

R. Vogel

Eine Messzelle für Spezialmörtel ¹⁾

Einleitung

Unter Spezialmörtel werden nachfolgend Mörtel hoher Fließfähigkeit verstanden; also vor allem Mörtel mit sehr kleiner Fließgrenze und geringer Viskosität. Zu den selbstverständlichen Eigenschaften dieser gehört eine Fluidstabilität, die Sedimentation und Entmischung ausschließt.

Für die Klassierung des Mörtelkorns soll fürs Erste eine maximale Korngröße (im Sinne einer Siebmaschenweite) von 2 mm gelten.

Aus der Sicht des Untersuchungsgegenstandes ist die Geometrie der Messzelle, und zwar sowohl in Gestalt als auch Abmessungen, das entscheidende Merkmal für Qualität und Quantität des Untersuchungsergebnisses. Da letztlich auch die Technik des gesamten Messsystems von Bedeutung ist, wurde diese in Form von Randbedingungen bei der Entwicklung der Messzelle mit einbezogen.

Zum Prinzip

Geht man davon aus, dass zur Realisierung eines geeigneten Scherfeldes Rotationskörper genutzt werden können – wie z.B. in DIN 53 018 bzw. 019 festgehalten –, so ist einschränkend zu beachten, dass sich an den Grenzflächen unter Umständen bei Druck- und/oder Scherbelastung des Mörtels wässriges Fluid absondert. Diese aus verarbeitungstechnischer Sicht oft nützliche Eigenschaft von Mörteln führt in den genannten Zellen zum bekannten Wandgleiten und damit einer Verfälschung der Messergebnisse. Wie schon oft vorgeschlagen, kann man diesen Effekt durch eine besondere Formgebung der Oberflächen der Messzellen – z.B. Rippung – einschränken. Eine andere Lösung wäre möglicherweise gängig, wenn der Adhäsionsverbund Fluid-Wand durch einen Kohäsionsverbund ersetzt werden könnte. Verfolgt man diesen Gedanken, dann müssten wenigstens die kritischen Zellenwände durch ‚Fluidwände‘ ersetzt werden.

Nach vielfältigen Orientierungsversuchen zur Realisierung solcher Zellenwände, also einer ‚Fluid-in-Fluid-Scherung‘ mit Hilfe äußerer Kraftfelder und dem damit verbundenen verhältnismäßig hohen Aufwand, wurde an Hand der gesammelten Erfahrungen nach einer einfach zu realisierenden Kompromisslösung gesucht. Einer Fluid-in-Fluid-Scherung kommt man sehr nahe, wenn die gewünschte Fluid-Wand mit Hilfe eines filigranen Gerüsts aufgebaut wird. Wählt man ein zylinderförmiges Ge-

¹⁾ Vortrag zum 16. Regensburger Baustoffkolloquium, 14. März 2007. (Gekürzte Fassung)

rüst – und damit zwangsläufig verbunden eine innere und äußere Fluid-Wandschale – so liegt es nahe, im weiteren nach einer Lösung in Anlehnung an eine Doppel-Ringspalt-Messzelle zu suchen.

Aufbau der Messzelle

Die Doppel-Ringspalt-Geometrie empfiehlt sich nicht nur aus den vorangegangenen Überlegungen. Auch wegen der absehbar kleinen Grenzfließspannungen, die aus dem Stabilitätskriterium /1/ für die genannten Spezialmörtel resultieren, kommt der Doppelspalt in Betracht.

Koaxiale Doppelspalt-Messzellen sind nicht neu. In DIN 54 453 wird z.B. eine solche zur Bestimmung der dynamischen Viskosität von anaeroben Klebstoffen empfohlen. Wird der prinzipielle Aufbau dieser beibehalten, aber der den Doppelspalt bildende Innenzylinder durch das besprochene Gerüst ersetzt, so erhält man eine Messzelle wie sie in Abb.1 skizziert ist. Das korbähnliche Gerüst wird

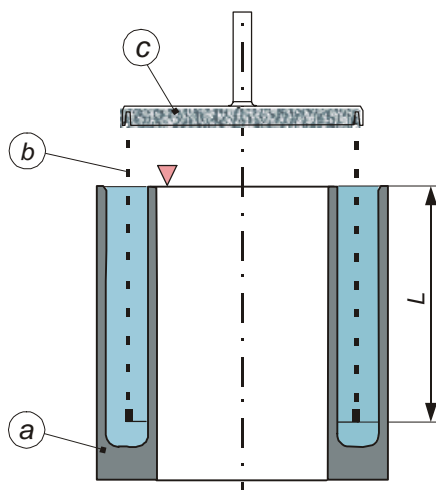


Abb.1 *Prinzipskizze einer Doppelspalt Messzelle mit einem korbähnlichen Innenzylinder*

