Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Timo Wüstholz
aus Künzelsau

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller

Tag der mündlichen Prüfung:
12. Juli 2005

Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart

2005

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart. Sie wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Selbstverdichtender Beton unter Verwendung lokaler Ausgangsstoffe“ mit finanziellen Mitteln der Gips-Schüle-Stiftung gefördert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt danke ich sehr herzlich für sein reges Interesse an der Arbeit, seine Anregungen und seine stete Diskussions- und Hilfsbereitschaft. Er hat im besonderen Maße zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller gilt mein Dank für seine wertvollen Hinweise und die Übernahme des Korreferates.

Ebenso möchte ich mich bei den Kollegen des Instituts bedanken, die mir mit geschätztem Rat und durch ihre Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Insbesondere Michael Stegmaier und Sven Mönnig möchte ich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen danken. Besonders möchte ich Frau Hella Schmidt erwähnen. Weiterer Dank gilt Simone Stumpp, Alexander T. Herb und Ralf Beutel.

Meinen wissenschaftlichen Hilfskräften und Diplomanden Alexandros Gkarvanos, Aristotelis Kitsakis, Seref Diler, Güven Kodas, Daniel Gaißert und Fatih Türk möchte ich für ihre Motivation, ihr Engagement und ihre Ausdauer danken.

Den Kollegen von der Materialprüfungsanstalt (Otto-Graf-Institut) möchte ich ebenso meinen Dank aussprechen. Hier ist besonders die Abteilung Mineralische Baustoffe zu erwähnen, an der sämtliche experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurden.

Zuletzt möchte ich noch meinen Eltern dafür danken, dass sie mir das Studium ermöglicht haben, die geduldige Korrekturdurchsicht der vorliegenden Arbeit vornahmen und mich stets unterstützten.

Stuttgart, im Juli 2005 Timo Wüstholz

Abstract

Experimental and theoretical investigations of the fresh properties of self-compacting concrete

Self-compacting concrete (SCC) flows alone under its dead weight up to levelling, airs out and consolidates itself thereby without any entry of additional compaction energy and without a nameable segregation. A well-designed SCC is able to overcome constricted openings and obstacles e.g. dense reinforced areas and notches. This highly flowable concrete was made possible by the development of highly effective water reducing agents (superplasticizers), those usually based on polycarboxylate ethers combined with a mixture composition which deviates from that of conventional concrete.

SCC responds very sensible to deviations of mixture proportions. Already slightest deviations can lead to a concrete that does not obtain one or more of these characteristic flow properties. This can cause substantial lack of the finished construction unit, which lower not least the durability drastically and make in the worst case a construction useless. It is the complex interaction of different mechanisms that lead to these flow properties. On the other hand these complex interactions are responsible for a large number of potential parameters controlling the fluidity of SCC.

One objective of this work was to vary a large number of parameters controlling the fluidity in order to show the dependences between the mixture compositions and the resulting flow behaviour and to understand the mechanisms standing behind them. The large number of varied parameters and the use of different cements and combinations of cements and fillers provide an assistance in the development and optimisation of SCC.

To clarify how the concrete composition is influencing the flow behaviour, different test programmes have been conducted (table 3.1). In detail the type of cement and filler and their mass ratio have been varied. Two different types of filler, limestone powder (KSM) and fly ash (SFA), have been used. In the test programme I the particle size distribution of the aggregates was varied between A16 and C16 [DIN 1045-2, Appendix L]. In the test programme II the amount of the cement content was varied for a constant equivalent water-cement ratio $(w/z)_{eq}$. The three cement types CEM II/A-LL 32.5R, CEM II/A-S 32.5R and CEM II/B-T 32.5R have been used. In the test programme III the water-binder ratio V_w/V_b, the paste volume V_{Leim}, the superplasticizer content m_{FM}, the content of the viscosity agent m_{St}, the mortar volume and the volume of coarse aggregates (> 8 mm) were varied for the concretes with CEM II/A-LL 32.5R and limestone powder. The equivalent water-cement ratios $(w/z)_{eq}$ were set in the range of 0.65 to 0.70. In the test programme IV fly ash SFA (A) was used instead of limestone powder KSM (A). The equivalent water-cement ratios $(w/z)_{eq}$ were set in the range of 0.41 to 0.47. In the test programme V additional tests have been performed with CEM II/A-LL 32.5R and partially with a combination of the fillers KSM (A) and SFA (A). For the test series I to V round aggregates, river sand and gravel, were used. In the test programme VI additional tests were performed with CEM II/A-LL 42.5R, limestone powder KSM (B) and crushed aggregates (marine sand 0/4 and crushed granite 4/16). For all test series the maximum aggregate diameter was set to 16 mm.

The rheological behaviour of fresh concrete can be compared to that of a BINGHAM fluid which starts to flow if the shear stress exceeds a minimum value (yield stress τ_0). The second characteristic value is the plastic viscosity η_{pl}. The rheological behaviour of fluids is normally characterised by so-called flow curves. Flow curves describe the relationship between the shear velocity and the shear stresses in a fluid. Flow curves can be measured be means of a so-called viscometer respective rheometer.

In this work the flow properties of SCC were characterised by means of standardised test methods [REINHARDT ET AL., 2001], [EFNARC, 2002] as well as by the measurement of the flow curves with the fresh concrete rheometer "BTRHEOM" [DE LARRARD ET AL., 1998], [HU ET AL., 1996]. The "BTRHEOM" (fig. 3.10, 3.11) is a parallel plate rheometer in which a concrete sample of about 7 litres is exposed to a rotational motion. During the measuring process the torque is determined as function of the number of revolutions in the range between 0.8 and 0.1 s^{-1}. Evaluated were 5 measuring points between 0.8 and 0.24 s^{-1} as below 0.2 s^{-1} caused partially a discontinuous motion (stick-slip motion). From these measuring points (torque Γ and number of revolutions n) a flow curve can the derived by a regression analysis.

As a simplest case the measuring points can be fitted by a straight line (BINGHAM model, fig. 3.12, eq. (4.1)). From the slope of the straight line the so-called plastic viscosity η_{pl} can be calculated whereas the yield stress can be derived for $n = 0$. The yield stress τ_0 and the plastic viscosity η_{pl} are characteristic values for each concrete composition. However, the majority of the tested concrete mixtures had a shear-thickening Γ-n-relationship. Hence the application of the BINGHAM model led especially for the relatively highly viscous concretes including fly ash to negative yield stresses τ_0, which are physically impossible. It is therefore better to choose the HERSCHEL-BULKLEY law for the regression analysis (eq. (4.3)) which is able to describe also shear-thickening flow behaviour. The yield stress determined after applying the Herschel-Bulkley law was identified with $\tau_{0,HB}$. However, for the description of a HERSCHEL-BULKLEY fluid three parameters are necessary, whereas only the yield stress can be physically interpreted, this is a disadvantage. Therefore a combined flow curve approximation was chosen which combines the advantages of the two different methods: As a first step the HERSCHEL-BULKLEY function was applied to determine the yield stress $\tau_{0,HB}$. After that a linear regression (BINGHAM model) was applied to calculate the plastic viscosity $\eta_{pl,HB}$, whereas the yield stress was before specified. By means of this combined method negative yield stresses have been avoided if only exponents $b > 1$ were allowed in eq. (4.3). With eq. (4.7) a relationship was found between the plastic viscosity η_{pl}, which is directly determined from the linear regression, and the plastic viscosity $\eta_{pl,HB}$, determined by the combined method (HERSCHEL-BULKLEY approximation and the subsequent BINGHAM approximation). This relationship was independent from the type of filler.

The verification of the reproducibility showed that the characteristic values derived from the more complex rheometric test methods are subjected to larger variations than the characteristic values derived from the simple standardised test methods (tables 4.1 to 4.4). There are doubts that the parameters of the standard test methods can directly be traced back to the rheological parameters yield stress and plastic viscosity. Another object was therefore to check which parameters of the standard test methods can be expressed as a function of the rheological parameters.

For the prediction of the flow behaviour the concrete was modelled as a two phase system consisting of the fluid phase paste and the solid phase aggregates. The interaction between these two phases can be described as a function of the model parameter thickness of excess paste on the aggregates d_{Leim} (fig. 5.1). The thickness of excess paste can be calculated if the specific surface area and the bulk density of the uncompacted poured aggregates has been determined (eq. (5.3) to (5.7)). It is also possible to describe the interaction between the two phases by means of the so-called relative solid concentration ϕ/ϕ_{max} (eq. (5.2)) which is equivalent to the ratio of the solid phase content in a concrete mixture (by volume) ϕ related to the maximum solid content (by volume) of the solid phase under compacted condition ϕ_{max} (eq. (5.1)).

The consideration of the void content and the specific surface area of poured aggregates with different particle-size distributions has shown that an optimum lies between the standardised particle-size distributions B16 and AB16 according to the German standard [DIN 1045-2, Appendix L], fig. 5.5. But also the texture of the aggregates should influence the bulk density respective void content of the poured aggregates. In fresh concrete tests in which the particle-size distributions of the aggregate were varied between A16 and C16 according to [DIN 1045-2, appendix L] and the paste properties and also the paste volume have been held constant, the maximum slump flow value was observed for the particle-size distribution AB16 (fig. 5.6). This could be traced back to the calculated excess paste thickness which was also maximal for AB16. It could be further shown – with regard to the modelling of the characteristic standard test parameters and the rheological parameters – that the variations of the paste volume, the mortar volume and the volume of the coarse aggregates could be transferred into variations of the model parameter excess paste thickness. So far, mostly the rheological values yield stress and plastic viscosity have been modelled in the literature. Hence, this work was also focussed on the modelling of the characteristic values of the standard test methods e.g. slump flow value etc. (fig. 5.11 et seqq.). If the paste composition was held constant and the model parameter relative solid concentration ϕ/ϕ_{max} was chosen, only one function fulfilled to describe the relationship between the model parameter and the consistency parameter; it needn't be distinguished between different types of filler. If the characteristic values of the concrete flow behaviour were modelled by means of the model parameter excess paste thickness d_{Leim} it had to be distinguished between the different types of filler. While the interaction between the fluid and solid phase was modelled by means of the relative solid concentration or the excess paste thickness, a second model parameter had to be introduced to characterize the paste properties. The paste flow time $t_{V,Leim}$, which stands for the apparent viscosity of the fluid phase, was suitable for this purpose. To measure the paste flow time the V-funnel from the mortar tests was used with a circular orifice (∅ = 12 mm) instead of the rectangular orifice, see fig. 3.4. The influence of different paste compositions on the plastic viscosity of concrete could be taken into account using the paste flow time. However, this flow time was only a provisory tool to predict the influence of different paste compositions on the slump flow value. The flow time $t_{V,Leim}$ wasn't suitable for the prediction of the yield stress and the funnel flow time of concrete $t_{V,B}$.

The relationships between the different standardised test methods were investigated with regard to a rationalisation of the required effort for testing. Because of the annotated doubts above the standardised test methods were considered in terms of the macroscopic rheological properties of self-compacting concrete. It could be shown by means of a BINGHAM model fluid that the slump

flow value could be traced back mainly to the yield stress and the density of the concrete if the influence of the plastic viscosity will be neglected, see eq. (6.9). When the slump flow value is plotted against the yield stress (fig. 6.3) the model eq. (6.9) represents the lower limit for the measured slump flow values.

The role of the characteristic rheological values and their influence on the deairing process of SCC was discussed on the basis of an exemplary BINGHAM fluid. In real concrete the presence of aggregates has an influence on the deairing process. But also the thixotropic behaviour of SCC influences the ability for deairing. Finally adhesion, especially between the air bubbles and the formwork but also between the air bubbles and the aggregates, has an influence on the deairing process. However, based on the cognitions of the exemplary consideration of an ideal BINGHAM fluid, an empirical model was deduced in which the measured air content is traced back to the macroscopic variables yield stress and plastic viscosity (eq. (6.29)). The parameters of this empirical model were derived from a regression analysis. The concretes produced with limestone filler had higher air contents than the concretes with fly ash. This was presumably provoked by a more rapid loss of workability of the concretes with limestone filler compared to the concretes with fly ash.

The segregation process – which means the sinking of aggregates caused by the differences in densities between paste and aggregates – can be considered analogous to the deairing process. It was possible to specify areas in that considered concretes showed segregation (fig. 6.14 and 6.15.). These areas are dependent on the composition and therefore also dependent on the filler type.

More research is needed to understand the role of thixotropy that influences the segregation and deairing process at rest, especially with regard to the question, how the thixotropic behaviour can be selectively controlled.

Also the blocking behaviour in the so-called J-ring test was considered. In a macroscopic scale the measured blocking behaviour depends on the plastic viscosity and the yield stress of the concrete. To quantify the blocking independently from the slump flow value the height difference st_J of the concrete contour inside the ring and directly outside the ring (behind the vertical rods) was measured (fig. 3.7). The blocked concrete inside the ring is approximately proportional to the measured height difference st_J if the concrete shape inside the ring is considered to be plane. In fact the contour of concrete depends on the yield stress.

The flow time t_{500} in the slump flow test could be described as a function of the plastic viscosity without distinction of the filler type (eq. (6.40), fig. 6.22). It is therefore possible to estimate the yield stress as well as the plastic viscosity based on the slump flow value and the flow time t_{500}. Actually the funnel flow time $t_{V,B}$, which is measured in the V-funnel test for concrete, shall provide an indication of concretes which have different plastic viscosities. In fact also the flow time $t_{V,B}$ was dependent on the plastic viscosity of concrete (fig. 6.24). But the concretes with fly ash had approximately a plastic viscosity which was twice as large compared to the concretes with limestone powder despite the funnel flow time was equal. Moreover it is problematic that the funnel flow time is also affected by blocking effects. Hence the funnel flow time $t_{V,B}$ is not a suitable value to distinguish between concretes which have different plastic viscosities.

Another chapter was dedicated to a concept for production of a robust self-compacting concrete. Preferred areas with robust mixes were indicated (fig. 7.1 and 7.2) by means of the introduced model parameters paste flow time $t_{V,Leim}$ and excess paste thickness d_{Leim}. These areas were dependent on the filler type. The flow behaviour of SCC was also considered as a function of the cement type, the excess paste thickness d_{Leim} and the water-binder ratio V_w/V_b (fig. 7.4 et seqq.). CEM II/A-LL 32.5R was especially appropriate. Robust self-compacting concretes have been produced with a total powder content below 500 kg/m³. The reduced flowability of concretes produced with CEM II/A-S 32.5R or CEM II/B-T 32.5R was traced back to an increased water demand (table 3.3). But it is also possible that chemical and mineralogical differences between the cements and also interactions with the superplasticizer were responsible for the observed behaviour. Hence the mentioned areas can't be transferred to any applications. Already the great amount of possible combinations of available raw materials prevents this. The mentioned areas and methods should be more understand as tools that provide a development of a new mixture or that serve for a continuous quality assurance.

After all, possible applications of the macroscopic rheological parameters were discussed. For this purpose the pumping of HERSCHEL-BULKLEY respective BINGHAM fluids through pipes was considered. The pumping of SCC – in analogy to ordinary concrete – also seems to be dominated by the formation and the maintenance of slipping areas. So that the macroscopic rheological parameters yield stress and plastic viscosity play a secondary role in the pumping processes. However they play an important role in other flow processes if the concrete does not segregate. The macroscopic rheological parameters could be used e.g. if the flow behaviour of self-compacting concrete shall be simulated before the building process starts. For this purpose commercial simulation software can be applied.

In other fields – like the injection moulding of polymers – it is state of the art to simulate the filling process. Further examples are simulations of debris flows [PARSONS ET AL., 2001], [MEI ET AL., 2001]. For those applications the flow curves respectively the derived rheological parameters are a basic requirement. The modelling of the rheological parameters is thereby an important simplification if the flow behaviour of concrete structures shall be simulated based on the mixture composition.

But further research is needed with regard to the dynamic segregation of self-compacting concrete which can be provoked by complex geometries of structures or by critical concentrations of reinforcement. It is not enough to determine only the macroscopic parameters yield stress and plastic viscosity if the segregation of concrete constituents shall be simulated. However these simulations can also be based on a two phase consideration of concrete. In future it is possible that the computer based modelling of the flow behaviour will be so sophisticated that the motion of single aggregate particles can be simulated during the flow process of self-compacting concrete in complex formworks.

