht. Wie in Bild 100 ersichtlich, nehmen die Scherspannungen erst bei sehr geringen Frischbetondrücken deutlich ab. Damit deutet sich an, dass sich die Scherspannung aus zwei

Komponenten zusammensetzt: Anfangsscherspannung und normalkraftabhängiger Anteil. Eine detailliertere Auswertung der Versuche wurden in Kapitel 6.4 durchgeführt.

6.3.2 Vergleich von rheologischen und tribologischen Eigenschaften

Zur Validierung und Bewertung der Tribometerversuche wurden sowohl Fließversuche im L-Kasten, der mit verschiedenen Modelloberflächen ausgekleidet war, als auch Viskosimeterversuche durchgeführt.

In Bild 101 sind die Fließzeiten, die die SVM im L-Kasten benötigen, um von der 200 mm Marke bis zur 400 mm Marke zu fließen, dargestellt. Die Weg-Zeit Diagramme der L-Kasten-Versuche sowohl für die SVM als auch für die SVB sind in den Bildern B161 und B162, Anhang B, enthalten.

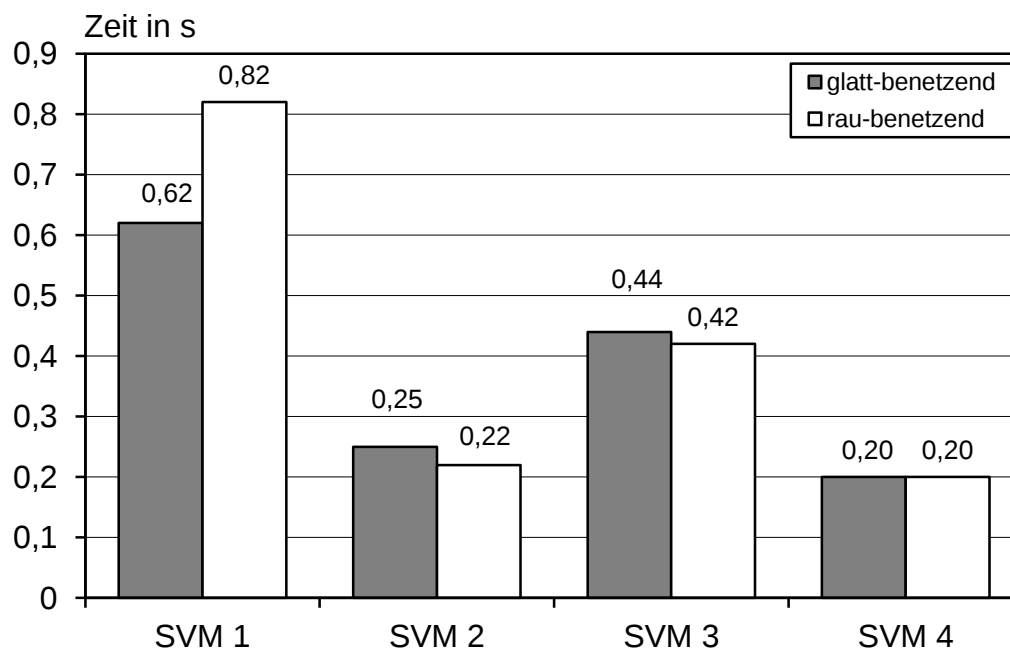


Bild 101: SVM-Fließzeiten im L-Kasten

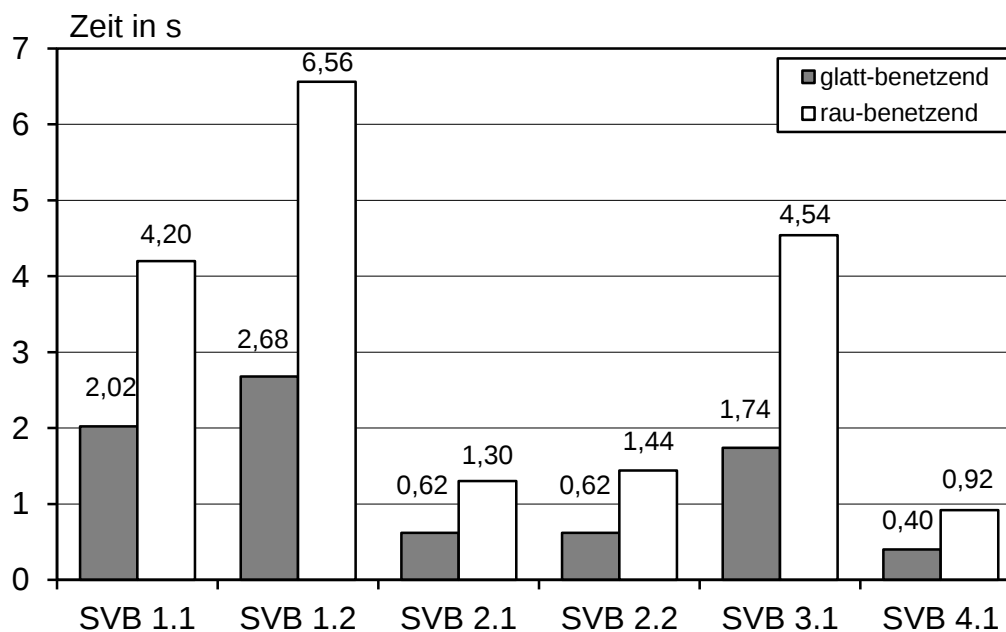


Bild 102: SVB-Fließzeiten im L-Kasten

Mit Ausnahme von SVM1 zeigen die SVM bei einer rau-benetzenden Oberfläche etwa die gleiche Fließzeit wie bei einer glatt-benetzenden Oberfläche.

Im Gegensatz dazu ist bei den SVB ein deutlicher Einfluss der Oberflächenrauigkeit festzustellen (vgl. Bild 102). Wie bei den Tribometerversuchen ist auch hier ein deutlicher Unterschied zwischen der rau- und der glatt-benetzenden Oberfläche zu erkennen. Die Fließzeiten bei einer rau-benetzenden Oberfläche sind zwei- bis dreimal höher als bei einer glatten Wandoberfläche. Dieses ist auf die Partikel/Wand-Interaktion der groben Gesteinskörnung mit den Modelloberflächen zurückzuführen. Offensichtlich wird durch diese Feststoff/Feststoff-Reibung die Fließgeschwindigkeit des Gesamtsystems „Beton“ signifikant beeinflusst.

Neben dem Einfluss der Fluid-Struktur-Interaktion wird die Fließgeschwindigkeit erwartungsgemäß ebenfalls durch die Viskosität des Mörtels bzw. Betons beeinflusst. Dementsprechend sind die Fließzeiten der niederviskosen Mischungen ca. 2 bis 3 Mal niedriger als die der höherviskosen. Ein signifikanter Einfluss des Größtkorns (16 mm (.1), 8 mm (.2)) auf die Fließzeiten im L-Kasten wurde bei den SVB nicht festgestellt. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Mehlkorntypen langsamer fließen als die Stabilisierertypen. Die einzige Ausnahme bildet der SVB3.1 bei einer rau-benetzenden Oberfläche. Er weist eine geringfügig höhere Zeit auf als der SVB1.1. Offensichtlich dominiert hier der Einfluss der Viskosität.

Die Fließzeiten der L-Kasten-Versuche entsprechen Fließgeschwindigkeiten von 40 mm/s für eine Fließzeit von 5 s und 200 mm/s für eine von 1 s. Die Ergebnisse der Tribometerversuche bei 20 mm/s werden im Hinblick auf den Einfluss der Viskosität und des Größtkorns bestätigt, wohingegen die größere Scherspannung der Stabilisierertypen im Tribometerversuch nicht generell durch höhere Fließzeiten im L-Kasten belegt werden.

Die Viskosität der Mischungen, charakterisiert z. B. durch das baustellengerechte Verfahren der Ermittlung der Trichterauslaufzeit (vgl. Tabellen 6 und 7), hat einen maßgebenden Einfluss auf die Fließzeit im L-Kasten sowohl bei den SVM als auch bei den SVB. Demgegenüber hat die Rauigkeit der Schalungsoberfläche nur bei den SVB einen signifikanten Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit.

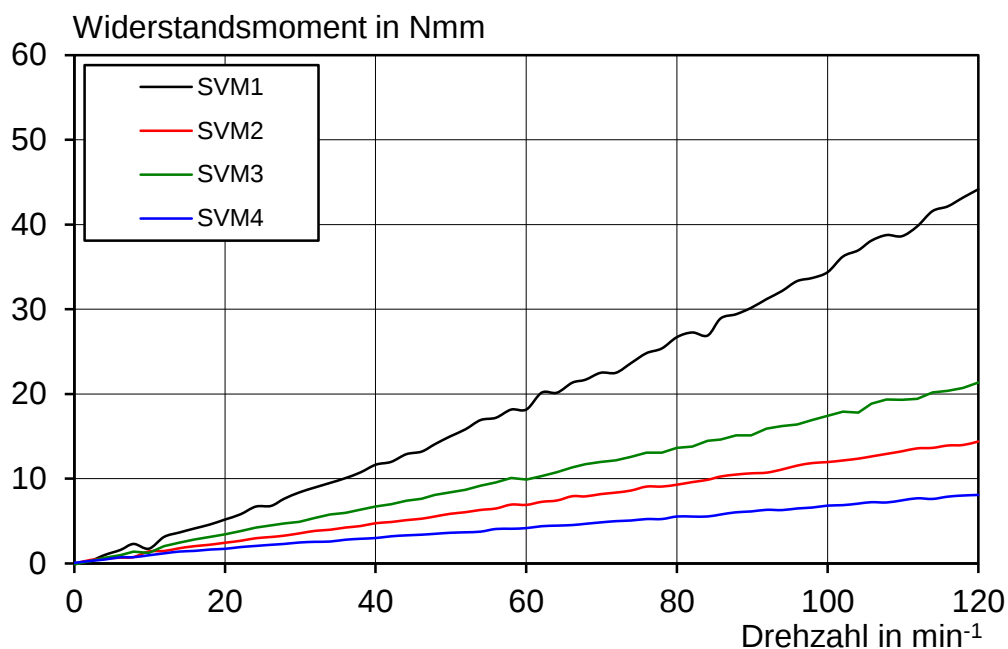


Bild 103: Fließkurven der SVM

Im Rahmen der Viskosimeteruntersuchungen werden Fließkurven anhand der Auswertung des abfallenden Astes des Scherprofils (vgl. Kapitel 5) ermittelt (vgl. Bild 103). Die Steigung der Fließkurve entspricht der Viskosität des Mörtels. Die in den Viskosimeterversuchen ermittelte relative Viskosität korreliert mit der Trichterauslaufzeit, was den bereits in Kapitel 5.2.5 festgestellten qualitativen Zusammenhang zwischen Trichterauslaufzeit und Viskosität bestätigt.

Je niedriger die Viskosität, desto eher zeigen die Mörtel im vorliegenden Fall ein lineares, Bingham'sches Fließverhalten. SVM3 zeigt ein tendenziell dilatantes, SVM1 mit der höchsten Viskosität ein ausgeprägt dilatantes Fließverhalten.

Stellt man die Ergebnisse der einzelnen Versuche gegenüber, so ist festzustellen, dass mit zunehmender relativer Viskosität die Fließzeit des SVB bzw. des SVM im L-Kasten ebenfalls ansteigt, d. h. der Trichterauslaufversuch spiegelt die Viskosität wieder (vgl. Tabellen 6 und 7).

Bei den hoch- und niederviskosen Systemen hat jeweils der Mehlkorntyp eine höhere Viskosität als der Stabilisierertyp. Dies begründet sich vermutlich im höheren Mehlkornanteil (Flugasche) der Mehlkorntypen. Bei der Unterscheidung des Mehlkorntyps hinsichtlich des Größtkorns zeigt sich, dass die SVB mit dem kleineren Größtkorn (8 mm) eine höhere Viskosität aufweisen als die mit einem Größtkorn von 16 mm (vgl. Tabelle 7). Das ist auf die größere Oberfläche der Gesteinskörnung bei einem Größtkorn von 8 mm zurückzuführen. Durch den daraus resultierenden höheren Wasseranspruch wird bei gleichem Wassergehalt der Partikelabstand verringert und somit die Viskosität erhöht.

Tabelle 6: Frischbetoneigenschaften und Scherspannung im Tribometerversuch bei einer Füllhöhe von 300 mm und Zuggeschwindigkeit von 20 mm/s der SVM - Ordnung nach der Viskosität

Prüfgröße	Einheit	SVM1	SVM3	SVM2	SVM4
Setzfließmaß sm	mm	270	270	270	270
Trichterauslaufzeit t_{Tr}	s	7	3	5	2
Relative Viskosität bei 60 1/min	Nmm·min	0,39	0,17	0,12	0,06
L-Kastenfließzeit glatt	s	0,62	0,25	0,44	0,20
L-Kastenfließzeit rau		0,82	0,22	0,42	0,20
Scherspannung g-b	kN/m ²	13,78	7,55	13,0	8,47
Scherspannung r-b		16,08	10,49	13,83	10,68

Tabelle 7: Frischbetoneigenschaften und Scherspannung im Tribometerversuch bei einer Füllhöhe von 300 mm und Zuggeschwindigkeit von 20 mm/s der SVB - Ordnung nach der Trichterauslaufzeit (Viskosität)

Prüfgröße	Einheit	SVB1.2	SVB1.1	SVB3.1	SVB2.2	SVB2.1	SVB4.1
Setzfließmaß sm	mm	710	710	710	710	710	710
Setzfließzeit t_{500}	s	7	6	5	3	2	2
Trichterauslaufzeit t_{Tr}		13	12	12	7	6	4
L-Kastenfließzeit glatt		2,68	2,02	1,74	0,62	0,62	0,40
L-Kastenfließzeit rau		6,56	4,20	4,54	1,44	1,30	0,92
Scherspannung g-b	kN/m ²	0,36	0,32	0,40	0,31	0,28	0,38
Scherspannung r-b		0,85	0,67	0,92	0,86	0,54	0,93

Unmittelbar lässt sich die Scherspannung im Tribometer nicht mit den rheologischen Kenngrößen korrelieren. Die Art des SVB scheint hier zusätzlich eine Rolle zu spielen, d. h., ob es sich um einen Mehlkorn- oder einen Stabilisierertyp handelt. Trotz geringer Viskosität hat der Stabilisierertyp 4.1 die höchste Scherspannung. Interessant ist dabei, dass sich die Fließzeiten im L-Kasten trotz der höheren Scherspannung bei SVB4.1 am niedrigsten einstellen. Offensichtlich dominiert die Viskosität die Fließgeschwindigkeit vom SVB im Vergleich zur Rauigkeit der Schalung.

6.4 Tribologisches Modell zur Prognose der Fluid-Struktur-Interaktion

6.4.1 Allgemeines

Um die Fluid-Struktur-Interaktion, die Reibung zwischen SVB und Schalung, berechnen und prognostizieren bzw. als Eingangsgröße in einem CFD-Code verwenden zu können, wird ein tribologisches Modell entwickelt, mit dem in Abhängigkeit von der Rauigkeit der Schalung und der jeweilig verwendeten SVM bzw. SVB der Reibungsbeiwert bestimmt werden kann.

Der Einfluss der Reibung von SVB und Schalung auf das Fließverhalten kann über den Reibungskoeffizient (μ -Wert) betrachtet werden. Dieser gibt das Verhältnis zwischen der Reibungskraft bzw. der Scherspannung und der Normalkraft bzw. dem Normaldruck an, und kann mit dem Coulombschen Gesetz $\mu = R / N$ ermittelt werden.

In den Tribometerversuchen kann die senkrecht auf die Schwertoberfläche wirkende Normalkraft N über den gemessenen Frischbetondruck ermittelt werden (vgl. Kapitel 6.4.2). Die in den Tribometerversuchen ermittelten Zugkräfte sind jedoch nicht mit der Reibungskraft R gleichzusetzen. Diese Zugkräfte setzen sich aus der Reibungskraft R und einer Grundreibung F_{GR} zusammen. Daher ist Gleichung wie folgt zu erweitern:

$$\mu = \frac{R}{N} = \frac{F_{gem} - F_{GR}}{N} \quad (48)$$

mit:

μ	Reibungskoeffizient
R	Reibungskraft
N	Normalkraft
F_{gem}	gemessene Zugkraft
F_{GR}	Grundreibung

Die Grundreibung setzt sich aus der Kraft, die erforderlich ist, um das Schwert durch den leeren Tribometer zu ziehen (Grundreibung des Systems) und der Kraft zum Abstreifen des SVB zusammen. Die Grundreibung wird indirekt, wie in Kapitel 6.4.3 beschrieben, ermittelt.

6.4.2 Messung des Frischbetondrucks

In Bild 104 sind die Ergebnisse der Druckmessungen mit der im Tribometer eingebauten Kraftmessdose dargestellt (vgl. Kapitel 6.2.1.5). Die Druckspannungen liegen für alle SVM und SVB erwartungsgemäß in einem annähernd gleichen Wertebereich, was durch die gleichen Frischmörtel- bzw. Frischbetonrohddichten und die gleiche Fließgrenze zu begründen ist. Die Stabilisierertypen SVB3.1 und SVB 4.1 weisen geringfügig höhere Werte auf. Es zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Füllhöhe und der gemessenen Kraft.

Da sich die ermittelten Werte der Druckmessungen für alle SVB und SVM nur geringfügig unterschieden, wurde für die Berechnung des Frischbetondrucks des SVB der Mittelwert aus diesen Messungen verwendet.

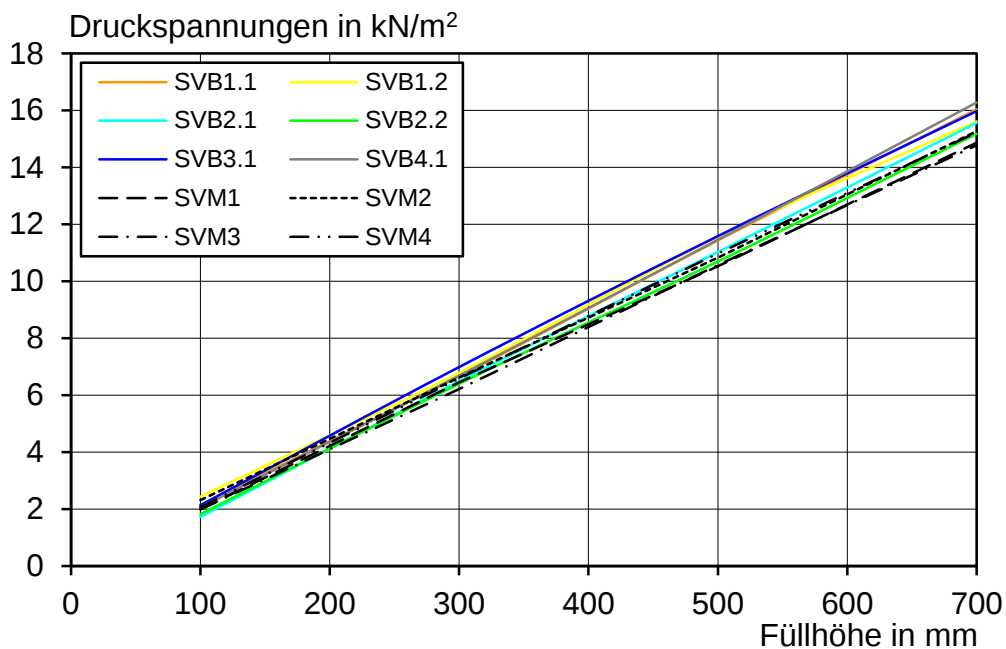


Bild 104: Ermittlung des Frischmörtel- und Frischbetondrucks im Tribometerversuch

6.4.3 Ermittlung der Grundreibung und der Reibungskoeffizienten

Die korrigierten Mittelwerte der Zugkräfte wurden in Abhängigkeit der Füllhöhen aufgetragen. Unter der Voraussetzung eines linearen Anstiegs der Zugkraft bzw. der Scherspannung zwischen Schwert und Beton mit zunehmender Füllhöhe kann eine Ermittlung der Grundreibung über eine lineare Regression erfolgen. Der y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden repräsentiert die Scherspannung, welche aufgebracht werden muss, um das Schwert im Tribometer bei einer fiktiven Füllhöhe von Null zu ziehen.

In Bild 105 ist eine schematische Darstellung dieses beschriebenen Verfahrens gegeben. In dem links dargestellten qualitativen Kurvenverlauf eines Tribometerversuchs bei gegebener Füllhöhe und Geschwindigkeit sind das erste Maximum mit $F_{\max}$ und der korrigierte Mittelwert mit F_{Mittel} gekennzeichnet. Im rechten Bild ist der Abtrag der ermittelten Kräfte $F_{\max}$ und F_{Mittel} über ihre jeweiligen Füllhöhen abgebildet. Der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden der Mittelwerte mit der Kraftachse ergibt die im Diagramm mit $F_{\text{GR(Gleit)}}$ bzw. $F_{\text{GR(Haft)}}$ gekennzeichnete Grundreibung F_{GR} .

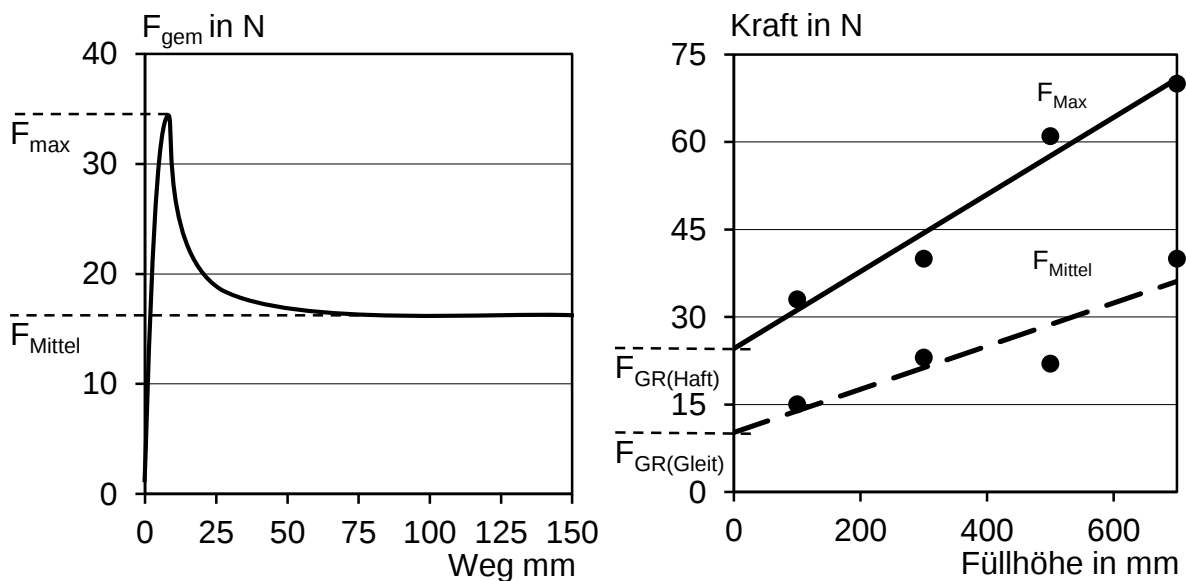


Bild 105: Darstellung des Prinzips der Grundreibungsermittlung

Im Rahmen der Tribometerversuche wurden zunächst Zugkräfte und Druckkräfte gemessen. Über die Fläche der an der Druckmessdose angeschlossenen Stahlplatte (vgl. Kapitel 6.2.1.5) können die Druckkräfte N in Normalspannungen σ_N und über die Fläche des Schwertes die Zugkräfte in Scherspannungen σ_S zwischen Fluid (Beton) und Schalung umgerechnet werden. Aus dem Auftrag von Scherspannung und Normal-

spannung ergibt sich bei $\sigma_N = 0$ der Grundwert der Scherspannung. Beispielhaft ist dies in Bild 106 dargestellt. Die Steigung der Regressionsgeraden ist der Reibungsbeiwert μ .

$$\sigma_S = \sigma_{GR} + \mu \cdot \sigma_N \quad (49)$$

mit:

σ_S	Scherspannung [kN/m ²]
μ	Reibungskoeffizient [-]
σ_N	Normalspannung [kN/m ²]
σ_{GR}	Grundreibung [kN/m ²]

Anhand des Bildes 106 werden beispielhaft die abzulesenden Kenndaten ermittelt. Mit der Gleichung der unteren Geraden wurden für den Gleitreibungskoeffizient μ_G der Wert 0,02 und für die Grundreibung σ_{GR} ein Wert von 0,19 kN/m² ermittelt. Aus der oberen Geraden, die durch den Abtrag der ersten Maxima gebildet wurde, kann der Haftreibungskoeffizient μ_H mit 0,05 und mit dem y-Achsenabschnitt die Grundreibung $\sigma_{GR(Haft)}$ mit 0,28 kN/m² abgelesen werden.

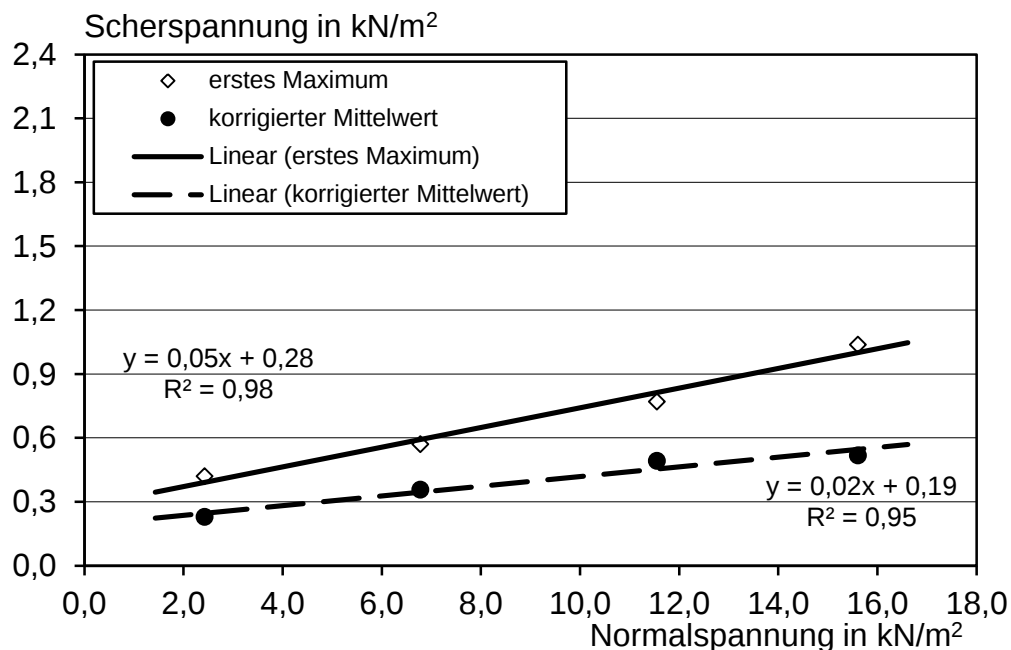


Bild 106: Bestimmung der Reibungskoeffizienten mittels linearer Regression

Alle weiteren Diagramme für die SVB sind in den Bildern B149 bis B160, Anhang B, aufgeführt. Die entsprechenden Diagramme für SVM sind in den Bildern B141 bis B148, Anhang B, zusammengestellt.

Die aus den Versuchen ermittelten Gleit- und Haftreibungskoeffizienten sowie die Grundreibungen, jeweils mit vier Füllhöhen ermittelt, sind für die untersuchten SVB/Schalhautkombinationen in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Reibungskoeffizienten und Grundreibungen der untersuchten SVB/Schalhautkombinationen; mit 4 Füllhöhen ermittelt

SVB	glatt-benetzend			rau-benetzend		
	μ_g	μ_h	σ_{GR}	μ_g	μ_h	σ_{GR}
-	kN/m ²			-	kN/m ²	
SVB1.1	0,023	0,043	0,287	0,063	0,163	0,394
SVB1.2	0,023	0,046	0,192	0,032	0,213	0,700
SVB2.1	0,022	0,017	0,144	0,031	0,053	0,302
SVB2.2	0,019	0,022	0,224	0,004	0,059	0,833
SVB3.1	0,020	0,020	0,326	0,096	0,151	0,350
SVB4.1	0,016	0,022	0,215	0,057	0,105	0,513

Bei rau-benetzender Oberfläche sind der Gleitreibungskoeffizient μ_g , der Haftreibungskoeffizient μ_h sowie die Grundreibung σ_{GR} erwartungsgemäß größer als bei einer glatt-benetzenden Oberfläche. μ_h ist in der Regel größer als μ_g . Somit ist eine eindeutige Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten und der Grundreibung von der Rauigkeit der Oberfläche gegeben.

Weiterhin ist erkennbar, dass die höherviskosen SVB tendenziell einen größeren Reibungskoeffizient aufweisen als die entsprechenden niederviskosen SVB. Dies gilt für beide Oberflächen. Somit würde eine höhere innere Reibung eine Erhöhung der äußeren Reibung bedeuten. Dies ist bei der rau-benetzenden Oberfläche ausgeprägter als bei der glatt-benetzenden Oberfläche.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten von der Partikelbeladung können auf Basis der ermittelten Ergebnisse keine eindeutigen Aussagen für die SVB getroffen werden. Beim Vergleich der Gleitreibungskoeffizienten der Mehlkorn-Typen mit unterschiedlichem Größtkorn ist festzustellen, dass diese bei den Mischungen mit einem Größtkorn von 8 mm kleiner sind als die Reibungskoeffizienten der Mischungen mit einem Größtkorn von 16 mm.

Die ermittelten Reibungskoeffizienten liegen im Bereich der Versuchsergebnisse von Djelal (vgl. Kapitel 3.3.2). Für den in diesen Untersuchungen geringsten Normaldruck von

50 kN/m² wurde ein Reibungskoeffizient von ca. 0,1 ermittelt. Geringere Werte wurden nur bei Verwendung von Schalölen erreicht.

6.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen einen großen Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Schalung auf die Reibung zwischen den untersuchten SVB und der Schalung. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der anstehende Frischbetondruck. Ein nahezu proportionaler Zusammenhang zwischen Füllhöhe und demzufolge dem anstehenden Frischbetondruck und der gemessenen Scherspannung wurde nachgewiesen. Der dritte maßgebende Einflussparameter ist die Viskosität des Selbstverdichtenden Betons. Dies zeigte sich sowohl in den Tribometerversuchen als auch in den L-Kasten-Versuchen.

Zum Einfluss des Größtkorns und der Volumenanteile der groben Partikel bzw. des SVB-Typs (Mehlkorn- bzw. Stabilisierertyp) konnten keine eindeutigen Aussagen herausgearbeitet werden. Die Unterschiede in den Gehalten an grober Gesteinskörnung bei den untersuchten Betonen sind aber auch verhältnismäßig gering. Die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass es sich für die Reibung bei diesen beiden Parametern eher um untergeordnete Einflussgrößen bei SVB handelt, allerdings bei der Fließgeschwindigkeit das Größtkorn sehr wohl einen Einfluss hat.

Die SVM zeigen dahingehend bei glatter Oberfläche eine geringere Reibung als die SVB. Somit hat die grobe Gesteinskörnung einen Einfluss auf die Fluid-Struktur-Interaktion, der jedoch nur bei signifikant unterschiedlichen Gehalten an grober Gesteinskörnung von Bedeutung ist. Besonders ausgeprägt ist dieser Unterschied bei rauen Oberflächen, da es dabei offensichtlich zu einer direkten Reibung der groben Partikel mit der Schalungsoberfläche kommt.

Mit einem einfachen Modell ist die Prognose der auftretenden Reibung einer SVB/Schalungskombination möglich.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen, bei denen die Schergeschwindigkeit im Tribometerversuch einen untergeordneten Einfluss auf die Reibung zwischen Beton und Schalung hat. Somit sind die maßgeblichen Einflüsse auf die Fluid-Struktur-Interaktion die Oberflächenrauigkeit, die Viskosität des Betons und der Frischbetondruck.

7 STRÖMUNGSSIMULATION MIT FLUENT

7.1 Allgemeines

Für die Strömungssimulation des SVM und SVB in dem L-Kasten sowie des SVM im Setzfließversuch wurde im Rahmen dieser Arbeit die Software FLUENT verwendet, welche auf dem CFD-Code basiert. Der Vorteil dieser Software im Vergleich zu anderen CFD Programmen ist die Implementierung einer Vielzahl von Fließgesetzen. In Kapitel 2 wurden die verschiedenen Fließgesetze, die dilatantes Verhalten abbilden, vorgestellt. In FLUENT sind vier dieser Fließgesetze implementiert: Ostwald & de Waele, Cross, Carreau und das Herschel-Bulkley Modell. Die Fließgesetze nach Ostwald & de Waele, Cross und Carreau berücksichtigen jedoch nicht die Fließgrenze, die aber für das Fließverhalten von SVB von Bedeutung ist. Daher wurde das Herschel-Bulkley Modell herangezogen, welches bei der Wahl eines Fließindex von $n = 1$ zugleich dem Bingham-Modell entspricht.

Ziel der Untersuchungen ist die Überprüfung, ob die Strömungssimulationssoftware FLUENT bzw. die darin implementierten Modelle prinzipiell für die Simulation des Strömungsvorgangs von SVB bzw. SVM geeignet sind. Außerdem sollte überprüft werden, ob die inverse Ermittlung von rheologischen Kenngrößen mit FLUENT möglich ist. Dabei wurden die SVM und SVB als Einphasenfluid betrachtet. FLUENT wurde jedoch auch deshalb als CFD-Code ausgewählt, weil mit dieser Software auch Mehrphasenströmungen simuliert werden können, wodurch Transport- und Sedimentationsvorgänge der groben Gesteinskörnung sichtbar werden. Dieses ist in einem weiteren Arbeitsschritt geplant. Die bei den Simulationen verwendeten numerischen Modelle und Parameter sind im Anhang C zusammengestellt.

7.2 Durchgeführte Versuche

Für die Strömungssimulation wurden zwei Versuchsarten angewendet. Zum einen der L-Kasten-Versuch (vgl. Kapitel 6.2.1.3), bei dem sowohl SVM als auch SVB untersucht und mit FLUENT simuliert wurden. Außerdem wurden Setzfließmaß-Versuche mit dem Hägermann-Trichter an SVM durchgeführt (vgl. Kapitel 5.2.3.3) und mit FLUENT simuliert.

Die Erstellung der Weg-Zeit-Kurven zur Validierung der Simulationsergebnisse erfolgte mit Videoaufnahmen der Versuche aus zwei Perspektiven (von der Seite und von oben). Die Auswertung der Videos erfolgte zunächst manuell. Dabei wurden in Zeitabständen von 0,5 s die frames (Einzelbilder) aus dem Video in ein Grafikprogramm eingefügt und bearbeitet. Aus den bearbeiteten Bildern konnte dann die Fließfrontausbreitung in

x-Richtung (L-Kasten-Versuch) bzw. in x- und y-Richtung (Setzfließmaßversuch) ermittelt werden.

Da die manuelle Auswertung der Versuche mit großem Aufwand verbunden ist, wurde in Kooperation mit dem Institut für Geodäsie (GIA) der RWTH Aachen University eine spezielle Bilderkennungssoftware für die Auswertung des Setzfließversuchs entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

7.3 Überprüfung der Anwendbarkeit von FLUENT

7.3.1 Simulation eines Newtonschen Fluids im L-Kasten-Versuch

Zur Überprüfung, ob die Simulation des L-Kasten-Versuchs mit FLUENT möglich ist, wurden Versuche mit einem Newtonschen Fluid, also ohne Fließgrenze, durchgeführt. Die Viskosität dieses Fluids wurde mit einem Koaxialviskosimeter zu $\eta = 12,4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ bei einer Temperatur von $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (entsprechend der Labortemperatur) ermittelt.

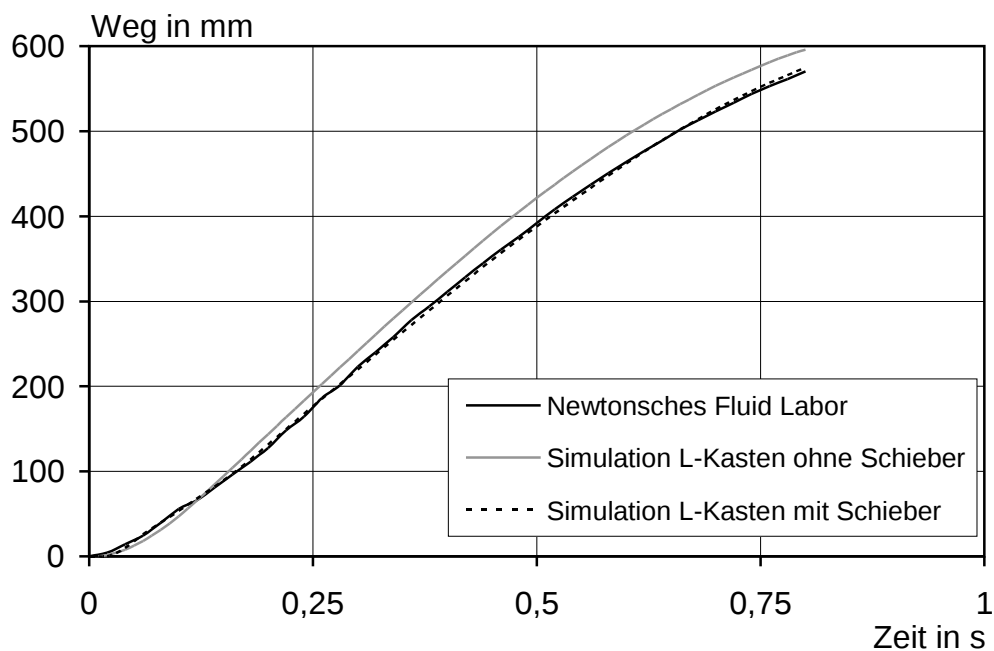


Bild 107: Weg-Zeit Diagramm der Simulationen des Newtonschen Fluids im L-Kasten mit und ohne Schieber sowie aus dem Laborversuch

Bei CFD-Codes können Probleme auftreten, wenn das rheologische Verhalten nicht Newtonisch ist, insbesondere beim Vorhandensein einer Fließgrenze, und wenn das Fluid eine hohe Viskosität hat. Dieses ist auch der Fall, wenn Reibung zwischen Fluid und Struktur auftritt. Da hier der Strömungsvorgang eines Newtonschen Fluids simuliert wird,

können solche Einflüsse zunächst ausgeschlossen werden. Die Untersuchungen ergaben eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus der Simulation und aus den Versuchen (vgl. Bild 107).

Um eine gute Übereinstimmung zu erhalten, ist es von besonderer Bedeutung, dass der Strömungsvorgang möglichst realistisch abgebildet wird. Im vorliegenden Fall wurde beispielsweise der Schieber des L-Kastens in das numerische Gitter implementiert. Dies geschah durch Bildung eines Schiebergitters, das wiederum aus fünf waagerechten Flächen bestand, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten in FLUENT von „wall“ auf „interior“ (vgl. Anhang C) umgestellt wurden, damit das Fluid hindurchströmen kann. Die Zeitpunkte wurden anhand der Videoaufnahmen ermittelt.

7.3.2 Simulation des Newtonschen Fluids im Setzfließtrichter

Um zu überprüfen, ob FLUENT sich prinzipiell für die Simulation des Setzfließversuchs eignet, wurde eine Simulation mit dem gleichen Newtonschen Referenzfluid wie beim L-Kasten-Versuch durchgeführt. In Bild 108 sind die Ergebnisse aus der Simulation des Fluids dargestellt. Hier zeigte sich keine exakte Abbildung des Versuchs, jedoch entspricht der qualitative Verlauf der Simulationskurve der des Versuchs.

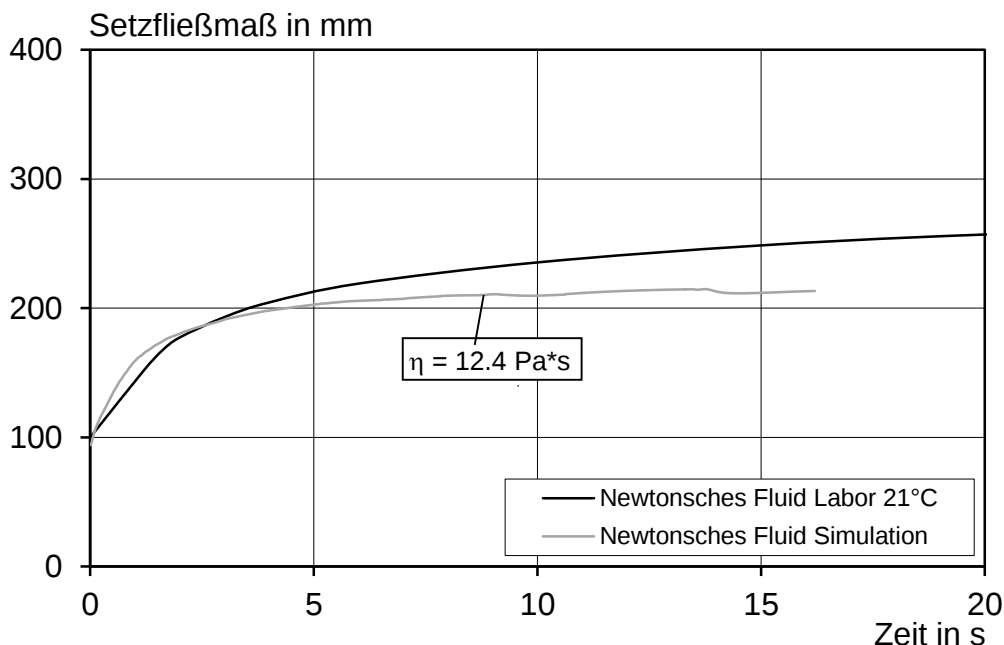


Bild 108: Weg-Zeit Diagramm für die Simulation des Newtonschen Fluids mit einer konstanten Viskosität von $\eta = 12,4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

7.4 Eingangskenngrößen für die Simulation von SVM und SVB

7.4.1 Allgemeines

Wie bereits in Kapitel 2.2 ausgeführt, können für Mörtel keine absoluten rheologischen Kenngrößen ermittelt werden, die als Eingangsparameter in FLUENT verwendet werden können. Es ist jedoch möglich, mit Viskosimeteruntersuchungen zu ermitteln, welches rheologische Verhalten das zu simulierende Fluid aufweist, d. h. ob es ein strukturviskoses, lineares oder dilatantes Fließverhalten zeigt. Entsprechend kann das rheologische Modell in dem CFD-Code ausgewählt werden. Im vorliegenden Fall wurde dieses für die SVM durchgeführt. Bei der Verwendung des Herschel-Bulkley-Modells in FLUENT sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten (vgl. Kapitel 7.4.2).

Auch die ermittelten Reibungswerte können zur qualitativen Beschreibung der Interaktion des Fluids mit der Schalung herangezogen werden.

7.4.2 Herschel-Bulkley Modell in FLUENT

Aus den Untersuchungen mit dem Viskomat NT (vgl. Kapitel 5) ist bekannt, dass SVM ein dilatantes Verhalten aufweist, so dass er mit dem Herschel-Bulkley Modell charakterisiert werden kann oder, bei größeren Partikelabständen, ein nahezu lineares Verhalten aufweist und somit durch das Bingham Modell beschrieben werden kann.

Das in Kapitel 2.3.1 beschriebene Herschel-Bulkley Modell wurde in FLUENT wie folgt modifiziert:

$$\tau = \tau_0 + k \times [\dot{\gamma}^n - (\tau_0/\mu_0)^n] \quad (50)$$

Hier stellt k den Konsistenzfaktor, n den Fließindex und μ_0 die Anfangsviskosität (Nullviskosität) dar. Das Modell weicht von dem Herschel-Bulkley Modell ab, da ein zusätzlicher Term (τ_0/μ_0) implementiert ist (vgl. Gl. (50)).

Es stellte sich heraus, dass das in FLUENT implementierte Herschel-Bulkley Modell nach Gleichung (50) mathematisch falsch ist. Durch eine Überprüfung dieses Modells konnte gezeigt werden, dass das Modell folgende Form aufweisen muss:

$$\tau = \tau_0 + k \times [\dot{\gamma} - (\tau_0/\mu_0)]^n \quad (51)$$

Für den Sonderfall $n = 1$, bei dem das Herschel-Bulkley Modell dem Bingham Modell entspricht, stimmen beide Formeln überein. Für ein $n > 1$ oder ein $n < 1$ können die Unterschiede jedoch je nach Größe der Scherrate $\dot{\gamma}$ und Fließgrenze τ_0 erheblich sein (vgl. Gl. (51)). Für das korrigierte Modell wurde eine User Defined Function (UDF) programmiert, welche in FLUENT eingelesen werden kann.

In FLUENT ist die Viskosität als Quotient aus Scherspannung und Scherrate definiert, so dass sich für eine Scherrate $\dot{\gamma} = 0$ eine unendlich große Viskosität ergibt.

Viskosität in FLUENT: $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \rightarrow \eta(\dot{\gamma} = 0) = \infty$ (52)

Da FLUENT nicht mit einer unendlich großen Viskosität rechnen kann, wird eine Fallunterscheidung vorgenommen, bei der sehr kleine Scherraten gesondert betrachtet werden. In Bild 109 ist die Scherspannung τ in Abhängigkeit der Scherrate $\dot{\gamma}$ für dieses Modell dargestellt.

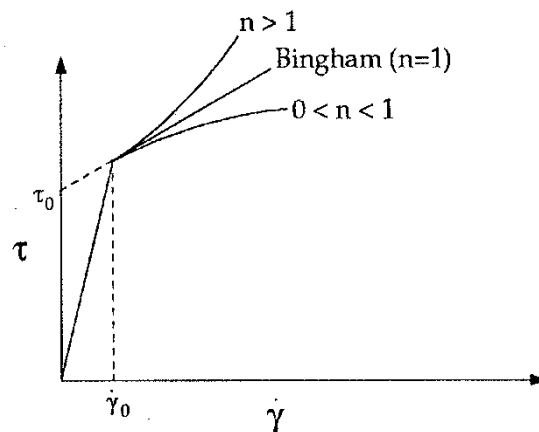


Bild 109: Scherspannung in Abhängigkeit der Scherrate /FLU08/

Das Herschel-Bulkley Modell gilt hier erst ab einer „Grenzscherrate“ $\dot{\gamma}_0$. Für den Bereich kleinerer Scherraten wird eine konstante Viskosität μ_0 (Nullviskosität) angenommen:

Für $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0$: $\tau = \tau_0 + k \times [\dot{\gamma} - (\tau_0/\mu_0)]^n \rightarrow \eta = \frac{\tau_0 + k \times [\dot{\gamma} - (\tau_0/\mu_0)]^n}{\dot{\gamma}}$ (53)

Für $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0$: $\tau = \mu_0 \times \dot{\gamma} \rightarrow \eta = \mu_0$ (54)

Die Grenzscherate $\dot{\gamma}_0$ wird indirekt durch die Wahl der Fließgrenze und der Nullviskosität μ_0 bestimmt, wobei vereinfachend folgender Zusammenhang angenommen werden kann:

$$\dot{\gamma}_0 \approx \frac{\tau_0}{\mu_0} \quad (55)$$

Die bei der Simulation verwendete UDF zu Implementierung des Herschel-Bulkley Modells lieferte nur dann physikalisch korrekte Ergebnisse, wenn die Grenze für die minimal auftretende Scherrate $\dot{\gamma}$ sowie die Grenze für die maximal auftretende Viskosität $\eta_{\max}$ realitätsnah definiert wird. Grund hierfür ist, dass bei Verwendung des Herschel-Bulkley Modells in Verbindung mit der Definition der Viskosität in FLUENT ($\eta = \tau/\dot{\gamma}$) im Bereich kleiner Scherraten sehr hohe Viskositäten auftreten (vgl. Bild 110).

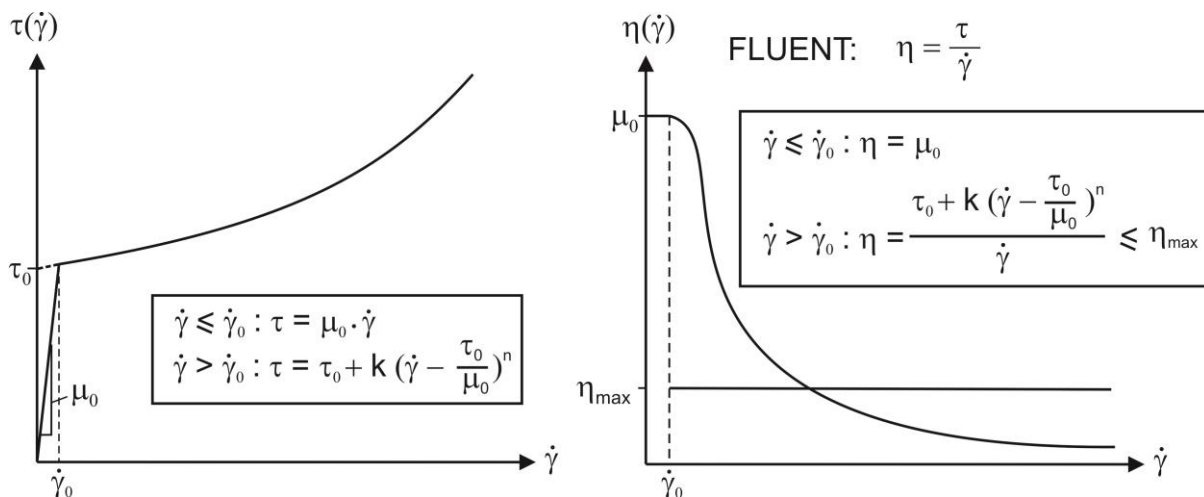


Bild 110: Darstellung der Viskosität η in Abhängigkeit der Scherrate $\dot{\gamma}$ (rechts) für das in FLUENT implementierte Herschel-Bulkley Fließgesetz (links)

Neben einer realitätsfernen Abbildung der Viskosität, die zu physikalisch falschen Ergebnissen führt, ergaben die Berechnungen oftmals keine Konvergenz.

Für die Definition der unteren Grenze der Scherrate $\dot{\gamma}_0$, die in dem UDF eingestellt werden soll, müssen zunächst die tatsächlich bei dem Strömungsvorgang auftretenden Scherraten ermittelt werden. Hierfür wurde zunächst eine Simulation ohne Verwendung des UDF mit dem Fließgesetz nach Newton (vgl. Kapitel 2.4.1) unter Annahme einer konstanten Viskosität durchgeführt.

Für die Simulationen des L-Kasten-Versuchs sowie des Setzfließversuchs wurden die auftretenden Scherraten nach dem Newtonschen Fließgesetz mit einer konstanten Visko-

sität von $\eta = 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ berechnet. Es traten bei den Simulationen des L-Kasten-Versuchs Scherraten im Bereich von $\dot{\gamma} \approx 10^{-5} - 10^3 \text{ 1/s}$ und bei den Simulationen des Setzfließversuchs Scherraten im Bereich von $\dot{\gamma} \approx 10^{-5} - 10^2 \text{ 1/s}$ auf, so dass für die Simulationen die untere Grenze der Scherrate auf der sicheren Seite liegend zu $\dot{\gamma}_0 \approx 10^{-6} \text{ 1/s}$ gewählt wurde. Dieses erfolgte indirekt durch die Variation der Anfangsviskosität μ_0 ($\dot{\gamma}_0 \approx \tau_0/\mu_0$). Die Grenze für die maximal auftretende Viskosität wurde auf $\eta_{\max} = 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ gesetzt.

7.5 Simulation des Fließvorganges durch Anpassung der Parameter

7.5.1 Simulation des L-Kasten-Versuchs

Die Untersuchungen der Simulation des Strömungsvorgangs im L-Kasten wurden mit SVM 2 und SVB 2.1 (vgl. Kapitel 5 und 6) durchgeführt, also mit einem SVM bzw. SVB mit einer für Mörtel/Beton vergleichsweise niedrigen Viskosität. Ein Fluid mit einer niedrigeren Viskosität ist bei einer Simulation mit FLUENT besser zu realisieren als ein Fluid mit einer höheren Viskosität.

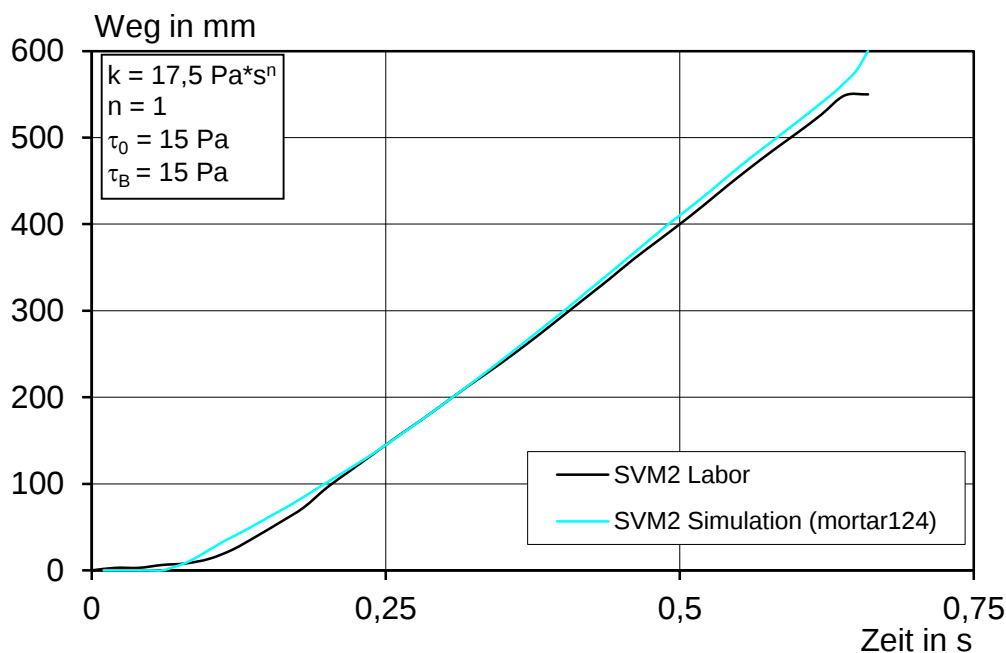


Bild 111: Weg-Zeit Diagramm für die Simulation des SVM 2 im L-Kasten ($\mu_0 = 1.000.000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta \leq 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

In Bild 111 sind die Ergebnisse des Laborversuchs und der Simulation für den SVM2 dargestellt. Bei der Simulation wurden die Parameter so gewählt, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation bestand. Dabei zeigte sich, dass für den SVM2 bei der Simulation auch ein lineares, Bingham'sches Fließverhalten anzusetzen ist.

Die Anpassung der Simulationskurve an die des Versuchs durch Variation der Parameter des Herschel-Bulkley Modells erfolgte exemplarisch für den niederviskosen SVB 2.1. In Bild 112 ist die Kurve der Simulation, bei der die beste Abbildung der Versuchskurve erreicht wurde, dargestellt. Die hier gewählte Fließgrenze von $\tau_0 = 15 \text{ Pa}$ befinden sich in dem in der Literatur angegebenen Bereich von $\tau_0 = 0 - 60 \text{ Pa}$, der in /WAL06a/ mit dem BML-Rheometer für den SVB gemessen wurde. Die Viskositäten, die bei dieser Simulation auftraten, wurden in Abhängigkeit der gewählten Parameter k , n , τ_0 sowie μ_0 in einem excel sheet berechnet. Es ergaben sich bei dieser Simulation Viskositäten im Bereich von $\eta = 22 - 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. In /HIL06/ wurde der Bereich der Viskosität von SVB mit $\eta = 20 - 45 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ angegeben. Insofern stimmen die bei der Simulation ermittelten rheologischen Parameter Fließgrenze und Viskosität mit den in der Literatur angegebenen Werten, die mit dem BML-Rheometer gemessen wurden, überein.

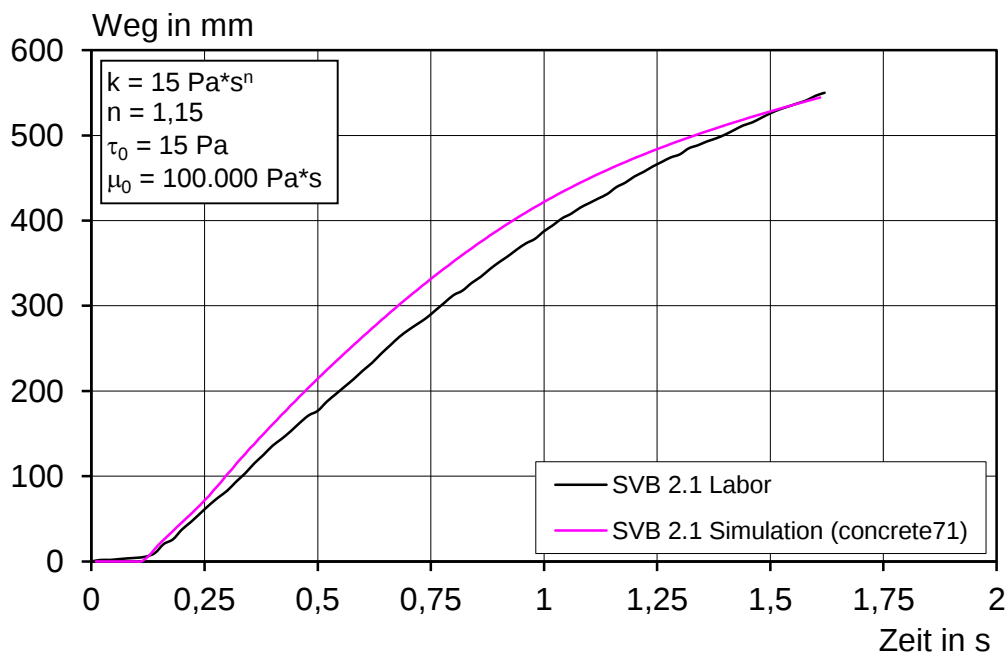


Bild 112: Weg-Zeit Diagramm für die Simulation des SVB 2.1 im L-Kasten mit Anpassung des UDF ($\mu_0 = 1.000.000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta \leq 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

7.5.2 Simulation des Setzfließversuchs

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit von FLUENT für die Simulation des Setzfließversuchs wurden Untersuchungen mit SVM 2 durchgeführt. Dabei wurden die rheologischen Parameter so gewählt, dass sich eine gute Abbildung des Versuchs ergab.

In Bild 113 ist das Weg-Zeit Diagramm dieser Simulation dargestellt. Es ist klar erkennbar, dass zur Anpassung der Kurve bei dem Setzfließversuch deutlich abweichende rheologische Parameter gewählt werden mussten als für die Simulation des L-Kasten-Versuchs. So musste bei dem Setzfließversuch ein Konsistenzfaktor von $n = 1,15$ angesetzt werden, was einem dilatanten Herschel-Bulkley-Fluid entspricht. Bei dem L-Kasten-Versuch konnte mit einem Konsistenzfaktor von $n = 1,0$ gerechnet werden (vgl. Kapitel 7.5.1), es handelte sich somit um ein Bingham Fluid.

Trotz der guten Approximation der Versuchskurve sind die angesetzten rheologischen Parameter zunächst unplausibel.

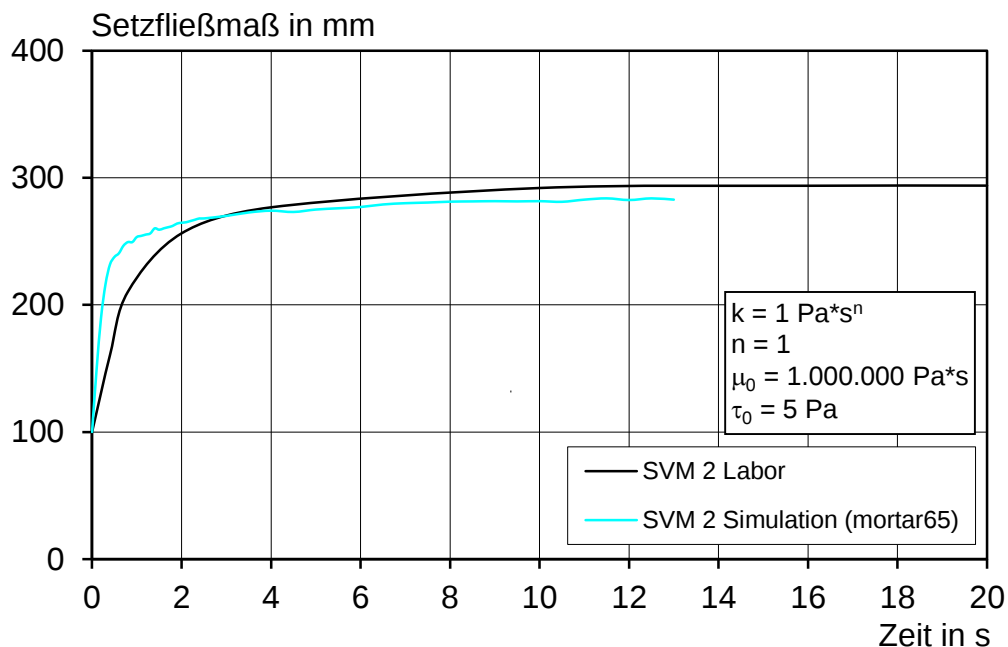


Bild 113: Weg-Zeit Diagramm für die Simulation des SVM 2 im Setzfließversuch ($\mu_0 = 1.000.000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta \leq 50 \text{ Pa}$)

Jedoch wurde in Kapitel 7.3.2 bei der Simulation des Newtonschen Fluids gezeigt, dass das hier verwendete Modell nicht in der Lage ist, den Setzfließversuch exakt abzubilden. Insofern erscheint es durchaus möglich, dass die Abweichungen zwischen der Versuchskurve und der Simulationskurve, insbesondere im Anfangsbereich, nicht auf das in FLUENT implementierte Herschel-Bulkley Gesetz, sondern auf das Modell zurückzuführen sind.

7.6 Übertragbarkeit der invers bestimmten rheologischen Parameter des Setzfließversuchs auf den L-Kasten-Versuch

Für die abschließende Klärung, ob eine Übertragbarkeit von rheologischen und numerischen Parametern auf die Simulation mit anderen Geometrien bei der Verwendung von FLUENT für SVM möglich ist, wurde der L-Kasten-Versuch mit denselben rheologischen und numerischen Parametern nochmals simuliert, die bei der Simulation des Setzfließversuchs für den niederviskosen SVM 2 eine gute Abbildung der Versuchskurve ergeben haben (vgl. Kapitel 7.5.2). In Bild 114 ist das Weg-Zeit Diagramm dieser Simulation dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass hier die Simulationskurve von der Versuchskurve stark abweicht, was zunächst darauf schließen lässt, dass eine Übertragbarkeit von rheologischen Parametern auf andere Geometrien nicht möglich ist.

An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass bei diesen Simulationen die Reibung, die bei den Versuchen einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Fließvorgang hat, unberücksichtigt blieb. Jedoch führte der Ansatz der in Kapitel 6 tatsächlich ermittelten Reibung zu unplausiblen Ergebnissen. Die in den Simulationen maximal ansetzbare Reibung lag um bis zu Faktor 50 unter der tatsächlich ermittelten Reibung, was ein weiteres Indiz dafür ist, dass FLUENT den Strömungsvorgang von SVB nicht ausreichend genau abbildet (vgl. Kapitel 7.5.2).

Für eine genaue Aussage hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Geometrien, müsste der Versuch realitätsnah modelliert werden, was die Berücksichtigung der Reibung zwingend erforderlich macht. Da in FLUENT die reibungsäquivalente Scherspannung lediglich in Richtung der Koordinatenachsen definiert werden kann, ist es nicht möglich, die Reibung bei den Simulationen des Setzfließversuchs zu berücksichtigen, da hier, anders als bei dem L-Kasten-Versuch, die Definition einer reibungsäquivalenten Scherspannung in alle radialen Richtungen erforderlich ist.

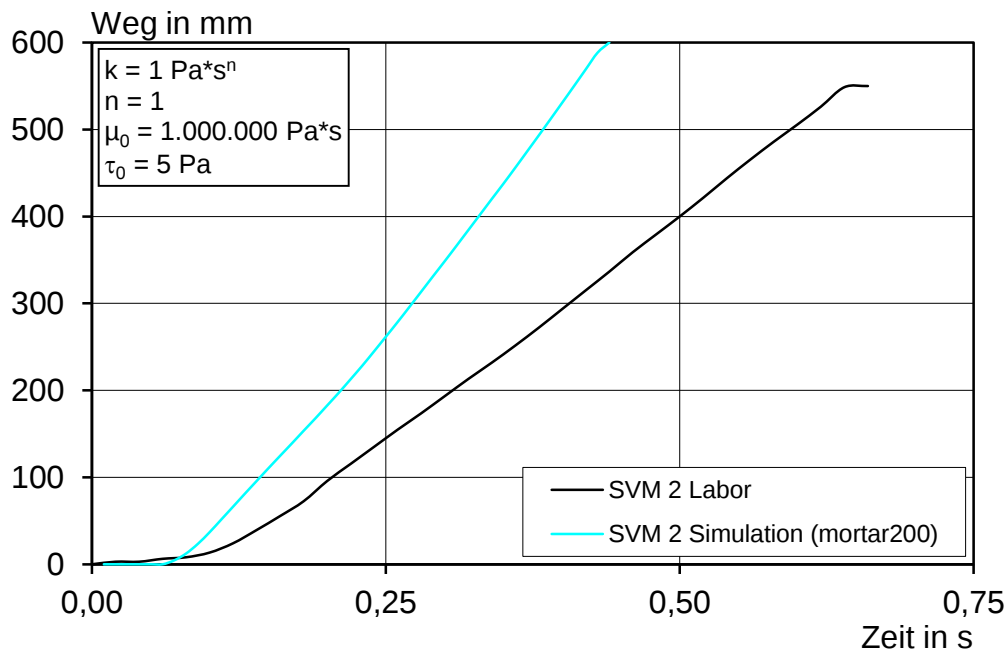


Bild 114: Weg-Zeit Diagramm für die Simulation des SVM 2 im L-Kasten ($\mu_0 = 1.000.000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta \leq 50 \text{ Pa}$)

7.7 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Strömungssimulation

Es wurden Simulationen des L-Kasten-Versuchs (SVM, SVB) und des Setzfließversuchs (SVM) mit FLUENT durchgeführt, wobei der SVM und SVB als Einphasenfluid abgebildet wurden. Es stellte sich heraus, dass das Herschel-Bulkley Modell nicht physikalisch korrekt in FLUENT hinterlegt war, und nur dann physikalisch richtige Ergebnisse liefert, wenn die Viskosität auf einen realitätsnahen Wert begrenzt wird. Zudem stellen sich im Bereich kleiner Scherraten sehr große Viskositäten ein, die zu physikalisch inkorrekten Ergebnissen sowie zu numerischen Instabilitäten bei den Simulationen führen.

Bei der Anpassung der Parameter konnte bei dem L-Kasten-Versuch eine gute Abbildung der Versuchskurve für SVM und SVB erreicht werden. Die gewählten rheologischen Parameter für den untersuchten SVB lagen in dem Bereich, der auch in der Literatur beschrieben ist.

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der invers bestimmten rheologischen Parameter auf die Simulation einer anderen Geometrie wurde der Setzfließversuch herangezogen. Bei der Simulation des SVM2 ergab sich eine annähernde Abbildung der Versuchskurve des Setzfließversuchs. Bei der Simulation des L-Kastens mit SVM2 kam es bei der

Verwendung der rheologischen sowie numerischen Parameter, die bei dem Setzfließversuch verwendet wurden, zu einer großen Abweichung zwischen der Versuchskurve und der Simulationskurve.

Die Übertragbarkeit von bei der Simulation angepassten rheologischen Parametern auf andere Geometrien ist somit nicht möglich. Jedoch konnte das gewählte Modell auch den Strömungsvorgang eines Newtonschen Fluids im Setzfließversuch nicht exakt abbilden. Die Simulation eines Newtonschen Fluids ist mit einem CFD-Code deutlich einfacher zu realisieren als die von Herschel-Bulkley-Fluiden.

Bei den Simulationen wurde die Reibung, die bei den Versuchen einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Fließvorgang hat, nicht berücksichtigt. Für eine genaue Aussage hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Geometrien, müssten die Versuche realitätsnah modelliert werden, was die Berücksichtigung der Reibung zwingend erforderlich macht. Da in FLUENT die reibungsäquivalente Scherspannung lediglich in Richtung der Koordinatenachsen definiert werden kann, ist es nicht möglich diese bei den Simulationen des Setzfließversuchs zu berücksichtigen.

Insgesamt wurde gezeigt, dass die Simulation des Strömungsvorgangs sowohl des SVM als auch des SVB als einphasiges Fluid mit dem CFD-Code FLUENT zurzeit nur sehr eingeschränkt möglich ist. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Geometrien ist nicht möglich, so dass die Ergebnisse der Simulationen insgesamt zu hinterfragen sind. Eine inverse Bestimmung rheologischer Kenngrößen ist ebenfalls nicht möglich. Offensichtlich ist die Simulation von hoch gefüllten Suspensionen wie SVM und SVB mit einer vergleichsweise hohen Viskosität, die mit dem Modell nach Herschel & Bulkley simuliert werden, mit einem CFD-Code schwierig, da dieser für die Simulation von niederviskosen, Newtonschen Fluiden konzipiert wurde.

Zur zielsicheren Anwendung von FLUENT für die Prognose von Strömungsvorgängen von SVB ist die Weiterentwicklung der rheologischen sowie der numerischen Modelle in dem CFD-Code erforderlich. Insbesondere muss auch die Reibung zwischen Fluid (SVB) und Struktur (Schalung) implementiert werden. Die Tribometerversuche zeigen, dass die Viskosität des Fluids in Verbindung mit dem Größtkorn einen nicht unmaßgeblichen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit ausübt. Insofern erscheint der hier gewählte Ansatz des Einphasenfluids für hoch gefüllte Fluide nicht unbedingt geeignet, wie auch die Simulationen mit anderen Geometrien zeigen. Die in der klassischen Rheologie bereits vorhandenen Modelle zur Simulation zweiphasiger Flüssigkeiten müssen daher zunächst auf höhere Feststoffanteile erweitert werden. Dabei ist ein Term in das Modell einzubauen, mit dem die Kontaktoberfläche beschrieben werden kann.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

8.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden rheologische und tribologische Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln (SVM) und Selbstverdichtenden Betonen (SVB) sowie numerische Berechnungen zu deren Strömungsverhalten mit dem Computational Fluid Dynamics Code (CFD) FLUENT durchgeführt.

Die rheologischen Untersuchungen sollten das rheologische Verhalten von SVM dahingehend klären, ob diese ein strukturviskoses, lineares (Binghamsches) oder dilatantes Fließverhalten zeigen, sowie Eingangsparameter für die numerische Strömungssimulation liefern. Außerdem wurde auf Basis der Untersuchungsergebnisse ein Partikelabstandsmodell entwickelt.

Im Rahmen der tribologischen Untersuchungen wurde die Interaktion zwischen Schalung und SVM bzw. SVB untersucht, die so genannte Fluid-Struktur-Interaktion. Diese dient zum Verständnis der Fließvorgänge von SVB und sollte zusätzlich Eingangsparameter für die numerische Simulation liefern. Abschließend erfolgte die Überprüfung der Eignung des CFD-Code FLUENT zur Simulation der Strömungsvorgänge von SVB.

8.2 Rheologische Untersuchungen an selbstverdichtenden Mörteln

Bei den Untersuchungen wurden in einem ersten Schritt die Sieblinien im Feinst- und Feinbereich gezielt variiert und der Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften untersucht.

Die Untersuchungen zeigen, dass SVM mit einem hohen Anteil an sphärisch geformten Körnern rheologisch einem Bingham-Körper entsprechen, wie z. B. bei der Verwendung von Schmelzkammerflugasche. Bei einem hohen Anteil von kantigeren Körnern zeigen die SVM in Abhängigkeit von dem Wassergehalt überwiegend ein dilatantes Verhalten.

SVM zeigt ein optimiertes rheologisches Verhalten, wenn die Sieblinien möglichst nahe an der Idealsieblinie nach Funk & Dinger liegen. Der Abstand zwischen den Feststoffpartikeln und dem Wasseranspruch, welcher ein indirekter Parameter für den Partikelabstand ist, bildet einen direkten Zusammenhang zur Korngrößenverteilung und zur Kornform. Bei einer Idealsieblinie sind alle Kornzwischenräume mit Feststoffpartikeln gefüllt. Das Wasser, das aus diesen Kornzwischenräumen verdrängt wird, steht rheologisch zur Verfügung, d. h. es umhüllt die Körner und vergrößert den Abstand zwischen den Partikeln.

SVM mit einer Sieblinie aus überwiegend sphärisch geformten Feststoffpartikeln, die der Idealsieblinie nach Funk & Dinger entsprechen, zeigen günstigere rheologische Eigenschaften, d. h. sie weisen bei gleichem Wassergehalt eine höhere Fließfähigkeit auf. Als eine granulometrische Kenngröße zur Quantifizierung dieses rheologischen Verhaltens wurde die „Siebliendifferenz“ eingeführt. Diese wurde aus der Differenz der Siebdurchgänge zwischen der tatsächlichen Sieblinie und der Sollsieblinie berechnet.