- a. Ringspalt-Gefäß
- b. Gerüstkörper
- c. Gerüstfassung

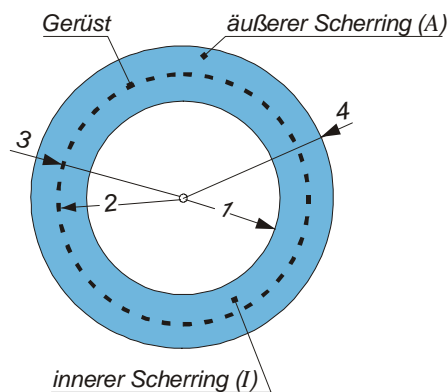


Abb.2 *Vergrößerter Querschnitt durch die Ringräume der Messzelle*

$$\delta_A = R_4/R_3 \quad \delta_I = R_2/R_1$$

danach oben in einer Tellernut gefasst und unten durch einem Ringeinsatz versteift. Die effektive Scherhöhe L liegt mit der Eintauchtiefe des Korbes in das ‚Fluidbad‘ des Ringspaltkörpers fest. Mit

diesem prinzipiellen Zellenaufbau wurden umfangreiche Tests, vor allem bezüglich der detaillierten Gerüstgestaltung, durchgeführt. Um von vornherein gegenüber Trägheitskräften ausreichende Stabilität der Grundströmung im Spalt abzusichern, wurde dafür der Messgeräteantrieb analog dem *Hatschek*-Apparat gewählt, damit die Spaltströmung einer *COUETTE*-Strömung sehr nahe kommt. Auf dieser Basis – also rotierendem Zellengefäß und feststehendem Gerüstkorb – erwiesen sich vor allem rhombusförmige Netzstrukturen geeignet. Abb.3 zeigt hierzu eine positiv bewertete Variante. Diese lässt auch Korneinlagerungen zu und realisiert den Verbund von innerer und äußerer Fluidschale des beidseits angelagerten Mörtel.



Abb.3 Beispiel für den Gerüst-Aufbau des Innenzylinders der Messzelle

Für die Optimierung der Wandabstände der Zellenelemente wurde eine Zelle mit dem Durchmesser $2R_4 \approx 200$ mm gewählt und über die bekannte Aussage

$$\text{Wandabstand} \geq 5 \cdot d_{p,max}$$

die anderen Abmessungen der Messzelle festgelegt. Die Versuche mit verschiedenen Wandabständen im Bereich $8 \leq \Delta \leq 2 \cdot d_{p,max}$ zeigten, nur bei den geringsten Abständen, durch mehr oder weniger ausgeprägtes Verkeilen des verwendeten natürlichen Korns, extreme Messwertschwankungen bis hin zum totalen Abbremsen der Zelle.

Der schließlich für die Festlegung der Hauptabmessungen der Messzelle verwendete Wandabstand $\Delta \approx 3 \cdot d_{p,max}$ ist nur im Zusammenhang mit einer speziellen Gerüstaufführung brauchbar.

Beschreibung der Grundströmung

Das Fließfeld ist mit den Hauptabmessungen der Zelle festgelegt. Entsprechend Abb.2 sind dies die Ränder mit den Gefäßradien und den effektiven Gerüstmaßen einschließlich -struktur.

Für den inneren (I) Spalt gilt: $\delta_I = R_2/R_1$ und für den äußeren (A) $\delta_A = R_4/R_3$
 $\Delta_I = R_2 - R_1$ $\Delta_A = R_4 - R_3$

Die relativen Gerüstabmessungen sind: $R_2/R_3 \rightarrow 1$ sowie L/R_3
 gebunden an die Gerüststruktur.

Folgt man den bekannten Aussagen (z.B. DIN 53 019) für die Schichtenströmung im Spalt

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{R^2}{r^2} \cdot \frac{2\delta^2}{\delta^2 - 1} \cdot \Omega \quad \text{sowie} \quad \tau(r) = \frac{T}{2\pi \cdot L} \cdot \frac{1}{r^2}$$

und geht im weiteren davon aus, dass die effektiven Größen dafür über die Methode der repräsentativen Viskosität mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können, so erhält man für die Messzelle speziell bei $\delta_I = \delta_A = \delta$

$$\dot{\gamma}_{rep} = \Omega \cdot \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \quad \text{sowie} \quad \tau_{rep} = \frac{T}{L \cdot \pi D_3^2} \cdot \frac{(1 + \delta^2)}{\left(\delta^2 + \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^2 \right)}$$

und unter Beachtung von Stirnflächen- bzw. Randeinflüssen

$$\tau_{rep,korr} = \frac{T}{L \cdot \pi D_3^2} \cdot \frac{(1 + \delta^2)}{\left(\delta^2 + \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^2 \right)} \cdot \frac{1}{c_L} .$$

Werden weiterhin evtl. vorhandene Geräteeffekte *GK* berücksichtigt und die relative Spaltgeometrie – insbesondere die des Gerüsts – durch

$$\psi = \frac{(1 + \delta^2)}{\left(\delta^2 + \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^2 \right)} \quad \text{ausgedrückt, so gilt}$$

$$\tau_{rep,korr} = \frac{T}{L \cdot \pi D_3^2} \cdot \psi \cdot \frac{GK}{c_L} = \frac{T}{L \cdot \pi D_3^2} \cdot \frac{1}{c_K} .$$

