

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 127 (2001)
Heft: 40: Betontechnologie

Artikel: Rheologische Eigenschaften von Mörteln und Betonen: neuartiges System für Messungen
Autor: Winnefeld, Frank
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-80217>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Rheologische Eigenschaften von Mörteln und Betonen

Neuartiges System für Messungen

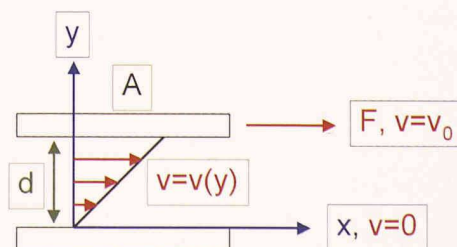
Die Verarbeitbarkeit von Mörteln und Betonen im frischen Zustand ist für die Anwendung in der Praxis von grosser Bedeutung. Gerade bei modernen Baustoffen wie selbstverdichtenden Betonen oder Fertigmörteln reichen die herkömmlichen Prüfmethoden (z.B. Ausbreitmass, L-Box) oder subjektive Beurteilungen (wie «klebrig» oder «geschmeidig») nicht mehr zur Charakterisierung der Verarbeitungseigenschaften aus. Aus diesen Gründen sind Untersuchungen der Rheologie, des Fliess- und Deformationsverhaltens von Materie unter Einwirkung von Scherkräften, erforderlich.

Rheologische Messungen liefern z.B. Aussagen zur Wirksamkeit und Kompatibilität von Zusatzmitteln, zum Verhalten von Zusatzstoffen oder Zuschlägen oder auch zu Verarbeitungseigenschaften verschiedenster Mörtelsysteme.

Die grundlegenden Parameter der Rheologie [1] lassen sich mit dem Zwei-Platten-Modell veranschaulichen (Bild 1). An der oberen Platte (Fläche A) wird mit der Kraft F gezogen, die resultierende Geschwindigkeit ist v_0 . Zwischen der oberen Platte und der unteren unbeweglichen Platte (Abstand d) wird die Flüssigkeit geschert. Unter der Annahme, dass die Flüssigkeit Wandhaftung hat und dass sich eine laminare Schichtenströmung (keine Turbulenzen) einstellt, können die rheologischen Parameter «Schubspannung» und «Scherrate» berechnet werden. Im einfachsten Fall (so genannte Newton'sche Flüssigkeiten, z. B. Wasser, Hydrauliköl) ist die Scherrate proportional zur Schubspannung. Der Proportionalitätsfaktor ist die Viskosität, die die «Zähigkeit» der Flüssigkeit oder Suspension beschreibt.

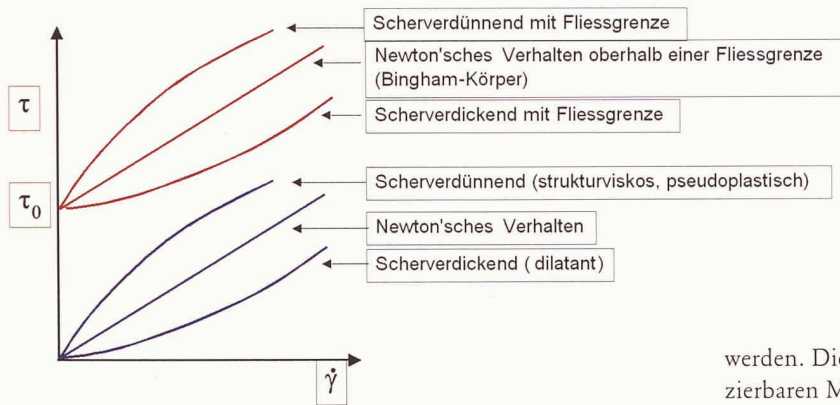
Viele Flüssigkeiten und Suspensionen zeigen Abweichungen von diesem Newton'schen Fliessverhalten, die zu komplizierteren Fliessgesetzen führen. Einige sind in Bild 2 dargestellt. So weisen manche Substanzen ein scherverdünnendes Verhalten (die Viskosität nimmt mit steigender Beanspruchung ab) oder ein scherverdickendes Verhalten (die Viskosität nimmt mit steigender Beanspruchung zu) auf. Weiterhin treten häufig Fliessgrenzen auf. Die Fliessgrenze ist diejenige Schubspannung, unterhalb der sich das Material wie ein Festkörper verhält. Bei Beanspruchungen oberhalb der Fliessgrenze beginnt es dann zu fliessen, verhält sich also wie eine Flüssigkeit.