Bei einer sorgfältigen Auswahl bzw. Kombination der Ausgangsstoffe und einer granulometrischen Optimierung der Feinstoffe können somit die Fließeigenschaften eines SVB gezielt optimiert werden. In der Praxis erfolgt dies oftmals dadurch, dass ein feiner Zement mit einem gröberen Betonzusatzstoff, ein gröberer Zement jedoch mit einem feineren Betonzusatzstoff kombiniert wird, da sich in diesem Fall die Sieblinien optimal ergänzen, wie gezeigt werden konnte.

Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Granulometrie auf die rheologischen Eigenschaften wurde deutlich, dass die Kornform einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Kornform wurde im Rahmen dieser Arbeit nur qualitativ anhand von lichtmikroskopischen Untersuchungen ermittelt. Die Ergebnisse ermöglichten eine Einordnung der Viskomatuntersuchungen. Zu einer detaillierteren Betrachtung und Quantifizierung des Einflusses der Kornform und der Kornrauigkeit sind jedoch weiterführende Untersuchungen erforderlich. Eine Möglichkeit dazu wäre die digitale fotooptische Partikelanalyse. Die auf dem Markt erhältlichen Messgeräte ermöglichen zurzeit bereits eine Ermittlung der Partikelform bis zu einer minimalen Partikelgröße von 20 μm .

Die Fließgrenze der SVM wurde bei der modellhaften Beschreibung der mit dem Viskomat NT ermittelten Fließkurven durch Extrapolation ermittelt. Da die Fließgrenzen bei den SVM sehr niedrig sind, haben modellbedingte Abweichungen einen vergleichsweise großen Einfluss auf das Ergebnis. Da die Fließgrenze auch für die numerische Simulation benötigt wird, sind weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung der Fließgrenze erforderlich. Dazu müssen in einem ersten Schritt Prüfverfahren identifiziert bzw. entwickelt werden. Möglich sind beispielsweise Oszillationsversuche.

Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Granulometrie auf die rheologischen Eigenschaften wurde gezeigt, dass das bei der granulometrischen Optimierung frei werdende Wasser rheologisch in der Mischung zur Verfügung steht und das Fließverhalten beeinflusst. In ergänzenden Untersuchungen wurde gezeigt, dass der Wassergehalt im Wesentlichen die Viskosität der SVM beeinflusst. Mit höherem Wassergehalt nimmt die Viskosität ab. Das Fließmittel hingegen beeinflusst im Wesentlichen nur die Fließgrenze der SVM.

Da der Wassergehalt und der durch das Wasser bedingte Abstand zwischen den Feststoffpartikeln die maßgebliche Steuergröße für die Viskosität und das rheologische Verhalten (strukturviskos, linear, dilatant) ist, wurde ein Partikelmodell aufgestellt, um diesen Zusammenhang zu quantifizieren. Das aufgestellte Partikelmodell zeigt für einen SVM mit einem Setzfließmaß von 260 bis 280 mm einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem wasserinduzierten Partikelabstand der Feststoffpartikel und der relativen Viskosität. Außerdem zeigt dieses Modell, dass bei Partikelabständen von kleiner $0,8\ \mu\text{m}$ ein dilatantes und bei Partikelabständen größer $0,8\ \mu\text{m}$ ein strukturviskoses Verhalten des selbstverdichtenden Mörtels zu erwarten ist. Bei einem Partikelabstand von rund $0,8\ \mu\text{m}$ zeigen die Mörtel ein Bingham'sches Fließverhalten.

Das Partikelmodell wurde bislang ausschließlich auf SVM angewendet, die mit Flugasche als Betonzusatzstoff hergestellt wurden. Das Modell ist für SVM, die mit anderen Betonzusatzstoffen, insbesondere Kalksteinmehlen, hergestellt wurden, zu überprüfen. Auf Basis der Ergebnisse eigener Untersuchungen ist nicht zu erwarten, dass sich das rheologische Verhalten von SVM mit Kalksteinmehl grundlegend von SVM mit Flugasche unterscheidet. Es wird jedoch erwartet, dass aufgrund der insgesamt kantigeren Form der Körner größere Partikelabstände erforderlich sind.

Es wurde festgestellt, dass sich ein minimaler Partikelabstand von ca. $0,2$ bis $0,3\ \mu\text{m}$ ergibt. Ein geringerer Partikelabstand konnte nicht festgestellt werden. Zur Eingrenzung dieses minimalen Partikelabstandes sind weitere Untersuchungen erforderlich. Es wurde auch nicht untersucht, ob der Partikelabstand ebenfalls Einfluss auf andere Betoneigenschaften hat. So weisen manche SVB in der Praxis beispielsweise eine „Klebrigkeit“ auf, die eine Verarbeitung erschwert. Es ist vorstellbar, dass neben den verwendeten Fließmitteln der Partikelabstand diese „Klebrigkeit“ beeinflusst. Des Weiteren kann sich der Partikelabstand auf chemisch-mineralogische Reaktionen auswirken, wie z. B. auf die Reaktionskinetik bei der Hydratation, was ebenfalls nicht untersucht wurde. Das Modell wurde bislang nur für SVM angewendet. Durch den hohen Volumenanteil des SVM beim Mehlkorntyp-SVB von rund 60 Vol.-% wird davon ausgegangen, dass der SVM als Basismörtel maßgeblich das Fließverhalten des zugehörigen SVB beeinflusst. Dieses ist durch Erweiterung des Modells auf den SVB zu validieren.

8.3 Tribologie von Selbstverdichtendem Beton

Zur Untersuchung der beim Fließvorgang auftretenden Reibung zwischen SVB und Schalung wurden ein Tribometer entwickelt und Versuche an SVM und SVB durchgeführt.

Dabei wurden zwei unterschiedliche Viskositäten (nieder- und hochviskos) sowie zwei unterschiedliche Partikelbeladungen entsprechend einem Mehlkorn- und einem Stabilisierer-Typ SVB sowie zwei unterschiedliche Gesteinskörnungsgrößtkörner (8 und 16 mm) untersucht. Ebenfalls wurden drei verschiedene Schalungsoberflächen untersucht: glatt-benetzend, glatt-nichtbenetzend und rau-benetzend. Zur Validierung der Tribometerversuche wurden parallel L-Kasten-Versuche durchgeführt, mit denen zusätzlich das Strömungsverhalten der SVM und SVB untersucht werden konnte.

Die Untersuchungen zeigen einen großen Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Schalung auf die Reibung zwischen den untersuchten SVB und der Schalung. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der anstehende Frischbetondruck. Erwartungsgemäß wurde ein nahezu proportionaler Zusammenhang zwischen dem anstehenden Frischbetondruck und der gemessenen Scherspannung nachgewiesen. Der dritte maßgebende Einflussparameter ist die Viskosität des SVB. Dies zeigte sich sowohl in den Tribometerversuchen als auch in den L-Kasten-Versuchen.

Zum Einfluss des Größtkorns und der Volumenanteile der groben Partikel bzw. des SVB-Typs (Mehlkorn- bzw. Stabilisierertyp) konnten aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl der untersuchten Mischungen keine eindeutigen Aussagen herausgearbeitet werden. Die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass diese beiden Parameter auf die Reibung einen eher untergeordneten Einfluss haben. Hinsichtlich des Anteils der Gesteinskörnung in der Mischung (Mehlkorn- bzw. Stabilisierer-Typ SVB) war dieses zu erwarten, da der volumetrische Unterschied nicht sehr groß ist. Allerdings zeigte sich bei der Fließgeschwindigkeit, dass das Größtkorn der Gesteinskörnung sehr wohl einen Einfluss hat und somit das Strömungsverhalten des SVB beeinflusst. Die durchgeführten Untersuchungen scheinen die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zu bestätigen, bei denen die Fließgeschwindigkeit im Tribometerversuch einen untergeordneten Einfluss auf die Reibung zwischen Beton und Schalung hat. Somit sind die maßgeblichen Einflüsse auf die Fluid-Struktur-Interaktion die Oberflächenrauigkeit, die Viskosität des Betons und der Frischbetondruck. Die ermittelte Reibung diene ebenfalls zur Bewertung der Reibung, die in die numerische Simulation eingeflossen ist.

Es wurde ein einfaches Modell aufgestellt, mit dem sich die auftretenden Reibkräfte für eine Schalungs/Betonkombination nicht nur für SVB, sondern auch für Rüttelbeton ermitteln lassen. Für die Aufstellung eines allgemeingültigen Stoffgesetzes zur Fluid-Struktur-Interaktion von SVB und Schalungsoberfläche muss der Prüfumfang insbesondere für die maßgeblichen Parameter Frischbetondruck, Rauigkeit der Schalung und Viskosität des Betons erweitert werden, um einen klaren Zusammenhang herauszu-

arbeiten. Ebenfalls noch nicht untersucht wurde, inwieweit sich aufgrund der festgestellten Interaktionen zwischen SVB und Schalung Rückschlüsse auf die sich ergebende Sichtbetonqualität ziehen lassen, was in einem weiterführenden Untersuchungsprogramm mit dem entwickelten Tribometer berücksichtigt werden kann.

8.4 Strömungssimulation mit FLUENT

Mit dem Computational Fluid Dynamics (CFD) Code FLUENT wurden Simulationen des L-Kasten-Versuchs (SVM, SVB) und des Setzfließversuchs (SVM) durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, die generelle Eignung der Software für die Simulation eines SVB zu überprüfen. Dabei wurden die Mörtel und Betone als Einphasenfluid abgebildet. Es stellte sich heraus, dass das verwendete Herschel-Bulkley Modell nur dann physikalisch richtige Ergebnisse liefert, wenn die Viskosität auf einen realitätsnahen Wert begrenzt wird. Außerdem war das Herschel-Bulkley Modell nicht physikalisch korrekt implementiert. Es wurde eine gute Abbildung der Versuchskurve des niederviskosen SVB im L-Kasten mit $\eta_{\max} = 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ erreicht. Die hier gewählten rheologischen Parameter lagen in dem Bereich, der in der Literatur angegeben ist.

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der invers bestimmten rheologischen Parameter auf die Simulation einer anderen Geometrie wurde der Setzfließversuch herangezogen. Bei der Simulation des niederviskosen SVM im L-Kasten kam es bei der Verwendung der rheologischen sowie numerischen Parameter, die bei dem Setzfließversuch zu einer guten Abbildung der Versuchskurve geführt hatten, zu großen Abweichungen zwischen der Versuchskurve und der Simulationskurve. Das gewählte Modell ist nicht in der Lage, den Versuch exakt abzubilden. Es muss jedoch angemerkt werden, dass bei diesen Simulationen die Reibung, die bei den Versuchen einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Fließvorgang hat, unberücksichtigt blieb. Für eine genaue Aussage hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Geometrien, müsste der Versuch realitätsnah modelliert werden, was die Berücksichtigung der Reibung zwingend erforderlich macht. Da in FLUENT die reibungsäquivalente Scherspannung lediglich in Richtung der Koordinatenachsen definiert werden kann, ist es nicht möglich diese bei den Simulationen des Setzfließversuchs zu berücksichtigen, da hier, anders als bei dem L-Kasten-Versuch, die Definition einer reibungsäquivalenten Scherspannung in alle radialen Richtungen erforderlich ist.

Insgesamt wurde gezeigt, dass die Simulation des Strömungsvorgangs sowohl des SVM als auch des SVB als einphasiges Fluid mit dem CFD-Code FLUENT zurzeit nur sehr

eingeschränkt möglich ist. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Geometrien ist nicht möglich. Somit kann auch keine inverse Bestimmung rheologischer Kenngrößen erfolgen.

Die Tribometerversuche haben deutlich gemacht, dass die Viskosität des Fluids in Verbindung mit dem Größtkorn einen nicht unmaßgeblichen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit ausübt. Insofern erscheint der hier gewählte Ansatz des Einphasenfluids für hoch gefüllte Fluide nicht unbedingt geeignet, wie auch die Simulationen mit anderen Geometrien zeigen. Die in der klassischen Rheologie bereits vorhandenen Modelle zur Simulation zweiphasiger Flüssigkeiten müssen daher zunächst auf höhere Feststoffanteile erweitert werden. Dabei ist ein Term in das Modell einzubauen, mit dem die Kontaktfläche beschrieben werden kann.

8.5 Schlussfolgerungen und Nutzen für die Praxis

Die Erkenntnisse aus den rheologischen Untersuchungen können direkt in die Praxis übernommen werden. Das Verfahren zur Ermittlung der Idealsieblinien ist vergleichsweise einfach und ein Lasergranulometer gehört zur Grundausstattung eines Labors, das sich mit Zementprüfung befasst. Eine rheologische Optimierung eines Mehlkorntyp-SVB kann bereits dadurch gelingen, wenn gezielt ein Zement mit einer niedrigen Feinheit mit einem Betonzusatzstoff mit einer höheren Feinheit kombiniert wird. Ebenfalls möglich ist die Kombination von Zement mit einer hohen Feinheit mit einem Betonzusatzstoff mit einer niedrigeren Feinheit. Dieses wird in der Praxis bereits häufig angewendet und die Funktionalität wurde im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen. Voraussetzung dafür ist, dass eine stetige Sieblinie der Gesteinskörnung und insbesondere ein ausreichender Anteil Feinsand bis zu einer Partikelgröße von 250 μm vorhanden sind. Aus der praktischen Anwendung ist bekannt, dass bei einem Feinsandanteil von ca. 20 bis 25 M.-% (bezogen auf den Sandanteil 0/2 mm) und einer optimierten Sieblinie im Feinstbereich bis 125 μm sehr gut verarbeitbare Mehrkorntyp-SVB hergestellt werden können.

Das entwickelte Partikelmodell ist sehr hilfreich zur Einschätzung des Fließverhaltens (strukturviskos, linear, dilatant) bzw. zur qualitativen Einschätzung der Viskosität des SVM vor der Betonage. Durch den hohen Volumenanteil des SVM beim Mehlkorntyp-SVB von rund 60 Vol.-% beeinflusst der SVM maßgeblich das Fließverhalten des zugehörigen SVB. Zur Anwendung des Partikelmodells sind lediglich zwei Größen erforderlich: Die Oberfläche der Feststoffpartikel sowie der Wasseranspruch nach Puntke. Die Oberfläche der Betonausgangsstoffe kann durch die werkseigene Produktionskontrolle des Ausgangs-

stoffherstellers ermittelt werden. Der Ermittlung des Wasseranspruchs nach Puntke ist ein einfacher Versuch, der in jedem (Baustellen-) Labor durchgeführt werden kann.

Mithilfe des entwickelten Tribometers kann die Reibung zwischen dem SVB und der Schalung gezielt untersucht werden. Dieses kann zur Prognose von Betonagen von Bauteilen mit komplexer Formgebung hilfreich sein. Aus der Praxis ist bekannt, dass bei zu großer Reibung zwischen Schalung und SVB die Formfüllung erschwert sein kann, was bei den durchgeführten L-Kasten-Versuchen bestätigt wurde. Dieses ist insbesondere bei dünnen Bauteilen in der Praxis beobachtet worden. Durch eine gezielte Wahl einer Schalautoberfläche in Kombination mit einem SVB mit einer angepassten Viskosität, die ggf. mit dem Partikelabstandsmodell bei dem Betonentwurf abgeschätzt werden kann, kann somit die zielgerichtete Füllung des Bauteils mit SVB sichergestellt werden.

Mit dem CFD-Code Fluent kann bislang keine inverse Bestimmung der rheologischen Eigenschaften eines SVB erfolgen. Ebenso sind die Simulation des Strömungsvorgangs und der Füllung von ganzen Bauteilen nicht möglich. Hier ist eine Weiterentwicklung der implementierten numerischen und rheologischen Modelle erforderlich. Die Anwendung ist bislang auf die Simulation von einfachen, vergleichsweise kleinen linienförmigen Geometrien beschränkt, wenn die Schwankung der rheologischen Eigenschaften des zu untersuchenden Betons in engen Grenzen gehalten wird.

Insgesamt konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass der Wasseranspruch die entscheidende Steuergröße für die zielsichere Herstellung von SVB ist. Für einen erfolgreichen Einsatz dieses innovativen Werkstoffes in der Praxis ist nicht nur die Steuerung der direkten Einflussgrößen auf den Wasseranspruch des einzelnen Ausgangsstoffes oder das Zugabewasser, sondern insbesondere auch die indirekten Einflussgrößen, wie z. B. die Granulometrie der Gesamtsieblinie, von Bedeutung, wozu in dieser Arbeit entsprechende Hinweise gegeben werden.

Die hier vorliegende Arbeit zeigt, dass sich mit dem Wassergehalt, der sich aus dem Wasseranspruch der Gesteinskörnung und dem Zugabewasser ergibt, die rheologischen Eigenschaften von SVB gezielt einstellen lassen, wobei die sich ergebende Wasserfilmdicke hier der Hauptparameter ist. Der Wasseranspruch lässt sich über die Granulometrie der Gesamtsieblinie des Feststoffs im Fluid steuern. Hierzu gibt diese Arbeit wesentliche Hinweise.

9 LITERATUR

- /AIM67/ Aim, R. B.; Le Goff, P.: Effet de Paroi dans les Empilements Desordonnes de Spheres et Application a la Porosite de Melanges Binaires. In: Powder Technology 1, 1967/68, pp 281-290
- /AND30/ Andreasen, A. H. M.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). In: Kolloid-Zeitschrift 50 (1930), Nr. 3, S. 217-228
- /BAG01/ Bager, H.; Geiker, R.; Jensen, M.: Rheology of self-compacting mortars - influence of particle grading. Nordic Concrete Research, Publ. No. 25, 2001
- /BAN87/ Banfill, P. F. G.: The Use of a Coaxial Cylinders Viscosimeter to study the Rheology of fresh Mortar. In: Mitteilungen des Institutes für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (1987), Nr. 55 : Berichte vom Fachkolloquium Zementleim Frischmörtel, Frischbeton, S. 44 - 57
- /BAN90/ Banfill, P. F. G.: Use of the viscocorder to study the rheology of fresh mortar. In: Magazine of Concrete Research, 1990, vol. 42, No. 153, pp 213-221
- /BAN91/ Banfill, P. F. G.: The Rheology of Fresh Mortar. University of Liverpool, 1991. - In: Magazine of Concrete Research 43 (1991), Nr. 154, S. 13 – 21
- /BAN92/ Banfill, P. F. G.; Hornung, F.: Zweipunktmessung im ViscoCorder. In: Beton 42 (1992), NR. 2, S. 84-88
- /BAN04/ Banfill, P. F. G.: Die Rheologie von Frischzement und Beton. In: Betonwerk, International BWI 7, 2004, Nr. 2, S. 88
- /BAR00/ Bartos, P. J. M.: Key Properties of Fresh Self-Compacting Concrete: A Case for Standardisation. Brussels: European Commission, ECCREDI, 2000. - In: Proceedings Seminar on Self-Compacting Concrete, Malmö, 20th - 21st November 2000, S. 22-26
- /BAR03/ Barron, R. M.; Salehi Neyshabouri, A. A.: Effects of Under-Relaxation Factors on Turbulent Flow Simulations. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids 42 (2003), Nr. 8, S. 923-928
- /BER79a/ Berg vom, W.: Influence of Specific Surface and Concentration of Solids Upon the Flow Behaviour of Cement Pastes. In: Magazine of Concrete Research 31, 1979, Nr. 109, pp 211-216
- /BER79b/ Berg vom, W.: Rheologische Untersuchungen zum Fließverhalten von Feinstzuschlägen und Zementmörtel. Aachen: Institut für Bauforschung, 1979 – Forschungsbericht Nr. F 52
- /BER82/ Berg vom, W.: Fließverhalten von Zementsuspensionen. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Diss. 1982

- /BER87/ Berg vom, W.: Zementleimrheologie- Begriffe und Erscheinungsformen. In: Mitteilungen des Institutes für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (1987), NR. 55: Berichte vom Fachkolloquium Zementleim Frischmörtel Frischbeton, S. 9-27
- /BIN22/ Bingham, E. C.: Fluidity and Plasticity. New York, McGraw-Hill, 1922
- /BLA02/ Blask, O.: Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen, Siegen, Universität Siegen. - Dissertation
- /BÖH02/ Böhrnsen, J. U.: Dynamisches Verhalten von Schüttgütern beim Entleeren aus Silos. Braunschweig, Technische Universität, Institut für Angewandte Mechanik, Dissertation, 2002
- /BOM73/ Bombled, J. P.: Rheology of Mortars and Fresh Concrete Influence of Cement. Leeds: Department of Civil Engineering, 1973. - In: Proceedings of the RILEM Seminar on Fresh Concrete, Vol. I, 1973, pp 3.1-3.1.100
- /BON78/ Bonzel, J.; Dahms, J.: Über den Wasseranspruch des Frischbetons. In: Beton 28, 1978, Nr. 9, S. 331-336, Nr. 10, S. 362-367, Nr. 11, S. 413-416
- /BRA71/ Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Aarau : Verlag Sauerländer, 1971. - In: Grundlagen der chemischen Technik
- /BRA01a/ Brameshuber, W. ; Uebachs, S.: Praxiserfahrung beim Einsatz eines selbstverdichtenden Betons im Fertigteilwerk - Untersuchungen zum Mischungsentwurf. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 67 (2001), Nr. 1, S. 17-19
- /BRA01b/ Brameshuber, W.; Krüger, T.; Uebachs, S.: Selbstverdichtender Beton im Transportbetonwerk. In: Beton 51 (2001), Nr. 10, S. 546-550
- /BRA01c/ Brameshuber, W.; Tigges, Ch.; Uebachs, S.: Selbstverdichtender Beton im Fertigteilwerk. Betonwerk- und Fertigteiltechnik Oktober 2001
- /BRA02/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: The Application of Self-Compacting Concrete in Germany under Special Consideration of Rheological Aspects. Evanston, 2002. – 1st North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, November 12-13, 2002, Rosemont, Illinois, USA
- /BRA03a/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Sedimentationsstabilität von selbstverdichtendem Beton. In: Beton 53 (2003), Nr. 1
- /BRA03b/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Schalungsdruck von selbstverdichtendem Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, 2003. - Forschungsbericht Nr. F 848
- /BRA03c/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: The Influence of the Temperature on the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete: Icelandic Building Research Institute, 2003. - In: Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17. - 20. August 2003, Reykjavik, Iceland

- /BRA03d/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: The Influence of Air Voids on the Properties of Self-Compacting Concrete Containing fly ash: Icelandic Building Research Institute, 2003. - In: Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17. - 20. August 2003, Reykjavik, Iceland
- /BRA03e/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Investigations on the Formwork Pressure using Self-Compacting Concrete: Icelandic Building Research Institute, 2003. In: Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17. - 20. August 2003, Reykjavik, Iceland
- /BRA03f/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Einfluss der Temperatur auf die rheologischen Kenngrößen von selbstverdichtendem Beton. Weimar: Bauhaus-Universität, 2003. In: 15. Internationale Baustofftagung, -ibaustil-, 9.-12. September 2003 in Weimar
- /BRA04/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Einfluss der Temperatur auf die rheologischen Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, 2004. - Forschungsbericht Nr. F 855
- /BRA06/ Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Entwicklung von zementgebundenen Fließestrichen mit hohem Frostwiderstand. Aachen: Institut für Bauforschung, 2006. - Forschungsbericht Nr. F 840
- /BRO02/ Bronstert, A.: Einführung in die Gewässerhydraulik. Potsdam, Universität, Institut für Geoökologie, Lehrstuhl für Hydrologie und Klimatologie, 2002
- /BUC04/ Buchenau, G.: Die rheologischen Eigenschaften eines selbstverdichtenden Betons mit Steinmehlen. Berlin, Technische Universität, Fakultät VI, Dissertation, 2004
- /BUI02/ Bui, V. K.; Akkaya, Y.; Shah, S.P.: Rheological Model for Self-Consolidating Concrete. In: ACI Materials Journal 99, 2002, Nr. 6, pp 549-559
- /CAB82/ Cabrera, J. G.; Hopkins, C. J.: The Effects of PFA on the Rheology of Cement Pastes. Leeds: Department of Civil Engineering, 1982. – In Proceedings of the International Symposium on the Use of PFA in Concrete, S. 141 - 149
- /CHA94/ CHANG, C; Powell, R. L.: Effect of particle size distributions on the rheology of concentrated bimodal suspensions. In: Journal of Rheology, 1994, Vol 38, No.1, pp 85-98
- /CHH92/ Chhabra, R. P.: Bubbles, Drops and particles in Non-Newton Fluids, CRC Press, London 1992
- /CON02/ Constantiner, D.; Daczko, J. A.: Not all Applications are Created Equal; Selecting the Appropriate SCC Performance Targets. Evanston: Center for Advance Cement-Based Materials, 2002. - In: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Evanston, IL, USA, November 12-13, 2002, S. 179-184

- /CUR02/ Civielttechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving: Aanbeveling 93, Zelfverdichtend Beton. Gouda: Civielttechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, 2002
- /CZI76/ Czichos, H.: Systemanalyse und Physik tribologischer Vorgänge, Teil 2: Anwendungen. In: Schmieretechnik + Tribologie, Hannover 1976, Nr. 1, S. 6-12
- /CZI77/ Czichos, H.: Die systemtechnischen Grundlagen der Tribologie. Ihre Anwendung zur Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen. In: Schmieretechnik + Tribologie, Hannover 24 (1977), Nr. 5, S. 109-113
- /DAF01a/ Reinhardt, H. W.; Brameshuber, W.; Uebachs, S.; Buchenau, G.; et al: Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). Berlin: Beuth. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2001), Nr. 516
- /DAF01b/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (DAfStb) Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ergänzungen zu DIN 1045 1988-07, Ausgabe 10/2001
- /DAF03/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ergänzungen und Änderungen zu DIN 1045-2 2001-07 und DIN EN 206-1 2001-07 sowie DIN 1045-3 2001-07, Ausgabe 12/2003
- /DAF12/ DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) - Teil 2: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 206-1, DIN EN 206-9 und DIN 1045-2, Ausgabedatum: 2012-09
- /DIB03/ Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Selbstverdichtendem Beton „MC-Plast-Beton (SVB)“; Deutsches Institut für Bautechnik, 2003
- /DIN98a/ DIN EN ISO 3274, April 1998: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten (ISO 3274:1996) Deutsche Fassung EN ISO 3274:1997
- /DIN98b/ DIN EN ISO 4287, Oktober 1998: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Benennung, Definition und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997) Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998
- /DIN99/ DIN EN 1097-7:1999-10. Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Teil 7: Bestimmung der Dichte von Füller – Pyknometer-Verfahren; Deutsche Fassung EN 1097-7:1999
- /DIN00/ DIN EN 12350-6:2000-03. Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonroh-dichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:1999
- /DIN01a/ DIN 1045-1:2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- /DIN01b/ DIN 1045-2:2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungs-regeln zu DIN EN 206-1

- /DIN01c/ DIN 53015:2001-02. Messung der Viskosität mit dem Kugelfallviskosimeter nach Höppler
- /DIN02/ DIN EN 934-2:2002-02. Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teil 2: Betonzusatzmittel; Definitionen und Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung; Deutsche Fassung EN 934-2:2001
- /DIN03/ DIN EN 12620: 2003-04. Gesteinskörnung für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002
- /DIN04a/ DIN V 20000-103: 2004-04. Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken Teil103: Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2003-04
- /DIN04b/ DIN 52102:2004-08. Prüfverfahren für Gesteinskörnungen – Bestimmung der Trockenrohdichte mit dem Messzylinderverfahren und Berechnung des Dichtheitsgrades
- /DIN04c/ DIN EN 197-1:2004-08 Zement; Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2000 + A1:2004
- /DIN05a/ DIN EN 196-1:2005-05. Prüfverfahren für Zement Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2005
- /DIN05b/ DIN 1055-6, März 2005: Einwirkung auf Tragwerke – Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter
- /DIN05c/ DIN EN 450-1:2005-05. Flugasche für Beton Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 450-1:2005
- /DIN05d/ DIN EN 206-1:2001-07. Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000 + A1:2004 + A2:2005
- /DIN08/ 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.
- /DIN10/ DIN EN 206-9:2010-09. Beton – Teil 9: Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton (SVB); Deutsche Fassung EN 206-9:2010
- /DJE01/ Djelal, C.: Designing and Perfecting a Tribometer for the Study of Friction of a Concentrated Clay-Water Mixture Against a Metallic Surface. In: Materials and Structures (RILEM) 34 (2001), Nr. 235, S. 51-58
- /DJE02/ Djelal, C.; Vanhove, Y.; De Caro, P.; Magnin, A.: Role of Demoulding Agents During Self-Compacting Concrete Casting in Formwork. In: Materials and Structures (RILEM) 35 (2002), Nr. 252, S. 470-476
- /DJE04/ Djelal, C.; Vanhove, Y.; Magnin, A.: Tribological Behaviour of Self Compacting Concrete. In: Cement and Concrete Research 34 (2004), Nr. 5, S. 821-828

- /EFN01/ EFNARC: Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Aldershot: EFNARC 2001
- /EIN06/ Einstein, A.: Eine neue Bestimmung der Moleküldimension. In: Annalen der Physik, 19, 1906, S. 289-306
- /EPG05/ European Project Group: The European Guideline for Self-Compacting Concrete. United Kingdom, 2005
- /FER92/ Ferraris, C. F.; Gaidis, J.M.: Connection between the Rheology of Concrete and Rheology of Cement Paste. In: ACI Materials Journal, July – August 1992, S. 388 - 393
- /FER98/ Ferraris, C. F.; Larrard, F.: Testing and modelling of the rheological properties of fresh concrete rheology. In: National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 6094, 1998, pp 29-35
- /FER99/ Ferraris, C. F.: Measurement of the rheological properties of high performance concrete. In: State of the art report, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 104, 1999, pp 461-478
- /FER02/ Ferziger, J. H.; Perić, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering, Stanford; USA, 2002
- /FLA73/ Flatten, H.: Untersuchungen über das Fließverhalten von Zementleim. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Diss., 1973
- /FLU08/ FLUENT Online User Services Center, 2008: <http://fluentusers.com/>
- /FRA02/ Frank, T.: Parallele Algorithmen für die numerische Simulation dreidimensionaler, disperser Mehrphasenströmungen und deren Anwendung in der Verfahrenstechnik. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Habilitation, Chemnitz, 2002
- /FRE01/ Frey, R.: Formänderung fließfähiger zementgebundener Estrichmörtel. Technische Universität, Cottbus 2001 In: Forum der Forschung Nr. 12 S. 40-44
- /FRE02/ Freimann, T.: Einfluß von Steinkohleflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln. Hannover, Universität, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation 2002. In: Berichte aus dem Institut für Baustoffe (IfB), Heft 01(/FRE01/)
- /FUL07/ Fuller, W. B.: The Laws of Proportioning Concrete. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers 33 (1907), Nr. 3, S. 22-297
- /FUN94/ Funk, J. E.: Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions. Kluwer Academic Publishers, 1994
- /FUR31/ Furnas, C. C.: Grading Aggregates. I: Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. In: Industrial and Engineering Chemistry 23 (1931), Nr. 9, S. 1052-1058

- /GÖT70/ Göttner, G. H.: Tribologie - Begriff, Wesen und Bedeutung. In: Schmiertechnik + Tribologie, Hannover 17 (1970), Nr. 6, S. 285-289
- /GRA05/ Graubner, C.-A.; Proske, T.: Formwork Pressure a New Concept for the Calculation. Evanston, Illinois: Center for Advanced Cement-Based Materials, 2005. - In: SCC 2005, Conference Proceedings, The Second North American Conference on the Design and Use of Self Consolidation Concrete (SCC) and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, Illinois, 30.Okt. bis 02. Nov. 2005, Session F-2, 8 Seiten
- /GRA15/ Gram, A.: Modelling Bingham Suspensional Flow; Influence of Viscosity and Particle Properties Applicable to Cementitious Materials. Doctoral Thesis. Stockholm, April 2015
- /GRE04a/ Greim, M.: Alles fließt - Baustoff-Rheometrische Messverfahren und ihre Grenzen. Kolloquium und Workshop über rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen, Regensburg, 2004
- /GRE04b/ Greaves, D. M.: The use of adapting quadtree grids for simulating moving interface and viscous fluid free surface flows. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAAS (2004)
- /HAC01/ Hackley, A.; Ferraris, C.F.: Guide to Rheological Nomenclature: Measurements in Ceramic Particulate Systems. In: National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 946, 2001
- /HAI09/ Haist, M.: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2009
- /HEL80/ Helmuth, R. A.: Structure and Rheology of Fresh Cement Paste. In: 7th International Congress on The Chemistry of Cement, Vol. III, 1980, pp VI.0/16-Vi.0/30
- /HEN00/ Henrichsen, A.: Durability Properties of Hardened Concrete Sampled in Full Scale Structures. Brussels: European Commission, ECCREDI, 2000. - In: Proceedings Seminar on Self-Compacting Concrete, Malmö, 20th - 21st November 2000, S. 28-31
- /HOC97/ Hochstein, B.: Rheologie von Kugel- und Fasersuspensionen mit visko-elastischen Matrixflüssigkeiten, Dissertation 1997
- /HOR91/ Hornung, F.: The Use of the Brabender ViscoCorder to study the Consistency of Fresh Mortar by Two-point Tests. - In: Rheology of Cement and Concrete, S. 227 – 237. London, 1991.
- /HU95/ Hu, C.; Larrard de, F.; Gjorv, O.E.: Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete. In: Materials and Structures 28 (1995), Nr. 175, S. 1-7

- /HUM59/ Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Auflage, Berlin : Ernst & Sohn, 1959
- /HUS10/ Huß, A.: Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2010
- /ILL14/ Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.; Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation: *Panta Rhei – Rheologie des Frischbetons* S. 35-40, 27, März 2014
- /INO01/ Inoue, H.; Takeichi, Y.; Ohtomo, T.: Construction of Rigid Foundation of Underground Diaphragmwalls with Highly Congested Reinforcing Bar Arrangement by Using Self-Compacting Concrete. Fukui: COMS Engineering Corporation, 2001. - In: *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, 23-25 October 2001, (Ozawa, K.; Ouchi, M. (Ed.)), S. 643-650
- /JAM97/ Jamel, A. A. M.: Untersuchungen zum Fließverhalten von Zementmörtel und Frischbeton. Weimar, Bauhaus-Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Diss., 1997
- /JAN95/ Janssen, H. A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. In: *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 39 (1895), S.1045-1049
- /JIR04/ Jirka, G. H.: Gerinnehydraulik, Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Institut für Hydromechanik, 2004
- /JSC99/ Uomoto, T.; Ozawa, K.: Recommendation for Self-Compacting Concrete. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers 1999, Tokyo, Japan
- /KAI68/ Kaiser, W.: Die technologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen und die daraus ableitbaren Folgerungen für die Praxis im Tiefbau, Dissertation, Universität Stuttgart 1968
- /KHA99/ Khayat, K. H.: Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete. In: *ACI Materials Journal* 96 (1999), Nr. 3, S. 346-353
- /KHA02/ Khayat, K. H.; Saric-Coric, M.; Liotta, F.: Influence of Thixotropy on Stability Characteristics of Cement Grout and Concrete. In: *ACI Materials Journal* 99, 2002, Nr. 3, pp 234-241
- /KEC99/ Keck, H.-J.: Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen. Essen : Universität Gesamthochschule. - In: *Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft* (1999), Nr. 5
- /KIN04/ Kinzelbach, W.: Hydraulik I. Zürich, Technische Hochschule, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, Vorlesungsumdruck, 2004
<http://www.ihw.ethz.ch/GWH/downloads/hydraulik1/kapitel4.pdf>

- /KOR05/ Kordts, Stephan: Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone, Dissertation, Technische Universität Berlin 2005
- /KRE87/ Krell, J.: Einfluß der Feinststoffe im Beton auf die Frischbetonkonsistenz. In: Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, 1987, Nr. 55: Berichte vom Fachkolloquium Zementleim Frischmörtel, Frischbeton, S. 160-176
- /KRÜ99/ Krüger, M.: Prüfmethode zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen. Hamburg : Libri BOD, 1999. - In: Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Ing. H.-W. Reinhardt
- /KUC95/ Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag Leipzig-Köln, 15. verbesserte Auflage, 1995
- /LAR96/ Larrard de, F.; Sedran, T.; Hu, C., Szitkar, J, C.; Joly, M.; Derkx, F.: Evolution of the Workability of Superplasticized Concretes: Assessment with the BTRRHEOM Rheometer, Proceedings of the international RILEM workshop Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, Scotland, edited by Bartos and Marrs, E & FN Spon, 1996
- /LAR97a/ Larrard, F. de; Ferraris, C. F.; Sedran, T.: Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. In: Materials and Structures, Vol. 31, August-September 1998, pp 494-498 (/LAR97/)
- /LAR97b/ Larrard de, F.; Hu, C.; Sedran, T.; Szitkar, J.C.; Joly, M.; et al: A New Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete. In: ACI Materials Journal 94 (1997), Nr. 3, S. 234-243 Discussion In: ACI Materials Journal 96 (1999), Nr. 1, S. 126-132 (/LAR97/)
- /LAR98/ Larrard de, F.; Ferraris, C.; Sedran, T.: Fresh Concrete: A Herschel-Bulkley Material. In: Materials and Structures (RILEM) 31 (1998), Nr. 211, S. 494-498
- /LAR99/ Larrard de, F.: Concrete Mixture-Proportioning – A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series No. 9, S. Mindess and A. Bentur, editors, E & FN SPON, London, 421p., March 1999.
- /LEA80/ Leal, L.: Particle Motions in a Viscous Fluid. Ann. Rev. Fluid Mechanics, 12, pp. 435-476, 1980
- /LEE02/ Lee, S. H.: Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes, Kunsan National University, 2002
- /LEG94/ Legrand, C.; Wirquin, E.: Study of the strenghts of very young concrete as a function of the amount of hydrates formed-influence of superplasticizer, Materials and Structures Nr. 27, 1994, pp 106-109
- /LI01/ Li, Z.: Investigation on Shear Flow of Self-Compacting Concrete. Fukui: COMS Engineering Corporation, 2001. In: Proceedings of the Second International

Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, 23-25 October 2001, (Ozawa, K.; Ouchi, M. (Ed.)), S. 69-78

- /LOW13a/ Lowke, D.: Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone; Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen. Dissertation, Technische Universität München, 2013
- /LOW13b/ Lowke, D.; Illguth, S.; Kränkel, T.; Gehlen, C.; Rheological Optimization of Flowable Concretes Based on Computational Fluid Dynamics (CFD), 7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials. 02. September 2013
- /MAR02/ Martys, N.; Ferraris, C. F.: Simulation of SCC Flow. Evanston: Center for Advance Cement-Based Materials, 2002. - In: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Evanston, IL, USA, November 12-13, 2002, S. 21-26
- /MAT94/ Matsuo, S.; Ozawa, K.: Influence of Properties Coarse Aggregates on Self-Compactability of Fresh Concrete. In: Proceedings of the Japan Concrete Institute 16 (1994), Nr. 1, S. 165-17
- /NAG96/ Nagamoto, N.; Ozawa, K.: Influence of Properties of Fine Aggregates on Self-Compactability of fresh Concrete. In: Proceedings of the Japan Concrete Institute 18 (1996), Nr. 1, S. 105-110
- /NAN89/ Nanayakkara, A.; Gunatilaka, D.; Ozawa, K.; Maekawa, K.: Flow and Segregation of Fresh Concrete in Tapered Pipes - Two-Phase Computational Model. In: Collected Papers 27 (1989), S. 47-52
- /NAW98/ Nawa, T.; Izumi, T.; Edamatsu, Y.: State-of-the-Art Report on Materials and Design of Self-Compacting Concrete. Tosa-Yamada Kochi, Japan: Kochi University of Technology, 1999. - In: Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August 1998, Tosa-Yamada Kochi, Japan, 31 Seiten
- /NIE02/ Nielsen, L. F.: Generalized Bingham description of fresh concrete. XVIII Symposium on Nordic Concrete Research, 12-14 June 2002, Helsingør, Denmark, Proceedings Danish Concrete Society, 2002
- /NOA23/ Noack, P.: Versuche zur Bestimmung des Seitendrucks von feuchten Zementbetonen. In: Beton und Eisen 22 (1923), Nr. 17/18, S. 220-223
- /OER03/ Oertel, H. jr., et al: Numerische Strömungsmechanik- Grundlagen, Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele, Überarbeitete Auflage. Karlsruhe, Universität (TH), Institut für Strömungslehre 2003

- /ÖBV12/ Österreichische Bautechnik Vereinigung: Richtlinie „Selbst- und Leichtverdichtender Beton“ (SCC und ECC), (Ausgabe September 2012), Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2012
- /OH99/ Oh, S. G.; Noguchi, T.; Tomosawa, F.: Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete. In: Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, September 13-14, 1999, pp 361-372
- /OKA96/ Okamura, H.; Ozawa, K.: Self-Compacting High-Performance Concrete in Japan, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute International. – In: ACI Special Publications, ACI-SP 159 (1996), „International Workshop on High Performance Concrete“, ((1994), pp 2.1-2.16), S. 31-44
- /ÖVB02/ Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Merkblatt Selbstverdichtender Beton (SCC) (Ausgabe Dez. 2002) Wien : Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2002
- /OZA86/ Ozawa, K. et al.: Specification for reinforced concretework, Japanese Architectural Standard, 1986, JASS 5
- /PCI03/ PCI Interim SCC Guidelines Fast Team: Interim Guidelines for the Use of Self-Compacting Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants. 1st Edition, Chicago, IL: Precast/Prestressed Concrete Institute, March 2003
- /PET01/ Petersson, Ö.; Hakami, H.: Simulation of Self-Compacting Concrete - Laboratory Experiments and Numerical Modelling of Slump Flow and L-Box Tests. Fukui: COMS Engineering Corporation, 2001. - In: Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, 23-25 October 2001, (Ozawa, K.; Ouchi, M. (Ed.)), S. 79-88
- /PET03/ Petersson, Ö.: Simulation of Self-Compacting Concrete: Icelandic Building Research Institute, 2003. - In: Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17. - 20. August 2003, Reykjavik, Iceland
- /POW68/ Powers, T. C.: The Properties of Fresh Concrete; Wiley, New York, 1968
- /PRO05/ Proske, T.: Schalungsdruck bei Selbstverdichtendem Beton : Ein neues Konzept für die Berechnung. In: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Tagungsband Doktoranden-Symposium 45. Forschungskolloquium des DAfStb am 6. - 7. Oktober 2005 in Wien, S. 169-172
- /PUN90/ Puntke, W.: Grundlagen für die Matrixoptimierung und Ausführung in der Praxis. In: Matrixoptimierung – Mikroskopisches Analysieren von Beton (1990), Lehrgang, Esslingen, Technische Akademie
- /REI99/ Reisch, B.: Schwindreduzierung stellt Betontechnologie auf den Kopf. Fachartikel. In: Boden Wand Decke 1999, Ausgabe 1

- /REN76/ Rendchen, K.: Einfluß verschiedener Zemente auf das Fließverhalten und die Stabilität von Zementsuspensionen. In: Beton 26, 1976, Nr. 9, S. 321-325
- /REU78/ Reul, H.: Rheologische Untersuchungen an Zementsuspensionen mit Fließmitteln. In: Beton 28 (1978), Nr. 10 S. 360 - 361
- /RIE01/ Riebel, U.: Praktikum Viskosimetrie und Rheologie. Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 2001 <http://www.mvt.tu-cottbus.de/lehrstuhl/>
- /RHE01/ Rheologie-Kurs, Teil 1+2. In: <http://www.rheologie.de/>
- /ROS02/ Rosso, F.: Sedimentation in Coal-Water Slurry Pipelining, Dipartimento di Matematica 'Ulisse Dini', University of Firenze, Italy, 2002
- /ROS84/ Rostasy, F. S.: Einfluß des Mehlkorns auf die Betoneigenschaften. In: Beton 34 (1984), Nr. 1, S. 19-22
- /ROU14/ Roussel, N., Gram, A.: Simulation of Fresh Concrete Flow; State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 222-SCF. 2014
- /SCH97/ Schießl, P. ; Müller, C.: Schwindverhalten von Fließestrich. Köln: Industrieverband Werk trockenmörtel, 1997. - In: Fließestrich auf Calciumsulfatbasis, Tagung für Fachgutachter, 15. April 1997 in Nürnberg, S. 43-58
- /SCH01/ Schütze, J.: Die numerische Simulation von Strömung und Stoffaustausch in gerührten, begasten Bioreaktoren. Braunschweig, Technische Universität, Naturwissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2001
- /SCH14/ Schmidt, W.: Der Einfluss der Temperatur auf die Rheologie und die frühen Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton in Abhängigkeit vom Mischungsentwurf und des Zusatzmittelsystems, Dissertation, University of Eindhoven, Netherlands 2014
- /SED99/ Sedran, T.; Larrard de, F.: Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model. Cachan Cedex: RILEM Publications, 1999. - In: Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, September 13-14, 1999, (Skarendahl, A.; Petersson, Ö. (Ed.)), S. 321-332
- /SIL02/ Silfwerbrand, J.; Swedish Cement Association: Self-Compacting Concrete: Recommendations for Use. Stockholm : Swedish Concrete Association, 2002. Concrete Report No. 10(E)
- /SPE72/ Specht, M.: Die Belastung von Schalung und Rüstung durch Frischbeton, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität Hannover, Dissertation, 1972
- /STE24/ Stern, O: Zur Theorie der Elektrolytischen Doppelschicht. In: Zeitschrift für Elektrochemie 30 (1924), S. 508-516

- /STE94/ Steinhilper, W.; Röper, R.: Maschinen- und Konstruktionselemente, 3. Elastische Elemente – Achsen und Wellen – Dichtungstechnik – Reibung, Schmierung, Lagerung, 1. Auflage 1994, S. 224-421
- /STE02/ Steinmann, A.: Numerische und experimentelle Untersuchung der ein- und zweiphasigen Strömung in einem technisch belüfteten Abwasserteich. Berlin, Technische Universität, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation, 2002.
- /STO86/ Stovall, T.; Larrard, F. de; Buil, M.: Linear Packing Density Model of Grain Mixtures. In: Powder Technology 48, 1986 pp 1-12
- /STÖ04/ Stöcker, H.: DeskTop, Taschenbuch der Physik Kapitel 2: Dynamik, Beispiele zur Trägheitskraft, Verlag Harri Deutsch, 2004
- /SWE02/ Silfwerbrand, J.; Swedish Cement Association: Self-Compacting Concrete: Recommendations for Use. Stockholm: Swedish Concrete Association, 2002. - Concrete Report No. 10(E)
- /SYB88/ Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohleflugasche. Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber, 1988. In: VGB-Konferenz: Forschung in der Kraftwerkstechnik 1988, 16.-17. März 1988 in Essen. Vorträge Band 2, Vortrag C12, 12 Seiten
- /SYB90/ Sybertz, F.; Reick, P.: Effect of Fly Ash on the Rheological Properties of Cement Paste. London: E & FN Spon, 1990. In: Rheology of Fresh Cement and Concrete, Proceedings of the International Conference Organized by the British Society of Rheology, March 16-20 1990, (Banfill, P.F.G. (Ed.)), S. 13-22 1990
- /TAT55/ Tattersall, G. H.: The Rheology of Portland Cement Pastes. In: Brit. J. Appl. Phys. 6, 1955, pp 165-167
- /TAT83a/ Tattersall, G. H.: Der Zweipunktversuch zur Messung der Verarbeitbarkeit. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 49, 1983, Nr. 12, S. 789-792
- /TAT83b/ Tattersall, G. H.; Banfill, P. F. G: Rheology of fresh concrete; Pitman, London, 1983
- /TOM01/ Tomas, J.; Reichmann, B.: In-situ-Messung der Kompressibilität, Permeabilität und des Fließverhaltens von hoch dispersen Filterkuchen mit einer Preß-Scherzelle, Vortrag GVC-Fachausschuß „Mechanische Flüssigkeitsabtrennung“, Berlin 2001
- /UBB97/ Ubbink, O.: Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. Doctor Thesis, Department of Mechanical Engineering (1997)
- /UEB05/ Uebachs, S.; Brameshuber, W.: Numerische Modellierung der Strömungsvorgänge von Selbstverdichtendem Beton: 14. Kolloquium und Workshop über Rheologische Messungen an mineralischen Baustoffen, 09. und 10. März 2005 in Regensburg

- /UEB06a/ Uebachs, S.: Strömungssimulation von selbstverdichtendem Beton. Aachen : Institut für Bauforschung, 2006. - In: Numerische Methoden zur Problemlösung im konstruktiven Bauwesen. 34. Aachener Baustofftag, Aachen, 02. Februar 2006, 7 Seiten
- /UEB06b/ Uebachs, S.: Numerical Simulation of the Flow Behaviour of Self-Compacting Concretes Using Fluid Mechanical Methods. Zürich: Institute of Structural Engineering, 2006. - In: 6th International PhD Symposium in Civil Engineering, Proceedings, Zürich, 23-26 August 2006, (Vogel, T.; Mojsilovic, N.; Marti, P. (Eds.)), 7 Seiten
- /UEB06c/ Uebachs, S.; Brameshuber, W.: Numerical Simulation of the Flow Behaviour of Self-Compacting Concretes Using Fluid Mechanical Methods: Numerische Simulation des Strömungsvorganges von selbstverdichtenden Betonen mit strömungsmechanischen Methoden. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), 2007. In: International Workshop on Modelling, Simulation and Visualization of Flow in Fresh Self-Compacting Concrete, Stockholm, 6. September 2006, 15 pp
- /VAL03/ Valentin, F.: Hydraulik I – Einführung in die Hydromechanik. München, Technische Universität, Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, Skriptum, 2003
- /VAN01a/ Vanhove, Y.: Contribution à l'étude du frottement d'un béton autoplaçant contre une surface métallique – Application aux poussées contre les coffrages, 2001, Dissertation, Faculté des Sciences Appliquées de Béthune Université d'Artois
- /VAN01b/ Vanhove, Y.; Djelal, C.; Magnin, A.; Martin, D.: Study of Self-Compacting Concrete Pressure on Formwork. Fukui: COMS Engineering Corporation, 2001. In: Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, 23-25 October 2001, (Ozawa, K.; Ouchi, M. (Ed.)), S. 585-594
- /VAN04/ Vanhove, Y.; Djelal, C.; Magnin, A.: Prediction of the lateral pressure exerted by self-compacting concrete on formwork, In: Magazine of Concrete Research, Vol. 56, N°1, P. 55-62, February 2004
- /VIS04/ Lehrstuhl E20 Oberflächenphysik, München, Technische Universität, Fakultät für Physik, S.81-91
- /VOG40/ Vogelpohl, G.: Die geschichtliche Entwicklung unseres Wissens über Reibung und Schmierung. In: Öl und Kohle, Nr.9, März 1940, S. 89-93, S. 129-134
- /WAL99/ Wall, W. A.: Fluid-Struktur-Interaktion mit stabilisierten Finiten Elementen, 1999, Dissertation, Institut für Baustatik der Universität Stuttgart
- /WAL95/ Wallevik, O. H.: Effect of Filler Materials on the Rheological Properties of Fresh Concrete. In: ACI Materials Journal 92 (1995), Nr. 5, S. 524-528
- /WES73/ Wesche, K. H.; Berg vom, W.: Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton. In: Beton 23, 1973, Nr. 1, S. 21-27

- /WES93/ Wesche, K. H.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2: Beton, Mauerwerk. 3. Aufl. Wiesbaden : Bauverlag, 1993
- /WIE81/ Wierig, H.-J.; Suhr, S.: Einfluß unterschiedlicher Calciumsulfate im Zement auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und Einpressmörteln. Forschungsbericht, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, Universität Hannover, 1981
- /YAH99/ Yahia, A.; Tanimura, M.; Shimabukkuro, A.; Shimoyama, Y.: Effect of Rheological Parameters on Self-Compactability of Concrete Containing Various Mineral Admixtures. Cachan Cedex: RILEM Publications, 1999. - In: Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, September 13-14, 1999, (Skarendahl, A.; Petersson, Ö. (Ed.)), S. 523-535
- /YAH03/ Yahia, A.; Khayat, K. H.: Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixtures. In: Materials and Structures; vol. 36, 2003, pp 402-412
- /ZÜR03/ Zürcher, L.: Simulation der Strömung in der menschlichen Aorta, Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2003

Tabelle A1: Ausgangsstoffe

Stoff	Bemerkung	Bezeichnung	Benennung
Zement ¹⁾	grob	CEM I 32,5 R	Z1
	fein	CEM I 42,5 R	Z2
	mittelfein	CEM III/A 32,5 N NW/NA	Z3
Flugasche ²⁾	aus Trocken- feuerung	feine Flugasche	FA1
		grobe Flugasche	FA2
		grobe Flugasche	FA3
		< 20 µm fraktioniert	FA3.1
		< 50 µm fraktioniert	FA3.2
		> 50 µm fraktioniert	FA3.3
	aus Schmelz- kammerfeuerung	sehr feine Flugasche	FA4
		< 10 µm fraktioniert	FA4.1
		< 20 µm fraktioniert	FA4.2
		> 20 µm fraktioniert	FA4.3
feine Gesteins- körnung ³⁾	aus gleichen Naturvorkommen	0,1 - 0,5 mm	S1
		0,1 - 1,0 mm	S2
		0,5 - 1,0 mm	S3
		0,5 - 1,5 mm	S4
		0,7 - 1,2 mm	S5
		1,0 – 1,5 mm	S6
		0,25 - 1,0 mm	S7
		1,0 – 2,0 mm	S8
	aus unterschied- lichen Natur- vorkommen ⁴⁾	0,1 – 0,5 mm	S9
		0,1 – 0,5 mm	S10.1
		0,1 – 0,355 mm	S10.2
		0,1 – 0,5 mm	S11.1
		0,1 – 0,355 mm	S11.2
		0,1 – 0,5 mm	S12.1
		0,1 – 0,355 mm	S12.2
	Brechsande	0,09 – 0,5 mm	S13
		0,5 – 0,8 mm	S14
		0,8 – 0,125 mm	S15
		1,25 – 2,0 mm	S16

1) Z: Zement

2) FA: Flugasche

3) S: Sand

4) Die Sande S10.1 und S10.2 stammen jeweils aus dem gleichen Naturvorkommen, gleiches gilt für die Sande S11.1 und S11.2 bzw. S12.1 und S12.2

Tabelle A2: Fließmittel und Entschäumer

Stoff	Bemerkung	Bezeichnung	Benennung
Fließmittel ¹⁾	entschäumt	Polycarboxylat-Ether	PCE1
			PCE2
	nicht entschäumt		PCE3
	gering entschäumt		PCE4
	entschäumt		PCE5
			PCE6
Entschäumer ²⁾	-	für PCE3	E1
		für PCE4	E2

¹⁾ PCE: Fließmittel auf Polycarboxylat-Ether Basis

²⁾ Soweit erforderlich

Tabelle°A3: Zusammensetzung der SVM für 1 m³

Parameter	Einheit	Gehalt/Wert
Zement	l/m ³	135,0
Flugasche		198,9
feine Gesteinskörnung		376,6
Wasser		258,2
Luftgehalt (angenommen) ¹⁾	Vol.-%	3,1
Fließmittel (PCE) ¹⁾	M.-% v. Z.	1,35
Entschäumer (E) ²⁾	M.-% v. PCE	2,0
w/Z _{eq}	-	0,54

¹⁾ Gehalt wird ggf. an die Mischung angepasst

²⁾ Soweit erforderlich

Tabelle A4: Chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Zemente

Bestandteil		Einheit	CEM I 32,5 R		CEM I 42,5 R		CEM III/A 32,5 N NW/NA	
			Gehalt					
			getrocknet	geglüht	getrocknet	geglüht	getrocknet	geglüht
Glühverlust, Luft		M.-%	2,68	-	2,38	-	1,59	-
Kohlenstoff	als CO ₂ , grav. ¹⁾		2,05	-	1,45	-	1,81	-
	als C		0,56	-	0,40	-	0,49	-
Sulfat, SO ₃ , grav. ¹⁾			2,22	2,28	2,62	2,68	3,63	3,69
Chlorid			0,02	-	0,054	-	0,053	-
Freikalk			1,83	-	2,43	-	1,48	-
Unlöslicher Rückstand			0,50	-	0,37	-	0,57	-
SiO ₂			19,45	19,99	19,42	19,89	26,16	26,58
TiO ₂			0,08	0,08	0,09	0,09	0,52	0,53
Al ₂ O ₃			4,04	4,15	4,07	4,17	9,43	9,58
Fe ₂ O ₃			2,49	2,56	2,53	2,59	1,27	1,29
MnO			0,03	0,03	0,02	0,02	0,10	0,10
MgO			1,73	1,78	1,52	1,56	6,26	6,36
CaO			64,46	66,23	64,49	66,06	48,38	49,16
P ₂ O ₅			0,23	0,24	0,16	0,16	0,11	0,11
Na ₂ O			0,19	0,20	0,21	0,22	0,27	0,27
K ₂ O			0,99	1,02	1,04	1,07	0,92	0,93

1) gravimetrisch

Tabelle A5: Prüfungen am Zement

Prüfung		Einheit	Prüfwert		
			CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM III/A 32,5 N NW/NA
Rohdichte		kg/m³	3.130	3.100	2.940
spezifische Oberfläche nach Blaine (DIN 196-6)		cm²/g	3.485	4.783	3.658
Wasseranspruch nach Puntke		Vol.-%	40,5	44,8	40,5
Wasseranspruch (DIN EN 196-3)		M.-%	26,5	30,4	30,0
Erstarrungsbeginn		h:min	2:00	1:50	4:10
Erstarrungsende			3:10	3:00	4:40
Raumbeständigkeit nach Le Chatelier (≤ 4 mm)		mm	0,6	2,1	1,4
Ausbreitmaß			184	189	202
Mörteldruckfestigkeit	28 d	N/mm²	46,4	56,4	48,6
	90 d		47,9	58,2	54,8
Mörtelbiegezugfestigkeit	28 d		7,3	7,8	8,1
	90 d		8,0	8,0	9,3

Tabelle A6: Prüfungen an der Flugasche

Prüfung		Einheit	Prüfwert			
			FA1	FA2	FA3	FA4
Rohdichte		kg/m ³	2.360	2.490	2.350	2.380
spezifische Oberfläche nach Blaine (DIN 196-6)		cm ² /g	3.960	2.601	3.279	3.326
Ausbreitmaß		mm	215	204	190	212
Mörteldruckfestigkeit	28 d	N/mm ²	46,3	40,8	49,5	48,3
	90 d		62,1	52,6	58,2	55,3
Mörtelbiegezugfestigkeit	28 d		7,4	7,1	7,4	8,1
	90 d		8,3	7,7	8,3	8,0
Wasseranspruch nach Puntke		Vol.-%	37,0	37,7	34,6	28,3
Wasseranspruch (DIN EN 196-3)		M.-%	27,2	26,0	25,2	20,4

Tabelle A7: Prüfungen an den fraktionierten Flugaschen

Prüfung	Einheit	Prüfwert				
		FA3.1	FA3.2	FA4.1	FA4.2	FA4.3
Rohdichte	kg/m ³	2.470	2.420	2.510	2.490	2.360
spezifische Oberfläche nach Blaine (DIN 196-6)	cm ² /g	4.561	3.902	-	-	-
Wasseranspruch nach Puntke	Vol.-%	35,4	33,1	-	-	-
Wasseranspruch (DIN EN 196-3)	M.-%	25,8	24,8	-	-	-

Tabelle A8: Dichte der Ausgangsstoffe¹⁾

Stoff	Bezeichnung	Dichte
-	-	kg/m ³
Zement	CEM I 32,5 R	3.130
	CEM I 42,5 R	3.100
	CEM III/A 32,5 N NW/NA	2.940
Flugasche und fraktionierte Flugasche	FA1	2.360
	FA2	2.490
	FA3	2.350
	FA3.1	2.470
	FA3.2	2.420
	FA3.3	2.080
	FA4	2.380
	FA4.1	2.510
	FA4.2	2.490
	FA4.3	2.360
Kalksteinmehl	KSM1	2.760
	KSM2	2.750
Gesteinskörnung	S1	2.650
	S2 – S12.2	2.630
	S13 – S14	2.720

¹⁾ Dichte der Füller (Z, FA, KSM) nach DIN 1097-7

Dichte der Gesteinskörnung nach DIN 52 102

Tabelle A9: Benennung und Zusammensetzung der SVM1 bis SVM22

Benennung	Zement			Flugasche										Bemerkungen
	Z1	Z2	Z3	FA1	FA2	FA3	FA3.1	FA3.2	FA3.3	FA4	FA4.1	FA4.2	FA4.3	
SVM1	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Referenzmischung ¹⁾
SVM2a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM2b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM3	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM4	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM5	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM6	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
SVM7	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	sm = 270 mm ¹⁾
SVM8	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM9	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	sm = 270 mm ¹⁾
SVM10	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM11	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sm = 270 mm ¹⁾
SVM12	-	x	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
SVM13	-	x	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	sm = 270 mm ¹⁾
SVM14	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM15	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	sm = 270 mm ¹⁾
SVM16	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-
SVM17	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
SVM18	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-
SVM19	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM20	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM21	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	x	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM22	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	48/52 Vol.-% ²⁾

¹⁾ Zielgröße sm = 270 mm; durch Änderung der Fließmitteldosierung erreicht

²⁾ Verhältnis der Volumenanteile der Zemente (Z1/Z2)

Tabelle A10: Benennung und Zusammensetzung der SVM23 bis SVM53a

Benennung	Zement			Flugasche										Bemerkungen
	Z1	Z2	Z3	FA1	FA2	FA3	FA3.1	FA3.2	FA3.3	FA4	FA4.1	FA4.2	FA4.3	
SVM23	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	49/51 Vol.-% ²⁾
SVM24	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-
SVM25	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
SVM26	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-
SVM27	-	x	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM28	-	x	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM29	-	x	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	x	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM30	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	48/52 Vol.-% ²⁾
SVM31	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	49/51 Vol.-% ²⁾
SVM32	x	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-
SVM33	x	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-
SVM34	x	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM35	x	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM36	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75/25 Vol.-% ²⁾
SVM37	x	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM38	x	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	65/35 Vol.-% ²⁾
SVM39	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-
SVM40	-	x	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-
SVM41	-	x	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM42	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM43	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM44	-	x	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	50/50 Vol.-% ²⁾
SVM45	-	x	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	65/35 Vol.-% ²⁾
SVM46	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM47	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	sm = 270 mm ¹⁾
SVM48	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM49	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	sm = 270 mm ¹⁾
SVM50a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM50b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM50c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM51a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM51b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM52a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM52b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM52c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM52d	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM53a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾ Zielgröße sm = 270 mm; durch Änderung der Fließmitteldosierung erreicht

²⁾ Verhältnis der Volumenanteile der Zemente (Z1/Z2)

Tabelle A11: Benennung und Zusammensetzung der SVM53b bis SVM64d

Benennung	Zement			Flugasche										Bemerkungen
	Z1	Z2	Z3	FA1	FA2	FA3	FA3.1	FA3.2	FA3.3	FA4	FA4.1	FA4.2	FA4.3	
SVM53b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM53c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM53d	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM53e	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM53f	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM54	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25/75 Vol.-% ²⁾
SVM55a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM55b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM55c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM55d	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM56a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM56b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM57	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58d	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58e	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58f	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58g	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM58h	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM59a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM59b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM59c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM60a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM60b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM60c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM61a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM61b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM61c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM61d	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM61e	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM62	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM63	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM64a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM64b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM64c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM64d	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

²⁾Verhältnis der Volumenanteile der Zemente (Z1/Z2)

Tabelle A12: Benennung und Zusammensetzung der SVM65a bis SVM90

Benennung	Zement			Flugasche										Bemerkungen
	Z1	Z2	Z3	FA1	FA2	FA3	FA3.1	FA3.2	FA3.3	FA4	FA4.1	FA4.2	FA4.3	
SVM65a	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM65b	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM65c	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM65d	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM66	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM67	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM68	-	-	x	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
SVM69	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM70	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM71	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	mit KSM F
SVM72	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	mit KSM
SVM73	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,32, NS, AWG
SVM74	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM75	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SVM76	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	GR, BS, KM
SVM77	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,22, BS, KM
SVM78	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,27, BS, KM
SVM79	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,32, BS, KM
SVM80	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,37, BS, KM
SVM81	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	GR, BS, VM
SVM82	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,22, BS, VM
SVM83	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,27, BS, VM
SVM84	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,32, BS, VM
SVM85	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,37, BS, VM
SVM86	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,42, BS, VM
SVM87	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,27, BS, AWG
SVM88	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,32, BS, AWG
SVM89	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	GR, NS, KM
SVM90	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,22, NS, KM

KSM F = Kalksteinmehl

KSM = Kalksteinmehl

n = Exponent der Idealsieblinie nach Funk&Dinger

BS = Brechsand

NS = Natursand

GR = Grund- / Referenzmischung

KM = konstanter Mehlkorngelalt (Variation des Sandgelaltes)

VM = variabler Mehlkorngelalt (& Variation des Sandgelaltes)

AWG = Anpassung des Wassergelaltes und VM

Tabelle A13: Benennung und Zusammensetzung der SVM91 bis SVM99

Benennung	Zement			Flugasche										Bemerkungen
-	Z1	Z2	Z3	FA1	FA2	FA3	FA3.1	FA3.2	FA3.3	FA4	FA4.1	FA4.2	FA4.3	-
SVM91	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,27, NS, KM
SVM92	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,32, NS, KM
SVM93	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,37, NS, KM
SVM94	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	GR, NS, VM
SVM95	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,22, NS, VM
SVM96	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,27, NS, VM
SVM97	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,32, NS, VM
SVM98	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,37, NS, VM
SVM99	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	n = 0,27, NS, AWG

n = Exponent der Idealsieblinie nach Funk&Dinger

NS = Natursand

GR = Grund- / Referenzmischung

KM = konstanter Mehlkorngelalt (Variation des Sandgehaltes)

VM = variabler Mehlkorngelalt (& Variation des Sandgehaltes)

AWG = Anpassung des Wassergehaltes und VM

Tabelle A14: Eigenschaften der untersuchten SVM1 bis SVM30

Benennung	Wasserfilm d_w	Fließgrenze	Viskosität η	Exponent n	Partikelabstand d_p
-	μm	N/mm ²	Nmm·min	-	μm
SVM1	0,339	1,502	0,385	1,134	0,677
SVM2a	0,420	1,778	0,146	0,965	0,841
SVM2b	0,420	1,420	0,135	0,854	0,841
SVM3	Basismörtel eines Stabilisierer-Typ-SVB, wurde ausschließlich für die tribologische Untersuchungen verwendet.				
SVM4					
SVM5	0,274	4,171	0,508	1,288	0,548
SVM6	0,436	0,276	0,090	1,123	0,872
SVM7	0,359	1,642	0,134	0,931	0,718
SVM8	0,382	0,584	0,406	1,076	0,763
SVM9	0,455	1,775	0,439	1,080	0,909
SVM10	0,269	2,494	0,424	1,320	0,539
SVM11	0,269	0,892	0,381	1,317	0,539
SVM12	0,349	0,297	0,103	1,241	0,698
SVM13	0,283	1,062	0,146	1,076	0,566
SVM14	0,319	0,620	0,313	1,127	0,639
SVM15	0,382	0,410	0,308	1,056	0,764
SVM16	0,197	7,040	0,193	0,706	0,395
SVM17	0,242	5,184	0,157	0,780	0,484
SVM18	0,455	5,095	0,719	0,650	0,911
SVM19	0,265	3,692	0,113	0,759	0,531
SVM20	0,301	2,628	0,131	0,808	0,601
SVM21	0,420	1,835	0,256	0,937	0,840
SVM22	0,383	1,994	0,185	0,856	0,766
SVM23	0,361	3,021	0,154	0,904	0,722
SVM24	0,154	9,332	0,218	0,778	0,307
SVM25	0,188	5,074	0,186	0,812	0,376
SVM26	0,316	3,923	0,510	1,017	0,631
SVM27	0,203	3,677	0,141	0,900	0,406
SVM28	0,234	3,185	0,154	0,977	0,468
SVM29	0,332	1,450	0,199	1,020	0,665
SVM30	0,290	1,773	0,171	0,994	0,580

Tabelle A15: Eigenschaften der untersuchten SVM31 bis SVM55c

Benennung	Wasserfilm d_w	Fließgrenze	Viskosität η	Exponent n	Partikelabstand d_p
-	μm	N/mm ²	Nmm·min	-	μm
SVM31	0,272	1,857	0,157	0,936	0,545
SVM32	0,379	0,670	0,143	1,232	0,757
SVM33	0,417	0,397	0,185	1,273	0,834
SVM34	0,416	0,434	0,192	1,140	0,832
SVM35	0,439	0,608	0,252	1,190	0,878
SVM36	0,326	0,062	0,394	1,101	0,652
SVM37	0,526	0,000	0,822	0,785	1,053
SVM38	0,568	0,000	0,869	0,655	1,136
SVM39	0,307	0,652	0,156	1,401	0,615
SVM40	0,341	0,408	0,196	1,455	0,682
SVM41	0,340	0,547	0,192	1,283	0,681
SVM42	0,364	0,597	0,232	1,293	0,729
SVM43	0,310	2,520	0,409	1,207	0,620
SVM44	0,434	0,000	0,713	0,983	0,869
SVM45	0,448	0,000	0,761	0,843	0,895
SVM46	0,402	0,000	0,693	1,194	0,804
SVM47	0,402	0,844	0,803	0,931	0,804
SVM48	0,336	8,986	0,750	0,845	0,673
SVM49	0,336	2,712	0,629	1,199	0,673
SVM50a	0,145	3,715	1,332	1,253	0,290
SVM50b	0,145	2,556	1,265	1,399	0,290
SVM50c	0,145	2,483	1,315	1,359	0,290
SVM51a	0,210	3,242	0,556	1,242	0,420
SVM51b	0,210	2,623	0,535	1,333	0,420
SVM52a	0,295	2,331	0,283	1,032	0,590
SVM52b	0,295	1,954	0,269	1,104	0,590
SVM52c	0,295	3,958	0,291	0,995	0,590
SVM52d	0,295	6,451	0,315	1,024	0,590
SVM53a	0,295	1,724	0,288	1,006	0,590
SVM53b	0,295	3,019	0,292	1,112	0,590
SVM53c	0,295	2,274	0,296	1,152	0,590
SVM53d	0,295	1,537	0,278	1,044	0,590
SVM53e	0,295	3,133	0,284	1,089	0,590
SVM53f	0,295	2,196	0,289	1,088	0,590
SVM54	0,294	3,333	0,461	1,281	0,587
SVM55a	0,546	2,461	0,080	0,698	1,092
SVM55b	0,546	2,420	0,081	0,719	1,092
SVM55c	0,546	2,101	0,074	0,736	1,092

Tabelle A16: Eigenschaften der untersuchten SVM55d bis SVM59c

Benennung	Wasserfilm d_w	Fließgrenze	Viskosität η	Exponent n	Partikelabstand d_p
-	μm	N/mm^2	$\text{Nmm}\cdot\text{min}$	-	μm
SVM55d	0,546	1,962	0,075	0,761	1,092
SVM56a	0,687	2,998	0,054	0,669	1,374
SVM56b	0,687	2,010	0,051	0,597	1,374
SVM57	0,216	2,036	1,281	1,348	0,431
SVM58a	0,305	3,652	0,491	1,140	0,610
SVM58b	0,305	3,932	0,473	1,191	0,610
SVM58c	0,305	2,618	0,457	1,095	0,610
SVM58d	0,305	3,854	0,476	1,116	0,610
SVM58e	0,305	1,677	0,470	1,119	0,610
SVM58f	0,305	2,909	0,501	1,096	0,610
SVM55d	0,546	1,962	0,077	0,761	1,092
SVM56a	0,687	2,998	0,054	0,669	1,374
SVM56b	0,687	2,010	0,051	0,597	1,374
SVM57	0,216	2,036	1,281	1,348	0,431
SVM58a	0,305	3,652	0,491	1,140	0,610
SVM58b	0,305	3,932	0,473	1,191	0,610
SVM58c	0,305	2,618	0,457	1,095	0,610
SVM58d	0,305	3,854	0,476	1,116	0,610
SVM58e	0,305	1,677	0,470	1,119	0,610
SVM58f	0,305	2,909	0,501	1,096	0,610
SVM58g	0,305	2,963	0,478	1,150	0,610
SVM58h	0,305	3,928	0,530	1,161	0,610
SVM59a	0,436	2,342	0,201	1,052	0,873
SVM59b	0,436	3,189	0,218	1,035	0,873
SVM59c	0,436	1,675	0,199	0,981	0,873

Tabelle A17: Eigenschaften der untersuchten SVM60a bis SVM65a

Benennung	Wasserfilm d_w	Fließgrenze	Viskosität η	Exponent n	Partikelabstand d_p
-	μm	N/mm^2	$\text{Nmm}\cdot\text{min}$	-	μm
SVM60a	0,568	2,489	0,109	0,861	1,136
SVM60b	0,568	1,747	0,105	0,903	1,136
SVM60c	0,568	1,757	0,102	0,824	1,136
SVM61a	0,716	2,001	0,071	0,576	1,432
SVM61b	0,716	1,954	0,065	0,644	1,432
SVM61c	0,716	1,849	0,060	0,722	1,432
SVM61d	0,716	0,824	0,064	0,553	1,432
SVM61e	0,716	1,577	0,060	0,659	1,432
SVM62	0,295	4,4117	0,3214	0,996	0,590
SVM63	0,260	4,0254	0,3394	1,073	0,521
SVM64a	0,254	7,314	0,414	1,2951	0,508
SVM64b	0,254	4,010	0,401	1,2647	0,508
SVM64c	0,254	4,3760	0,4249	1,3232	0,508
SVM64d	0,254	4,8475	0,4266	1,2903	0,508
SVM65a	0,204	3,7991	0,9972	1,416	0,408