Inhalt

1 Einleitung und Ziel ... 1

2 Grundlagen ... 3

2.1 Rheologische Betrachtungsweise ... 3

2.1.1 Phänomenologische Rheologie bzw. Makrorheologie ... 3

2.1.2 Mikrorheologie ... 3

2.2 Messung rheologischer Eigenschaften (Rheometrie) ... 4

2.3 Unterteilung der Dispersionen ... 6

2.4 Fließverhalten von Suspensionen ... 9

2.4.1 (Schub-)Dilatanz ... 9

2.4.2 Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Suspensionen ... 10

2.5 Fließverhalten von Bindemittelleim bzw. Beton ... 13

2.5.1 Zeit- und temperaturabhängiges Verhalten ... 13

2.5.1.1 Thixotropie ... 14

2.5.1.2 Wechselwirkungen mit Fließmitteln ... 18

2.5.2 Rolle stabilisierender Zusätze ... 20

2.5.3 Einfluss des Wasserzementwertes und der Mahlfeinheit von Zement ... 23

2.6 Existierende Modelle für die Beschreibung des Fließverhaltens von Beton ... 24

3 Art und Umfang der Untersuchungen ... 28

3.1 Versuchsprogramme ... 28

3.2 Charakterisierung der verwendeten Ausgangsstoffe ... 30

3.2.1 Wasser ... 30

3.2.2 Zusatzmittel ... 30

3.2.3 Bindemittel ... 31

3.2.4 Gesteinskörnung ... 32

3.3 Rheologische Untersuchungen ... 33

3.3.1 Prüfungen an Leim ... 33

3.3.2 Standardprüfverfahren für Mörtel und Beton (1-Punkt-Verfahren) ... 35

3.3.3 Rheometrische Prüfverfahren für Beton (2-Punkt-Verfahren) ... 38

4 Ergebnisse und Diskussion ... 43

4.1 Reproduzierbarkeit einzelner Ergebnisse ... 43

4.2 Abhängigkeit der Fließkurvenparameter von den Standardkonsistenzparametern und der Betonzusammensetzung ... 47

4.3 Zusammenhang zwischen der Betonzusammensetzung und dem Fließverhalten ... 51

4.3.1 Variation der Leimzusammensetzung ... 51

4.3.1.1 Variation des Wassergehaltes ... 52

4.3.1.2 Variation des Fließmittelgehaltes ... 54

4.3.1.3 Variation des Stabilisierergehaltes ... 56

4.3.1.4 Variation des Zementgehaltes bei einem konstanten äquivalenten Wasserzementwert ... 58

4.3.2 Variation des Leimvolumens ... 60

4.3.3 Variation des Mörtelvolumens ... 62

4.3.4 Variation der Sieblinie bei konstantem Leimvolumen 64
4.3.4.1 Variation der Sieblinie im Bereich A16 bis C16 64
4.3.4.2 Variation der Grobkornzusammensetzung 66

5 Modellierung der rheologischen Eigenschaften 70
5.1 Modellierung der Feststoffphase (Gesteinskörnung) 70
5.2 Interaktion zwischen Feststoff- und Leimphase 77
5.3 Berücksichtigung verschiedener Leimzusammensetzungen 84

6 Prüftechnische Betrachtung makroskopischer Eigenschaften 89
6.1 Nivellierfähigkeit 89
6.2 Selbstentlüftungsfähigkeit 93
6.3 Entmischen 103
6.3.1 Sedimentieren 103
6.3.2 Blockieren 108
6.4 Zusammenhang zwischen der Fließzeit und der plastischen Viskosität 113
6.5 Beziehungen zwischen den Fließzeiten unterschiedlicher Versuche 116

7 Konzept zur Herstellung von SVB 118

8 Simulation des Fließverhaltens bei baupraktischen Anwendungen 127

9 Zusammenfassung und Ausblick 131

10 Literatur 135

Anhang

Verwendete Symbole und Abkürzungen

Im Folgenden werden die wichtigsten verwendeten Symbole und Abkürzungen aufgeführt. Die Bedeutung anderer, nicht aufgeführter Zeichen leitet sich aus dem jeweiligen Zusammenhang ab und wird im betreffenden Abschnitt erläutert. Gleiches gilt für Doppelnennungen.

Lateinische Buchstaben

a	[variabel]	Parameter zur Beschreibung der HERSCHEL-BULKLEY-Fließkurven
a_B	[%]	Frischbetonluftgehalt
b	[variabel]	Parameter zur Beschreibung der HERSCHEL-BULKLEY-Fließkurven
d	[m]	Durchmesser
d_i	[mm]	Fiktiver Korndurchmesser
$d_{Leim,sphär}$	[mm]	Berechnete Leimschichtdicke auf der Gesteinskörnung, sphärische Betrachtung
$d_{Leim,pris}$	[mm]	Berechnete Leimschichtdicke auf der Gesteinskörnung, prismatische Betrachtung
h	[m]	Höhe der Betonprobe im Rheometer
m_b	[kg/m³]	Masse des Bindemittels je Kubikmeter Frischbeton
m_g	[kg/m³]	Masse der Gesteinskörnung je Kubikmeter Frischbeton
m_{FM}	[kg/m³]	Masse des zugegebenen Fließmittels je Kubikmeter Frischbeton
$m_{g,4/8}$	[kg/m³]	Masse der Gesteinskörnung (Kornfraktion 4/8) je Kubikmeter Frischbeton
$m_{g,8/16}$	[kg/m³]	Masse der Gesteinskörnung (Kornfraktion 8/16) je Kubikmeter Frischbeton
m_m	[kg/m³]	Masse des Mehlkorns (inkl. Anteil aus Gesteinskörnung) je Kubikmeter Frischbeton
m_{St}	[kg/m³]	Masse des zugegebenen Stabilisierers je Kubikmeter Frischbeton
m_z	[kg/m³]	Masse des Zementes je Kubikmeter Frischbeton
m_w	[kg/m³]	Masse des Wassers (Zugabewasser und Anteil aus flüssigen Zusatzstoffen) je Kubikmeter Frischbeton
n	[s^{-1}]	Drehzahl, Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde (Rheometer)
$n_{g,Schütt}$	[-]	Feststoffgehalt der losen Gesteinsschüttung
$n_{g,H,Schütt}$	[-]	Hohlraumgehalt der losen Gesteinsschüttung
n_i	[-]	Anzahl der fiktiven Gesteinskörner in der Kornklasse i
r	[m]	Radius
r_i	[m]	Mittlerer Radius des fiktiven Korns einer Kornklasse i
p	[N/m²]	Druck
p_L	[N/m²]	Luftdruck
s	[mm]	Setzmaß im Setzversuch (Slump Test)

sf_B	[mm]	Setzfließmaß des Betons im Setzfließversuch
$sf_{B,J}$	[mm]	Setzfließmaß des Betons im Blockierringversuch (J-Ring)
sf_M	[mm]	Setzfließmaß des Mörtels
st_J	[mm]	Höhenunterschied im Blockierringversuch (J-Ring)
t_{500}	[s]	Fließzeit im Setzfließversuch bis zum Erreichen eines Durchmessers von 500 mm
$t_{500,J}$	[s]	Fließzeit im Blockierringversuch (J-Ring) bis zum Erreichen eines Durchmessers von 500 mm
$t_{V,B}$	[s]	Trichterauslaufzeit Beton
$t_{V,Leim}$	[s]	Trichterauslaufzeit Leim
$t_{V,M}$	[s]	Trichterauslaufzeit Mörtel
$(w/z)_{eq}$	[-]	Äquivalenter Wasserzementwert
A_{HB}	[variabel]	Parameter zur Kurvenanpassung der Messkurve im Rheometerversuch (HERSCHEL-BULKLEY)
A_B	[Nm.s]	Parameter zur Kurvenanpassung der Messkurve im Rheometerversuch (BINGHAM)
$A_{B'}$	[Nm.s]	Parameter zur Kurvenanpassung der Messkurve im Rheometerversuch (BINGHAM mit vorgeschalteter HERSCHEL-BULKLEY-Anpassung)
D	[m]	Durchmesser
O_g	[cm²/m³]	Oberfläche der Gesteinskörnung je Kubikmeter Frischbeton
$O_{g,spez}$	[cm²/g]	Spezifische Oberfläche der Gesteinskörnung je Gramm der Gesteinskörnung
V_g	[dm³/m³]	Volumen der Gesteinskörnung (reines Kornvolumen) je Kubikmeter Frischbeton
$V_{g,Schütt}$	[dm³/m³]	Volumen der losen Gesteinsschüttung je Kubikmeter Frischbeton
V_{ges}	[dm³]	Gesamtvolumen (Bezugsvolumen)
$V_{g,H,Schütt}$	[dm³/m³]	Hohlraumvolumen in der losen Gesteinsschüttung
V_{Leim}	[dm³/m³]	Volumen des Bindemittelleimes je Kubikmeter Frischbeton
$V_{Leim,Ü}$	[dm³/m³]	Volumen des Überschussleimes je Kubikmeter Frischbeton
V_M	[dm³/m³]	Mörtelvolumen (Leim + Gesteinskörnung < 4 mm) je Kubikmeter Frischbeton
V_w/V_b	[-]	Volumenbezogenes Wasser-Bindemittel-Verhältnis
$V_{g>8}$	[dm³/m³]	Volumen Kornfraktion > 8 mm je Kubikmeter Frischbeton

Griechische Buchstaben

β_p	[-]	Wasseranspruch nach OKAMURA
ϕ	[-]	Feststoffkonzentration
ϕ_{max}	[-]	Maximal mögliche Feststoffkonzentration
ϕ/ϕ_{max}	[-]	Relative Feststoffkonzentration
γ	[-]	Modellparameter, festgelegt durch eine Regressionsrechnung
$\dot{\gamma}$	[s^{-1}]	Schergeschwindigkeit
$\dot{\gamma}_{t_{500}}$	[s^{-1}]	Schergeschwindigkeit im Setzfließversuch bei Erreichen der 500 mm-Markierung
η	[Pa.s]	Dynamische Viskosität
$[\eta]$	[-]	Intrinsische Viskosität
η_{diff}	[Pa.s]	Differenzielle Viskosität
η_F	[Pa.s]	DynamischeViskosität der flüssigen Phase
η_{pl}	[Pa.s]	Plastische Viskosität nach BINGHAM
$\eta_{pl,HB}$	[Pa.s]	Plastische Viskosität (BINGHAM-Modell), ermittelt durch zwei aufeinander folgende Kurvenanpassungen. Zunächst HERSCHEL-BULKLEY-Anpassung und anschließend BINGHAM-Anpassung bei festgehaltener Fließgrenze
η_{rel}	[-]	Relative dynamische Viskosität. Verhältnis zwischen dynamischer Viskosität der Suspension und der flüssigen Phase
ρ_B	[kg/dm³]	Dichte des Betons
ρ_F	[kg/dm³]	Dichte des Fluides
ρ_g	[kg/dm³]	Mittlere Korndichte der Gesteinskörnung
$\rho_{g,Schütt}$	[kg/dm³]	Dichte der Gesteinsschüttung bei loser Schüttung (Schüttdichte)
$\rho_{g,Pack}$	[kg/dm³]	Dichte der Gesteinsschüttung bei verdichteter Schüttung (Packungsdichte)
ρ_L	[kg/dm³]	Dichte der Luft
ρ_w	[kg/dm³]	Dichte des Wassers
ρ_z	[kg/dm³]	Dichte des Zements
τ	[N/m²]	Schubspannung
τ_0	[N/m²]	Fließgrenze
$\tau_{0,B}$	[N/m²]	Fließgrenze ermittelt nach BINGHAM-Ansatz
$\tau_{0,HB}$	[N/m²]	Fließgrenze. Fließkurve durch HERSCHEL-BULKLEY-Ansatz angepasst
Γ	[Nm]	Drehmoment, gemessen im Rheometerversuch
Γ_0	[Nm]	Durch Extrapolation ermitteltes Fließmoment im Rheometerversuch
$\Gamma_{0,B}$	[Nm]	Durch Extrapolation ermitteltes Fließmoment im Rheometerversuch. Annäherung der Messpunkte durch eine Gerade (BINGHAM)
Ω	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung und Ziel

Selbstverdichtender Beton (SVB) fließt allein unter seinem Eigengewicht bis zum Niveauausgleich und entlüftet sich dabei selbständig, ohne Eintrag zusätzlicher Rüttelenergie. Richtig konzipiert ist er in der Lage, Engpässe und Hindernisse, die etwa aus der Bewehrung und aus Aussparungen bestehen können, zu passieren, ohne dass er sich dabei nennenswert entmischt. Ermöglicht wurde dieses außerordentliche Fließverhalten erst durch die Entwicklung hochwirksamer Fließmittel in Verbindung mit einer von Rüttelbeton abweichenden Mischungszusammensetzung.

SVB reagiert jedoch sehr sensibel auf Schwankungen in der Zusammensetzung. Bereits geringste Abweichungen führen dazu, dass eine oder mehrere dieser charakteristischen Fließeigenschaften nicht erreicht werden. Dies kann zu erheblichen Mängeln am fertigen Bauteil führen, welche die Dauerhaftigkeit drastisch herabsetzen und im schlimmsten Fall eine Konstruktion unbrauchbar machen. Daher ist es wichtig, die Beziehung zwischen der Betonzusammensetzung und dem resultierenden Fließverhalten eingehend zu untersuchen.

Das rheologische Verhalten von Frischbeton kann am einfachsten mit dem einer BINGHAM-Flüssigkeit verglichen werden, die erst zu fließen beginnt, wenn eine Mindestschubspannung (Fließgrenze) überwunden ist, wobei der zweite Kennwert dieser BINGHAM-Flüssigkeit die plastische Viskosität (Zähigkeit) darstellt. Das Wort *„Rheologie“* ist vom griechischen *„ρεω“* abgeleitet, was „Fließen“ bedeutet. Wörtlich übersetzt ist die Rheologie also die Lehre vom Fließen. Zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften von Flüssigkeiten bedarf es der Aufzeichnung so genannter Fließkurven, welche die Beziehung zwischen den in der Flüssigkeit herrschenden Schubspannungen und der daraus resultierenden Schergeschwindigkeit beschreiben. Die Aufzeichnung solcher Fließkurven erfolgt mit so genannten Viskometern bzw. Rheometern.

Die Kenntnis der Fließkurven bzw. der davon abgeleiteten Kennwerte eröffnet eine Vielzahl von Anwendungsgebieten. So kann beispielsweise bereits in der Entwurfsphase das Formfüllungsvermögen simuliert werden. Entweder kann dabei auf existierende Lösungen strömungsmechanischer Problemstellungen zurückgegriffen werden oder es kann kommerzielle Software eingesetzt werden, wenn komplexere Anwendungen simuliert werden sollen. In anderen technischen Disziplinen – wie beispielsweise beim Kunststoffspritzgießen – ist es bereits heute Stand der Technik, den Formfüllungsvorgang durch strömungsmechanische Berechnungen auf Basis der Fließkurven vorab zu simulieren. Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit solcher Simulationsverfahren sind jedoch entmischungsfreie Betone.

Wegen der vergleichsweise teuren Messausstattung zur Ermittlung solcher Fließkurven werden rheometrische Verfahren auch in Zukunft nur größeren Betonlabors vorbehalten sein. Deshalb wurden zur Charakterisierung der Frischbetoneigenschaften und zur Abschätzung des Formausfüllungsvermögens einfachere, auch für den Baustelleneinsatz geeignete Konsistenzprüfverfahren entwickelt. Im Grunde sollen diese einfachen Verfahren Rückschlüsse auf die charakteristischen Kennwerte Fließgrenze und plastische Viskosität ermöglichen. Weil SVB aufgrund seiner Zusammensetzung prinzipiell zur Entmischung neigt, wurden ergänzende Verfahren eingeführt, mit denen auch die Entmischungsneigung während und nach Beendigung des Fließvorganges bewertet werden kann.