Das in Bild 1 dargestellte Zwei-Platten-Modell ist für Rheometer wenig geeignet. In der Praxis werden daher koaxiale Zylinder (nach ISO 3219) oder Platte-Platte- bzw. Kegel-Platte-Geometrien verwendet. Diese ermöglichen in Kombination mit modernen Rheometern mit Luftlager und Temperiereinrichtungen sehr genaue Messungen von Flüssigkeiten und Pasten. Neben der



1

Zwei-Platten-Modell, Definition der Viskosität, mit Schubspannung: $\tau = F/A$; Scherrate: $\dot{\gamma} = v_0/d$ für das Zwei-Platten-Modell; Viskosität: $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ für Newton'sche Flüssigkeiten



2

Beispiele für das Fließverhalten von Flüssigkeiten und Suspensionen

Ermittlung von Fließkurven in einem weiten Scherratenbereich sind auch spezielle Messungen (Kriechversuch, Relaxationsversuch, Oszillationsmessungen, Zeit- und Temperaturversuch u. a.) möglich, mit denen zusätzliche Informationen über die Mikrostruktur der Fluide erhalten werden können.

Besonderheiten bei der Messung von Baustoffen

Zementleime, Mörtel und Betone sind näherungsweise Bingham-Körper (Bild 2), d.h. sie weisen oberhalb einer Fließgrenze annähernd Newton'sches Verhalten auf. Im Gegensatz zu einer homogenen Flüssigkeit wie z.B. Silikonöl stellen sie ein Mehrphasen-System dar, bestehend aus Bindemittel, Zusatzstoffen, Zusatzmitteln und Zuschlägen in einer wässrigen Suspension. Dies verursacht bei herkömmlichen Messsystemen Probleme bei der Messung rheologischer Kenngrößen [2,3,4,5]:

- Mörtel sondern bereits bei sehr leichten Bewegungen das Zugabewasser ab, d.h. es befindet sich ein Wasserfilm an der Oberfläche. Bei Messungen z.B. mit einer Zylindergeometrie wird dann nicht die ganze Probe geschert, sondern nur der Gleitfilm, es werden also zu geringe Viskositäten gemessen. Vermeiden kann man dies teilweise durch die Verwendung profilierter Messsysteme, was aber lediglich Relativmessungen ermöglicht, da die Spaltbreite nicht genau definiert ist.
- Für die Ermittlung rheologischer Größen ist ein enger Messspalt erforderlich. Die Spaltbreite sollte jedoch fünf- bis zehnmal grösser sein als die maximale Partikelgröße; es lassen sich so nur Partikelgrößen bis rund 0,1 mm (z.B. Zementleime) untersuchen. Es können zwar grössere Spaltbreiten verwendet werden, dabei werden aber lediglich Relativmessungen erhalten, da die Scherrate im Messspalt nicht konstant ist.
- Die Partikel können bei höheren Scherraten Turbulenzen verursachen. Dabei nimmt der Strömungswiderstand zu, wodurch eine Scherverdickung vorgetäuscht wird.
- Die Baustoff Suspensionen sind scherempfindlich. Sie neigen zur Sedimentation, währenddem sie geschert

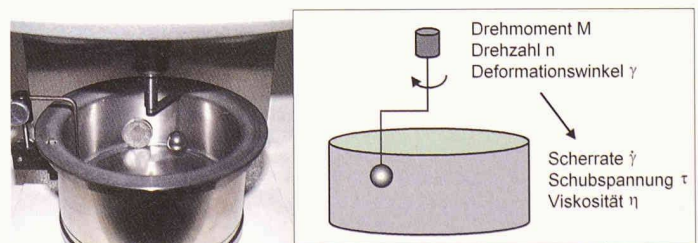
werden. Dies führt zu fehlerhaften und wenig reproduzierbaren Messwerten.