Tabelle A18: Eigenschaften der untersuchten SVM65b bis SVM99

Benennung	Wasserfilm d_w	Fließgrenze	Viskosität η	Exponent n	Partikelabstand d_p
-	μm	N/mm^2	$\text{Nmm} \cdot \text{min}$	-	μm
SVM65b	0,204	4,6578	0,9314	1,4474	0,408
SVM65c	0,204	3,4557	0,9790	1,4694	0,408
SVM65d	0,204	4,0179	0,9307	1,3934	0,408
SVM66	0,328	0,000	0,451	1,507	0,656
SVM67	0,361	2,800	0,527	1,381	0,722
SVM68	0,468	0,000	0,083	1,310	0,935
SVM69	0,425	0,972	0,417	1,234	0,850
SVM70	0,445	0,465	0,767	1,261	0,889
SVM71	0,151	2,310	0,472	1,217	0,303
SVM72	0,252	2,473	0,466	1,222	0,504
SVM73	0,234	2,147	1,187	0,950	0,468
SVM74	0,000	0,049	0,702	1,326	0,000
SVM75	0,405	1,981	0,911	1,002	0,810
SVM76	0,103	0,679	0,712	1,271	0,207
SVM77	0,163	0,539	0,422	1,334	0,325
SVM78	0,181	0,183	0,466	1,369	0,362
SVM79	0,200	0,093	0,382	1,323	0,400
SVM80	0,232	0,093	0,382	1,323	0,464
SVM81	0,103	0,679	0,712	1,271	0,207
SVM82	0,163	0,534	0,422	1,334	0,325
SVM83	0,199	0,000	0,358	1,206	0,399
SVM84	0,233	0,005	0,320	1,095	0,466
SVM85	0,344	0,000	0,370	0,921	0,687
SVM86	0,661	0,000	0,391	0,770	1,322
SVM87	0,155	0,548	0,497	1,219	0,311
SVM88	0,105	0,000	0,691	1,012	0,209
SVM89	0,231	1,085	0,587	1,377	0,461
SVM90	0,252	0,485	0,401	1,274	0,505
SVM91	0,259	1,047	0,359	1,359	0,518
SVM92	0,267	0,672	0,338	1,372	0,534
SVM93	0,273	0,360	0,339	1,358	0,547
SVM94	0,231	1,085	0,587	1,377	0,461
SVM95	0,252	0,485	0,401	1,274	0,505
SVM96	0,337	0,000	0,232	1,227	0,674
SVM97	0,447	0,000	0,182	1,146	0,894
SVM98	0,578	0,249	0,176	1,066	1,156
SVM99	0,227	1,242	0,431	1,246	0,454

Tabelle A19: Ergebnisse aus den indirekten Messverfahren für SVM1 bis SVM30

Mischung	Setzfließ- maß	Trichter- auslaufzeit	Frisch- mörtel- temperatur	Rohdichte	Luftporen- gehalt	Wasser- anspruch ¹⁾
	sm	t _{Tr}	T	ρ	LP-Gehalt	W _P
-	mm	s	°C	kg/m ³	Vol.-%	Vol.-%
SVM1	269	5,7	24,8	2.140	3,5	24,6
SVM2a	276	3,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM2b	266	3,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM3	Basismörtel eines Stabilisierer-Typ-SVB, wurde ausschließlich für die tribologische Untersuchungen verwendet.					
SVM4						
SVM5	208	7,7	26,1	n. b.	n. b.	25,7
SVM6	365	2,3	23,6	n. b.	n. b.	21,7
SVM7	269	2,9	24,0	2.214	0,3	21,7
SVM8	291	4,8	23,9	2.099	4,8	24,3
SVM9	269	5,6	24,2	2.091	5,1	24,3
SVM10	248	6,5	25,6	2.103	4,6	25,9
SVM11	273	6,4	25,2	2.093	4,9	25,9
SVM12	364	2,6	24,0	2.216	0,1	22,9
SVM13	275	3,7	24,2	2.191	1,0	22,9
SVM14	282	5,6	24,7	2.082	5,3	24,6
SVM15	275	5,5	24,7	2.077	5,5	24,6
SVM16	118	14,4	27,2	2.185	2,6	24,9
SVM17	151	5,4	25,2	2.200	1,8	24,3
SVM18	150	18,0	24,4	2.120	4,0	24,1
SVM19	188	3,4	25,4	2.210	0,9	23,2
SVM20	213	3,5	24,9	2.212	0,8	22,7
SVM21	257	3,6	23,9	2.181	1,5	22,1
SVM22	234	3,3	24,0	2.196	1,2	22,6
SVM23	226	3,0	24,2	2.199	1,3	22,5
SVM24	100	26,5	27,0	2.171	2,9	26,5
SVM25	138	6,6	26,0	2.176	2,5	25,8
SVM26	216	5,3	24,3	2.152	2,5	24,0
SVM27	179	4,6	25,6	2.173	2,3	25,0
SVM28	199	4,0	25,2	2.174	2,2	24,2
SVM29	258	3,7	24,2	2.191	0,9	22,8
SVM30	238	3,6	24,2	2.181	1,7	24,0

¹⁾ Wasseranspruch nach Punkte, kleinster Wert aus drei Versuchen

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A20: Ergebnisse aus den indirekten Messverfahren für SVM31 bis SVM40

Mischung	Setzfließ- maß	Trichter- auslaufzeit	Frisch- mörtel- temperatur	Rohdichte	Luftporen- gehalt	Wasser- anspruch ¹⁾
	sm	t _{Tr}	T	ρ	LP-Gehalt	W _P
-	mm	s	°C	kg/m ³	Vol.-%	Vol.-%
SVM31	224	3,7	24,7	2.188	1,5	24,1
SVM32	338	3,3	24,3	2.177	2,5	23,8
SVM33	345	3,8	24,2	2.178	2,1	23,9
SVM34	316	3,9	24,3	2.142	3,5	23,9
SVM35	317	4,1	24,1	2.131	3,7	23,9
SVM36	264	6,0	25,3	n. b.	n. b.	24,6
SVM37	226	18,8	25,2	2.031	6,5	25,4
SVM38	152	- ²⁾	24,4	2.028	6,3	26,2
SVM39	313	3,9	25,0	2.139	3,9	25,3
SVM40	339	4,1	25,0	2.142	3,4	25,0

¹⁾ Wasseranspruch nach Puntke, kleinster Wert aus drei Versuchen

²⁾ kein Ausfließen des Betons

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A21: Ergebnisse aus den indirekten Messverfahren für SVM41 bis SVM58g

Mischung	Setzfließ- maß	Trichter- auslaufzeit	Frisch- mörtel- temperatur	Rohdichte	Luftporen- gehalt	Wasser- anspruch ¹⁾
	sm	t _{Tr}	T	ρ	LP-Gehalt	W _P
-	mm	s	°C	kg/m ³	Vol.-%	Vol.-%
SVM41	310	4,2	25,1	2.107	4,8	24,8
SVM42	310	4,3	25,0	2.107	4,6	24,6
SVM43	249	6,2	25,5	n. b.	n. b.	24,8
SVM44	254	7,5	24,9	2.024	6,7	25,4
SVM45	223	11,3	24,8	n. b.	n. b.	25,9
SVM46	360	6,5	24,2	n. b.	n. b.	24,8
SVM47	268	7,9	24,3	2.156	3,5	24,8
SVM48	157	9,6	24,9	n. b.	n. b.	24,9
SVM49	265	6,2	24,9	2.134	4,3	24,9
SVM50a	262	22,4	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM50b	275	16,5	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM50c	268	19,3	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM51a	269	9,9	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM51b	274	9,6	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM52a	295	7,2	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
SVM52b	315	5,2	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
SVM52c	269	7,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
SVM52d	255	8,0	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
SVM53a	267	6,6	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM53b	270	6,5	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM53c	282	6,6	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM53d	276	6,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM53e	267	3,9	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM53f	274	6,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM54	229	7,1	25,8	n. b.	n. b.	25,1
SVM55a	262	2,4	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM55b	263	2,6	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM55c	271	2,2	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM55d	272	2,3	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM56a	266	1,6	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM56b	269	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	25,2
SVM57	273	15,2	n. b.	n. b.	n. b.	25,4

¹⁾ Wasseranspruch nach Puntke, kleinster Wert aus drei Versuchen

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A22: Ergebnisse aus den indirekten Messverfahren für SVM58h bis SVM70

Mischung	Setzfließ- maß	Trichter- auslaufzeit	Frisch- mörtel- temperatur	Rohdichte	Luftporen- gehalt	Wasser- anspruch ¹⁾
	sm	t _{Tr}	T	ρ	LP-Gehalt	W _P
-	mm	s	°C	kg/m ³	Vol.-%	Vol.-%
SVM58a	265	9,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM58b	279	8,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM58c	271	8,3	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM58d	261	11,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM58e	274	8,9	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM58f	269	9,8	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM58g	267	9,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM58h	268	9,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM59a	274	5,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM59b	261	5,3	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM59c	276	4,8	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM60a	264	3,1	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM60b	279	3,1	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM60c	272	2,9	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM61a	278	1,6	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM61b	265	2,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM61c	287	1,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM61d	272	1,9	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM61e	266	2,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
SVM62	271	7,8	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
SVM63	270	7,6	n. b.	n. b.	n. b.	26,5
SVM64a	261	8,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,3
SVM64b	277	8,0	n. b.	n. b.	n. b.	25,3
SVM64c	265	9,1	n. b.	n. b.	n. b.	25,3
SVM64d	271	8,7	n. b.	n. b.	n. b.	25,3
SVM65a	279	14,9	n. b.	n. b.	n. b.	28,5
SVM65b	279	-	n. b.	n. b.	n. b.	28,5
SVM65c	275	13,5	n. b.	n. b.	n. b.	28,5
SVM65d	269	12,9	n. b.	n. b.	n. b.	28,5
SVM66	375	5,2	24,0	2.144	1,9	25,2
SVM67	276	6,3	24,3	2.094	4,0	25,2
SVM68	410	2,4	22,8	n. b.	n. b.	22,0
SVM69	323	5,0	23,1	2.079	4,6	24,1
SVM70	351	6,4	23,3	n. b.	n. b.	24,8

¹⁾ Wasseranspruch nach Punkte, kleinster Wert aus drei Versuchen

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A23: Ergebnisse aus den indirekten Messverfahren für SVM71 bis SVM83

Mischung	Setzfließ- maß	Trichter- auslaufzeit	Frisch- mörtel- temperatur	Rohdichte	Luftporen- gehalt	Wasser- anspruch ¹⁾
	sm	t _{Tr}	T	ρ	LP-Gehalt	WP
-	mm	s	°C	kg/m ³	Vol.-%	Vol.-%
SVM71	272	7,7	24,4	2.216	3,3	24,3
SVM72	277	7,8	24,4	2.220	3,0	24,0
SVM73	180	20	25,6	2.212	4,8	17,1
SVM74	364	5,5	23,2	n. b.	n. b.	24,8
SVM75	273	7,8	23,4	2.112	4,3	24,8
SVM76	267	9,5	25,6	2.135	4,8	24,6
SVM77	295	7,6	25,6	2.197	3,0	22,4
SVM78	300	7,1	25,1	2.202	2,2	21,9
SVM79	296	6,6	25,4	2.201	2,5	21,4
SVM80	290	6,6	25,2	2.200	2,4	20,5
SVM81	267	9,5	25,6	2.135	4,8	24,0
SVM82	295	7,6	25,6	2.197	3,0	22,4
SVM83	316	5,6	24,6	2.225	2,2	22,0

¹⁾ nach Punkte, kleinster Wert aus drei Versuchen; n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A24: Ergebnisse aus den indirekten Messverfahren für SVM84 bis SVM100

Mischung	Setzfließ- maß	Trichter- auslaufzeit	Frisch- mörtel- temperatur	Rohdichte	Luftporen- gehalt	Wasser- anspruch ¹⁾
	sm	t _{Tr}	T	ρ	LP-Gehalt	W _P
-	mm	s	°C	kg/m ³	Vol.-%	Vol.-%
SVM84	291	5,5	24,2	2.226	2,8	21,9
SVM85	288	7,8	23,5	2.235	4,6	20,2
SVM86	260	10	24,5	n. b.	5,0	18,8
SVM87	284	7,3	25,4	2.230	2,3	22
SVM88	246	12	25,5	2.251	3,6	21,9
SVM89	269	7,9	25,4	2.151	3,4	20,5
SVM90	289	7,1	25,1	2.183	2,1	19,9
SVM91	292	7,1	25,1	2.165	2,6	19,7
SVM92	295	6,5	25,0	2.171	2,2	19,5
SVM93	299	6,4	25,0	2.169	2,1	19,3
SVM94	269	7,9	25,4	2.151	3,4	20,5
SVM95	289	7,1	24,3	2.183	2,1	19,9
SVM96	320	5,2	24,2	n. b.	1,5	18,5
SVM97	325	3,8	23,4	2.231	1,2	17,1
SVM98	322	3,2	23,3	2.236	1,7	15,4
SVM99	282	6,9	25,3	2.194	2,7	18,5

¹⁾ nach Punkte, kleinster Wert aus drei Versuchen; n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A25: Wasserfilmdicken der untersuchten SVM1 bis SVM25

Benennung	Wasserfilmdicke		
	Bui /BUI02/	Oh /OH99/	Uebachs
-	µm		
SVM1	7,8509	0,0003	0,3386
SVM2a	8,4270	0,0013	0,4205
SVM2b	8,4270	0,0013	0,4205
SVM3	Basismörtel eines Stabilisierer-Typ-SVB, wurden ausschließlich für die tribologische Untersuchungen verwendet.		
SVM4			
SVM5	7,3469	0,0003	0,2738
SVM6	9,1231	0,0038	0,4361
SVM7	7,5808	0,0037	0,3591
SVM8	8,0396	0,0093	0,3817
SVM9	9,4982	0,0095	0,4547
SVM10	7,2195	0,0003	0,2693
SVM11	7,2195	0,0003	0,2693
SVM12	8,5457	0,0034	0,3491
SVM13	6,9931	0,0034	0,2831
SVM14	7,8704	0,0082	0,3195
SVM15	9,3265	0,0084	0,3818
SVM16	5,9509	0,0002	0,1974
SVM17	6,2519	0,0002	0,2421
SVM18	6,6054	0,0143	0,4554
SVM19	7,7614	0,0016	0,2654
SVM20	8,0420	0,0017	0,3007
SVM21	8,5382	0,0077	0,4199
SVM22	8,0073	0,0073	0,3828
SVM23	8,2743	0,0058	0,3609
SVM24	5,1827	0,0002	0,1536
SVM25	5,5295	0,0002	0,1880

Tabelle A26: Wasserfilmdicken der untersuchten SVM26 bis SVM38

Benennung	Wasserfilmdicke		
	Bui /BUI02/	Oh /OH99/	Uebachs
-	μm		
SVM26	5,7575	0,0129	0,3156
SVM27	6,7773	0,0015	0,2030
SVM28	7,2180	0,0016	0,2339
SVM29	8,1323	0,0071	0,3324
SVM30	7,2453	0,0068	0,2901
SVM31	7,3845	0,0054	0,2724
SVM32	9,5446	0,0003	0,3786
SVM33	9,5763	0,0003	0,4168
SVM34	10,9546	0,0052	0,4158
SVM35	11,0025	0,0047	0,4391
SVM36	8,3043	0,0003	0,3259
SVM37	10,4507	0,1999	0,5263
SVM38	9,4137	0,3419	0,5678

Tabelle A27: Wasserfilmdicken der untersuchten SVM39 bis SVM49

Benennung	Wasserfilmdicke		
	Bui /BUI02/	Oh /OH99/	Uebachs
-	μm		
SVM39	8,8436	0,0006	0,3074
SVM40	9,0488	0,0003	0,3411
SVM41	10,3544	0,0047	0,3404
SVM42	10,6052	0,0044	0,3643
SVM43	8,7108	0,0003	0,3102
SVM44	10,4141	0,1799	0,4343
SVM45	9,7678	0,0031	0,4477
SVM46	7,7350	0,0019	0,4022
SVM47	7,7350	0,0019	0,4022
SVM48	7,6600	0,0018	0,3365
SVM49	7,6600	0,0018	0,3365

Tabelle A28: Wasserfilmdicken der untersuchten SVM50 bis SVM58h

Benennung	Wasserfilmdicke		
	Bui /BUI02/	Oh /OH99/	Uebachs
-	µm		
SVM50a	3,0108	0,0012	0,1449
SVM50b	3,0108	0,0012	0,1449
SVM50c	3,0108	0,0012	0,1449
SVM51a	4,3265	0,0012	0,2100
SVM51b	4,3265	0,0012	0,2100
SVM52a	n. b.	n. b.	n. b.
SVM52b	n. b.	n. b.	n. b.
SVM52c	n. b.	n. b.	n. b.
SVM52d	n. b.	n. b.	n. b.
SVM53a	6,0144	0,0012	0,2951
SVM53b	6,0144	0,0012	0,2951
SVM53c	6,0144	0,0012	0,2951
SVM53d	6,0144	0,0012	0,2951
SVM53e	6,0144	0,0012	0,2951
SVM53f	6,0144	0,0012	0,2951
SVM54	9,1167	0,0003	0,2937
SVM55a	10,7530	0,0014	0,5460
SVM55b	10,7530	0,0014	0,5460
SVM55c	10,7530	0,0014	0,5460
SVM55d	10,7530	0,0014	0,5460
SVM56a	13,2487	0,0014	0,6868
SVM56b	13,2487	0,0014	0,6868
SVM57	4,2510	0,0012	0,2156
SVM58a	5,9468	0,0013	0,3049
SVM58b	5,9468	0,0013	0,3049
SVM58c	5,9468	0,0013	0,3049
SVM58d	5,9468	0,0013	0,3049
SVM58e	5,9468	0,0013	0,3049
SVM58f	5,9468	0,0013	0,3049
SVM58g	5,9468	0,0013	0,3049
SVM58h	5,9468	0,0013	0,3049

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A29: Wasserfilmdicken der untersuchten SVM59a bis SVM75

Benennung	Wasserfilmdicke		
	Bui /BUI02/	Oh /OH99/	Uebachs
-	µm		
SVM59a	8,3712	0,0013	0,4364
SVM59b	8,3712	0,0013	0,4364
SVM59c	8,3712	0,0013	0,4364
SVM60a	10,7091	0,0014	0,5681
SVM60b	10,7091	0,0014	0,5681
SVM60c	10,7091	0,0014	0,5681
SVM61a	13,2185	0,0015	0,7158
SVM61b	13,2185	0,0015	0,7158
SVM61c	13,2185	0,0015	0,7158
SVM61d	13,2185	0,0015	0,7158
SVM61e	13,2185	0,0015	0,7158
SVM62	n. b.	n. b.	n. b.
SVM63	6,6055	0,0015	0,2815
SVM64a	5,1440	0,0011	0,2540
SVM64b	5,1440	0,0011	0,2540
SVM64c	5,1440	0,0011	0,2540
SVM64d	5,1440	0,0011	0,2540
SVM65a	7,0434	0,0005	0,3807
SVM65b	7,0434	0,0005	0,3807
SVM65c	7,0434	0,0005	0,3807
SVM65d	7,0434	0,0005	0,3807
SVM66	7,6601	0,0003	0,3281
SVM67	8,3916	0,0003	0,3609
SVM68	9,7962	0,0038	0,4676
SVM69	8,9560	0,0091	0,4252
SVM70	8,5498	0,0020	0,4447
SVM71	7,9585	0,0017	0,1513
SVM72	7,4386	0,0003	0,2521
SVM73	n. b.	n. b.	0,2105
SVM74	7,8230	0,0020	0,4052
SVM75	7,8230	0,0020	0,4052

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A30: Eigenschaften der untersuchten SVM76 bis SVM99

Benennung	Wasserfilmdicke		
	Bui /BUI02/	Oh /OH99/	Uebachs
-	µm		
SVM76	n. b.	n. b.	0,1034
SVM77	n. b.	n. b.	0,1626
SVM78	n. b.	n. b.	0,1812
SVM79	n. b.	n. b.	0,1998
SVM80	n. b.	n. b.	0,2320
SVM81	n. b.	n. b.	0,1034
SVM82	n. b.	n. b.	0,1626
SVM83	n. b.	n. b.	0,1994
SVM84	n. b.	n. b.	0,2329
SVM85	n. b.	n. b.	0,3435
SVM86	n. b.	n. b.	0,6609
SVM87	n. b.	n. b.	0,1553
SVM88	n. b.	n. b.	0,1046
SVM89	n. b.	n. b.	0,2307
SVM90	n. b.	n. b.	0,2524
SVM91	n. b.	n. b.	0,2589
SVM92	n. b.	n. b.	0,2671
SVM93	n. b.	n. b.	0,2733
SVM94	n. b.	n. b.	0,2307
SVM95	n. b.	n. b.	0,2524
SVM96	n. b.	n. b.	0,3371
SVM97	n. b.	n. b.	0,4470
SVM98	n. b.	n. b.	0,5780
SVM99	n. b.	n. b.	0,2645

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A31: Zusammensetzung der SVB1.1 und SVB1.2

Parameter	Einheit	Gehalt/Wert SVB1.1	Gehalt/Wert SVB1.2
Zementgehalt CEM I 32,5R	kg/m ³	270	270
Flugaschegehalt		300	300
Fließmittel		2,9	3,3
Wassergehalt		165	165
Gesteinskörnungsgehalt 0/1		319,8	319,8
Gesteinskörnungsgehalt 0,25/1		271,8	271,8
Gesteinskörnungsgehalt 1/2		48	48
Gesteinskörnungsgehalt 2/4		175,9	383,7
Gesteinskörnungsgehalt 4/8		319,8	575,6
Gesteinskörnungsgehalt 8/16		463,6	-
Luftgehalt	%	1,5	1,5
w/z _{eq}	—	0,54	0,54

Tabelle A32: Zusammensetzung der SVB2.1 und SVB2.2

Parameter	Einheit	Gehalt/Wert SVB2.1	Gehalt/Wert SVB2.2
Zementgehalt CEM I 32,5R	kg/m ³	270	270
Flugaschegehalt		300	300
Fließmittel		1,2	1,5
Wassergehalt		200	200
Gesteinskörnungsgehalt 0/1		301,3	301,3
Gesteinskörnungsgehalt 0,25/1		256,1	256,1
Gesteinskörnungsgehalt 1/2		45,2	45,2
Gesteinskörnungsgehalt 2/4		165,7	361,6
Gesteinskörnungsgehalt 4/8		301,3	542,4
Gesteinskörnungsgehalt 8/16		437,0	-
Luftgehalt	%	1,5	1,5
w/z _{eq}	—	0,65	0,65

Tabelle A33: Zusammensetzung der SVB3.1 und SVB4.1

Ausgangsstoff/Parameter		Einheit	Gehalt/Wert SVB3.1	Gehalt/Wert SVB4.1
CEM I 32,5R		kg/m³	270	
Flugasche			180	
Stabilisierer			0,03	
Fließmittel			4,20	2,00
Zugabewasser			165	200
Gesteins- körnung	0/1		329	311
	0,25/1		260	246
	1/2		138	131
	2/4		294	279
	4/8		312	295
	8/16	398	377	
Luft		Vol.-%	1,5	
w/z _{eq}		—	0,54	0,65

Tabelle A34: Zusammensetzung der SVM1 und SVM2

Parameter	Einheit	Gehalt/Wert SVM1	Gehalt/Wert SVM2
Zementgehalt CEM I 32,5R	kg/m ³	425,02	411,42
Flugaschegehalt		472,25	457,14
Fließmittel		5,02	2,57
Wassergehalt		256,65	303,26
Gesteinskörnungsgehalt 0/1		503,35	459,19
Gesteinskörnungsgehalt 0,25/1		427,85	390,31
Gesteinskörnungsgehalt 1/2		75,50	68,88
Luftgehalt	%	2,36	2,29
w/z _{eq}	—	0,61	0,74

Tabelle A35: Zusammensetzung der SVM3 und SVM4

Parameter	Einheit	Gehalt/Wert SVM3	Gehalt/Wert SVM4
Zementgehalt CEM I 32,5R	kg/m ³	436,60	422,72
Flugaschegehalt		291,07	281,82
Stabilisierer		0,044	0,042
Fließmittel		4,67	2,16
Wassergehalt		262,52	311,13
Gesteinskörnungsgehalt 0/1		531,61	487,33
Gesteinskörnungsgehalt 0,25/1		419,69	384,73
Gesteinskörnungsgehalt 1/2		223,83	205,19
Luftgehalt	%	2,43	2,35
w/z _{eq}	—	0,61	0,74

Tabelle A36: Ergebnisse der Tribometerversuche

SVB./ SVM	Ober- fläche	Ge- schwin- digkeit	Füll- höhe	Be- zeich- nung	Mittel- wert (Werte ab 40 mm)	Stan- dard- abweich- ung (Werte ab 40 mm)	Korri- gierter Mittel- wert (Werte ab 40 mm)	neue Stan- dard- abweich- ung (Werte ab 40 mm)	erstes Maxi- mum (Verlauf aller Werte)
-	-	mm/s	mm	-	N	-	N	-	N
SVB1.2	g-b	20	300	G1	13,53	0,97	13,53	0,86	21,67
SVB2.2	g-b	20	300	G2	11,77	1,21	11,73	0,94	17,59
SVB3.1	g-b	20	300	G3	15,38	0,94	15,37	0,80	23,58
SVB4.1	g-b	20	300	G4	14,32	0,94	14,29	0,79	22,25
SVB1.2	g-b	20	500	G5	19,18	1,59	19,05	1,02	33,8
SVB1.2	g-nb	20	300	G6	11,88	0,79	11,83	0,62	19,51
SVB1.2	g-b	20	100	G7	8,68	0,55	8,68	0,55	15,95
SVB1.2	g-b	20	700	G8	19,71	1,03	19,67	0,90	39,43
SVB1.1	g-b	20	300	G9	12,23	0,90	12,16	0,66	20,57
SVB4.1	g-b	10	300	G10	10,79	0,69	10,79	0,61	13,34
SVB4.1	g-b	30	300	G11	9,93	0,73	9,93	0,64	24,76
SVB4.1	g-b	20	100	G12	8,56	0,59	8,54	0,50	14,05
SVB4.1	g-b	20	500	G13	14,11	0,65	14,08	0,55	18,35
SVB4.1	g-b	20	700	G14	18,47	0,81	18,50	0,69	28,41
SVB2.1	g-b	20	300	G15	10,59	0,79	10,55	0,56	20,28
SVB1.1	g-b	20	500	G16	14,29	0,74	14,27	0,63	25,00
SVB3.1	g-b	10	300	G17	12,48	0,43	12,49	0,36	16,61
SVB3.1	g-b	30	300	G18	12,16	0,71	12,15	0,63	24,63
SVB4.1	g-nb	20	300	G19	13,30	2,27	13,08	1,34	18,4
SVB2.2	g-b	10	300	G20	14,63	0,99	14,56	0,66	14,54
SVB2.2	g-b	30	300	G21	12,37	0,88	12,33	0,79	23,06
SVB1.1	g-b	20	500	G22	17,02	0,66	17,00	0,55	27,64
SVB1.2	g-b	20	500	G23	18,76	1,08	18,68	0,80	29,26
SVB2.2	g-b	20	500	G24	13,54	1,17	13,47	0,89	18,63
SVB2.1	g-b	20	500	G25	13,46	0,79	13,46	0,72	28,81
SVB3.1	g-b	20	500	G26	18,05	1,77	17,97	1,56	25,48
SVB4.1	g-b	20	500	G27	17,95	1,40	17,97	1,22	21,13

Tabelle A36: Fortsetzung

SVB / SVM	Oberfläche	Geschwindigkeit	Füllhöhe	Bezeichnung	Mittelwert (Werte ab 40 mm)	Standardabweichung (Werte ab 40 mm)	Korrigierter Mittelwert (Werte ab 40 mm)	neue Standardabweichung (Werte ab 40 mm)	erstes Maximum (Verlauf aller Werte)
-	-	mm/s	mm	-	N	-	N	-	N
SVM1	g-b	20	300	G28	9,50	0,67	9,49	0,60	15,54
SVB2.1	g-b	20	100	GB1	7,60	0,84	7,59	0,74	19,20
SVB2.2	g-b	20	100	GB2	11,84	0,97	11,82	0,85	31,32
SVB2.1	g-b	20	700	GB3	19,48	1,33	19,52	1,19	26,33
SVB2.2	g-b	20	700	GB4	22,25	2,13	22,17	1,75	43,20
SVB3.1	g-b	20	700	GB5	27,67	1,69	27,58	1,38	29,10
SVB1.1	g-b	20	700	GB6	29,04	1,63	29,07	1,38	39,75
SVM4	g-b	20	700	GB7	18,21	1,08	18,23	0,94	20,17
SVM3	g-b	20	700	GB8	20,33	1,24	20,33	1,12	23,52
SVM2	g-b	20	700	GB9	20,13	1,12	20,14	1,01	24,04
SVM1	g-b	20	700	GB10	23,91	0,97	23,92	0,86	29,69
SVB3.1	g-b	20	100	GB11	16,64	1,29	16,55	1,02	18,12
SVB1.1	g-b	20	100	GB12	17,17	1,63	17,16	1,47	16,80
SVM1	g-b	20	500	GB13	11,73	1,05	11,75	0,98	12,06
SVM1	g-b	20	300	GB14	13,78	1,00	13,78	0,89	14,82
SVM1	g-b	20	100	GB15	9,26	0,85	9,25	0,78	10,26
SVB2.1	g-b	20	300	GB16	23,12	1,72	23,06	1,49	23,52
SVM3	g-b	20	500	GB17	13,01	1,02	12,94	0,79	14,40
SVB2.1	g-b	20	300	GB18	19,78	1,05	19,78	0,92	22,06
SVM3	g-b	20	500	GB19	24,41	0,77	24,41	0,67	24,96
SVM3	g-b	20	300	GB20	13,07	1,21	13,00	0,95	13,80
SVM4	g-b	20	500	GB21	9,30	0,94	9,31	0,82	13,10
SVM4	g-b	20	300	GB22	8,45	0,71	8,47	0,60	9,24
SVM2	g-b	20	300	GB23	7,54	0,82	7,55	0,75	9,60
SVM2	g-b	20	100	GB24	6,17	0,89	6,17	0,80	7,32
SVM4	g-b	20	100	GB25	9,16	0,85	9,17	0,73	9,48
SVM3	g-b	20	100	GB26	5,52	0,93	5,49	0,79	6,78
SVB2.2	r-b	20	300	R1	32,95	3,28	32,83	2,89	102,38

Tabelle A36: Fortsetzung

SVB / SVM	Oberfläche	Geschwindigkeit	Füllhöhe	Bezeichnung	Mittelwert (Werte ab 40 mm)	Standardabweichung (Werte ab 40 mm)	Korrigierter Mittelwert (Werte ab 40 mm)	neue Standardabweichung (Werte ab 40 mm)	erstes Maximum (Verlauf aller Werte)
-	-	mm/s	mm	-	N	-	N	-	N
SVB3.1	r-b	20	300	R2	35,27	3,69	35,12	3,28	142,26
SVB4.1	r-b	20	300	R3	35,52	4,18	35,48	3,90	80,03
SVB1.2	r-b	20	300	R4	32,39	2,89	32,21	2,44	123,91
SVB1.2	r-b	20	100	R5	29,95	5,88	29,37	3,34	120,71
SVB1.2	r-b	20	700	R6	42,19	3,67	42,02	3,14	225,69
SVB1.2	r-b	20	500	R7	46,94	3,92	46,75	3,45	168,49
SVB1.1	r-b	20	300	R8	25,43	2,28	25,34	2,01	179,41
SVB2.1	r-b	20	300	R9	20,57	2,67	20,40	2,27	101,26
SVB4.1	r-b	10	300	R10	36,16	3,25	36,03	2,86	82,47
SVB4.1	r-b	30	300	R11	32,82	3,90	32,65	3,35	108,03
SVB4.1	r-b	20	500	R12	39,90	5,33	39,61	4,64	117,93
SVB1.2	r-b	10	300	R13	28,59	6,52	27,82	4,25	216,61
SVB1.2	r-b	30	300	R14	47,82	9,37	47,09	7,58	229,06
SVB3.1	r-b	10	300	R15	38,82	2,94	38,68	2,47	94,26
SVB3.1	r-b	30	300	R16	39,30	12,28	37,84	7,49	128,8
SVB2.1	r-b	20	300	R17	20,83	3,26	20,73	2,99	105,36
SVB1.1	r-b	20	700	RB1	53,51	8,85	52,78	7,25	170,10
SVB1.1	r-b	20	500	RB2	47,33	8,53	46,42	5,24	147,72
SVB2.1	r-b	20	500	RB3	24,44	4,73	25,23	4,20	67,92
SVB3.1	r-b	20	500	RB4	56,46	4,28	56,34	3,72	138,24
SVB1.1	r-b	20	100	RB5	22,53	3,57	22,59	2,76	62,82
SVB2.2	r-b	20	500	RB6	38,31	17,47	36,66	13,50	84,87
SVB2.2	r-b	20	700	RB7	31,82	5,74	31,30	4,11	86,37
SVB2.1	r-b	20	700	RB8	28,77	5,45	28,43	4,53	90,80
SVB2.2	r-b	20	100	RB9	33,21	23,62	30,53	15,01	47,94
SVB2.1	r-b	20	100	RB10	12,21	1,73	12,23	1,54	45,72
SVB4.1	r-b	20	700	RB11	59,67	22,40	57,24	15,35	88,50
SVB3.1	r-b	20	700	RB12	72,81	7,52	72,57	6,53	131,91
SVB3.1	r-b	20	100	RB13	23,57	4,13	23,31	3,22	44,10

Tabelle A36: Fortsetzung

SVB / SVM	Oberfläche	Geschwindigkeit	Füllhöhe	Bezeichnung	Mittelwert (Werte ab 40 mm)	Standardabweichung (Werte ab 40 mm)	Korrigierter Mittelwert (Werte ab 40 mm)	neue Standardabweichung (Werte ab 40 mm)	erstes Maximum (Verlauf aller Werte)
-	-	mm/s	mm	-	N	-	N	-	N
SVB4.1	r-b	20	100	RB14	24,84	7,01	24,47	6,25	37,74
SVM4	r-b	20	500	RB15	16,87	2,62	16,76	2,30	62,16
SVM4	r-b	20	300	RB16	10,74	2,60	10,68	2,39	30,63
SVM4	r-b	20	700	RB17	21,25	5,17	21,11	4,85	52,74
SVM3	r-b	20	300	RB18	13,87	2,07	13,83	1,87	96,30
SVM4	r-b	20	100	RB19	6,82	1,70	6,76	1,46	41,64
SVM3	r-b	20	700	RB20	27,72	4,93	27,56	4,55	92,22
SVM3	r-b	20	500	RB21	17,98	1,72	17,94	1,53	64,58
SVM3	r-b	20	100	RB22	9,33	1,74	9,30	1,51	48,51
SVM2	r-b	20	700	RB23	22,03	2,87	21,94	2,53	76,47
SVM2	r-b	20	500	RB24	13,60	1,48	13,57	1,30	89,88
SVM2	r-b	20	300	RB25	10,54	1,68	10,49	1,46	48,12
SVM1	r-b	20	700	RB26	32,12	3,98	32,26	3,19	135,03
SVM1	r-b	20	500	RB27	23,24	3,23	23,34	2,60	150,54
SVM1	r-b	20	300	RB28	16,05	2,99	16,08	2,50	115,44
SVM2	r-b	20	100	RB29	6,66	1,75	6,58	1,46	44,10
SVM1	r-b	20	100	RB30	13,53	2,65	13,64	2,20	76,80
SVB1.2	g-b	30	300	TG5	14,64	0,68	14,64	0,60	26,17
SVB1.2	g-b	10	300	TG6	11,87	0,59	11,86	0,45	18,82

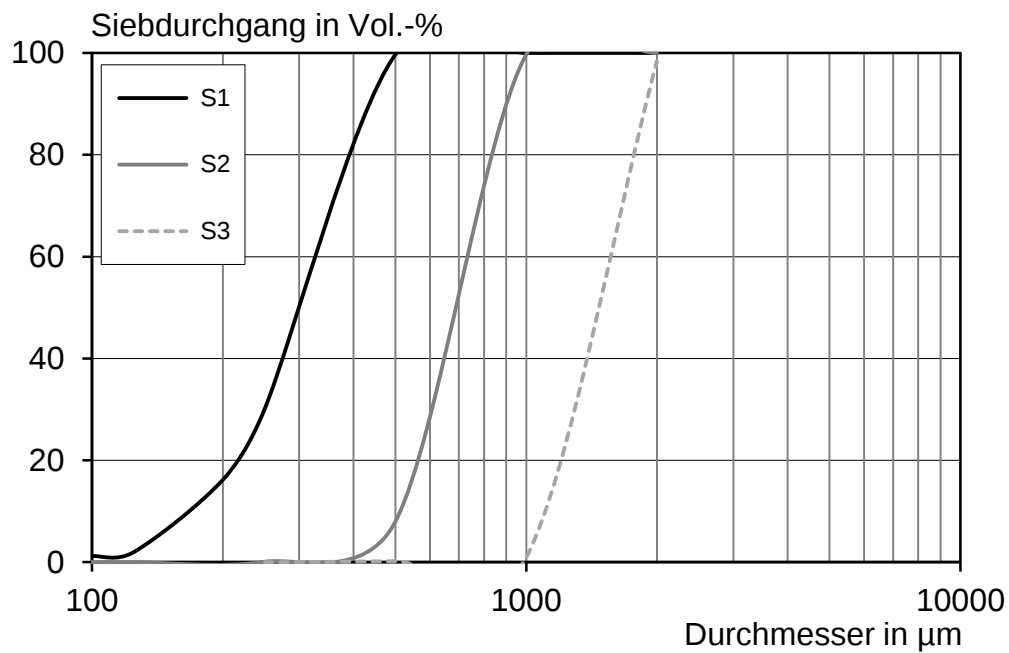


Bild B1: Sieblinien der Sande S1 – S3 ermittelt durch Maschinensiebung

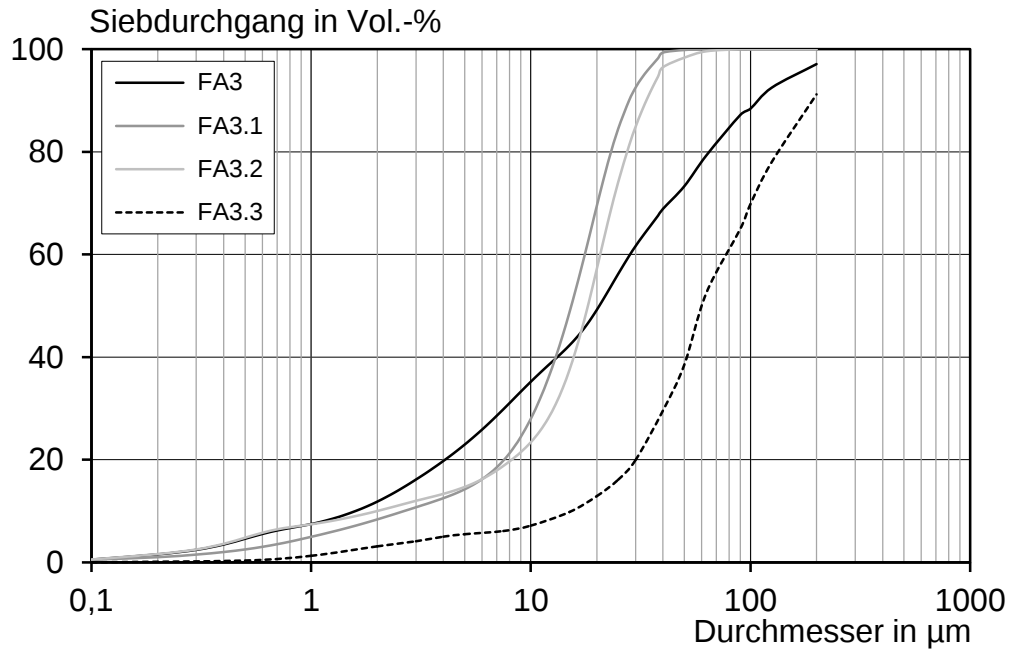


Bild B2: Modellsiebdiagramm der fraktionierten Flugaschen FA3.1, FA3.2 und FA3.3 im Vergleich mit der Flugasche FA3

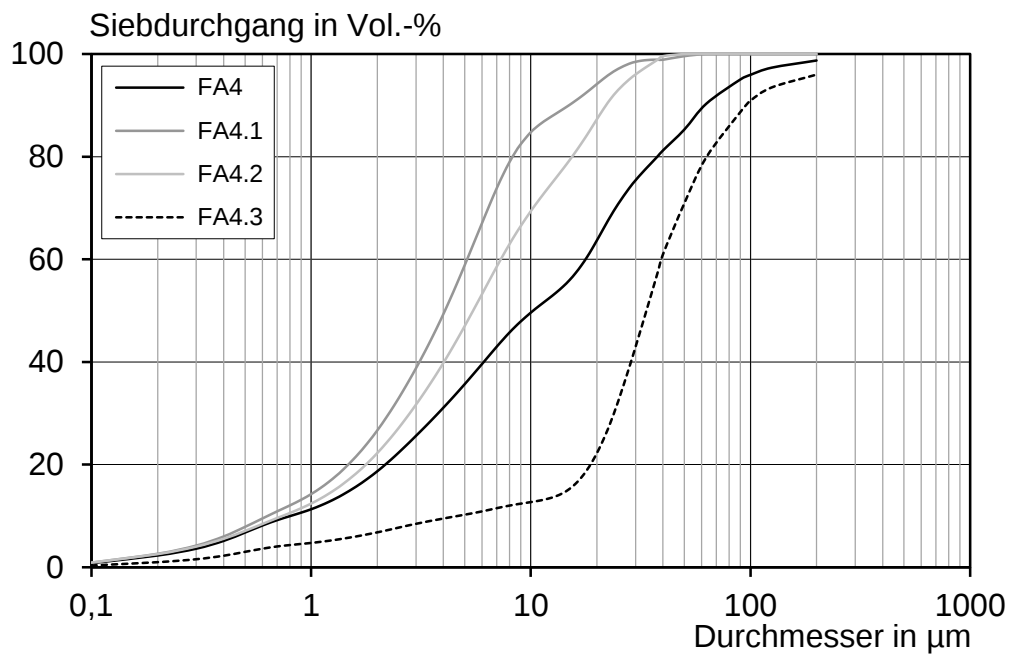


Bild B3: Modellsieblinien der fraktionierten Flugaschen FA4.1, FA4.2 und FA4.3 im Vergleich mit der Flugasche FA4

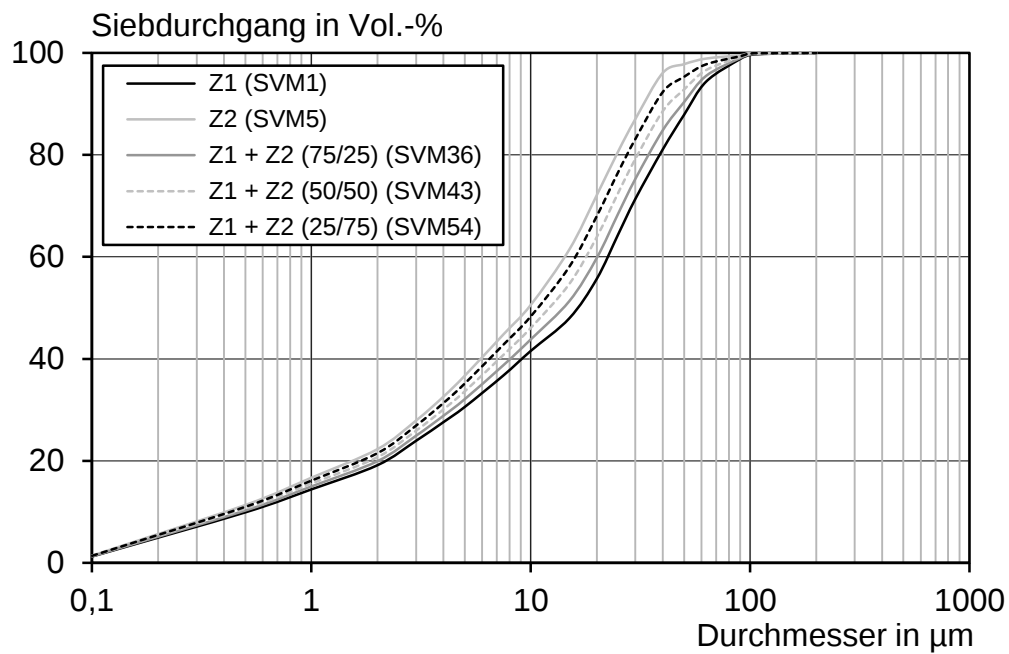


Bild B4: Zementsieblinien der SVM1, SVM5, SVM36, SVM43 und SVM54

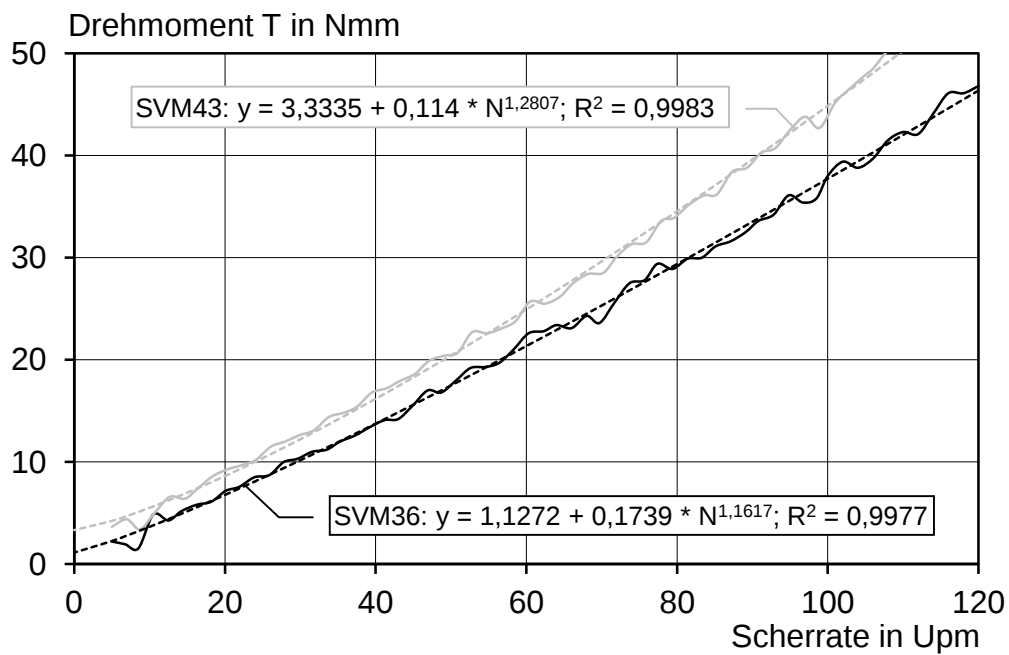


Bild B5: Fließkurven aus den Messwerten und aus der polynomischen Regression (SVM36 und SVM43)

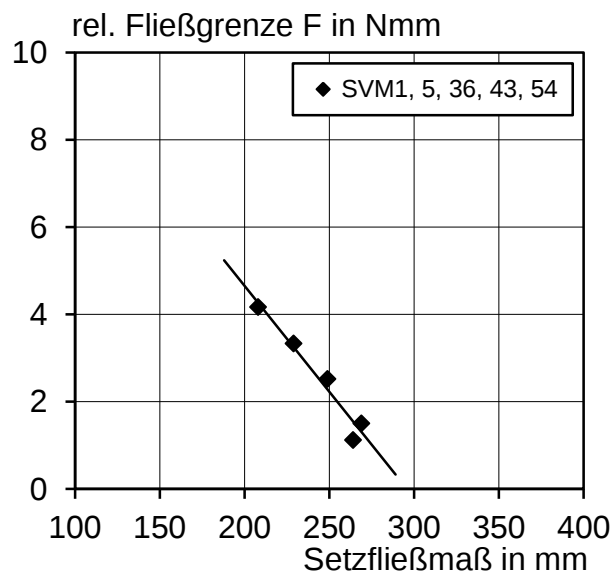


Bild B6: Vergleich der relativen Fließgrenze mit dem Setzfließmaß (SVM1, SVM5, SVM36, SVM43 und SVM54)

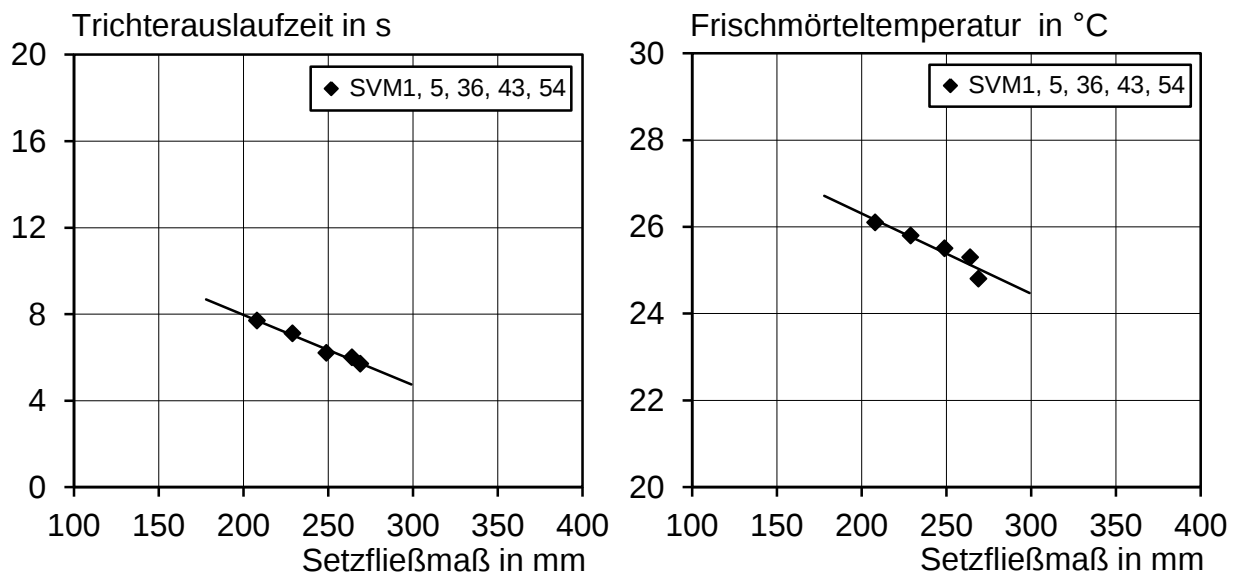


Bild B7: Vergleich der Trichterauslaufzeit bzw. der Frischmörteltemperatur mit dem Setzfließmaß der SVM1, SVM5, SVM36, SVM43, SVM54

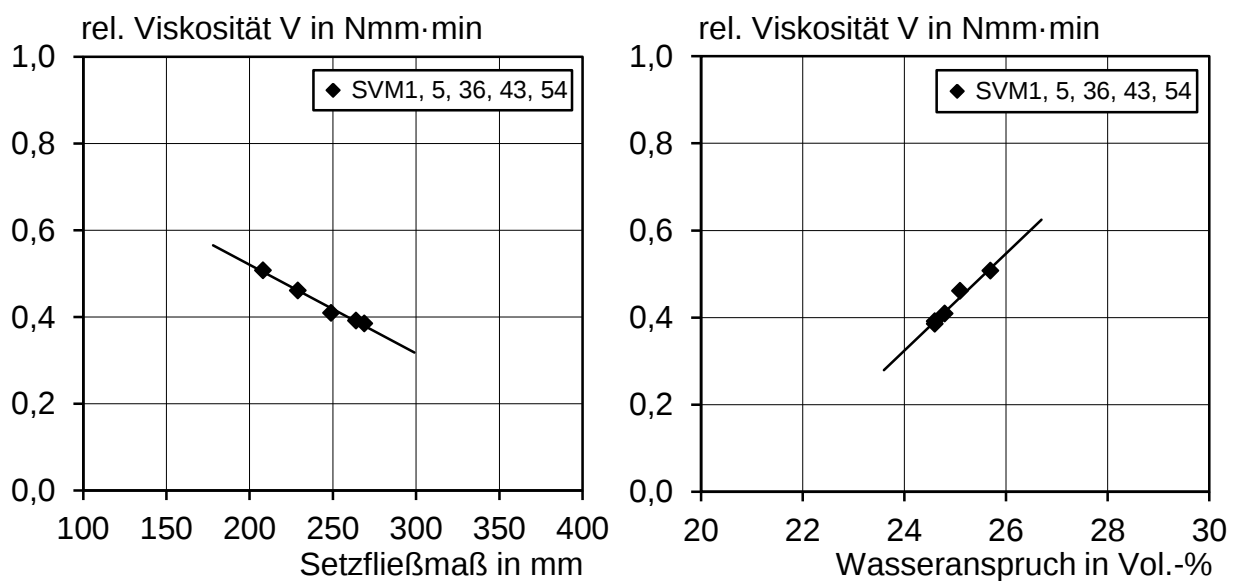


Bild B8: Vergleich der relativen Viskosität V mit dem Setzfließmaß bzw. dem Wasseranspruch der SVM1, SVM5, SVM36, SVM43, SVM54

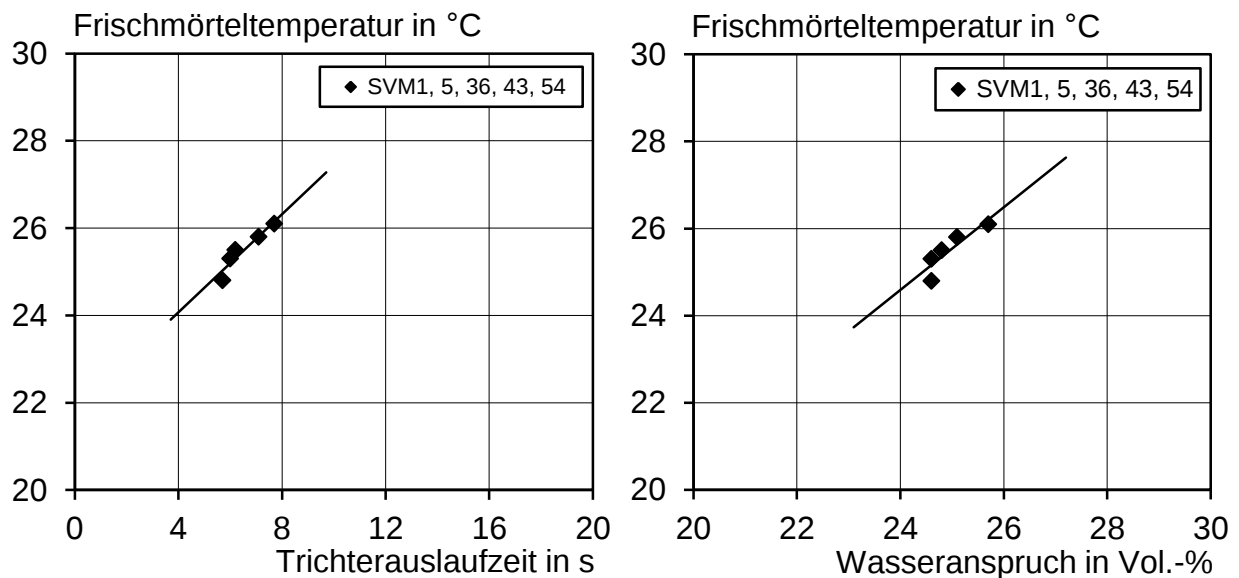


Bild B9: Vergleich der Frischmörteltemperatur mit der Trichterauslaufzeit bzw. dem Wasseranspruch der SVM1, SVM5, SVM36, SVM43, SVM54

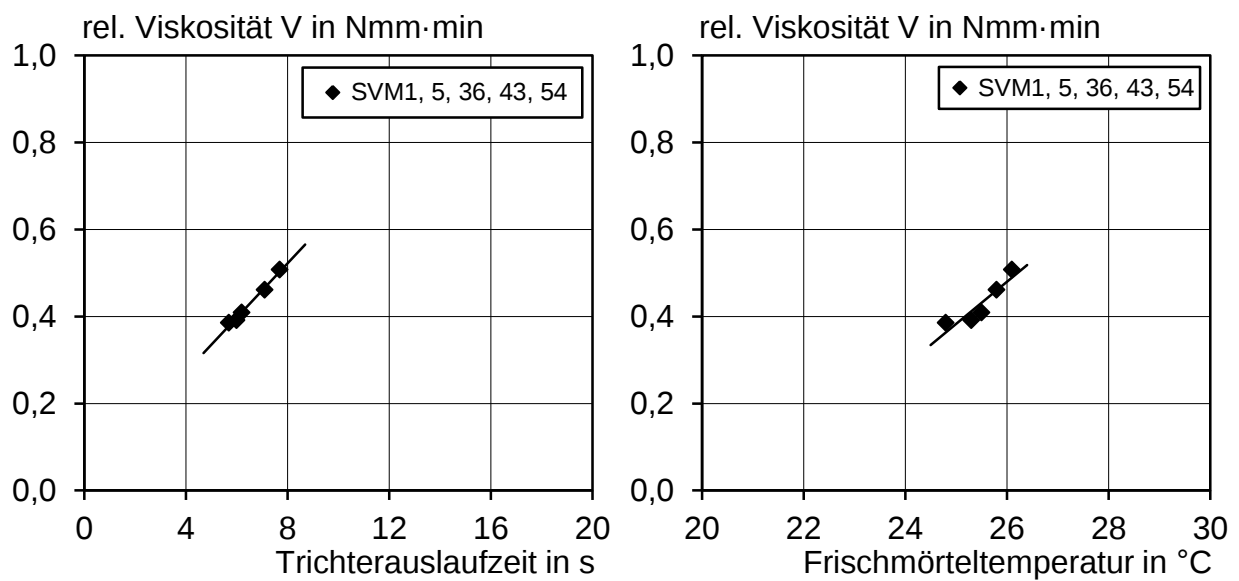


Bild B10: Vergleich der relativen Viskosität mit der Trichterauslaufzeit bzw. der Frischmörteltemperatur (SVM1, SVM5, SVM36, SVM43 und SVM54)

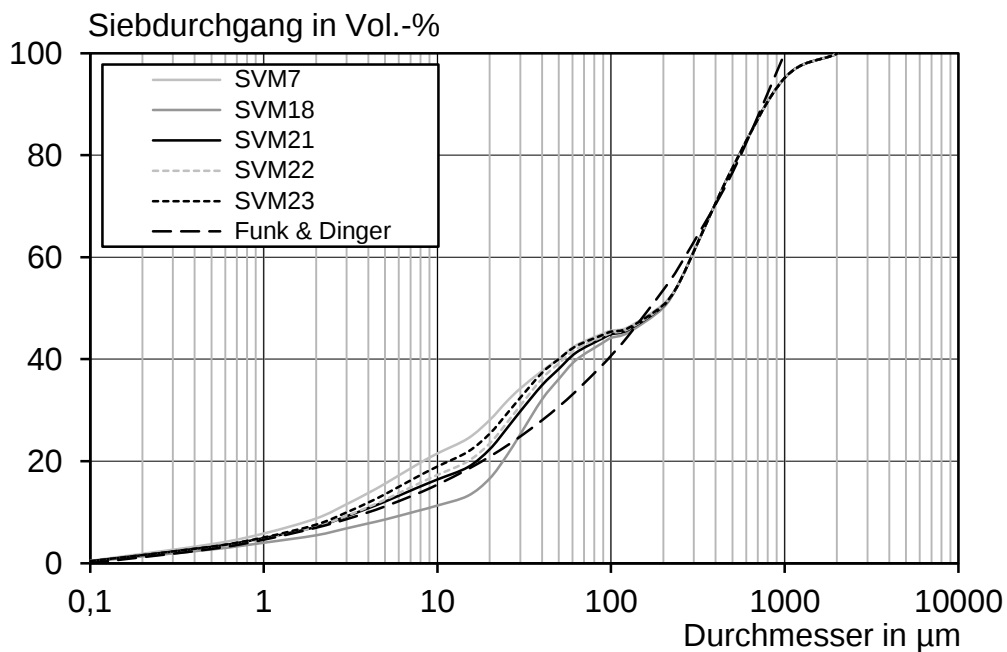


Bild B11: Sieblinien der SVM7, SVM18, SVM21, SVM22 und SVM23 im Vergleich mit der Idealsieblinie nach Funk & Dinger

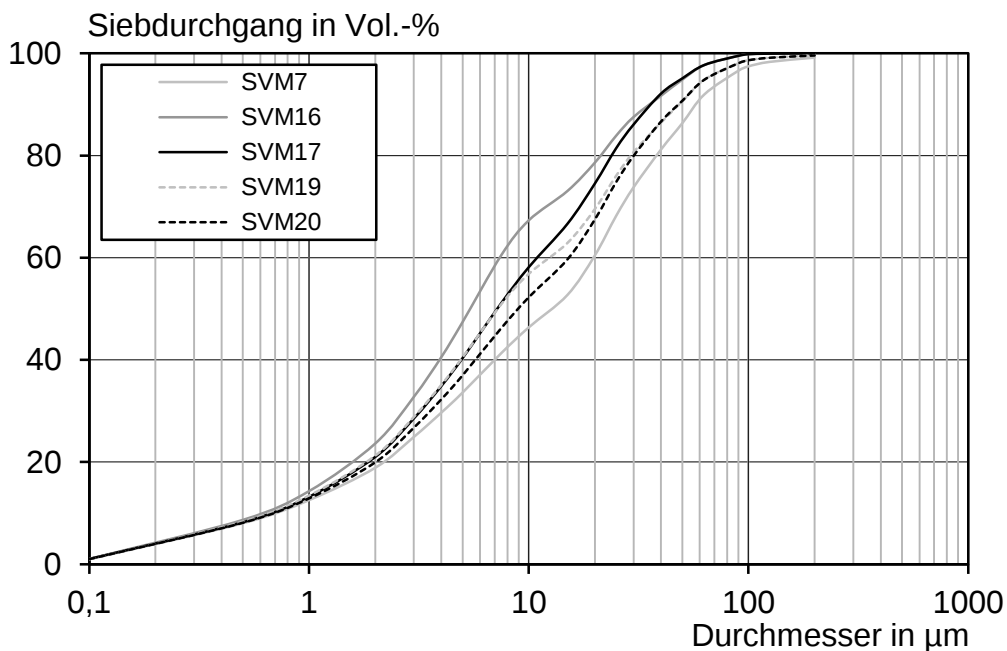


Bild B12: Zement- und Flugaschesieblinien der SVM7, SVM16, SVM17, SVM19 und SVM20

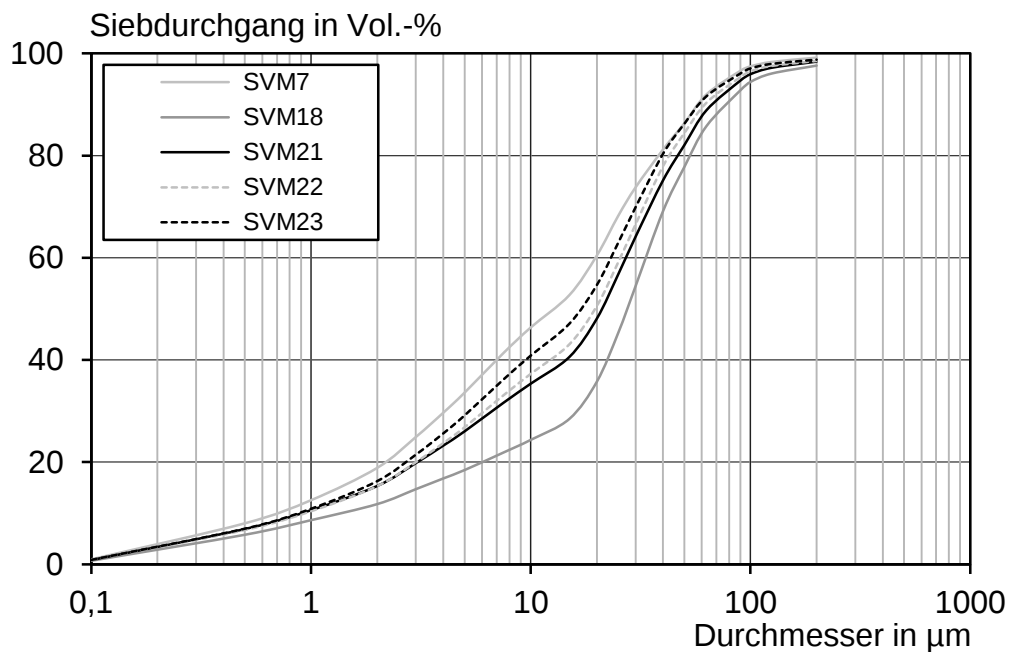


Bild B13: Zement- und Flugaschesieblinien der SVM7, SVM18, SVM21, SVM22 und SVM23

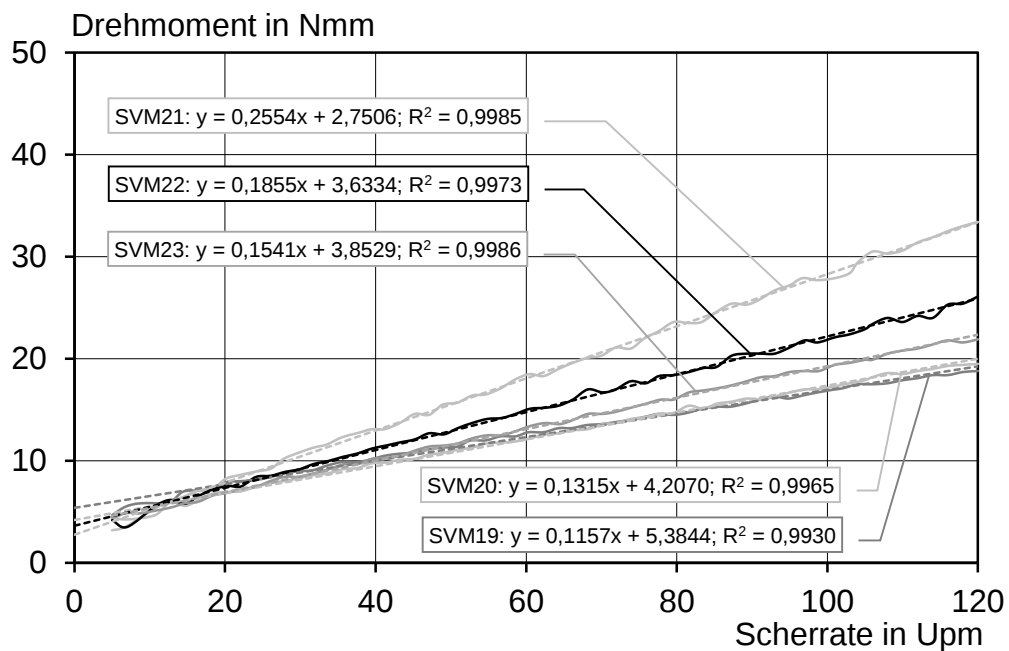


Bild B14: Fließkurven aus den Messwerten und aus der linearen Regression der SVM19, SVM20, SVM21, SVM22 und SVM23

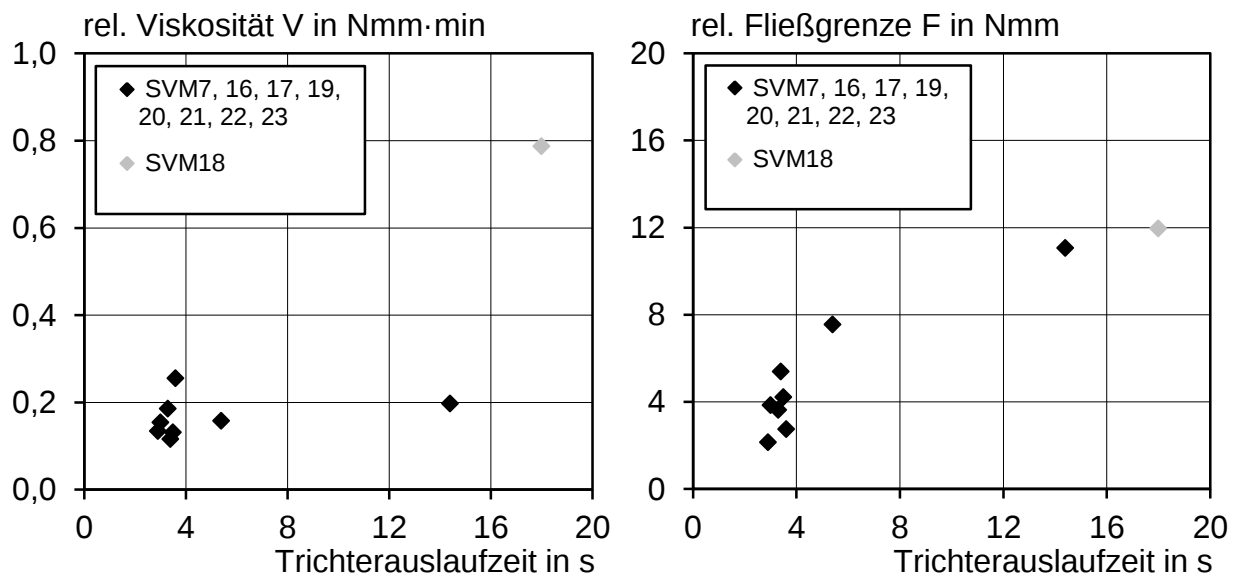


Bild B15: Vergleich der relativen Viskosität bzw. der relativen Fließgrenze mit der Trichterauslaufzeit der SVM7 und SVM16 bis SVM23

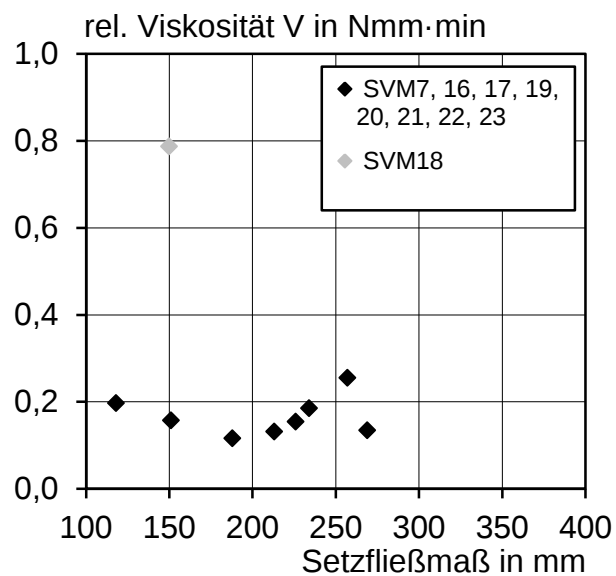


Bild B16: Vergleich der relativen Viskosität mit dem Setzfließmaß (SVM7 und SVM16 bis SVM23)

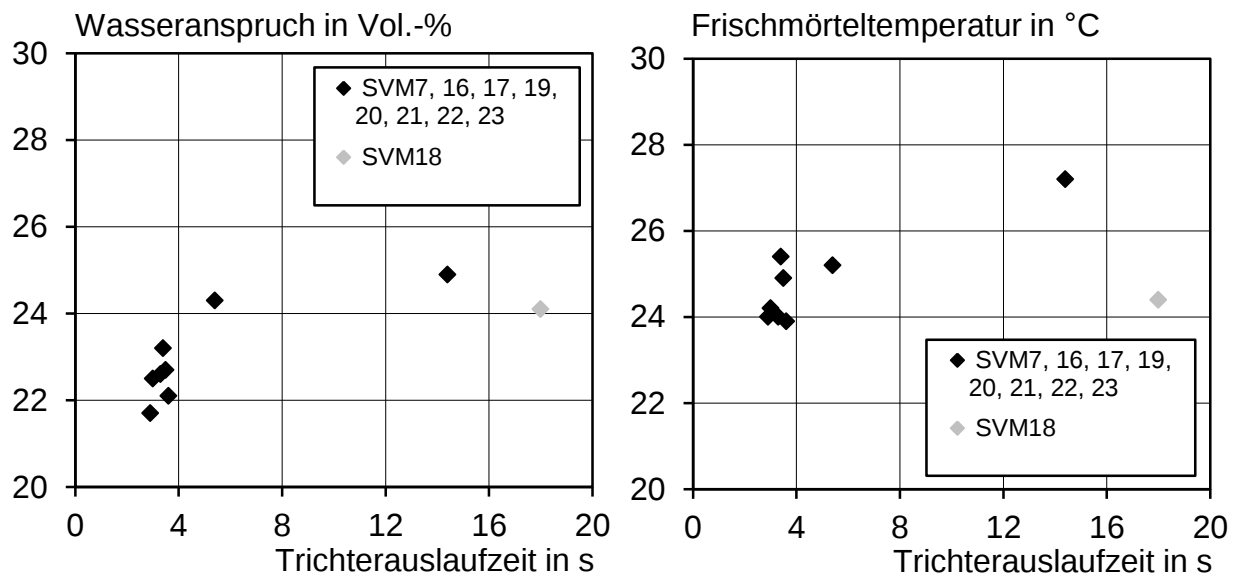


Bild B17: Vergleich des Wasseranspruchs bzw. der Frischmörteltemperatur mit der Trichterauslaufzeit (SVM7 und SVM16 bis SVM23)