Die Bestimmungsgleichungen für die repräsentativen Größen $\dot{\gamma}_{rep} | \tau_{rep,korr}$ gelten für alle Fluide – auch für nicht-newtonsche –, sofern die Bedingung: *enge Spalte*; also $\delta \rightarrow 1$ erfüllt wird. Da dies für Mörtel mit gefordertem Δ nur möglich ist bei sehr, sehr großen absoluten Spaltabmessungen R , sind im anderen Fall Messwerte bei kleinen Ω kritisch zu beleuchten. Bei Fluiden mit Fließgrenze muss z.B. im Bereich $\tau(r)|_{R_1}^{R_4}$ die Fließspannung über der Fließgrenze liegen. Wird dieses Kriterium verletzt, so hat das Einfluss auf den Messwert. Ab $\tau_0 > \tau_4$ wird das Scherfeld eingeschränkt und wegen

$$Bm_{krit} = \frac{\tau_0}{\eta_{pl}} \cdot \frac{2}{\Omega_{krit}} = \frac{4}{\delta_A^2 - 1 - \ln \delta_A^2} \quad \text{siehe hierzu /2/, gilt für die Grenze}$$

$$\dot{\gamma}_{rep} \geq \dot{\gamma}_{krit} = \Omega_{krit} \cdot \frac{1 + \delta_A^2}{\delta_A^2 - 1} = \frac{\tau_0}{\eta_{pl}} \cdot \left(1 - \frac{\ln \delta_A^2}{\delta_A^2 - 1} \right) \cdot \frac{1 + \delta_A^2}{2} .$$

Alle Messwerte bei $\dot{\gamma}_{rep} < \dot{\gamma}_{krit}$ müssen demnach gesondert betrachtet werden.

Vorbereitung für den Ersteinsatz

Um die positiven Eigenschaften einer *COUETTE*-Anordnung gegenüber eines *SEARLE*-Betriebs der Messzelle nutzen zu können, wurde als Basisgerät für die vorgesehenen Materialuntersuchungen der *VISKOMAT NT* der Firma Schleibinger²⁾ ausgewählt. Außerdem spricht für dieses Gerät das außergewöhnlich große Probenvolumen bei notwendigerweise großem Drehmoment bis 300 mNm (unter Sonderbedingungen bis maximal 1000 mNm).

In Anlehnung an die Hauptabmessungen des Standardmesstopfes ($D_i = 83,0$ mm) des *VISKOMAT* wurde auch der Innendurchmesser D_4 des Ringspaltgefäßes festgelegt. Für Mörtel mit einem Korn (Siebmaschenweite) von 2 mm und zulässigem Überkorn bis maximal 2,5 mm wurde, den Voruntersuchungen folgend, $2\Delta \approx R_4 - R_1 \approx 13$ mm übernommen. Die weitere konstruktive Gestaltung erfolgte schließlich von einem mehr oder weniger pragmatischen Standpunkt aus. Hierzu gehört die Anordnung und Gestaltung der Überlauf-Tasse genauso wie die Minimierung der Gesamtmasse des Ringspaltgefäßes. Auch die Eintauchtiefe des Sensors zählt hierzu, die fürs erste nach $T[mNm] \approx \tau[Pa]$ gewählt wurde, um einen schnellen Überblick bei den Messungen zu ermöglichen.

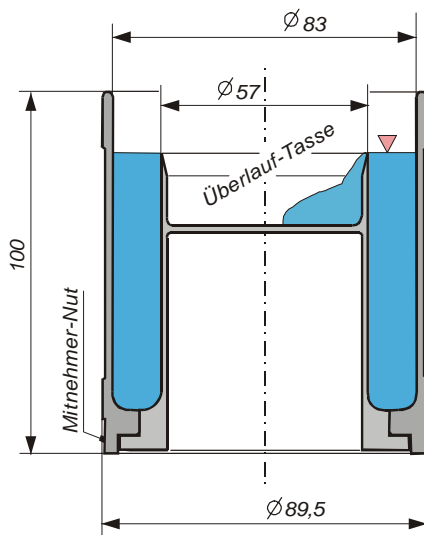


Abb.4 Schnitt durch das Ringspalt-Gefäß 7 der Messzelle (mit Fluid-Füllung) für den *VISKOMAT NT*.

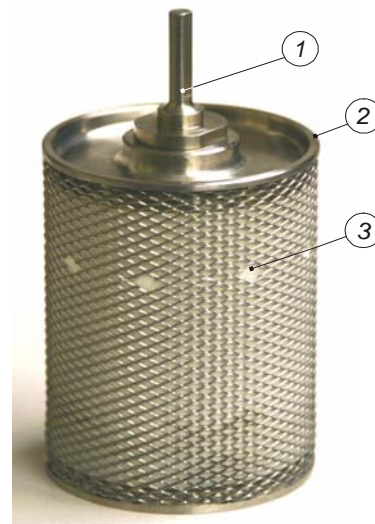


Abb.5 *Sensor 71.02*, Foto - Ansicht
(1) Kupplungs-Adapter
(2) Geflechtfassung
(3) Durchbrüche für Fluidnivellierung.

²⁾ Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH, Gewerbestraße 4, 84 428 BUCHBACH

In Abb.4 ist das Ergebnis aller Bemühungen festgehalten. Die äußere Überhöhung des Ringspaltgefäßes als auch die Tassentiefe sind so gehalten, dass eine Füllung des Gefäßes aus einem gängigen Mischtrog erfolgen kann.