Ein Ziel dieser Arbeit besteht darin, den Zusammenhang zwischen der Betonzusammensetzung und den resultierenden rheologischen Eigenschaften systematisch und umfassend zu untersuchen. Dabei kommen sowohl die Standardkonsistenzprüfverfahren als auch ein Frischbetonrheometer zum Einsatz.

Der Variation der Ausgangsstoffe kommt dabei eine besondere Rolle zu. Es ist wichtig, unterschiedliche Zemente bzw. Zement-Zusatzstoff-Kombinationen zu untersuchen sowie die wichtigsten Entwurfsparameter zu variieren. Nur so kann eine umfassende Datenbasis erstellt werden, die ein breites Spektrum der in der Praxis eingesetzten selbstverdichtenden Betone repräsentiert.

Damit die zahlreichen Konsistenzsteuerparameter vergleichbar gemacht werden können, bedarf es der Einführung geeigneter Modellparameter. Diese Modellparameter gestatten die Vorhersage des Fließverhaltens auf Basis der Zusammensetzung bereits während der Entwurfsphase. Ein besonderes Augenmerk gilt der Modellierung der Standardkonsistenzparameter und der rheologischen Kenngrößen.

Weil Zweifel bestehen, ob insbesondere die einfachen Konsistenzprüfverfahren direkte Rückschlüsse auf die physikalischen Kenngrößen Fließgrenze und plastische Viskosität zulassen, werden vor dem Hintergrund dieser physikalischen Kennwerte die Schlüsseleigenschaften Nivellierfähigkeit, Selbstentlüftungsfähigkeit sowie die Entmischungsstabilität diskutiert. Die Entmischungsstabilität spielt dabei eine besondere Rolle, weil sie die Voraussetzung zur Anwendung strömungsmechanischer Modellgleichungen darstellt. In diesem Zusammenhang muss untersucht werden, welche Kennwerte der Standardverfahren am ehesten durch die fundamentalen rheologischen Kennwerte beschrieben werden können.

Schließlich gestattet die umfangreiche Datensammlung die Ableitung eines Konzepts zur zielsicheren Herstellung von selbstverdichtendem Beton, welches dem entwerfenden Ingenieur als Hilfestellung bei der Auswahl und Zusammensetzung von SVB dienen soll. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Sensibilität von SVB wichtig.

Der letzte Teil dieser Arbeit widmet sich schließlich der Anwendung der rheologischen Kennwerte im Hinblick auf die Simulation des Fließverhaltens von Beton. Am Beispiel der Rohrströmung wird die Rolle der Fließgrenze und der plastischen Viskosität diskutiert; gleichzeitig können anhand der Rohrströmung auch die Grenzen aufgezeigt werden, die bei der Anwendung der makroskopischen rheologischen Kennwerte von Beton beachtet werden müssen.

2 Grundlagen

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die grundlegenden Begriffe, Methoden und Phänomene der Rheologie gegeben. Es wird jedoch nur soweit auf die Grundlagen eingegangen, wie sie zum Verständnis der Anwendung der Rheologie auf die Konsistenz von Frischbeton notwendig sind. Allgemeine theoretische Grundlagen zur Rheologie sind z.B. in [BARNES ET AL., 1989] und in [TANNER, 2000] enthalten. In den letzten beiden Abschnitten werden schließlich schwerpunktmäßig die Besonderheiten behandelt, die im Zusammenhang mit dem Fließverhalten von Zementleim bzw. Beton beachtet werden müssen, sowie bereits existierende Modelle für die Vorhersage des Fließverhaltens von Beton beschrieben.

2.1 Rheologische Betrachtungsweise

Abhängig von der Betrachtungsebene unterscheidet man zwischen *phänomenologischer Rheologie* bzw. *Makrorheologie* und *Mikrorheologie* [REINER, 1958], [BARNES ET AL., 1989].

2.1.1 Phänomenologische Rheologie bzw. Makrorheologie

Die phänomenologische Rheologie geht von homogenen oder quasi-homogenen und isotropen oder quasi-isotropen Materialien auf phänomenologischem Niveau aus; die Materialien werden also als Kontinuum betrachtet. Die kleinsten diskreten Einheiten wie z.B. Moleküle und Atome, aus denen das Medium besteht, werden jedoch nicht betrachtet. Von einem quasi-homogenen Material kann dann ausgegangen werden, wenn die Abmessungen des größten Elements (also z.B. eines Partikels) kleiner ist als das kleinste Volumenelement, dessen Verhalten betrachtet werden soll. Im Hinblick auf rheologische Untersuchungen von Beton bedeutet dies, dass dieser als quasi-homogen betrachtet werden darf, sofern die Abmessungen der größten Zuschlagkörner wesentlich kleiner sind als die Abstände der rotierenden Platten im Rheometer. Nur reine Flüssigkeiten und perfekte Einzelkristalle sind im phänomenologischen Sinne homogen; nahezu alle Materialien, mit denen sich Rheologie beschäftigt, sind jedoch Systeme, die aus zwei oder mehr Phasen bestehen, wobei eine für gewöhnlich Luft ist, die in Poren enthalten ist und sichtbar oder unsichtbar sein kann.

Die phänomenologische Rheologie betrachtet das Fließverhalten der Materialen losgelöst von der Thermodynamik, indem sie unterstellt, dass der rheologische Prozess unter isothermen Bedingungen stattfindet.

2.1.2 Mikrorheologie

Die Mikrorheologie leitet das rheologische Verhalten von Zwei- oder Mehrphasensystemen ausgehend von dem bekannten rheologischen Verhalten ihrer Bestandteile ab. EINSTEIN [1906, 1911] hatte die bekanntesten mikrorheologischen Untersuchungen durchgeführt [REINER, 1958]. Im Prinzip beruhen alle Modellansätze zur Beschreibung der Frischbetonrheologie auf mikrorheologischen Ansätzen.

2.2 Messung rheologischer Eigenschaften (Rheometrie)

Allen rheometrischen Verfahren ist gemein, dass durch Aufbringung einer Scherbeanspruchung ein Geschwindigkeitsgefälle $\dot{\gamma}$ in der untersuchten Flüssigkeit erzeugt wird.

Die in Bild 2.1 dargestellte Flüssigkeit befindet sich zwischen zwei parallelen Platten im Abstand d. Die obere Platte bewegt sich dabei mit der Geschwindigkeit U in x-Richtung. Die Schergeschwindigkeit ist definiert als $\dot{\gamma} = U / d$. An jedem Punkt in der Flüssigkeit herrscht dann die Schubspannung τ. Sie kann über die Kraft berechnet werden, die erforderlich ist, um die Platte der Fläche A mit der konstanten Geschwindigkeit U zu bewegen.

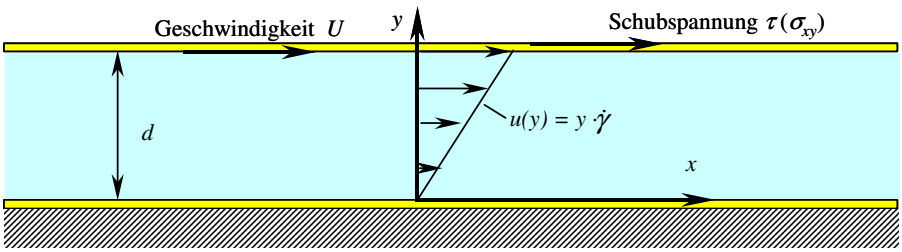


Bild 2.1: Flüssigkeit zwischen zwei parallelen Platten, die sich mit der Relativgeschwindigkeit *U* gegeneinander bewegen, nach [TANNER, 2000]

Nach Gl. (2.1) ist die Viskosität $\eta(\dot{\gamma})$ einer Flüssigkeit das Verhältnis von Schubspannung τ zur Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$. Die Viskosität ist je nach untersuchter Flüssigkeit abhängig von der Schergeschwindigkeit und stellt nicht notwendigerweise eine Stoffkonstante dar.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{2.1}$$

Trägt man die Schubspannung τ über der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ in einem Diagramm auf, so erhält man eine so genannte Fließkurve (Bild 2.2). Im einfachsten Fall – der NEWTON'schen Flüssigkeit (Nr. 1) – entspricht diese Fließkurve einer Geraden durch den Ursprung. Dann ist $\eta(\dot{\gamma})$ eine Konstante und wird als dynamische Viskosität η bezeichnet.

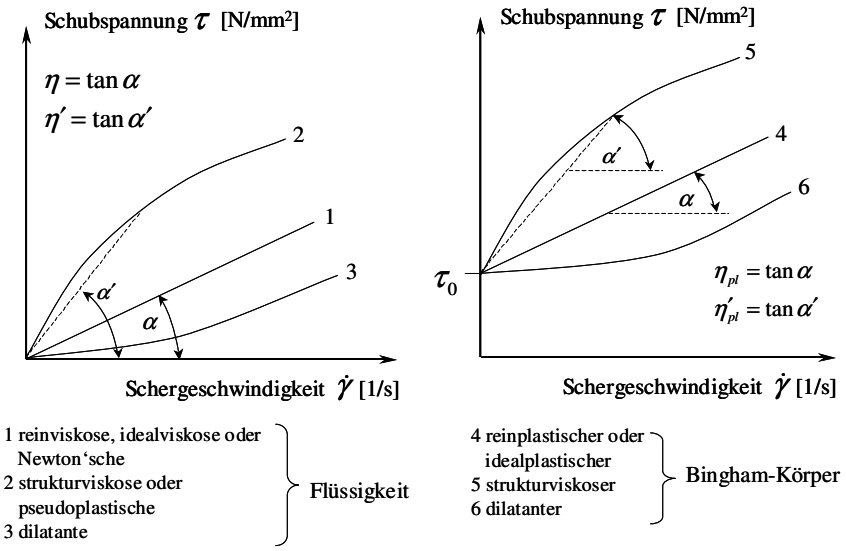


Bild 2.2: Fließkurven von Flüssigkeiten ohne und mit Fließgrenze, nach [HILLEMEIER ET AL., 2001]

Die dynamische Viskosität η stellt damit einen Stoffparameter dar, der allerdings abhängig von der Temperatur und vom Druck ist [BOHL, 2001]. Die Kurven der strukturviskosen oder pseudoplastischen Stoffe (Nr. 2 und Nr. 5) sind dadurch gekennzeichnet, dass deren Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit kleiner wird [DIN 1342-1]. Im Englischen werden diese Stoffe daher mit dem Adjektiv „shear thinning“ bezeichnet. Im Gegensatz dazu stehen die dilatanten („sich ausdehnenden“) Stoffe mit den Kurven Nr. 3 und 6, bei denen die Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit überproportional ansteigt. Im Englischen werden diese auch mit „shear thickening“ bezeichnet [DIN 1342-1]. Ebenso taucht öfters der Begriff der Differenzialviskosität η_{diff} auf. Die Differenzialviskosität η_{diff} entspricht der Steigung der Tangente an die τ-$\dot{\gamma}$-Kurve im Punkt (τ, $\dot{\gamma}$) [HACKLEY ET AL., 2001].

Es gibt aber auch Flüssigkeiten, die erst zu fließen beginnen, wenn eine gewisse Schubspannung überschritten worden ist. Dieser Grenzwert wird als Fließgrenze τ_0 bzw. τ_y bezeichnet (Nr. 4, 5 und 6). Unterhalb dieser Fließgrenze verhalten sie sich wie ein elastischer Festkörper, darüber können sie sich strukturviskos (Nr. 5), idealplastisch (Nr. 4) oder dilatant (Nr. 6) verhalten. Aus praktischen Gründen wird die Fließgrenze als Achsenschnittpunkt durch eine Kurvenextrapolation ermittelt. Handelt es sich um einen Stoff, der ein idealplastisches Verhalten zeigt, so ist nach Überschreiten der Fließgrenze dessen differenzielle Viskosität η_{diff} eine Konstante; sie wird auch als plastische Viskosität η_{pl} bezeichnet (idealplastischer BINGHAM-Körper).

Die Fließkurven von Beton und auch von selbstverdichtendem Beton werden häufig durch die des idealplastischen BINGHAM-Körpers (Nr. 4) vereinfacht (siehe hierzu auch Abschnitt 3 und 4). Insbesondere Hochleistungsbetone und selbstverdichtende Betone zeigen jedoch häufig ein dilatantes Fließverhalten (Nr. 6) [DE LARRARD ET AL., 1998]. Die Approximation solcher Fließkurven durch die des idealplastischen BINGHAM-Körpers bietet jedoch den entscheidenden Vorteil, dass die zwei physikalischen Kenngrößen Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität η_{pl} zur Beschreibung genügen. Im Folgenden wird der Begriff des BINGHAM-Körpers – wie häufig in der Literatur – ausschließlich für den Sonderfall der idealplastischen Schubspannungs-Schergeschwindigkeits-Beziehung (Nr. 4) verwendet.

Es gibt zahlreiche Ansätze, die zur Beschreibung der Fließkurven von Suspensionen herangezogen werden. Eine Übersicht enthält Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Zusammenstellung von Modellen zur Beschreibung von Fließkurven, [FERRARIS, 1999], [HACKLEY ET AL., 2001]

Bezeichnung	Gleichung	Anwendung
Allgemeine Potenzfunktion	$\tau = a \cdot \dot{\gamma}^b$ (2.2)	Für NEWTON'sche (b = 1), strukturviskose (b < 1), dialatante (b > 1) Flüssigkeiten
BINGHAM	$\tau = \tau_0 + \eta_{pl}\dot{\gamma}$ (2.3)	Viskoplastische Flüssigkeiten
HERSCHEL-BULKLEY	$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b$ (2.4)	Viskoplastische Flüssigkeiten, für b = 1 wie BINGHAM
CARREAU-YASUDA	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + (\lambda\dot{\gamma})^a\right]^{(b-1)/a}$ (2.5)	Pseudoplastisches Fließverhalten mit asymptotischen Viskositäten η_0 für $\dot{\gamma}$ = 0 und η_∞ für $\dot{\gamma} \to \infty$
CROSS	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + \lambda\dot{\gamma}^b}$ (2.6)	Pseudoplastisches Fließen mit asymptotischer Viskosität η_0 für $\dot{\gamma}$ = 0 und η_∞ für $\dot{\gamma} \to \infty$
ELLIS	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\tau / \tau_2\right)^{\alpha - 1}}$ (2.7)	Pseudoplastisches Fließen. Der Parameter τ_2 kann grob als die Schubspannung identifiziert werden, bei der η ungefähr auf die Hälfte des asymptotischen Werts η_0 gefallen ist.

2.3 Unterteilung der Dispersionen

Zur Beschreibung der Struktur von Zementleim und Beton werden häufig die Begriffe Dispersion, Suspension und Gel verwendet. Im Folgenden werden diese Begriffe kurz erläutert.

Unter einer Dispersion (lat. dispersio = Zerteilung) versteht man ein aus mindestens zwei Phasen bestehendes System (disperses System), bei dem eine Phase (disperse oder dispergierte Phase) in einer zweiten Phase, dem Dispersionsmittel (lat. Dispergens), verteilt ist. Dabei können dispergierte Substanz und Dispersionsmittel in verschiedenen Aggregatzuständen vorliegen [BENEDIX, 1999]. Von einem Aerosol spricht man, wenn ein fester Stoff in einem Gas fein verteilt ist. Beim Nebel ist die disperse Phase flüssig, die dispergierende Phase gasförmig und bei einer Emulsion sind beide Phasen flüssig. Von Schaum ist die Rede, wenn ein gasförmiger Stoff in einer Flüssigkeit fein verteilt ist. Als letztes ist noch die Suspension zu nennen, in der ein Feststoff in einer flüssigen Phase verteilt ist. Frischbeton kann als Suspension bezeichnet werden, weil abgesehen von in ihm vorliegender Luft immer von einer Verteilung der festen Phase in der flüssigen Phase gesprochen werden kann.

Ein weiteres wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist der Dispersionsgrad, er beschreibt den Grad der Zerteilung. Je kleiner die Zerteilung des Stoffes ist, umso größer ist der Dispersionsgrad. Die Teilchengröße des dispergierten Stoffes ist für die Eigenschaft einer Dispersion von zentraler Bedeutung.