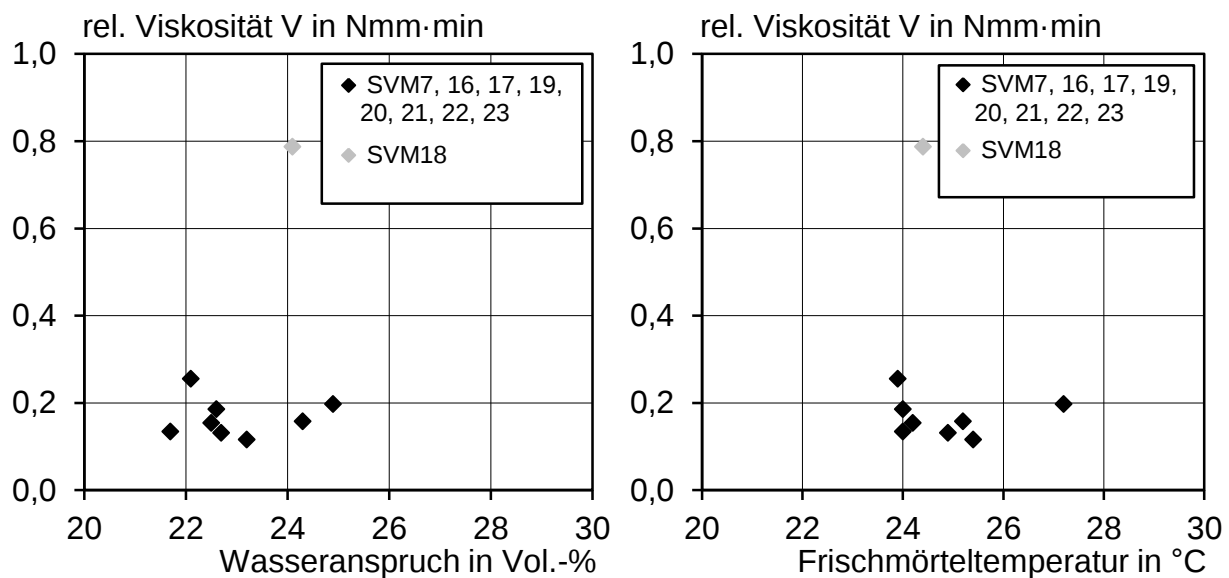


Bild B18: Vergleich der relativen Viskosität mit dem Wasseranspruch bzw. der Frischmörteltemperatur (SVM7 und SVM16 bis SVM23)

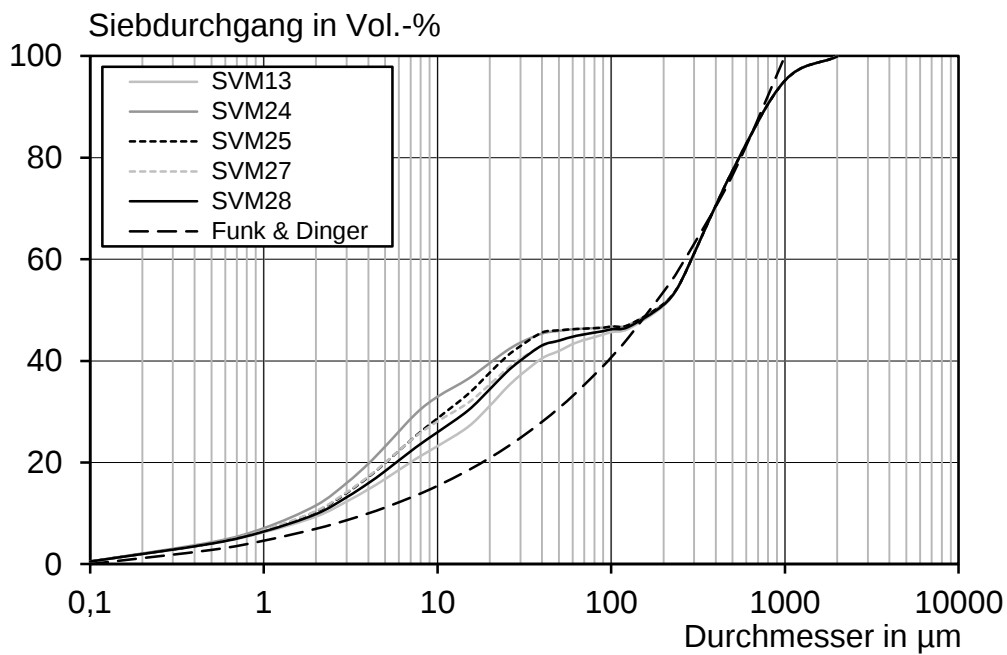


Bild B19: Sieblinien der SVM13, SVM24, SVM25, SVM27 und SVM28 im Vergleich mit der Idealsieblinie nach Funk & Dinger

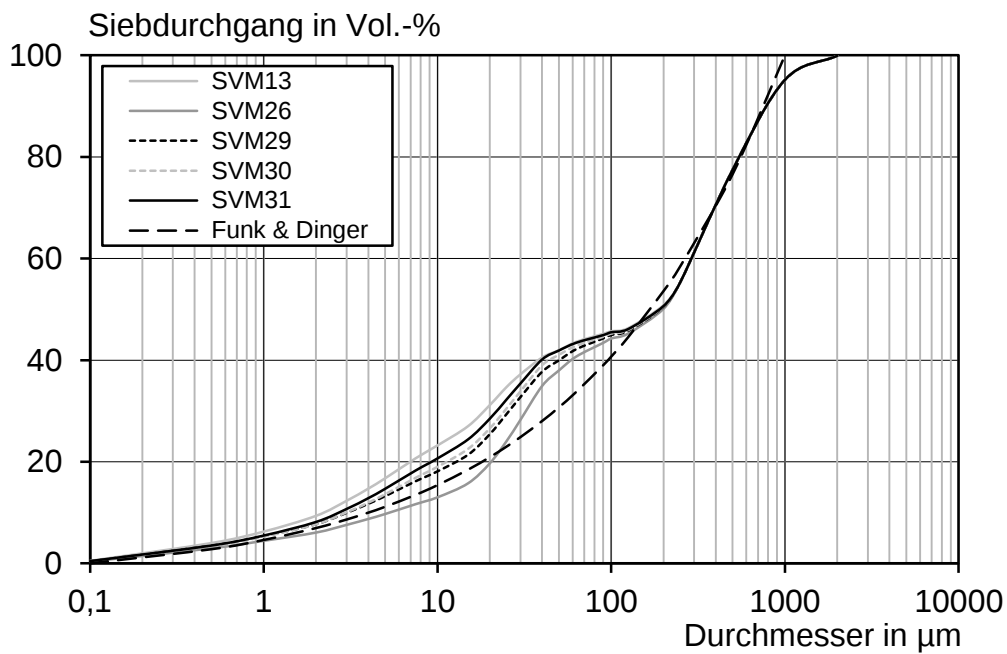


Bild B20: Sieblinien der SVM13, SVM26, SVM29, SVM30 und SVM31 im Vergleich mit der Idealsieblinie nach Funk & Dinger

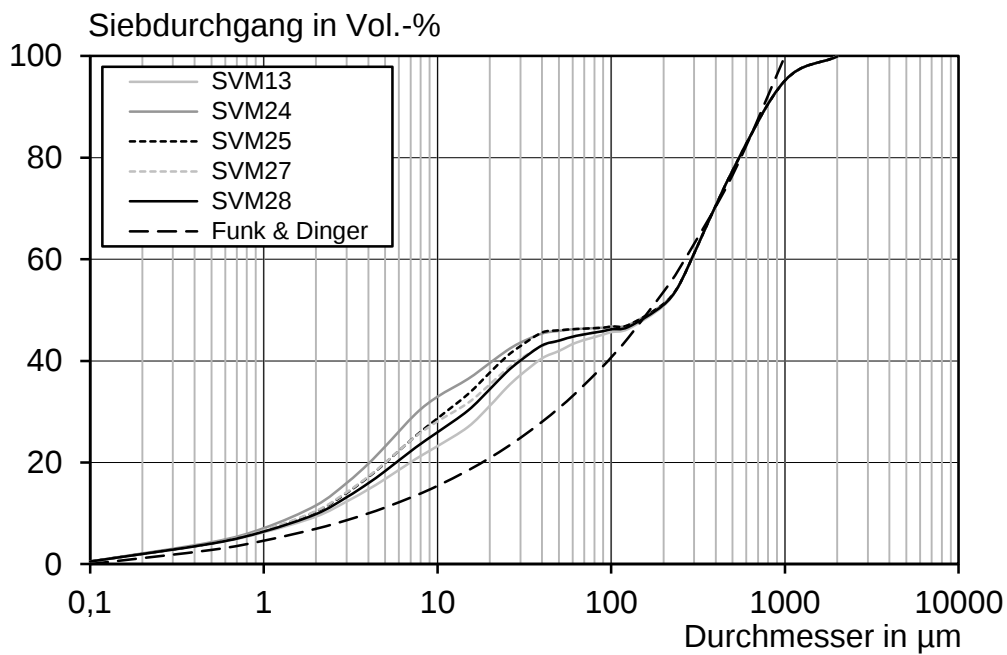


Bild B21: Zement- und Flugaschesieblinien der SVM13, SVM24, SVM25, SVM27 und SVM28

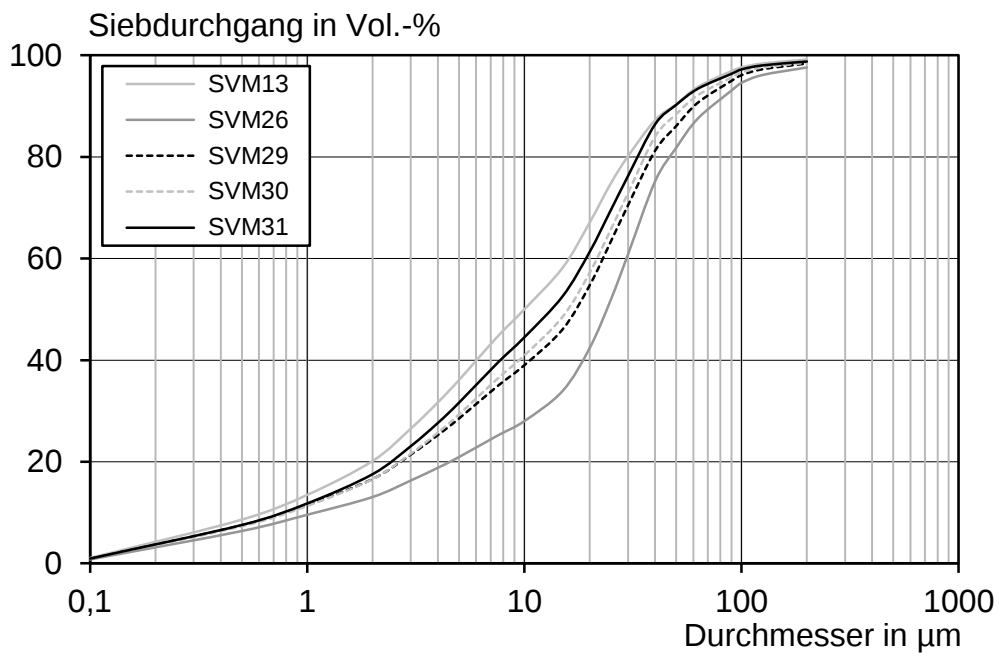


Bild B22: Zement- und Flugaschesieblinien der SVM13, SVM26, SVM29, SVM30 und SVM31

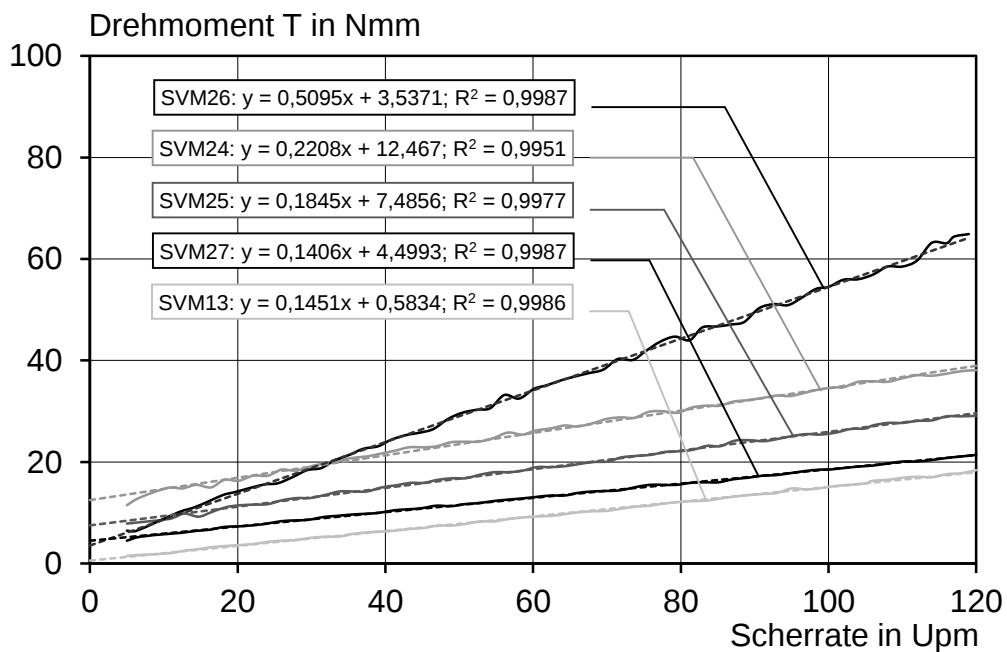


Bild B23: Fließkurven aus den Messwerten und aus der linearen Regression (SVM13, SVM24, SVM25, SVM26 und SVM27)

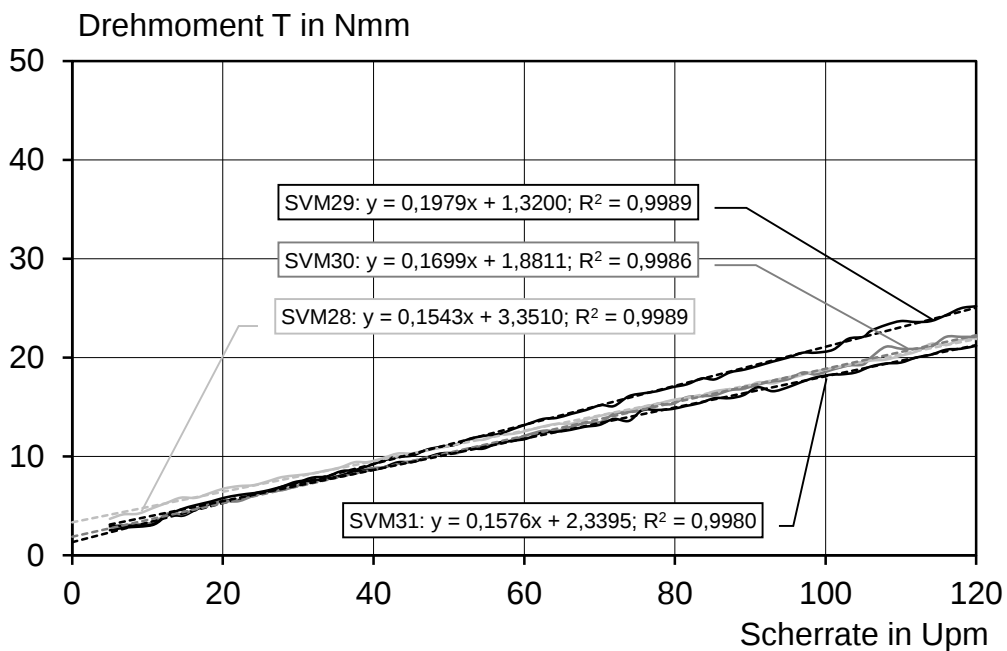


Bild B24: Fließkurven aus den Messwerten und aus der linearen Regression (SVM28, SVM29, SVM30 und SVM31)

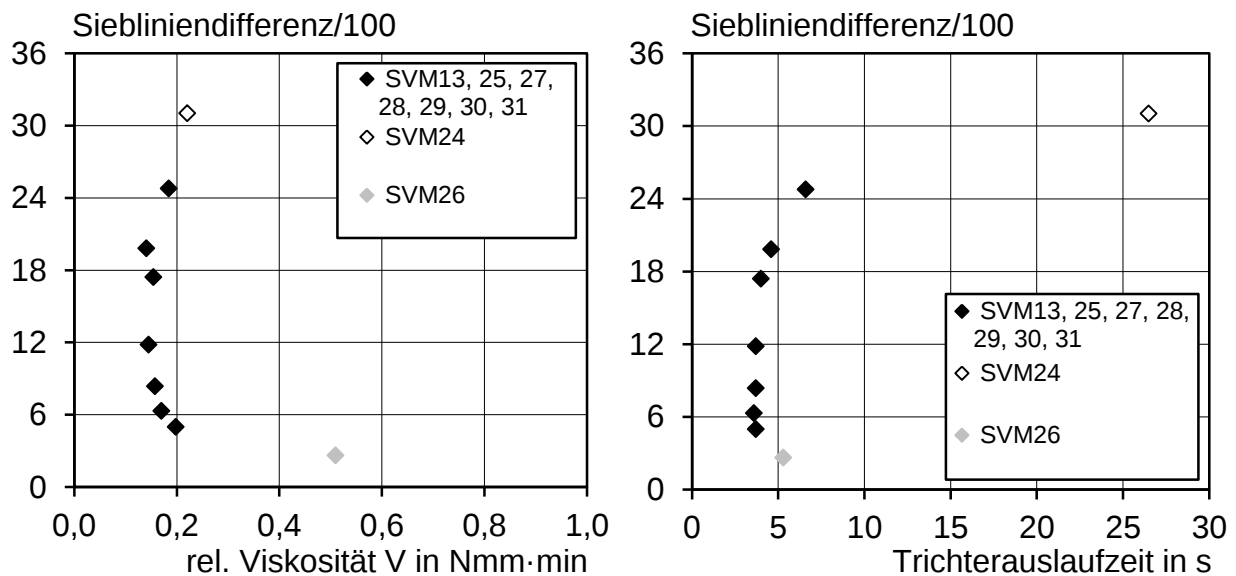


Bild B25: Vergleich der Siebliniendifferenz mit der relativen Viskosität bzw. der Trichterauslaufzeit (SVM13, SVM24 bis SVM31)

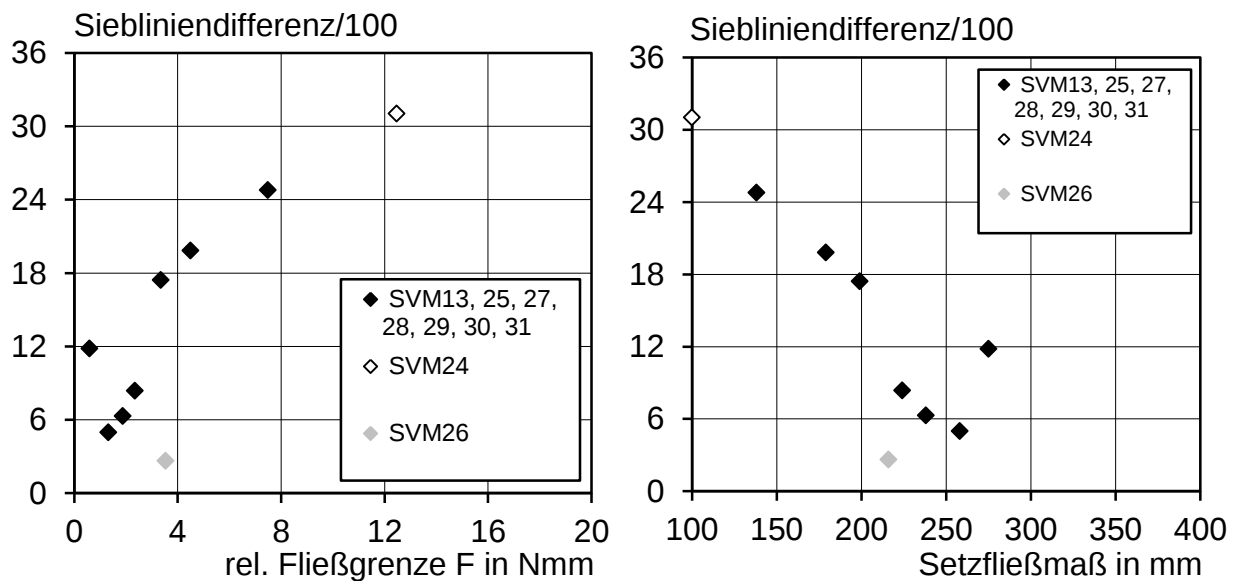


Bild B26: Vergleich der Siebliniendifferenz mit der relativen Fließgrenze bzw. dem Setzfließmaß (SVM13, SVM24 bis SVM31)

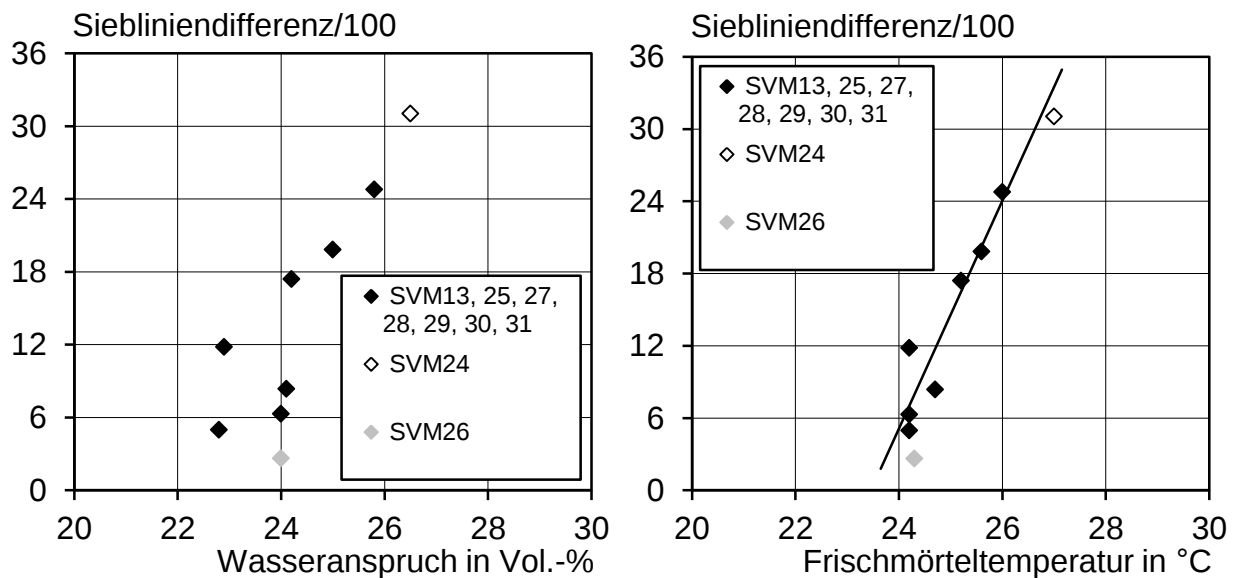


Bild B27: Vergleich der Siebliniendifferenz mit dem Wasseranspruch bzw. der Frischmörteltemperatur (SVM13, SVM25 bis SVM31)

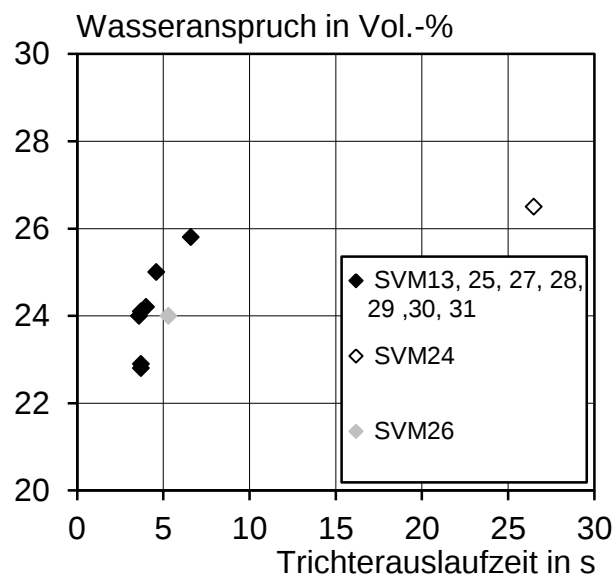


Bild B28: Vergleich des Wasseranspruchs mit der Trichterauslaufzeit (SVM13, SVM25 bis SVM31)

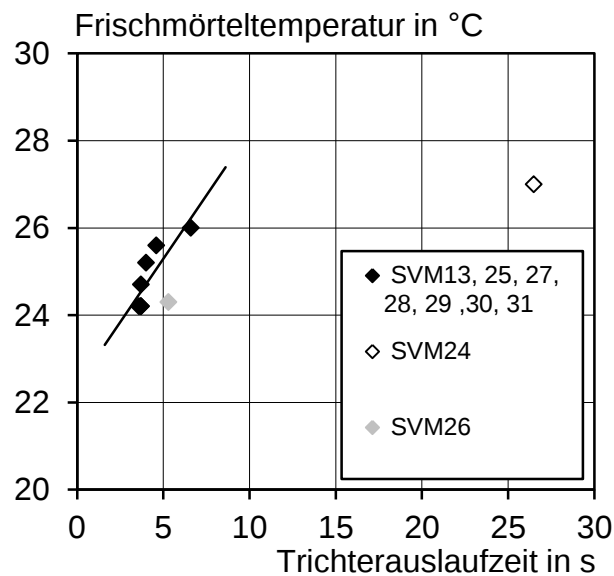


Bild B29: Vergleich der Frischmörteltemperatur mit der Trichterauslaufzeit (SVM13, SVM24 bis SVM31)

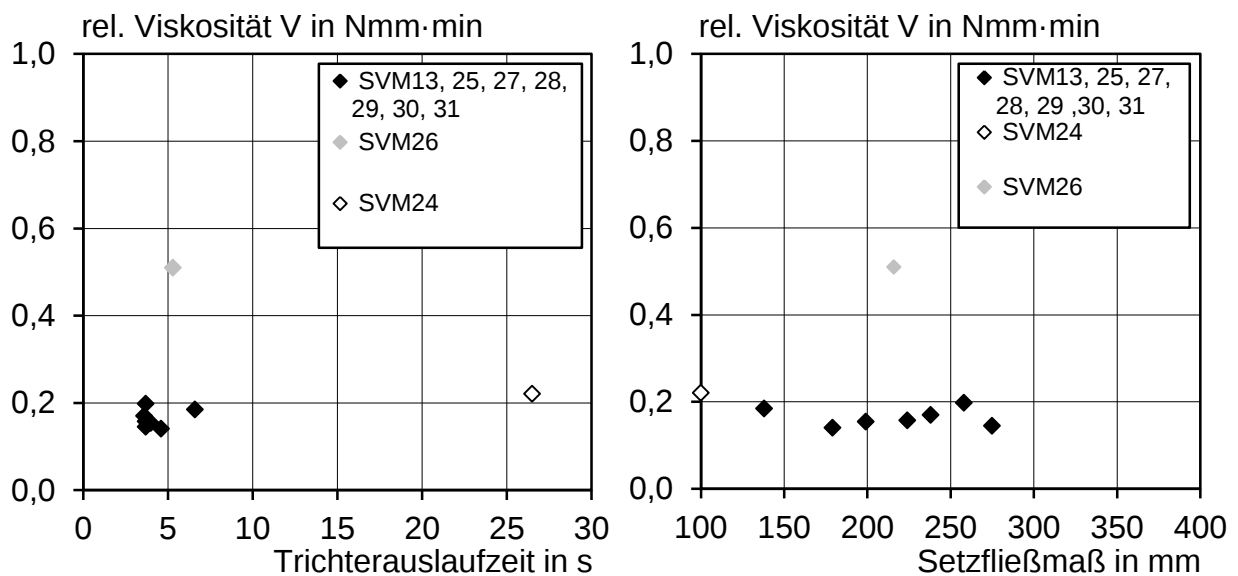


Bild B30: Vergleich der relativen Viskosität mit der Trichterauslaufzeit bzw. dem Setzfließmaß (SVM13, SVM24 bis SVM31)

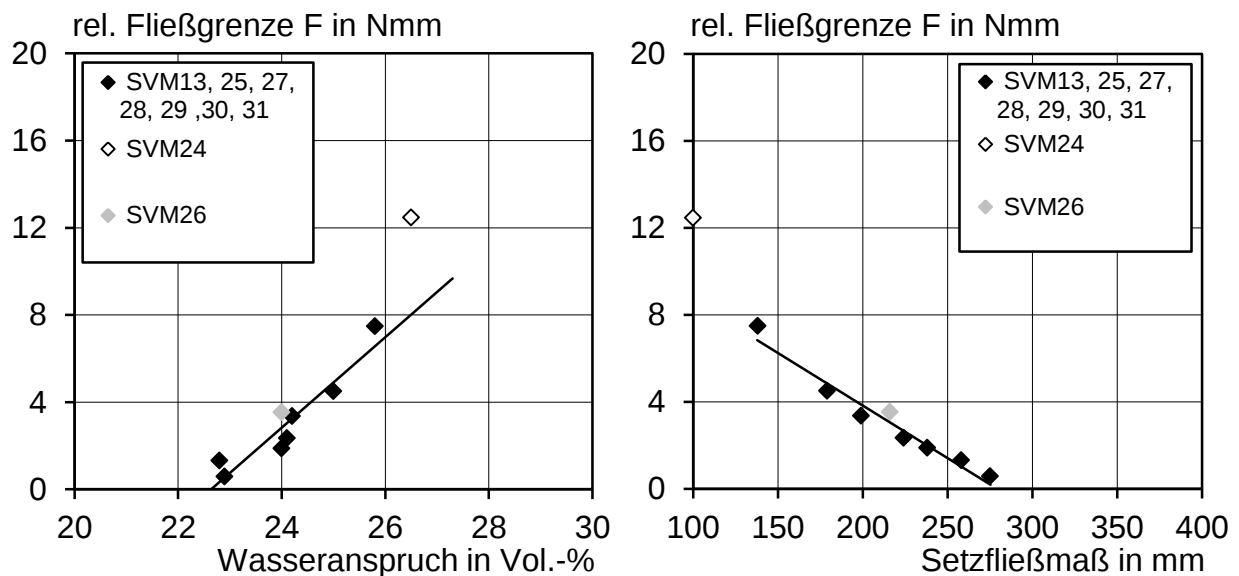


Bild B31: Vergleich der relativen Fließgrenze mit dem Wasseranspruch bzw. dem Setzfließmaß (SVM13, SVM25 bis SVM31)

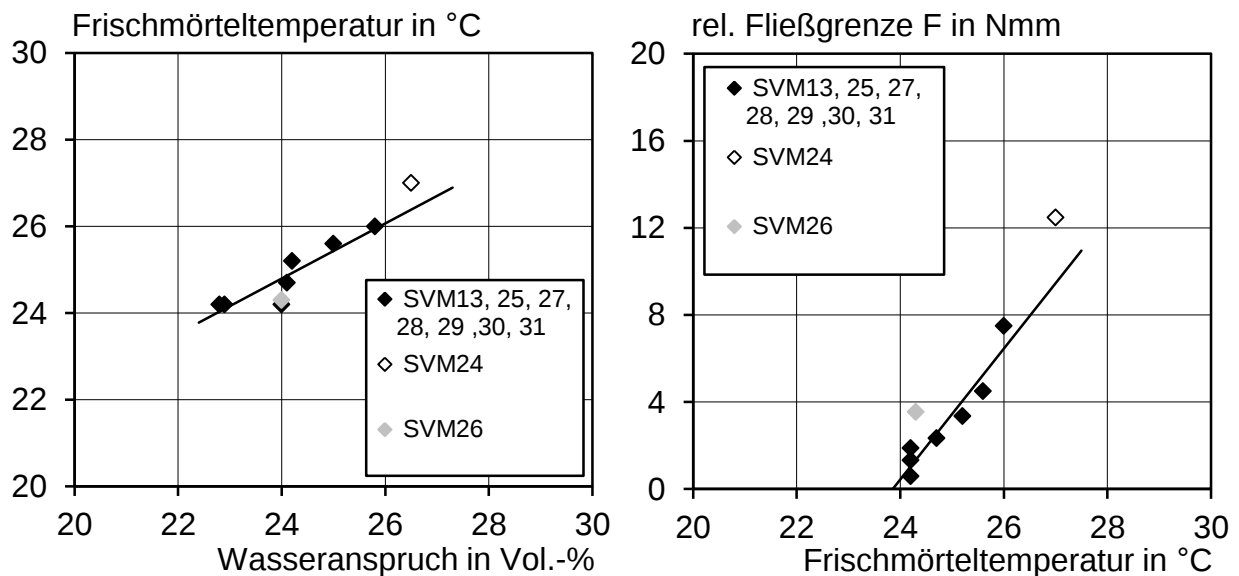


Bild B32: Vergleich der Frischmörteltemperatur mit dem Wasseranspruch bzw. der relativen Fließgrenze mit der Frischmörteltemperatur (SVM13, SVM25 bis SVM31)

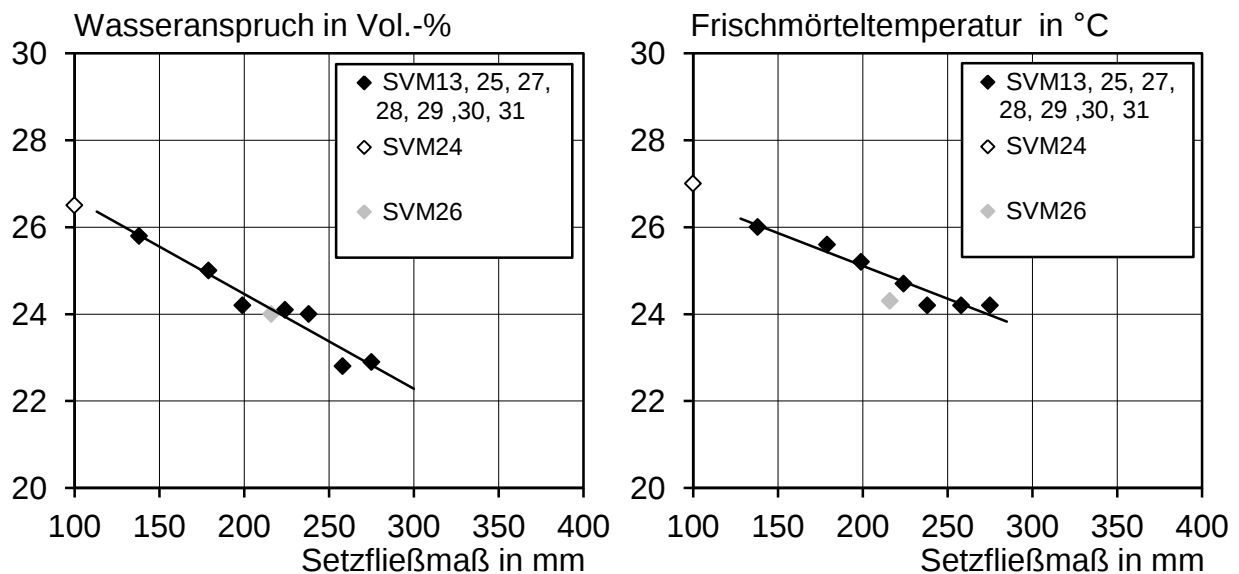


Bild B33: Vergleich des Wasseranspruchs bzw. der Frischmörteltemperatur mit dem Setzfließmaß (SVM13, SVM25 bis SVM31)

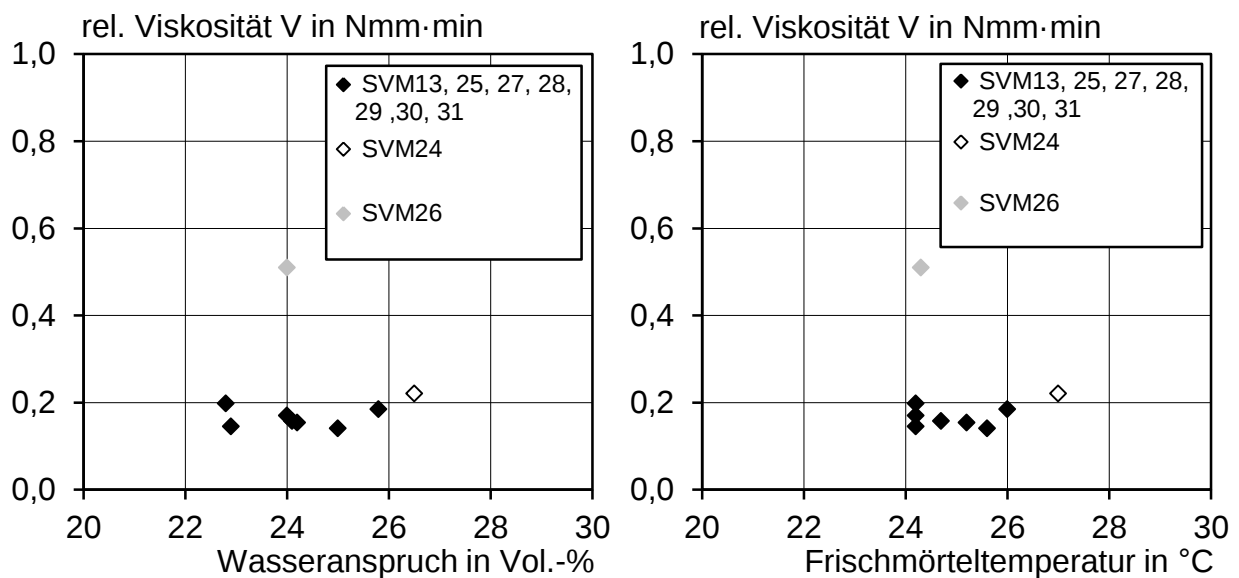


Bild B34: Vergleich der relativen Viskosität mit dem Wasseranspruch bzw. der Frischmörteltemperatur (SVM13, SVM24 bis SVM31)

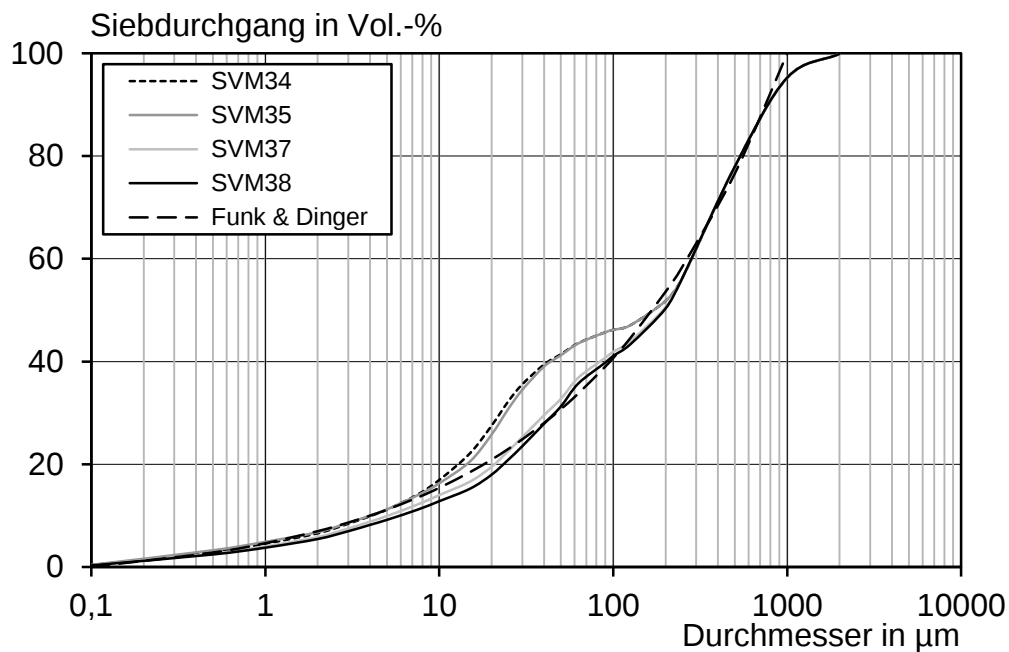


Bild B35: Sieblinien der SVM34, SVM35, SVM37 und SVM38 im Vergleich mit der Ideal-sieblinie nach Funk & Dinger

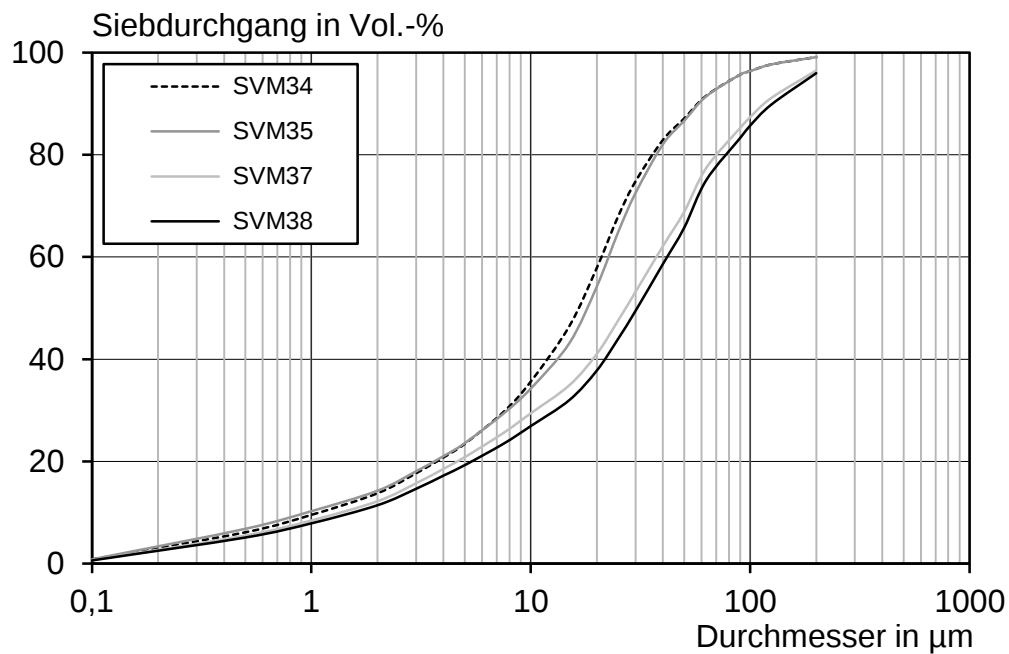


Bild B36: Zement- und Flugaschesieblinien der SVM9, SVM32 und SVM33

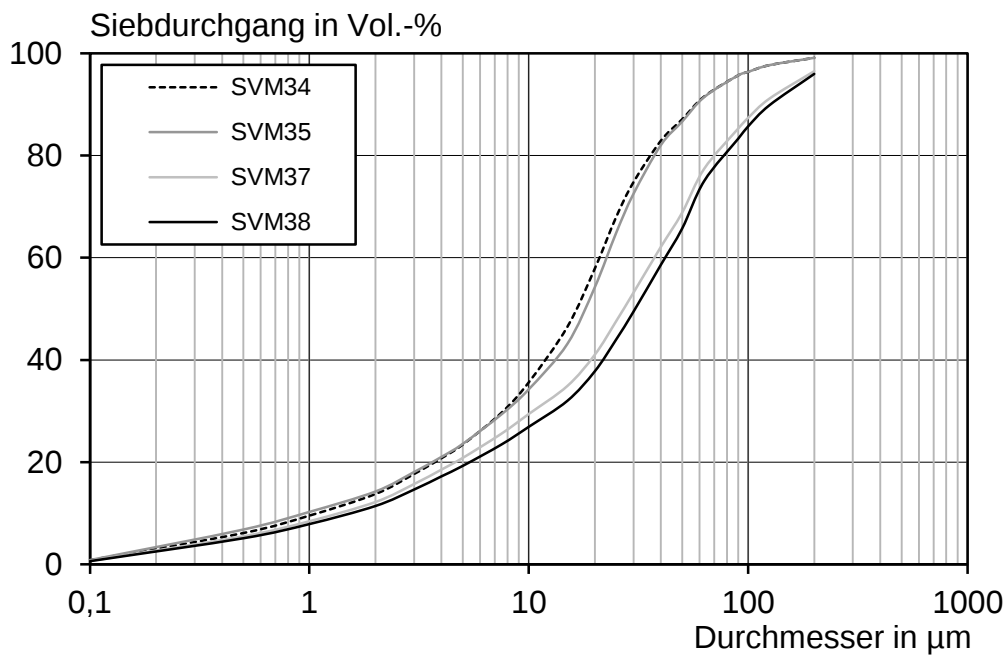


Bild B37: Zement- und Flugaschesieblinien der SVM34, SVM35, SVM37 und SVM38

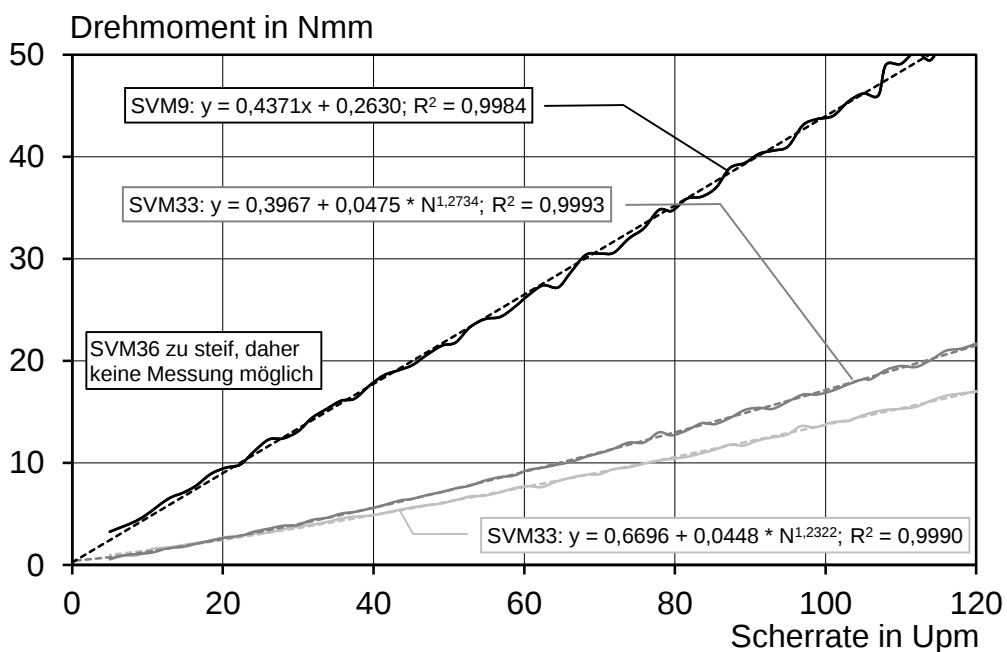


Bild B38: Fließkurven aus den Messwerten und aus der linearen bzw. polynomischen Regression (SVM9, SVM32, und SVM33)

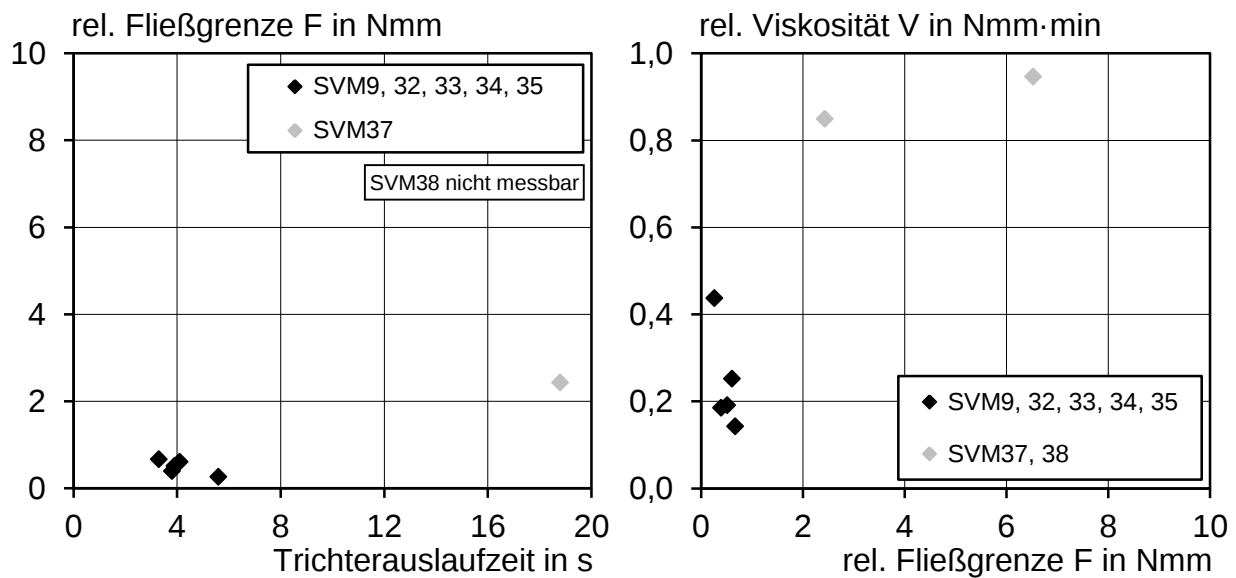


Bild B39: Vergleich der relativen Fließgrenze mit der Trichterauslaufzeit bzw. der relativen Viskosität mit der relativen Fließgrenze (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

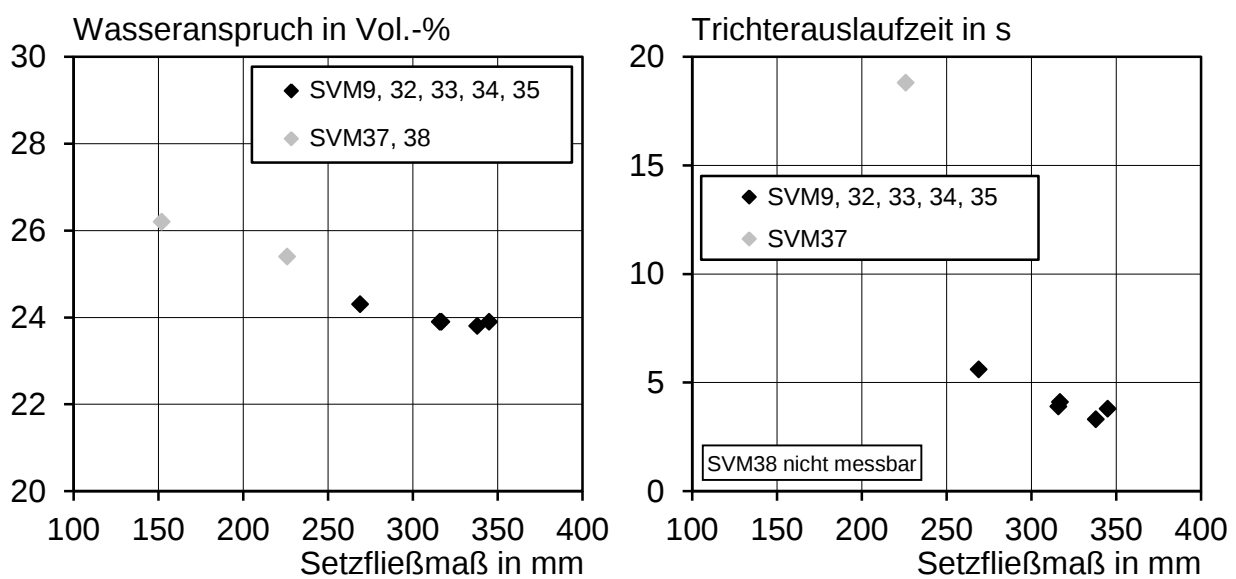


Bild B40: Vergleich des Wasseranspruchs bzw. der Trichterauslaufzeit mit dem Setzfließmaß (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

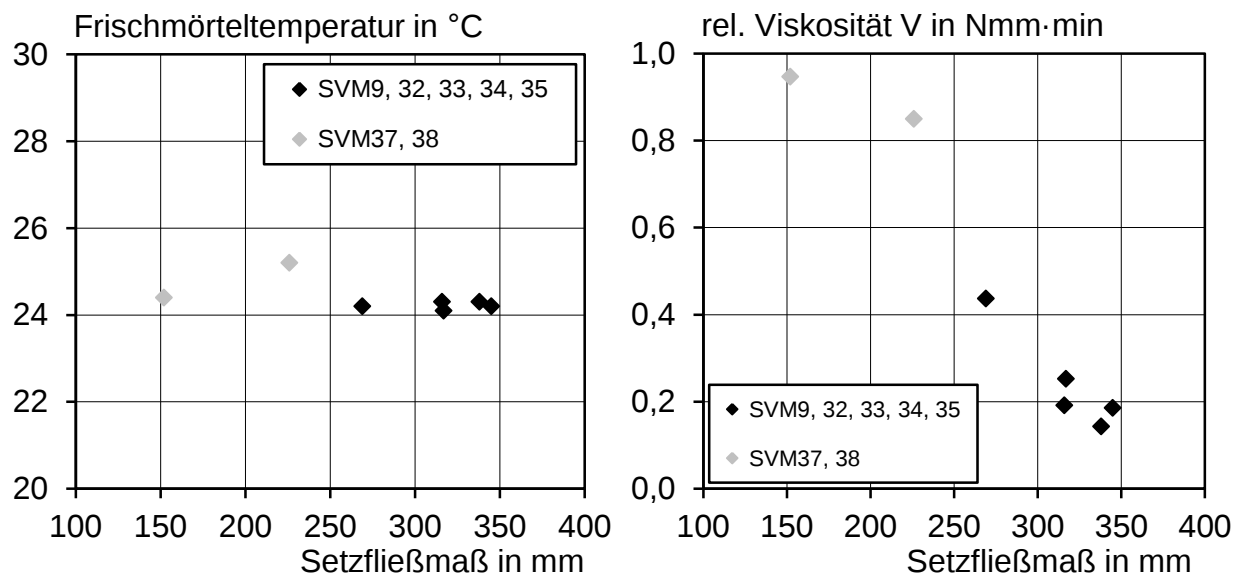


Bild B41: Vergleich der Frischmörteltemperatur bzw. der relativen Viskosität mit dem Setzfließmaß (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

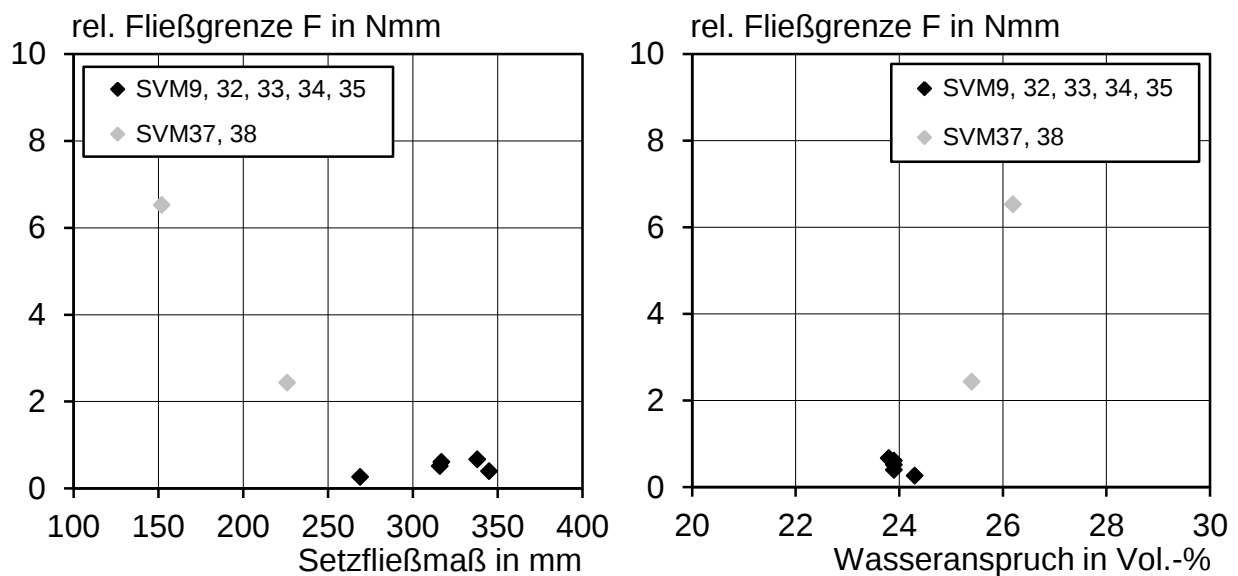


Bild B42: Vergleich der relativen Fließgrenze mit dem Setzfließmaß bzw. dem Wasseranspruch (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

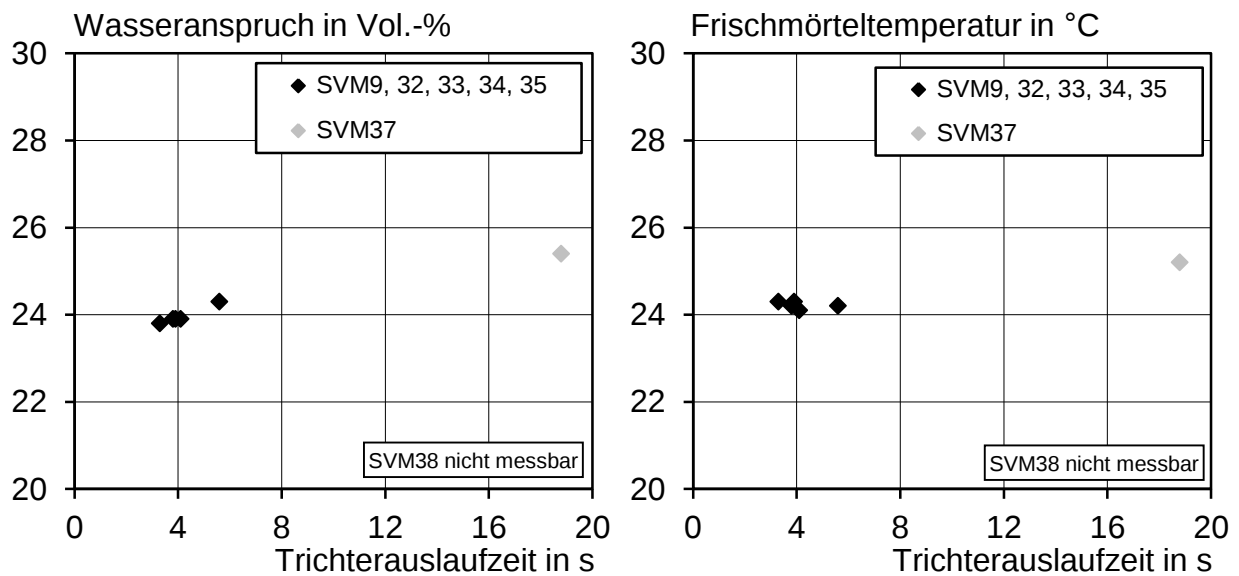


Bild B43: Vergleich des Wasseranspruchs bzw. der Frischmörteltemperatur mit der Trichterauslaufzeit (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

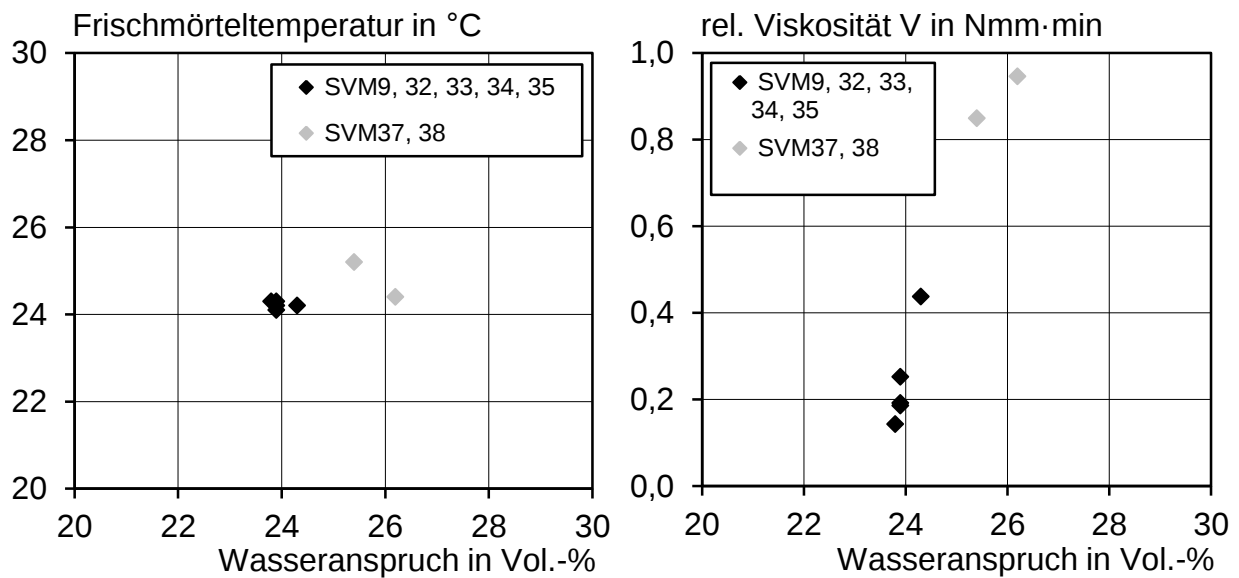


Bild B44: Vergleich der Frischmörteltemperatur bzw. der relativen Viskosität mit dem Wasseranspruch (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

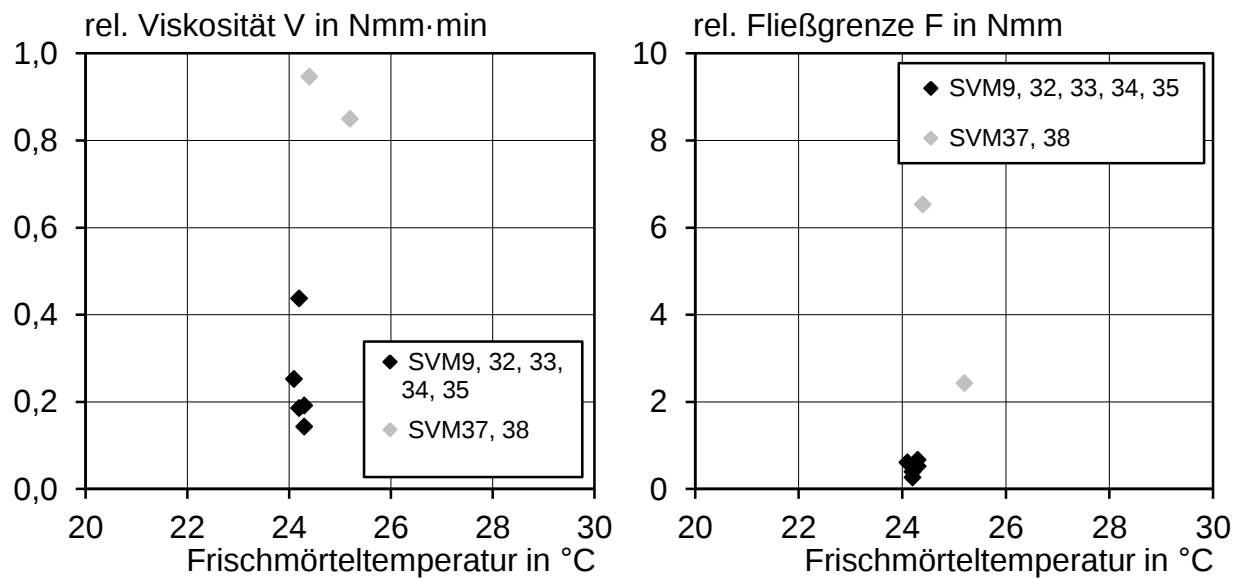


Bild B45: Vergleich der relativen Viskosität bzw. der relativen Fließgrenze mit der Frishmörteltemperatur (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

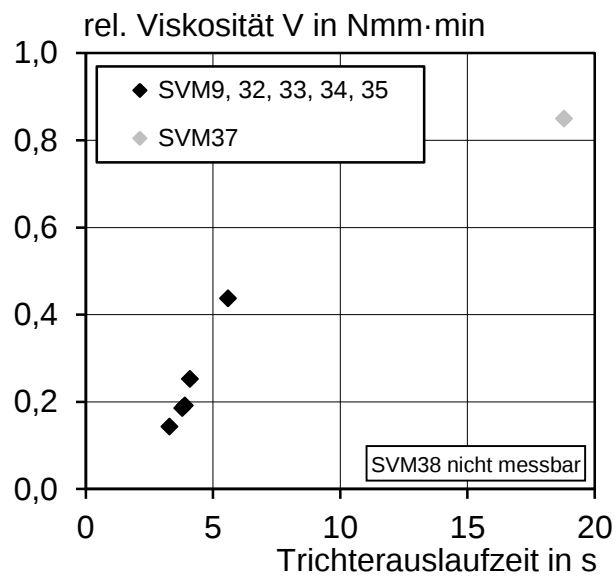


Bild B46: Vergleich der relativen Viskosität mit der Trichterauslaufzeit (SVM9, SVM32 bis SVM35, SVM37 und SVM38)

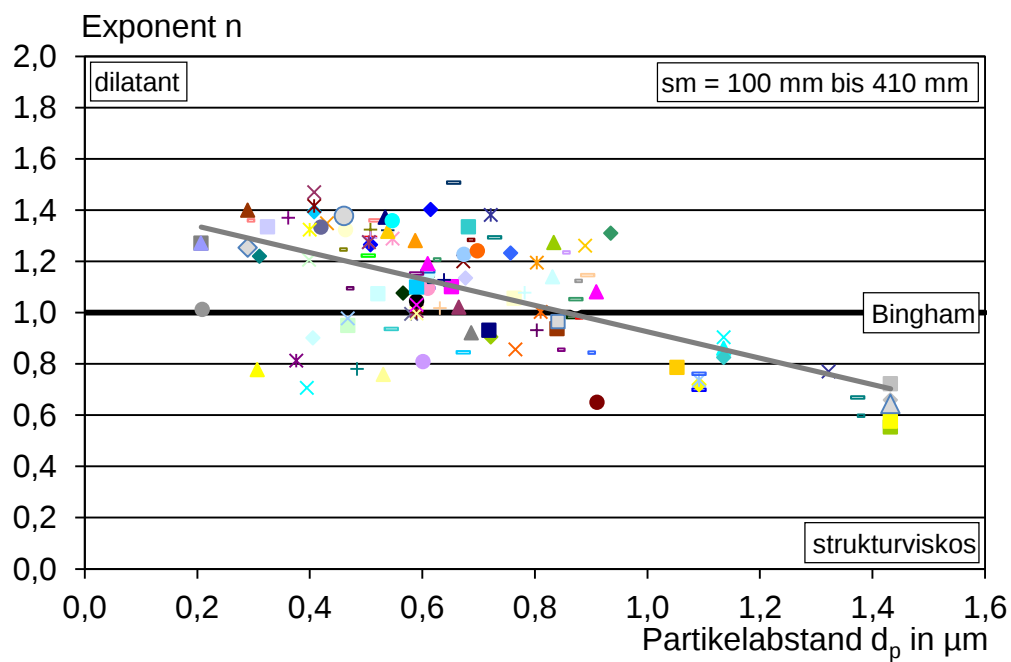


Bild B47: Exponent n aufgetragen über den Partikelabstand d_p (Legende vgl. Bild B55)

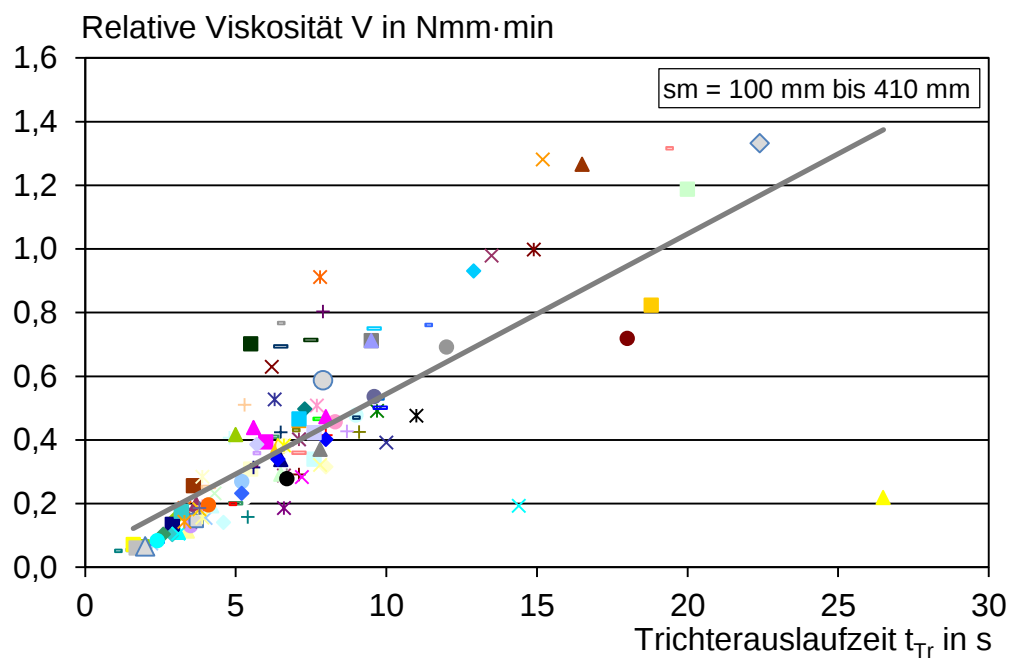


Bild B48: Relative Viskosität V aufgetragen über die Trichterauslaufzeit t_{Tr} (Legende vgl. Bild B55)

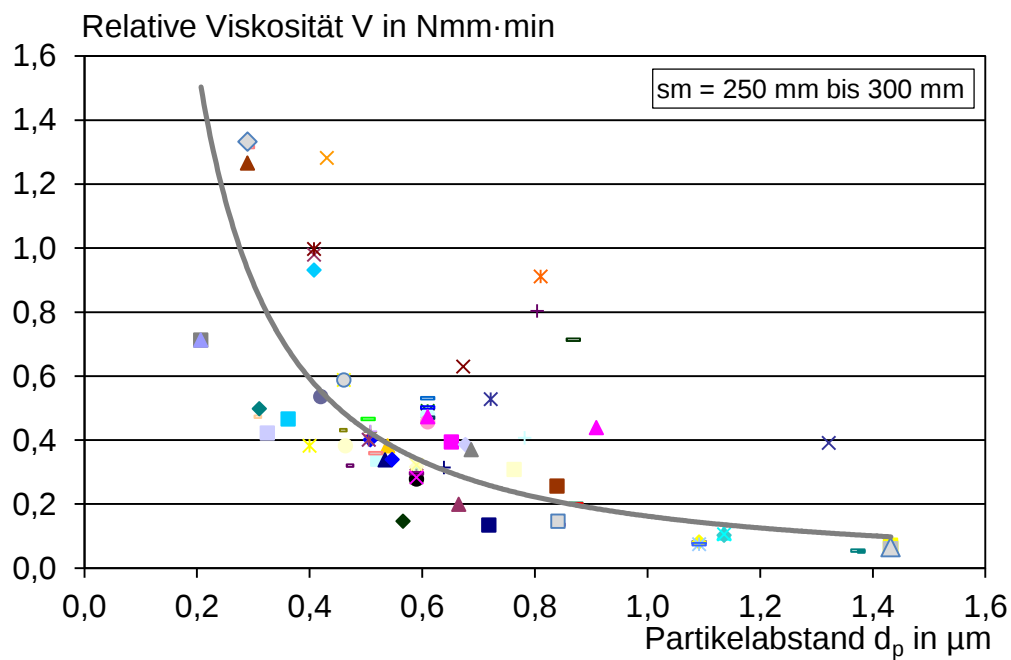


Bild B49: Relative Viskosität V aufgetragen über den Partikelabstand d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 250 \text{ mm}$ bis 300 mm (Legende vgl. Bild B55)

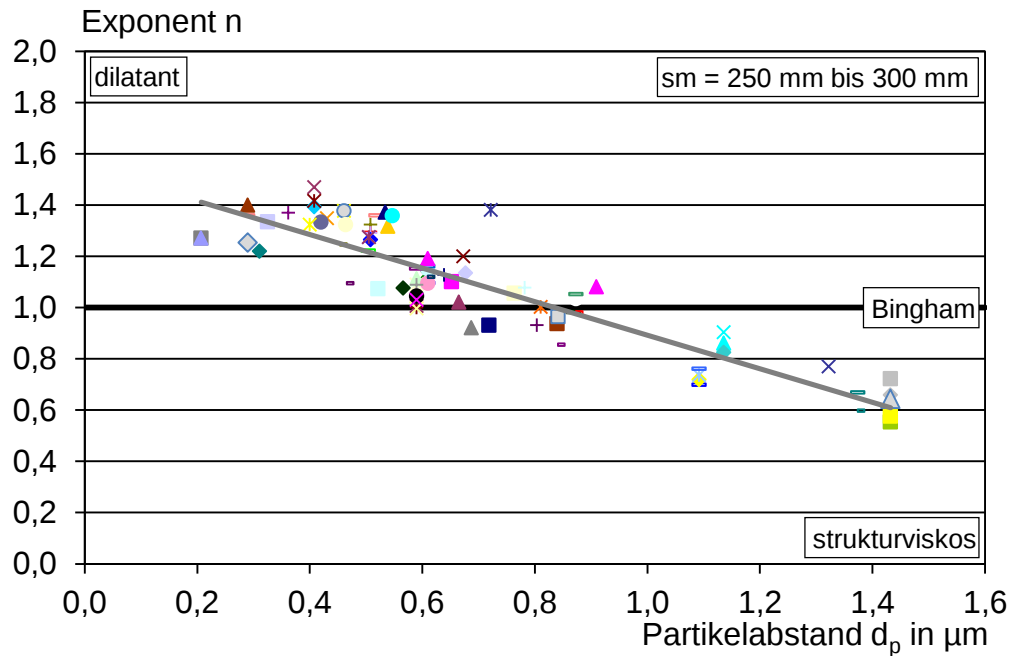


Bild B50: Exponent n aufgetragen über den Partikelabstand d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 250 \text{ mm}$ bis 300 mm (Legende vgl. Bild B55)