- Das Probenvolumen in herkömmlichen Platte-Platte-Geometrien (etwa 1ml) bzw. Zylinder-Geometrien (etwa 10–50 ml) ist für inhomogene Systeme wie Baustoffe relativ gering.

- Ein weiteres Problem ist das Vorhandensein einer Fließgrenze. Da sich die Schubspannung im Messspalt ändert, wird die Probe nur dort geschert, wo die Schubspannung die Fließgrenze überschreitet.

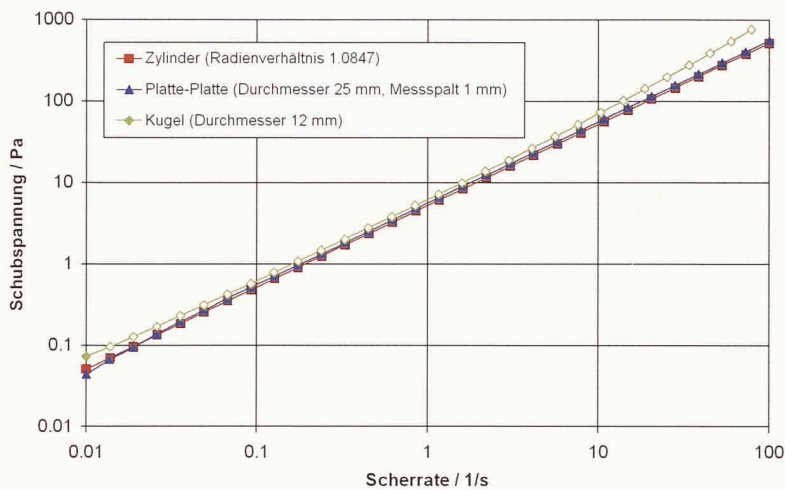
Die oben beschriebenen Probleme haben zur Entwicklung mehrerer spezieller Baustoffrheometer geführt, die meist von der Zylindergeometrie abgeleitet sind oder Rührer-ähnliche Drehkörper aufweisen. Diese eignen sich für Relativmessungen, sind jedoch im unteren Drehzahlbereich wenig empfindlich.

Eine relativ neue Entwicklung speziell für Baustoffe stellt das Kugelmesssystem nach Tyrach und Müller [2,3] dar, das mit einem modernen luftgelagerten Rheometer gekoppelt werden kann (Bild 3). Das Messprinzip dieses Systems mit einer exzentrisch rotierenden Kugel beruht auf einer Verdrängungsströmung, durch die der Baustoff zwangsweise geschert wird. Die rheologischen Kenngrößen wie Scherrate, Schubspannung und Viskosität werden aus den Messgrößen Drehmoment, Drehzahl und Deformationswinkel berechnet. Mit dem Kugelmesssystem ist es möglich, ohne die oben beschriebenen Nachteile Messungen an Zementsuspensionen und Mörteln bis etwa 4 mm Korngröße bei einem Probenvolumen von 500 ml durchzuführen. Bild 4 zeigt am Beispiel einer Newton'schen Flüssigkeit (Silikonöl mit Nennviskosität 5000 cSt), dass mit einem



3

Kugelmesssystem nach Tyrach und Müller für ein Probenvolumen 500 ml; Kugeldurchmesser: 8, 12, 16 mm

