



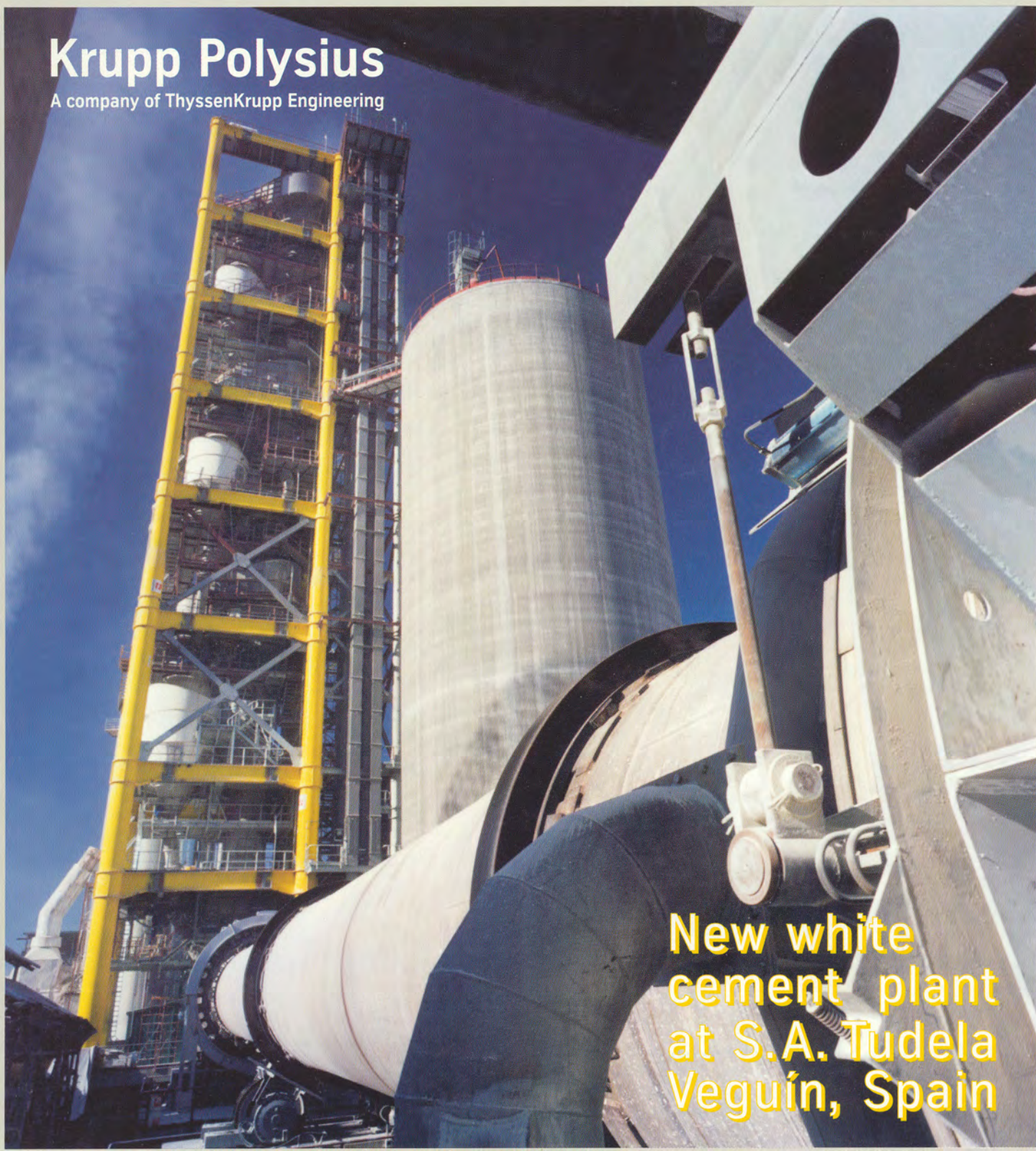
INTERNATIONAL

No. 2/2000

CEMENT-LIME-GYPSUM

Krupp Polysius

A company of ThyssenKrupp Engineering



New white
cement plant
at S.A. Tudela
Veguín, Spain

Zur Rheologie von Baustoffen

E. W. Hollinderbäumer, K.-H. Zysk, B. Aberle, Essen/Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Das rheologische Verhalten von Baustoffen wird durch nicht-Newton'schen Fließeigenschaften bestimmt. Zu ihrer Beschreibung ist das Fließgesetz von Herschel-Bulkley besser geeignet als die Vereinfachungen von Ostwald und Bingham, da Fließgrenze und Strukturviskosität berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Fließeigenschaften von Baustoffen können Rotations- und Rohrviskosimeter eingesetzt werden, wobei letztere onlinefähig sind. Aufgrund des nicht-Newton'schen Fließverhaltens erfordert die Auswertung viskosimetrischer Rohmessdaten einen erhöhten mathematischen Aufwand, der bei den im Handel erhältlichen Viskosimetern meistens vernachlässigt wird.

SUMMARY

The rheological behaviour of building materials is determined by non-Newtonian flow properties. Because the Herschel-Bulkley flow law takes yield values and intrinsic viscosities into account it is more suitable than the simplifications by Ostwald and Bingham for describing rheological behaviour. The flow properties of building materials can be determined with rotating viscometers and pipe viscometers, the latter being usable on-line. Because of the non-Newtonian flow behaviour the evaluation of raw viscometric measurements requires a high level of mathematical input, which is usually ignored in commercially obtainable viscometers.

RÉSUMÉ

Le comportement rhéologique des matériaux de construction est régi par des propriétés d'écoulement non - Newtoniennes. Pour les décrire, la loi d'écoulement de Herschel-Bulkley est mieux adaptée, que la simplification de Ostwald et Bingham, parce que la limite d'écoulement et la structure de viscosité sont prises en compte. Pour la détermination des propriétés d'écoulement des matériaux de construction, il est possible d'utiliser des viscosimètres rotatifs ou à tube, ces derniers étant apte à une exploitation en temps réel. En raison du comportement d'écoulement non - Newtonien, l'exploitation des données viscosimétriques brutes exige plus de travail mathématique, qui malheureusement est, dans la plupart des cas, négligé sur les viscosimètres disponibles sur le marché.