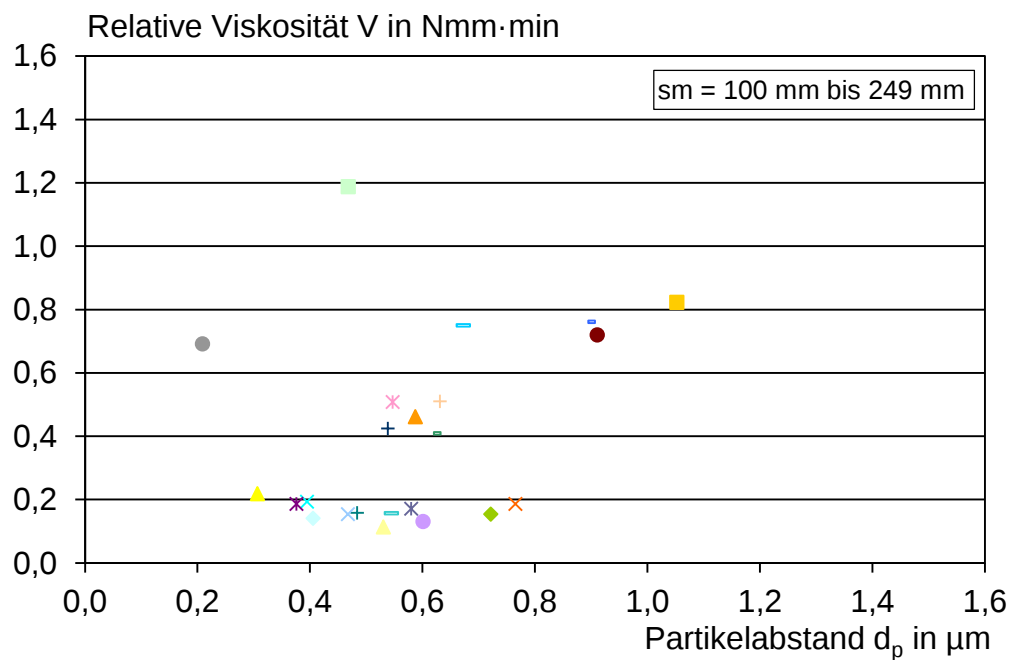


Bild B51: Relative Viskosität V aufgetragen über den Partikelabstand d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 100 \text{ mm bis } 249 \text{ mm}$ (Legende vgl. Bild B55)

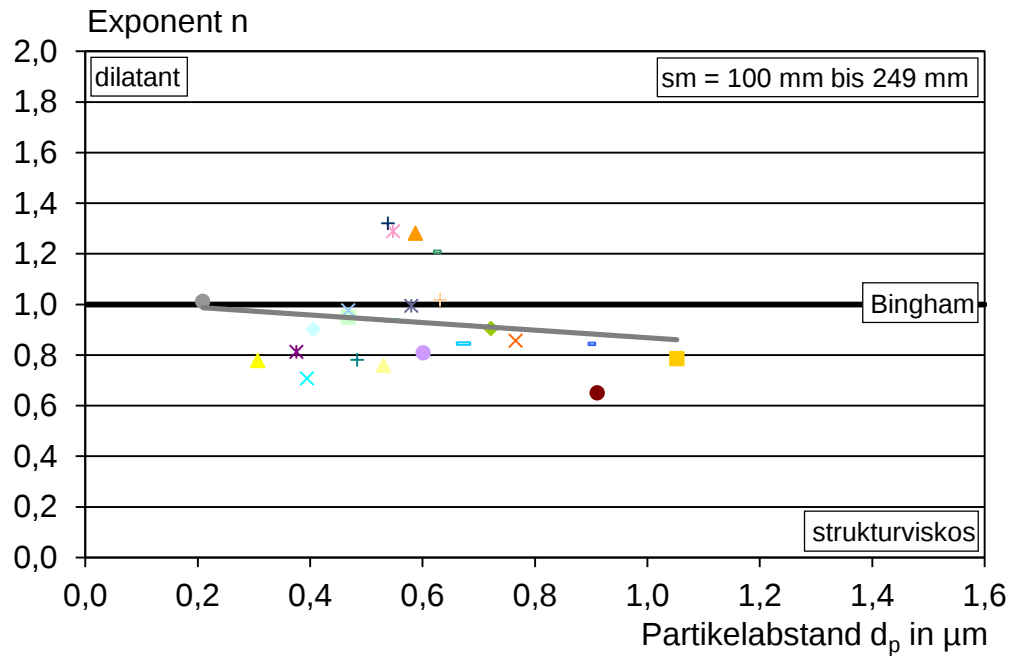


Bild B52: Exponent n aufgetragen über den Partikelabstand d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 100 \text{ mm bis } 249 \text{ mm}$ (Legende vgl. Bild B55)

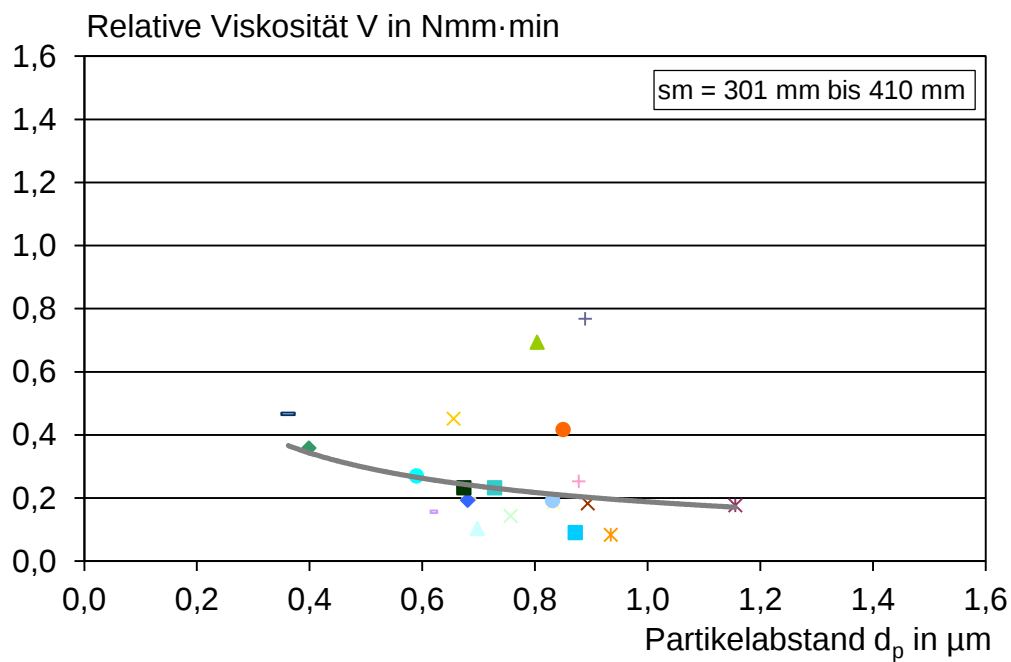


Bild B53: Relative Viskosität V aufgetragen über den Partikelabstand d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 301 \text{ mm bis } 410 \text{ mm}$ (Legende vgl. Bild B55)

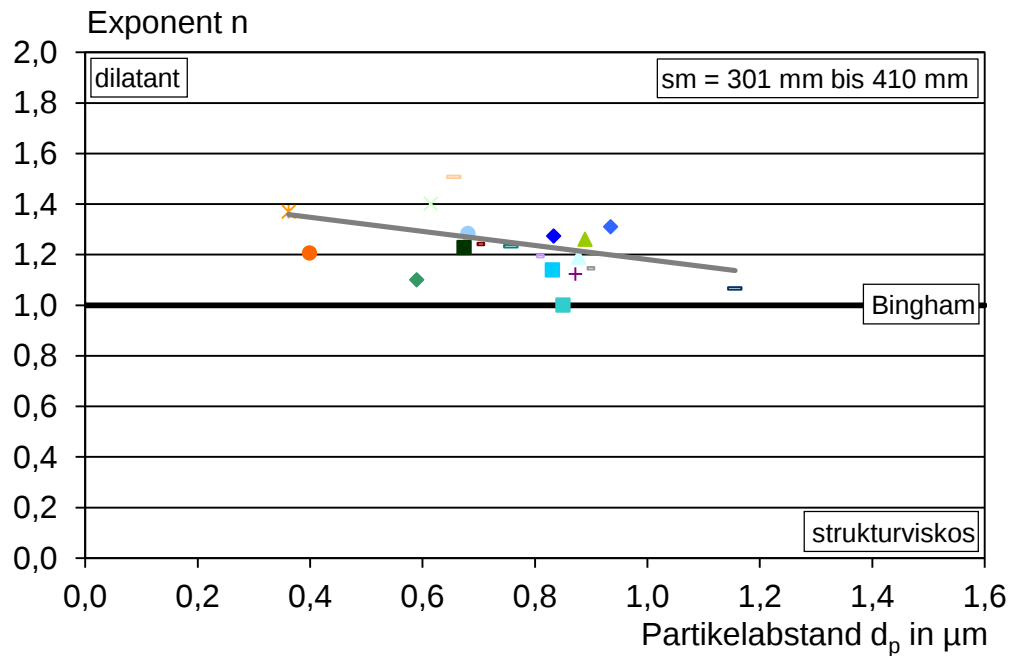


Bild B54: Exponent n aufgetragen über den Partikelabstand d_p bei SVM mit einem Setzfließmaß von $sm = 301 \text{ mm bis } 410 \text{ mm}$ (Legende vgl. Bild B55)

◆ SVM1	□ SVM2a	- SVM2b	✕ SVM5	✕ SVM6	■ SVM7	+ SVM8
▲ SVM9	+ SVM10	▲ SVM11	◆ SVM12	◆ SVM13	+ SVM14	■ SVM15
✕ SVM16	+ SVM17	● SVM18	▲ SVM19	● SVM20	■ SVM21	✕ SVM22
◆ SVM23	▲ SVM24	✕ SVM25	+ SVM26	◆ SVM27	✕ SVM28	▲ SVM29
✕ SVM30	- SVM31	✕ SVM32	+ SVM33	+ SVM34	- SVM35	■ SVM36
■ SVM37	- SVM38	✕ SVM39	● SVM40	◆ SVM41	✕ SVM42	- SVM43
- SVM44	- SVM45	- SVM46	+ SVM47	- SVM48	✕ SVM49	◆ SVM50a
▲ SVM50b	- SVM50c	● SVM51a	● SVM51b	✕ SVM52a	● SVM52b	+ SVM52c
■ SVM52d	✕ SVM53a	▲ SVM53b	- SVM53c	● SVM53d	✕ SVM53e	+ SVM53f
▲ SVM54	- SVM55a	◆ SVM55b	✕ SVM55c	- SVM55d	- SVM56a	- SVM56b
✕ SVM57	✕ SVM58a	▲ SVM58b	● SVM58c	✕ SVM58d	- SVM58e	- SVM58f
◆ SVM58g	- SVM58h	- SVM59a	SVM59b	- SVM59c	▲ SVM60a	✕ SVM60b
◆ SVM60c	■ SVM61a	▲ SVM61b	■ SVM61c	■ SVM61d	◆ SVM61e	✕ SVM62
■ SVM63	+ SVM64a	◆ SVM64b	+ SVM64c	+ SVM64d	✕ SVM65a	● SVM65b
✕ SVM65c	◆ SVM65d	✕ SVM66	✕ SVM67	● SVM68	▲ SVM69	- SVM70
- SVM71	- SVM72	■ SVM73	■ SVM74	✕ SVM75	■ SVM76	◆ SVM77
■ SVM78	✕ SVM79	■ SVM80	▲ SVM81	■ SVM82	- SVM83	- SVM84
▲ SVM85	✕ SVM86	◆ SVM87	● SVM88	✕ SVM89	✕ SVM90	- SVM91
▲ SVM92	◆ SVM93	● SVM94	✕ SVM95	◆ SVM96	✕ SVM97	■ SVM98
- SVM99						

Bild B55: Legende

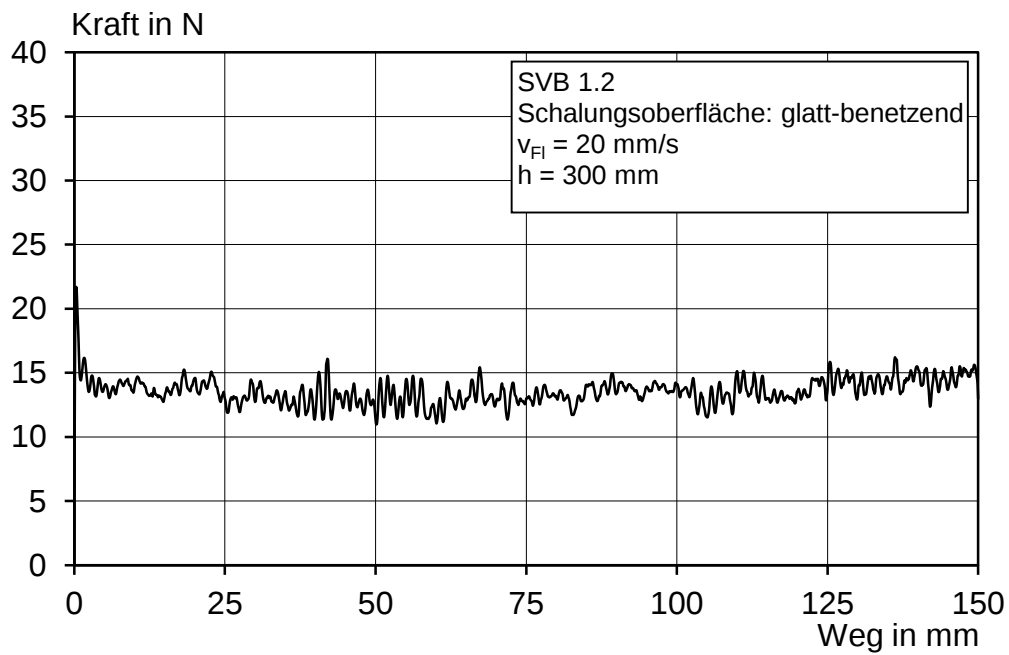


Bild B56: Versuch G1

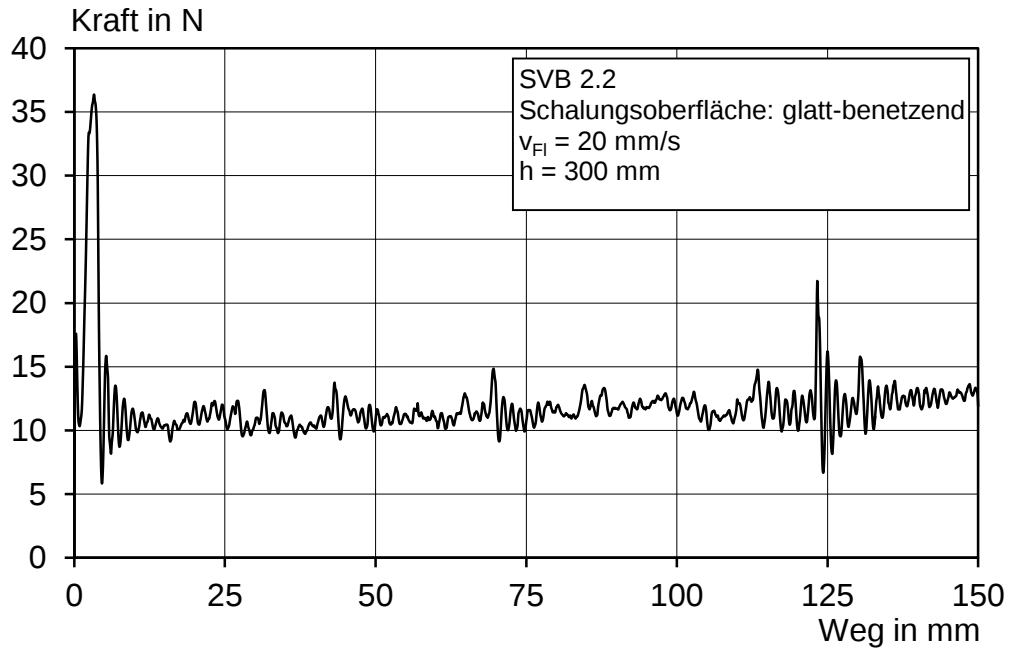


Bild B57: Versuch G2

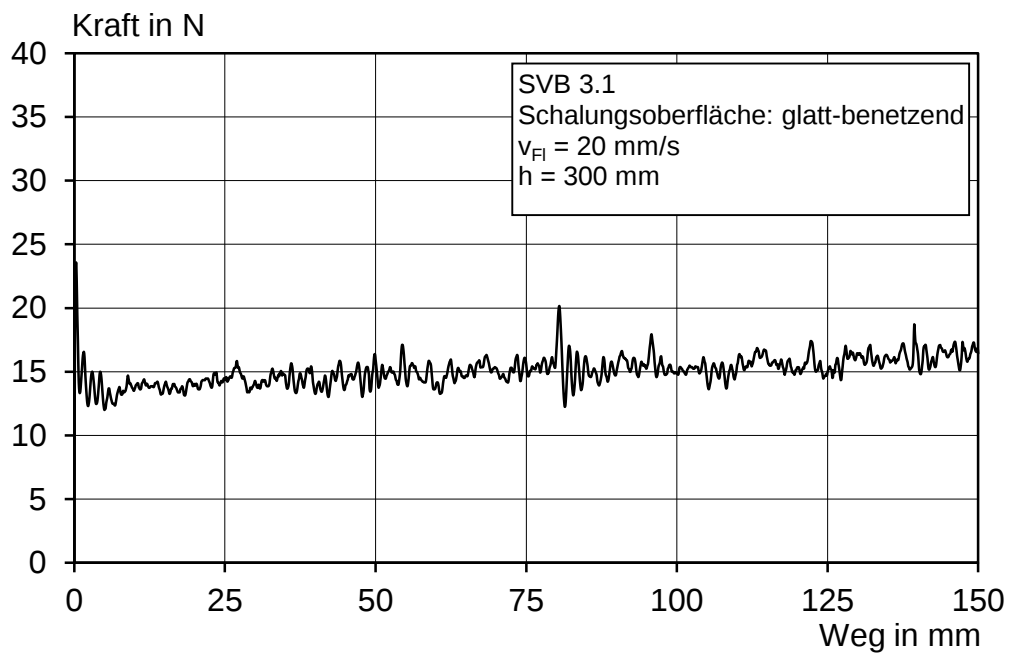


Bild B58: Versuch G3

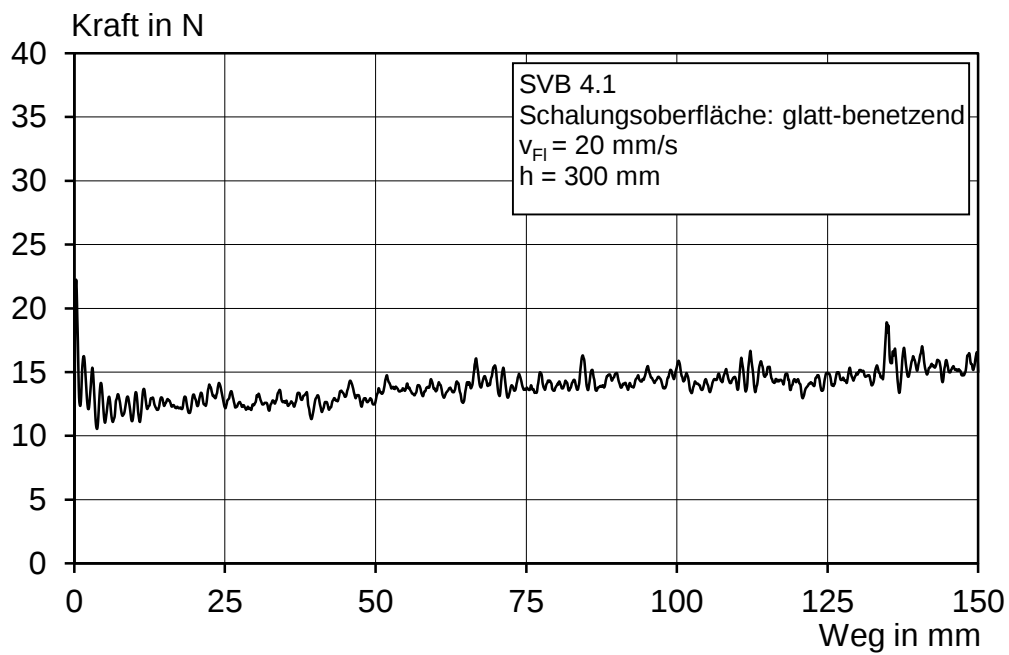


Bild B59: Versuch G4

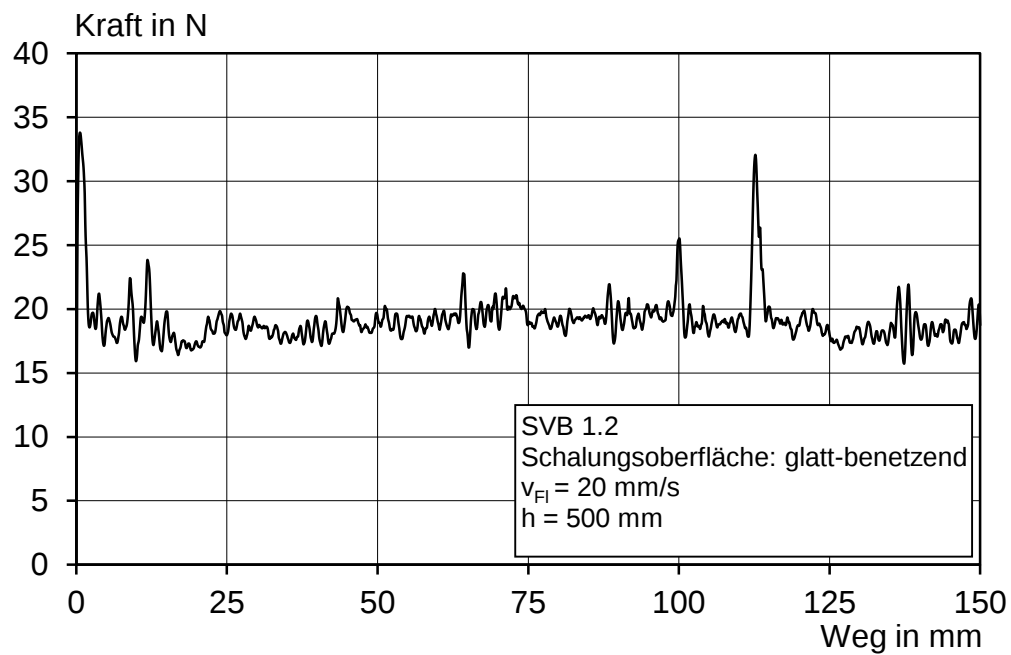


Bild B60: Versuch G5

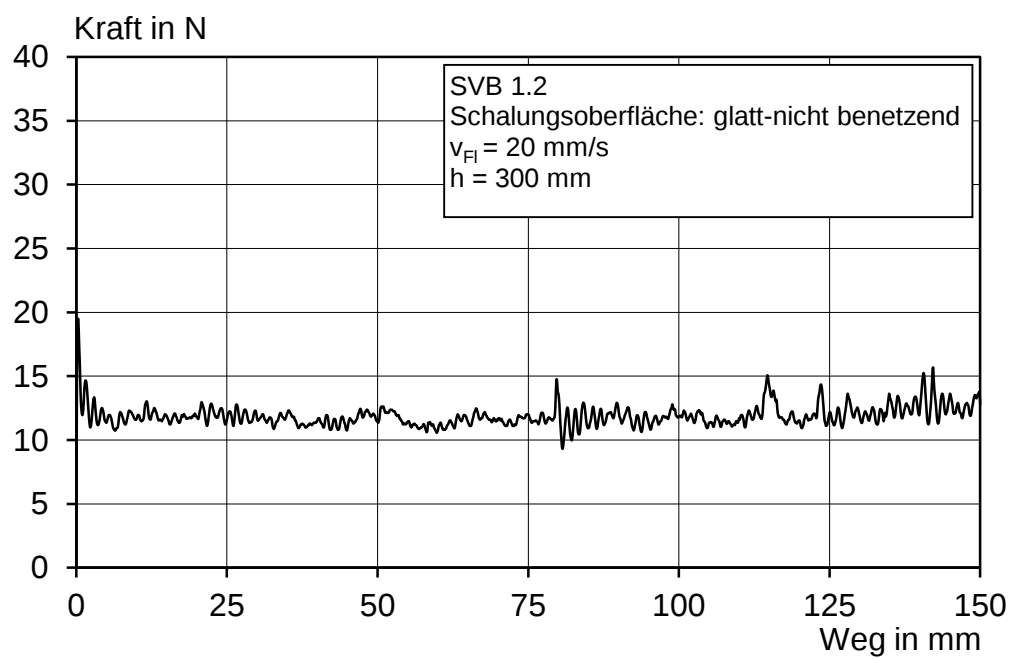


Bild B61: Versuch G6

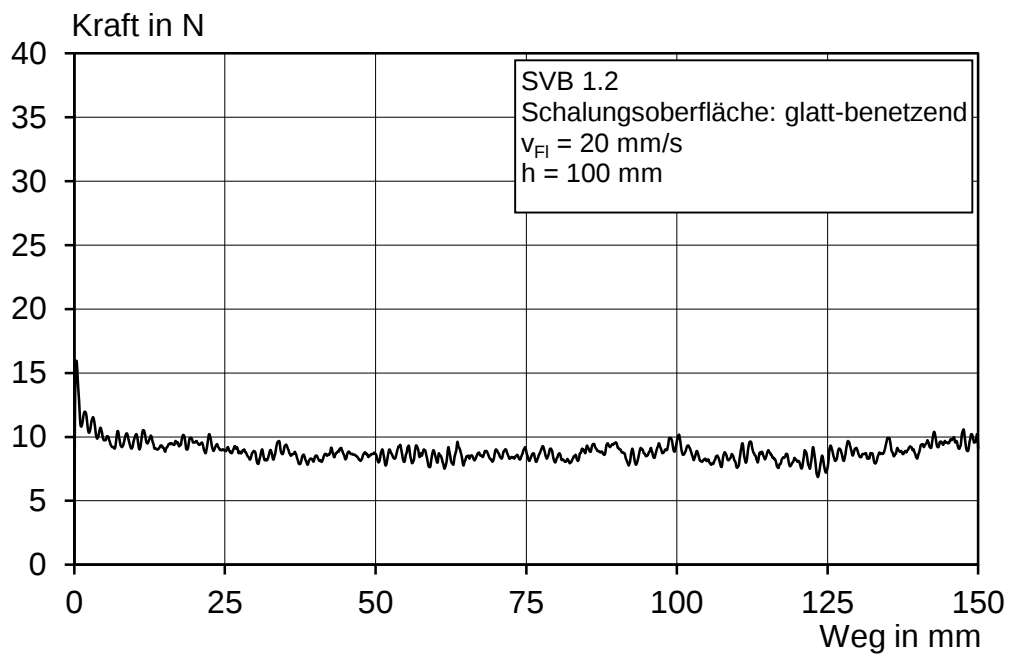


Bild B62: Versuch G7

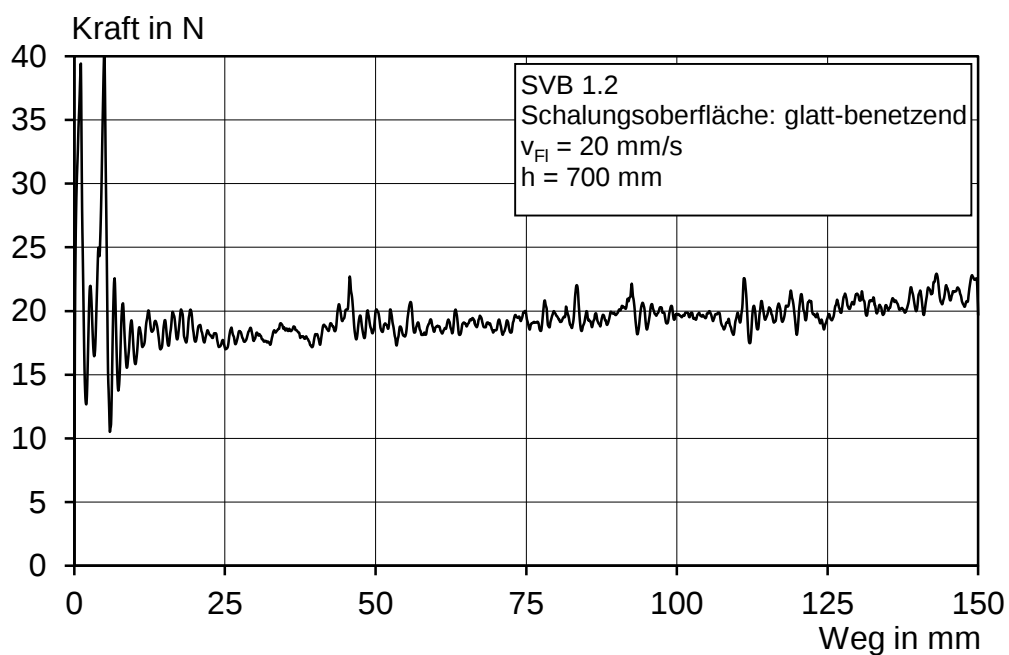


Bild B63: Versuch G8

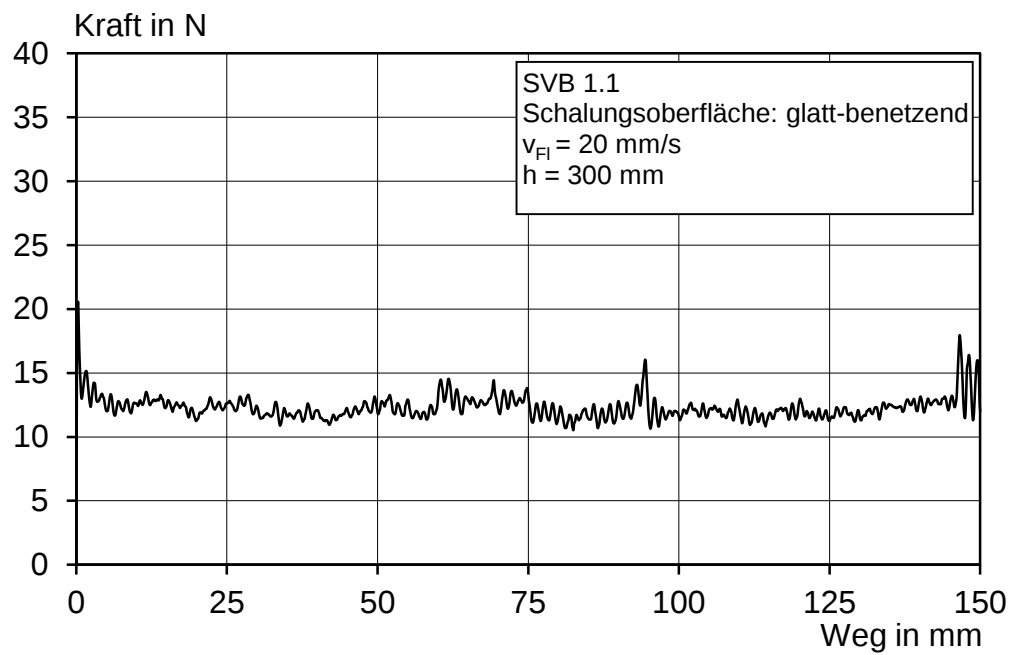


Bild B64: Versuch G9

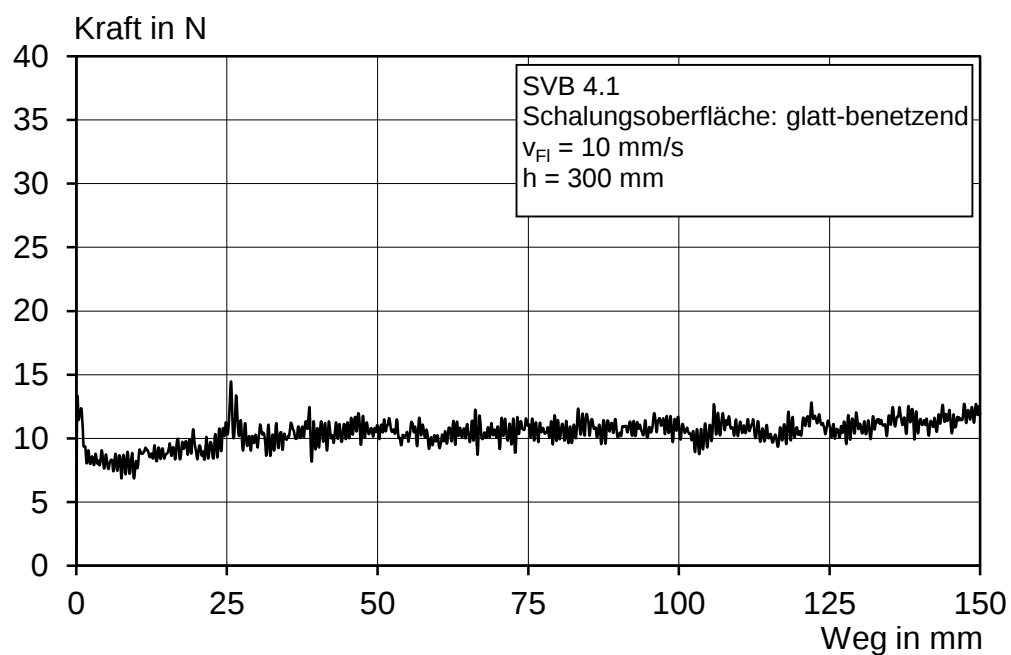


Bild B65: Versuch G10

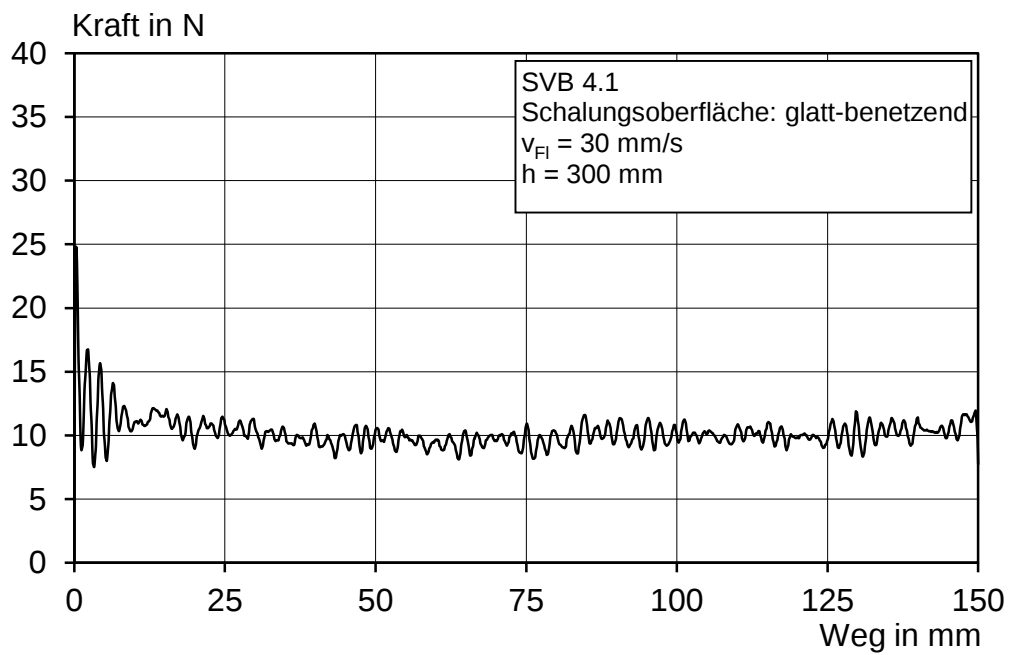


Bild B66: Versuch G11

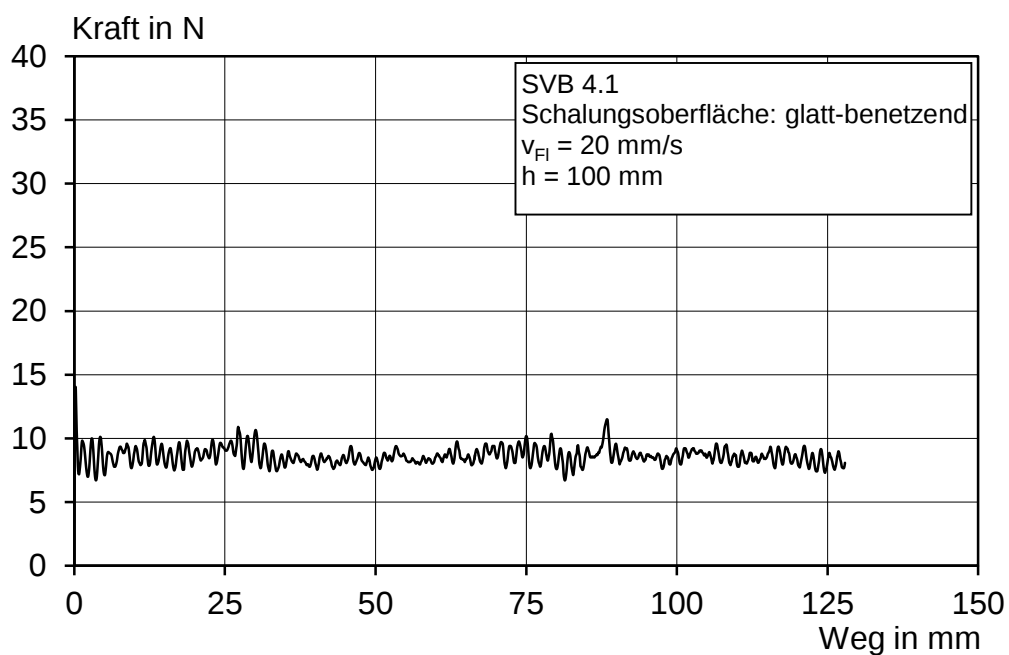


Bild B67: Versuch G12

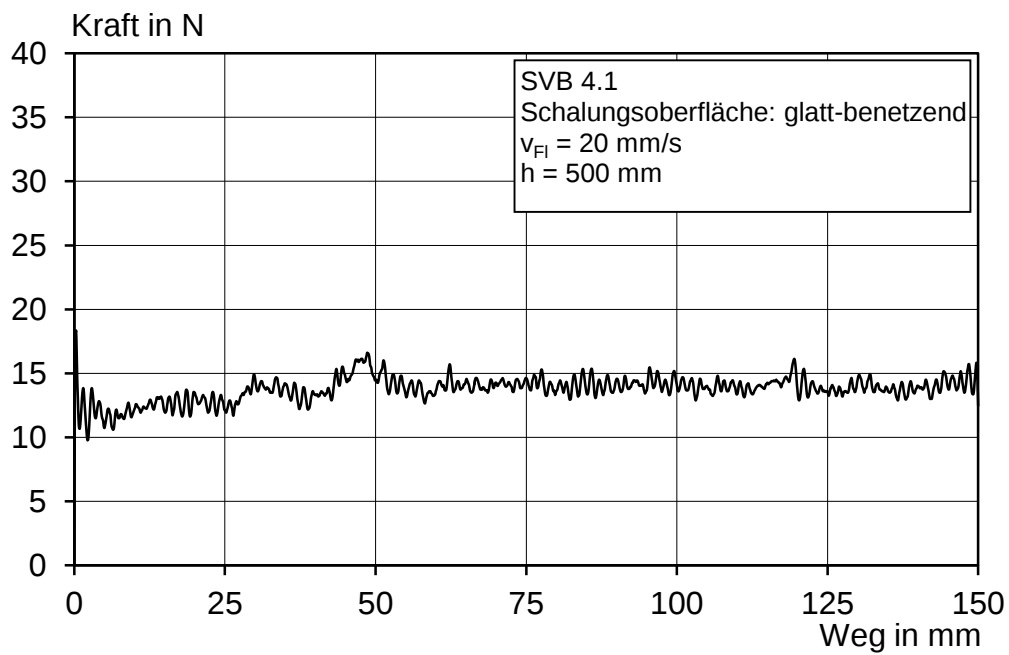


Bild B68: Versuch G13

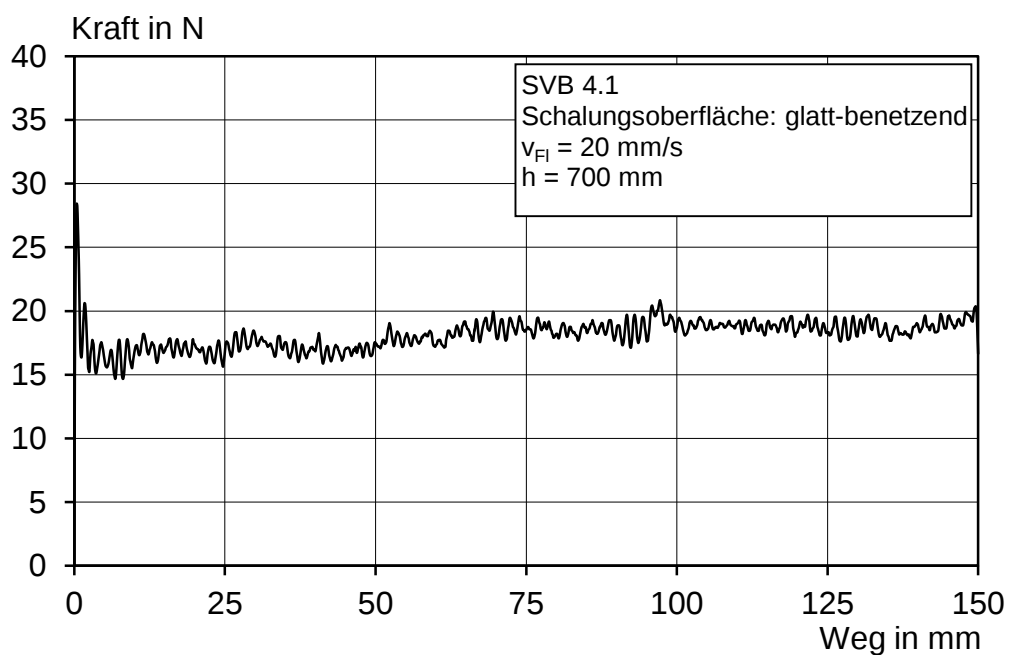


Bild B69: Versuch G14

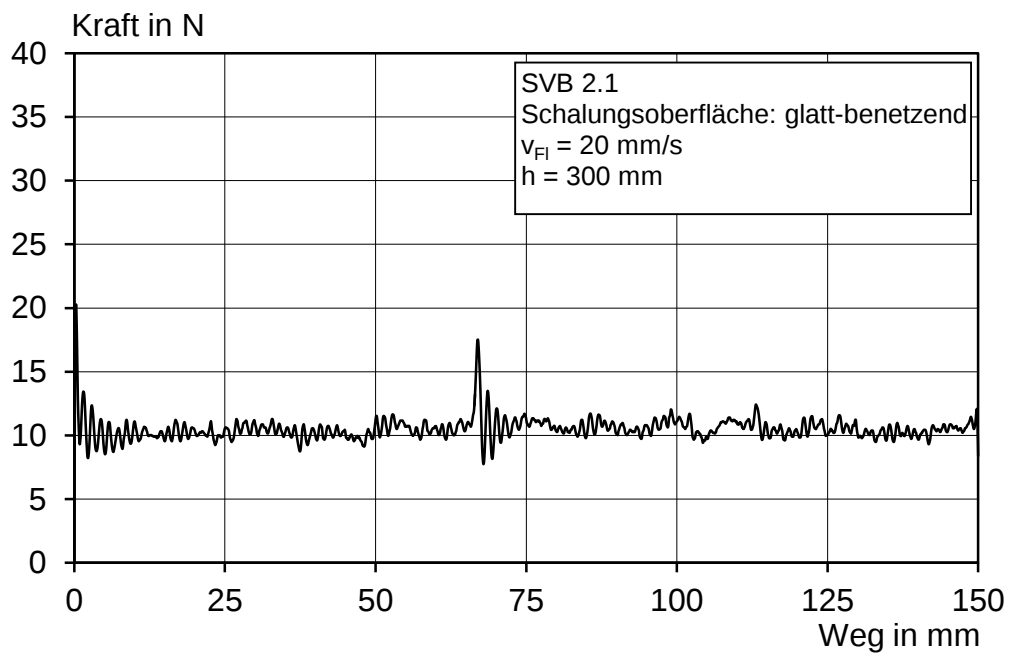


Bild B70: Versuch G15

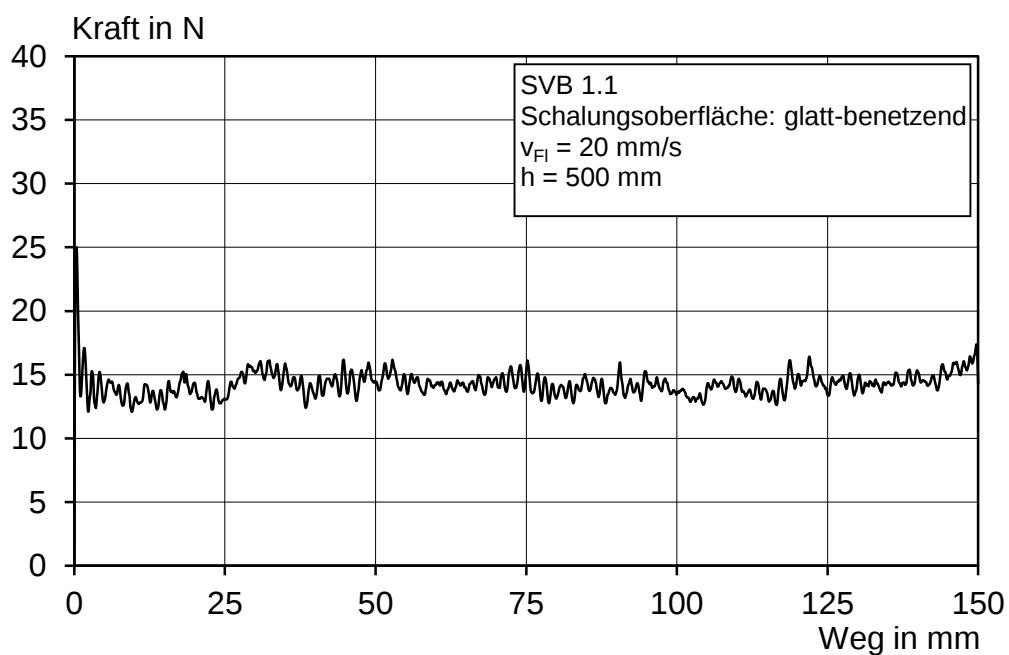
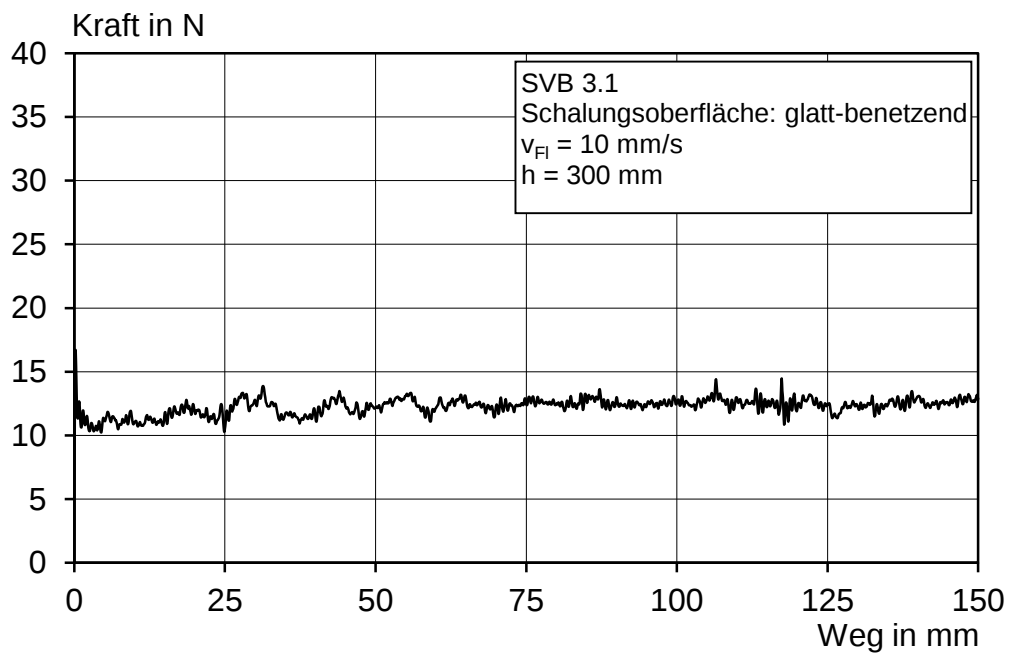
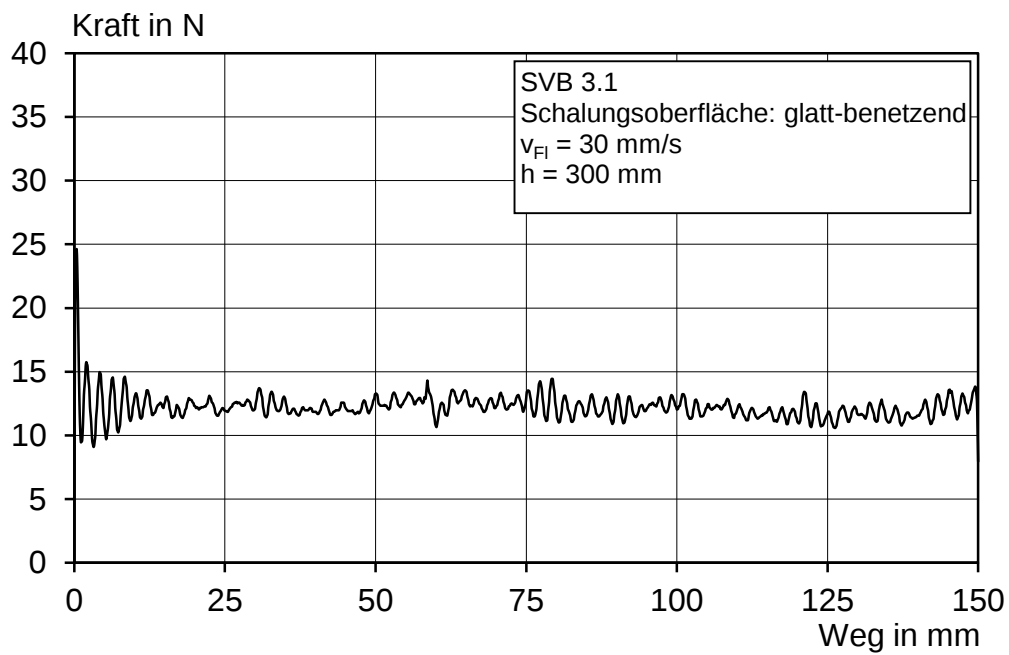


Bild B71: Versuch G16

Bild B72: Versuch G17Bild B73: Versuch G18

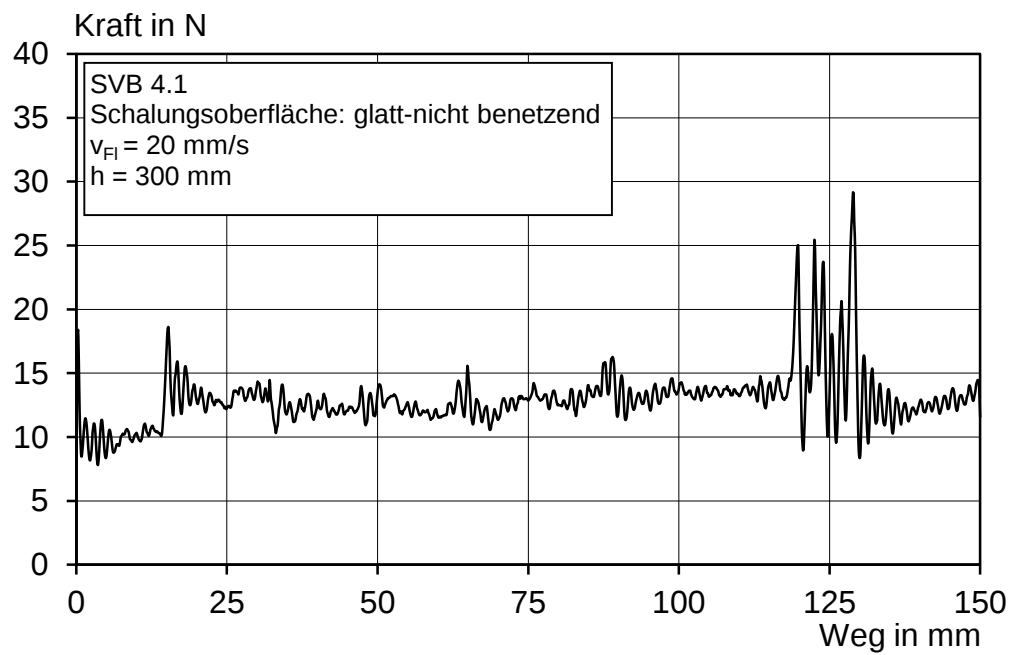


Bild B74: Versuch G19

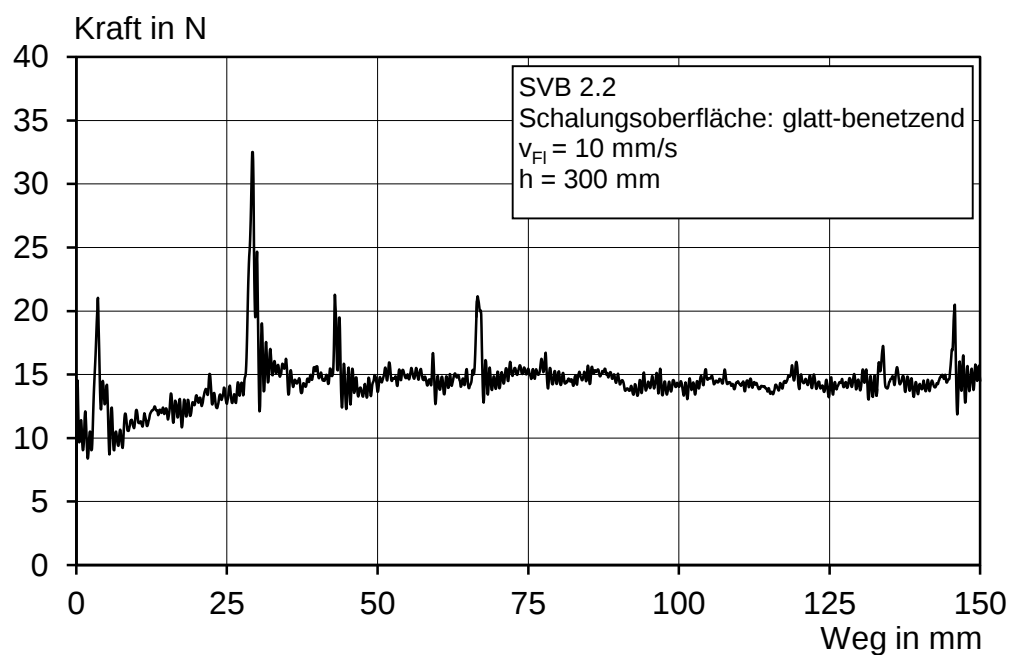
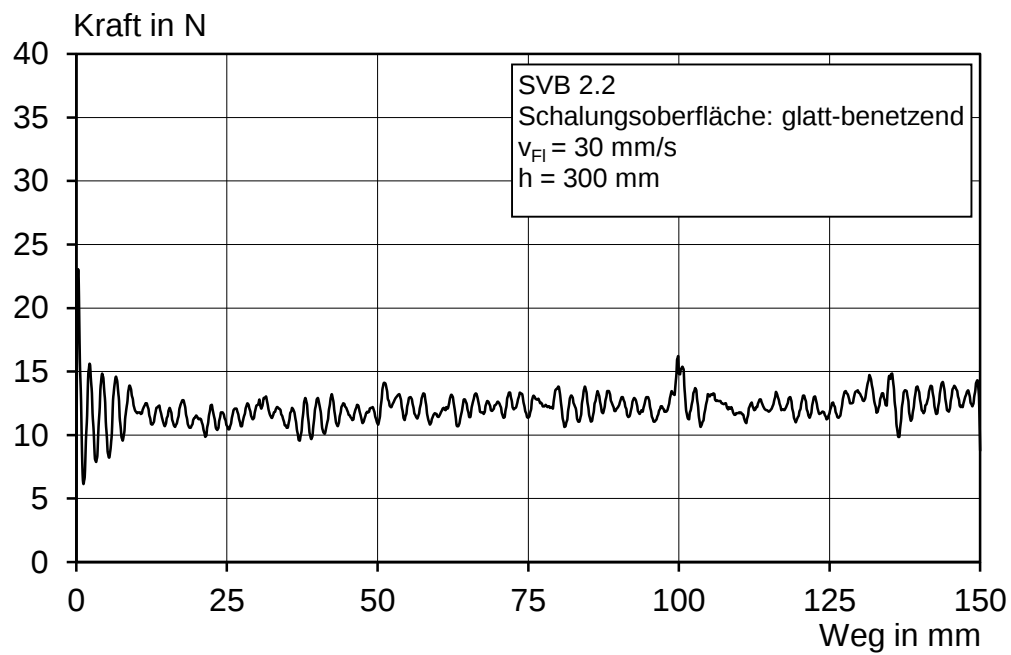
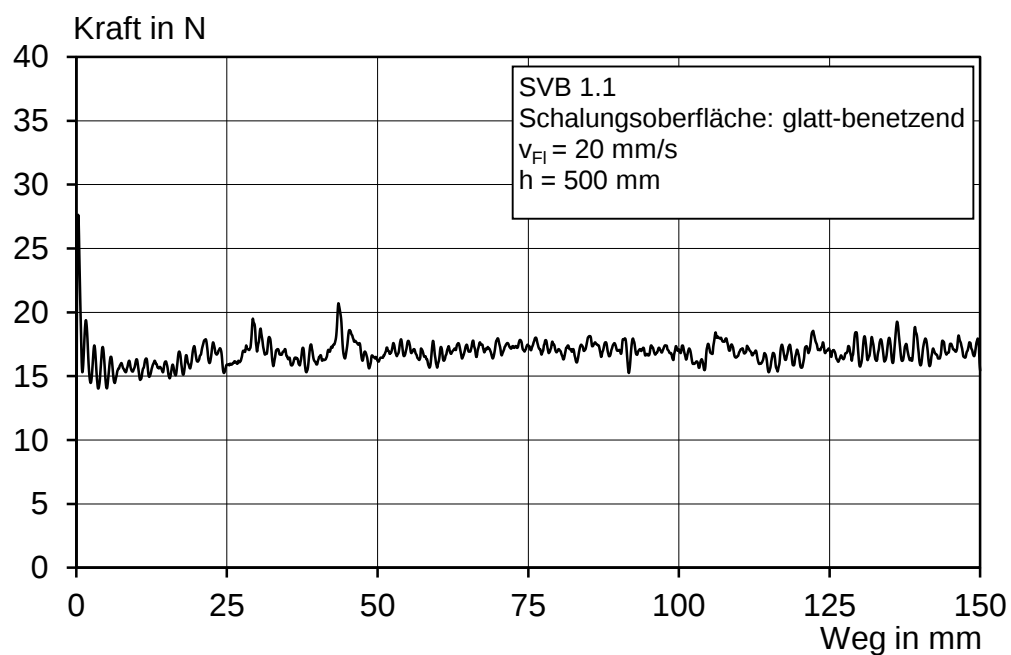
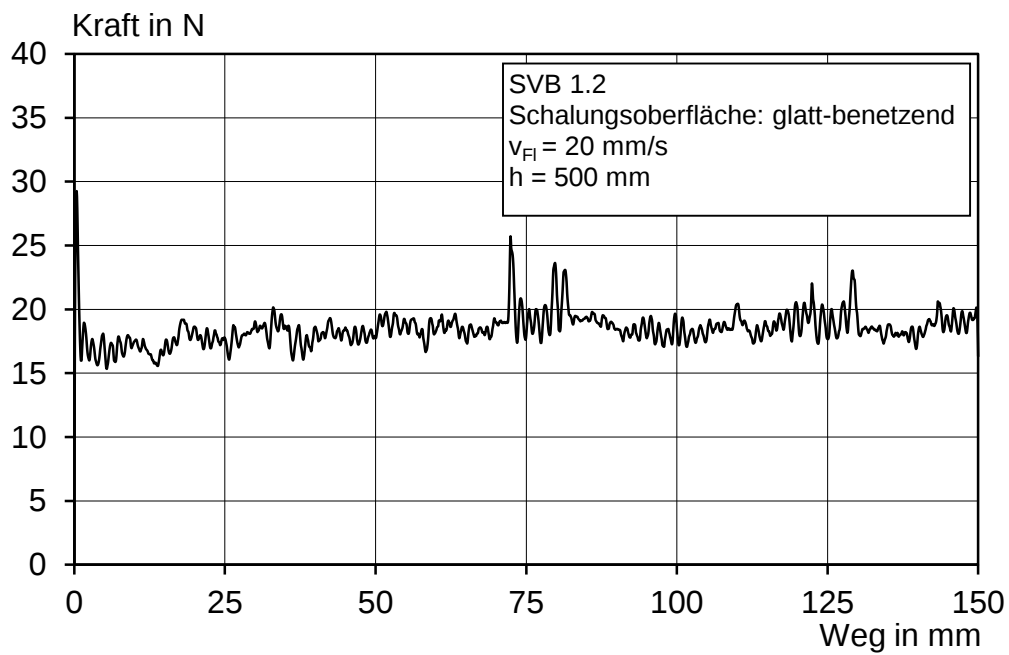
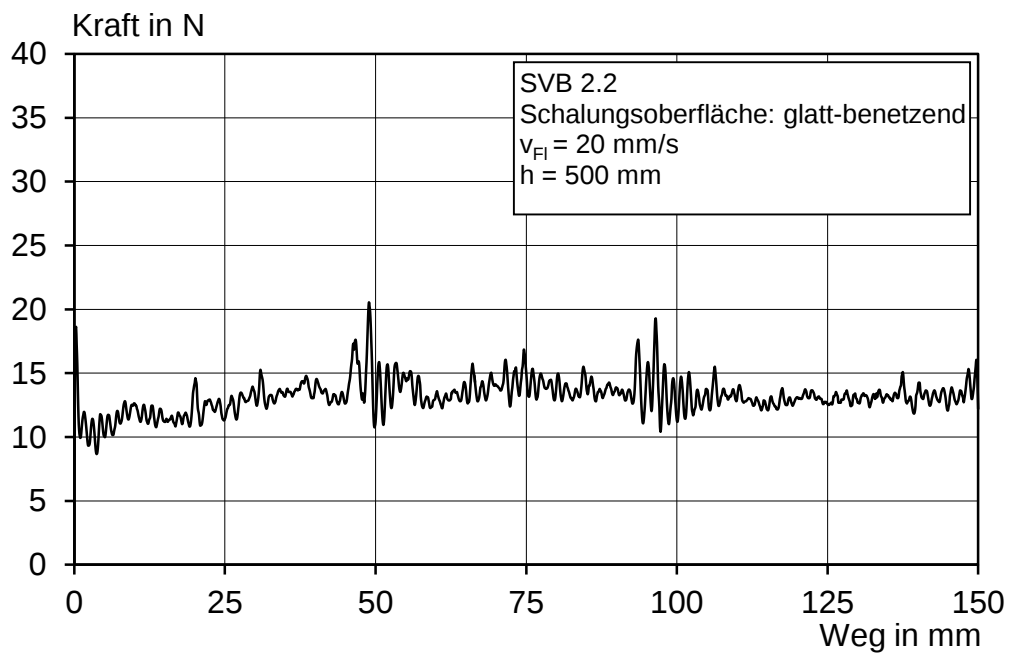


