

Einfluß verschiedener Zemente auf das Fließverhalten und die Stabilität von Zementsuspensionen

Von Karsten Rendchen, Düsseldorf

Übersicht

Unter Verwendung von Ergebnissen früherer Untersuchungen werden einfache, jedoch allgemeingültige Beziehungen zwischen den physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften von Zement und den rheologischen Kennwerten für das Fließverhalten und Sedimentierverhalten von Zementsuspensionen aufgestellt. Hierzu wurden die Untersuchungen an 19 verschiedenen Zementen und an den damit hergestellten Suspensionen mit Wasserzementwerten zwischen 0,6 und 2,0 in Form multipler Regressionen mit einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage ausgewertet.

Die Viskosität wird — außer vom Wasserzementwert — im wesentlichen von der Mahlfineinheit und vom Wasseranspruch des Zements beeinflusst. Durch eine mathematische Verknüpfung dieser drei Einflußgrößen ist eine hinreichend genaue Bestimmung des Fließverhaltens der Suspension, ausgedrückt durch die Viskosität, möglich. Die Fließgrenze ist dagegen mit den vorgegebenen Kenngrößen nicht sinnvoll zu erfassen.

Die Sedimentiergeschwindigkeit, die als Maß für die Stabilität der Suspension diente, wird im wesentlichen vom Wasserzementwert und von der Kornverteilung bestimmt.

1. Allgemeines

Die Eigenschaften des Frischbetons, wie z. B. Verformbarkeit, Verdichtungswilligkeit und Fließvermögen, hängen im wesentlichen vom Zuschlag, insbesondere von seiner Kornzusammensetzung, Kornform und -oberfläche, sowie von der Menge und den rheologischen Eigenschaften des Zementleims ab. In der Praxis ist eine Steuerung der Konsistenz des Betons durch Wahl besonders günstiger Kornformen und -oberflächen nur in Ausnahmefällen möglich, da aus wirtschaftlichen Gründen fast immer der örtlich verfügbare Zuschlag verwendet wird; allenfalls kann eine Auswahl nach gebrochenem oder ungebrochenem Zuschlag erfolgen. Eine Beeinflussung der Konsistenz des Betons ist daher in der Praxis nur durch Wahl der Kornzusammensetzung sowie durch Menge und Fließverhalten des Zementleims möglich. Für das Fließverhalten des Zementleims ist hauptsächlich der Wasserzementwert maß-

gebend, daneben sind jedoch auch die Eigenschaften des Zements von Einfluß [1 bis 6].

In zahlreichen Untersuchungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen ist der Einfluß der Zementeigenschaften (z. B. Mahlfineinheit, chemisch-mineralogische Zusammensetzung) im Verhältnis zum Wasserzementwert auf das Fließverhalten von Zementleim bislang nur in Ansätzen untersucht worden [1 bis 7]. In den meisten Fällen wurden dabei die Einflußgrößen unabhängig voneinander untersucht, d. h. bei der Untersuchung einer Einflußgröße, wie z. B. der Mahlfineinheit, wurden in den einzelnen Versuchsreihen die Einflüsse der anderen Parameter ausgeschlossen, indem diese konstantgehalten und getrennt ausgewertet wurden, was eine Beurteilung der relativen Einflußnahme einzelner Einflußgrößen erschwert.

Im nachstehenden wurde versucht, die relative Einflußnahme mehrerer Einflußgrößen auf eine Zielgröße mathematisch zu erfassen und darzulegen. Durchgeführt wurden diese Auswertungen mit Versuchsergebnissen, die bereits W. Kaiser [1] sowie J. Bonzel und J. Dahms [2] aufgrund ihrer mit anderer Zielsetzung durchgeführten Untersuchungen ermittelt haben.