Das Eintauchen des Sensors in das Ringspaltgefäß erfolgt mit leichter Rotation (Hinein,schrauben' in das Fluid). Diese hängt von der Geflechtstruktur ab, ist an die Eintauchgeschwindigkeit angepasst und verhindert damit das Einschleppen von Luftblasen. Die Endstellung des Sensors gewährleistet einen optimalen Bodenabstand, der mit Δ konform läuft. Für sicheren Niveau-Ausgleich in der Messzelle sorgen, gleichmäßig über den Umfang verteilt, Geflechtdurchbrüche im Sensor – siehe Abb.5 . Das durch den Sensor verdrängte Fluid wird in der Überlauf tasse gesammelt.

Dem Einsatz der Messzelle muss eine **Kalibrierung** vorausgehen. Es ist immer ratsam, diese zusammen mit dem zur Verfügung stehenden Messgerät durchzuführen.

Eckpunkte für die Kalibrierung der beschriebenen Messzelle sind

- deren Hauptabmessungen $D_3 = 71,2 \text{ mm}$; $L = 64,8 \text{ mm}$ sowie
- die Definitionsgleichung
$$\tau = \frac{T}{L \cdot \pi D_3^2} \cdot \frac{1}{c_K} .$$

In der Größe c_K sind Randeinflüsse, die Spaltgeometrie und gerätespezifische Eigenheiten enthalten. Die Aufspaltung in die Einzelheiten – wie oben geschehen – ist nur dann von Bedeutung, wenn verschiedene Zellen und Geräte verglichen werden sollen.

Die Kalibrierung wurde mit dem VISKOMAT NT Gerät # 2006 060 sowie dem Silikon-Öl S 3000 durchgeführt. Dieses Öl besitzt bei $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ die dynamische Zähigkeit von $\eta_{20} = 2940 \text{ mPa s}$. Da mit der Messzelle vor allem Aussagen zur Stabilität und Tragfähigkeit von Selbstverdichtendem Mörtel (SVM) getroffen werden sollen, wurde für die Kalibrierung die Drehzahl des Messtopfes (Ringspaltgefäß) nach einigen Tests $N = 30 \text{ U/min}$ ausgesucht und damit der untere Moment-Messbereich des VISKOMAT bevorzugt. Es wurden insgesamt 21 Einzelmessungen, in 7-ner Gruppen, durchgeführt. Gemessen wurde das Moment $T(t)$, kontrolliert wurde die Konstanz der Drehzahl. Jede Messung dauerte 120 s, vorher und danach wurde die Öltemperatur bestimmt. Der Einfluss der Temperatur auf die Ölzähigkeit kann über die Beziehung

$$\eta(\vartheta) = 9190 \cdot \vartheta^{-0,380} \text{ [mPa s]} \quad \text{erfasst werden (} \vartheta \text{ in } [^\circ\text{C}] \text{) .}$$

Mit dem gemessenen, über 100 Werte gemittelten Moment T und der bekannten Ölviskosität η_ϑ wurde c_K ermittelt; denn es gilt:

$$c_K = \frac{1}{L \cdot \pi D_3^2} \cdot \frac{T}{\tau} = \frac{1}{L \cdot \pi D_3^2} \cdot \frac{T}{\eta_\vartheta \cdot \dot{\gamma}} . \quad \text{Fügt man hier } \dot{\gamma} = \Omega \cdot \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \text{ bzw. bei}$$

gering unterschiedlichem δ , $\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{2} \cdot \left[\frac{1 + \delta_I^2}{\delta_I^2 - 1} + \frac{1 + \delta_A^2}{\delta_A^2 - 1} \right]$ ein, und ersetzt die Winkel-

geschwindigkeit Ω durch $\Omega = \pi N/30$, so findet man für c_K die Zahlenwertgleichung

$$c_K = \frac{1}{1,0320 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{T}{\eta_g \cdot 18,613} = 52,059 \cdot \frac{[mPa \cdot s]}{[mNm]} \cdot \frac{T}{\eta_g},$$

die deutlich macht, dass es bei der Kalibrierung darauf ankommt, bei gegebener Ölviskosität – und damit konstanter (bzw. bekannter und präziser) Öltemperatur – das Drehmoment genau zu ermitteln. Gibt es über den Zeitraum der Messung (hier 15 min) Temperaturschwankungen, so ist dies zu beachten. Ist, wie im vorliegenden Fall, $\eta(\vartheta)$ bekannt, so kann auch

$$c_K = 5,665 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{[mNm \cdot (^\circ C)^{0,380}]} \cdot T \cdot \vartheta^{0,380} \quad \text{benutzt werden.}$$

Die Details von Messung und Auswertung sind in Tafel 1 wiedergegeben. Zusammen mit den anderen, insgesamt 21 Messwerten, lautet das Kalibrierergebnis $c_K = 0,9970$ mit $\pm 0,1\%$ rel. Fehler.