Bild B75: Versuch G20

Bild B76: Versuch G21Bild B77: Versuch G22

Bild B78: Versuch G23Bild B79: Versuch G24

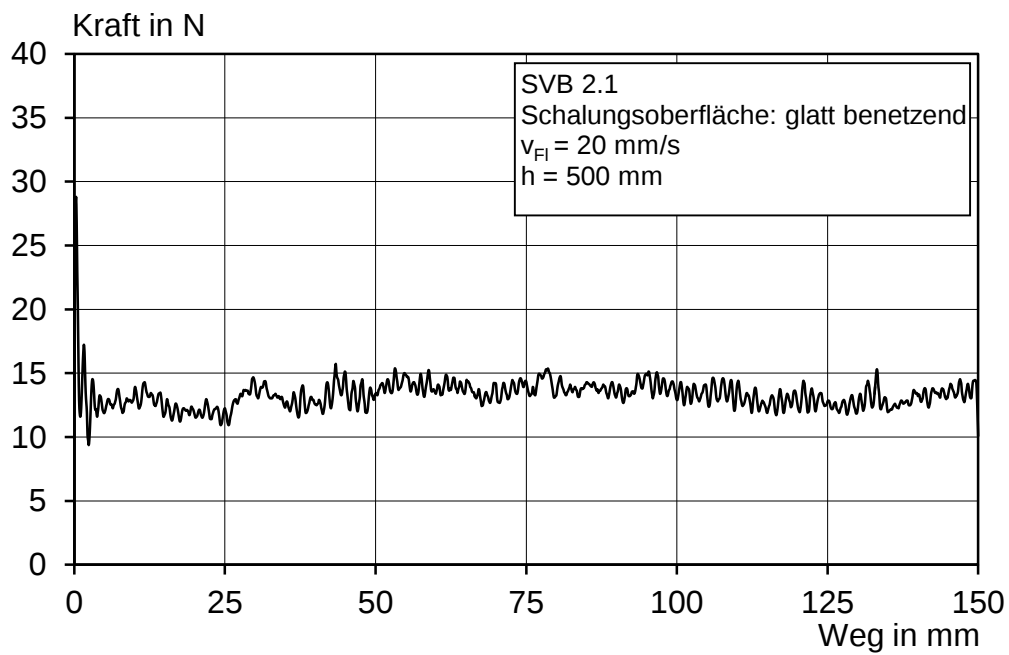


Bild B80: Versuch G25

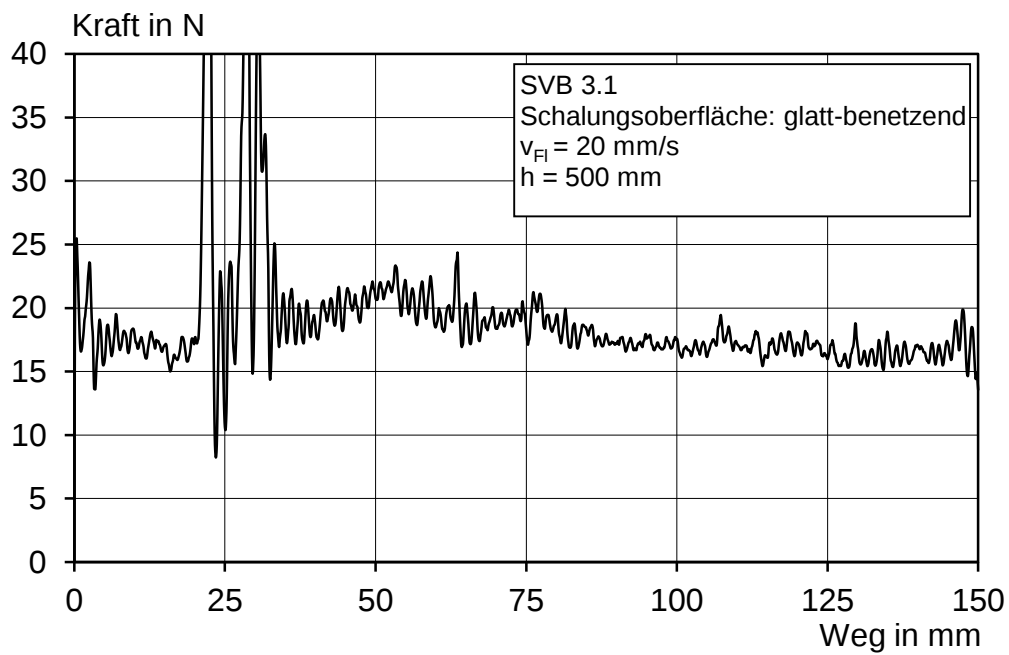


Bild B81: Versuch G26

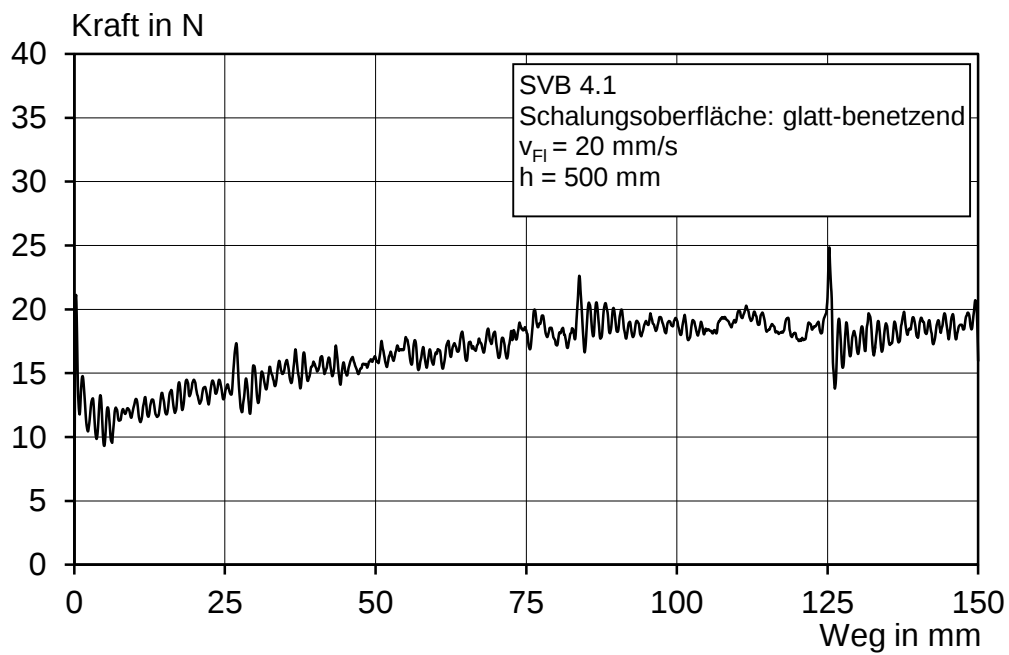


Bild B82: Versuch G27

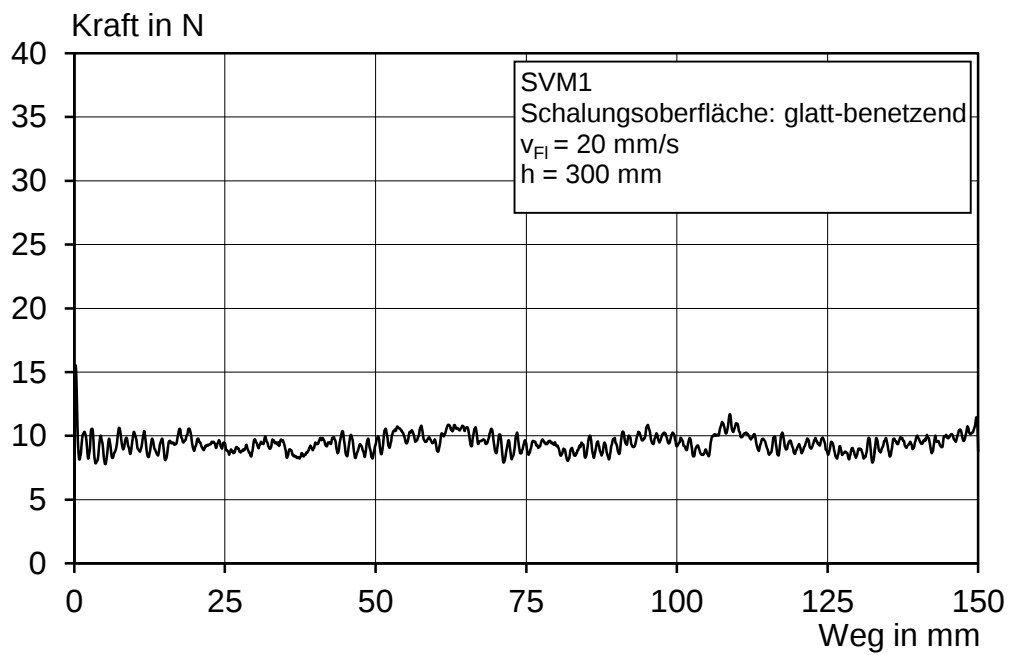


Bild B83: Versuch G28

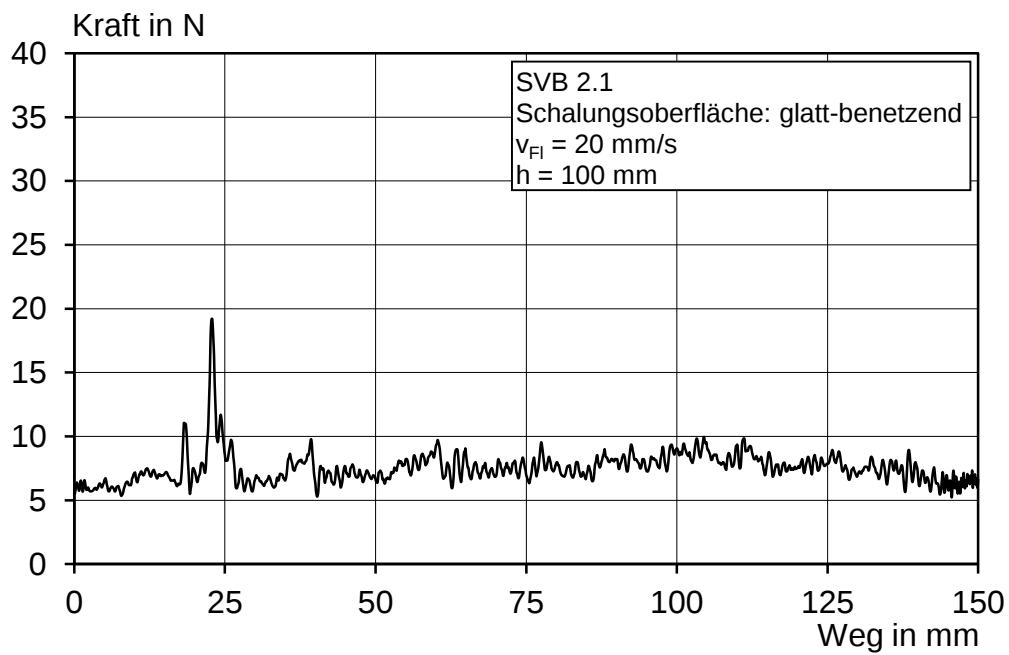


Bild B84: Versuch G29

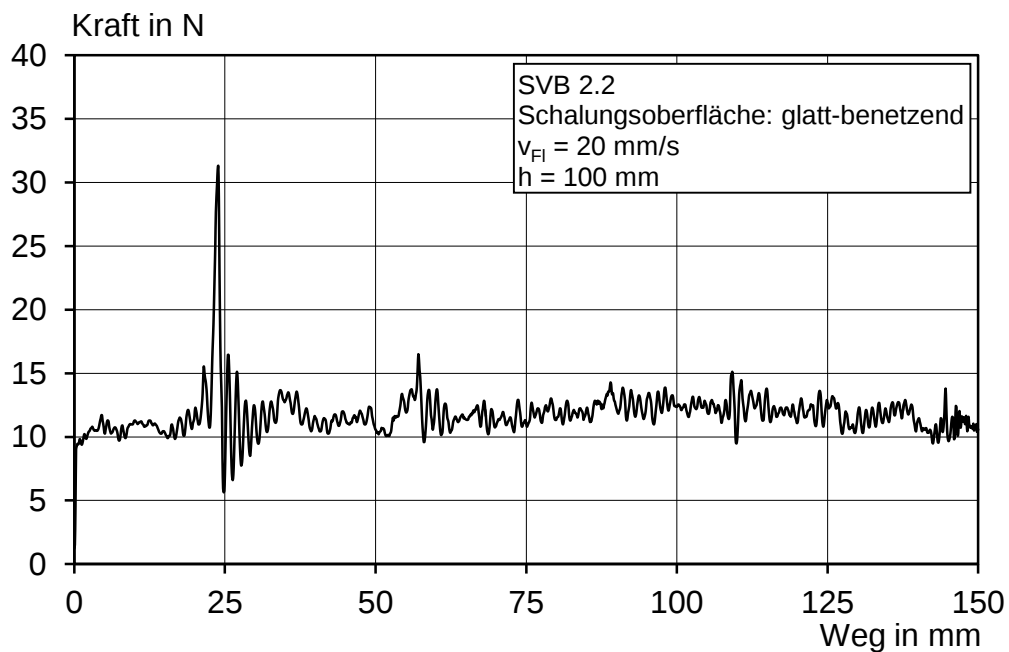


Bild B85: Versuch G30

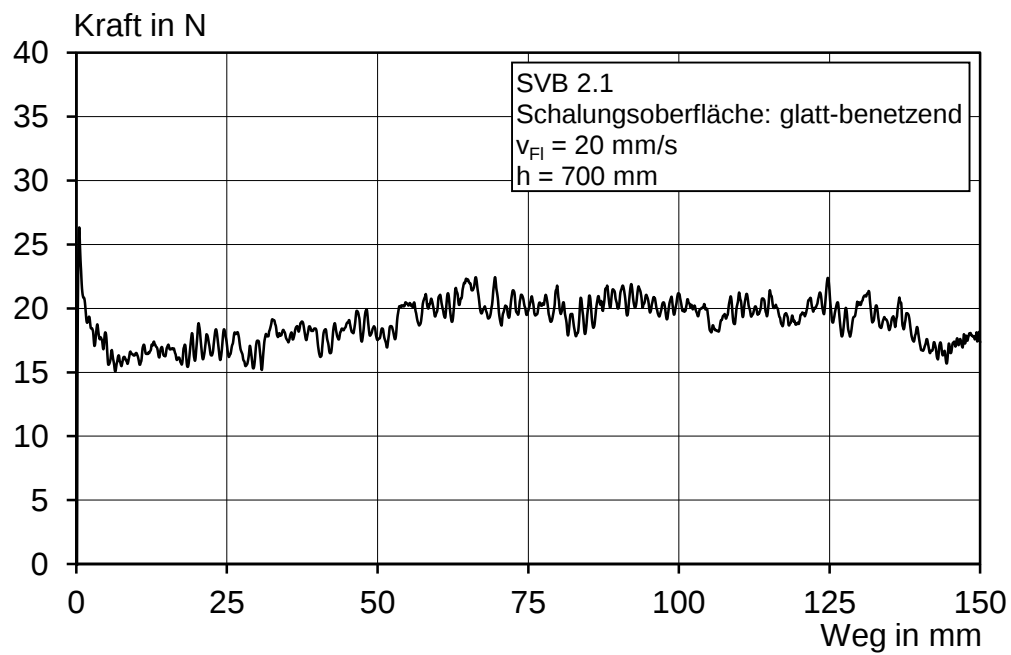


Bild B86: Versuch G31

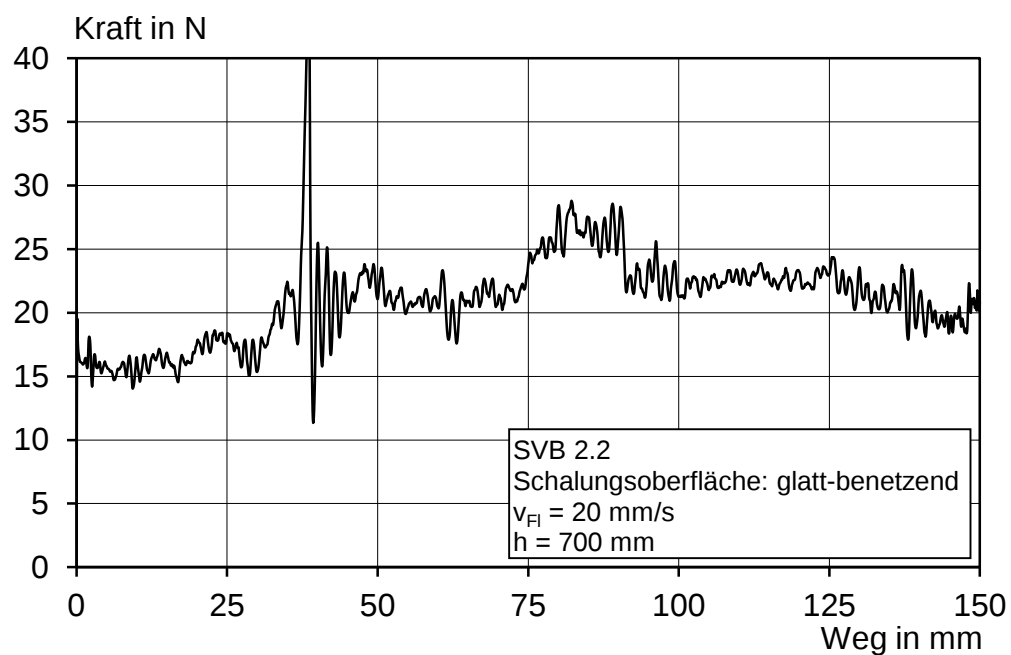


Bild B87: Versuch G32

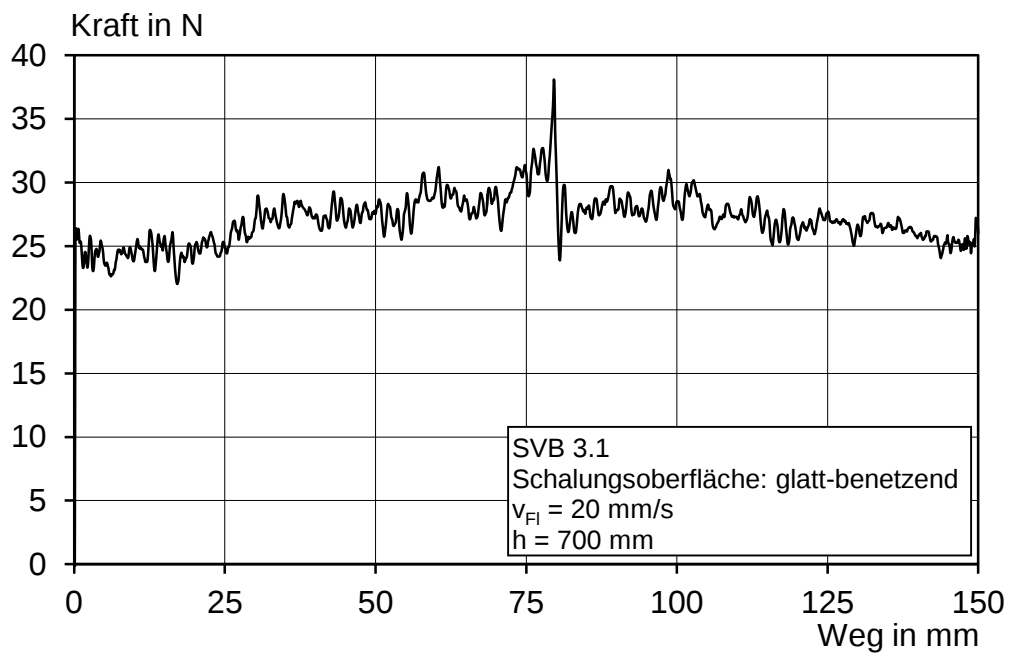


Bild B88: Versuch G33

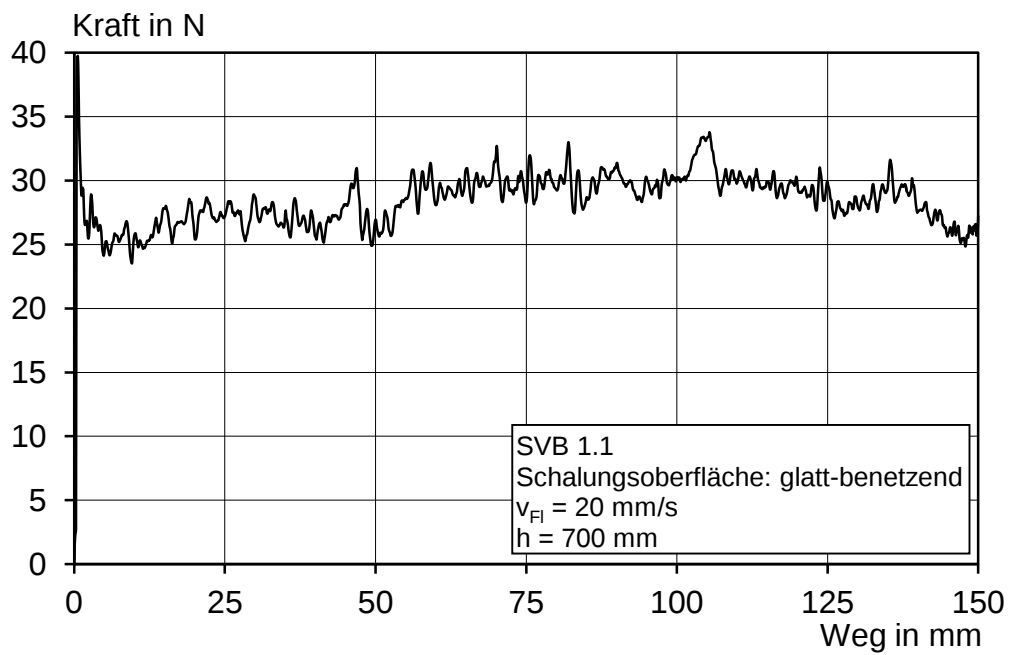


Bild B89: Versuch G34

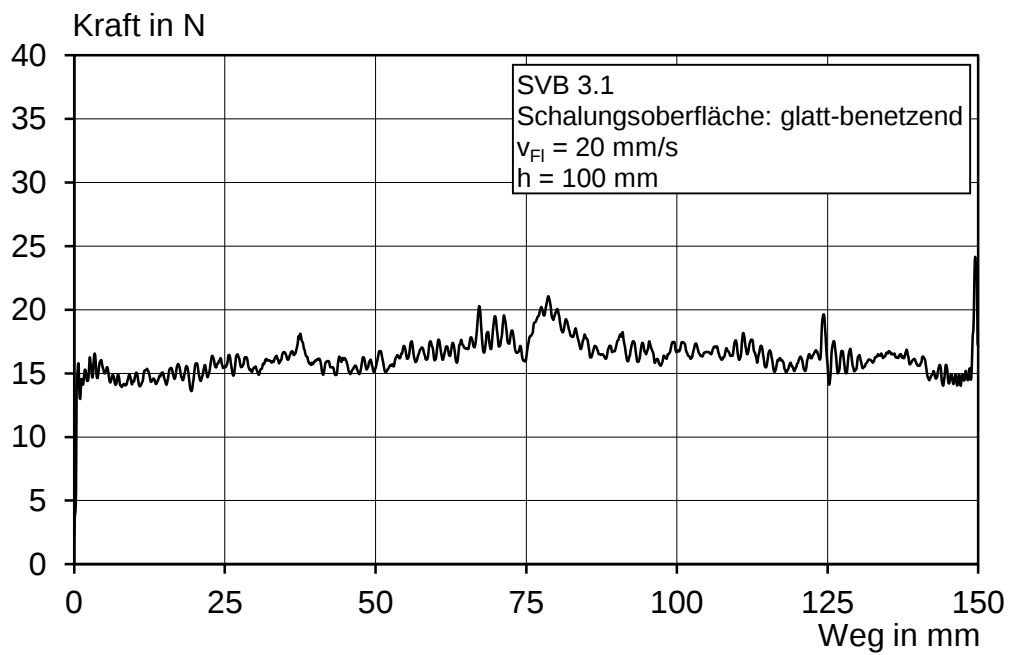


Bild B90: Versuch G35

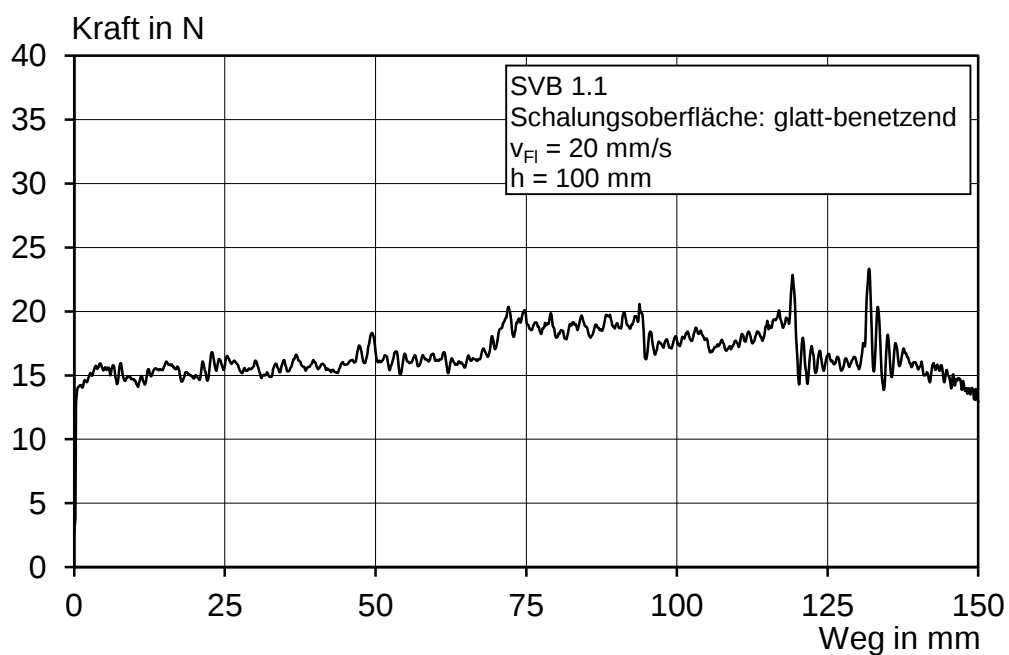
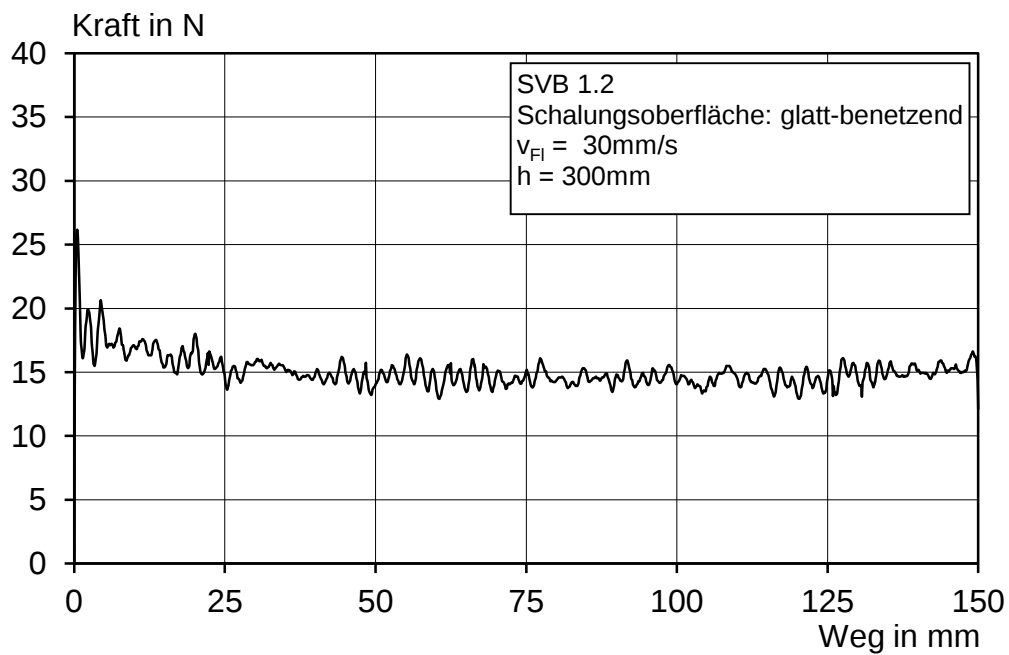
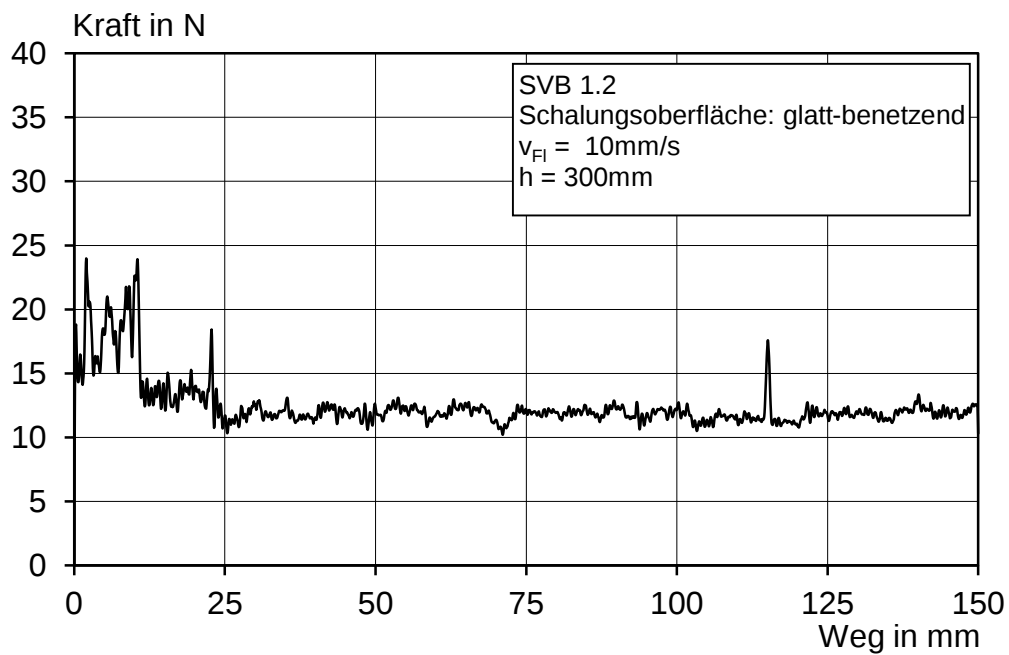


Bild B91: Versuch G36

Bild B92: Versuch G37Bild B93: Versuch G38

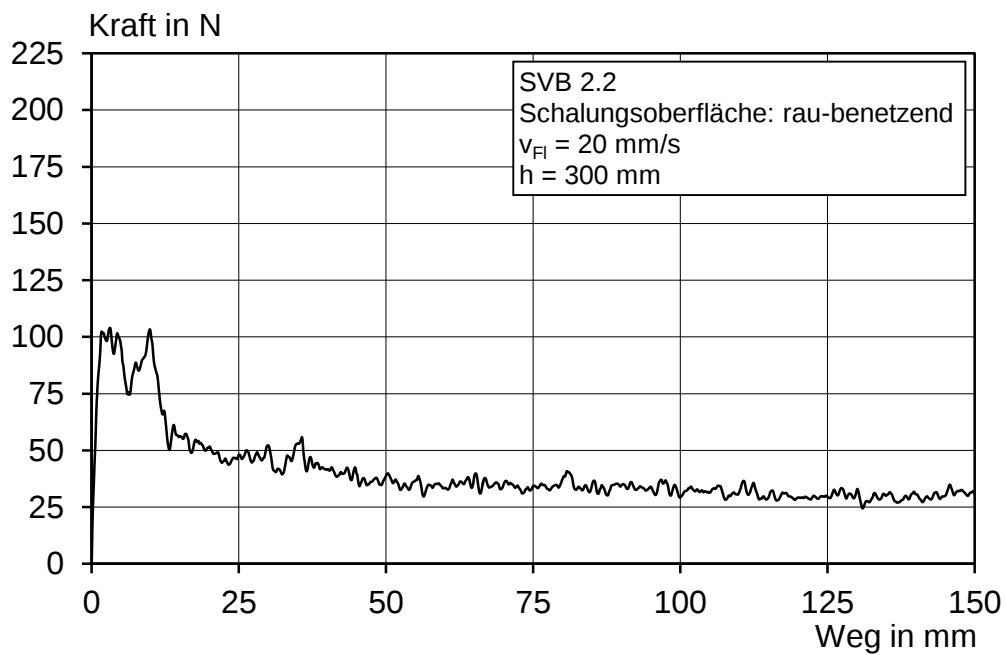


Bild B94: Versuch R1

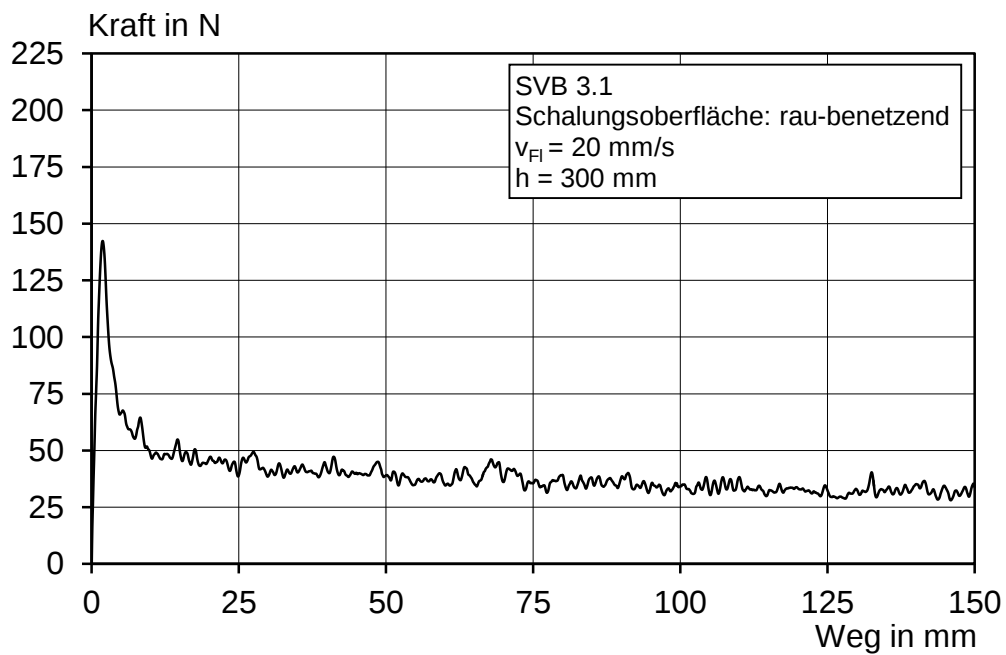
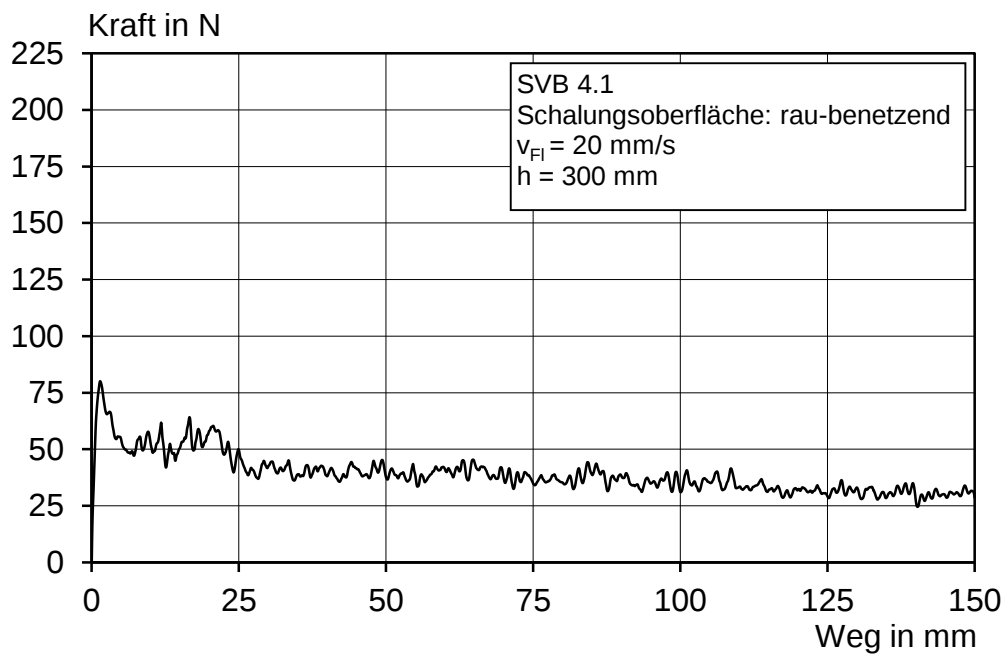
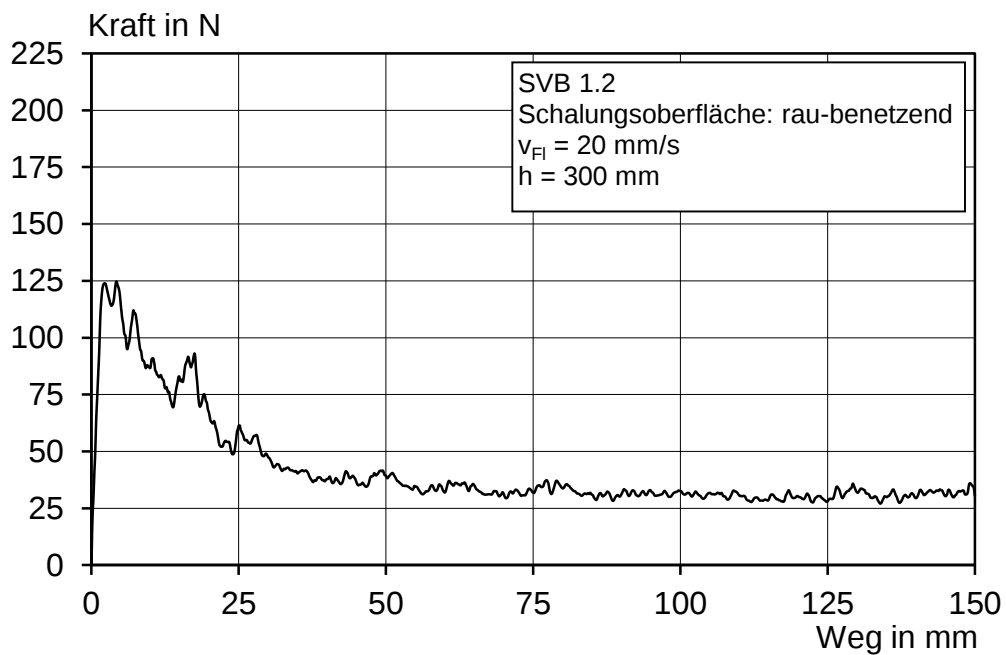