2. Ermittlung rheologischer Kennwerte

Eine Beurteilung von Flüssigkeiten nach ihren rheologischen Eigenschaften erfolgt durch den Scherversuch: An einer dünnen Flüssigkeitsschicht wird die Änderung der Schergeschwindigkeit v in Abhängigkeit von der aufgetragenen Scherspannung τ untersucht. Den Differentialquotienten aus Schergeschwindigkeit v und Schichtdicke y bezeichnet man mit Schergeschwindigkeitsgefälle

$$D = \frac{dv}{dy}$$

Im allgemeinen werden Flüssigkeiten nach den in Tafel 1 dargestellten Grund-Fließverhalten eingeteilt.

Hier muß darauf hingewiesen werden, daß einige Bezeichnungen auf dem Gebiet der Rheologie sowohl im deutschen als auch im englischsprachigen Schrifttum nicht einheitlich sind und unterschiedliche Bedeutungen in sich tragen. Einen umfassenden Überblick über die rheologischen Bezeichnungen des internationalen Schrifttums geben J. M. Burgers und G. W. Scott [9].

Zur Ermittlung der rheologischen Kennwerte verwendet man verschiedene Viskosimeter. Je nach Wirkungsweise unterscheidet man Kapillarviskosimeter, Fallkörperviskosimeter und Rotationsviskosimeter. H. Umstätter hat in [10] den Aufbau und die Anwendungsmöglichkeiten von 55 verschiedenen Viskosimetern beschrieben.

Zur Untersuchung der nicht-Newtonschen Flüssigkeiten eignen sich Rotationsviskosimeter, wie sie u. a. auch in [11] aufgeführt sind. Die nachfolgend ausgewerteten Ergebnisse wurden mit einem Rotationsviskosimeter nach Couette-Hatschek bestimmt. Bei diesem Viskosimeter dreht sich ein äußerer Zylinder mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um einen inneren konzentrischen Zylinder, der an

Tafel 1 Zusammenfassung der Grund-Fließverhalten (nach [8])

	Idealviskos Newton	Pseudoplastisch		Dilatant Ostwald	Plastisch	
		Ostwald	Steiger/Ory		Bingham	Casson
Fließverhalten $D=f(\tau)$						
Charakterisierung $D=f(\dot{\tau})$	$D = \frac{\tau}{\eta}$	$D = \kappa \tau^n, n > 1$	$D = a \tau^3 + c \tau$	$D = \kappa \tau^n, n < 1$	$D = \frac{\tau - \tau_0}{\eta}$	$D = \frac{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0})^2}{\eta}$
Viskosität $\eta = f(\tau)$	$\eta = \frac{\tau}{D}$	—	—	—	$\eta = \frac{\tau - \tau_0}{D}$	$\eta = \frac{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0})^2}{D}$
Fließgrenze τ_0	0	0	0	0	$\tau_0 = \tau - D \eta$	$\tau_0 = (\sqrt{\tau} - \sqrt{\eta \cdot D})^2$
logarithmische Darstellung des Fließverhaltens $\log \eta = f(\log D)$						

einer Torsionsfeder aufgehängt ist. Infolge der Zähigkeit der Suspension wird je nach Umlaufgeschwindigkeit des äußeren Zylinders ein bestimmtes Drehmoment auf den inneren Zylinder übertragen, das an einer Skala abgelesen werden kann. Unter Berücksichtigung der Geräteabmessungen und der Federkraft kann die aufgebrauchte Scherspannung berechnet werden [1]. Mit Hilfe der Darstellung des Geschwindigkeitsgefälles in Abhängigkeit der so ermittelten Scherspannung werden die dynamische Viskosität und die Fließgrenze ermittelt.