Je nach der Teilchengröße der dispersen Phase unterscheidet man:

- molekular- oder iondisperse (feindisperse) Systeme,
- kolloiddisperse Systeme und
- grobdisperse Systeme.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf kolloiddisperse und grobdisperse Systeme:

Bei **kolloiddispersen Systemen** (Kolloide, kolloide Lösungen, Sole) liegt die Teilchengröße im Bereich zwischen 10^{-9} und 10^{-6} m. Die dispergierten Teilchen sind entweder Makromoleküle (z.B. Stärke, Eiweißlösungen) oder Zusammenballungen (Aggregate, Assoziate) kleiner Teilchen (z.B. Kieselsäuren, Seifenlösungen) [BENEDIX, 1999]. Kolloide Lösungen (Sole) erscheinen bei Anwendung relativ grober Untersuchungsmethoden noch weitgehend homogen. Bestrahlt man sie jedoch mit einem Lichtstrahl, so kann der Strahlengang in der Lösung beobachtet werden, da die kleinen dispergierten Partikel das Licht nach allen Seiten streuen (Tyndall-Effekt). In echten Lösungen hingegen bleibt der einfallende Lichtstrahl bei seitlicher Beobachtung unsichtbar [BENEDIX, 1999].

Das Verhalten von Kolloiden wird hauptsächlich von dem sehr großen Oberflächen/Volumenverhältnis der sehr feinen Partikel bestimmt. Die Oberflächenkräfte liegen in der Größenordnung der Schwerkraft. Mit zunehmender Teilchengröße werden diese Kräfte geringer [KECK, 1999]. Da die mittlere Teilchengröße für den in Bild 2.3 gezeigten Portlandkalksteinzement im Bereich von etwa $1 \cdot 10^{-5}$ m liegt (siehe auch Abschnitt 3.2.3), könnte ein damit hergestellter Zementleim strenggenommen nicht als kolloide Suspension bezeichnet werden. Allenfalls die Gel-Schicht, mit den darin enthaltenen C-S-H-Phasen, die sich auf der Oberfläche der Zementkörner bildet, könnte als kolloide Suspension bezeichnet werden [KECK, 1999].

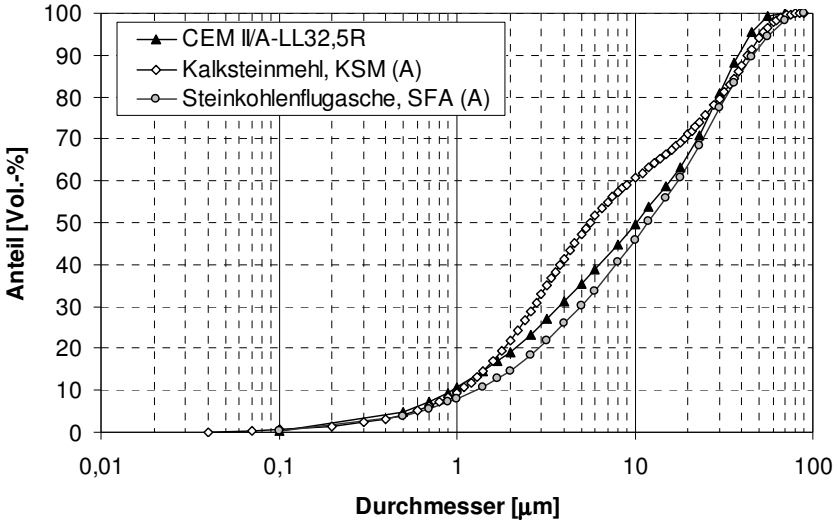


Bild 2.3: Beispielhafte Partikelgrößenverteilung von Zement, Kalksteinmehl und Steinkohlenflugasche

Trotzdem sind die Anziehungs- und Abstoßungskräfte für das Fließverhalten von entscheidender Rolle. Tabelle 2.2 enthält für die in Bild 2.3 dargestellte Kornverteilung des Zementes eine Abschätzung des Partikelanteils im Größenbereich der Kolloide in Anlehnung an KECK [1999]. Vereinfacht wird dabei angenommen, dass es sich um kugelförmige Partikel konstanter Dichte handelt.

Tabelle 2.2: Auswertung der Korngrößenverteilung von Zement nach Bild 2.3

	Korndurchmesser $d \leq 10^{-6}$ m
Volumenanteil der Partikel	10,6 Vol.-%
Zahlenmäßiger Anteil der Partikel	rund 99,9 %

Der Anteil der Partikel mit einem mittleren Durchmesser $\leq 10^{-6}$ m beträgt zwar nur 10,6 Vol.-%, er stellt allerdings zahlenmäßig mit rund 99,9 % der Partikel praktisch den Gesamtanteil der Teilchen dar. Diese kolloiden Partikel bestimmen durch ihre interpartikulären Anziehungs- und Abstoßungskräfte das Fließverhalten von Zementleim maßgeblich.

Bei **grobdispersen Systemen** liegt die Teilchengröße oberhalb von 10^{-6} m. Die dispergierten Teilchen sind deutlich größer als die des Dispersionsmittels Wasser. Ein grobdisperses System erscheint dem Auge nicht mehr als klare, sondern als trübe Lösung (Suspension, Aufschlämmung). Die Teilchen grobdisperser Systeme können z.B. durch Filtration vom Dispersionsmittel abgetrennt werden (Filtration einer Aufschlämmung von fein zermahlenem Sand in Wasser). Als Beispiele für solche grobdispersen Systeme sind Sand/Ton in Wasser (Schlamm) oder auch Dispersionsfarben zu nennen. Grobdisperse Systeme gehören zu den heterogenen Mischungen. Der Vollständigkeit halber ist noch die grobdisperse Verteilung einer Flüssigkeit in einer anderen Flüssigkeit zu nennen, die Emulsion. Rauch (feste Teilchen in Luft) und Schaum (Luftblasen in einer Flüssigkeit) sind weitere Beispiele grobdisperser Systeme [BENEDIX, 1999].

Stabilität kolloidaler Systeme

Ein stabiles kolloidales System unterliegt keiner zeitlichen Änderung des Dispersionsgrades. Sprich: es kommt zu keiner Zusammenballung (Koagulation) von kolloiden Partikeln. Die Kolloide bleiben gleichmäßig im Dispersionsmittel verteilt; also findet auch kein Absinken der Partikel unter der Einwirkung der Schwerkraft statt [BENEDIX, 1999]. Ob es zu einer Koagulation der Teilchen kommt, hängt im Wesentlichen von zwei stabilisierenden Faktoren ab, die im Folgenden beschrieben werden.

Hydrophobe Kolloide

Lagern die kolloiden Teilchen aufgrund ihres hohen Adsorptionsvermögens bestimmte, in der Lösung vorhandene Ionenarten adsorptiv an der Oberfläche an, so liegen hydrophobe Kolloide vor. Die gleichsinnige Aufladung der Teilchen bewirkt eine gegenseitige Abstoßung und verhindert den Zusammenschluss der kolloiden Teilchen zu größeren Aggregaten. Sie ist die Ursache für die Stabilität des Sols (der kolloiden Dispersion). Die Aufladung bewirkenden Ionen können Hydroniumionen (z.B. bei kolloiden Hydroxiden) bzw. Hydroxidionen (z.B. bei kolloiden Sulfiden) des Wassers oder Ionen eines Fremdelektrolyten sein. Die Ladungskompensation erfolgt durch die Gegenionen, die Ionenwolken um die kolloiden Teilchen ausbilden [BENEDIX, 1999]. Möchte man hingegen eine kolloide Lösung wieder zum Ausflocken bringen, so gelingt dies über die Kompensation der Teilchenabstoßung, indem besonders leicht adsorbierbare Ionen entgegengesetzter Ladung der Lösung hinzugesetzt werden. Daher gelten Lösungen hydrophober Kolloide generell als empfindlich gegenüber Elektrolytzusatz.

Hydrophile Kolloide

Im Gegensatz zur Stabilisierung der Teilchen durch elektrische Aufladung beruht die Stabilisierung hydrophiler Kolloide im Wesentlichen auf der Hydratation der dispergierten Teilchen. Die hydrophilen Kolloide besitzen das Bestreben, Wassermoleküle adsorptiv anzulagern und Hydrathüllen aufzubauen. Die gegenseitige Abstoßung der Hydrathüllen verhindert eine Aggregation der Teilchen zu größeren Partikeln und stabilisiert die kolloide Lösung. Die Ausbildung der Hydrathülle, d.h. das Bestreben zur Anlagerung von Wasser, kann so effektiv sein, dass das Sol zu einer gallertartigen, wasserreichen Masse (einem Gel) erstarrt. Beispiele sind konzentrierte Polykieselsäure bzw. Aluminiumhydroxidlösungen [BENEDIX, 1999].

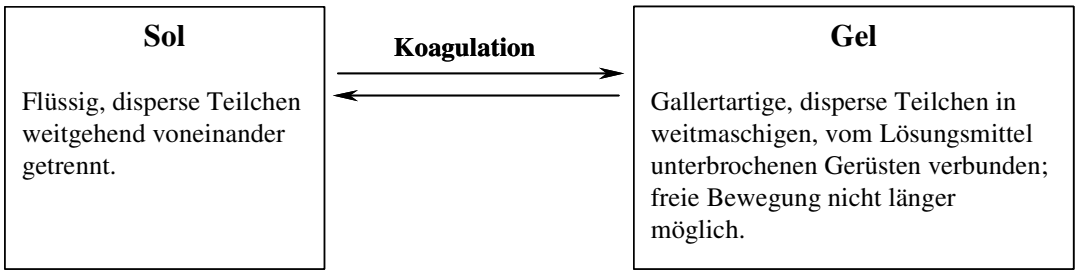


Bild 2.4: Sol-Gel-Umwandlungen [BENEDIX, 1999]

Sol-Gel-Umwandlungen hydrophiler Kolloide sind in der Regel reversibel. Durch Eintrag mechanischer Energie (z.B. durch Schütteln) können die unregelmäßigen schwachen Bindungen zwischen den dispergierten Teilchen gelöst werden und das Gel kann wieder verflüssigt werden. Nachdem die mechanische Störung aufhört, kommt es nach einer gewissen Zeit wieder zum Aufbau der Bindungen. Das Sol erstarrt nun wieder zum Gel. Dieser zeitabhängige Aufbau- bzw. Abbauprozess wird gemeinhin auch als Thixotropie bezeichnet und ist neben Zement-Wassermischungen auch bei Ton-Wassermischungen festzustellen. Eine genauere Betrachtung des thixotropen Verhaltens von Bindemittelleim erfolgt dann im Abschnitt 2.5.1.1. Die DIN 1342-1 definiert thixotrope Stoffe folgendermaßen: Thixotrope Stoffe zeigen ein zeitabhängiges Fließverhalten, bei dem die Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung vom Wert im Ruhezustand her gegen einen Endwert hin abnimmt und nach Aufhören der Beanspruchung wieder zunimmt.

Hydrophobe Kolloide werden auch als irreversible Kolloide bezeichnet, da sie sich im Gegensatz zu den hydrophilen Kolloiden nach der Ausflockung nicht mehr in den Solzustand zurückversetzen lassen. Dies ist durch das Fehlen der schützenden Wasserhülle zu erklären, was bei der Koagulation zu einem Zusammenschluss stabiler größerer Teilchen führt [BENEDIX, 1999].

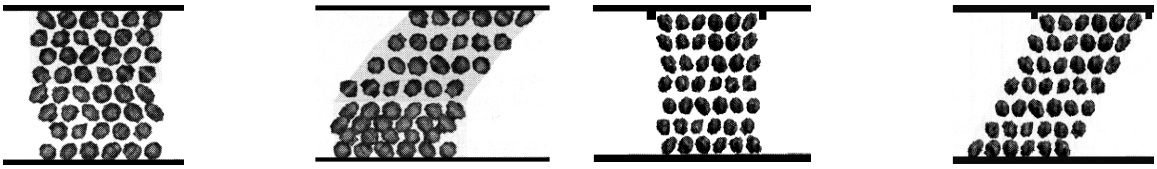
2.4 Fließverhalten von Suspensionen

2.4.1 (Schub-)Dilatanz

Wie bereits im Abschnitt 1.1 erläutert, werden Stoffe, deren Viskosität bei steigender Schergeschwindigkeit entsprechend Kurven Nr. 3 oder Nr. 6 in Bild 2.2 zunimmt, gemeinhin als dilatante Stoffe bezeichnet. Recherchen TANNERS zufolge war es REYNOLDS, der sich erstmalig 1885 mit konzentrierten Feststoffsuspensionen beschäftigte, die sich in dieser Weise verhielten. Er nahm an, dass diese konzentrierten Feststoffsupsensionen im Ruhezustand ein minimales Lückenvolumen aufweisen [TANNER, 2000]. Die in der Suspension enthaltene Flüssigkeit ist gerade in der Lage, die Feststoffzwischenräume auszufüllen. Werden diese Stoffsysteme niedrigen Schergeschwindigkeiten ausgesetzt, schmiert die Flüssigkeit die Partikelbewegung und die Spannungen in der Suspension sind noch vergleichsweise gering. Bei höheren Schergeschwindigkeiten lockert sich die dichte Partikelpackung auf und das Materialvolumen expandiert etwas (Dilatation); d.h. das Porenvolumen nimmt etwas zu. Es steht jedoch nicht genügend Flüssigkeit zur Verfügung, um die Bewegung dieser veränderten Partikelstruktur in gleichem Maße zu schmieren wie bei niedrigen Schergeschwindigkeiten. Dementsprechend ist eine größere Schubspannung erforderlich, um die Bewegung aufrecht zu erhalten. Ein solches Verhalten äußert sich dadurch, dass die Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit rapide zunimmt. Oft werden Stoffe irreführender Weise als „dilatant“ bezeichnet, nur weil sie ein „scherverdickendes“ Fließverhalten aufweisen. Tatsächlich handelt es sich häufig um kein echtes dilatantes Verhalten [TANNER, 2000].

Hinsichtlich des dilatanten Verhaltens von Frischbeton muss zwischen Normalbeton und SVB unterschieden werden. Wenn Normalbeton, wie im Bild 2.5, einer Scherbewegung unterworfen wird, so gelangt Leim vom stationären Teil in den Bereich der Scherzone, damit eine Bewegung der großen dicht gepackten Partikel überhaupt möglich ist. Das Volumen der gescherten Zone

steigt dabei an. Da SVB im Vergleich zu Rüttelbeton über deutlich mehr Leim verfügt, steht bei der Scherbewegung mehr Raum für die Partikelbewegung zur Verfügung, so dass insgesamt ein geringerer Volumenanstieg als bei Normalbeton zu beobachten ist [WALLEVIK, 2003].



Normalbeton mit ca. 28 % Matrixanteil: vor und nach der Scherbewegung

SVB mit ca. 36% Matrixanteil: vor und nach der Scherbewegung

Bild 2.5: Unterschied zwischen Normalbeton und SVB bei der Scherbewegung [WALLEVIK, 2003]

2.4.2 Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Suspensionen

Frischbeton stellt eine hochkonzentrierte Suspension mit – in den meisten Fällen – sehr fein abgestufter Korngrößenverteilung im Bereich weniger µm bis einige mm dar. Ehe auf das besondere Fließverhalten von Bindemittelleim bzw. Beton eingegangen wird, werden zunächst die allgemeinen Begriffe und Abhängigkeiten erläutert, die im Zusammenhang mit der Modellierung von Suspensionen verwendet werden.

Modellhaft kann die Viskosität η einer Suspension als Funktion des Feststoffanteils ϕ und der Viskosität η_F der flüssigen Phase beschrieben werden. Der Feststoffanteil ϕ ist dabei definiert als der volumenbezogene Anteil der Feststoffe bezogen auf das Gesamtvolumen von flüssiger und fester Phase. Meist wird die Viskosität der Suspension η auf die Viskosität der flüssigen Phase bezogen. Der Quotient $\eta_r = \eta/\eta_F$ wird dann als relative Viskosität bezeichnet.