Tafel 1 *Ergebnis-Protokoll der Kalibrierung*

Viskomat NT # 2006 060	Messzelle KZ 7.71				
Kalib_S3_1.xls	Silikon-Oel S 3000				
mit durchweg N = 30 U/min	Oel-Temperatur : 18,7 ... 18,9 °C				
Geräte-Einstellung:	Mittelwerte (An- und Abfahren gestrichen)				
Abtastrate:	für jeweils 100 Messwerte bei 1 s Zeitraster				
Mittlung:	ϑ	η	T	c_K	rel.Fehler
Filterfrequenz:	#	[°C]	[mPa s]	[mNm]	[-]
max. Moment:	1.	18,7	3020	57,85	0,997
Topf-Startdrehzahl:	2.	18,7	3020	57,83	0,997
Verstärkung:	3.	18,8	3014	57,78	0,998
Temperaturmessung:	4.	18,8	3014	57,73	0,997
	5.	18,8	3014	57,68	0,996
	6.	18,9	3008	57,61	0,997
	7.	18,9	3008	57,56	0,996
	Mittelwert				0,9969

Anmerkung: Der Zahlenwert $0,9969 \approx 1$ darf als Qualitätsaussage nicht allein für die Messzelle gewertet werden. Sollte die Gerätekonstante $GK = 1$ sein, dann folgt aus $\psi = 1,044$ der Wert für Randeinflüsse zu $c_L \hat{=} c_K \cdot \psi = 1,041$.

Damit ist die Basis für die Arbeit mit der Korbzelle gegeben. Das abschließende **Prüf-Zertifikat** enthält die wichtigsten Angaben – siehe Tafel 2.

Tafel 2 Auszug aus dem Prüf-Zertifikat

Produkt	Doppelringspalt-Korb-Messzelle KZ 7.71 ³⁾ für VISKOMAT NT # Gerät 2006 060	
Hauptabmessungen	$D_3 = 71,2 \text{ mm}$	$L = 64,8 \text{ mm}$ Einstellgröße $\Delta h = 12,0 \text{ mm}$
Kalibrier-Resultat	$c_K = 0,997$ $\frac{\tau}{T} = 0,972 \cdot \frac{[Pa]}{[mNm]}$; $\frac{\dot{\gamma}}{N} = 0,620 \cdot \frac{[min]}{[s]}$	
Vermerk	$\frac{\dot{\gamma}_{krit}}{\tau_0/\eta_{pl}} = 0,172 \cdot [-]$	

Eine weitere Optimierung der Messzelle bezüglich der Hauptabmessungen insbesondere hinsichtlich der effektiven Sensor-Eintauchtiefe L erscheint sinnvoll, um z.B. bei Langzeitversuchen $T(t)_{N=konst}$ über mehrere Stunden, die Abfälschung von T durch den Rand – Verkrustung des Mörtels an der offenen Oberfläche – zurückzudrängen.

³⁾ Korb-Messzellen dieser Art werden im Auftrag und unter besonderer Gütekontrolle von **R.VOGEL-FORSCHUNG , Weimar** gefertigt, kalibriert und zertifiziert.
 Auf Anfrage unter r.vogel@vogel-labor.de erhalten Sie ein unverbindliches Angebot.
 Auch sind Sonderanfertigungen für spezielle Einsatzfälle möglich, ebenso wie eine Anpassung an andere Rheometer-Ausführungen.

Ausgewählte Messergebnisse

Mit der Korbzelle wird schon einige Zeit gearbeitet. Die in den diversen Vorträgen und Mitteilungen veröffentlichten Untersuchungen zum Thema ‚Selbstverdichtender Beton bzw. Mörtel‘ wurden mit dieser Messzelle durchgeführt [4/ 5/]. Die folgenden Ergebnisse sollen der weiteren Einschätzung der Leistungsfähigkeit dieser Zelle dienen und Anregungen für weiterführende stoffliche Untersuchungen geben.

a.) Ein in mehrer Hinsicht interessantes Ergebnis lieferte der Einsatz der Zelle bei der Prüfung eines handelsüblichen **Quell-Verguss-Mörtels**. Laut Gebinde-Aufdruck sollte dieser günstige Verarbeitungseigenschaften besitzen, wenn ein Wasser-Trockenmörtel-Verhältnis $W/TM = 0,135$ eingehalten wird. Es stellte sich nach einigen Tests heraus, dass augenscheinlich erst ab $W/TM \geq 0,15$ Fließfähigkeit beobachtet werden konnte und ab $W/TM \geq 0,175$ Sedimentation eintrat. Um bestes Fließen zu erreichen, wurde die rheologische Prüfung dieses Mörtels nahe an der maximal möglichen Wassergabemenge durchgeführt.

Das Ergebnis der Langzeitscherung $T(t)$ mit verschiedenen Messzellen ist in Abb.6 festgehalten.