Bild B95: Versuch R2

Bild B96: Versuch R3Bild B97: Versuch R4

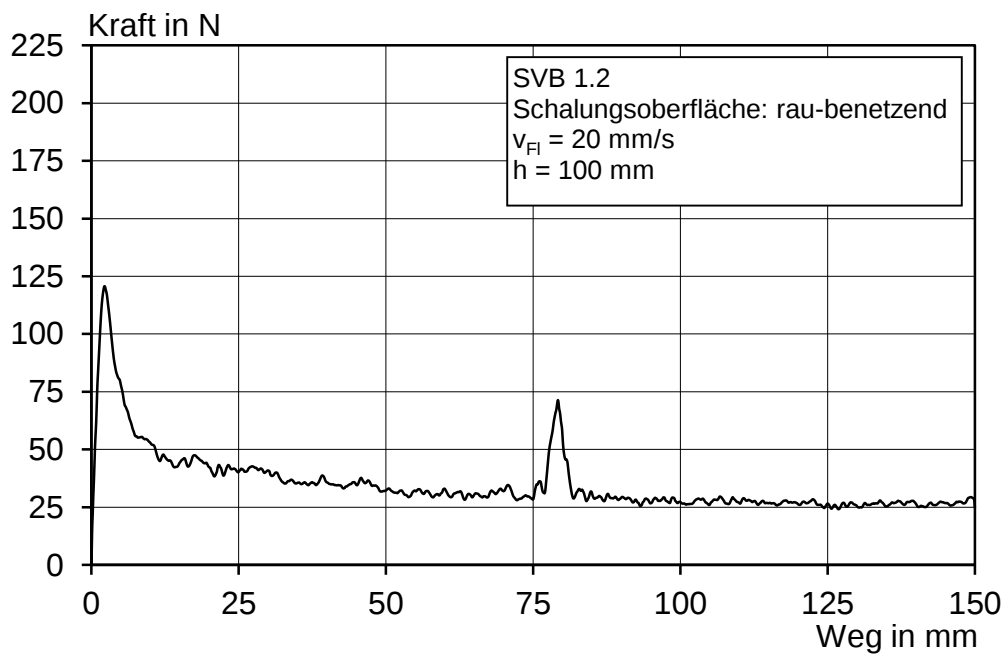


Bild B98: Versuch R5

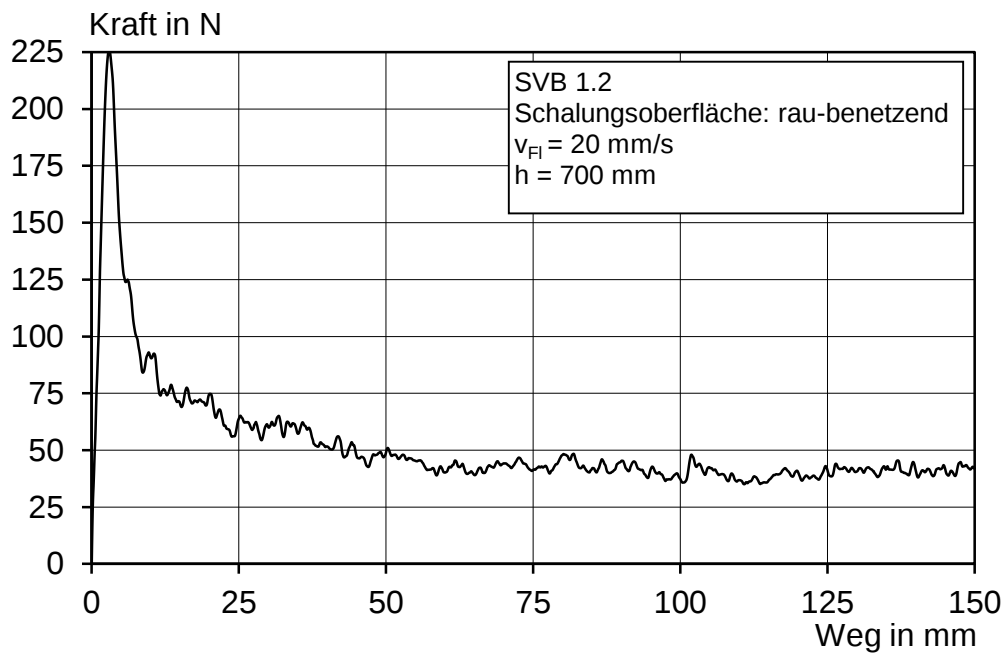


Bild B99: Versuch R6

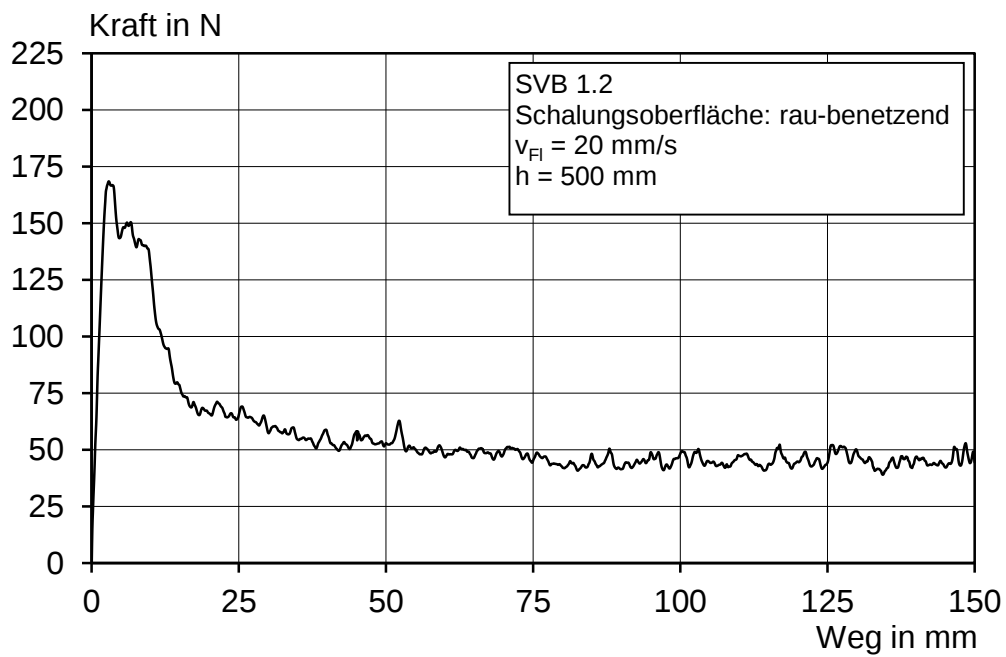


Bild B100: Versuch R7

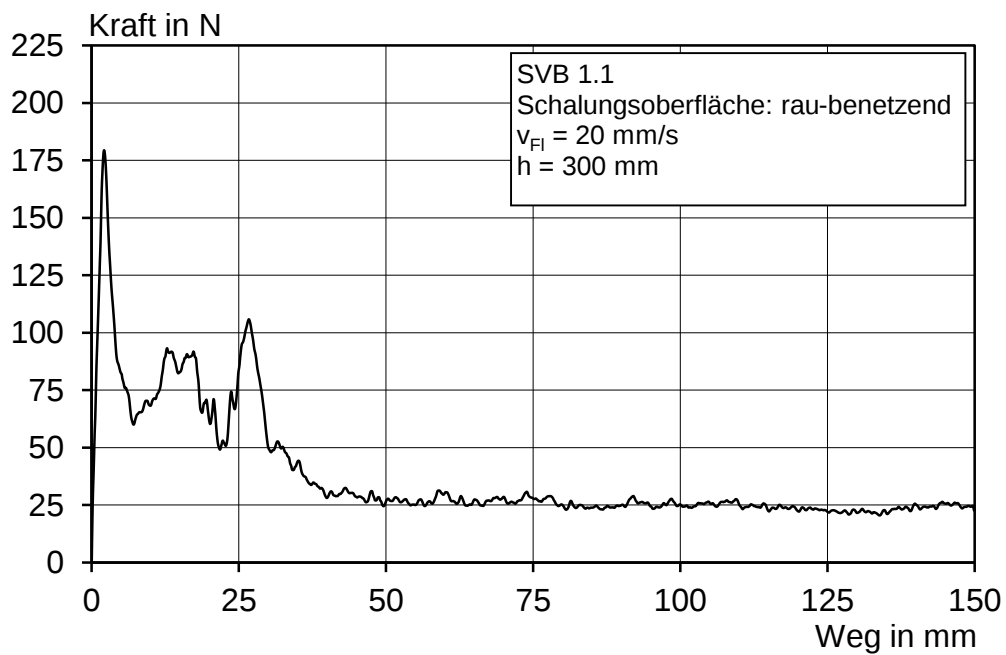


Bild B101: Versuch R8

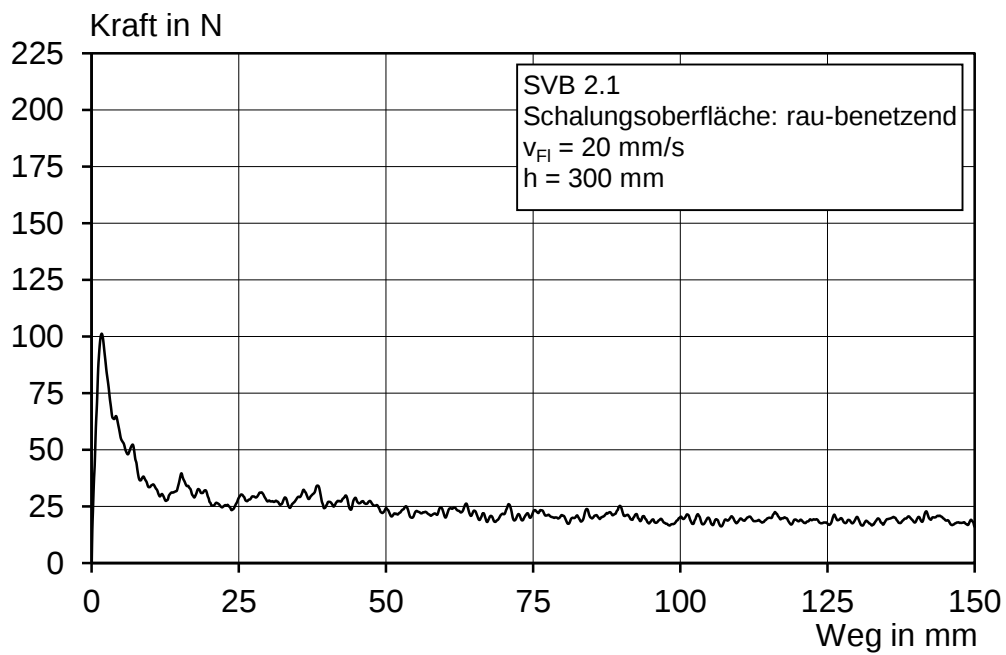


Bild B102: Versuch R9

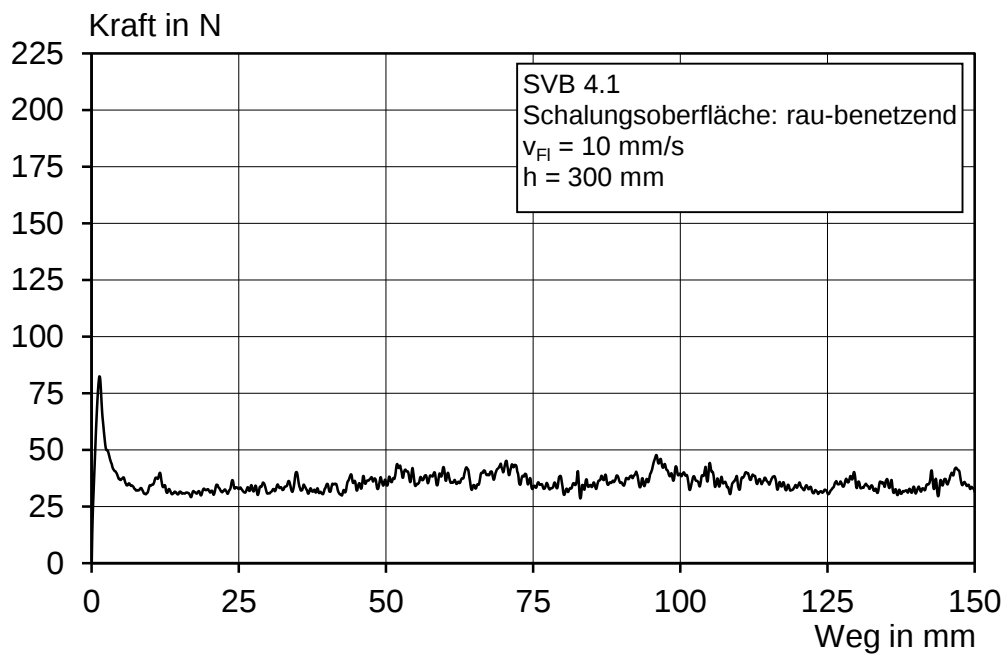


Bild B103: Versuch R10

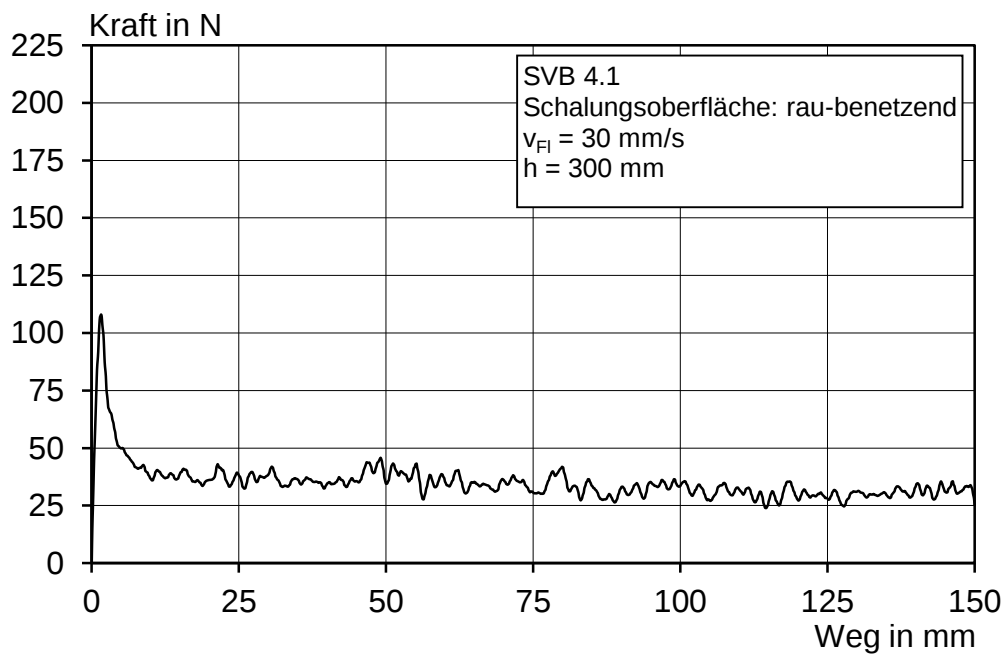


Bild B104: Versuch R11

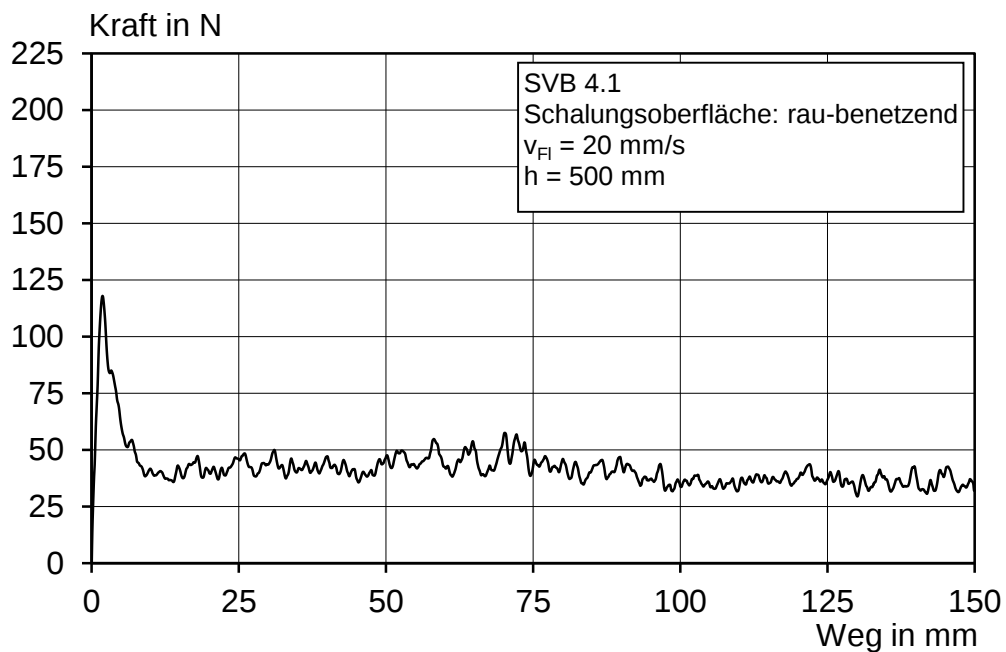


Bild B105: Versuch R12

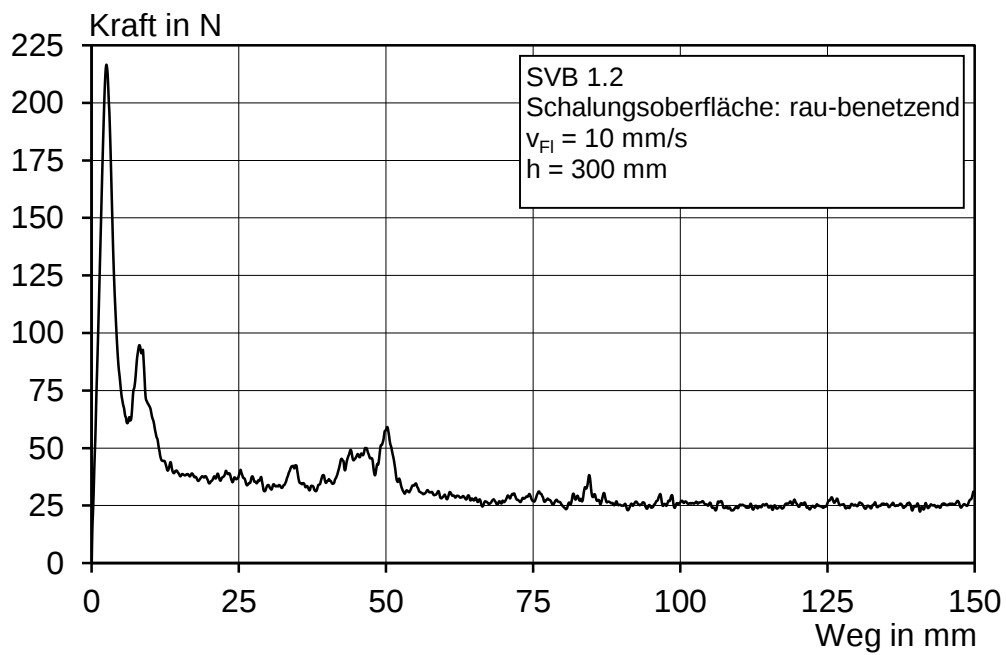


Bild B106: Versuch R13

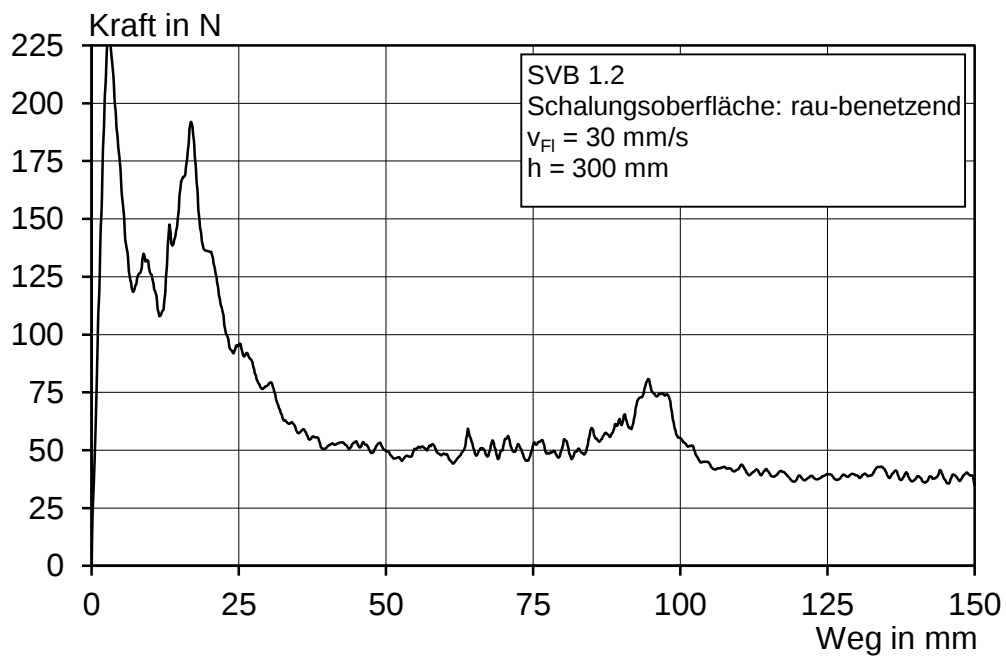


Bild B107: Versuch R14

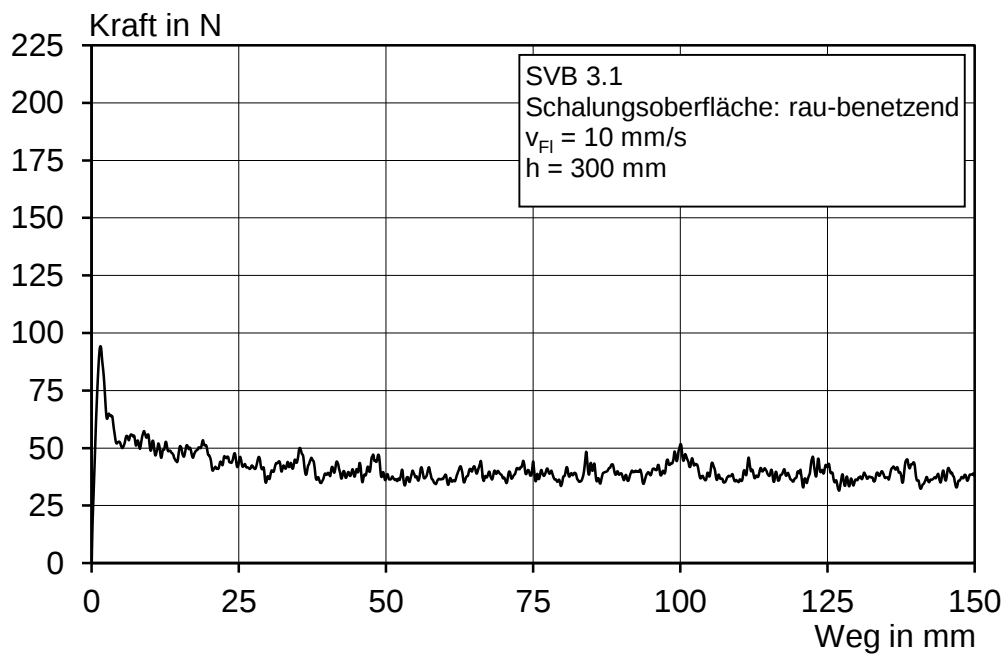


Bild B108: Versuch R15

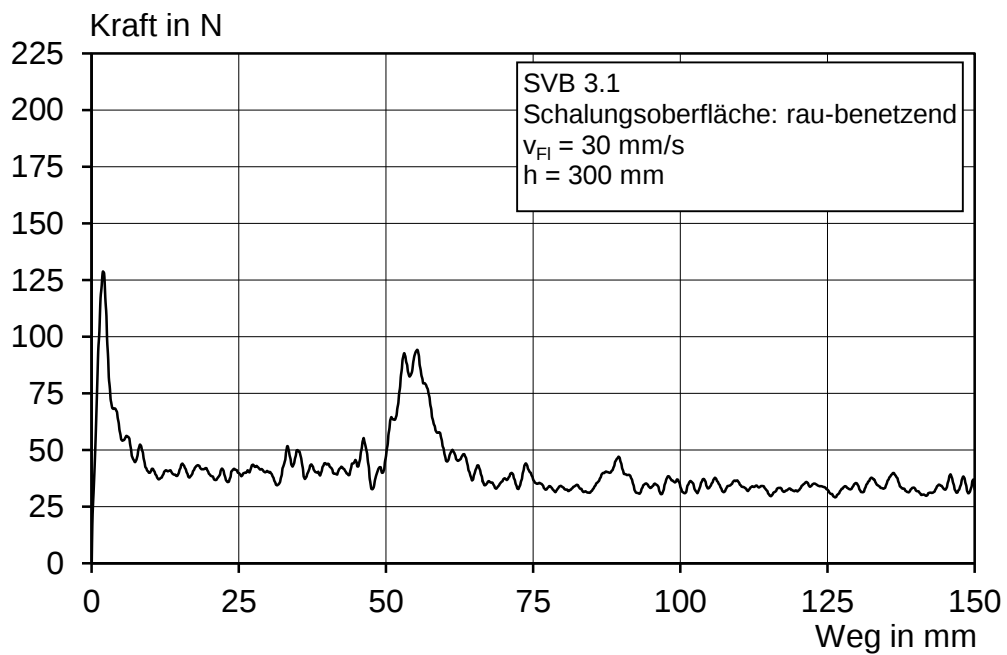


Bild B109: Versuch R16

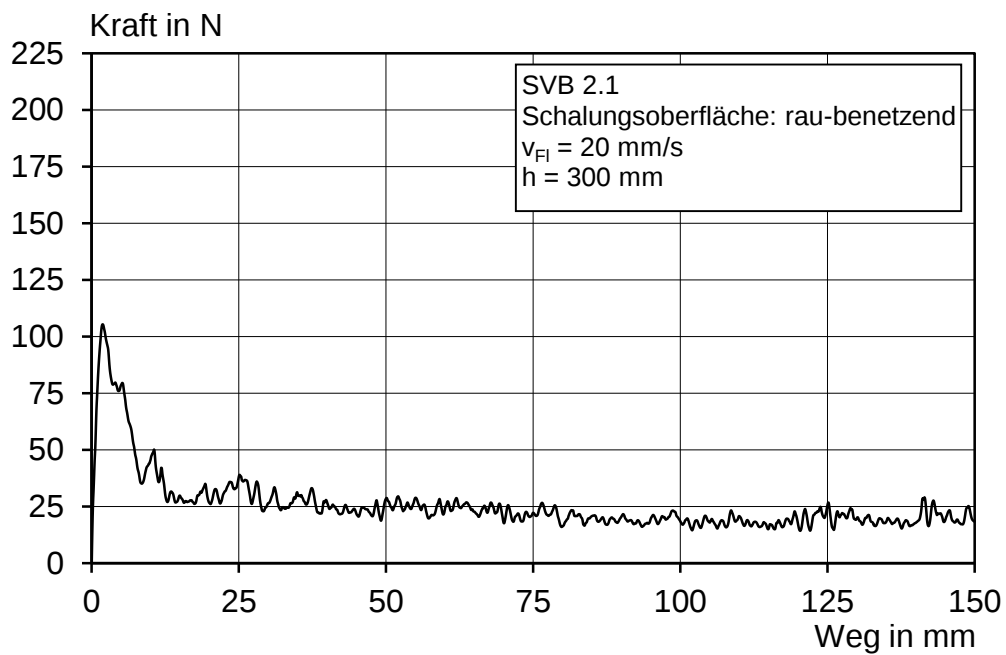


Bild B110: Versuch R17

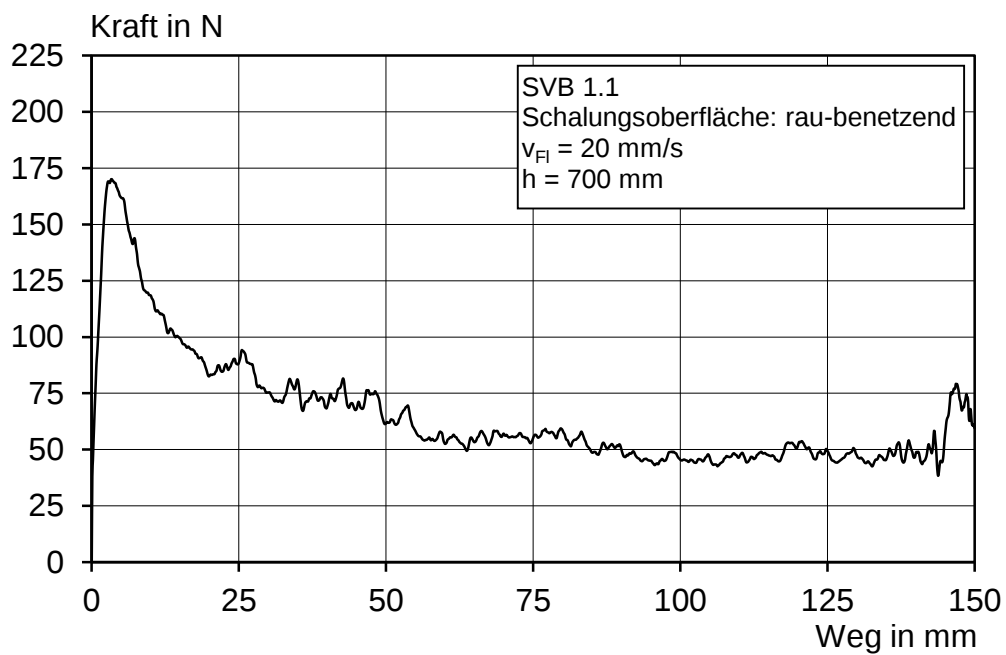


Bild B111: Versuch R18

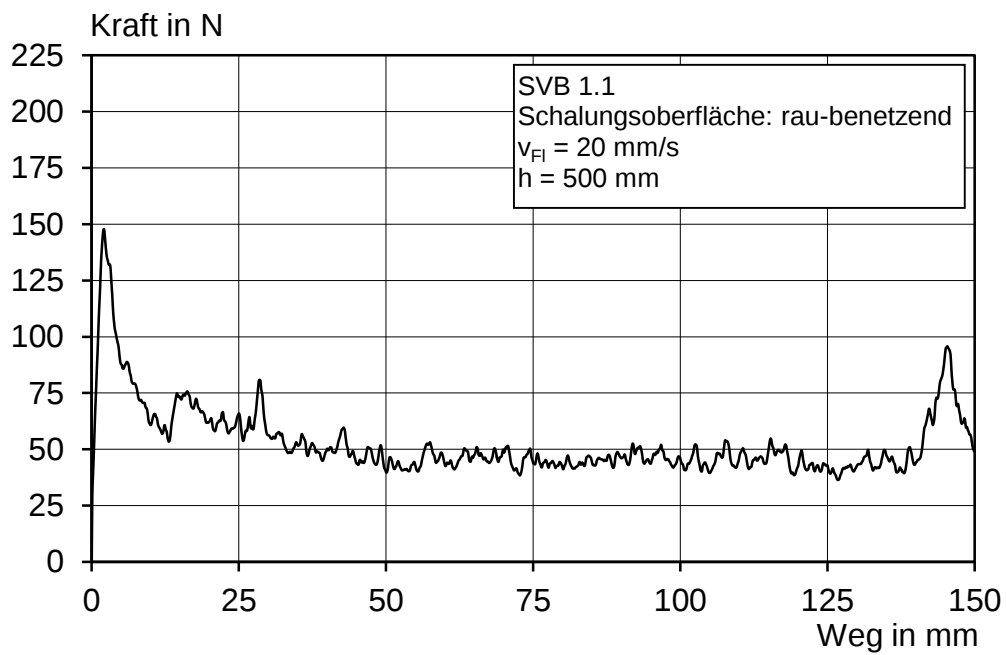


Bild B112: Versuch R19

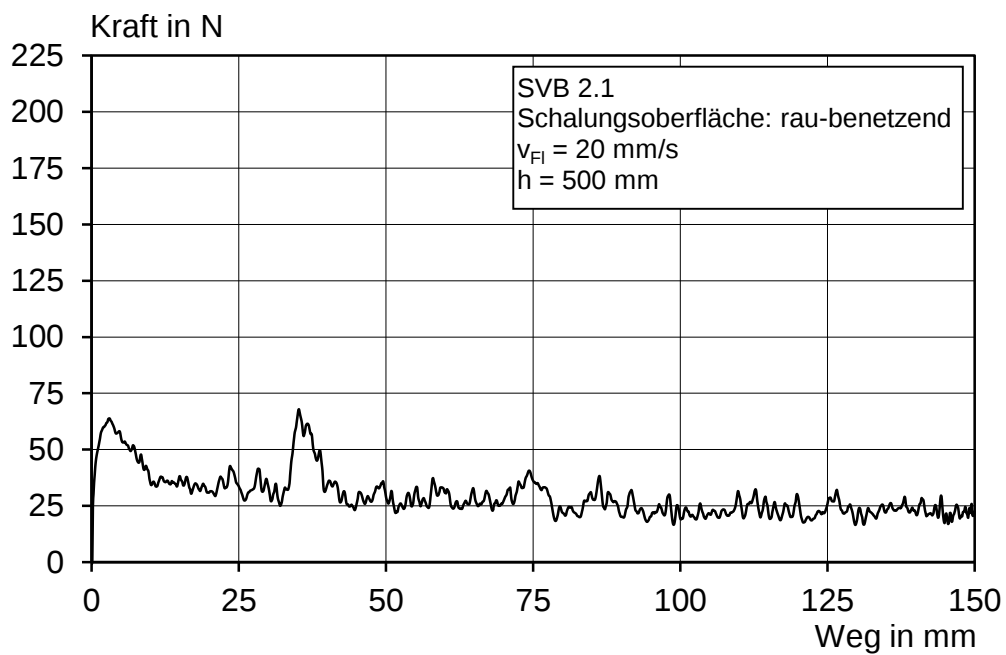


Bild B113: Versuch R20

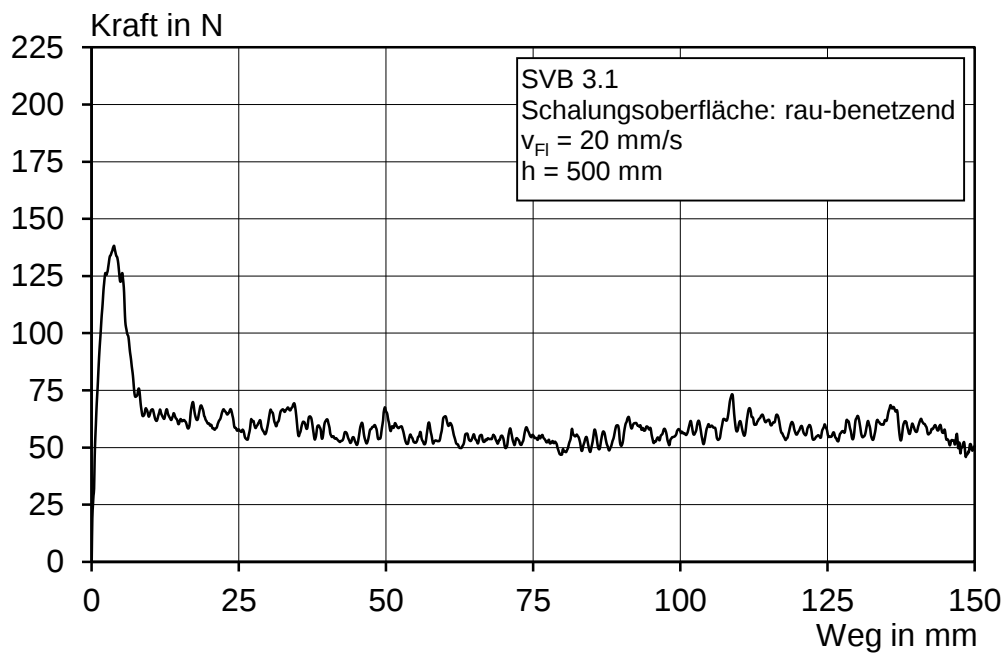


Bild B114: Versuch R21

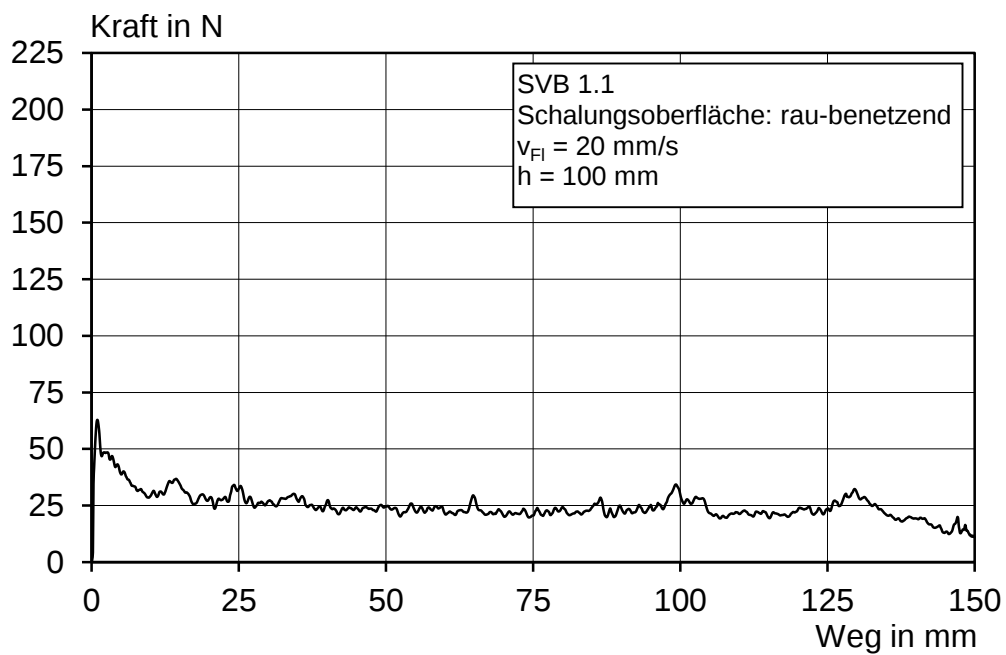


Bild B115: Versuch R22

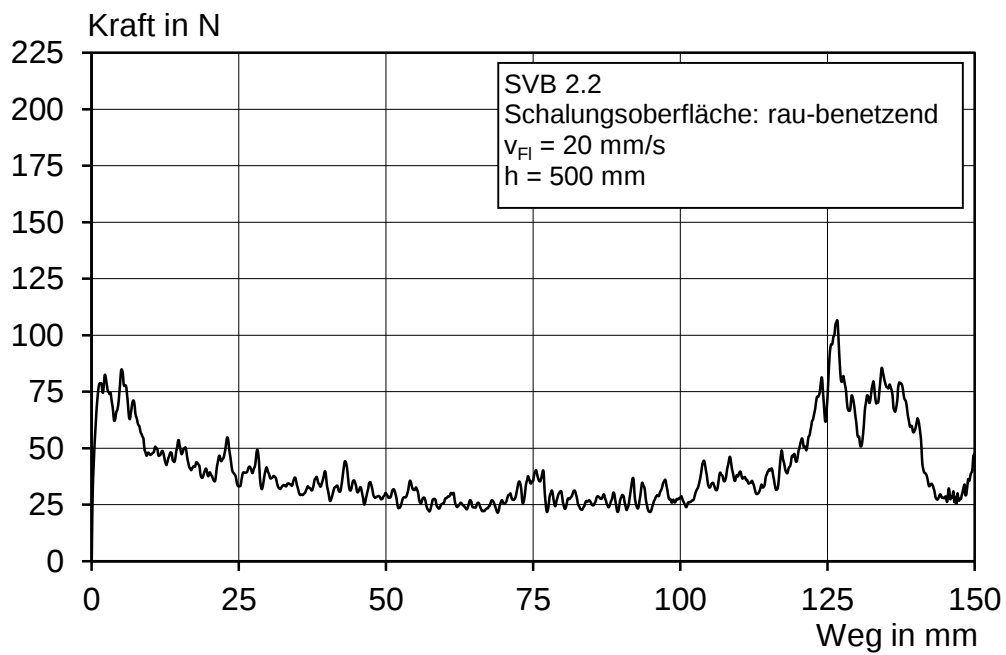


Bild B116: Versuch R23

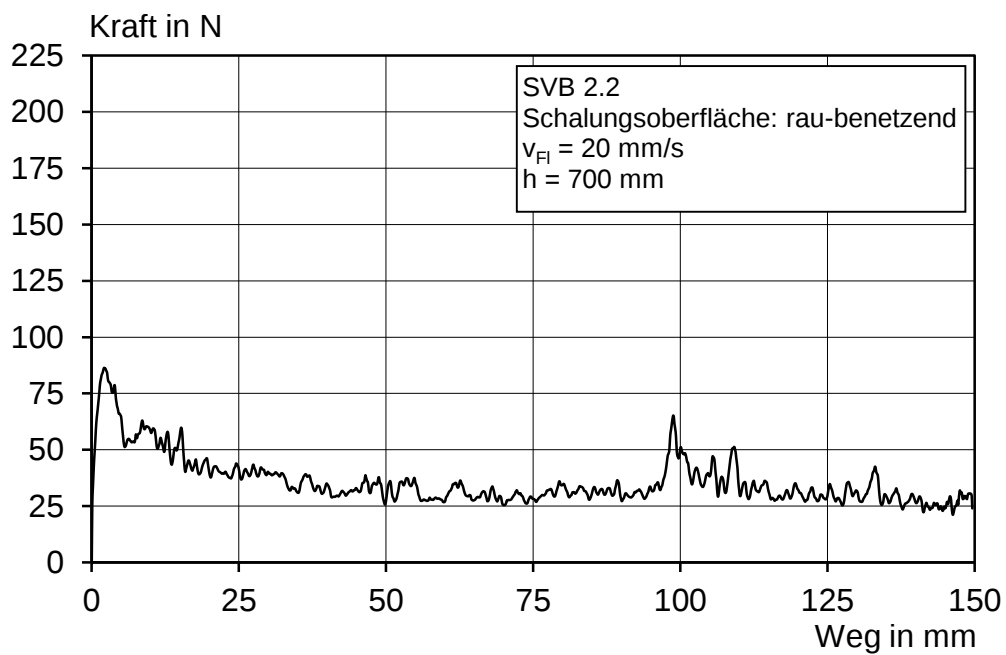


Bild B117: Versuch R24

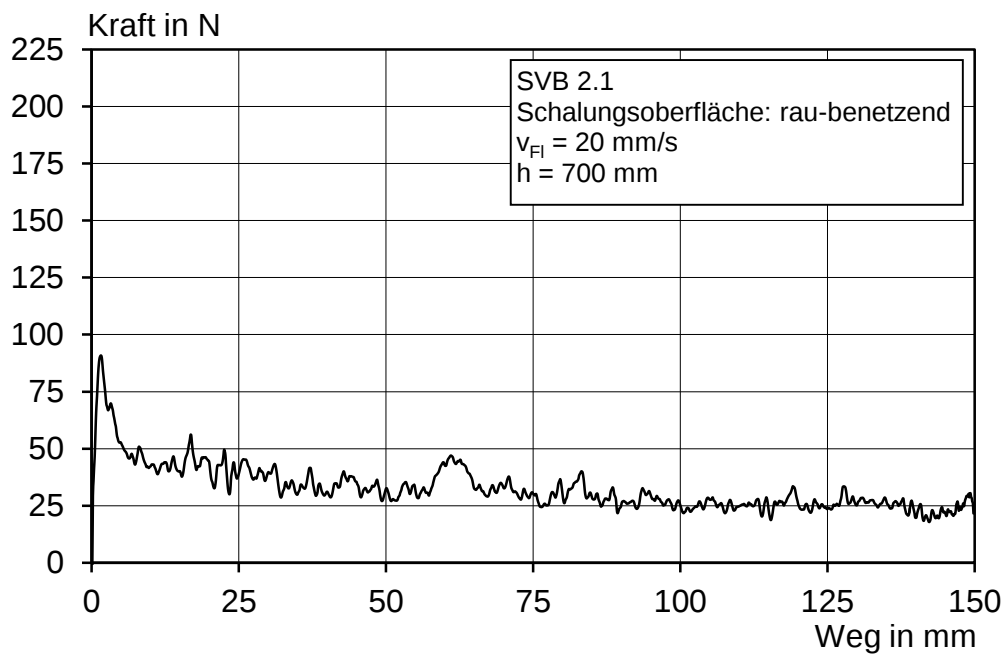


Bild B118: Versuch R25

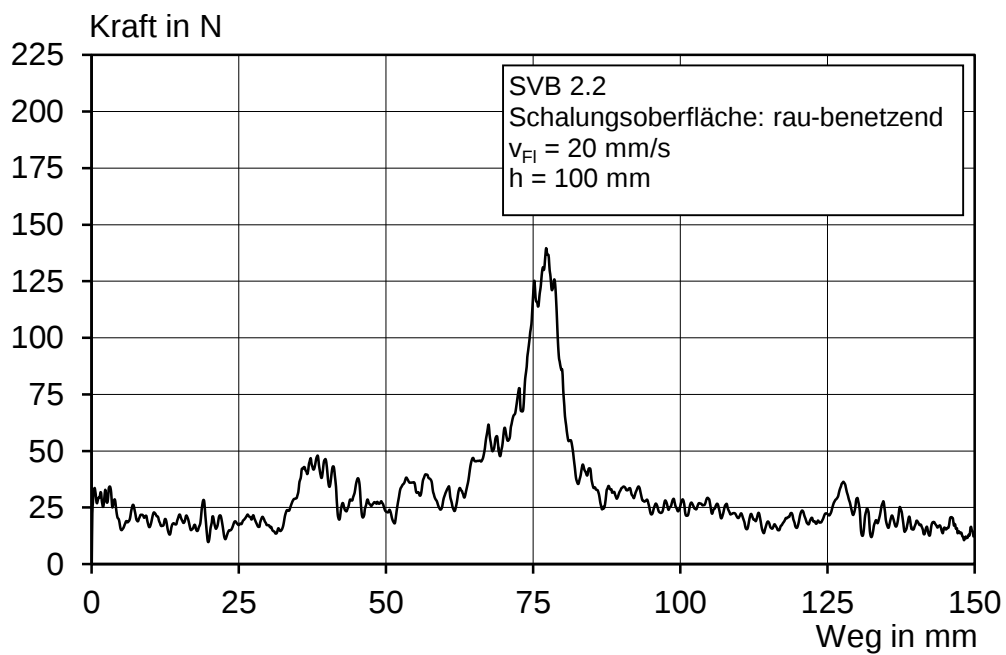


Bild B119: Versuch R26

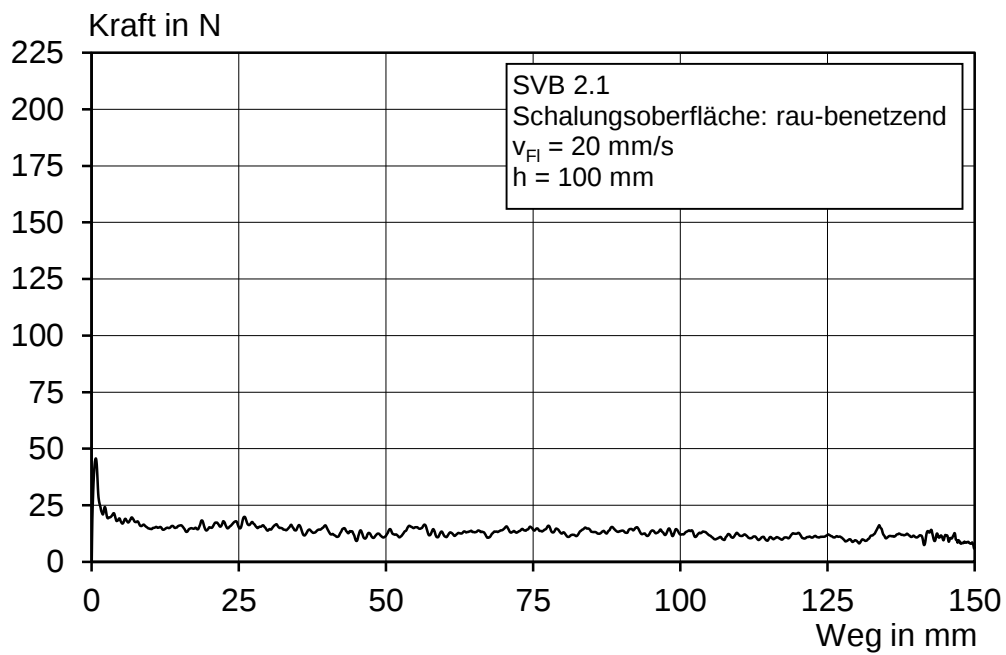


Bild B120: Versuch R27

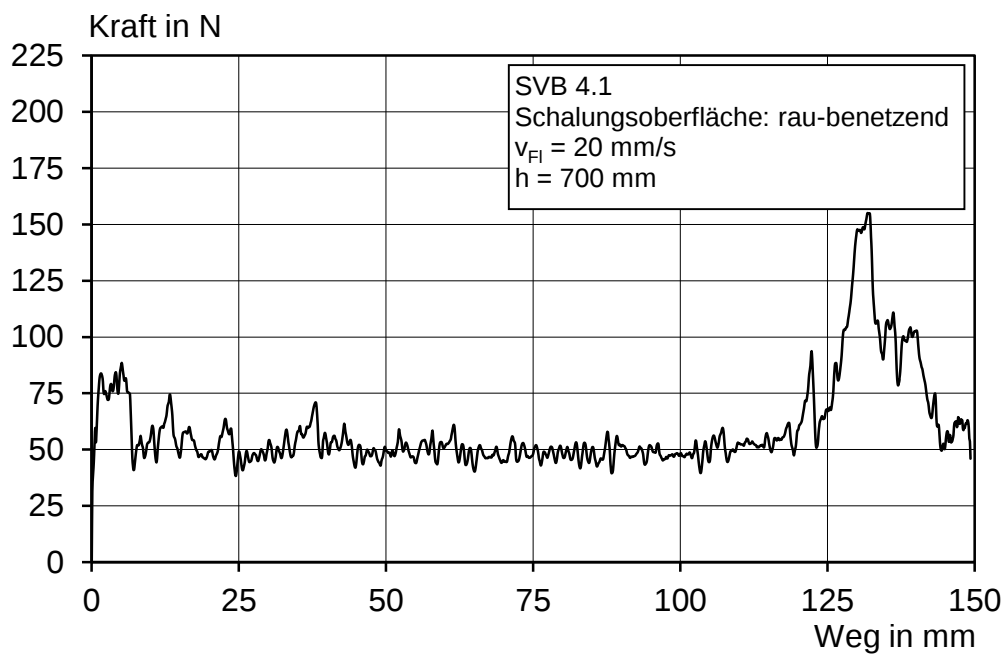


Bild B121: Versuch R28

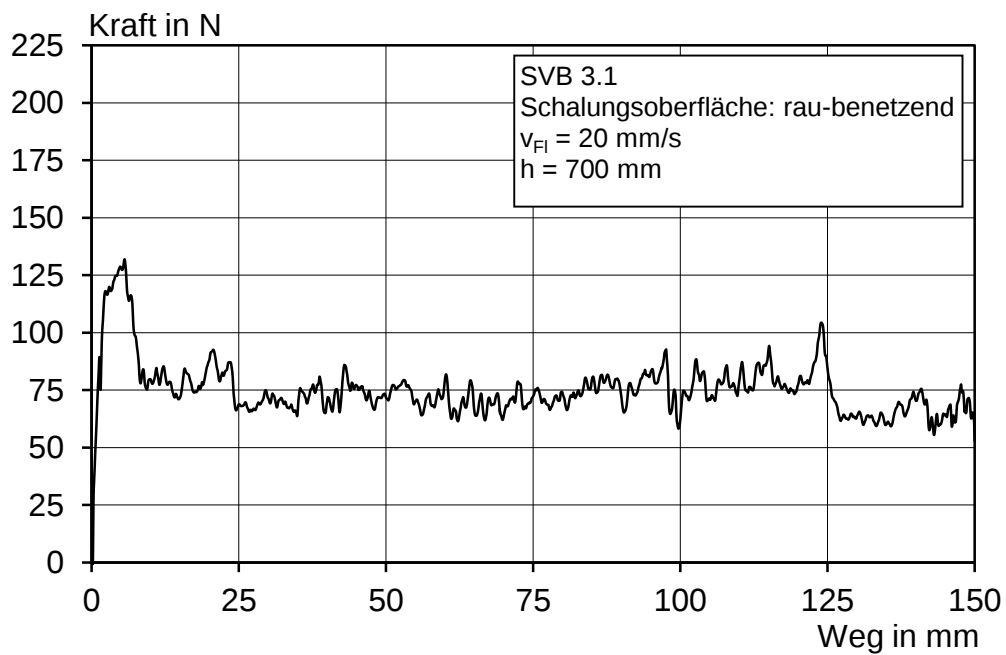


Bild B122: Versuch R29

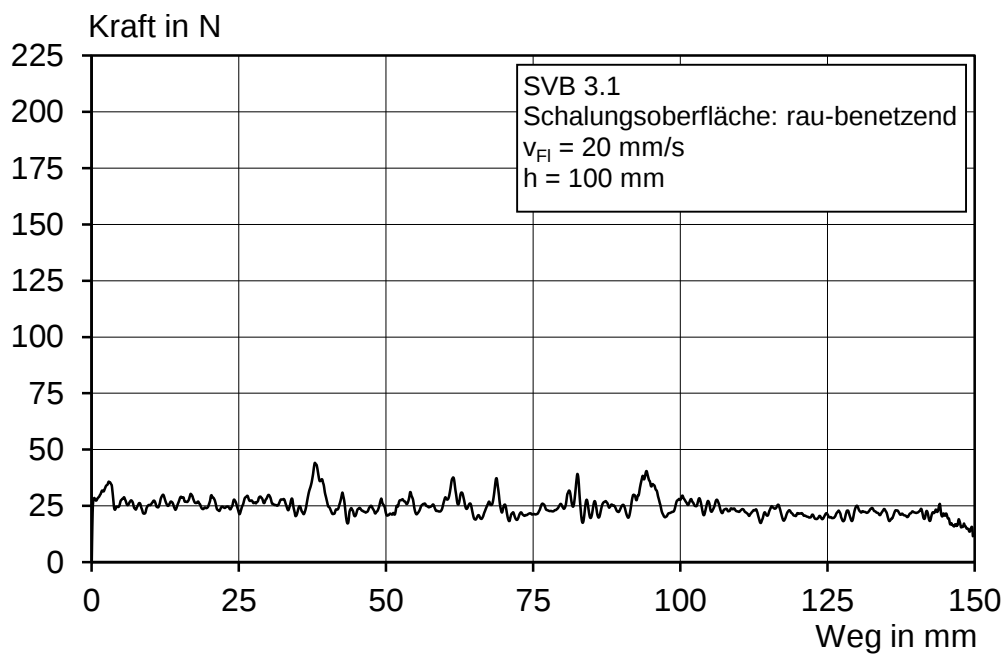


Bild B123: Versuch R30

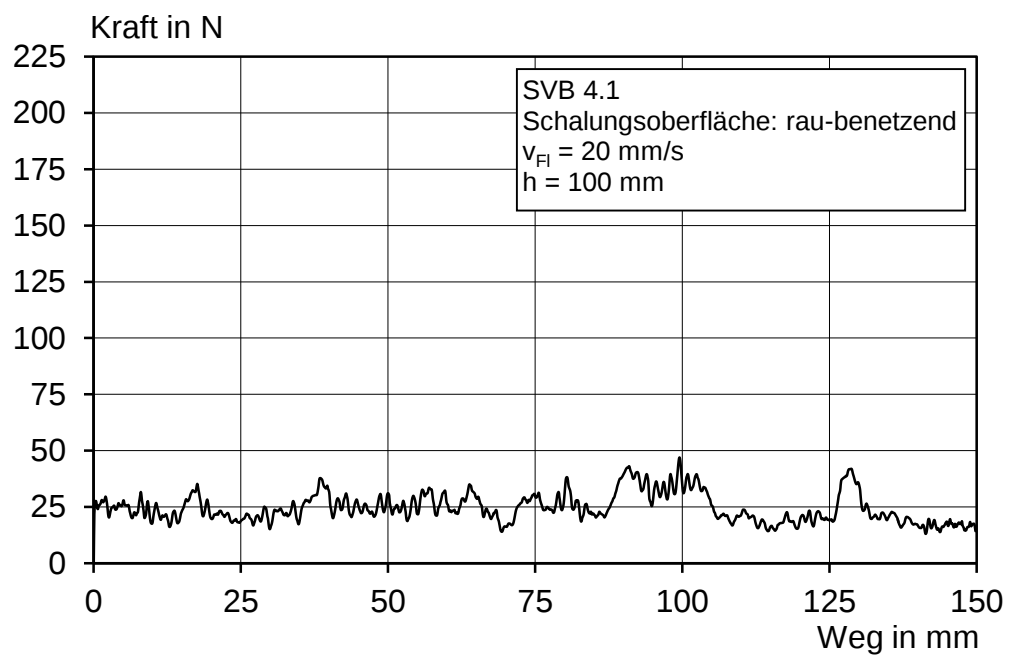


Bild B124: Versuch R31

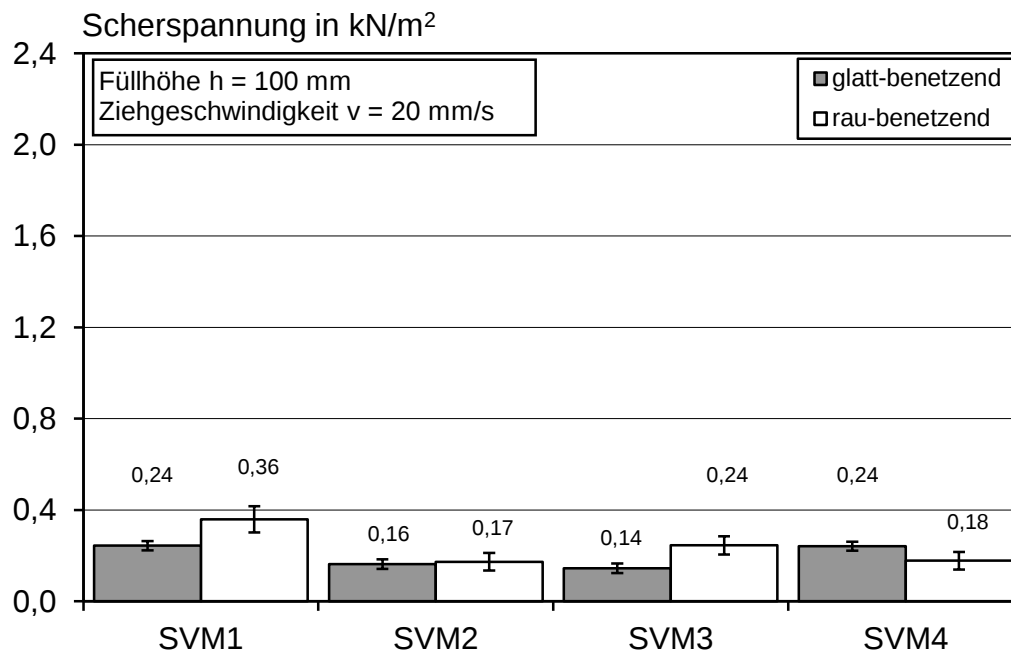


Bild B125: Gegenüberstellung der SVM-Typen, Füllhöhe 100 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

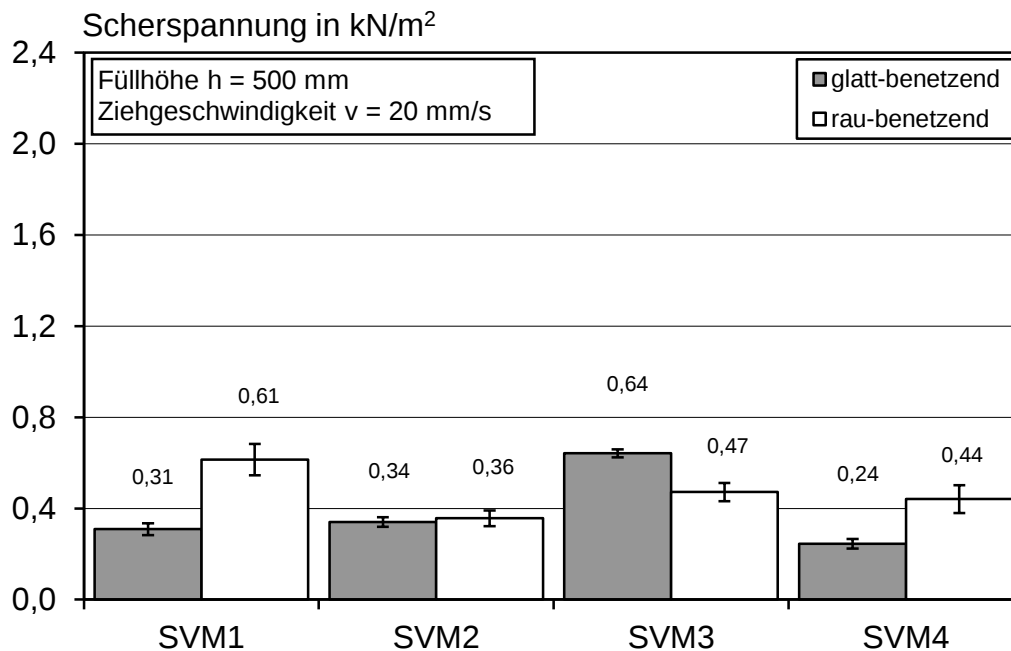


Bild B126: Gegenüberstellung der SVM-Typen, Füllhöhe 500 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

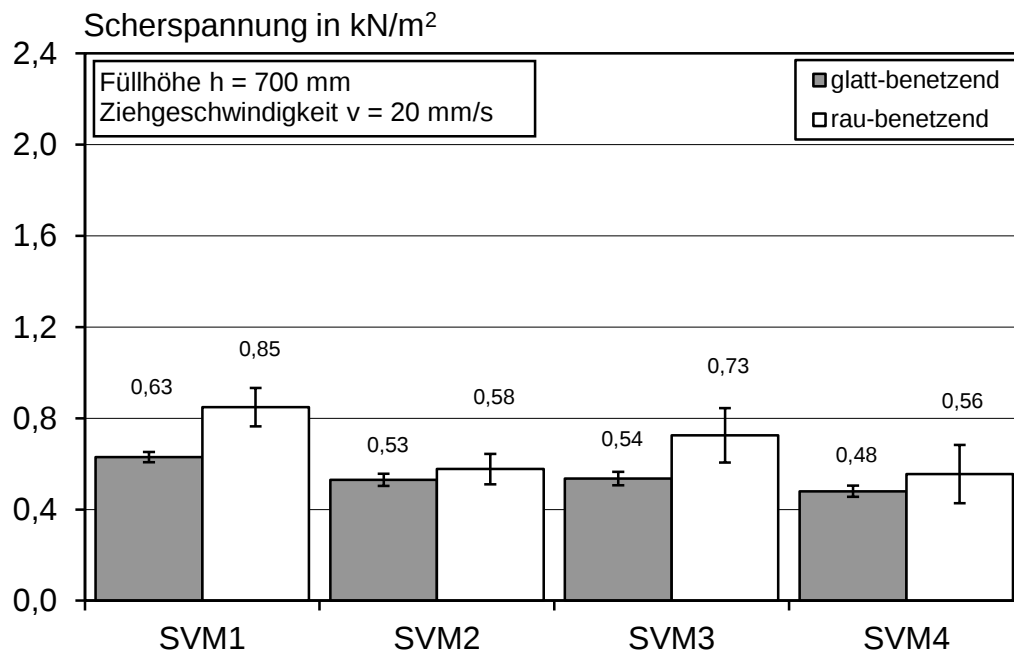


Bild B127: Gegenüberstellung der SVM-Typen, Füllhöhe 700 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

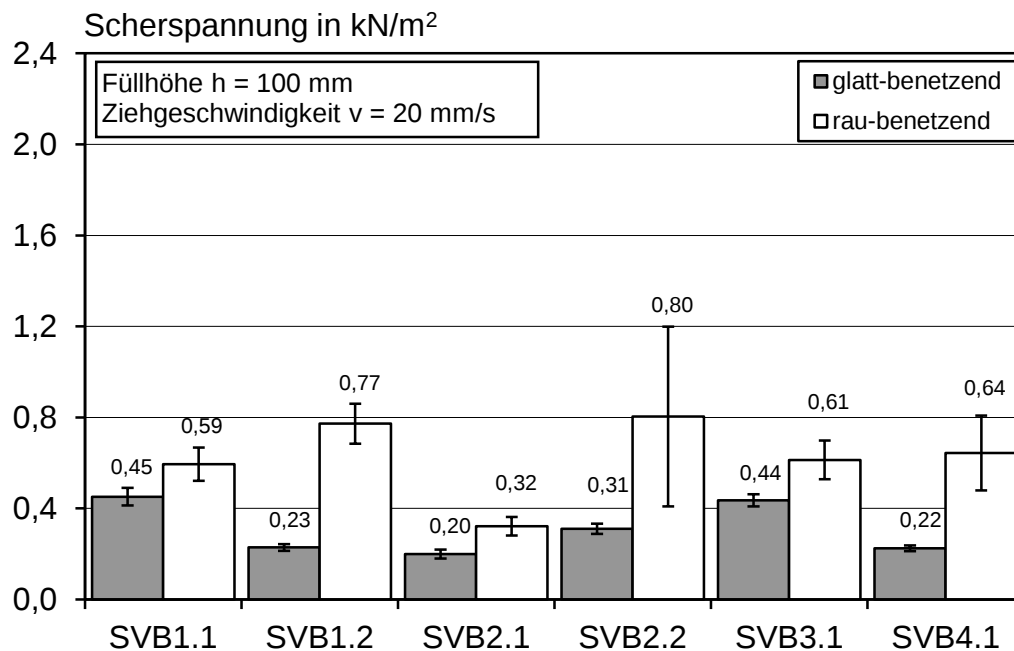


Bild B128: Gegenüberstellung der SVB-Typen, Füllhöhe 100 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

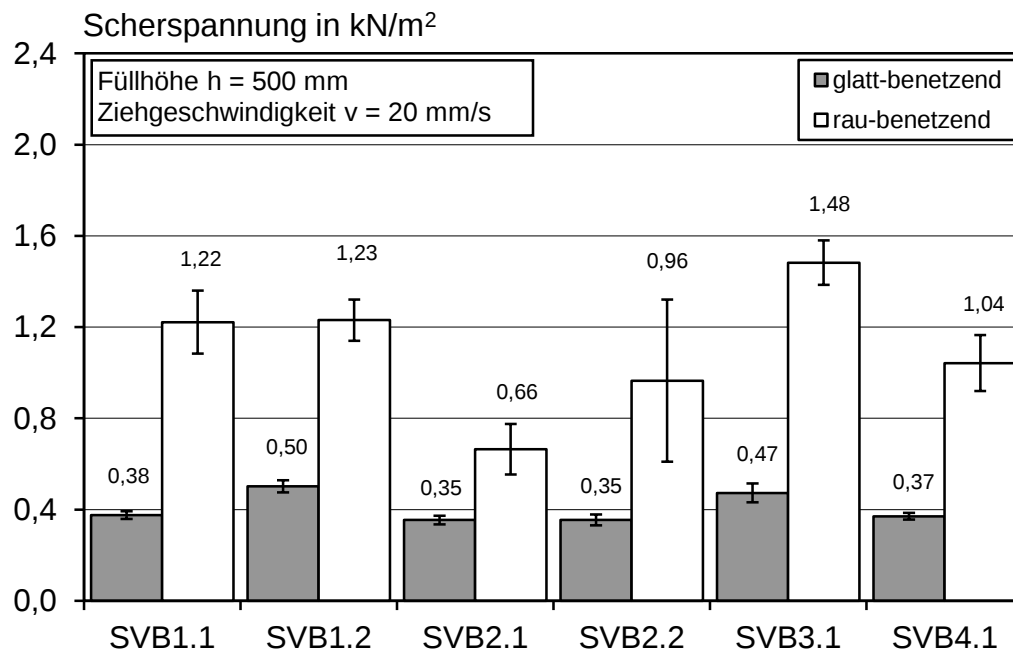


Bild B129: Gegenüberstellung der SVB-Typen, Füllhöhe 500 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

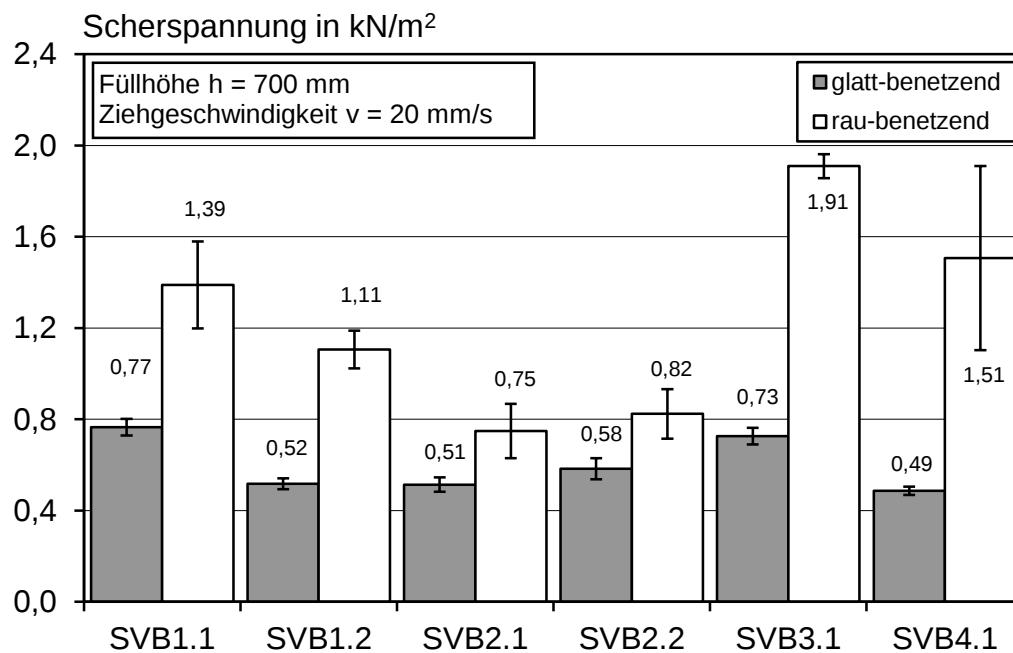


Bild B130: Gegenüberstellung der SVB-Typen, Füllhöhe 700 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

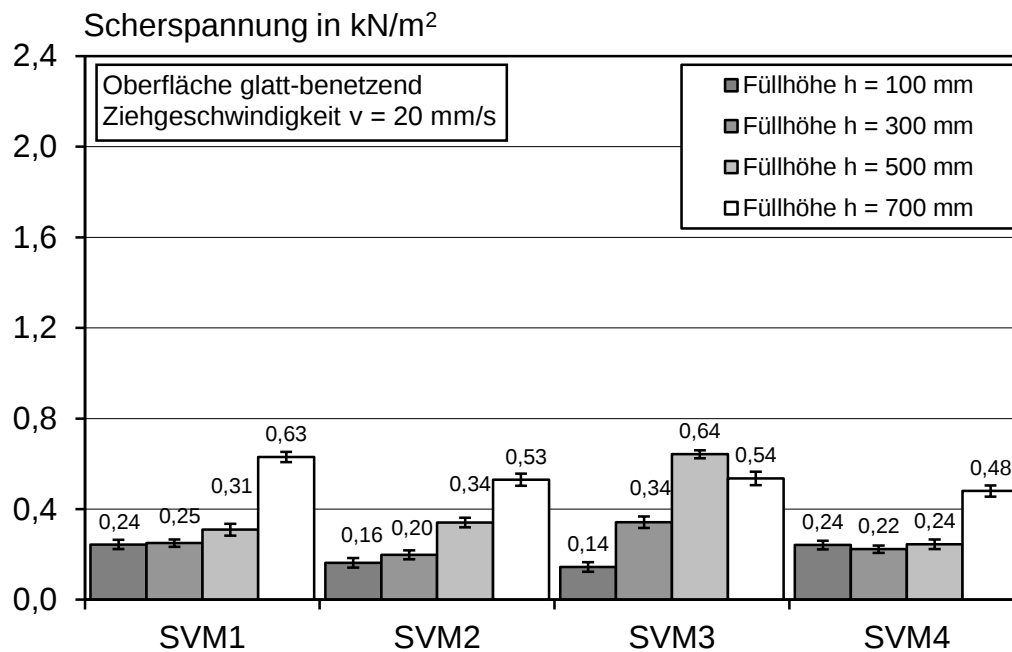


Bild B131: Füllhöhenvergleich der SVM, Oberfläche glatt-benetzend und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

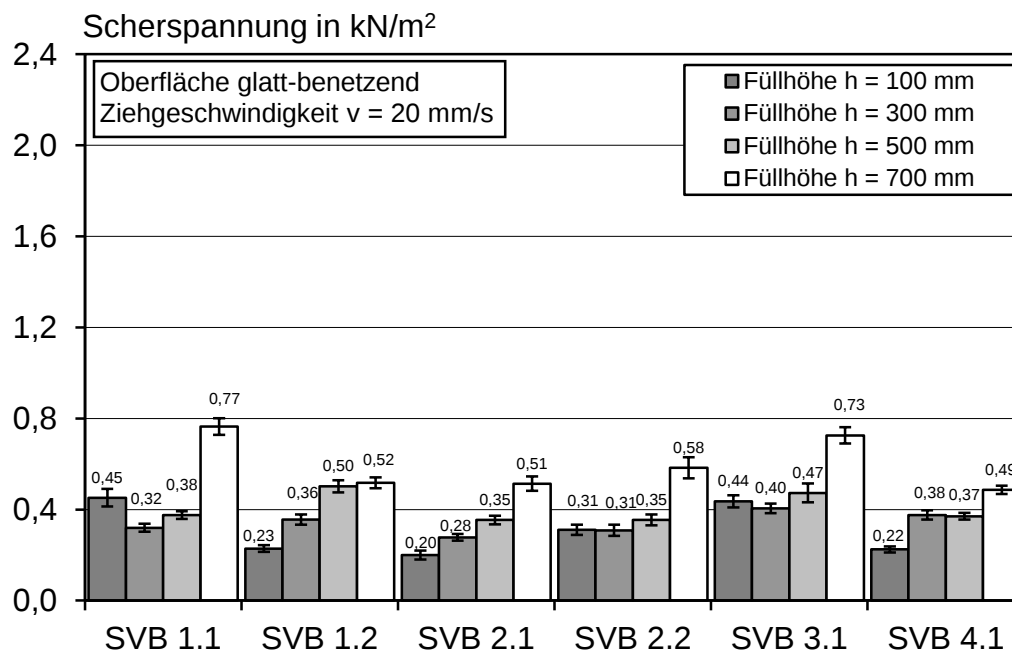


Bild B132: Füllhöhenvergleich der SVB, Oberfläche glatt-benetzend und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

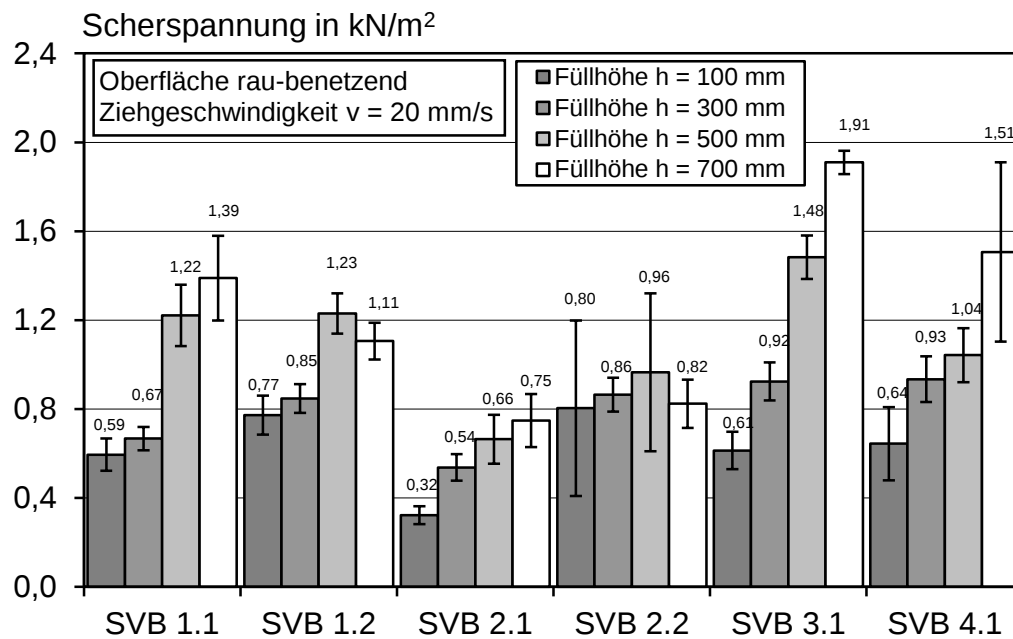


Bild B133: Füllhöhenvergleich der SVB, Oberfläche rau-benetzend und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

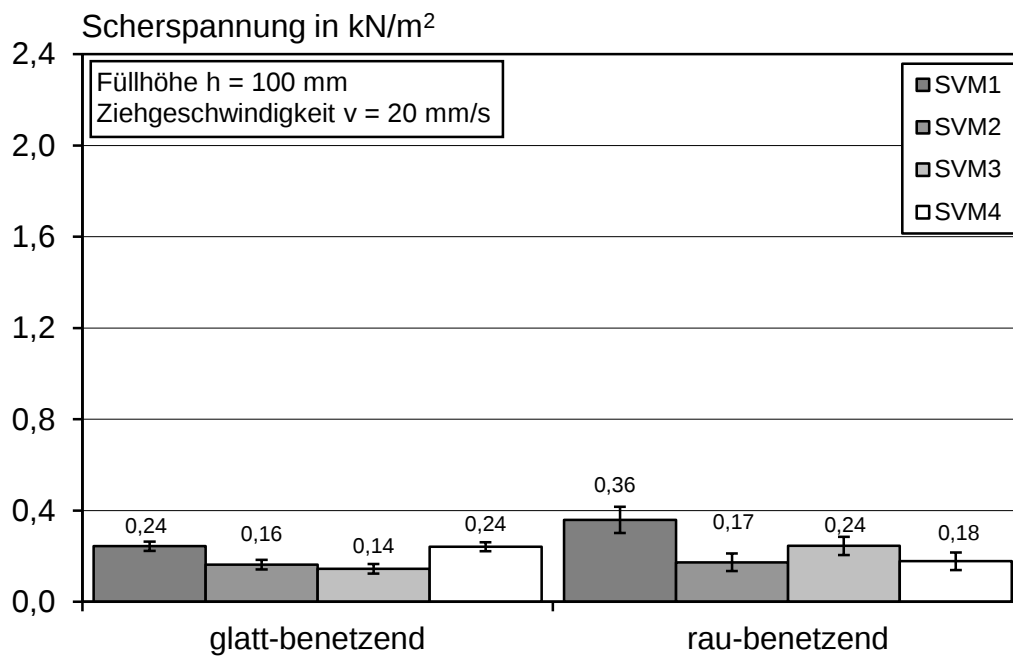


Bild B134: Oberflächenvergleich der SVM, Füllhöhe 100 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

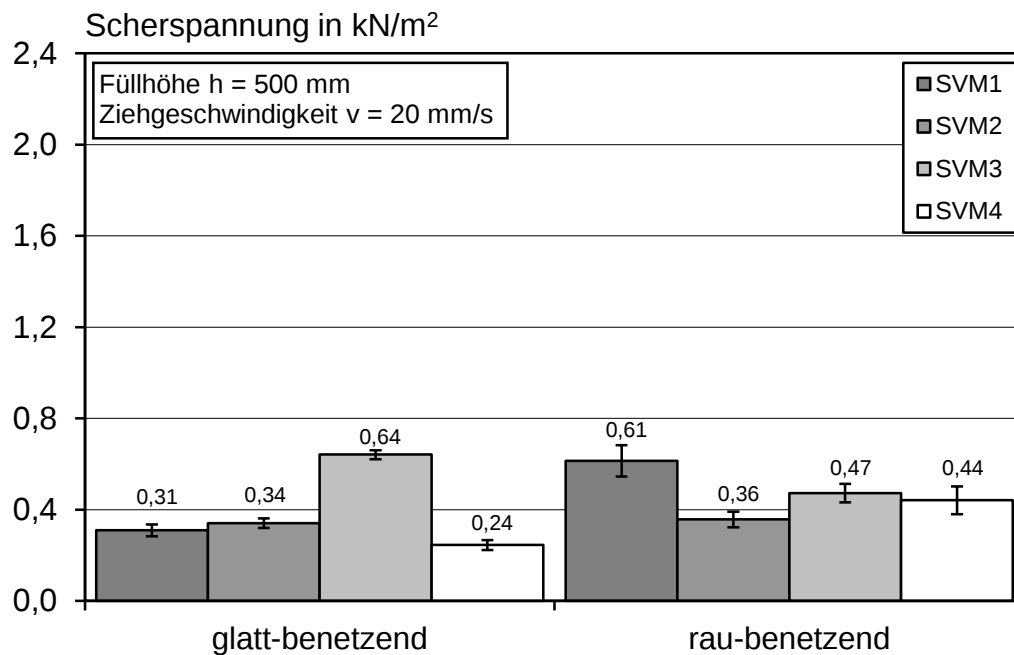


Bild B135: Oberflächenvergleich der SVM, Füllhöhe 500 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

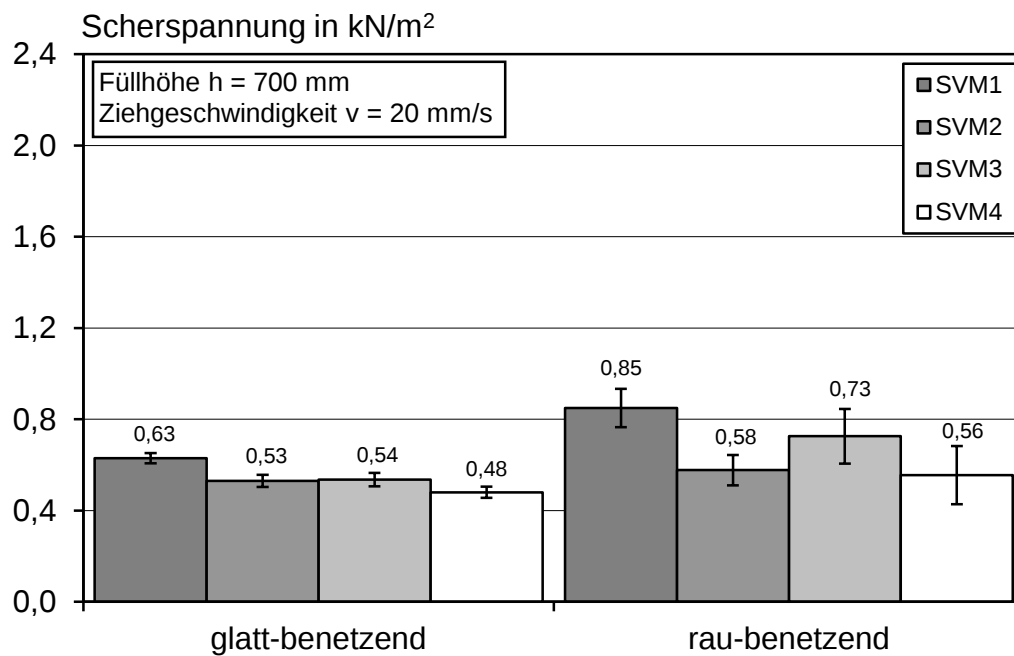


Bild B136: Oberflächenvergleich der SVM, Füllhöhe 700 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

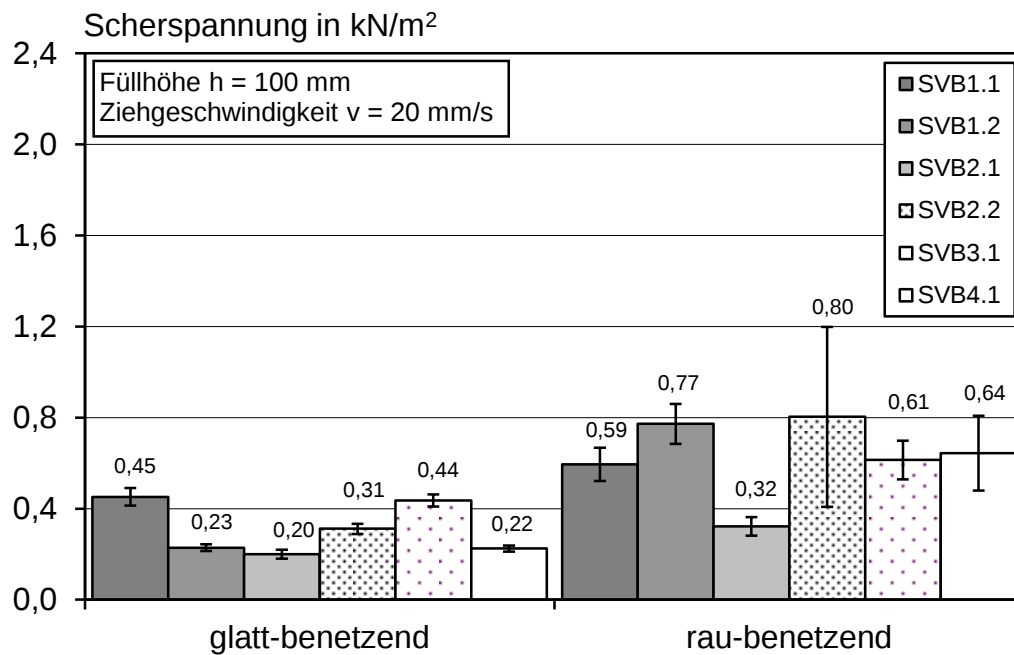


Bild B137: Oberflächenvergleich der SVB, Füllhöhe 100 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

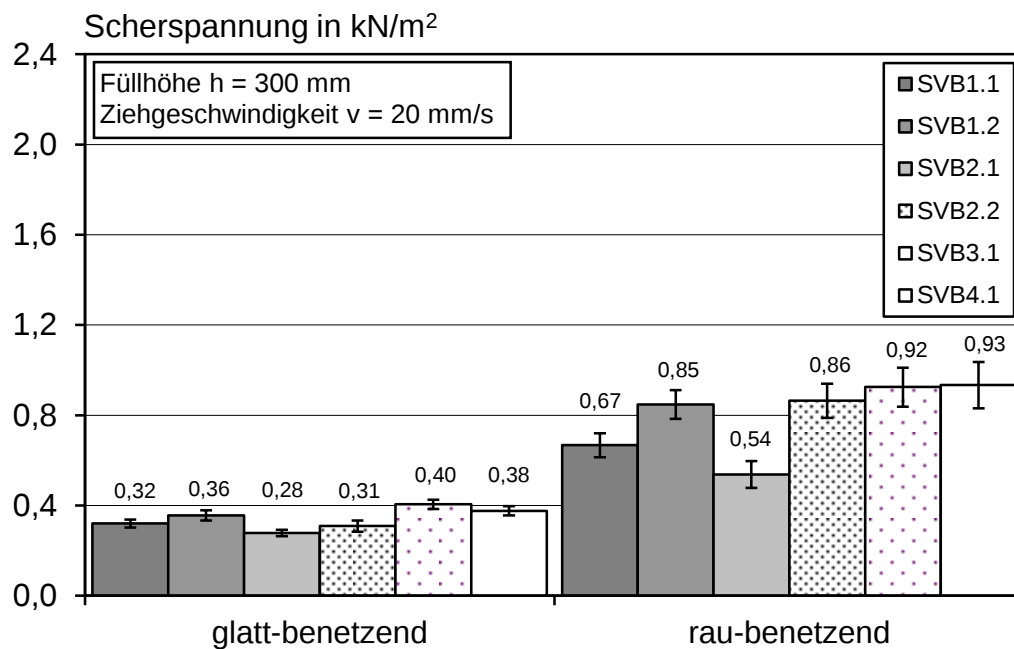


Bild B138: Oberflächenvergleich der SVB, Füllhöhe 300 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

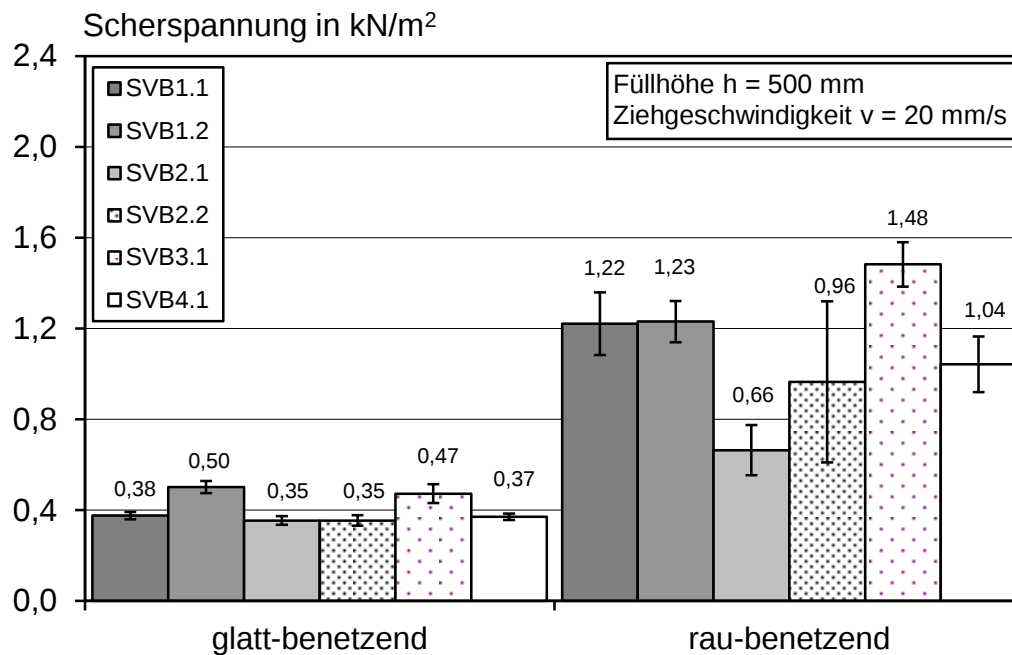


Bild B139: Oberflächenvergleich der SVB, Füllhöhe 500 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

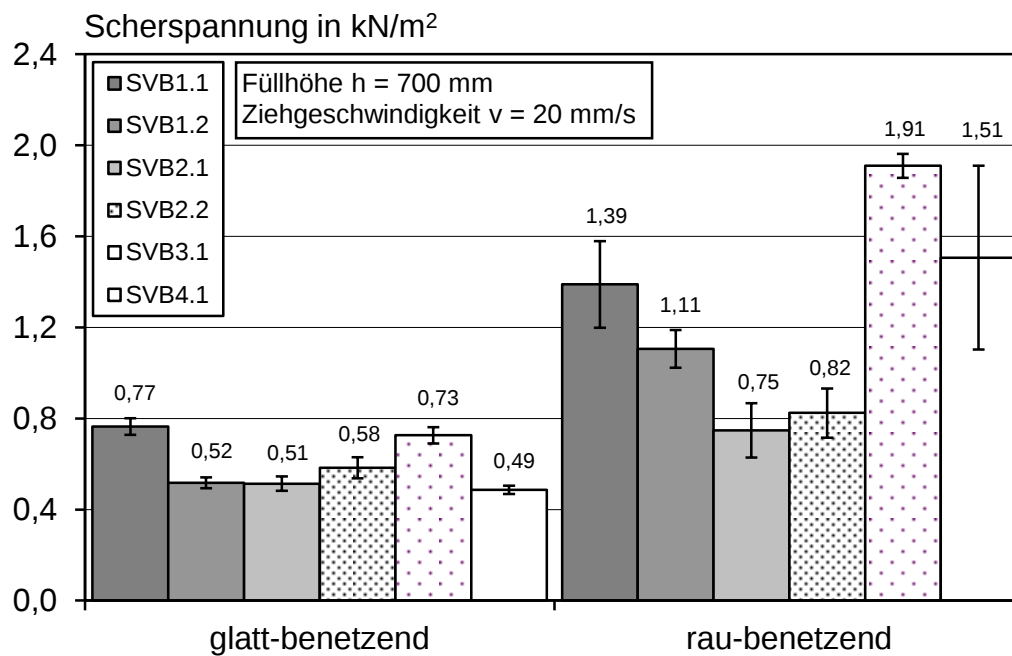


Bild B140: Oberflächenvergleich der SVB, Füllhöhe 700 mm und Ziehgeschwindigkeit 20 mm/s