Eines der bekanntesten Modelle ist das von EINSTEIN [1906, 1911], es gilt allerdings nur für stark verdünnte Suspensionen bis zu einer maximalen Volumenkonzentration von 2 bis 3 % [REINER, 1958]:

$$\eta = \eta_F \left(1 + [\eta]\phi\right) \tag{2.8}$$

Der dimensionslose Parameter $[\eta]$ in Gl. (2.8) wird als intrinsische Viskosität bezeichnet. Im Falle idealer Kugeln beträgt $[\eta] = 2{,}5$ (EINSTEIN-Koeffizient). Abweichungen von der idealen Kugelform führen zu Werten größer als 2,5.

Bild 2.6 zeigt schematisch die Einflüsse von Partikelgestalt und Feststoffkonzentration auf die Viskosität einer Suspension. Je mehr von der idealen Kugelform abgewichen wird, desto stärker wirkt sich die Form der Partikel auf die Viskosität der Suspension aus.

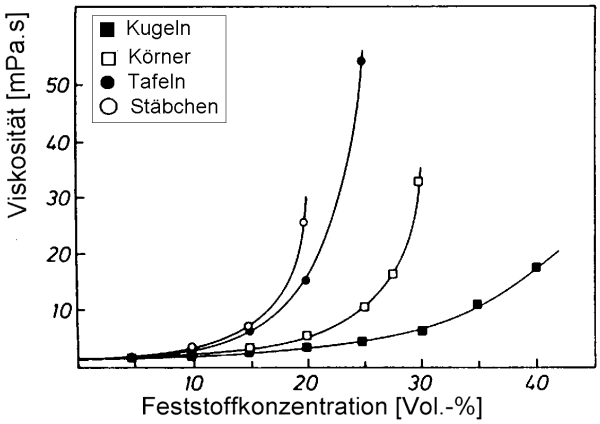


Bild 2.6: Einfluss der Partikelgestalt auf die Viskosität von Suspensionen bei einer Schergeschwindigkeit von 300 s^{-1} [BARNES ET AL., 1989]

Insbesondere bei größeren Feststoffkonzentrationen ist ein überproportionaler Anstieg der Viskosität zu erkennen. Auch dieser hängt offensichtlich von der Partikelgestalt ab. Anhand von Bild 2.7 kann anschaulich das Fließverhalten solcher hochkonzentrierter Suspensionen erläutert werden. Der Reibungswiderstand unter Scherbeanspruchung setzt sich aus einem intergranularen (Kornreibungsanteil) und einem viskosen Reibungsanteil zusammen [FERRARIS ET AL., 1998].

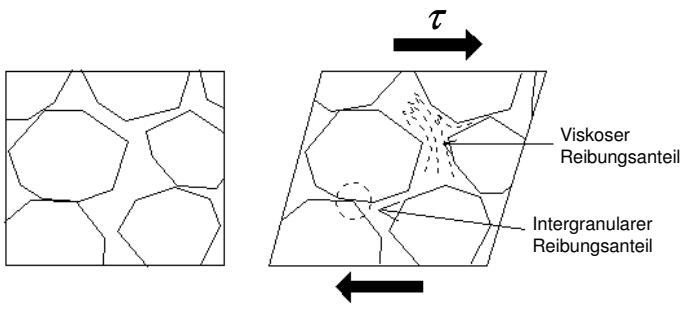


Bild 2.7: Veranschaulichung der Reibungsanteile bei der Fließbewegung einer Suspension mit hohem Feststoffgehalt bestehend aus Wasser und Feststoffpartikeln einer Korngröße, nach [FERRARIS ET AL., 1998]; links: Ruhezustand, rechts: Verhalten unter einer Schubdeformation

Bei sehr hohen Feststoffkonzentrationen gewinnt zunehmend der intergranulare Reibungsanteil an Bedeutung (Bild 2.8). Die Viskosität der Suspension steigt damit überproportional an, bis sie theoretisch beim Erreichen der maximalen Feststoffkonzentration ϕ_{max} unendlich große Werte annehmen würde und kein Fließen mehr möglich wäre.

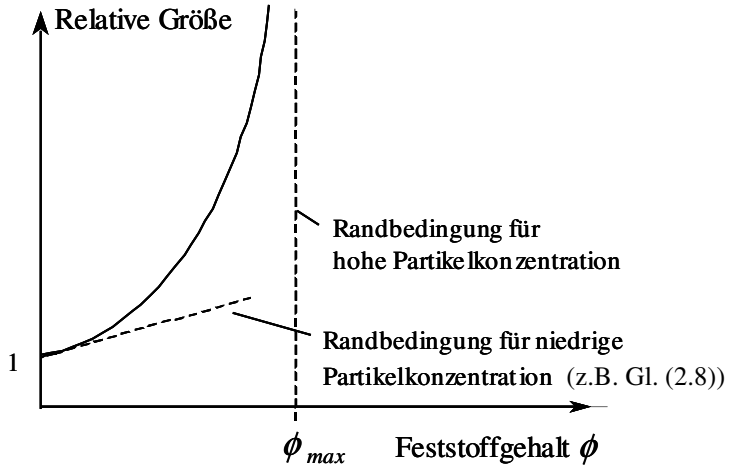


Bild 2.8: Abhängigkeit relativer Größen vom Feststoffgehalt, nach [REINER, 1958]

Die maximal mögliche Feststoffkonzentration ϕ_{max} ist abhängig von der Kornform, der Korngrößenverteilung, aber auch von der Lagerungsdichte der einzelnen Partikel. In Bild 2.6 besitzen demnach die Stäbchen im Vergleich zu den Kugeln eine geringere maximale Feststoffkonzentration. Für eine einheitliche Kugelgröße gilt beispielsweise bei Anordnung im kubisch flächenzentrierten Gitter ebenso wie für die hexagonal dichteste Packung ϕ_{max} = 0,74. Bei kubisch raumzentrierter Anordnung beträgt ϕ_{max} = 0,68 und für den einfachsten Fall, der kubischen Anordnung, gilt $\phi_{max} = \pi/6 \cong 0{,}52$ [BARNES ET AL., 1989].

MOONEY [1951] hat einen Ansatz entwickelt, der beide Randbedingungen in Bild 2.8 berücksichtigt, indem er das Verhältnis ϕ/ϕ_{max} eingeführt hat. Dieses Verhältnis wird allgemein auch als relative Feststoffkonzentration bezeichnet [DE LARRARD, 1999].

REINER [1958] gibt MOONEYS Beziehung in Form von Gl. (2.9) an.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_F} = \exp\left(\frac{2{,}5\phi}{1-k\phi}\right) \tag{2.9}$$

Alle Partikelinteraktionseffekte werden allein durch den Faktor k berücksichtigt. Bei Annahme einheitlicher Kugeln gleicher Größe ist k im Bereich von $1{,}35 < k < 1{,}91$ abhängig von der Packungsart zu wählen. FERRARIS [1999] gibt MOONEYS Beziehung mit Gl. (2.10) an; das Produkt $k \cdot \phi$ ist bereits durch das Verhältnis ϕ/ϕ_{max} ersetzt worden.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_F} = \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1-\phi/\phi_{\max}}\right) \tag{2.10}$$

Auch SIMHA [1952] hat einen Ansatz für hochkonzentrierte Suspensionen entwickelt. Er nahm dabei an, dass bei hohen Konzentrationen nur die nächsten benachbarten Partikel für die Interaktionsbeziehungen von Bedeutung sind. Gl. (2.11) stellt das Ergebnis seiner Berechnungen dar.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_F} = 1 + 2{,}5 \cdot \lambda \cdot \phi \tag{2.11}$$

Der Faktor λ ist dabei eine Funktion, die vom Partikelradius und dem Radius der so genannten hypothetischen Oberfläche abhängt. Für kleine ϕ tendiert λ gegen 1, für die dichte Packung gegen Unendlich [REINER, 1958].

HACKLEY ET AL. [2001] geben in ihrer Übersicht auch ein Modell von KRIEGER und DOUGHERTY an [KRIEGER ET AL., 1959].

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_F} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-[\eta]\cdot\phi_{\max}} \tag{2.12}$$

Neben der Partikelform beeinflusst auch die Partikelgrößenverteilung die intrinsische Viskosität $[\eta]$. Beide Parameter $[\eta]$ und ϕ/ϕ_{max} können auch als Stellgrößen des Modells verstanden werden [HACKLEY ET AL., 2001].

Bild 2.7 kann auch zur anschaulichen Erklärung der Fließgrenze von Suspensionen dienen. Erst nach Überschreitung der interpartikulären Reibung ist eine Initiierung der Fließbewegung möglich. Immer vorausgesetzt, dass ein genügend großer Anteil der flüssigen Phase vorhanden ist. Handelt es sich bei der flüssigen Phase um Wasser, so wird die Fließgrenze der Suspension durch die Reibung zwischen den Partikeln bestimmt, die wiederum eine Funktion der relativen Feststoffkonzentration ϕ/ϕ_{max} ist (Gl.(2.13)) [FERRARIS ET AL., 1998].

$$\tau_0 = f\left(\frac{\phi}{\phi_{\max}}\right) \tag{2.13}$$

Handelt es sich bei der flüssigen Phase um eine BINGHAM-Flüssigkeit, so muss zur Initiierung einer Fließbewegung zusätzlich zum Kornreibungsanteil auch noch die Fließgrenze der flüssigen Phase überwunden werden.

2.5 Fließverhalten von Bindemittelleim bzw. Beton

Auf das dilatante Fließverhalten von Frischbeton wurde bereits im Abschnitt 2.4.1 eingegangen. Viel bedeutsamer für das Fließverhalten von Beton bzw. selbstverdichtendem Beton ist hingegen das zeit- und temperaturabhängige Verhalten.

2.5.1 Zeit- und temperaturabhängiges Verhalten

Bislang wurden allgemeine mikrorheologische Modellansätze vorgestellt, die zur Beschreibung des Fließverhaltens von Suspensionen angewendet werden können. Sie basieren auf der Vorstellung, dass das Fließverhalten von Suspensionen nicht zeitabhängig ist. Sie können jedoch auch zur Beschreibung zeitabhängigen Verhaltens herangezogen werden, wenn sie jeweils auf einen bestimmten Zeitschritt begrenzt bleiben.

Zement- bzw. Bindemittelleime zeigen im Gegensatz zu reinen NEWTON'schen Flüssigkeiten ein ausgesprochen zeitabhängiges Fließverhalten. Zum einen besteht eine Abhängigkeit zwischen der zeitlich aufgebrachten Scherdeformation (d.h. der Schergeschichte), welche die Morphologie der Partikelformationen (Agglomerate) des Bindemittelleimes bestimmt, wovon wiederum die Fließeigenschaften abhängen (Thixotropie). Andererseits läuft gleichzeitig der im Vergleich dazu langsamere, jedoch stark temperaturabhängige Prozess der Hydratation ab.

Eine besondere Rolle beim Fließverhalten von Bindemittelleimen spielen dabei die zugegebenen Fließmittel, sie greifen sowohl in die Agglomerations- als auch in die Hydratationsprozesse ein und zeigen mitunter eine starke temperaturabhängige Wirkung. Auch die Anwesenheit von organisch stabilisierenden Zusätzen spielt aufgrund ihrer Gel bildenden Wirkung eine Rolle (Abschnitt 2.5.2).

In den folgenden Unterabschnitten werden diese gegenseitigen Abhängigkeiten näher beschrieben.

2.5.1.1 Thixotropie

Zement zeigt unmittelbar nach dem ersten Kontakt mit dem Zugabewasser eine Serie komplexer chemischer Reaktionen, bei denen z.B. das Calciumsulfat und ein geringer Anteil des Tricalciumaluminats (C_3A) in Lösung gehen und Trisulfat (Ettringit) entsteht. Die Erstreaktion der Zemente führt z.B. zu positiv geladenen Ettringitteilchen, die mit negativ geladenen Zementpartikeln oder weiteren Hydratationsprodukten eine elektrostatische Wechselwirkung eingehen können. Dabei weisen die Zementpartikel sowie die ersten Rektionsprodukte Calciumhydroxid und Ettringit in der wässrigen Suspension aufgrund überwiegend physikalischer Wechselwirkungen ein starkes Bestreben zur Agglomeration auf. Diese Neigung zur Agglomeration zeigen übrigens auch die mineralischen Bestandteile reiner Flugaschesuspensionen oder Zement-Flugasche-Silicastaub-Suspensionen [VDZ, 2000]. Aufgrund dieser Agglomerationen bildet sich eine Flockenstruktur, in der das eingeschlossene Wasser nur wenig zur Fließfähigkeit der Suspension beiträgt [SPANKA ET AL., 1995].

TATTERSALL ET AL. [1983] führten den Begriff des irreversiblen Strukturbruches ein, der für die Beurteilung des Fließverhaltens von Bindemittelleim bedeutsam ist. Er wird anhand von Bild 2.9 erläutert. Die gelartige Schicht aus den ersten Reaktionsprodukten, die sich um die Zementkörner bildet, kann auch mehrere Zementkörner umschließen, weil die Zementkörner bereits im trockenen Zustand durch geringe Anziehungskräfte aneinander haften können (Bild 2.9). Die Zusammenhaltekraft zwischen den eingeschlossenen Partikeln hängt dabei ab von der Schichtdicke der Membran.

Sobald auf das System ausreichend große Scherkräfte aufgebracht werden, kommt es zum Strukturbruch und eine neue Membran bildet sich auf der freien Oberfläche. Aufgrund der neu gebildeten Membranen kann die vorherige Partikelbindung nicht mehr aufgebaut werden. Deshalb sprechen TATTERSALL ET AL. [1983] auch vom irreversiblen Strukturbruch. Nach wie vor herrschen zwischen den unterschiedlich geladenen Partikeln die bereits oben erwähnten Anziehungskräfte, die zu einer Agglomeration dieser membranumfüllten Partikel führen können.

Dieser irreversible Strukturbruch darf nicht mit dem reversiblen BINGHAM-Verhalten verwechselt werden, das dadurch charakterisiert ist, dass die netzartige Anziehung von Partikeln bei Überschreiten der Fließgrenze überwunden wird und somit zur gegenseitigen Verschiebung der

Partikel führt, nach Beenden der Scherbeanspruchung sich jedoch wieder aufbaut. Allgemein wird davon ausgegangen, dass sich Zement-Wasser-Suspensionen unterhalb der Fließgrenze elastisch verhalten [BILLBERG, 1999].

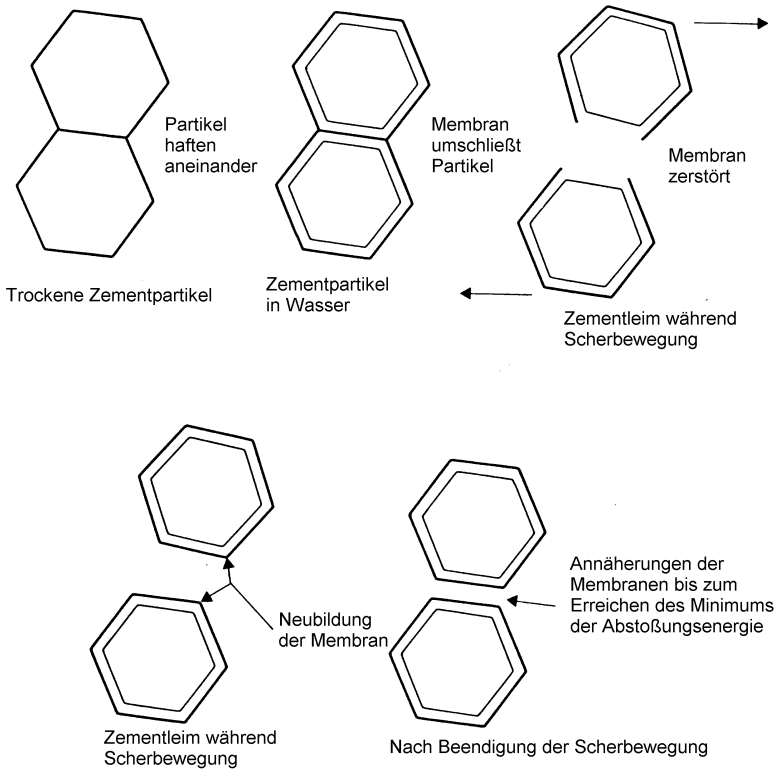


Bild 2.9: Schematisches Modell für einen irreversiblen Strukturbruch von Zement in Wasser [TATTERSALL ET AL., 1983]

Die üblichen Mischprozesse beim Herstellen von Beton reichen in der Regel aus, um alle interpartikulären Membranen aufzubrechen, so dass Beton bei nachfolgenden rheologischen Messungen keinen irreversiblen Strukturbruch wie Zementleim zeigt. Die während der Weiterverarbeitung aufgezwungenen Scherbeanspruchungen überschreiten zudem meist nicht die Beanspruchungen während des Mischens, so dass insgesamt das BINGHAM-Modell für Beton herangezogen werden kann [TATTERSALL ET AL., 1983].