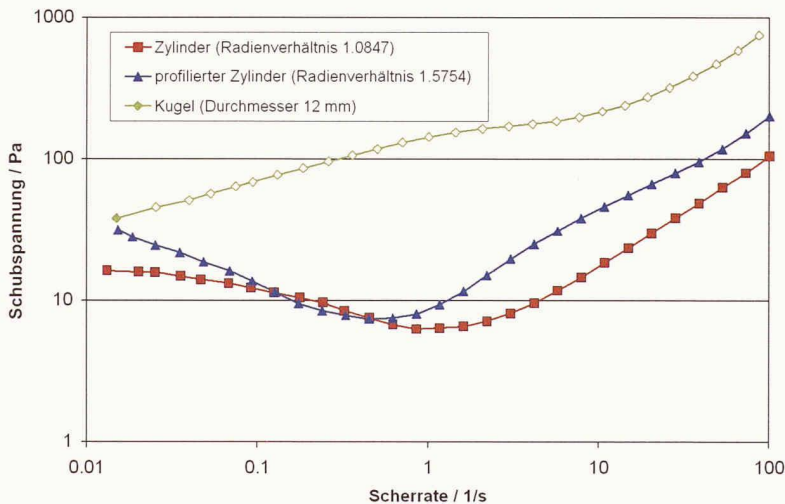


4

Fliesskurve eines Silikonöls in Abhängigkeit des verwendeten Messsystems

5

Fliesskurve eines Zementleims (CEM I 42.5, $w/z = 0,35$) in Abhängigkeit des verwendeten Messsystems



Kugelmesssystem vergleichbare Messergebnisse erhalten werden wie mit den herkömmlichen Zylinder- bzw. Platte-Platte-Geometrien. Der doppellogarithmische Massstab verdeutlicht, dass auch bei sehr geringen Scherraten (d.h. bei geringer Beanspruchung des Materials), wie sie z.B. bei selbstverlaufenden Massen auftreten, sehr genaue Messungen möglich sind. Bei hohen Scherraten weicht die Messkurve des Kugelmesssystems aufgrund von Turbulenzen nach oben ab, da das Silikonöl relativ dünnflüssig ist.

Dass mit der Kugelgeometrie der Effekt des Wandgleitens vermieden werden kann, zeigt Bild 5 am Beispiel eines Zementleims, vgl. hierzu auch [2,4]. Mit Zylindergeometrie werden deutlich geringere Schubspannungen gemessen, was darauf hindeutet, dass in diesem Fall lediglich der Gleitfilm an der Zylinderoberfläche gesichert wurde. Bei der Platte-Platte-Geometrie – in Bild 5 nicht dargestellt – findet sich derselbe Effekt. Auch die Verwendung profilierter Zylinder bzw. Platten führt zu keiner wesentlichen Verbesserung.

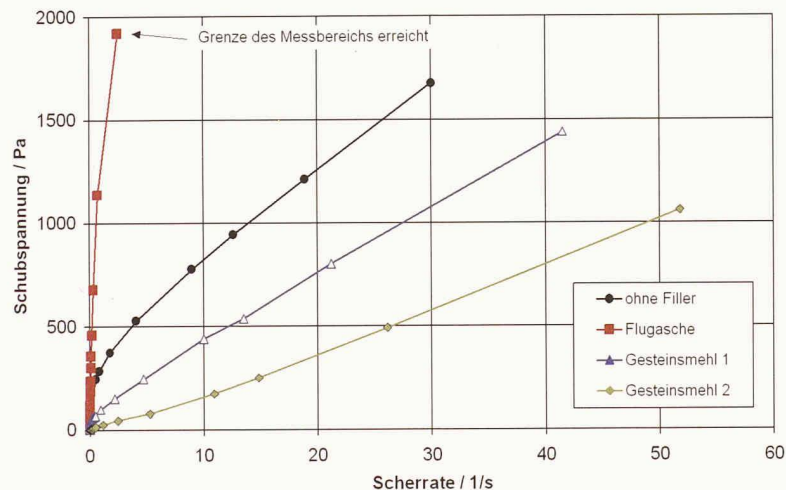
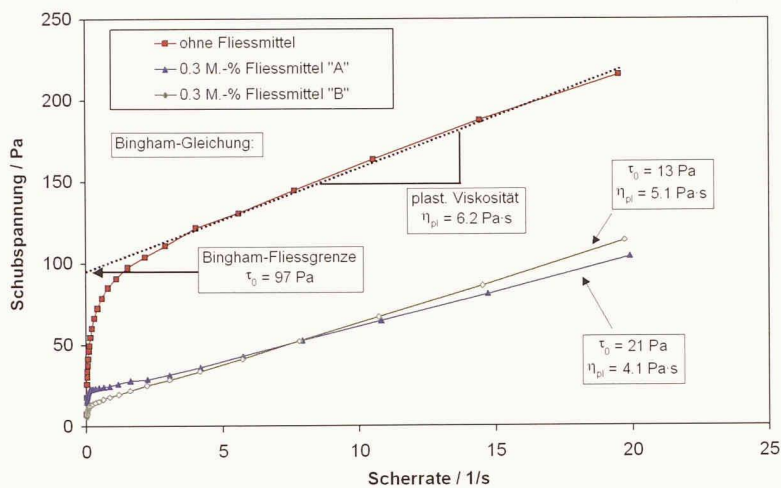
Anwendungsbeispiel selbstverdichtender Beton