RESUMEN

El comportamiento reológico de los materiales de construcción queda determinado por las características de flujo no newtonianas. Para su descripción es más apropiada la ley de flujo de Herschel-Bulkley que las simplificaciones de Ostwald y Bingham, ya que se tienen en cuenta tanto el límite reológico como la viscosidad de estructura. Para determinar las características reológicas de los materiales de construcción se pueden emplear viscosímetros rotativos o de tubo, pudiendo ser utilizados estos últimos online. Debido al comportamiento reológico no newtoniano, la evaluación de los datos viscosimétricos brutos requiere un mayor despliegue matemático, del cual se suele prescindir en los viscosímetros usuales en el comercio.

The rheology of building materials

Au sujet de la rhéologie des matériaux de construction

Sobre la reología de los materiales de construcción

1. Einleitung

Bei der Verarbeitung von Baustoffen müssen verschiedene strömungsmechanische Aufgaben gelöst werden, welche durch die besonderen nicht-Newton'schen Fließeigenschaften geprägt sind. Hierzu gehört z.B. die Förderung in Rohrleitungen, das Einfließen in eine Verschalung oder das Verputzen von Wänden. Die Bestimmung der nicht-Newton'schen Fließeigenschaften ist immer noch mit erheblichen Fehlern behaftet, die vorrangig in der Anwendung vereinfachter Messtechniken (Marshtrichter, Ausbreitmaß etc.) und der Meidung komplizierter mathematischer Zusammenhänge begründet sind.

2. Nicht-Newton'sche Fließeigenschaften von Baustoffen

Die Fließwiderstände herkömmlicher Newton'scher Fluide können anhand einer einzigen Größe, der dynamischen Viskosität η , beschrieben werden. Bei frischen Baustoffmassen treten, wie bei anderen konzentrierten Suspensionen auch, zwei zusätzliche Erscheinungen auf: Die Strukturviskosität und die Fließgrenze.

1. Introduction

During the processing of building materials it is necessary to solve various flow-mechanical problems which result from the special, non-Newtonian, flow properties. These problems include conveying in pipelines, pouring into shuttering, and plastering of walls. The determination of non-Newtonian flow properties is still subject to considerable errors which are due primarily to the use of simplified measuring techniques (Marsh funnel, flow table spread, etc.) and the avoidance of complicated mathematical relationships.

2. Non-Newtonian flow properties of building materials

The flow resistance of conventional Newtonian fluids can be described by a single variable, the dynamic viscosity η . As with other concentrated suspensions two additional phenomena – the intrinsic viscosity and the yield value – occur in fresh bulk building materials.

2.1 Fließgrenze

Fluide, die sich in einem Übergangszustand zwischen Feststoff und Flüssigkeit befinden, verfügen im ruhendem Zustand oft über typische Festkörpereigenschaften wie z.B. eine – wenn auch geringe – Druckfestigkeit. Besonders Baustoff Suspensionen zählen zu dieser Gruppe. Das strömungsmechanische Äquivalent zur Druckfestigkeit (σ_D) ist die durch den Mohrschen Spannungskreis verbundene Fließgrenze τ_0 (Bild 1). Diese Fließgrenze ist verantwortlich für eine Reihe wirklich praxisrelevanter Erscheinungen (Bild 2):

- der Mindestdruckverlust in einer Rohrleitung, welcher überwunden werden muss, um die Förderung in Gang zu setzen,
- die maximale sedimentationsstabile Korngröße für Zuschlagstoffe,
- die minimal zulässige Spaltweite von Verschalungen, um ein Einfließen des Baustoffes durch Gravitation sicherzustellen und
- die maximale Schichtstärke eines Putzes, bis zu der ein Abfließen von der Wand verhindert wird.

Die Existenz einer Fließgrenze lässt sich sehr leicht erkennen. Die Oberfläche einer solchen Flüssigkeit ist nicht zwangsläufig plan. Kleine Täler und Hügel können geformt werden und schwerere Partikel scheinen auf der Oberfläche zu schwimmen (Bild 3).

2.2 Strukturviskosität

Die Partikel in einer konzentrierten Suspension befinden sich in Berührung und sind zum Teil miteinander verzahnt. Mit zunehmender mechanischer Beanspruchung lösen sich diese Verzahnungen auf, was ein zunehmend schwächeres Ansteigen der Fließwiderstände zur Folge hat. Praktisch kann diese Erscheinung bei der Rohrförderung beobachtet werden. Bei größeren Volumenströmen können diese Stoffe mit niedrigeren Druckverlusten gefördert werden, als zunächst erwartet. Die Strukturviskosität wird in der Regel durch einen dimensionslosen Strukturexponenten n quantifiziert.

3. Fließgesetze

Fließgesetze dienen zur mathematischen Beschreibung der Fließwiderstände in Abhängigkeit von der Scherung. Die Fließwiderstände werden üblicherweise durch die auftre-

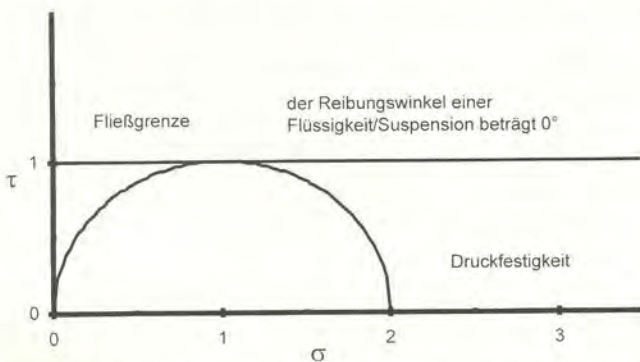


BILD 1: Mohr'scher Spannungskreis: Bei nicht zu trocken konditionierten Baustoff Suspensionen beträgt der innere Reibungswinkel des Fließortes nahezu 0°. In diesem Fall gilt für den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Fließgrenze $\tau_0 = 1/2 \sigma_D$ [1]

FIGURE 1: Mohr's stress circle: the internal angle of friction of the flow locus is virtually 0° for building material suspensions which are not too dry. In this case the expression $\tau_0 = 1/2 \sigma_D$ applies for the relationship between compressive strength and yield value [1]