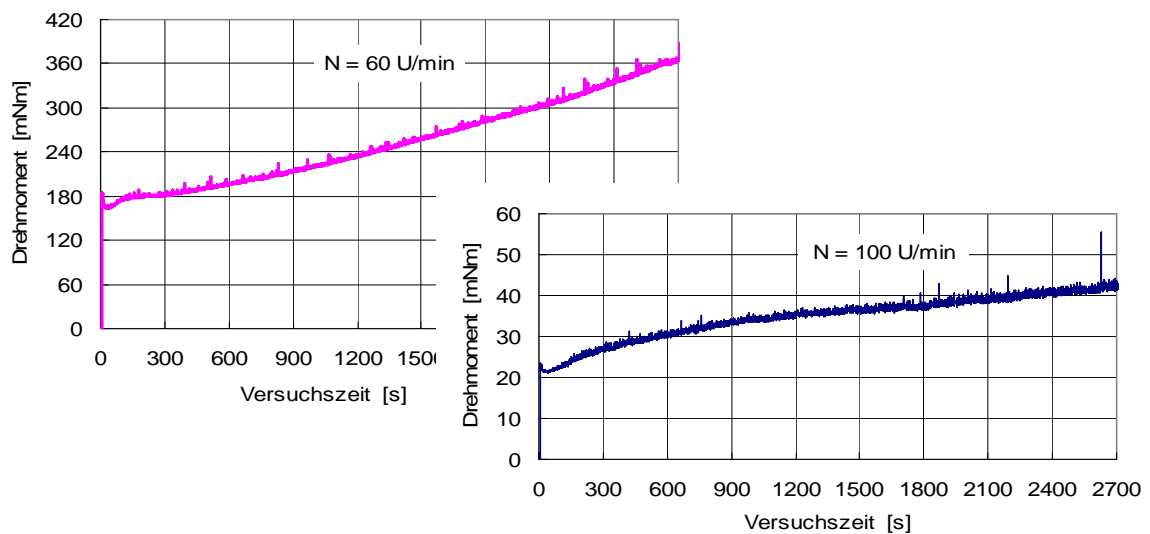


Abb.6 Scherung von Quellverguss-Mörtel $W/TM = 0,170$ mit
oben: Korbzelle KZ unten: Mörtelpaddel

Danach ist zweierlei festzustellen:

- Die Korbzelle ist wesentlich empfindlicher als das bekannte Mörtelpaddel. Die Korbzelle bringt ein ca. 15 mal größeres Moment (beachte den Drehzahlunterschied).
- Die Korbzelle zeigt tendenziell einen anderen Verlauf als das Mörtelpaddel. Mit der Realisierung einer Schichtenströmung in der Korbzelle treten nach anfänglichem ‚Ausrichten‘ der Mörtelpartikel im weiteren strukturzerstörende Effekte in den Hintergrund.

Um außerdem die Fließfähigkeit beurteilen zu können, wurde eine Fließkurve aufgenommen, und zwar 3 min nach dem intensiven Mischen und ebenfalls nach 3 min Vorscheren. In Abb.7 sind die Messergebnisse festgehalten. Auf dem ersten Blick liegt es nahe, dieses Resultat mit Hilfe einer Potenzfunktion – z.B. mit dem *Herschel-Bulkley-Modell* – zu interpretieren. Da es auch möglich erscheint, den Messwertverlauf fern vom Nullpunkt durch eine lineare Beziehung wiederzugeben, sollte zunächst eine Prüfung auf vollständige Scherung erfolgen. Über eine sukzessive Approximation von $\tau(\dot{\gamma})$ erhält man mit $\dot{\gamma}_{krit} = 0,172 \cdot \frac{\tau_0}{\eta_{pl}} [s^{-1}]$ den Wert $\dot{\gamma}_{krit} = 4,36 s^{-1}$.

Daraus folgt, dass nur im Bereich $\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_{krit}$ unverfälschte Messwerte vorliegen – die Grenze ist in Abb.7 rot markiert. Bei den drei kleinen Drehzahlen/Schergewerten ist demnach das Drehmoment

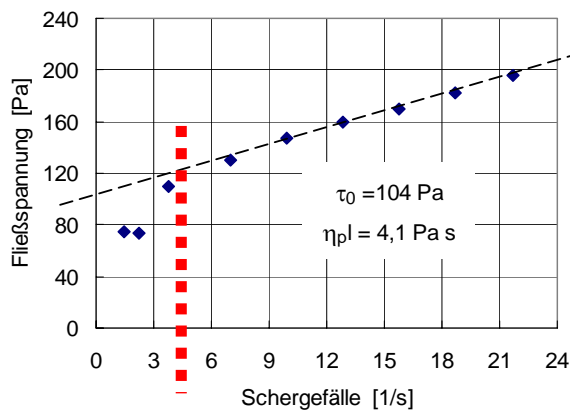


Abb.7 Fließkurve des untersuchten Quell-Vergussmörtels

bzw. die Fließspannung nicht allein Ausdruck des Mörtels, sondern auch der Spaltgeometrie. Man kann daher annehmen, dass der untersuchte Quell-Vergussmörtel mit hinreichender Genauigkeit dem *Bingham-Gesetz* folgt. Aus rheologischer Sicht lautet das Urteil:

Dieser Mörtel wird der Bezeichnung ‚Verguss‘ nicht gerecht, da die Fließgrenze viel zu hoch liegt. Es wäre dafür

$$10 \leq \tau_0 < 20 \text{ Pa} \quad \text{angemessen.}$$

b.) Die Zusammenstellung der Gemengeanteile von **Selbstverdichtendem Beton/Mörtel** erfolgt oft nach Erfahrungswerten oder auch nach der Regel von *Okamura*. In beiden Fällen besteht letztlich die Aufgabe, auf experimentellem Wege die Fließmittelmenge zu bestimmen, die optimales Fließen ermöglicht, ohne dass eine Sedimentation des groben Zuschlages erfolgt.