Derzeit beschäftigt man sich am Institut des Autors in mehreren Forschungsarbeiten mit der Konzeptionierung von SCC (Self-compacting concrete – selbstverdichtendem Beton) unter der Verwendung von in der Schweiz eingesetzten Ausgangsstoffen [6,7]. Dazu werden u.a. auch rheologische Messmethoden eingesetzt. Selbstverdichtender Beton unterscheidet sich vom her-

kömmlichen Beton dadurch, dass er eine hohe Fließfähigkeit aufweist sowie sich beim Einbau selbst verdichtet und entlüftet. Bei richtiger Anwendung sind mit diesem Beton schnellere Betonierarbeiten möglich. Diese führen auch zu einem homogeneren Material, da die Verdichtung z.B. mit einem Innenrüttler entfällt. Gegenüber herkömmlichem Beton weist ein SCC einen erhöhten Mehlkornanteil (Zement, Filler wie z.B. Steinkohlenflugasche oder Kalksteinmehl sowie Zuschlagbestandteile $<125\ \mu\text{m}$) von z.T. über $500\ \text{kg/m}^3$ auf. Weiterhin werden moderne Hochleistungsfließmittel auf Polycarboxylatether-Basis zur Reduktion des Zugabewassers eingesetzt.

Die Wirkungsweise eines Fließmittels lässt sich anhand einer Fließkurve verdeutlichen (siehe Bild 6 am Beispiel eines Zementleims mit und ohne Zusatz eines Fließmittels). Bei gleichem W/Z-Wert wird durch das Fließmittel die Fließgrenze stark gesenkt, während die Viskosität nur geringfügig beeinflusst (gesenkt) wird. Die Fließgrenze ist dabei nicht als scharfer Punkt, sondern als gewisser Bereich erkennbar. Daher sollte sie besser als «Fließzone» bezeichnet werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass sich für einen bestimmten Zement verschiedene Fließmittel auch unterschiedlich verhalten, vgl. hierzu auch [8]. Dies bedeutet, dass Zusatzmittel und Zement für den jeweiligen Anwendungszweck aufeinander abzustimmen sind.

Ein weiterer zentraler Bestandteil des SCC sind die Feinanteile. Durch geeignete Wahl eines Fillers – hier



spielt die Packungsdichte der Feinanteile, d.h. speziell deren Kornverteilung, eine Rolle – lässt sich der Wasseranspruch eines SCC gezielt verringern. Mittels rheologischer Messungen lassen sich sehr gut die verschiedenen Filler unterscheiden und optimieren. Bild 7 zeigt, dass sich die drei Filler im untersuchten SCC-System bei gleichem Wasser/Bindemittel-Wert (Bindemittel = Zement + Filler) deutlich unterschiedlich verhalten. Die beiden Gesteinsmehle – insbesondere Gesteinsmehl 2 – zeigen eine stark verflüssigende Wirkung, während die Flugasche den gegenteiligen Effekt hat.

Die spezielle Zusammensetzung eines SCC bewirkt, dass er ein zähflüssiges, «honigartiges» Fließverhalten zeigt. In rheologischen Begriffen lässt sich das folgendermaßen ausdrücken:

SCC muss einerseits eine geringe Fließgrenze aufweisen, damit er ohne grössere äussere Einwirkung fließt und selbstständig entlüftet. Andererseits sollte die Viskosität dabei vergleichsweise hoch sein, damit die groben Zuschläge nicht sedimentieren, was insbesondere problematisch beim Umfließen des Bewehrungsstahles ist.