Fließgrenze
Druckfestigkeit
der Reibungswinkel einer Flüssigkeit/
Suspension beträgt 0°

yield value
compressive strength
the angle of friction of a
liquid/suspension is 0°

	Minstdruckverlust in einer Rohrleitung $\left(\frac{\Delta p}{\Delta l}\right)_{\min} = \frac{2 \cdot \tau_0}{R} = \frac{4 \cdot \tau_0}{D}$
	max. sedimentationsstabile Korngröße nach DEDEGIL [2] $d_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{\tau_0}{\rho \cdot g}$
	Mindestspaltweite einer Verschalung für Einfließen durch Gravitation $b_{\min} = \frac{2 \cdot \tau_0}{\rho \cdot g}$
	Maximale stabile Dicke eines Putzes an einer senkrechten Wand $b_{\max} = \frac{\tau_0}{\rho \cdot g}$

BILD 2: Einige wichtige praxisrelevante Effekte die durch die Fließgrenze bedingt sind

FIGURE 2: Some important effects caused by the yield value which are of practical relevance

Minstdruckverlust in einer Rohrleitung
max. sedimentationsstabile Korngröße nach Dedegil
Mindestspaltweite einer Verschalung für Einfließen durch Gravitation
Maximale stabile Dicke eines Putzes an einer senkrechten Wand

minimum pressure drop in a pipeline
maximum particle size for sedimentation stability acc. to Dedegil
minimum shuttering gap width for gravity pouring
maximum stable plaster thickness on a vertical wall

2.1 Yield value

Fluids which are in a transitional state between solid and liquid often, when undisturbed, have typical solid body properties such as a compressive strength – even if it is a low one. Building material suspensions belong to this group. The flow-mechanical equivalent of compressive strength (σ_D) is the yield value τ_0 connected through the Mohr's stress circle (Fig. 1). This yield value is responsible for a number of phenomena which are of real practical relevance (Fig. 2):

- the minimum pressure drop in a pipeline which has to be overcome to set the delivery in motion,
- the maximum particle size of aggregates for sedimentation stability,
- the smallest permissible gap width of shuttering to enable the building material to flow in under gravity, and
- the maximum layer thickness of a plaster which can adhere to a wall without running off.

The existence of a yield value is very easy to detect. The surface of such a liquid is not necessarily flat. Small valleys and hills may be formed, and fairly heavy particles appear to float on the surface (Fig. 3).

2.2 Intrinsic viscosity

The particles in a concentrated suspension are in contact, and in some cases interlocked, with one another. With in-

tende Schubspannung τ als Funktion des Schergefälles dargestellt (Gleichung 1). Das Schergefälle γ ist als Geschwindigkeitsgradient senkrecht zur Strömungsrichtung definiert und stellt ein Maß für die Intensität der Fluidbeanspruchung dar. Die dynamische Viskosität, die Fließgrenze und der Strukturexponent sind als charakteristische Stoffgrößen Parameter der Fließgesetze, wobei die dynamische Viskosität η bei nicht-Newtonschen Fluiden oft auch mit K (Konsistenz) bezeichnet wird:

$$\tau = f(\gamma, \tau_0, \eta, n) \text{ bzw. } \tau = f(\gamma, \tau_0, K, n). \tag{1}$$

Alternativ können Fließgesetze auch als scheinbare Viskositätskurven (Gleichung 2) dargestellt werden. Die scheinbare Viskosität η_s vergleicht die Fließwiderstände nicht-Newtonscher Fluide mit der dynamischen Viskosität Newtonscher Fluide. Im Gegensatz zur dynamischen Viskosität η ist die scheinbare Viskosität η_s jedoch abhängig vom Schergefälle:

$$\eta_s(\gamma) = \frac{\tau(\gamma, \tau_0, \eta, n)}{\gamma}. \tag{2}$$

Das für Suspensionen und somit für Baustoffe gültige übergeordnete Fließgesetz stammt von Herschel und Bulkley [3] (Gleichung 3). Es berücksichtigt die Fließgrenze und die Strukturviskosität. **Bild 4** zeigt exemplarisch Fließkurve

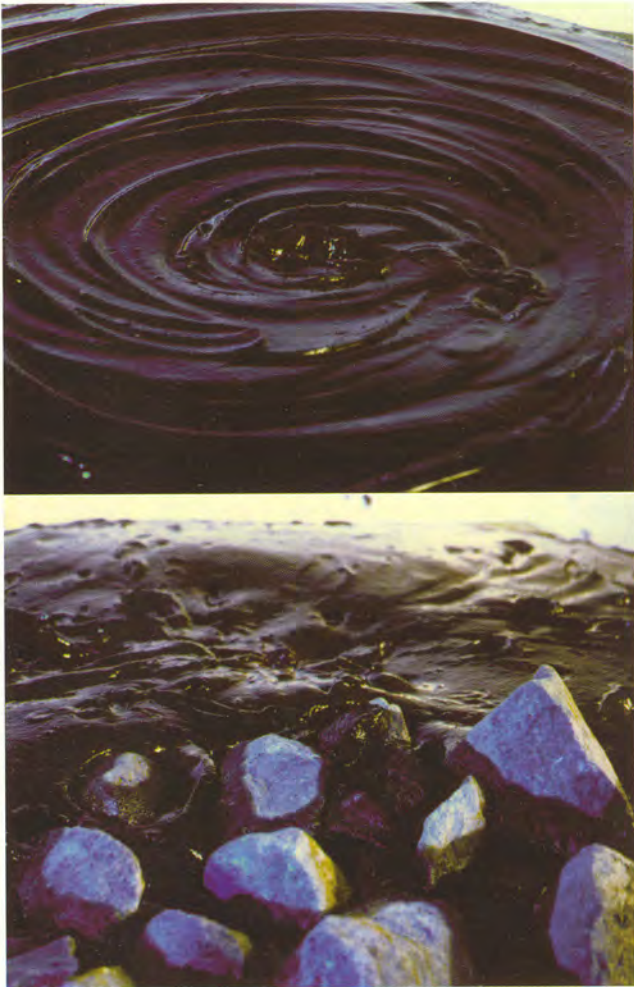


BILD 3: Bedingt durch die Fließgrenze ist die Oberfläche von Suspensionen nicht automatisch flach. Kleine Steine, können – obwohl schwerer als die Suspension – scheinbar schwimmen