KECK [1999] hat das Fließverhalten von Zementleimen näher untersucht. Auch er beschreibt, dass das Verflocken der Partikel der entscheidende Vorgang für das Fließverhalten von Zementleim ist. Sofort nach dem Mischen mit Wasser beginnen die Partikel zu agglomerieren. Je nach Dauer des Ruhezustands bildet sich eine durchgehende Struktur aus, die abhängig von der Mischintensität und -dauer aus mehr oder weniger gleichmäßig verteilten Partikeln besteht. Sie kann auch noch Anteile von trockenen, verklumpten Zementpartikeln enthalten. Durch das Aneinanderstoßen der Partikel wird die gegenseitige Beweglichkeit herabgesetzt. Es bilden sich große Hohlräume, die mit nicht-physikalisch gebundenem Wasser ausgefüllt sind (Bild 2.10a). Die Stabilität dieser Flockenstruktur hängt von der Anzahl der Kontaktpunkte ab.

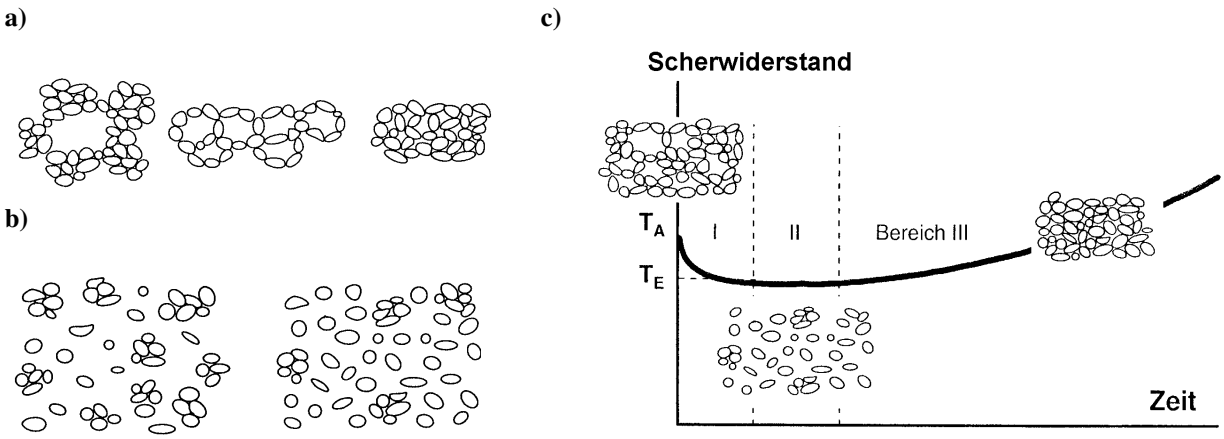


Bild 2.10: a) Mögliche zusammenhängende Flockenstrukturen [KECK, 1999]
b) Mögliche nicht zusammenhängende Partikel-Agglomerat-Verteilungen [KECK, 1999]
c) Schematische Entwicklung des Scherwiderstandes (Drehmoment) infolge konstanter Drehgeschwindigkeit, nach [KECK, 1999]

Bei einer Scherbeanspruchung lässt die Flockstruktur bis zu einem gewissen Grad eine elastische Verformung zu. Sie zerbricht jedoch in einzelne Flocken bei weiterer Steigerung der Belastung und ein Teil des eingeschlossenen Wassers wird freigesetzt. Allerdings kann dieses Wasser auch schon während der Verformung verdrängt werden. In beiden Fällen führt die Verdrängung bzw. das Freiwerden von Wasser zu einer Verflüssigung und damit zu einer Abnahme des Scherwiderstands. Mit der Zeit werden die Flocken zunehmend kleiner. Infolgedessen lässt der Schereinfluss immer mehr nach und der Scherwiderstand wird geringer. Es entsteht ein System aus einzelnen, nicht miteinander verbundenen Agglomeraten und Partikeln (Bild 2.10b). Die Zerstörung der Flockenstruktur wird auch als Strukturbruch bezeichnet. Sie darf jedoch nicht mit dem von TATTERSALL ET AL. [1983] eingeführten irreversiblen Strukturbruch verwechselt werden.

KECK [1999] teilt den Scherwiderstand von Zementleim in drei Bereiche ein (Bild 2.10c). Zu Beginn tritt häufig ein starker Abfall auf, der in einen relativ flachen zweiten Bereich übergeht. Dieser endet in einem dritten Bereich, dem Anstieg des Scherwiderstands. Der Abfall im Bereich 1 und der flache Verlauf im Bereich 2 entstehen durch Überlagerung von Strukturzerstörung und Verflocken (Strukturaufbau). Die Strukturzerstörung ist im Bereich 1 stärker als das Verflocken, so dass der Gesamtscherwiderstand im Bereich 1 abfällt. Der Abfall wird mit zunehmender Vereinzelung der Partikel geringer. Reicht die Scherbeanspruchung nicht mehr aus, um weitere Agglomerate zu trennen, stellt sich ein minimaler Scherwiderstand ein (Bereich 2). Sind zu Messbeginn der Verflockungsgrad und die Scherbeanspruchung gering, so kann es durchaus schon zu Beginn der Belastung zu einem Anstieg des Scherwiderstandes kommen. Nach Erreichen der für die jeweilige Belastung maximalen Vereinzelung beginnt im Bereich 3 der Anstieg des Scherwiderstandes infolge der Hydratation.

Kennzeichnend für das thixotrope Verhalten von Zementleim ist, dass nach Beendigung des Schervorganges die Agglomeration von neuem beginnt. Häufig wird bei rheologischen Messungen entweder die Schergeschwindigkeit von Null bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit zeitlich konstant gesteigert und anschließend wieder gleichmäßig bis auf Null reduziert oder bei

maximaler Geschwindigkeit begonnen und anschließend auf Null reduziert (Bild 2.11a). Dabei kann das so genannte Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil auch aus mehreren Zyklen bestehen.

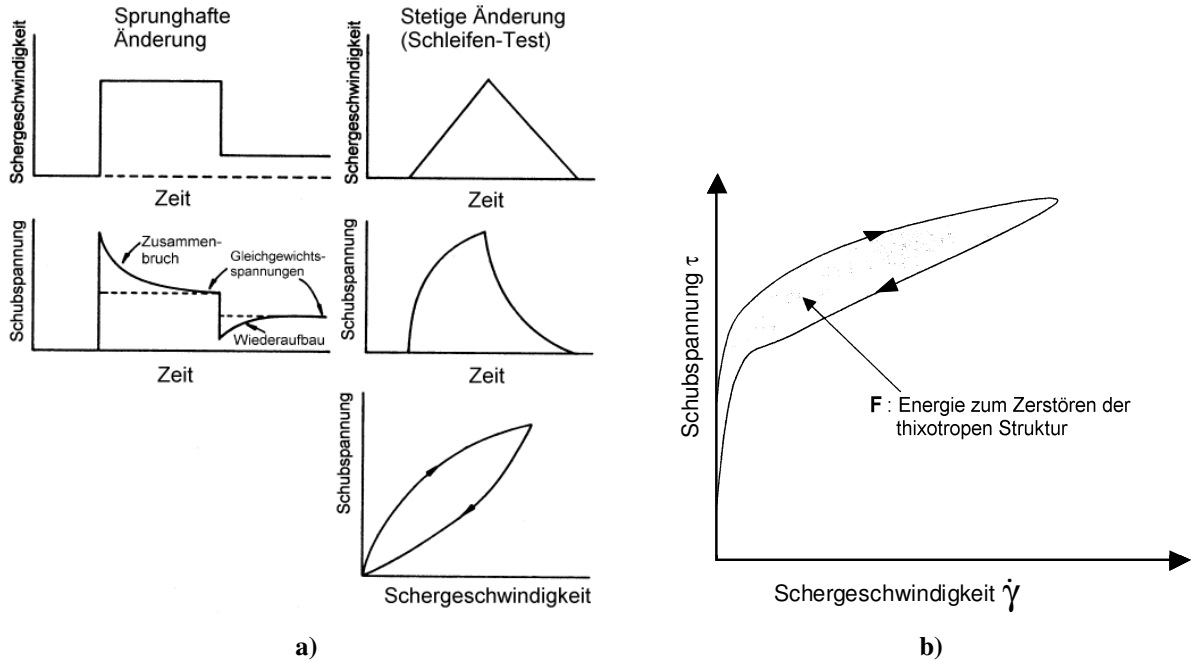


Bild 2.11: a) Schematische Darstellung der Reaktion eines thixotropen Materials auf eine abrupte Änderung der Schergeschwindigkeit [BARNES ET AL., 1989]
b) Fließkurve eines thixotropen Materials und Energie zum Zerstören der thixotropen Struktur, nach [KHAYAT ET AL., 2002]

Bild 2.11a) zeigt die schematische Darstellung des zeitabhängigen Schubspannungsverlaufes bei stufenförmigem Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil. Aufgrund unterschiedlicher Oberflächenladungen von in Wasser dispergierten Zementpartikeln kommt es zu Bildung von Agglomerationen einzelner Partikel. Es dauert relativ lange, bis diese agglomerierte Struktur in einzelne Partikel aufgebrochen ist und sich ein Gleichgewicht einstellt. Wird die Schergeschwindigkeit nach dem Erreichen des ersten Gleichgewichts drastisch gesenkt, so kommt es anstelle eines Zusammenbruchs der Struktur zu einem erneuten Strukturaufbau, also zu einer erneuten Agglomeration von Partikeln. Wird ein dreiecksförmiges Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil gemäß Bild 2.11a) gewählt, dann kann die Fläche F zwischen dem Aufwärts- und Abwärtskurvenast der τ-$\dot{\gamma}$-Kurve in Bild 2.11b) als „Energie“ bezogen auf das untersuchte Probenvolumen interpretiert werden, die erforderlich ist, während der Beanspruchungsdauer die thixotrope Struktur zu zerstören [KHAYAT ET AL., 2002]. Dies kann anhand von Gl. (2.14) anschaulich erklärt werden. Die Fläche F kann jedoch nicht als Materialparameter verstanden werden, da sie von der Schergeschichte abhängt.

$$F = \tau \cdot \gamma = \frac{N}{m^2} \cdot \frac{1}{s} = \frac{Nm}{s} \cdot \frac{1}{m^3} \tag{2.14}$$

Damit hängt die bei Zementleim und bei Frischbeton aufgezeichnete Fließkurve von der Schergeschichte ab, also vom aufgebrachten Schergeschwindigkeits-Zeit-Profil. Deshalb ist es wichtig, dass vor der eigentlichen Messung des Fließverhaltens die thixotrope Struktur des Betons

zerstört wird (siehe hierzu auch Abschnitt 3). Nur dann lassen sich reproduzierbare Messungen erzielen.

Zur Vervollständigung sei hier noch der Begriff Rheopexie erläutert. Rheopexes Verhalten entspricht dem Gegenteil von thixotropem Verhalten. Bei rheopexen Stoffen – etwa pastöser Gipsmasse – baut sich eine Struktur nur unter Scherbeanspruchung auf, löst sich aber wieder auf, nachdem der Stoff in Ruhe ist. Dieses Verhalten wird bei moderaten Schergeschwindigkeiten beobachtet. Bei höheren Schergeschwindigkeiten kann ein struktureller Aufbau nicht stattfinden [TANNER, 2000].

Das thixotrope Verhalten von Beton beeinflusst auch den Schalungsdruck [BILLBERG, 2003]. Weiter wirkt sich das thixotrope Verhalten von selbstverdichtenden Betonen günstig auf die Entmischungsstabilität aus, andererseits wird auch die Fähigkeit zur Selbstentlüftung im Ruhezustand beeinflusst. Näheres folgt hierzu im Abschnitt 6.

2.5.1.2 Wechselwirkungen mit Fließmitteln

Eine besonders effektive Partikelvereinzelung kann durch Zugabe von Fließmitteln hervorgerufen werden, indem die einzelnen Zementpartikel und erste Hydratationsprodukte dispergiert werden [SPANKA ET AL., 1995]. Zur Dispergierung des Mehlkorns werden für selbstverdichtenden Beton in der Regel hochwirksame Fließmittel (meist Polycarboxylatether, PCE) eingesetzt, die über eine kombinierte Wirkung von elektrostatischen, sterischen und über die Oberflächenspannung herabsetzenden Effekten verfügen.

Die anfänglich heftige Reaktion von Zement und Wasser, die mit Freisetzung großer Wärmemengen verbunden ist, endet, sobald der Sulfatvorrat aufgebraucht ist, es tritt die so genannte Ruhephase (dormante Phase) ein. Bedeutsam ist, dass diese Mikrostruktur auch während der dormanten Phase einer ständigen Veränderung unterworfen ist. TATTERSALL ET AL. [1983] beobachteten unter Zugrundelegung des BINGHAM-Modells bei reinen Zementleimsuspensionen, dass während der Ruhephase sowohl die Fließgrenze als auch die plastische Viskosität zunahmen. Dies lässt sich durch die zwar verlangsamte aber dennoch fortschreitende Hydratation und der damit einhergehenden Strukturänderung erklären. Hierzu kann die Modellvorstellung von KRELL [1987] herangezogen werden, der die Konsistenz von Bindemittelleimen auf die Wasserfilmdicke auf dem Mehlkorn zurückgeführt hat (Bild 2.12). Das Wachsen der Hydratationsprodukte verringert im Laufe der Zeit die Wasserfilmdicke, wodurch die Verarbeitbarkeit abnimmt.

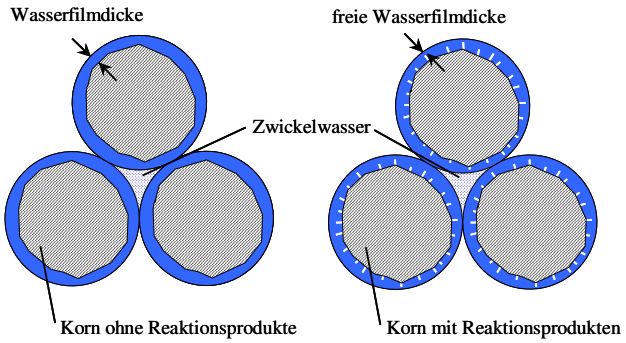


Bild 2.12: Einfluss von Reaktionsprodukten auf die schmierende Wasserfilmdicke um die Zementpartikel (schematisch), nach [KRELL, 1987]; links: ohne Reaktionsprodukte, rechts: mit Reaktionsprodukten und verringerter freier Wasserfilmdicke

Nach dem Ende der dormanten Phase wird erwartungsgemäß ein stark beschleunigtes Anwachsen von Fließgrenze und plastischer Viskosität verzeichnet.