Neben den rheologischen Untersuchungen wurde in den Mörtelversuchen auch das Ausbreitmass (100 mm Konus, ohne Schocken) und die Auslaufzeit aus dem sogenannten «V-Funnel» bestimmt. Nach [9] sind Mörtelsysteme als Matrix für SCC geeignet, wenn sie ein Ausbreitmass von etwa 240–280 mm und Auslaufzeit

ten von rund 6–10 s aufweisen. Es wurde nun anhand der rheologischen Messungen untersucht, inwieweit das Ausbreitmass und die Auslaufzeit mit den rheologischen Parametern «Bingham-Fließgrenze» und «plastische Viskosität» zusammenhängen. Dazu wurden die Fließkurven im Scherratenbereich zwischen 5 s^{-1} und 25 s^{-1} anhand der Bingham-Gleichung interpoliert.

In Bild 8 ist für die untersuchten Mörtel die plastische Viskosität gegen die Auslaufzeit aufgetragen. Zu erkennen ist ein annähernd linearer Zusammenhang, d.h. die Auslaufzeit aus dem V-Funnel ist der im Rheometer bestimmten Viskosität proportional. Dies ist insofern nicht verwunderlich, da es auch Viskosimeter – z.B. den Becher nach ISO 2431 – gibt, die nach demselben Prinzip, d.h. der Bestimmung der Auslaufzeit aus Kapillaren, die Viskosität bestimmen. Abgesehen von zwei Messungen zeigen die Mörtel für SCC brauchbare Auslaufzeiten, wenn ihre Viskositäten etwa im Bereich zwischen 15 und 25 Pa·s liegen. Es ist weiter zu berücksichtigen, dass die Bestimmung der Auslaufzeit mit einer relativ grossen Unsicherheit von etwa 1 s behaftet ist, während die Fließkurven mit dem Kugelmesssystem sehr reproduzierbar gemessen werden können.[3]

Etwas anders sieht der Fall bei der Auftragung der Bingham-Fließgrenze gegen das Ausbreitmass aus, siehe Bild 9. Als allgemeiner Trend ergibt sich, dass hohe Fließgrenzen zu geringeren Ausbreitmassen führen. Eine deutlichere – z.B. lineare – Abhängigkeit ist

6

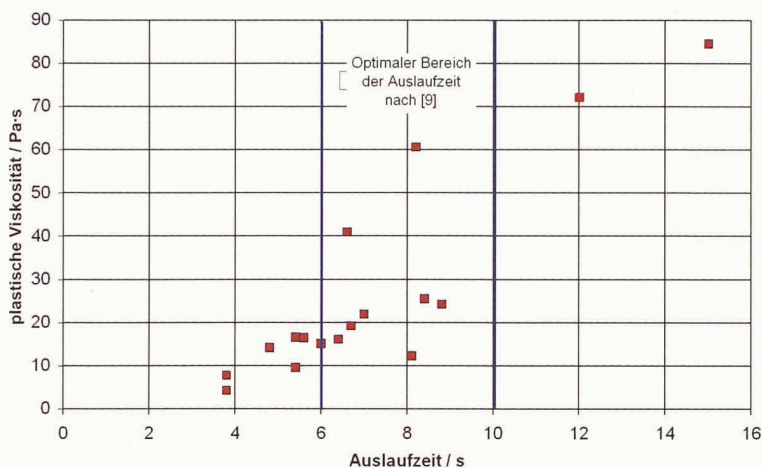
Einfluss von Fließmitteln auf die Fließkurve eines Zementleims (CEM I 42.5, w/z = 0,355). Kugelmesssystem (Ø 12 mm)

7

Einfluss verschiedener Filler auf das Fließverhalten von Mörtelsystemen für SCC-Vorversuche.

Filler: CEM I 42.5 = 1:1; Bindemittel: Sand 0–1 mm = 1:1 jeweils in Vol.-Teilen

Wasser/Bindemittel-Wert = 0,28; Kugelmesssystem (Ø 12 mm)