FIGURE 3: Due to the yield value the surfaces of suspensions are not automatically flat. Small stones can appear to float although they are denser than the suspension

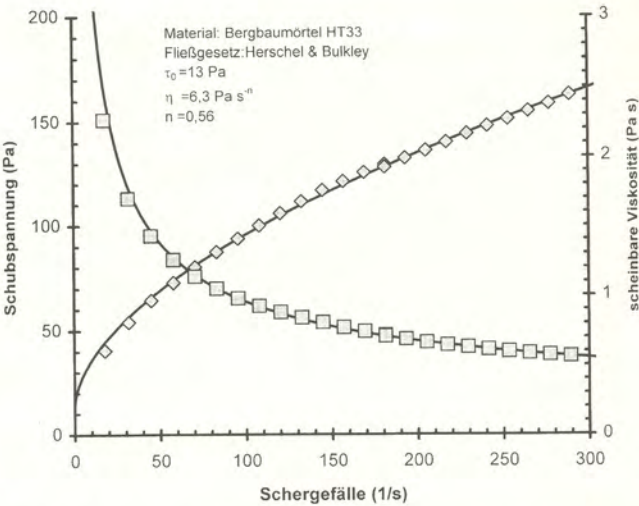


BILD 4: Fließkurve und scheinbare Viskositätskurve eines spättragenden Bergbaumörtels für die hydraulische Fernförderung. Das Material gehorcht dem Fließgesetz von Herschel und Bulkley

FIGURE 4: Flow curve and apparent viscosity curve for a late-bearing mining mortar for long-distance hydraulic transport. The material obeys the Herschel and Bulkley flow law

Schubspannung	shear stress
Schergefälle	shear gradient
scheinbare Viskosität	apparent viscosity
Material: Bergbaumörtel	material: mining mortar
Fließgesetz	flow law

creasing mechanical stressing this interlocking is broken up, resulting in an ever weaker rise in flow resistance. This phenomenon can be observed in practice during transport in a pipe. At higher volumetric flow rates these materials can be transported with lower pressure drops than initially expected. The intrinsic viscosity is normally quantified by a dimensionless structural exponent n .

3. Flow laws

Flow laws are used to provide a mathematical description of flow resistance as a function of shear. Flow resistances are normally shown by the shear stress τ which occurs as a function of the shear gradient (Equation 1). The shear gradient γ is defined as the velocity gradient perpendicular to the direction of flow and represents a measure of the intensity of the fluid stressing. As characteristic material variables the dynamic viscosity, yield value and structural exponent are parameters of the flow laws, in which the dynamic viscosity η in non-Newtonian fluids is often also described by K (consistency):

$$\tau = f(\gamma, \tau_0, \eta, n) \text{ or } \tau = f(\gamma, \tau_0, K, n). \tag{1}$$

Alternatively, flow laws can also be represented as apparent viscosity curves (Equation 2). The apparent viscosity η_s compares the flow resistances of non-Newtonian fluids with the dynamic viscosities of Newtonian fluids. However, unlike the dynamic viscosity η , the apparent viscosity η_s is dependent on the shear gradient:

$$\eta_s(\gamma) = \frac{\tau(\gamma, \tau_0, \eta, n)}{\gamma}. \tag{2}$$

The overriding flow law which applies to suspensions, and therefore to building materials, comes from Herschel and Bulkley [3] (Equation 3). It takes into account the yield strength and the intrinsic viscosity. **Fig. 4** shows examples of a flow curve and an apparent viscosity curve

und scheinbare Viskositätskurve eines Bergbaumörtels, dessen Fließeigenschaften durch Gleichung 3 beschrieben werden können:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}^n \text{ bzw. } \eta_s = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \tag{3}$$

Die bekannteren Fließgesetze von Ostwald De’Weale, Bingham und Newton sind Sonderfälle und Vereinfachungen des Fließgesetzes von Herschel und Bulkley. Das Fließgesetz von Ostwald De’Weale vernachlässigt die Fließgrenze ($\tau_0=0$). Es kann für feinkörnige und dünnflüssige Baustoffsuspensionen wie z.B. selbstnivellierende Fließestriche und Vergussmassen angewendet werden. Das Fließgesetz von Bingham vernachlässigt die Strukturviskosität ($n=1$). Diese Linearisierung wird in der Regel nur als Näherungsgleichung für einen kleineren Schergefällebereich gültig sein. Prinzipiell tendiert die Fließgrenze mit kleiner werdendem Feststoffgehalt gegen 0 und der Struktur exponent gegen 1. Dieser Sonderfall entspricht dem Fließgesetz von Newton. Reines Wasser ist die klassische Newtonsche Flüssigkeit schlechthin. Mit steigendem Feststoffgehalt wächst die Fließgrenze, ebenso beim Abbinden von Baustoffen, wenn mit der Fließgrenze auch Druckfestigkeit aufgebaut wird. Gleichfalls nimmt die Strukturviskosität zu, der Struktur exponent wird kleiner und strebt gegen 0.

4. Rotationsviskosimeter

Das Rotationsviskosimeter ist das klassische Laborinstrument zur Viskositätsmessung und zur Bestimmung der Fließeigenschaften nicht-Newtonscher Fluide. Die zu untersuchende Probe wird in einem idealerweise engen, zylindrischen Ringspalt bei verschiedenen Geschwindigkeiten geschert. Aus der aufgenommenen Drehmoment/Drehzahl-Kurve können die rheologischen Größen Schubspannung und Schergefälle berechnet und die Fließgesetzparameter durch Approximationen bestimmt werden (Tabelle 1).

Bei der Messung an Baustoff suspensionen muss allerdings eine Messzelle mit breitem Spalt verwendet werden, wobei die Spaltbreite ein Vielfaches der maximalen Korngröße betragen sollte. Bedingt durch diesen breiten Spalt gelten die einfachen Gleichungen für die Auswertung der Rohmesswerte nicht mehr. Für die Bestimmung des Schergefalles ziehen kommerzielle Viskosimeteranbieter allenfalls die Margules-Gleichung heran, welche nur für Newtonsche Fluide Gültigkeit hat.