Ausgehend von der Zusammensetzung des SVB-Gemenges mit den Anteilen für den Basismörtel ⁴⁾

$$W/Z = 0,521 \quad BM/Z = 0,333 \quad S/Z = 1,67 \quad ,$$

sollte dieser das natürliche Korn des Grobzuschlages sedimentationsfrei tragen. Diese Forderung begrenzt die Fließmittelmenge nach oben hin, selbst dann, wenn der Mörtel an sich noch keine Instabili-

⁴⁾ Freundlicher Weise von Herrn Dipl.-Ing. A. Flohr, FINGER-Institut der BAUHAUS-Uni, Weimar, bereitgestellt.

tät zeigt. Mit der projektierten Grenzsiebmaschenweite für den Grobzuschlag von $\hat{d}_{\max} = 16$ mm erhält man an Hand des Stabilitätskriteriums /1/

$$\frac{\tau_0}{\Delta\rho \cdot g \cdot \hat{d}_{\max}} = \Lambda \quad \text{die erforderliche Mindest-Grenzfließspannung des Basismörtels.}$$

Aus dieser Beziehung folgt die Abhängigkeit $\tau_{0,\Lambda}(FM/Z)$, andererseits ergibt das Experiment $\tau_0(FM/Z)$. Über $\tau_0 = \tau_{0,\Lambda}$ ist schließlich die optimale Fließmittelmenge bekannt.

Bedingt durch die sehr geringe Änderung der Dichtedifferenz des Mörtels, die dem Fließmittelanteil geschuldet ist, erhält man im Bereich $0,01 \leq FM/Z \leq 0,02$ ein quasi konstantes $\tau_{0,\Lambda} \approx 21$ Pa. In Abb.8 ist die geringe Änderung von $\tau_{0,\Lambda}$ gerade noch erkennbar.

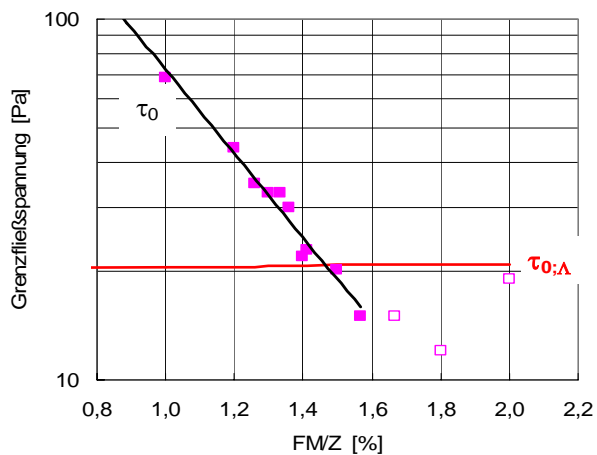


Abb.8

Beeinflussung der Grenzfließspannung τ_0 eines SVM durch Zugabe von Fließmittel FM/Z .

Zur Bestimmung der Fließgrenzen $\tau_0(FM/Z)$ wurden nach vorgegebenem Mischregime und ausgesetzter Vorscherzeit Fließkurven aufgenommen. Ihre Auswertung erfolgte mit Hilfe des in /4/ /5/ angegebenen Fließmodells

$$\tau = \tau_0 + \frac{\eta_{pl,0} \cdot \dot{\gamma}}{1 + \frac{\eta_{pl,0} \cdot \dot{\gamma}}{2\sigma}}$$

Das Ergebnis ist auch in Abb.8 festgehalten. Bis $FM/Z \approx 1,6$ konnte nach Augenschein keine Sedimentation während eines Versuchs (Versuchsdauer je Fließkurve ca. 40 min) beobachtet werden. Oberhalb dieser Grenze (offene Versuchspunkte) zeigten sich Verdichtungen des Mörtels im Bodenbereich der Messzelle. Während man näherungsweise für alle $FM/Z < 0,014$ auch mit dem

Bingham-Gesetz den linearen Verlauf der Fließkurve hätte approximieren können, so war dies im Bereich $FM/Z > 1,6$ nicht möglich. Die während des Versuchs einsetzende Sedimentation spiegelte sich in einem auffälligen S-Schlag der Fließkurve wieder, was wiederum fragwürdige τ_0 -Werte lieferte.

Der Schnittpunkt der beiden Grafen in Abb.8 zeigt das Resultat der Fließmittel-Optimierung an. Es lautet $FM/Z \approx 0,015$. Räumt man Mess-Unsicherheiten ein, so sollte $FM/Z = 0,014$ verwendet werden. Wie Großversuche mit diesem SVB zeigten – ergänzender Grobzuschlag $G/Z = 2,36$ –, ist auch der Wert $0,015$ realistisch.

Das Ergebnis $\tau_0(FM/Z)$ lässt sich auch mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschreiben und deuten. Bringt man diese in die Form $\tau_0 = q \cdot \exp(p \cdot FM/Z)$, so steht die Größe q für die Grenzfließspannung des Mörtels ohne Fließmittel, also für $FM/Z = 0$. Mit der hier verwendeten Messzelle lässt sich dieser Wert nicht bestimmen. Die Verwendung eines Tauchkörpers – analog dem des *Vicat*-Tauchstabes – o.ä. ist hierfür sinnvoll. Geht man diesen Weg, so lässt sich die optimale Fließmittelmenge explizit bestimmen; denn es gilt:

einerseits $\tau_{0,\Lambda} = \Lambda \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot \hat{d}_{\max}$ (Stabilitätskriterium)

andererseits $\tau_0 = q \cdot \exp(p \cdot FM/Z)$ (Korbzelle + Tauchkörper).