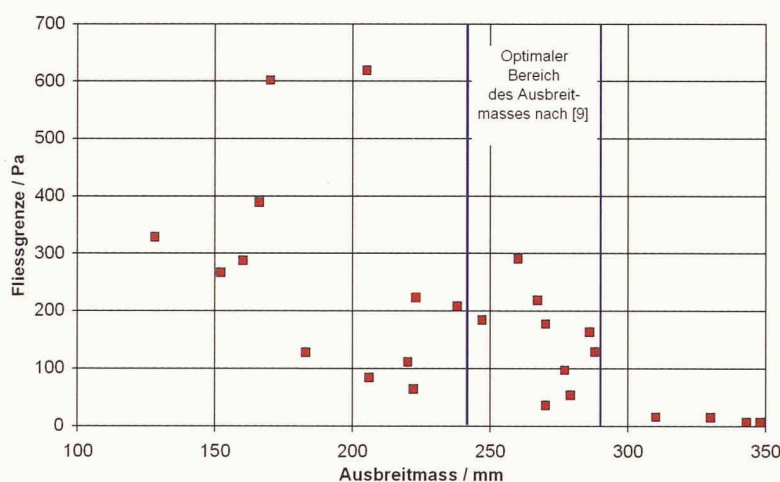


8

Mörtelversuche SCC, Zusammenhang zwischen Viskosität und Auslaufzeit. Kugelmesssystem (Ø 12 mm)

9

Mörtelversuche SCC, Zusammenhang zwischen Fließgrenze und Ausbreitmass Kugelmesssystem (Ø 12 mm)



jedoch nicht zu erkennen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Ausbreitmass nicht nur von der Fließgrenze, sondern auch von der Viskosität abhängt. Bei geringer Viskosität neigen die Zuschläge – wie oben erwähnt – zum Sedimentieren, das Fließverhalten verschlechtert sich.

Die rheologischen Untersuchungen im Rahmen der SCC-Optimierung werden derzeit weiter fortgeführt. Schwerpunkt ist der Einfluss verschiedener Zusatzmittel und Filler auf das Fließverhalten.

Zusammenfassung

Rheologische Messungen liefern mehr Informationen über die Verarbeitbarkeit und das Fließverhalten von Zementleimen, Mörteln und Betonen als die Normversuche wie Ausbreitmass oder Auslaufzeit. Die speziellen bei der rheologischen Messung von Baustoffen auftretenden Probleme, vor allem das Wandgleiten, lassen sich durch Verwendung eines Kugelmesssystems in Kombination mit einem modernen, luftgelagerten Rheometer lösen. Dadurch können Optimierungen im Labor effizient und unter Berücksichtigung vieler Parameter durchgeführt werden.

Frank Winnefeld, Dr. rer. nat., Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Beton/Bauchemie, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Literatur

- [1] Mezger, T.: Das Rheologie-Handbuch. Curt R. Vincentz Verlag, Hannover, 2000.
- [2] Tyrach, J.; Hiller, W. und Brunn, P. O.: Rheologie und Anwendungen. 1. Tagung Bauchemie, München, 21.–22. November 1997, S. 77–88.
- [3] Müller, M.; Tyrach, J. und Brunn, P. O.: Rheologische Charakterisierung von Maschinenputzen. Zement-Kalk-Gips 52 (1999), S. 252–258.
- [4] Blask, O.; Knöfel, D.; Pakusch, J. und Dreher, S.: Die rheologischen Eigenschaften von Zementleim und Frischmörtel – Besondere Messmethoden. 2. Tagung Bauchemie, Siegen, 5.–6. März 1999, S. 62–66.
- [5] Saak, A. W.; Jennings, H. M. und Shah, S. P.: The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. Cement and concrete research 31/2001, S. 205–212.
- [6] Leemann, A.: SCC – Selbstverdichtender Beton. Empa-Bericht Nr. 840334.
- [7] Leemann, A.: Stahlfasern mit positiven Eigenschaften – Selbstverdichtender Beton mit Fasern. Schweizer Bauwirtschaft 100/2001, Nr. 1, S. 7.
- [8] Blask, O.; Knöfel, D. und Sandor, M.: Der Einfluss chemischer Zusatzmittel auf die Rheologie zementgebundener Baustoffe. 14. Internationale Baustofftagung (ibausil), Weimar, 20.–23. September 2000, Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Prof. Dr.-Ing. J. Stark, Band 2, S. 881–889.
- [9] Nawa, T.; Izumi, T. und Edamatsu, Y.: State-of-the-art Report on Materials and Design of Self-compacting Concrete. International Workshop on Self-Compacting Concrete. Kochi, Japan, 23.–26. August 1998, S. 160–190.