Bei nicht-Newtonschen Fluiden muss die allgemein gültige Gleichung zur Bestimmung des Schergefalles im Ringspalt nach [4] benutzt werden. Der Differentialquotient in dieser Gleichung stellt einen nicht unerheblichen mathematischen Aufwand dar. Daher werden diese Zusammenhänge von praktisch allen Viskosimeterherstellern ignoriert. Bild 5 zeigt exemplarisch die beträchtlichen Fehler bei der Fließkurvenbestimmung nicht-Newtonscher Fluide im breiten Spalt.

of a mining mortar, the flow properties of which can be described by Equation 3:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}^n \text{ or } \eta_s = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \tag{3}$$

The more familiar flow laws of Ostwald De’Weale, Bingham and Newton are special cases and simplifications of the Herschel and Bulkley flow law. The Ostwald De’Weale flow law ignores the yield value ($\tau_0 = 0$). It can be used for thin, fine-grained, building material suspensions, such as self-levelling flow screeds and sealing compounds. The Bingham flow law ignores the intrinsic viscosity ($n = 1$). As a rule this linearization can only be applied as an approximation equation over a fairly small shear gradient range. In principle, the yield value tends towards 0 with decreasing solids content, and the structural exponent tends towards 1. This special case corresponds to the Newton flow law. To all intents and purposes water is the classical Newtonian liquid. The yield value grows with rising solids content, and the same is true during the setting of building materials when the compressive strength also increases with the yield value. At the same time the intrinsic viscosity increases and the structural exponent becomes smaller and tends towards 0.

4. Rotating viscometer

The rotating viscometer is the classical laboratory instrument for measuring viscosity and for determining the flow properties of non-Newtonian fluids. The sample to be investigated is sheared at different velocities in what is ideally a narrow, cylindrical annular gap. From the torque/speed curve obtained it is possible to calculate the rheological variables – shear stress and shear gradient – and to determine the flow law parameters by approximation (Table 1).

However, during measurements on building material suspensions it is necessary to use a test cell with a wide gap, in which the gap width should be a multiple of the maximum particle size. Because of this wide gap the simple equations for evaluating the raw measurements are no longer applicable. At best the suppliers of commercial viscometers make use of the Margules equation, which is only valid for Newtonian fluids, for determination of the shear gradient.

For non-Newtonian fluids it is necessary to use the universally valid equation for determining the shear gradient in the annular gap as given in [4]. The differential quotient in this equation represents a not considerable mathematical input. These relationships are therefore ignored by practically all producers of viscometers. Fig. 5 shows an example of the considerable errors which occur when determining the flow curves of non-Newtonian fluids in a wide gap.

TABELLE 1: Exemplarisch bestimmte Fließgesetzparameter verschiedener Frischmörtel bei vorgegebenem W/F-Wert
TABLE 1: Flow law parameters determined by way of example for different fresh mortars with given water/solids ratios

Baustoff building material	W/F water/solids	τ_0	η	n	ABM DIN 18 555
		[Pa]	[Pa s ⁿ]		[cm]
Zement/Normsand/cement/standard sand	0,125	15	103,0	0,29	16
Maschinenputz/machine-applied plaster	0,270	20	13,5	0,50	20
Ankermörtel/anchor mortar	0,210	23	16,9	0,52	19
spättragender Bergbaumörtel für die hydromechanische Verarbeitung late-bearing mining mortar for hydromechanic processing	0,360	13	6,3	0,56	19
Vergussmasse/sealing compound	0,120	0	12,7	0,75	24

5. Rohrviskosimeter

Rohrviskosimeter leiten sich aus den bekannten Kapillarviskosimetern ab. Sie unterscheiden sich von diesen im Prinzip nur durch ihre größeren Abmessungen, die nötig sind, um Suspensionen mit größeren Partikeln verarbeiten zu können. Bild 6 illustriert das zugrunde liegende Messprinzip. Das zu untersuchende Fluid wird bei verschiedenen Volumenströmen durch eine Druckverlustmessstrecke gefördert. Aus den Rohmesswerten Druckverlust und Strömungsgeschwindigkeit lassen sich Schubspannung und Schergefälle berechnen. Die Weißenberg-Rabinowitsch-Gleichung [5] für die Bestimmung des Schergefälles enthält ebenfalls wie die Krieger-Gleichung einen Differenzialkoeffizienten, wodurch bei nicht-Newtonschen Fluiden vergleichbare mathematische Probleme entstehen.

Im Vergleich zum Rotationsviskosimeter besitzt das Rohrviskosimeter einige praktische Vorteile: Durch den Einsatz moderner Sensoren (totraumfreie Rohrdruckmittler und Coriolis-Massenstromsensoren in Geradrohrausführung) besteht die Messstrecke aus einem idealen Rohr, ohne Einbauten und bewegliche Teile. Ein solches System kann einfach durch Spülen oder Molchen gereinigt werden und erhält dadurch auch bei abbindenden Baustoffen seine volle online-Fähigkeit. Somit besteht die Option, die Fließeigenschaften von Trockenbaustoffen, trotz ihrer veränderlichen Wasseransprüche, beim Anmischprozess automatisch einzuregeln. Durch die Verwendung von Coriolis-Massenstrommessern wird parallel die Trübedichte und somit der in der Baustofftechnik wichtige Wasser/Feststoff-Wert erfasst.