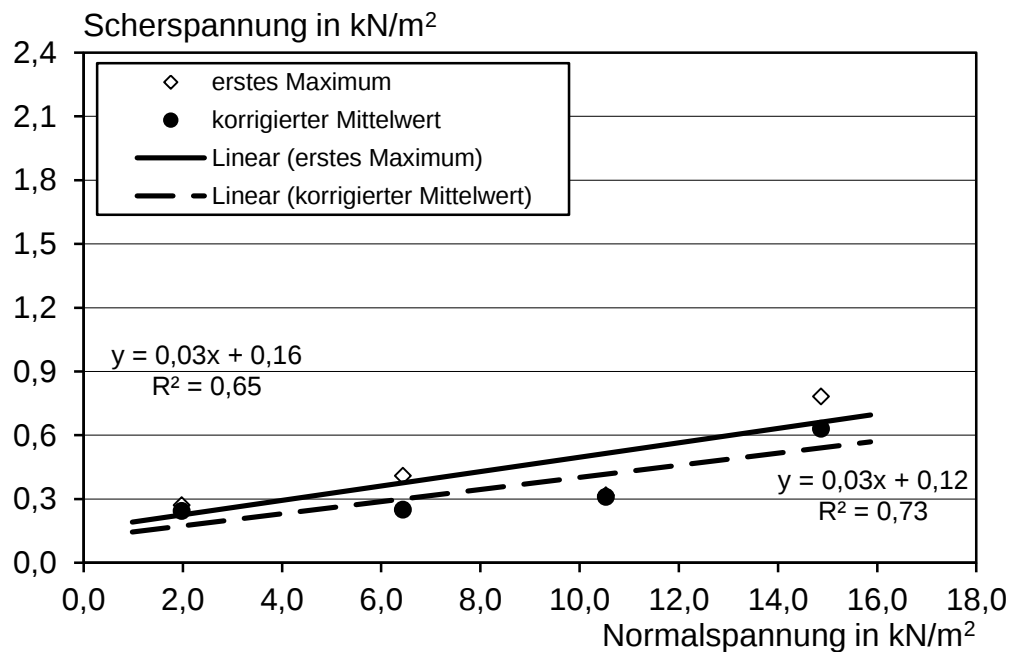


Bild B141: SVM1 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

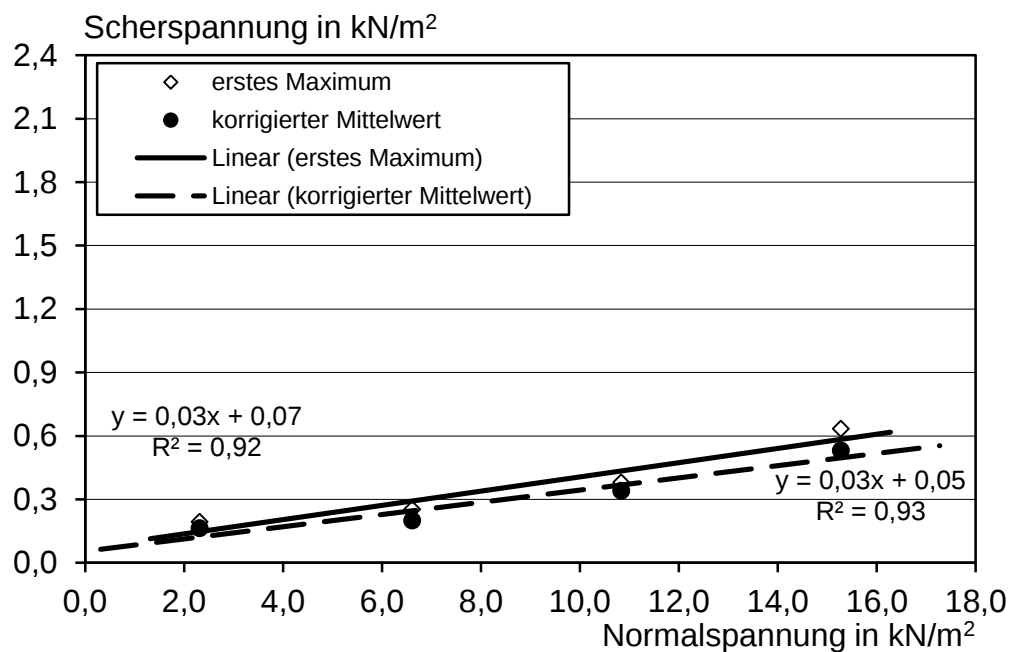


Bild B142: SVM2 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

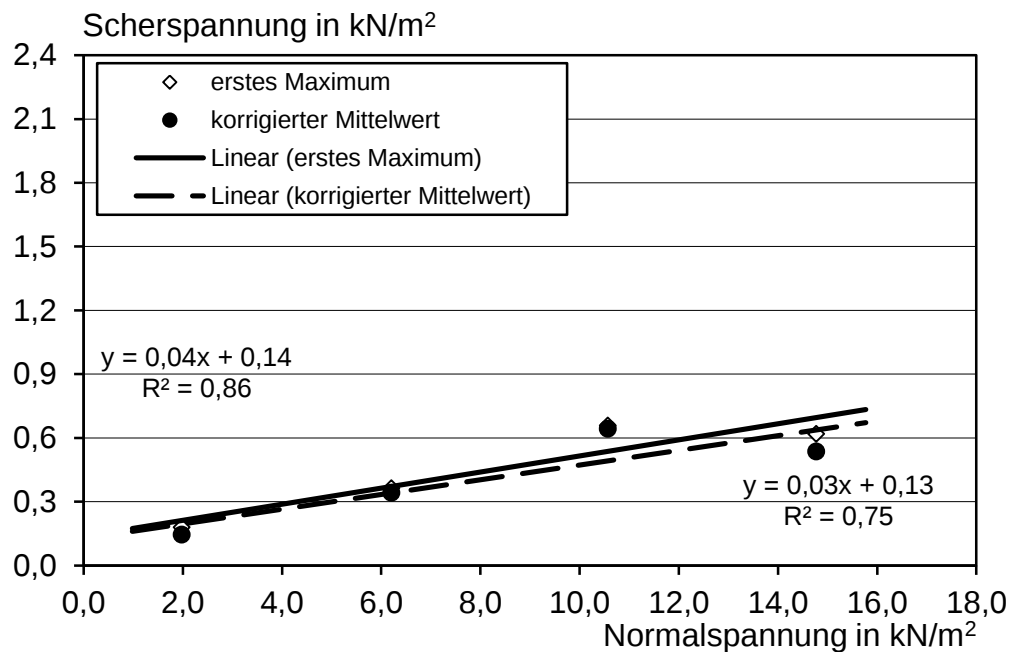


Bild B143: SVM3 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

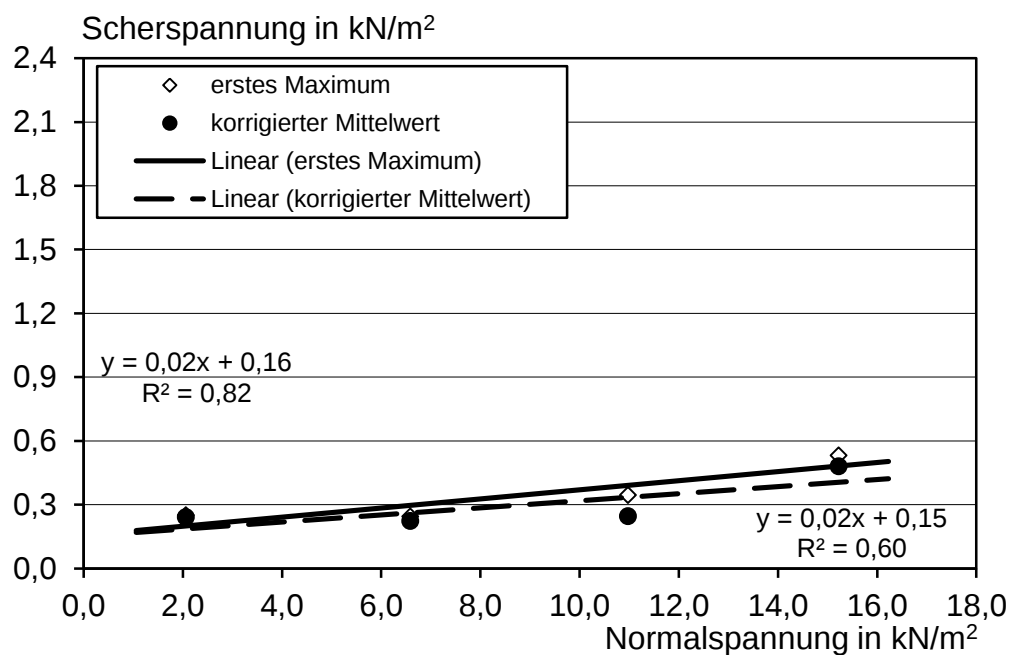


Bild B144: SVM4 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

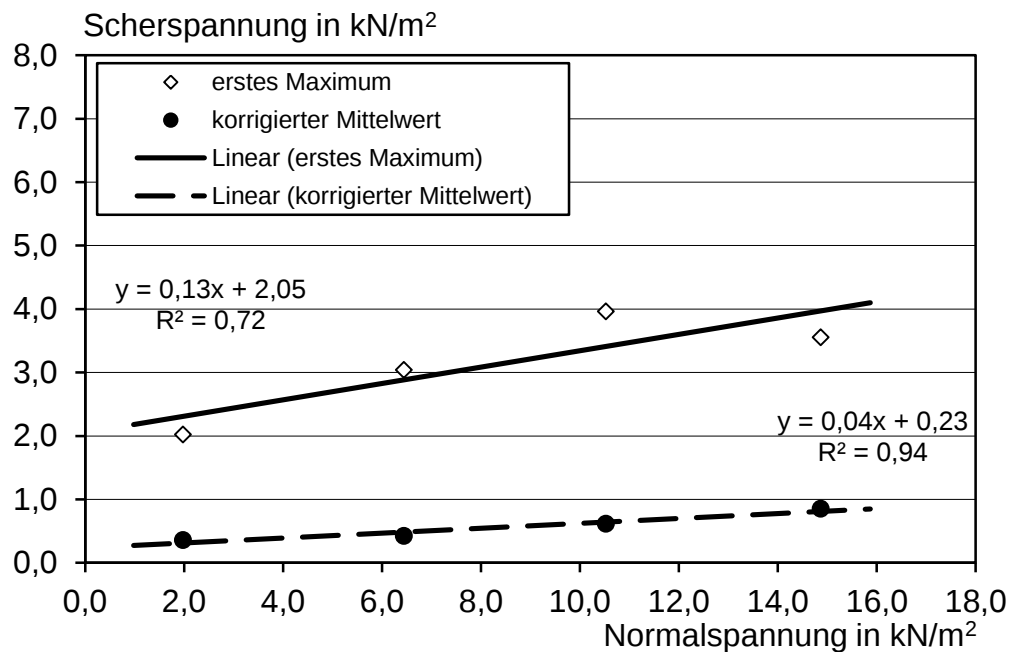


Bild B145: SVM1 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

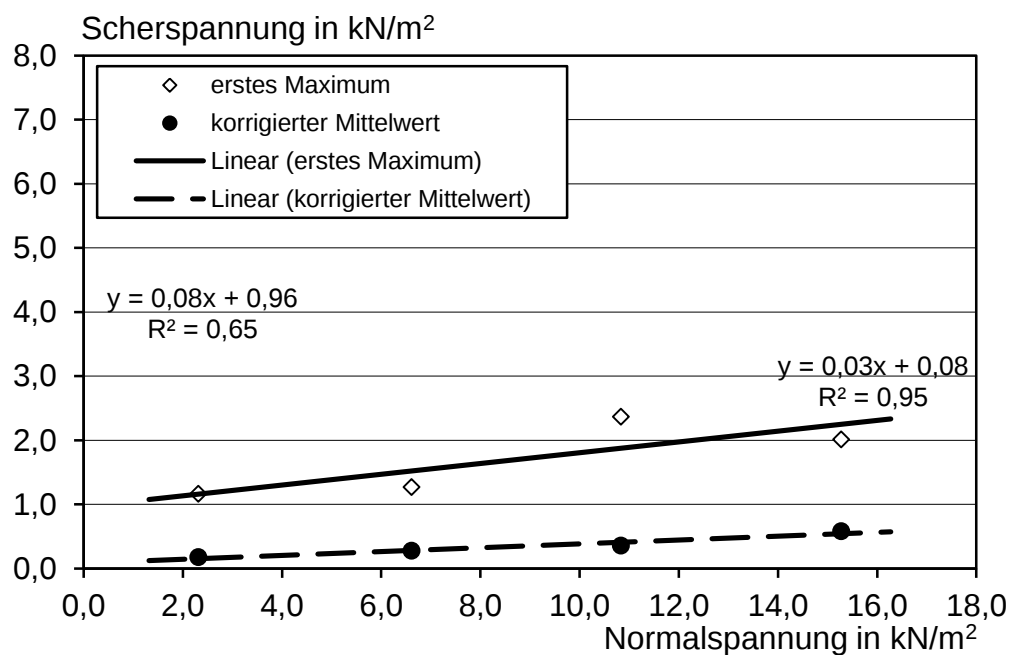


Bild B146: SVM2 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

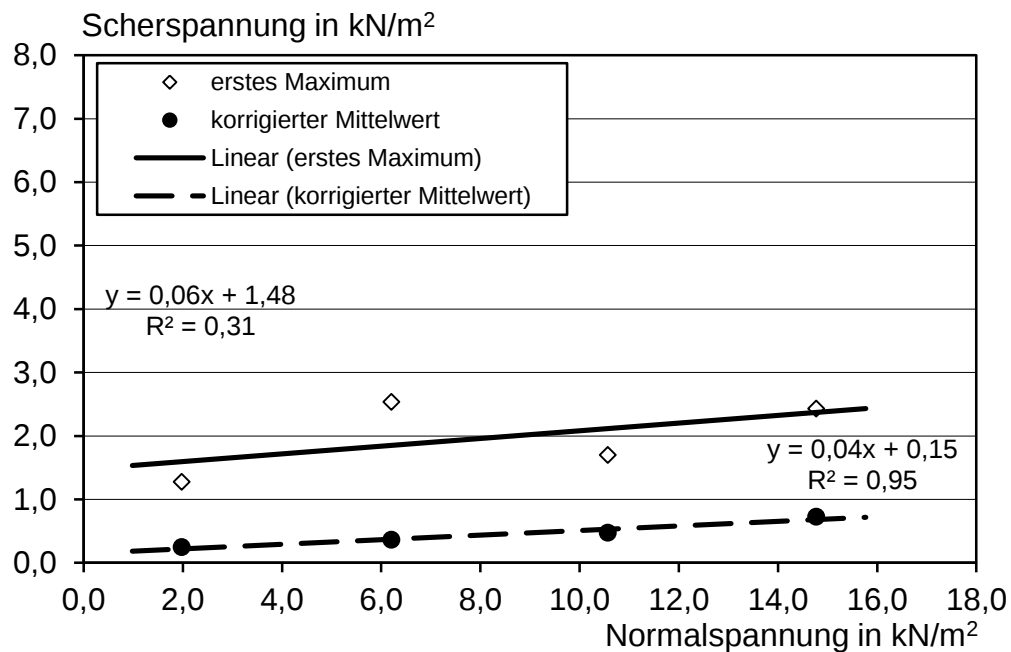


Bild B147: SVM3 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

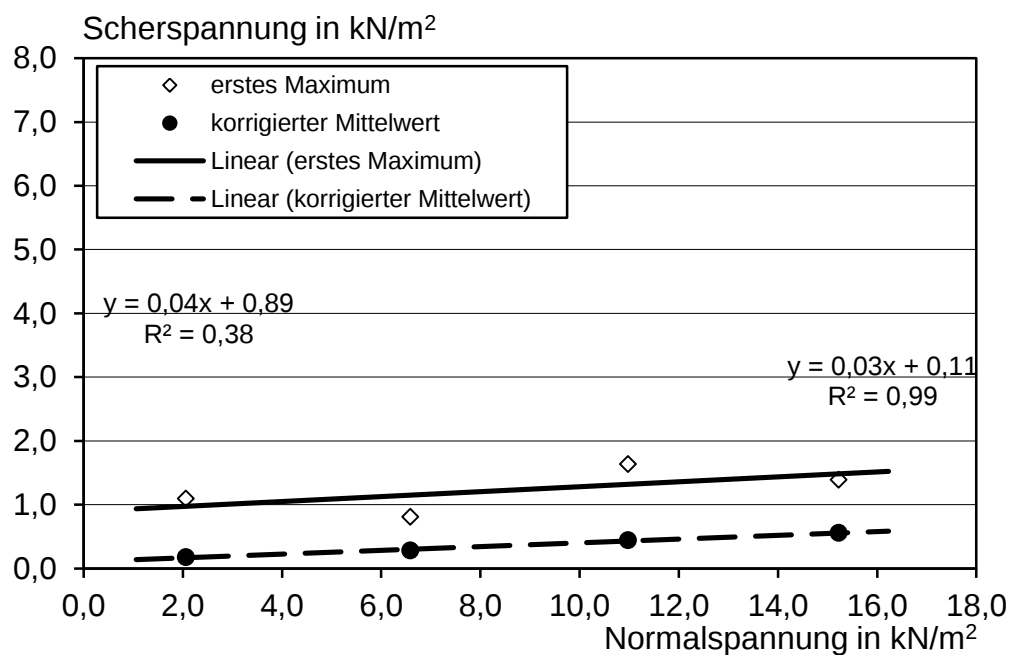


Bild B148: SVM4 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

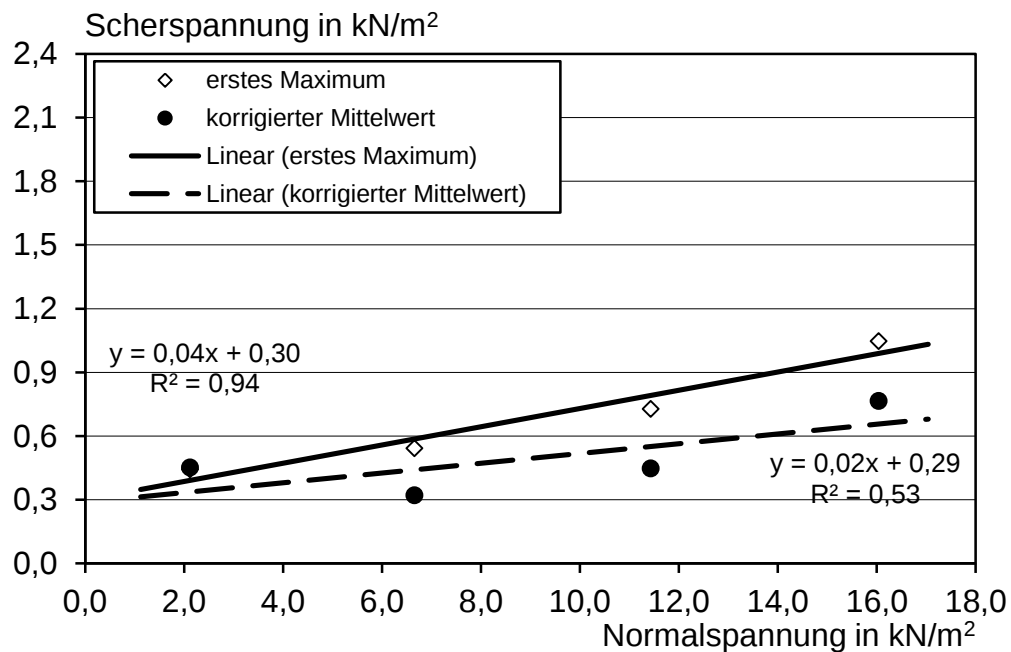


Bild B149: SVB1.1 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

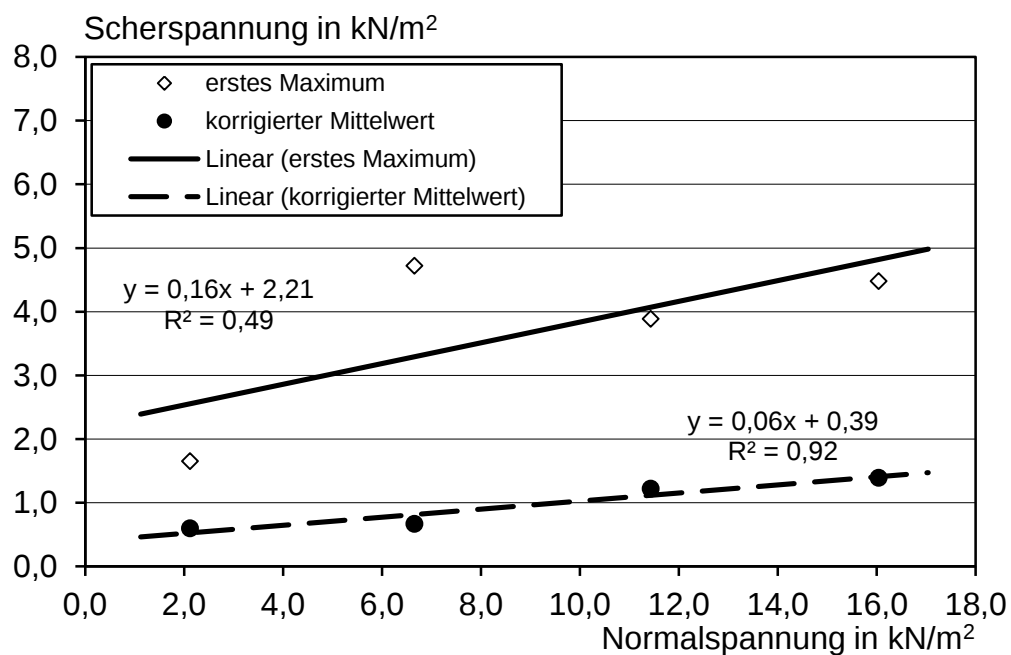


Bild B150: SVB1.1 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

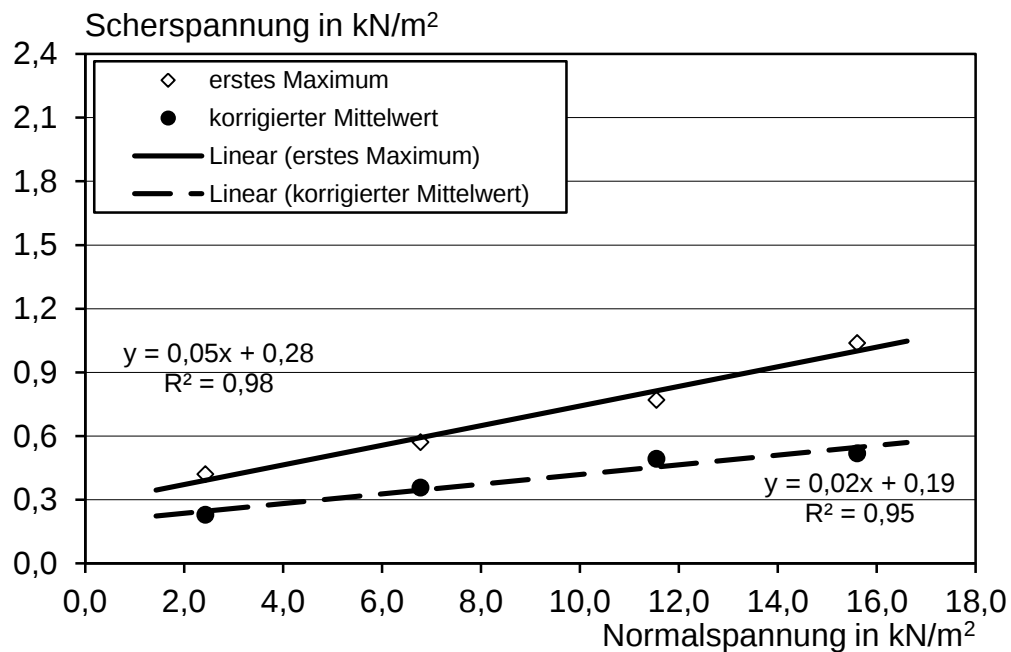


Bild B151: SVB1.2 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

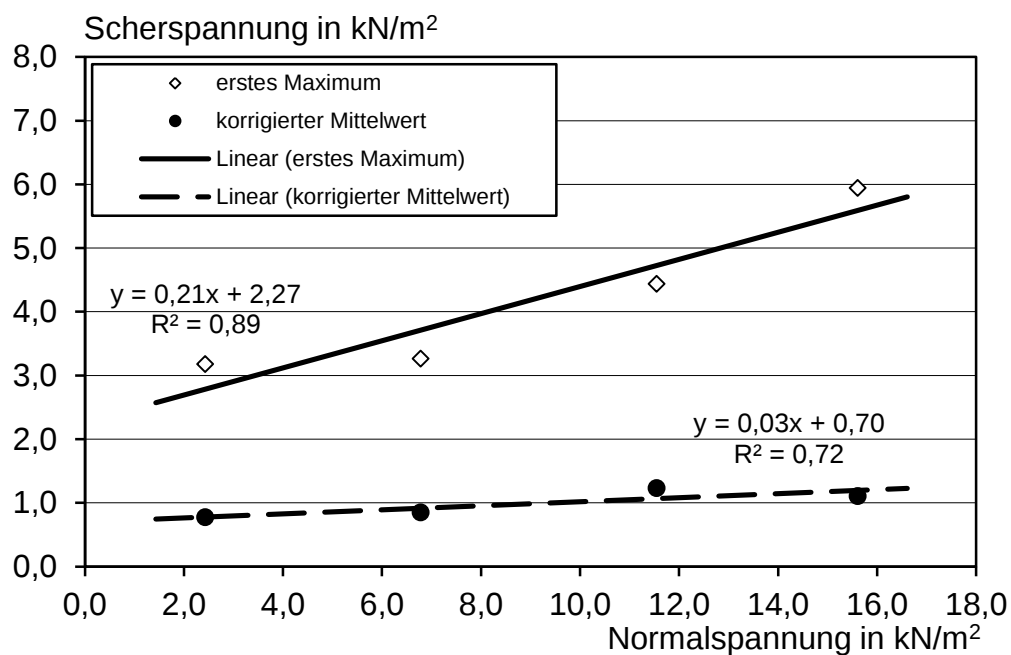


Bild B152: SVB1.2 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

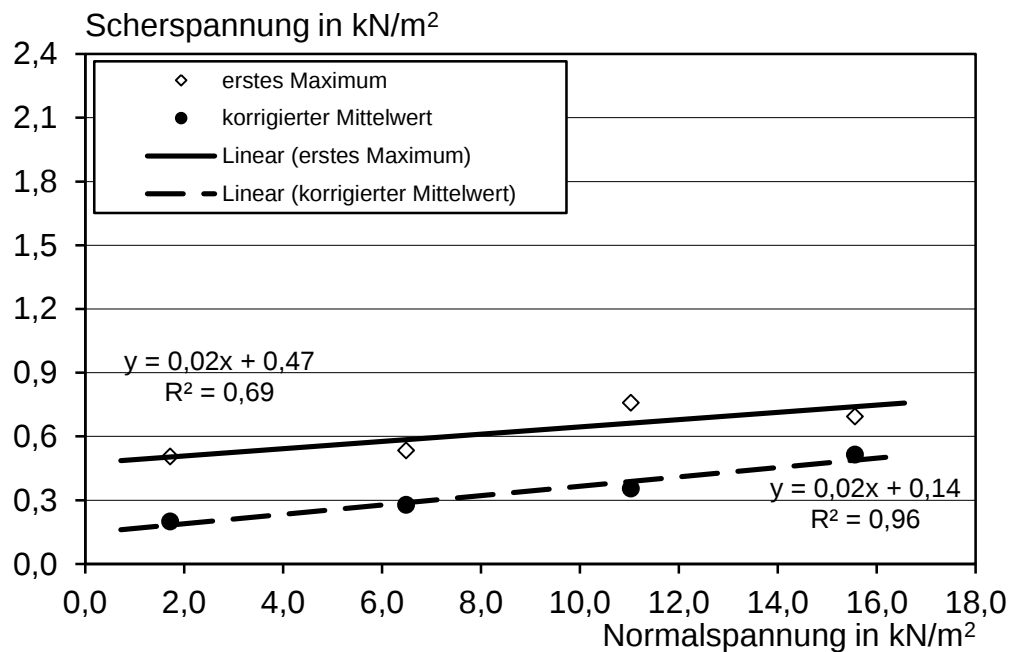


Bild B153: SVB2.1 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

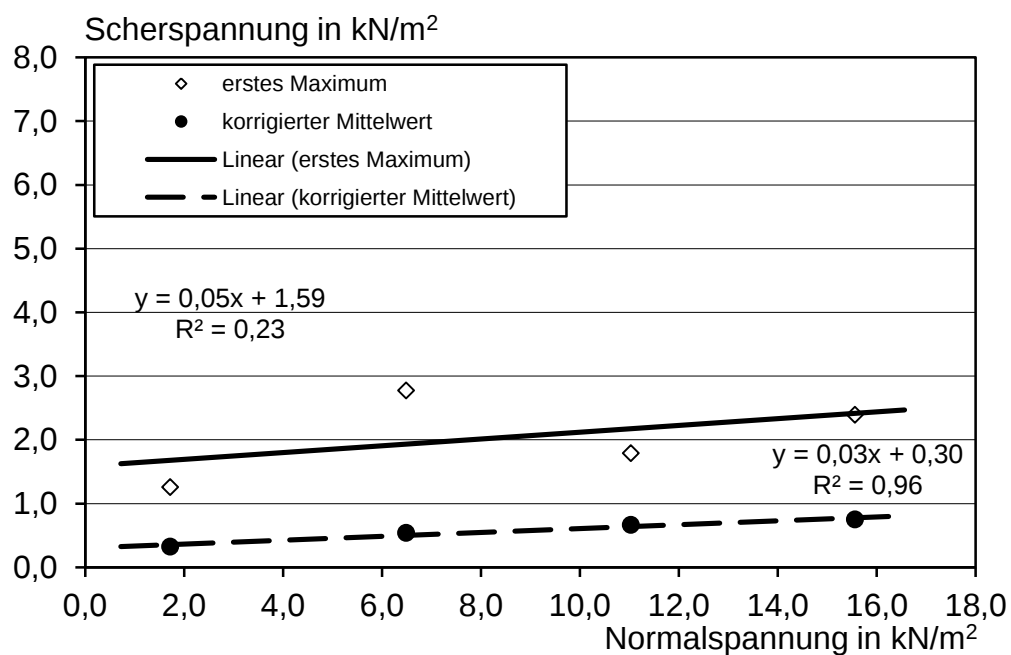


Bild B154: SVB2.1 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

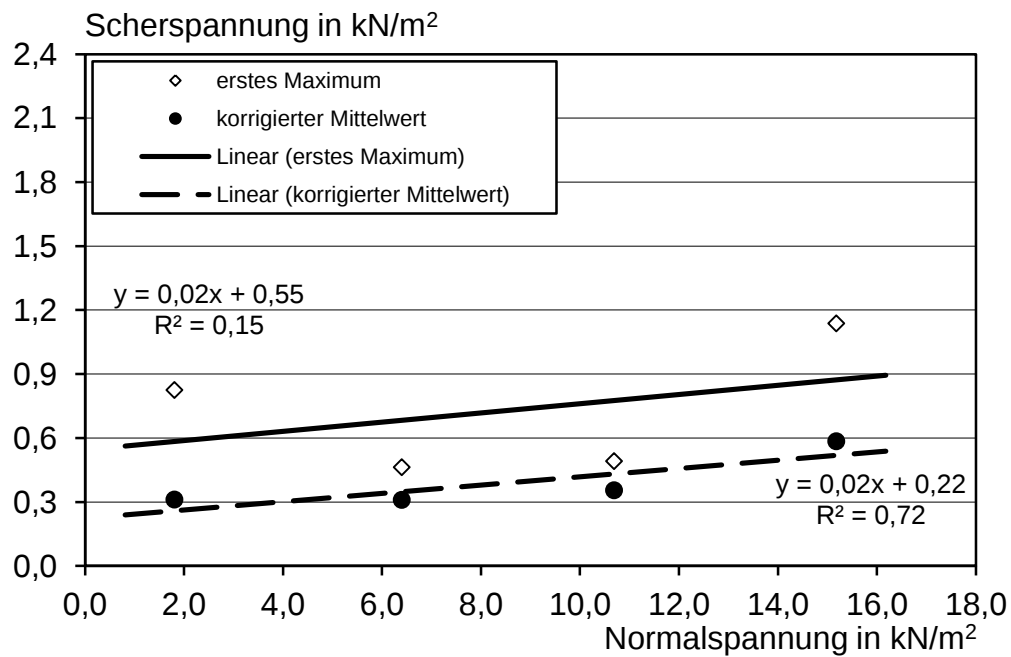


Bild B155: SVB2.2 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

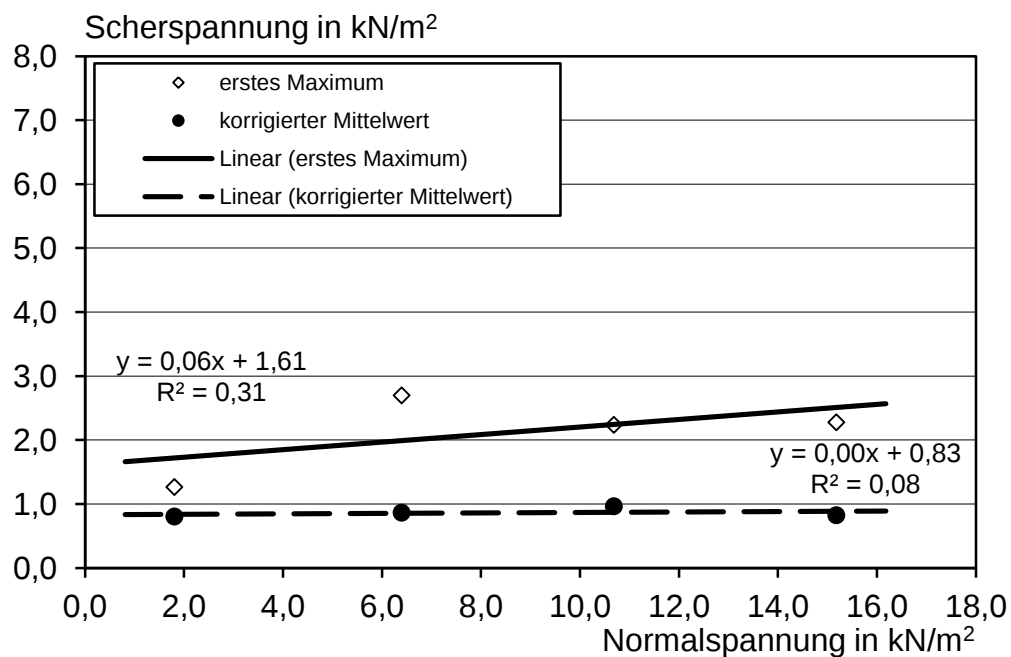


Bild B156: SVB2.2 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

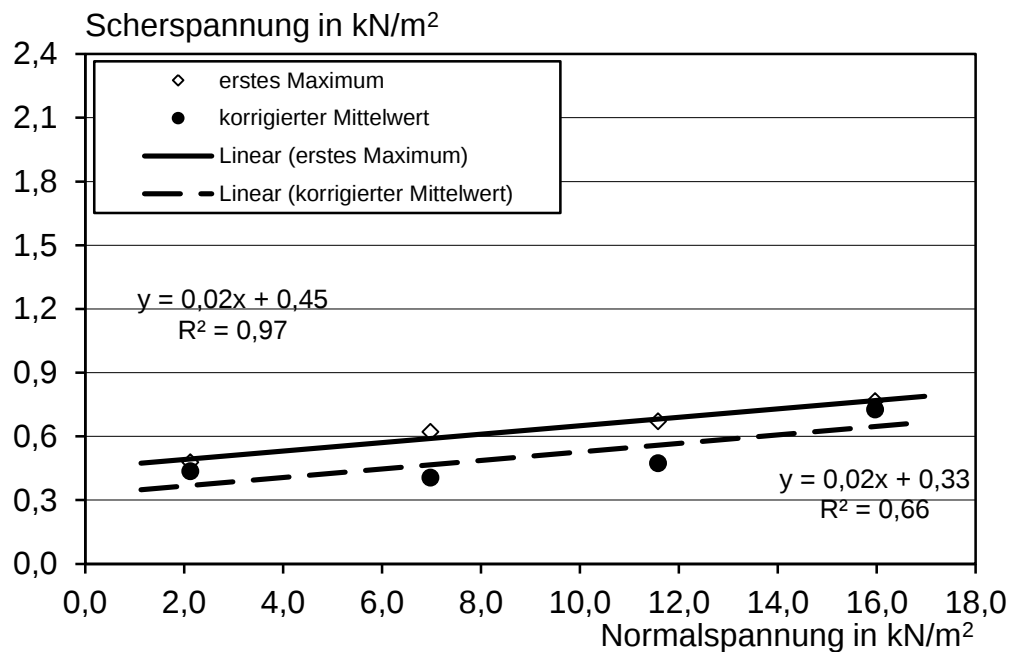


Bild B157: SVB3.1 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

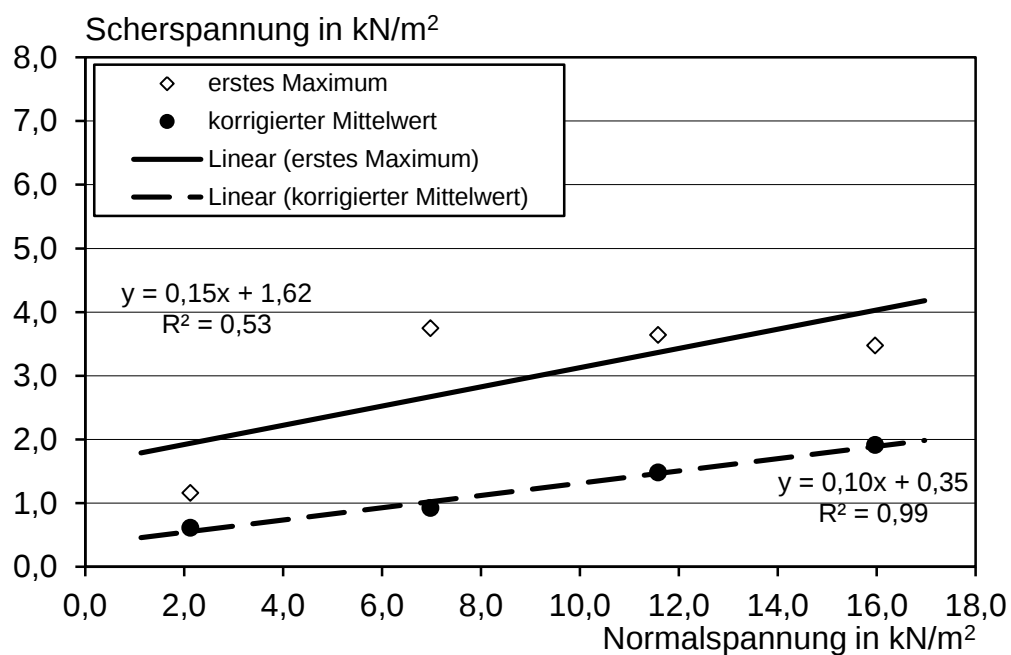


Bild B158: SVB3.1 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

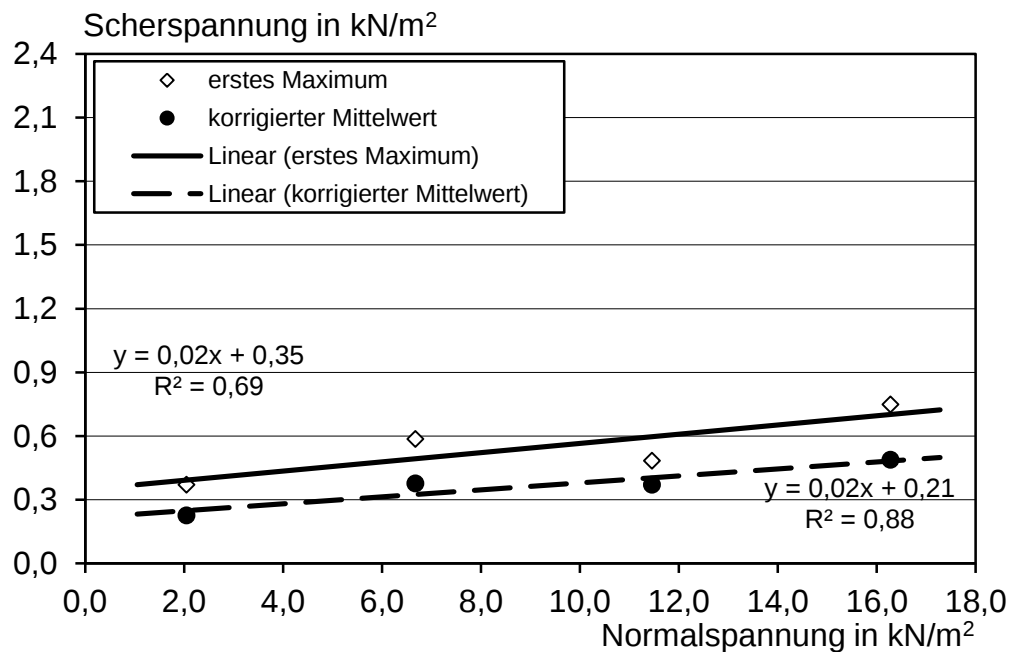


Bild B159: SVB4.1 bei 20 mm/s und glatt-benetzender Oberfläche

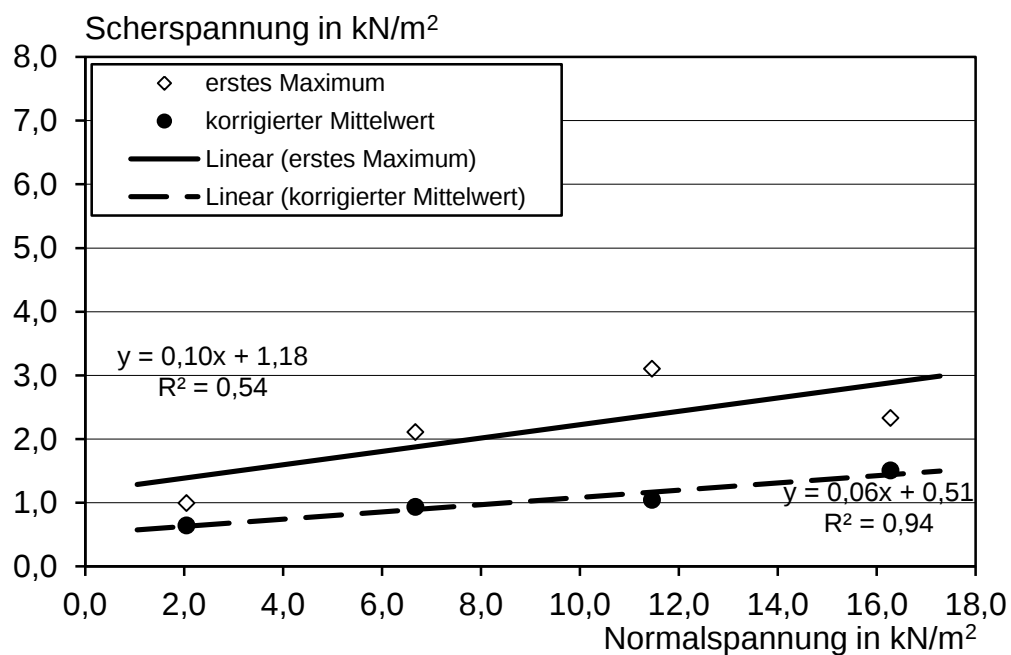


Bild B160: SVB4.1 bei 20 mm/s und rau-benetzender Oberfläche

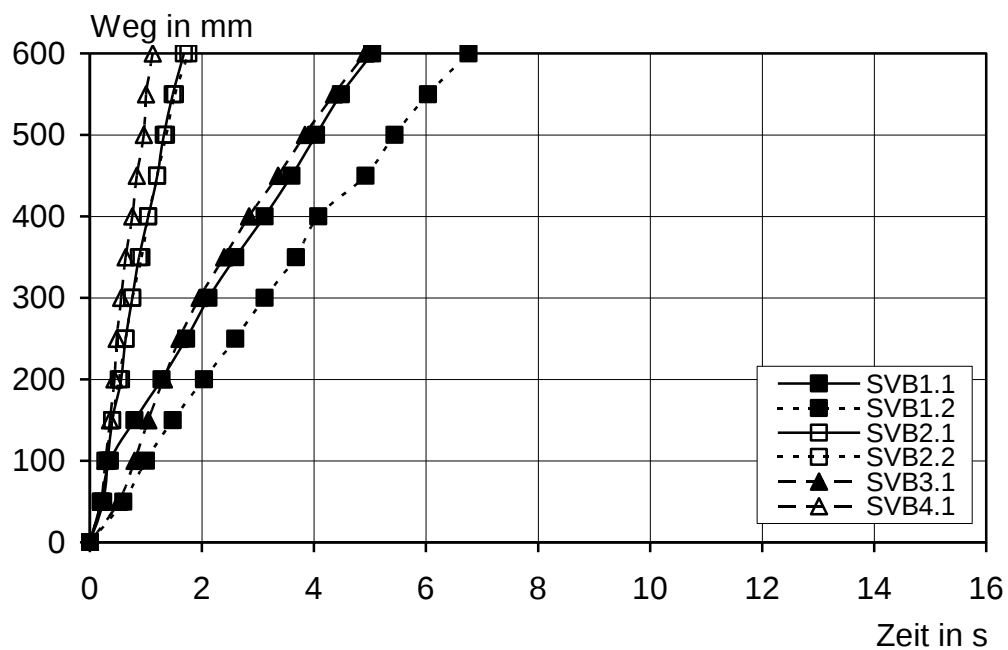


Bild B161: L-Kasten mit glatt-benetzender Oberfläche

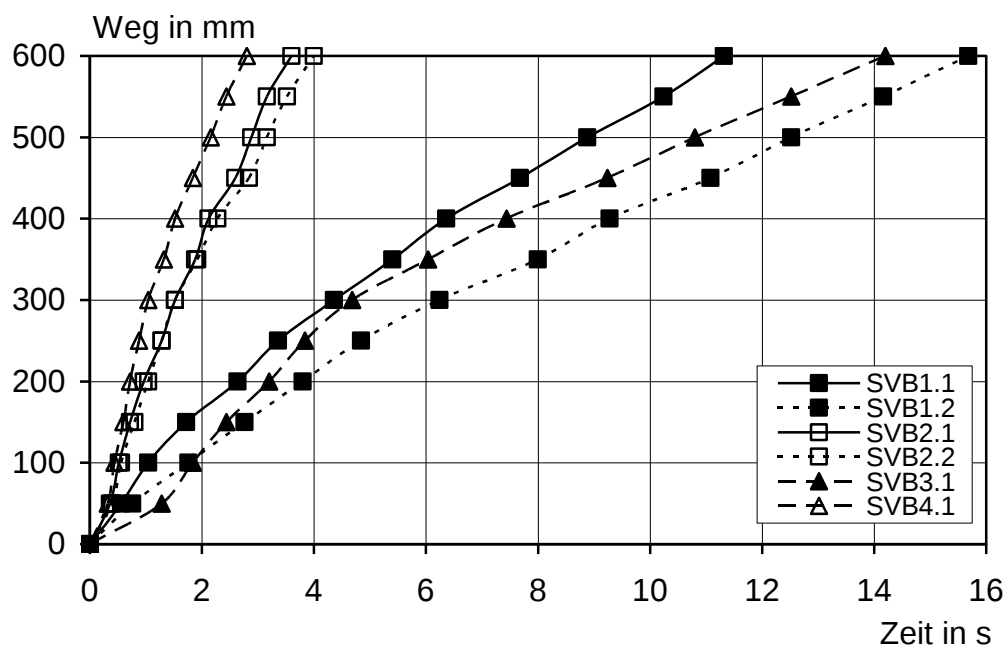


Bild B162: L-Kasten mit rau-benetzender Oberfläche

1 CFD-SOFTWARE FLUENT

1.1 Allgemeines

Im Folgenden sollen die verschiedenen numerischen Einstellungen in FLUENT erläutert werden, wobei das Hauptaugenmerk auf die für diese Arbeit verwendeten Einstellungen gelegt werden soll.

1.2 Gittergenerierung mit GAMBIT

GAMBIT ist der Pre-Prozessor, mit dem die Rechennetze für alle Solver in FLUENT erstellt werden können. In GAMBIT ist die Geometrieerzeugung, die Netzgenerierung sowie die Netzuntersuchung in einem Programm integriert /FLU08/.

Zur Erzeugung einer 3-D Geometrie in GAMBIT können vorher definierte Oberflächen zu Volumina zusammengefügt werden oder aber die Volumenelemente direkt gewählt werden. Hierfür stehen u.a. Quader, Prismen, Kegel, Zylinder und Kugeln zur Verfügung. Nach Wahl der Elemente, welche die Geometrie abbilden sollen, werden diese miteinander „connectiert“, d. h. verbunden. Im Anschluss daran wird das Netz erstellt. Hierfür stehen verschiedene Netzarten, wie z. B. Quader, Hexaeder und Tetraeder zur Verfügung. Je nachdem welche Netzart gewählt wurde, wird auch ein entsprechender Vernetzungsalgorithmus zugeordnet, hierzu zählen Map, Submap, Pave und Cooper. Bei der Erstellung des Netzes kann über den „spacing“ Button die Netzgröße eingestellt werden. Nach der Netzgenerierung werden den Oberflächen der Volumenelemente Eigenschaften zugewiesen, die sogenannten „boundary conditions“. In Kapitel 2.1 sind die für das Modell des L-Kastens und in Kapitel 2.2 die für das Modell des Setzfließmaß-trichters gewählten boundary conditions genauer beschrieben. Abschließend wird definiert, welches Kontinuum das Volumenelement hat. Es kann bei „continuum types“ als „SOLID“ oder „FLUID“ definiert werden.

Bei der Wahl des Netztypes und der Netzart sind die Randbedingungen der nachfolgenden Simulation zu beachten. Wählt man ein zu feines Gitter aus, so steigt der Berechnungsaufwand stark an, bei einem zu groben Gitter kann es sein, dass die Berechnung zu ungenau ist oder instabil wird. Insofern stellt die Gittergenerierung einen Kompromiss zwischen der Genauigkeit der räumlichen Diskretisierung und des daraus resultierenden Rechenaufwandes dar. Für die Qualität des Netzes sind außer der Netzgröße noch weitere Eigenschaften von Bedeutung, wie z. B. die „skewness“ oder der „aspect ratio“ /FLU08/. Die skewness gibt Informationen darüber wie schräg die Zellen

sind. Bei idealen Zellen, die nicht schräg sind, beträgt sie Null und bei sehr schrägen Zellen Eins. Für eine gute Netzqualität sollte darauf geachtet werden, dass die skewness kleiner 0,85 ist. Ansonsten wird die Stabilität der Rechnung beeinträchtigt. Wenn es keine Möglichkeit gibt, die skewness in GAMBIT zu verringern, gibt es noch die Option in FLUENT den PISO Algorithmus mit skewness-correction einzuschalten (vgl. Kapitel 1.4.2.3). Der aspect ratio hingegen gibt Auskunft über das Größenverhältnis von benachbarten Zellen, er sollte den Wert Fünf nicht überschreiten und möglichst gering sein. Bei einem zu großen aspect ratio sollten die Gitter mit ähnlichen Netzgrößen neu generiert werden.

Bei der numerischen Simulation von Strömungsvorgängen ist es sinnvoll, Gebiete des Gitters, in denen die Berechnung möglichst genau sein soll, zu verfeinern (Adaption). Diese Adaption kann sowohl bei der Gittergenerierung in Gambit als auch zu einem späteren Zeitpunkt in FLUENT erfolgen. Nachdem das Gitter vollständig generiert ist und die boundary conditions sowie die continuum types gewählt wurden, muss das in GAMBIT erzeugte Modell so gespeichert werden, dass es von FLUENT aus geöffnet werden kann. Dies geschieht, indem es als msh-File exportiert wird.

1.3 Numerische Modelle in FLUENT

1.3.1 Allgemeines

In FLUENT stehen drei Modelle zur Verfügung mit denen Mehrphasenströmungen nach dem Euler-Euler-Modell simuliert werden können. Das „Volume of Fluid“ (VOF) Modell, das „Mixture“ Modell sowie das „Eulerian“ Modell /FLU08/. Alle drei Methoden eignen sich zur Simulation instationärer Strömungsvorgänge.

Das VOF Modell ist für die Simulation von Strömungsvorgängen mit freien Oberflächen geeignet, bei denen sich die unterschiedlichen Phasen nicht gegenseitig durchdringen. Da bei der Betonage von Bauteilen als auch bei der Simulation des L-Kastens und des Setzfließversuchs freie Oberflächen auftreten /UEB06a, UEB06b, UEB06c/, ist die Verwendung dieses Modells für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen obligatorisch. Mit dem Mixture und dem Eulerian Modell können Mehrphasenströmungen simuliert werden, in denen sich die Phasen gegenseitig durchdringen und der Phasenanteil der dispersen Phase größer als 10% ist. Es ist zu beachten, dass alle drei Modelle als physikalische Grundlage das Euler-Euler-Modell haben, auch wenn die Namen der jeweiligen Modelle dies nicht unbedingt zum Ausdruck bringen. Die genaue Formulierung

aller Gleichungen, die bei der Anwendung dieser Lösungsansätze eingesetzt werden, können in /FLU08/ nachgelesen werden.

In allen Ansätzen sind die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie implementiert. Je nach Modellwahl und abzubildender Strömung müssen problemspezifische Einstellungen vorgenommen werden. Zunächst werden die drei Modelle vorgestellt und die daraus resultierende Wahl eines Modells zur Simulation von SVB bzw. SVM wird erläutert.

1.3.2 Das Volume of Fluid (VOF) Modell

Bei dem VOF Modell wird eine Technik zur Oberflächenverfolgung in einem festen Euler Gitter eingesetzt. Mit diesem Modell können ein oder mehrere nicht mischbare Fluide simuliert werden und es eignet sich zur Analyse der Grenzflächen zwischen diesen Fluiden. Es wird ein einziger Satz der Impulserhaltung für alle Fluide verwendet und deren Volumenanteile werden in jeder Zelle erfasst und durch die gesamte Geometrie verfolgt. Die Erfassung der Oberflächen zwischen den Phasen wird durch die Lösung der Kontinuitätsgleichungen für jede Volumenfraktion der jeweiligen Phase erreicht. Für jede Phase wird ein Volumenanteil in jeder Zelle definiert und die Summe der im Kontrollvolumen vorhandenen Phasenanteile ergibt Eins /FLU08/.

Die Berechnung der Volumenanteile kann mit Hilfe einer impliziten (Implicit Scheme) oder expliziten Zeitdiskretisierung (Explicit Scheme) erfolgen /FLU08/.

Bei dem „Implicit Scheme“ zur Berechnung der Grenzfläche wird ein Standard Finite-Differenzenschema eingesetzt, um die Flüsse durch die Zellen, einschließlich der Zellen, die die Grenzflächen beinhalten, zu berechnen. Dabei wird die Volumenkonzentration zu jedem aktuellen Zeitschritt benötigt und es wird iterativ zu jedem Zeitschritt die Transportgleichung berechnet. Bei diesem Ansatz ist mit erheblichem Verwischen der Grenzfläche zu rechnen.

Das Euler „Explicit Scheme“ ist ein Standard Finite-Differenzenschema, das die Volumenkonzentrationen aus dem vorangegangenen Zeitschritt berechnet. Dieses Schema ist wesentlich genauer als das Implicit Schema /FLU08/.

Die Interpolation der Grenzfläche zwischen den Fluiden kann in FLUENT mit vier verschiedenen Schemata durchgeführt werden, dem „Geo-Reconstruction“- , dem

„CICSAM“- dem „Modified HRIC“- sowie dem „QUICK“-Schema, wobei das „Donor-Acceptor“-Schema die Grundlage der letzten drei Schemata bildet /FLU08, GRE04b/.

Bei dem Geo-Reconstruction Schema wird ein linearer Verlauf der Fluidgrenzfläche innerhalb der nur teilweise gefüllten Zelle vorausgesetzt (vgl. Bild C1). Der Verlauf wird mit Hilfe einer Oberflächenspannungsbeziehung ermittelt. Dieses Diskretisierungsschema stellt die genaueste Interpolation der freien Oberflächen in einer Phasentrennzelle dar. Allerdings ist es im Vergleich zu den anderen Schemata instabil und benötigt die kleinste Zeitschrittweite. Für Phasen mit sehr großen Viskositätsunterschieden ist es eher ungeeignet.

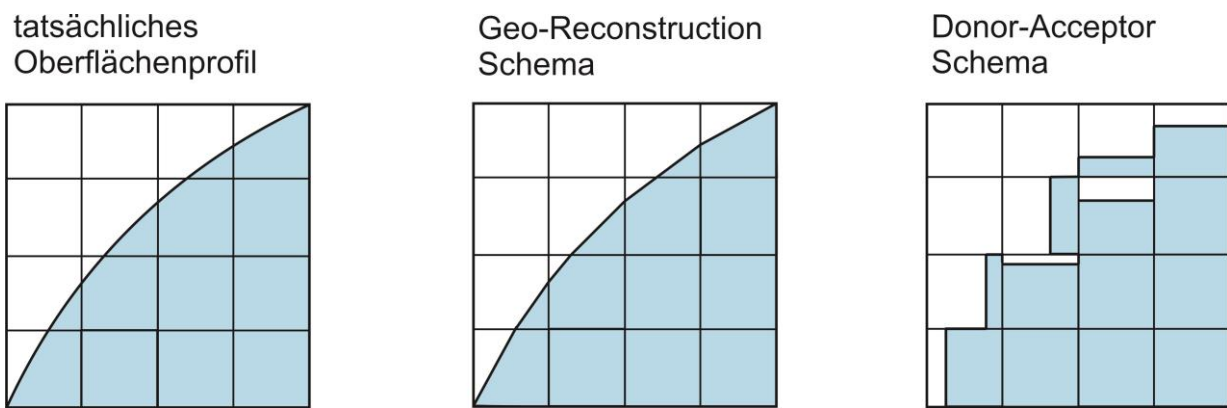


Bild C1: Darstellung des Oberflächenprofils bei einer Interpolation mit dem Geo-Reconstruction Schema und dem Donor-Acceptor Schema

Bei dem Donor-Acceptor Schema wird die Zelle, in der die Grenzfläche auftritt als Donor und die stromabwärts liegende Zelle als Acceptor definiert. Das Schema erkennt eine Zelle als spendende Zelle einer bestimmten Fluidmenge und eine andere benachbarte Zelle als annehmende Zelle der gleichen Fluidmenge (vgl. Bild C1). Dadurch wird das Auftreten von numerischer Diffusion limitiert.

Bei dem CICSAM Schema (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) handelt es sich um ein von FLUENT neu entwickeltes Schema, welches zwar mit der Donor-Acceptor Methode arbeitet, aber dennoch über eine fast so exakte Abbildung der Fluidoberfläche verfügt wie das Geo-Reconstruction Schema /FLU08, GRE04b, UBB97/. Das CICSAM Schema hat gegenüber dem Geo-Reconstruction Schema den Vorteil, dass es mit Fluiden arbeiten kann, die hohe Viskositätsunterschiede haben. Somit ist es ideal für die Simulation des hochviskosen SVM und SVB, die im Vergleich zu dem Medium Luft eine um den Faktor $10^6 - 10^7$ mal höhere Viskosität besitzen. Das CICSAM

Schema kann in FLUENT jedoch nur in Verbindung mit dem VOF-Modell und einer expliziten Zeitdiskretisierung verwendet werden /FLU08/.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurde das VOF Modell gewählt, da sowohl bei dem L-Kasten als auch bei dem Setzfließversuch freie Oberflächen auftreten. Als Zeitdiskretisierung wurde das Explizite Schema und für die Ermittlung der Grenzflächen für den niederviskosen SVM und SVB das Geo-Reconstruction sowie das CICSAM Schema für den hochviskosen SVM und SVB verwendet.

1.3.3 Das Mixture Modell

Mit dem Mixture Modell können Strömungen von zwei oder mehreren, fluiden oder granularen Phasen simuliert werden. Dabei werden die Phasen als sich gegenseitig durchdringende Kontinuen angesehen. Es handelt sich hierbei um ein vereinfachtes Modell mit dem Mehrphasenströmungen simuliert werden können, in denen sich die Phasen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, aber ein lokales Gleichgewicht in kleinen räumlichen Längeneinheiten angenommen werden kann. Man definiert eine primäre Trägerphase und eine oder mehrere dispergierte, sekundäre Phasen.

Im Mixture Modell wird wie im VOF Modell ein Ein-Fluid Ansatz benutzt, allerdings ist es hier möglich gegenseitig durchdringende Fluide abzubilden sowie mit Hilfe des Konzeptes der Relativitätsgeschwindigkeiten Phasen zu simulieren, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen. Dieses Modell löst die Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichungen für mehrere Phasen, die sowohl fluid als auch dispers vorliegen können. Es werden relative Geschwindigkeiten für das Gemisch festgeschrieben, um die dispersen Phasen zu beschreiben.

Typische Anwendungen sind die Simulation von Sedimentationsvorgängen und Partikelströmungen mit einer Partikelbeladung kleiner 10 %. Der Volumenanteil der dispersen Phase beträgt bei SVB ungefähr 40 Vol.-%, so dass es sich bei SVB um eine dichte Zweiphasenströmung mit hoher Partikelbeladung handelt. Daher ist dieses Modell nicht für die Simulation der Strömungsvorgänge von SVB geeignet. Die Abbildung der Strömungsvorgänge von SVM könnten mit dem Mixture Modell berechnet werden. Allerdings kann mit diesem Modell die freie Oberfläche des Mörtels nicht genau abgebildet werden. Aus diesen Gründen wurde dieses Modell in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet.

1.3.4 Das Eulerian Modell

Das Eulerian Modell ist das komplexeste der in FLUENT vorhandenen Mehrphasenmodelle. Die unterschiedlichen Phasen werden als sich gegenseitig durchdringende Kontinuen betrachtet. Das Modell löst einen Satz von n Kontinuitäts- und Impuls-gleichungen für jede Phase, wobei n die Anzahl der vorhandenen Phasen ist. Die Kopplung der Phasen wird durch den Druck- und den Phasenaustauschkoeffizienten erreicht und in Abhängigkeit von den vorhandenen Phasen unterschiedlich berücksichtigt, d. h. ob es sich um eine Fluid-Feststoffströmung oder um eine Fluid-Fluidströmung handelt.

Mit diesem Modell können beispielsweise die Strömungsvorgänge von Fließbetten oder Partikelsuspensionen simuliert werden. Allerdings kann es, wie auch das Mixture Modell, nicht zur Simulation des L-Kastens und der Setzfließversuche herangezogen werden, da es keine freie Oberfläche abbilden kann.

1.4 Lösungsalgorithmen

1.4.1 Allgemeines

In FLUENT stehen zwei Lösungsalgorithmen zur Verfügung, die die Erhaltungsgleichungen unterschiedlich behandeln, der „Segregated Solver“ sowie der „Coupled Solver“. Der „Segregated Solver“ löst die Grundgleichungen nacheinander (voneinander getrennt) während der „Coupled Solver“ die Gleichungen simultan (miteinander gekoppelt) löst. In beiden Fällen werden in FLUENT die Integralgleichungen für Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und Impulserhaltung (Navier-Stokes Gleichung) gelöst. Falls erforderlich werden auch skalare Größen wie Energie und Turbulenz mit in die Berechnung einbezogen. Bei beiden Methoden wird eine auf Kontrollvolumen basierende Technik eingesetzt, die folgende Schritte beinhaltet:

- Einteilung des Strömungsgebietes in diskrete Kontrollvolumen mit einem numerischen Gitter,
- Integration der geltenden Gleichungen in einem individuellen Kontrollvolumen, um algebraische Gleichungen für die Unbekannten, wie Geschwindigkeit, Druck oder Temperatur zu erzeugen und

- Linearisierung der diskretisierten Gleichungen und Lösung des daraus resultierenden linearen Gleichungssystems, um aktualisierte Werte der Variablen zu erhalten.

Beide Methoden verwenden den gleichen Ansatz zur Diskretisierung, die Finite-Volumen Methode. Sie unterscheiden sich allerdings hinsichtlich der durchgeführten Linearisierung und Lösung der diskretisierten Gleichungen.

An dieser Stelle wird nur auf den Segregated Solver eingegangen, da dieser Ansatz bei den in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen eingesetzt wurde. Um das Strömungsverhalten von Mehrphasenströmungen mit FLUENT zu simulieren muss der Segregated Solver gewählt werden.

1.4.2 Der Segregated Solver

1.4.2.1 Allgemeines

Da die Grundgleichungen sowohl nichtlinear als auch gekoppelt sind, müssen mehrere Iterationensschritte durchgeführt werden, bevor eine konvergierte Lösung erreicht wird, mit der die Grundgleichungen erfüllt werden. Jede Iteration beinhaltet folgende Schritte:

- Auf der momentanen Lösung basierend werden die Fluideigenschaften aktualisiert bzw. zu Beginn einer Berechnung werden die initialisierten Fluideigenschaften angenommen.
- Die u , v und w Impulsgleichungen werden der Reihe nach mit Hilfe der momentanen Werte des Drucks und der Oberflächenflüsse gelöst, um so ein aktualisiertes Geschwindigkeitsfeld zu berechnen.
- Da die im vorangegangenen Schritt ermittelten Geschwindigkeiten möglicherweise die Kontinuitätsgleichung nicht erfüllen, wird eine Poisson-Gleichung zur Druckkorrektur von der Kontinuitäts- und der linearisierten Impulsgleichung abgeleitet. Die Gleichung zur Druckkorrektur wird dann gelöst, um den Druck, das Geschwindigkeitsfeld und die Oberflächenflüsse dahingehend zu korrigieren, dass Kontinuität erreicht wird.
- Falls erforderlich, werden die Gleichungen für skalare Größen wie Turbulenz oder Energie mittels der vorher aktualisierten Werte der anderen Größen bestimmt.

- Bei der Behandlung gekoppelter Phasen kann der Quellterm in den Gleichungen der entsprechenden kontinuierlichen Phase mit Hilfe einer Trajektorienberechnung der dispersen Phase aktualisiert werden.
- Für den Gleichungssatz wird eine Überprüfung der Konvergenz durchgeführt.

1.4.2.2 Linearisierungsmethode

Sowohl bei dem Segregated als auch bei dem Coupled Solver werden die diskreten, nichtlinearen Grundgleichungen linearisiert, um ein Gleichungssystem für die voneinander abhängigen Variablen in jeder numerischen Zelle zu erzeugen. Das daraus resultierende lineare Gleichungssystem wird dann gelöst, um eine aktualisierte Lösung des Strömungsfeldes zu berechnen.

Die Linearisierung kann in „impliziter“ und „expliziter“ Form erfolgen, wobei implizit und explizit wie folgt definiert ist:

- implizit: Für eine gegebene Variable wird in jeder Zelle ihr unbekannter Wert berechnet, indem auf bestehende und unbekannte Werte aus benachbarten Zellen zurückgegriffen wird. Jede Unbekannte tritt somit in mehr als einer Gleichung des Systems auf. Diese Gleichungen müssen gleichzeitig gelöst werden, um den Unbekannten Werte zuzuweisen.
- explizit: Für eine gegebene Variable wird in jeder Zelle ihr unbekannter Wert berechnet, indem nur auf existierende Werte zurückgegriffen wird. Dadurch tritt jede Unbekannte nur einmal im System auf und die Gleichungen für den unbekannten Wert werden nacheinander gelöst, um Werte für die unbekannten Variablen zu berechnen.

Bei dem Segregated Solver wird jede diskrete Grundgleichung implizit hinsichtlich der von dieser Gleichung abhängigen Variable gelöst. Es ergibt sich ein lineares Gleichungssystem mit einer Gleichung für jede Zelle des Strömungsgebietes. Der Segregated Solver löst somit ein einzelnes Variablenfeld unter Berücksichtigung aller Zellen zum gleichen Zeitpunkt. Danach wird das nächste Variablenfeld gelöst, indem wiederum alle Zellen gleichzeitig betrachtet werden.

1.4.2.3 Kopplung von Druck und Geschwindigkeit

Die Kopplung von Druck und Geschwindigkeit wird in FLUENT erreicht, indem eine Gleichung für den Druck aus der diskretisierten Gleichung für die Kontinuität abgeleitet wird. Hierzu stehen für den Segregated Solver in FLUENT drei Algorithmen zur Verfügung: der SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations), der SIMPLEC (SIMPLE Consistent), sowie der PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) Algorithmus. An dieser Stelle wird kurz auf den SIMPLE und den PISO Algorithmus eingegangen, da diese Algorithmen bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen verwendet wurde.

Der SIMPLE Algorithmus verwendet eine Verknüpfung von Druck und Geschwindigkeit, um Massenkontinuität zu erzwingen und das Druckfeld zu bestimmen. Dabei wird der Druck mittels einer Druckkorrekturgleichung verändert bis alle Gleichungen erfüllt sind. Die Vorgehensweise sieht vor, dass die Impulsgleichung zunächst mit einem geschätzten Druckfeld gelöst wird und so zwangsläufig der resultierende Fluss über die Zelloberfläche die Kontinuitätsgleichung nicht erfüllt. Durch Anwendung einer Druckkorrekturgleichung wird erreicht, dass das Druckfeld korrigiert wird und somit auch die Kontinuitätsgleichung erfüllt ist. Das korrigierte Druckfeld ist der Ausgangspunkt für eine neue Schätzung.

Der PISO Algorithmus basiert auf dem SIMPLE Algorithmus, verfügt jedoch über zusätzliche Korrekturgleichungen. Ein Nachteil der SIMPLE und SIMPLEC Algorithmen ist der, dass bei der Lösung der Druck-Korrektur Gleichung die ermittelten Geschwindigkeiten und zugehörigen Strömungsgrößen das Impuls-Gleichgewicht (Navier-Stokes Gleichung) nicht erfüllen. Daher muss die Rechnung sofort wiederholt werden, bis das Gleichgewicht erreicht wird. Um die Effizienz der Rechnung zu verbessern bedient sich der PISO Algorithmus zweier zusätzlicher Korrekturgleichungen, der Neighbour-Correction Gleichung sowie der Skewness-Correction Gleichung [FLU08]. Bei der Neighbour-Correction werden die Rechnungen, die beim SIMPLE Algorithmus in der Regel mehrmals wiederholt werden müssen, in die Druck-Korrektur Gleichung integriert, so dass bereits nach wenigen PISO-Schleifen die korrigierten Gleichungen die Kontinuitätsgleichung sowie den Impulssatz erfüllen. Dieser iterative Prozess wird auch „momentum correction“ genannt. Bei diesem Verfahren wird für eine Iteration zwar mehr Zeit benötigt, allerdings wird die Anzahl der Iterationen, die für die Konvergenz benötigt wird, enorm herabgesetzt. Für Netze, die schräge Elemente enthalten, ist die approximierende Relation zwischen der Korrektur des Massenflusses an der Zelloberfläche und der Differenz der Druckkorrektur

zu der benachbarten Zelle, sehr grob. Dies führt dazu, dass erst bei einer sehr hohen Anzahl an Iterationen, das Gleichgewicht erreicht wird. Die Skewness-Correction des PISO Algorithmus ermöglicht es, mit einer annähernd gleichen Anzahl an Iterationen, wie bei geraden Netzelementen, das Gleichgewicht zu erreichen, so dass sich die Rechenzeit deutlich verkürzt /FLU08/.

1.4.3 Zeitdiskretisierung

1.4.3.1 Allgemeines

In FLUENT wird eine auf Kontrollvolumen basierende Technik zur Umwandlung der Grundgleichungen in algebraische Gleichungen, die numerisch gelöst werden können, angewendet. Diese Technik besteht darin, dass die Grundgleichungen über jedes Kontrollvolumen integriert werden, so dass diskrete Gleichungen erzeugt werden, die die Konservierung einer Größe, bezogen auf die Basis des Kontrollvolumens, sicherstellen. Im Fall einer instationären Berechnung muss zusätzlich eine Integration über die Zeit erfolgen.

Als Grundeinstellung speichert FLUENT die diskreten Werte für die skalare Größe ϕ für die Zellenmittelpunkte. Da für die konvektiven Terme die Werte an der Zellenoberfläche ϕ_f benötigt werden, muss, von den Zellmittelpunkten ausgehend, eine Interpolation durchgeführt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines „Aufwind“ Schemas, in FLUENT „Upwind“ Schema genannt. In diesem Schema werden die Oberflächenwerte ϕ_f von den Werten der Zellen abgeleitet, die relativ zur Normalenrichtung der Geschwindigkeit stromaufwärts, „upwind“, liegen. In FLUENT sind vier Schemata implementiert: „First-Order Upwind“, „Second-Order Upwind“, „Power Law“ und „QUICK“. In dieser Arbeit wird bei den numerischen Simulationen das „Second-Order Upwind“, eingesetzt.

1.4.3.2 Under-Relaxation-Factors

Bei der Lösung von nichtlinearen Gleichungen ist es notwendig die Änderung einer berechneten Variablen ϕ nach jedem Iterationsschritt zu überprüfen. Sie muss möglichst gering gehalten werden, um Divergenz zu vermeiden. Dies wird durch das Unter-Relaxieren (Under-Relaxation) erreicht. Hierbei wird die Änderung der Variablen nach jedem Iterationsschritt reduziert, indem sie mit einem Wert kleiner Eins, dem sogenannten Under-Relaxation Factor α , multipliziert wird.

Für jedes Volumenelement ergibt sich die neu berechnete Zustandsgröße ϕ_n dann aus der Variablen der vorausgegangenen Iteration ϕ_{n-1} zuzüglich der mit dem Under-Relaxation-Factor α reduzierten Änderung der Variablen $\Delta\phi$:

$$\phi_n = \phi_{n-1} + \alpha \cdot \Delta\phi \quad (56)$$

In FLUENT können die Under-Relaxation-Factors für alle Gleichungen, die mit dem Segregated Solver gelöst werden eingestellt werden. Hierbei handelt es sich um die Gleichungen zur Berechnung von Druck, Dichte, Volumenkraft und Impuls. In der Regel sind die Under-Relaxation-Factors in dem *Solution Control Panel* von FLUENT für Standardfälle wie folgt voreingestellt:

- pressure (Druck) α_p : 0,2
- density (Dichte) α_d : 0,5
- body force (Volumenkraft) α_b : 0,5
- momentum (Impuls) α_m : 0,5

Bei einigen Sonderfälle, z. B. bei Strömungen mit hohen Rayleigh Zahlen, bei denen Konvektion auftritt, sowie bei turbulenten Strömungen, ist es notwendig, die Under-Relaxation-Factors herabzusetzen, damit die Lösung konvergiert /FLU08/. In /BAR03/ wurde der Einfluss der Under-Relaxation-Factors auf die Konvergenz turbulenter Strömungen genauer untersucht. Hierbei wurden die Faktoren für Geschwindigkeit (α_u), turbulente kinetische Energie (α_k), Zerstreuung turbulenter kinetischer Energie (α_e), „Wirbel-Viskosität“ (α_ν), dem generation term (α_g) sowie Druck (α_p) herangezogen, wobei nur letztere in FLUENT Verwendung findet. In Kapitel 6 wird der Einfluss der Under-Relaxation Factors auf die Ergebnisse der numerischen Simulation anhand eigener Untersuchungen genauer dargestellt.

1.4.4 Vorgehensweise bei der Berechnung einer FLUENT-Simulation mit dem Euler-Euler Modell

1.4.4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die allgemeine Vorgehensweise bei der Durchführung einer numerischen Simulation in FLUENT mit dem Euler-Euler Modell beschrieben. Wie im

vorangegangenen Kapitel erläutert muss zunächst ein numerisches Gitter erzeugt werden, das dann in FLUENT importiert werden kann.

1.4.4.2 Modellparameter

Der erste Schritt bei der Auswahl der Modellparameter ist die Wahl eines Solvers. In dieser Arbeit wird der Segregated Solver (vgl. Kapitel 1.4.2) eingesetzt. Die zu simulierenden Strömungsvorgänge des L-Kastens und des Setzfließversuchs sind instationäre Vorgänge. Die Auswahl des Modells, welches die Strömungsvorgänge abbilden soll, ist der nächste Schritt. Dabei stehen dem Anwender das VOF, das Mixture oder das Eulerian Modell zur Verfügung und er kann die Anzahl der vorhandenen Phasen vorgeben. Schließlich muss noch angegeben werden, ob es sich um eine laminare oder eine turbulente Strömung handelt.

Die Charakterisierung des hier untersuchten Strömungsvorgangs als laminare Strömung erfolgte anhand der Reynoldszahl. Das Strömungsgebiet ist der Trog des L-Kastens, der ein offenes Gerinne darstellt. Die Reynoldszahl für ein offenes Gerinne wird mit folgender Formel ermittelt [JIR04]:

$$Re = \frac{V \cdot R_h}{\nu} \quad (57)$$

In dieser Formel repräsentiert R_h den hydraulischen Radius, der nach [JIR04] definiert ist als:

$$R = \frac{h}{1 + 2h/B} \quad (58)$$

Darin ist B die Breite eines Rechteckprofils und h die Tiefe des strömenden Fluids. Für ein Rechteckprofil mit der Breite B und der Fluidtiefe h . V ist die mittlere Geschwindigkeit und ν die kinematische Viskosität. Die kritische Reynoldszahl, bei der die Strömung von laminar nach turbulent umschlägt, ist bei offenen Gerinnen

$$Re_{krit} \approx 500 \quad [JIR04].$$

Die Reynoldszahlen wurde nach Gleichung (2) für die Strömung des Mörtels und des newtonschen Referenzfluid in dem L-Kasten berechnet. Für den Mörtel ergaben sich Reynoldszahlen, die zwischen $Re = 1$ bis 6 lagen und für das Newtonschen Referenzfluid Werte, die zwischen $Re = 2$ bis 9 lagen. In Anbetracht der Tatsache, dass diese Werte weit unterhalb der kritischen Grenze Re_{krit} liegen, wird für die Strömung des SVB in dem L-Kasten und die Strömung des SVM und des Newtonschen Fluids in dem Setzfließmaßtrichter vereinfachend angenommen, dass die Reynoldszahlen ebenfalls unterhalb der kritischen Grenze liegen, so dass bei dieser Arbeit alle Strömungen als laminar betrachtet werden können.

Ein anderer Modellparameter ist die Festlegung der „Operating Conditions“. Hier wird der Umgebungsdruck definiert, bei dem die Grundeinstellung beizubehalten ist. Auch der Betrag und die Richtung der Erdbeschleunigung werden hier eingestellt.

1.4.4.3 Materialparameter

In FLUENT kann einerseits auf Materialien zurückgegriffen werden, die in der Datenbank des Programms vorhanden sind, wie Luft, Wasser oder Maschinenöl. Andererseits können neue Materialien definiert werden. Dies geschieht bei Fluiden durch Angabe der Dichte und der Viskosität. Zur Definition der Viskosität können unterschiedliche Stoffmodelle angesetzt werden, in dieser Arbeit wurde für das Newtonsche Fluid das Newton Modell und für den SVM sowie SVB das Herschel-Bulkley Modell herangezogen (vgl. Kapitel 1.1). Im Anschluss daran müssen die definierten Materialien den jeweiligen Phasen zugeordnet werden.

1.4.4.4 Wahl der numerischen Parameter

Als numerische Parameter können die Unterrelaxationsfaktoren gewählt werden, mit denen der Iterationsfehler je Iteration beeinflusst werden kann. Hier wird üblicherweise von den Grundeinstellungen ausgegangen. Sollten sich die numerischen Berechnungen als nicht konvergent oder instabil erweisen, können diese Faktoren verringert werden (vgl. Kapitel 1.4.3.2).

Außerdem kann hier der Lösungsalgorithmus definiert werden, mit dem der Druck, die Druck-Geschwindigkeitskopplung, die Impulserhaltung und die Volumenanteile berechnet werden soll (vgl. Kapitel 1.4.2).

1.4.4.5 Berechnung der Strömungsvorgänge

Vor dem Start des Simulationsprozesses muss eine Initialisierung stattfinden. Das bedeutet, dass entweder den Strömungsgrößen bestimmte Werte zugewiesen werden, oder dass die Simulation von einer bereits berechneten Strömungssituation ausgehend gestartet wird. Bei der numerischen Simulation des L-Kastens und des Setzfließversuchs sind zu Beginn alle Strömungsgrößen gleich Null, da im realen Versuch das Fluid im vertikalen Teil des Kastens sowie das Fluid in dem Trichter in Ruhe ist.

Die Strömungsvorgänge in dem L-Kasten und im Setzfließmaßtrichter sind instationäre Vorgänge (unsteady). Die Simulation instationärer Strömungen unterscheidet sich von der Simulation stationärer Vorgänge dahingehend, dass der kontinuierliche Strömungsvorgang zeitlich diskretisiert werden muss. Zur zeitlichen Diskretisierung muss ein Zeitschritt ausgewählt werden und man muss festlegen, wie viele Iterationen pro Zeitschritt maximal durchgeführt werden sollen. Die Wahl des Zeitschritts spielt bei der Berechnung eine wichtige Rolle, da hierdurch das Ergebnis der Simulation erheblich beeinflusst werden kann. Um instationäre Phänomene genau zu erfassen, ist es sinnvoll, den Zeitschritt mindestens eine Größenordnung kleiner als die kleinste Zeitkonstante des Systems zu wählen. Die Beurteilung des gewählten Zeitschrittes kann anhand der Anzahl der notwendigen Iterationen erfolgen, die erforderlich ist, um eine konvergierte Lösung zu erzielen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Anzahl der Iterationen pro Zeitschritt idealerweise zwischen 10 und 20 liegen sollte.

1.4.4.6 Numerische Diffusion

Wie bereits erläutert entstehen bei der numerischen Simulation von Strömungsvorgängen Fehler, die sich in der numerischen Diffusion widerspiegeln. Die numerische Diffusion ist auf den Rundungsfehler zurück zu führen, der bei der diskreten Darstellung der Strömungsgleichungen entsteht. Durch Diskretisierungsschemata höherer Ordnung (2nd Order Upwind) und der Verfeinerung des numerischen Gitters kann die numerische Diffusion verringert werden. Wenn es sich bei den Strömungen um einfache Strömungsvorgänge handelt, wirkt sich eine Ausrichtung des Gitters an die Strömungsrichtung positiv auf die Berechnung aus.

1.4.4.7 Simulationsauswertung (Post-Processing)

In FLUENT besteht die Möglichkeit bei einer instationären Berechnung zu vorgegebenen Zeitpunkten durch Aktivieren der „Autosave“ Funktion ein Datenfile (.dat-file) zu speichern. In dem Datenfile werden alle Gitterinformationen und berechneten Daten gespeichert. Somit können die Strömungsgrößen für jeden gewählten bzw. vorher definierten Zeitpunkt mit den in FLUENT vorhandenen graphischen und numerischen Darstellungen analysiert werden. Ein Befehl, der eine Analyse der Fließfront in dem L-Kasten oder in dem Setzfließversuch ermöglicht, ist in FLUENT allerdings nicht implementiert. Die Fließfront wird identifiziert indem die Grenzfläche zwischen dem Fluid und der Luft erfasst wird. Dies erfolgt mit Hilfe der „VOF“ Funktion in dem „Iso-Clip“ Panel. Hier kann angegeben werden, wie viel Volumenprozent einer Fluidphase sich in einer Zelle befindet, die entlang einer Linie verläuft oder auf einer Fläche liegt. Die Linie oder Fläche muss zuvor „geclippt“, d. h. erfasst werden. Dabei muss ein Mindestwert sowie ein Höchstwert für den Volumengehalt eingegeben werden. Für die Erfassung der Werte muss die „Execute Command“ Funktion aktiviert werden, welche die Werte in einer x-time Datei in Abhängigkeit der Zeit herauschreibt. Die Koordinate der jeweiligen Zelle wird bei der Simulation des L-Kastens mit einer Linie definiert, die 10 mm über dem Boden des L-Kastens verläuft (vgl. [Bild C2](#)). Aus den Versuchen konnte dieser Wert als sinnvolle Koordinate zur Beschreibung der Fließfront angenommen werden. Bei dem Setzfließversuch wurde eine Linie gewählt, die von dem Mittelpunkt der Platte in positive x-Richtung verläuft und somit den Radius des Setzfließkuchens wiedergibt. Die Linie liegt hier allerdings nur 0,1 mm oberhalb der Platte, da sonst aufgrund der Geometrie des Trichters zu Beginn der Simulation Werte herausgeschrieben würden, die kleiner sind als der tatsächlich Radius der Trichterunterkante (vgl. [Bild C2](#)).

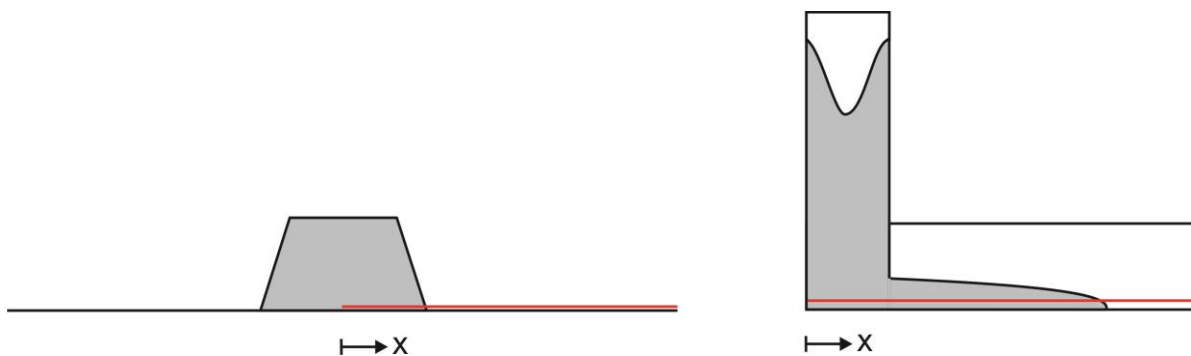


Bild C2: Darstellung der Auswertelinie bei der Simulation des Setzfließversuchs sowie des L-Kasten-Versuchs

2 MODELLIERUNG DER VERSUCHE

2.1 Modellierung des L-Kastens

Bevor eine Simulation in FLUENT durchgeführt wird, muss zuvor, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, das Modell erstellt und das Netz generiert werden. Für das Modell des L-Kastens wurde in GAMBIT eine Netzgröße von 1,0 gewählt. In Bild C3 ist das Modell des L-Kastens mit den zugehörigen „boundary conditions“ dargestellt (vgl. Kapitel 1.2).

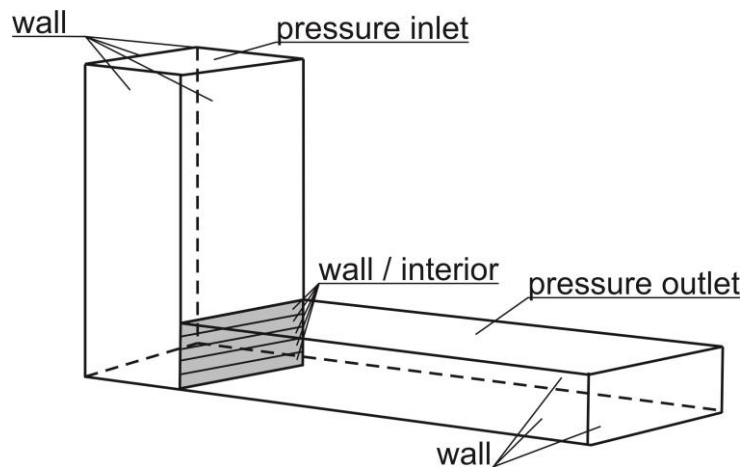


Bild C3: Boundary conditions des L-Kastens

Die obere Öffnung des vertikalen Kastens ist als „pressure inlet“ und die Öffnung des Trogs als „pressure outlet“ definiert, da an beiden Öffnungen der atmosphärische Druck ausgeglichen werden muss. Alle anderen Flächen werden als „wall“ (Wand) angenommen. Der Schieber wurde durch fünf Flächen abgebildet, die zunächst als „wall“ (Wand) definiert waren und in FLUENT nacheinander von „wall“ in „interior“ umgewandelt wurden, wobei Flächen, die als „interior“ definiert sind, von dem Fluid durchströmt werden können. So konnte das Hochziehen des Schiebers im Versuch modelliert werden.

2.2 Modellierung des Setzfließversuchs

Die Modellierung des Setzfließversuchs erwies sich als wesentlich schwieriger als die Modellierung des L-Kasten-Versuchs (vgl. Kapitel 2.1). Da es in FLUENT nicht ohne weiteres möglich ist, Geometrien in Bewegung zu setzen, musste nach Möglichkeiten gesucht werden, das Hochziehen des Trichters im Versuch ohne die Bewegung von Flächen zu modellieren. Zunächst wurde anhand der Videoaufnahmen des Setzfließversuches bestimmt, wie hoch der Trichter insgesamt angehoben wird. Es ergab sich eine

Höhe von ca. 60 mm, die in etwa der Höhe des Hägermanntrichters entspricht. Bei der Modellierung wurde der Trichter direkt auf der Platte aufgesetzt. Das Hochziehen des Trichters wurde modelliert, indem die untere Hälfte der Trichterfläche, die 30 mm hoch ist, in GAMBIT als „interior“ definiert wurde, was impliziert, dass diese Fläche zu Beginn der Simulation von dem Fluid durchdrungen werden kann. Dass die untere Trichterfläche, die als „interior“ definiert wurde, 30 mm hoch ist, stellt insofern einen Kompromiss dar, als dass der Trichter in dem Versuch kontinuierlich bis auf 60 mm hochgehoben wird, so dass sichergestellt wird, dass zu Beginn des Fließvorgangs eine definierte Menge des Fluids aus dem Trichter ausfließt.

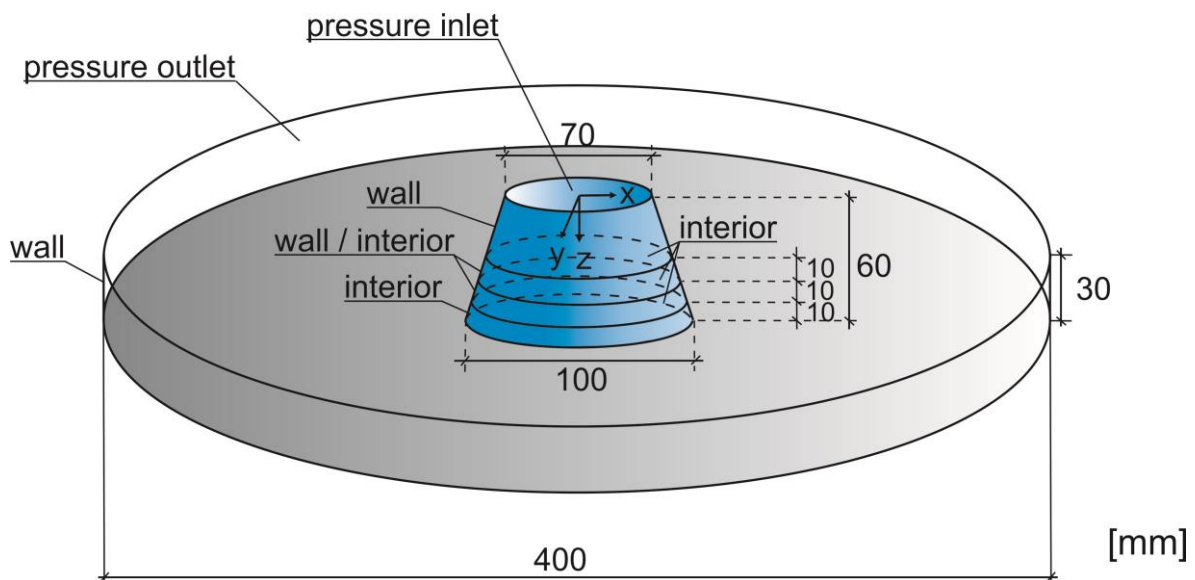


Bild C4: Modell des Setzfließmaßversuchs mit den zugehörigen boundary conditions

Bei den Simulationen mit diesem Modell stellte sich heraus, dass die Fließgeschwindigkeit in den ersten 0,5 s gegenüber der aus den Versuchen stark erhöht war. Bei Betrachtung des Fließvorgangs in den Videoaufnahmen des Setzfließversuchs stellte sich heraus, dass das Anheben des Trichters um 30 mm ebenfalls in den ersten 0,5 s erfolgte. Bei genauerer Betrachtung der Videoaufnahme konnte beobachtet werden, dass das Anheben um 10 mm nach 0,12 s, um 20 mm nach 0,32 s sowie um 30 mm nach 0,50 s erfolgte. Für eine bessere Abbildung dieser Anhebegeschwindigkeit in den ersten 0,5 s wurde daher in dem Modell in GAMBIT die 30 mm hohe Trichterfläche in drei Trichterflächen á 10 mm aufgeteilt (vgl. Bild C4), wobei die untere Fläche bereits in GAMBIT als „interior“ definiert wurde (vgl. Kapitel 1.2). Die mittlere sowie obere Fläche wurde zunächst als „wall“ definiert und in FLUENT zu den entsprechenden Zeitpunkten, d. h. nach 0,32 s und nach 0,50 s, in „interior“ umgewandelt. In GAMBIT wurden weiterhin die Flächen zwischen den einzelnen

Trichtersegmenten als interior definiert. Die obere Öffnung des Trichters wurde als „pressure inlet“ und die obere Öffnung der „Box“, in dem sich der Trichter befindet als „pressure inlet“ abgebildet, da an beiden Öffnungen der atmosphärische Druck ausgeglichen werden muss. Alle anderen Flächen wurden als „wall“ definiert (vgl. Bild C4).

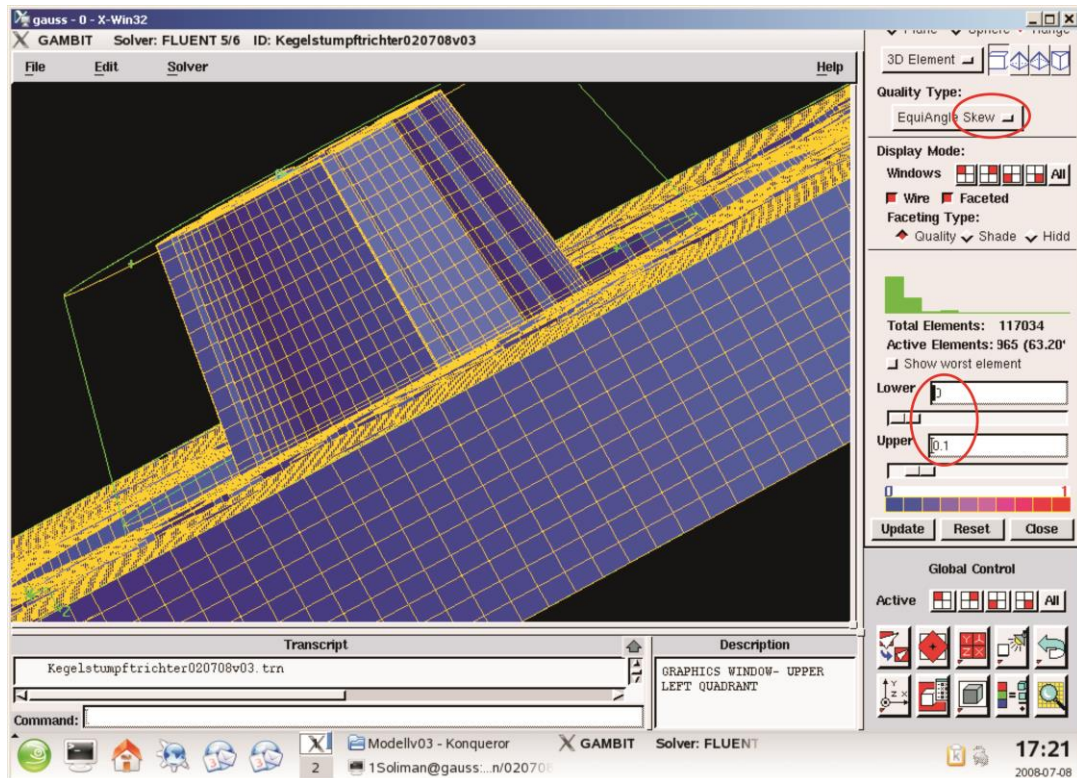


Bild C5: Darstellung der Zellen aus dem Setzfließtrichter Modell mit einer skewness (Schräge) von bis zu 10%

Die Platte wurde nicht rechteckig, wie im tatsächlichen Versuch abgebildet, sondern rund, da sich dadurch die Anzahl der Zellen drastisch reduzierte und somit die Rechenzeit in FLUENT verkürzte. Für den Trichter und die „Box“, in der sich der Trichter befand wurde eine Netzgröße von 0,25 sowie 0,40 gewählt. Somit erfolgte hier eine feinere Netzeinteilung als bei dem L-Kasten Modell, wo die Netzgröße 1 betrug. Jedoch ist dies aufgrund der komplexeren Geometrie des Trichters erforderlich. Weiterhin wurde die in Kapitel 1.2 beschriebenen Netzeigenschaften skewness (vgl. Bild C5) und aspect ratio untersucht, bei der sich die Qualität des Netzes als gut erwies.