Ein Gleichsetzen beider Ausdrücke bringt

$$\frac{FM}{Z} = \frac{1}{p} \cdot \ln \left[\frac{\Lambda}{q} \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot \hat{d}_{\max} \right]$$

und schließlich für natürliches Korn des

Grobzuschlages mit $\Lambda = 0,3$ das Resultat

$$\frac{FM}{Z} = 0,0147 \hat{=} 1,47 \%$$

Zusammenfassung und Ausblick

Es wird eine Sonderform einer Doppelpingspalt- Messzelle – die sog. Korbzelle – für Rotationsviskosimeter vorgestellt, die nach dem *Hatscheck*-Prinzip arbeiten. Die Zelle ermöglicht eine Fluid-in-Fluid-Scherung und ist vor allem für Mörtel mit hoher Fließfähigkeit sowie einem Größtkorn von $\hat{d} = 2$ mm gedacht. Neben der Kalibrierung der Zelle werden ausgewählte Messergebnisse beschrieben, die in einem Vergleich mit einem konventionellem Mörtelpaddel eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Korbzelle erlauben.

Nach den bisher vorliegenden experimentellen Befunden eignet sich die Korbzelle für alle Fluide mit hoher Fließfähigkeit, deren Habitus durch mehrere Phasen gekennzeichnet ist. Z.B. Selbstverdichtende Mörtel u.a. Vergussmörtel, Fließestriche und Spachtelmassen ebenso wie Bindebaustoffleime, keramische Schlicker, Schlämme aller Art sowie Farben. Nicht ausgeschlossen sind Lösungen.

Voraussetzung für jegliche rheologische Material-Untersuchung ist eine Stabilität des Untersuchungsobjektes, sie ist auch hier notwendige Bedingung.

Die gesammelten Erfahrungen bei der Entwicklung und Erprobung sowie dem Einsatz ermöglichen bei Bedarf eine weitere Optimierung der Korbzelle. Dies betrifft die Hauptabmessungen der Messzelle bedingt durch verschiedenes Größtkorn genauso wie die Gerüststruktur für Spezialeinsatzfälle.

Literatur

- /1/ Vogel, R. Ein Stabilitätskriterium für Selbstverdichtenden Beton ,
Betonwerk+Fertigteil-Technik BFT 12 (2005), S.42...49 .
- /2/ Vogel, R. Untersuchungen mit dem Rotationsviskosimeter RHEOTEST 2
Riedel, M. zur Abgrenzung des Einsatzbereiches ,
Silikattechnik 41 (1990), Heft 2, S.59...64
- /3/ Vogel, R. Fließkurven von Selbstverdichtendem Beton
– Zielvorgaben und Fließmodelle
Vortrag Regensburger Baustoffkolloquium März 2006
- /4/ Vogel, R. Fließen von Selbstverdichtenden Beton – Das Fließgesetz ,
www.vogel-labor.de / Mitteilung 04/6
- /5/ Vogel, R. Stabilität und Fließverhalten von Selbstverdichtendem Beton
Vortrag Ibausil Weimar Sept. 2006, Druck Bd.2, S.1047...1058

Verwendete Formelzeichen, Abkürzungen und Indices

Bm	[-]	Bingham-Zahl
c	[-]	Korrekturfaktor
d, \hat{d}	[m]	charakteristische Kornabmessung, Sieb-Maschenweite
D	[m]	Durchmesser
δ	[-]	Radien- bzw. Durchmesser Verhältnis
ϑ	[°C]	Temperatur
Δ	[m]	Radien Differenz
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
η_{pl}	[Pa s]	Plastische Viskosität
L	[m]	Eintauchtiefe
Λ	[-]	Stabilitätskennzahl
N	[U/min]	Drehzahl
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Schergefälle, Scherrate
Ω	[s ⁻¹]	Winkelgeschwindigkeit
r, R	[m]	Radius
ρ	[kg/m ³]	Dichte
$\Delta\rho$	[kg/m ³]	Dichtedifferenz (Korn – Fluid)
t	[s], [min]	Zeit
T	[mNm]	Drehmoment
τ	[Pa]	Schubspannung, Fließspannung
τ_0	[Pa]	Grenzfließspannung, (Schubspannung an der) Fließgrenze

Abkürzungen + Indices

A	Außen	K	Kalibrierung
B	(Frisch-) Beton	KZ	Korbzelle
BM	Alt Betonmehl	L	Längenkorrektur
Fl	Fluid	M	Mörtel
FM	Fließmittel	P	Partikel
G	Grobzuschlag	rep	repräsentativ
I	Innen	S	Sand (feiner Zuschlag)
$1...4$	Messzellenränder	SV	Selbstverdichtend
0	im Abszissen-Nullpunkt	TM	Trockenmörtel
$korr$	korrigiert	W	Wasser
$krit$	kritisch	Z	Zement