6. Auswertung viskosimetrischer Rohmesswerte

Die allgemeinen Bestimmungsgleichungen für Rotationsviskosimeter und Rohrviskosimeter von Krieger und Weißenberg-Rabinowitsch enthalten Differentialkoeffizienten des Drehmomentes bzw. des Druckverlustes. Diese Differenzialkoeffizienten stellen ein nicht zu unterschätzendes mathematisches Problem dar, da das numerische Differenzieren fehlerbehafteter Messwerte extrem aufrauhend wirkt. Die vergleichsweise kleinen Messfehler können sich vervielfachen, und das Ergebnis völlig unbrauchbar machen. Die Auswertung der Rohmesswerte erfordert eine Egalisierung der streuenden Messwerte. Am erfolgreichsten hat sich die folgende Vorgehensweise erwiesen:

- 1. Aus jedem Fließgesetz kann durch Integration eine formale Drehmomentgleichung für die rotationssymmetrische Ringraumströmung oder eine Druckverlustgleichung für die Kreisrohrströmung abgeleitet werden.
- 2. Durch lineare oder erforderlichenfalls nichtlineare Fehlerquadratsummenminimierung können gemessene Drehmoment- bzw. Druckverlustkurven durch die entsprechenden Drehmoment- bzw. Druckverlustgleichungen approximiert werden.
- 3. Das Ergebnis der Fehlerquadratsummenminimierung sind die Fließgesetzparameter τ_0 , η , n und ein Korrelationskoeffizient bzw. das Bestimmtheitsmaß der Approximation. Hiermit kann quantitativ bewertet werden, wie gut jedes Fließgesetz geeignet ist, das Fließverhalten einer gegebenen Probe zu beschreiben.

Tabelle 2 zeigt alle Drehmoment- und Druckverlustgleichungen für die in diesem Beitrag genannten Fließgesetze. Insbesondere die Druckverlustgleichungen sind nicht nur für die Viskosimetrie bedeutend, sondern auch für die Auslegung von Pumpen und Rohrleitungen, mit denen nicht-Newtonsche Fluide wie z.B. Baustoff Suspensionen gefördert werden müssen.

7. Schlussfolgerungen

Baustoffe verfügen über besondere nicht-Newtonsche Fließeigenschaften, die durch Strukturviskosität und eine

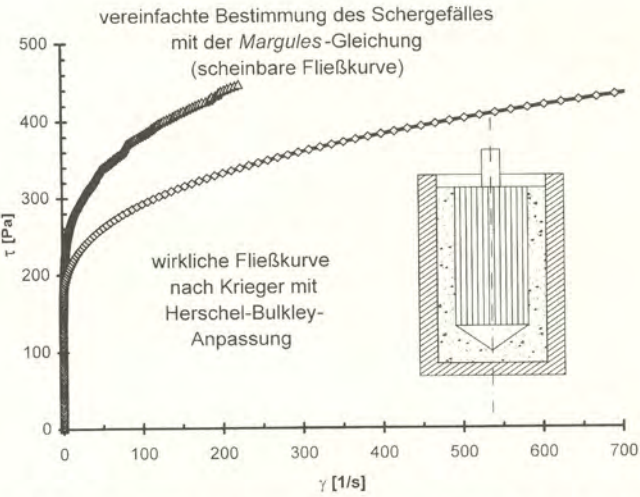


BILD 5: Fließkurvenbestimmung im Rotationsviskosimeter mit breitem Spalt mit und ohne Berücksichtigung der Krieger-Gleichung

FIGURE 5: Flow curve determination in a rotating viscometer with wide gap, with and without taking the Krieger Equation into account

vereinfachte Bestimmung des Schergefälles mit der Margules-Gleichung (scheinbare Fließkurve)
wirkliche Fließkurve nach Krieger mit Herschel-Bulkley-Anpassung

simplified determination of the shear gradient with the Margules Equation (apparent flow curve)
actual Krieger flow curve with Herschel-Bulkley adjustment

5. Pipe viscometers

Pipe viscometers are derived from the familiar capillary viscometers. In principle, they differ from them only in their larger dimensions, which are necessary in order to be able to process suspensions with coarser particles. Fig. 6 illustrates the underlying principle of the measurement. The fluid to be investigated is passed through a pressure drop test section at different volumetric flows. From the raw measurements – pressure drop and flow velocity – it is possible to calculate the shear stress and shear gradient. Like the Krieger Equation, the Weißenberg-Rabinowitsch Equation for determining the shear gradient also contains a differential coefficient, resulting in comparable mathematical problems for non-Newtonian fluids.

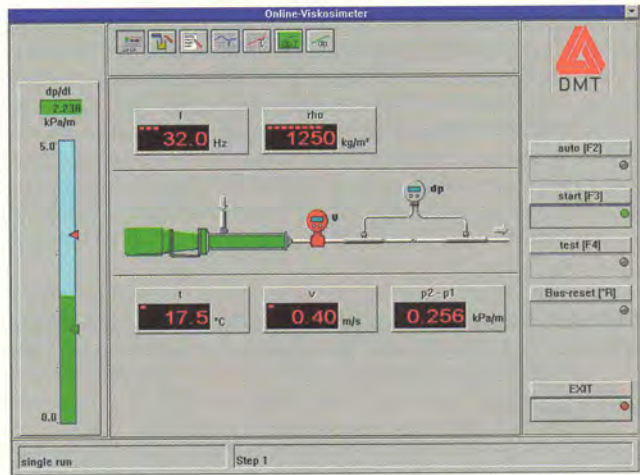


BILD 6: Funktionsprinzip Rohrviskosimeter. Die Suspension wird bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten durch eine Druckverlustmessstrecke gefördert. Aus der gemessenen Druckverlustkurve kann die Fließkurve oder das Fließgesetz bestimmt werden

FIGURE 6: Functioning principle of the pipe viscometer. The suspension is passed through a pressure drop test section at different flow velocities. The flow curve or the flow law can be determined from the measured pressure drop curve

TABELLE 2: Die wichtigsten Gleichungen für die Auswertung von Rotations- und Rohrviskosimeterversuchen
TABLE 2: The most important equations for evaluating rotating viscometer and pipe viscometer tests