Wenn die Temperatur steigt, werden die ablaufenden chemischen Hydratationsreaktionen beschleunigt. Höhere Frischbetontemperaturen führen daher i.a. zu schnellerem Ansteifen von Beton und damit zu rascherem Nachlassen der Verarbeitbarkeit. Bei Anwesenheit von Fließmittel sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten:

Während der ersten 120 Minuten nach dem Anmischen von Zementleim kann nach YAMADA ET AL. [1999] in erster Näherung von einer linearen Beziehung zwischen Fließfähigkeit und der je Zementkornoberfläche adsorbierten PCE-Moleküle ausgegangen werden. Außerdem scheint die Anzahl adsorbierter PCE-Moleküle auch von der Sulfationenkonzentration des im Beton befindlichen Wassers abzuhängen. Die Oberfläche der Zementkörner wächst auch während der dormanten Periode stetig weiter. Gleichzeitig sinkt die Sulfationenkonzentration von einer zunächst relativ hohen Anfangskonzentration direkt nach Mischende auf einen vergleichsweise niedrigen Wert nach ein bis zwei Stunden ab. Das Zusammenwirken beider gegensätzlicher Wirkungen bestimmt die Wirkung des PCE-Fließmittels.

Es ist das komplexe Zusammenspiel von sich ständig neu bildender Reaktionsoberfläche einerseits und der Anlagerung von Fließmittelmolekülen andererseits, das die zeitliche Entwicklung des Fließverhaltens von Bindemittelleim und Beton bestimmt.

BRAMESHUBER ET AL. [2003] untersuchten die temperaturabhängigen Eigenschaften von selbstverdichtendem Mörtel unter Verwendung von Portlandzement der Festigkeitsklasse 32,5R sowie verschiedenen Fließmitteln auf PCE-Basis. Die Untersuchungen zeigten, dass sich die Fließmittel hinsichtlich ihres zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens voneinander unterschieden. Einige zeigten ein ausgeprägtes Nachverflüssigungsverhalten, was vermutlich auf eine verzögerte Adsorption zurückzuführen war. Der qualitative Unterschied der Fließmittel bestand u.a. in der Länge von Haupt- und Seitenketten. Mörtel unter Verwendung von Fließmittel mit langen Seitenketten zeigte ein frühes Ansteifen, wohingegen Mörtel mit Fließmittel ausschließlich kurzer Seitenketten ein ausgeprägtes Konsistenzhaltevermögen aufwies. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass der sterische Effekt bei kurzen Seitenketten stabiler ist als bei langen. Die Fließmittel mit ausschließlich langen Seitenketten waren bedeutend kälteempfindlicher als jene mit unterschiedlich langen oder kurzen Seitenketten. Als mögliche Ursache wurde vermutet, dass der sterische Effekt bei niedrigeren Temperaturen und langen Seitenketten behindert wird, so dass eine Verflüssigung nur stark verzögert eintritt. Um ein optimales Fließverhalten von SVB zu erreichen, müssen demnach das Fließmittel, der eingesetzte Zement und der voraussichtliche Temperaturbereich aufeinander abgestimmt sein.

Interessant ist, dass selbst inerte Zusatzstoffe wie Kalksteinmehl die zeitliche Änderung der Fließfähigkeit von Bindemittelleimsuspensionen beeinflussen können. Versuche mit hochfeinem Kalksteinmehl zeigten, dass die leicht verzögernde Wirkung von Fließmittel auf PCE-Basis partiell aufgehoben werden kann [STARK ET AL., 2004]. Weiter konnte anhand von ESEM-Bildern ein erhöhter Hydratationsfortschritt nachgewiesen werden. Diese Wirkung des an sich inerten Kalksteinmehles wird auf Bildung von Kristallisationskeimen zurückgeführt. So kann es möglich sein, dass bei Verwendung von Kalksteinmehl die Verarbeitbarkeit von Beton rascher nachlässt als bei Verwendung von Flugasche.

Auch die Dosierfolge von Fließmittel beeinflusst die Fließfähigkeit von Beton, indem sie den Hydratationsfortschritt und damit die Bestandteile der Suspension bzw. die Größe der Oberfläche der zu dispergierenden Teilchen bestimmt. Weiterhin bestimmt der Zeitpunkt der Zusatzmittelzugabe die Wirksamkeit. Fließmittel, die nach der Wasserzugabe bzw. nach dem Kontakt von Zement und Wasser zugegeben werden, haben in der Regel eine stärker verflüssigende Wirkung als bei der Dosierung mit dem Zugabewasser [HILLEMEIER ET AL., 2001]. SPANKA ET AL. [1995] berichteten, dass bei Zementleimen zum Erreichen des Sättigungspunktes[1)] etwa die doppelte Menge des Fließmittels benötigt werden kann, sofern das Fließmittel nicht einige Minuten danach, sondern zusammen mit dem Zugabewasser dosiert wird. Ebenso wird berichtet, dass durch eine schrittweise Zugabe des Fließmittels zu unterschiedlichen Zeiten des Mischvorgangs die Fließfähigkeit bei gleicher Dosiermenge erhöht werden kann [HILLEMEIER ET AL., 2001].

Die notwendige Fließmitteldosierung für Beton kann höher liegen als sie in Eignungsversuchen an Leim ermittelt wurde, da das Fließmittel durch den Fein- und Grobzuschlag adsorbiert wird und so weniger zur Dispergierung des Leims zur Verfügung steht [SPANKA ET AL., 1995]. Grundsätzlich ist es möglich, die allmählich nachlassende dispergierende Wirkung der Fließmittel durch eine Nachdosierung auszugleichen [KORDTS, 2002].

Mit zunehmender Fließmitteldosierung ist eine Verringerung des Scherwiderstands des Zementleims durch den Abbau der Fließgrenze verbunden, während die Viskosität der Suspension weitgehend von der Fließmittelzugabe unbeeinflusst bleibt und überwiegend vom Wasser/Feststoff-Verhältnis abhängt, d.h. von der mittleren Wasserschichtdicke zwischen den Feststoffpartikeln. Nachteilig bei zu geringer Leimfließgrenze ist das verringerte Zusammenhaltevermögen des Leims. Dies wirkt sich ähnlich aus, wie eine überhöhte Wasserzugabe, die ein Sedimentieren von Feinstoffpartikel bewirken kann [VDZ, 2000]. Makroskopisch kann sich eine zu geringe Leimfließgrenze durch die Sedimentation von Grobzuschlägen äußern.

2.5.2 Rolle stabilisierender Zusätze

Bei selbstverdichtendem Beton besteht aufgrund der hohen Fließmitteldosierung grundsätzlich die Gefahr des Entmischens. Dabei bestehen zwei Möglichkeiten, den Entmischungswiderstand durch eine physikalische Wirkung zu vergrößern: Durch Zugabe von organisch stabilisierenden Zusätzen oder durch Zugabe mehlfeiner Zusatzstoffe.

Die Wirkung von organisch stabilisierenden Zusätzen (Stabilisierer) beruht dabei auf einer Gelbildung, die durch extrem lange Molekülketten (Makromoleküle) aus synthetischen oder natürlichen Polymeren hervorgerufen wird. Einerseits wird dem Beton ein guter Zusammenhalt verliehen, andererseits wird die innere Reibung herabgesetzt [HILLEMEIER ET AL., 2001].

Untersuchungen am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) zeigten, dass organische Stabilisierer auch aus einem Mix von verflüssigenden Komponenten (z.B. Naphthalinsulfonat) und stabilisierenden Komponenten (Polysacchariden) bestehen können. Aufgrund ihrer Gelbildung beeinflussen organische Stabilisierer das thixotrope Verhalten des Betons.

[1)] Der Sättigungspunkt definiert dabei die Fließmitteldosierung, ab der keine weitere Verflüssigung erzielt wird.

In Anlehnung an [UCHIKAWA, 1995] werden drei Typen von SVB unterschieden:

1) **Mehlkorntyp (powder type):**
   erhöhter Mehlkornanteil
2) **Stabilisierertyp (viscosity-agent type):**
   kein erhöhter Mehlkorntanteil + Verwendung von organischen Stabilisierern
3) **Kombinationstyp (combination type):**
   Kombination aus 1) und 2)

Anorganische Zusätze wirken im Wesentlichen durch die große spezifische Oberfläche, indem sie das Wasserrückhaltevermögen steigern. Ihre Wirkungsweise hängt dabei von ihrer Feinheit, der Korngrößenverteilung und der geometrischen Form ab. Wenn ihre mittlere Korngröße kleiner als diejenige von Zement ist, wirken sie gleichzeitig als Füller der Bindemittelmatrix. Der Widerstand gegenüber der Wasserabsonderung steigt um so mehr, je feiner die Zusätze sind [HILLEMEIER ET AL., 2001].

Beispiele für anorganisch stabilisierende Zusätze sind synthetische Kieselsäure bzw. Silicastaub, Flugasche, Kalksteinmehl, Phonolit und Quarzmehl. Bei Zugabe von Zusätzen mit amorpher Kieselsäure wird zudem die Festigkeit des Betons aufgrund der puzzolanischen Reaktion erhöht. Besonders günstig wirkt sich hingegen die Zugabe kugeliger Zusatzstoffe (wie etwa Flugasche) aus. Zusatzstoffe mit einem hohen Anteil plattiger Körner, z.B. Gesteinsmehle mit hohem Glimmeranteil, sollten möglichst vermieden werden (vgl. auch Einfluss der Kornform in Bild 2.6).

Der zweite notwendige Effekt, der durch Zugabe solcher Zusatzstoffe erreicht wird, ist die Vergrößerung des Leimvolumens, das bei SVB gegenüber Rüttelbeton i.d.R. deutlich erhöht ist. Die Zugabe von Zusatzstoffen führt bei konstantem Wassergehalt zusätzlich zu einer Erhöhung des Feststoffgehaltes im Leim und damit zu einer reduzierten Wasserfilmdicke. KRELL [1987] berichtet, dass sich (Rüttel-) Betone durch Zugabe von Zusatzstoffen bei konstantem Wassergehalt trotz zum Teil weicherer Ausgangskonsistenz in Richtung „ansteifempfindlicher Betone“ bewegen, weil die für eine vorgegebene Konsistenz mindestens erforderliche Grenzwasserfilmdicke im Zuge der fortschreitenden Hydratation früher erreicht wird (vgl. Bild 2.12). Dabei dient der überwiegende Anteil des Zugabewassers dazu, die Hohlräume zwischen den Partikeln einer Zementschüttung zu füllen und die Partikel mit einem Wasserfilm zu überziehen, bis sie sich gegeneinander frei verschieben können. Dieser Wasseranteil kann durch Zugabe von Zusatzstoffen mit Füllerwirkung verringert werden. Der geringere Teil des Zugabewassers wird durch die anfängliche Hydratation der Zementbestandteile verbraucht. WISCHERS [1981] gibt an, dass in den ersten Minuten nach Wasserzugabe eine dünne, oberflächennahe Schicht der Zementkörner mit dem Wasser reagiert. Der Menge nach sind dies etwa 2 bis 5 % des gesamten Zements, abhängig davon, wie reaktionsfreudig der Zement, wie fein er gemahlen und wie hoch die Temperatur der Zement-Wasser-Suspension ist. Darüber hinaus werden geringe Wassermengen zur Benetzung der im Frühstadium der Hydratation entstandenen Hydratationsprodukte benötigt. Der Wasseranteil, der für die anfängliche Hydratation benötigt wird, kann also durch Ersatz von Zement durch mehlfeine Zusatzstoffe gesenkt werden.

Eine Sonderrolle nimmt die Flugasche aufgrund ihrer kugeligen Form verbunden mit der festigkeitssteigernden Wirkung ein, sie wird daher näher erläutert: Flugaschen sind feinkörnige Verbrennungsrückstände, die in Elektrofiltern zur Abgasreinigung von Kohlekraftwerken abgeschieden werden. Sie können je nach Herkunft und chemisch-mineralogischer Beschaffenheit der Braun- bzw. Steinkohle alumo-silicatisch oder silicatisch-kalkhaltig zusammengesetzt sein und besitzen die oben beschriebenen puzzolanischen Eigenschaften. Kalkreiche Flugaschen können zudem hydraulische Eigenschaften aufweisen [VDZ, 2000]. Heutzutage werden Flugaschen hauptsächlich aus der Trockenfeuerung gewonnen, da diese Feuerungsart allgemein als umweltfreundlicher eingestuft wird als die Schmelzfeuerung. Flugaschen aus Schmelzfeuerungen weisen teilweise sogar eine größere puzzolanische Wirkung auf als durch Trockenfeuerung gewonnene.

Die mineralogischen Eigenschaften hängen jedoch im starken Maße von der Kohleart und ihrer Herkunft ab. Damit ist auch ihre rheologische Wirkungsweise Schwankungen unterworfen. Es wird berichtet, dass Flugaschen mit einem erhöhten Grobanteil um 125 µm den Wasseranspruch des Zementleims unter Umständen sogar erhöhen und die Verarbeitbarkeit verschlechtern können [GRÜBL ET AL., 2001]. Auch die erhöhte Porosität von Flugasche kann zu einem Anstieg des Wasseranspruchs führen, insbesondere dann, wenn ein hoher Anteil zerbrochener Flugaschekörner vorliegt; Bild 2.13 zeigt ein solches zerbrochenes Flugaschekorn. Günstig ist ein hoher Anteil der Kornfraktion kleiner als 10 µm [VDZ, 2000]. Ebenso wird berichtet, dass sich die größtenteils glatte und glasige Oberfläche der Flugaschepartikel positiv auf die Fließeigenschaften des Bindemittelleims auswirken, da für deren Benetzung weniger Wasser benötigt wird [VDZ, 2000].

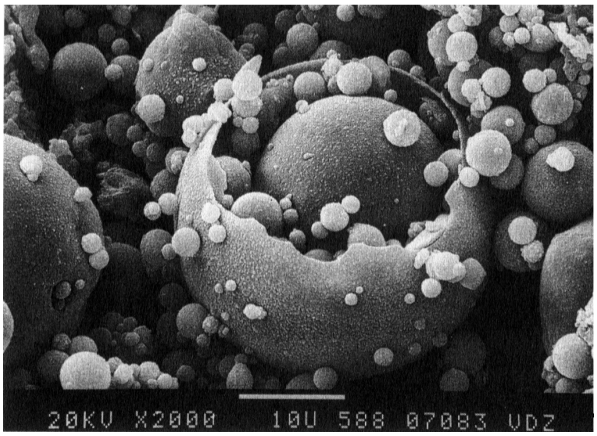


Bild 2.13: Steinkohlenflugasche im Rasterelektronenmikroskop [VDZ, 2000]

2.5.3 Einfluss des Wasserzementwertes und der Mahlfeinheit von Zement

Im Abschnitt 2.4.2 wurden eine Reihe von Modellen zur Berücksichtigung der Feststoffkonzentration vorgestellt.

Die wichtigsten Steuergrößen beim Entwurf von Betonen bestimmter Festbetoneigenschaften sind jedoch der Wasserzementwert, die Zementfestigkeitsklasse sowie der Leim- bzw. Zuschlaggehalt. Bei gleicher Zementart unterscheiden sich Zemente unterschiedlicher Festigkeitsklasse i.d.R. durch ihre spezifische Oberfläche (Mahlfeinheit nach BLAINE), während der Wasserzementwert – abhängig von der Korndichte des Zementes – rheologisch gesehen einer bestimmten Feststoffkonzentration entspricht.

VOM BERG [1979] gibt zur Abschätzung der rheologischen Kenngrößen von Zementleimen (reine Zement-Wasser-Suspensionen) folgende empirische Gleichungen an:

$$\tau_0 = 299 \cdot 10^{-4} e^{26,0 \cdot C_V} \cdot S_{vB}^{\ 3,83} \tag{2.15}$$

$$\eta_{pl} = 7,72 \cdot 10^{-5} e^{18,8 \cdot C_V} \cdot S_{vB}^{\ 2,47} \tag{2.16}$$

mit:

τ_0	[N/mm²]	Fließgrenze
η_{pl}	[Ns/mm²]	Plastische Viskosität
C_V	[-]	Feststoffkonzentration der Zement-Wasser-Suspension (zwischen 0,44 und 0,29, was *w*/*z*-Werten von 0,40 bis 0,80 entspricht)
$S_{v,B}$	[m²/cm³]	Aus dem BLAINE-Wert berechnete spezifische Oberfläche des Zementes (zwischen 0,4 und 2,1 m²/cm³, was mit einer spezifischen Oberfläche zwischen 1300 bis 6900 cm²/g korrespondiert).