	Rotationsviskosimeter/rotating viscometer	Rohrviskosimeter/pipe viscometer
Schubspannung τ shear stress τ	$\tau = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot r^2}$	$\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} \cdot R$
Schergefälle $\dot{\gamma}$ shear gradient $\dot{\gamma}$	enger Spalt (Breite s)/narrow gap(width s): $\dot{\gamma} \approx \frac{\omega \cdot r}{s}$ breiter Spalt/wide gap: $\dot{\gamma}(r) = -r \cdot \left(\frac{\partial \omega}{\partial r}\right) = 2 \cdot \tau \cdot \left(\frac{\partial \omega}{\partial \tau}\right) + \gamma \left(\tau \cdot \frac{r^2}{r_a^2}\right) = 2 \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \left(\frac{r^2}{r_a^2}\right)^j \cdot \tau \cdot \left(\frac{\partial \omega}{\partial \tau_j}\right) \cdot \tau_j = \tau \cdot \left(\frac{r^2}{r_a^2}\right)^j$ (Krieger-Gleichung/Krieger Equation [4])	$\dot{\gamma} = -\frac{dw}{dR} = 3 \frac{w}{R} + r \cdot \frac{d}{d\tau} \left(\frac{w}{R}\right)$ (Weissenberg Rabinowitsch-Gln./Weissenberg Rabinowitsch Equation [5])
Fließgesetze flow laws	Strömungsgleichungen rotationssymmetrische Ringraumströmung flow equations for rotationally symmetrical annular flow	Strömungsgleichungen Kreisrohrströmung flow equations for circular pipe flow
Herschel-Bulkley $\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}^n$ bzw. $\eta_s = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	$\omega(r) = -\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1}{i}\right) \cdot \left(-\frac{\tau_0}{\eta}\right)^i \cdot \frac{\left(\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \eta} \cdot \frac{1}{r_a^2}\right)^{\frac{1}{n}-i} - \left(\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \eta} \cdot \frac{1}{r^2}\right)^{\frac{1}{n}-i}}{\left(\frac{1}{n}-i\right)}$ Im Sonderfall/in the special case $1/n=1, 2, 3, 4, \dots$: $\omega(r) = -\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{1}{i}\right) \cdot \left(-\frac{\tau_0}{\eta}\right)^i \cdot \frac{\left(\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \eta} \cdot \frac{1}{r_a^2}\right)^{\frac{1}{n}-i} - \left(\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \eta} \cdot \frac{1}{r^2}\right)^{\frac{1}{n}-i}}{\left(\frac{1}{n}-i\right)} + \left(-\frac{\tau_0}{\eta}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r}\right)$ maximaler Außenradius/maximum external radius: $r_{a,max} = \sqrt{\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \tau_0}}$ (siehe/sec [6])	$w_m = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{n}+1} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left[R^2 \cdot (R-R_0)^{\frac{1}{n}+1} - 2 \cdot \frac{(R-R_0)^{\frac{1}{n}+3}}{\frac{1}{n}+3} - 2 \cdot r_0 \cdot \frac{(R-R_0)^{\frac{1}{n}+2}}{\frac{1}{n}+2} \right]$ mit $R_0 = \frac{2 \cdot \tau_0}{\frac{\Delta p}{\Delta l}}$ (ohne Namen/without name [7])
Ostwald ($\tau_0=0$) $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n$ bzw. $\eta_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	$\omega(r) = n \cdot \left(\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \eta \cdot r^2}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{r_a}\right)^{\frac{2}{n}}\right)$ (ohne Namen/without name [8])	$w_m = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n}{3n+1} \cdot R^{\frac{1}{n}+1}$ (ohne Namen/without name [8])
Bingham ($n=1$) $\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$ bzw. $\eta_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta$	$\omega(r) = \frac{M}{4 \cdot \pi \cdot l \cdot \eta} \cdot \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_a^2}\right) - \frac{\tau_0}{\eta} \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r}\right)$ (Reiner-Riwlin-Gleichung/Reiner-Riwlin-Equation [8])	$w_m = \frac{R^2}{8 \eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^4\right)$ mit $\tau_w = \frac{R}{2} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l}$ (Buckingham-Gleichung/Buckingham Equation[8])
Newton ($\tau_0=0, n=1$) $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \text{ bzw. } \eta_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta$	$\omega(r) = \frac{M}{4 \cdot \pi \cdot l \cdot \eta} \cdot \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_a^2}\right)$ (Margules-Gleichung/Margules Equation [8])	$w_m = \frac{R^2}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l}$ (Hagen-Poiseuille-Gleichung/Hagen-Poiseuille-Equation [8])

Fließgrenze gekennzeichnet sind. Letztere ist besonders relevant für die Beurteilung verschiedener praktischer Aufgaben bei der Baustoffverarbeitung. Zur Beschreibung der Fließeigenschaften von Baustoffen ist das Fließgesetz von Herschel-Bulkley besonders geeignet. Die bekanntesten Fließgesetze von Ostwald De'Weale, Bingham und Newton sind nur Sonderformen des Fließgesetzes von Herschel und Bulkley. Für die Messung der Fließeigenschaften können Rotationsviskosimeter mit breitem Spalt oder Rohrviskosimeter eingesetzt werden. Rohrviskosimeter weisen verschiedene Vorteile auf und sind insbesondere online-fähig. In jedem Fall ist für die Auswertung der Rohmesswerte sowohl bei Rohr- als auch bei Rotationsviskosimetern ein nicht unbedeutender mathematischer Aufwand erforderlich, der bei kommerziell angebotenen Messsystemen durchweg vernachlässigt wird. Die hierdurch verursachten Fehler sind beträchtlich.

Literaturverzeichnis/Literature

[1] Molerus, O.: Schüttgutmechanik. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York Tokyo, 1985.

[2] Dedegil, Y.: International Symposium on Slurry-Flows, Vol.: 38, pp. 9–15, American Society of Mechanical Engineers, Fluid Engineering Division.

[3] Herschel, W. H.; Bulkley, R.: Kolloid – Z. 39 (1926) p. 291.

[4] Krieger, I. M.: Shear Rate in the Couette Viscosimeter, Transactions of the Society of Rheology, No. 12 (1968) pp. 5–11.

[5] Ebert, F.: Strömung nicht-newtonscher Fluide, Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig 1980.

The pipe viscometer has some practical advantages over the rotating viscometer: by using modern sensors (lag-free pipe pressure sensors and Coriolis straight-tube mass flow sensors) the test section consists of an ideal pipe, without internal fittings or moving parts. Such a system is easy to clean by flushing or pigging, so it can retain its full on-line capability, even with building materials which set. This makes it possible to control the flow properties of dry building materials automatically during the mixing process in spite of the varying water demand. The slurry density, and hence the water/solids ratio which is so important in building materials technology, are measured at the same time using Coriolis mass flow meters.

6. Evaluation of raw viscometric measurements

The general conditional equations of Krieger and Weissenberg-Rabinowitsch for rotating viscometers and pipe viscometers contain differential coefficients of the torque and pressure drop respectively. These differential coefficients represent a mathematical problem which should not be underestimated, as the numerical differentiation of measurements with their attendant errors has an extremely coarsening effect. The comparatively small test errors can be multiplied and make the result completely unusable. Evaluation of the raw measurements requires smoothing of the scattered test values. The following procedure has proved the most successful:

1. From each flow law it is possible, by integration, to derive a formal torque equation for the rotationally symmetrical flow in the annulus or a pressure drop equation for the circular pipe flow.

[6] Hollinderbäumer, E. W.; Mez, W.: Messung der Fließeigenschaften von Suspensionen im Rotationsviskosimeter, Chem.-Ing.-Tech. 66 (1994) No. 11, pp. 1515–1518.

[7] Hörning, G.; Richter, H.: Technische Hydromechanik Bd. 2, pp. 351–436, VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin.

[8] Wasp, E. J.; Keney, J. W.; Gandhi, R. L.: Series on Bulk Materials Handling, Vol. 1 (1975/77) No. 4, pp. 56–59, Trans Tech Publications.

Symbolverzeichnis/Explanation of symbols

Symbol Symbols	Maßeinheit Units	Bezeichnung Designation
b _{min.}	m	min. Spaltbreite Verschalung min. gap width, shuttering
b _{max.}	m	max. Putzdicke max. plaster thickness
d _{max.}	m	max. sedimentationsstabile Korngröße max. particle size for sedimentation stability
D	m	Rohrdurchmesser pipe diameter
g	m/s ²	Erdbeschleunigung gravitational acceleration
K	Pa s ⁿ	Konsistenz (dynamische Viskosität) bei nicht-Newtonschen Fluiden consistency (dynamic viscosity) for non-Newtonian fluids
l	m	Rohrleitungslänge und Zylinderlänge (Rotationsviskosimeter) pipeline length and cylinder length (rotating viscometer)
M	Nm	Drehmoment (Rotationsviskosimeter) torque (rotating viscometer)
n	–	Strukturexponent structural exponent
p	Pa	Druck pressure
r	m	Zylinderradius (Rotationsviskosimeter) cylinder radius (rotating viscometer)
r _a	m	Zylinderradius (Rotationsviskosimeter) außen cylinder radius (rotating viscometer) external
r _i	m	Zylinderradius (Rotationsviskosimeter) innen cylinder radius (rotating viscometers), internal
R	m	Rohrleitungsradius pipeline radius
w	m/s	Strömungsgeschwindigkeit flow velocity
γ	1/s	Schergefälle shear gradient
η	Pa s ⁿ	dynamische Viskosität/Konsistenz dynamic viscosity/consistency
η _s	Pa s	scheinbare Viskosität apparent viscosity
ρ	kg/m ³	Dichte density
σ _D	Pa	Druckfestigkeit compressive strength
τ	Pa	Schubspannung shear stress
τ ₀	Pa	Fließgrenze yield value
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit (Rotations- viskosimeter) angular velocity (rotating viscometer)

2. By linear, or if necessary non-linear, minimization of the error sum of squares it is possible to approximate measured torque and pressure drop curves by the corresponding torque and pressure drop equations.
3. Minimizing the error sum squares gives the flow law parameters τ₀, η, n and a correlation coefficient or coefficient of determination of the approximation. With this it is possible to evaluate quantitatively how well each flow law is suitable for describing the flow behaviour of a given sample.

Table 2 shows all the torque and pressure drop equations for the flow laws mentioned in this article. The pressure drop equations in particular are important not only for viscometry but also for the design of pumps and pipelines in which non-Newtonian fluids, such as building material suspensions, have to be transported.

7. Conclusion

Building materials have special non-Newtonian flow properties which are characterized by inherent viscosity and yield value. The latter is particularly relevant for assessing various practical tasks in the processing of building materials. The Herschel-Bulkley flow law is particularly suitable for describing the flow properties of building materials. The more familiar flow laws of Ostwald De'Weale, Bingham and Newton are only special forms of the Herschel and Bulkley flow law. Rotating viscometers with wide gaps or pipe viscometers can be used for measuring the flow properties. Pipe viscometers exhibit various advantages and, in particular, can be used online. Pipe viscometers and rotating viscometers both require a not insignificant mathematical input for evaluating the raw measurements, which is completely ignored in commercially available measuring systems. The errors which this causes are considerable.

Rheologie und Schwinden von Baustoffen

viskomat NT

Von Grund auf überarbeitet bietet dieses bewährte Baustoffrheometer nun völlig neue Einsatzmöglichkeiten im Baustofflabor.

Ein hochdynamisches neuartiges Antriebskonzept ermöglicht lineare Gereschwindigkeitsverläufe von 0,001 bis 240 U/min und einen Drehmomentbereich von 0 bis 250 Nmm.

Neben den bekannten Zellen können auch kundenspezifische Messgeometrien adaptiert werden.

Schwind-/Dehnrinne

Diese Messeinrichtung ermöglicht die Bestimmung von Schwind- oder Dehnvorgängen in Baustoffen. Die Längenänderung wird über hochpräzise Messtaster erfasst. Die Konstruktion ist so ausgeführt, dass möglichst schon während des Abbindens die Längenänderung ermittelt wird.

Die Software erlaubt die gleichzeitige Langzeiterfassung von bis zu acht Schwindrinnen in einem PC.

Es sind Rinnen für Estriche und Putze und für Beton verfügbar.

Schleibinger Geräte

Teubert u. Greim GmbH

Gewerbstraße 4, D-84428 Buchbach
Telefon (0 80 86) 9 40 10, Telefax (0 80 86) 9 40 14
e-mail schlei@schleibinger.com, www.schleibinger.com

120

(Volume 53) No. 2/2000 – ZKG INTERNATIONAL