Dabei geht die spezifische Oberfläche in die Fließgrenze mit einer höheren Potenz ein, was darauf hindeutet, dass die Fließgrenze mehr durch die Partikelanziehungskräfte beeinflusst wird als die plastische Viskosität [TATTERSALL ET AL., 1983]. Sinngemäß dürften diese Abhängigkeiten auch auf andere mehlfeine Zusatzstoffe übertragbar sein.

Eine Zusammenstellung weiterer empirischer Modelle zur Berücksichtigung der Feinheit von Zement und des Wasserzementwertes enthält [FREIMANN, 2002].

2.6 Existierende Modelle für die Beschreibung des Fließverhaltens von Beton

Analog zu den bereits im Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Modellen basieren auch die Modelle zur Beschreibung der Fließeigenschaften von Beton im Wesentlichen auf einer geometrischen Betrachtungsweise, wobei der Beton durch eine flüssige und eine feste Phase idealisiert wird. Zwischen den einzelnen Modellen bestehen Unterschiede im Hinblick auf die Definition der flüssigen Phase sowie hinsichtlich der Art und Weise, wie der Kornreibungsanteil der Feststoffphase modelliert wird.

Aus der Fülle der existierenden Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens von Beton bzw. von selbstverdichtendem Beton werden stellvertretend drei unterschiedliche Modellansätze herausgegriffen, weil sie auf unterschiedlichen Betrachtungsweisen beruhen.

DE LARRARD [1999] hat die folgenden halb-empirischen Modelle zur Abschätzung der Fließgrenze bzw. der plastischen Viskosität von Beton angegeben. Die Feststoffkonzentration ϕ ist durch die Betonrezeptur gegeben und setzt sich aus der Gesteinskörnung, Zement und den Zusatzstoffen zusammen. Die Besonderheit ist hierbei, dass die flüssige Phase das Wasser darstellt. Weil die flüssige Phase durch Wasser abgebildet wurde, konnte die Fließgrenze nur abhängig von der Fließmitteldosierung modelliert werden.

$$\tau_0 = \exp\left(2{,}537 + 0{,}540K_g^{'} + 0{,}854K_s^{'} + 1{,}134K_c^{'}\right) \text{ (ohne Fließmittel)} \tag{2.17}$$

Die Faktoren K_g' bzw. K_s' und K_c' sind Funktionen der relativen Feststoffkonzentrationen ϕ/ϕ_{max} der groben Gesteinskörnung (g) bzw. des Sandes (s) und des Zements (c).

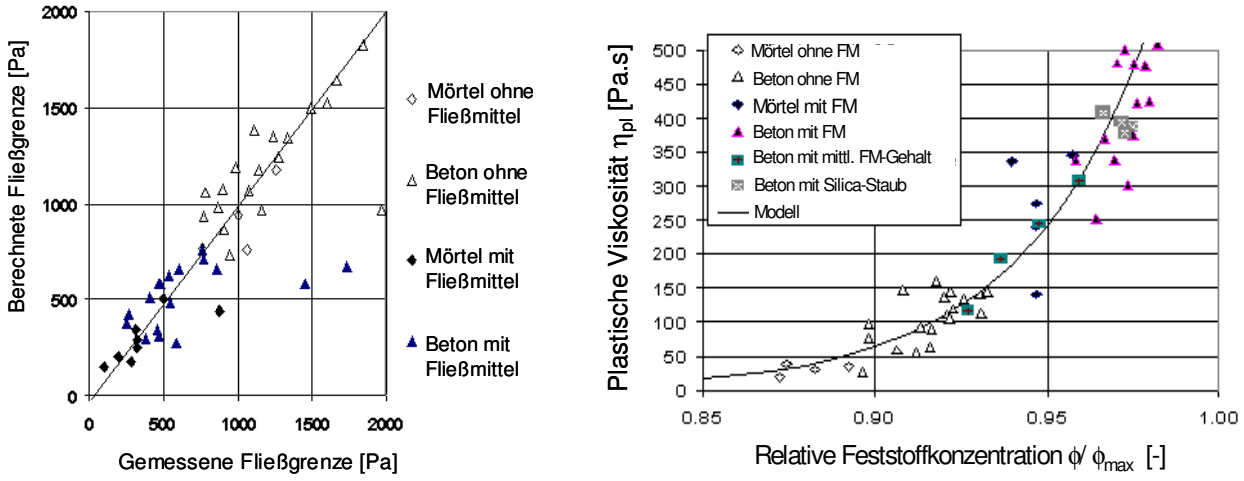
$$\tau_0 = \exp\left(2{,}537 + 0{,}540K_g^{'} + 0{,}854K_s^{'} + 0{,}224K_c^{'}\right) \text{ (mit Fließmittel)} \tag{2.18}$$

Die plastische Viskosität konnte für Mörtel und Beton unabhängig von der Fließmitteldosierung mit nur einer Funktion angegeben werden.

$$\eta_{pl} = \exp\left(26{,}75\left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} - 0{,}7448\right)\right) \tag{2.19}$$

Aus Bild 2.14 ist ersichtlich, dass bei Verwendung von Fließmittel größere relative Feststoffkonzentrationen möglich sind, weil der Wasseranspruch der Feststoffphase sinkt.

Es liegen jedoch nur vergleichsweise wenig Daten im Bereich selbstverdichtender Betone vor. Selbstverdichtende Betone verfügen über Fließgrenzen, die deutlich unterhalb von 500 Pa liegen (siehe auch Abschnitt 4).



a) b)

Bild 2.14: Modellierung der rheologischen Kenngrößen von Beton [FERRARIS ET AL., 1998], [DE LARRARD, 1999]
a) Gegenüberstellung von berechneter und gemessener Fließgrenze
b) Zusammenhang zwischen relativer Feststoffkonzentration und plastischer Viskosität

Im Gegensatz zu FERRARIS ET AL. [1998] sowie zu DE LARRARD [1999] hat NIELSEN [2001] den Beton durch die flüssige BINGHAM-Phase (Mörtel) und die Feststoffphase grobe Gesteinskörnung idealisiert. Das hat den Vorteil, dass die Modelle unabhängig von der Fließmitteldosierung sind. Die Fließgrenze τ_0 bzw. die plastische Viskosität η_{pl} des Betons werden auf die Fließgrenze $\tau_{0,M}$ bzw. auf die plastische Viskosität $\eta_{pl,M}$ des Mörtels zurückgeführt.

$$\tau_0 = \tau_{0,M}\left(1+\gamma_\infty c\right) \tag{2.20}$$

$$\eta_{pl} = \eta_{pl,M}\,\frac{1+\gamma_\infty}{1-c} \tag{2.21}$$

Die in den Gl. (2.20) und (2.21) enthaltene so genannte Geometriefunktion γ_∞ ist abhängig von der Formfunktion μ_s der flüssigen Phase („suspending medium“, hier der Mörtel) bzw. der Formfunktion der festen Phase μ_p (grobe Gesteinskörnung):

$$\gamma_\infty = \frac{3}{2}\cdot\frac{\mu_p+\mu_s-1}{\mu_s} \quad mit \quad c<c_s \text{ und } \gamma_\infty=\infty \text{ für } c\geq c_s \tag{2.22}$$

Die Formfunktionen charakterisieren die Verteilung der festen Phase P in der flüssigen Phase S und werden durch Gl. (2.23) bis (2.25) bestimmt:

$$\mu_s = \mu_s^0\left(1-\frac{c}{c_s}\right)^M \;;\; \mu_p = \mu_p^0\left(1-\frac{c}{c_p}\right)^M \quad \text{mit} \quad c_p = -\frac{\mu_p^0}{\mu_s^0}c_s \text{ für } c_p\leq c_s$$

(2.23) (2.24) (2.25)

Der Formfaktor μ_p^0 hängt von der Schlankheit B der als Ellipsoide idealisierten groben Gesteinskörnung ab. Die Schlankheit B ist das Verhältnis von Länge zu Durchmesser des Ellipsoids. Sowohl die Schlankheit als auch die maximale Packungsdichte können experimentell bestimmt werden. Der Verlauf der Formfaktoren hängt ab von den Konzentrationen der einzelnen Anteile sowie vom Interaktionsfaktor M.

$$\mu_p^0 = \begin{cases} \dfrac{3B}{B^2+B+1} \\ 3\dfrac{B^2-B+1}{4B^2-5B+4} \end{cases} \quad ; \quad \mu_s^0 = -\begin{cases} \mu_p^0 & ; \mathrm{B} \le 1 \\ 4\mu_p^0 - 3 & ; \mathrm{B} > 1 \end{cases} \tag{2.26}$$

Die Gegenüberstellung von Versuchsergebnissen und Modell an SVB zeigt Bild 2.15.

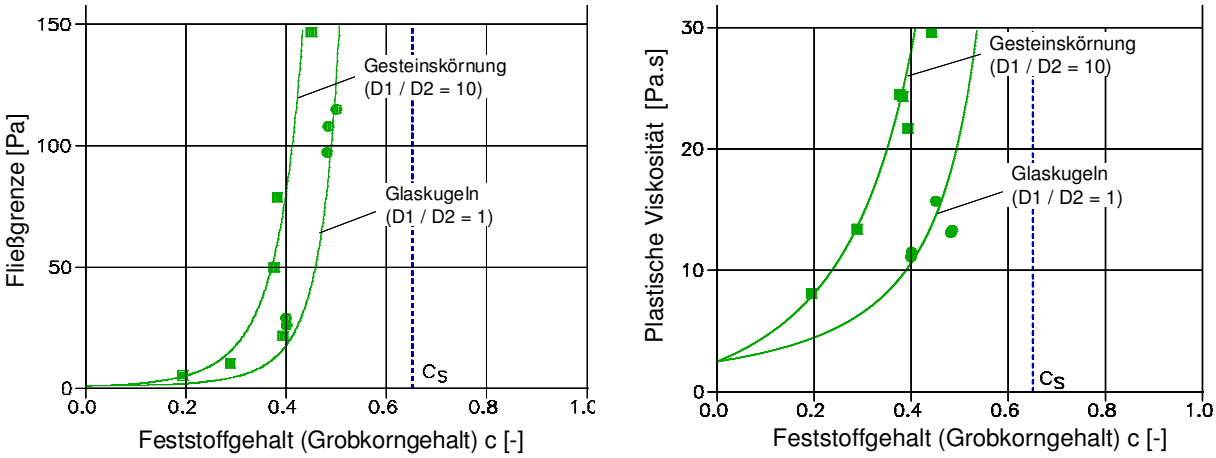


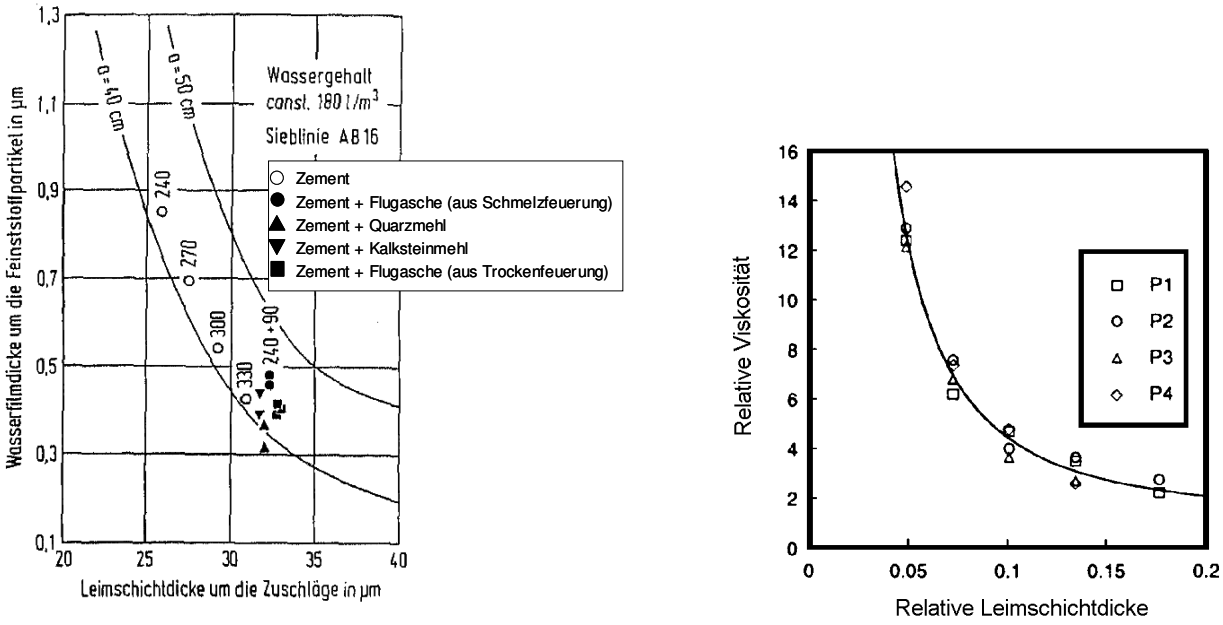
Bild 2.15: Modell für die rheologischen Kenngrößen von SVB [NIELSEN, 2001]
a) Fließgrenze von SVB, Interaktionsfaktor M = 3,5; Fließgrenze des Mörtels $\tau_{0,M}$ = 1 Pa
b) Plastische Viskosität von SVB, Interaktionsfaktor M = 1,0; plastische Viskosität des Mörtels $\eta_{pl,M}$ = 2,5 Pa.s

GEIKER ET AL., [2002] überprüften den obigen Modellansatz an selbstverdichtenden Betonen mit unterschiedlich beschaffener Gesteinskörnung. Dabei war eine Übereinstimmung von Versuch und Rechnung erst durch eine rechnerische Anpassung der Schlankheit B der Gesteinskörnung zu erreichen, die dann jedoch im Widerspruch zu den experimentell ermittelten Schlankheiten stand.

Weitere Modelle zur Abschätzung der rheologischen Kenngrößen auf Basis der relativen Feststoffkonzentration sind z.B. in [HU ET AL., 1995] enthalten.

Eine dritte Möglichkeit besteht darin, den Bindemittelleim als flüssige Phase zu betrachten; die Gesteinskörnung ist demzufolge die Feststoffphase (siehe Abschnitt 5). Der granulare Reibungsanteil kann auch als Funktion des Abstandes der Gesteinskörner untereinander beschrieben werden. Dieser Abstand steigt, wenn die Feststoffkonzentration der Gesteinskörnung abnimmt. Anstelle des Kornabstandes kann auch die Leimschichtdicke auf der Gesteinskörnung als Modellgröße herangezogen werden, weil diese gerade dem halben Kornabstand entspricht.

In der Literatur werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Berechnung der Leimschichtdicke genannt. Während KRELL [1987] und BUI ET AL. [2002] von einer einheitlichen Leimschichtdicke auf allen Zuschlagkörnern ausgingen (Bild 2.16a), berechneten OH ET AL. [1999] die Leimschichtdicke abhängig von der jeweiligen Kornfraktion proportional zur Korngröße und bezeichneten sie als relative Leimschichtdicke (Bild 2.16b).



a) b)

Bild 2.16: a) Zusammenhang zwischen der Wasserfilmdicke um die Feinststoffpartikel, der Leimschichtdicke auf den Zuschlägen und dem Ausbreitmaß a bei Rüttelbeton, nach [KRELL, 1987]; Zahlenbeispiel: (240 + 90) entspricht einem Zementgehalt von 240 kg/m³ und einem Zusatzstoffgehalt von 90 kg/m³

b) Einfluss der relativen Leimschichtdicke auf die relative Viskosität von Modellbeton bei unterschiedlichen Polymergehalten: P1 = 5,0; P2 = 4,7; P3 = 4,5; P4 = 4,1 kg/m³; der Wassergehalt blieb jeweils konstant mit 1000 kg/m³ [OH ET AL., 1999]; die relative Viskosität stellt dabei das Verhältnis der plastischen Viskosität des Modellbetons bezogen auf die plastische Viskosität des Leimes dar

Im Zusammenhang mit der Modellierung eigener Versuchsergebnisse im Abschnitt 5 folgt eine detaillierte Herleitung zur Berechnung der Leimschichtdicke.