3. Versuchsdurchführung

Das Otto-Graf-Institut in Stuttgart hat in Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut der Zementindustrie Versuche über die technologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen durchgeführt [1, 2]. Einbezogen wurden insgesamt 19 Zemente, die sich in Herkunft, Feinheit, Festigkeitsklasse und chemischer Zusammensetzung unterschieden. Unter Verwendung von Wasserzementwerten zwischen 0,50 und 2,00 und der verschiedenen Zemente ergaben sich Zementsuspensionen mit unterschiedlichem Fließ- und Sedimentierverhalten. Anhand der Versuchsergebnisse stellte W. Kaiser [1] Beziehungen zwischen den granulometrischen Werten der Zemente und den rheologischen Kennwerten auf. Aufbauend auf diesen Ergebnissen untersuchten J. Bonzel und J. Dahms [2] den Einfluß von Zementen und Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde weiterhin das Sedimentieren der Suspensionen bestimmt. Das Ziel der nachfolgenden Auswertungen bestand darin, unter Verwendung der Ergebnisse aus [1] und [2] allgemeingültige Beziehungen zwischen den physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften der Zemente und den rheologischen Kennwerten von Zementsuspensionen aufzufinden und darzustellen.

4. Auswertung

Für die Auswertungen wurden unter Benutzung eines bereits vorhandenen Programms für multiple lineare Regressionen [12] auf einer elektronischen Rechenanlage Regressionen mit den entsprechenden Größen durchgeführt. Die Werte der ermittelten Regressionsgleichungen wurden anschließend ebenfalls mit Hilfe einer elektronischen Rechenanlage und eines dafür geeigneten Programms [12] graphisch dargestellt.

Als rheologische Zielgrößen wurden die Fließeigenschaften und die Stabilität der Suspension gewählt. Zur Charakterisierung der Fließeigenschaften diente die dynamische Viskosität η_d , die mit der häufig gewählten scheinbaren Viskosität η_s stark korreliert ($r = 0,997$), sowie die Bingham'sche Fließgrenze τ_0 . Als kennzeichnend für die Stabilität wurde die Sedimentation als Verhältnis der Höhe des abgesonderten Wassers H zur ursprünglichen Einfüllhöhe der Suspension S angesehen sowie die Sedimentationsgeschwindigkeit v_{sed} (vgl. [2]).

Als potentielle Einflußgrößen wurden zunächst eine Vielzahl von physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften in der speziell für diese Auswertung angelegten Datei erfaßt. Daran sich anschließende Voruntersuchungen ergaben jedoch, daß mit den gesuchten rheologischen Zielgrößen nur jene physikalischen Einflußgrößen in stärkerem Maße korrelierten, die in irgendeiner Form die Kornzusammensetzung, Kornverteilung oder Feinheit kennzeichneten. Es war daher wenig sinnvoll, weitere physikalische Einflußgrößen in die eigentliche Auswertung einzubeziehen. Diese Voruntersuchungen ergaben außerdem recht schwache Korrelationen zwischen den rheologischen Zielgrößen und den chemisch-mineralogischen Eigenschaften der Zemente, so daß ein stärkerer Einfluß nicht zu erwarten war (vgl. hierzu jedoch Abschnitt 5.1).

Nach statistischen Gesetzen gelten Regressionen nur in dem durch Versuche belegten Bereich. Die nachfolgend aufgestellten Regressionsgleichungen gelten daher für Zemente unterschiedlicher Art und Festigkeit mit spezifischen Oberflächen zwischen $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ und $5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ sowie für Suspensionen mit Wasserzementwerten zwischen 0,6 und 2,0.

5. Ergebnisse

5.1. Fließverhalten

Die Auswertung lieferte in erster Näherung für die dynamische Viskosität eine Potenzfunktion mit den Einflußgrößen Wasserzementwert w der Suspension und spezifische Oberfläche O_{spez} des Zements nach DIN 1164 Blatt 4 in der folgenden allgemeinen Form

$$\eta_d = a \cdot w^b \cdot O_{spez}^c + d \quad (1)$$

Die Übereinstimmung der Versuchswerte und der aus der Regressionsgleichung ermittelten Werte war jedoch noch nicht zufriedenstellend. Nach weiteren Auswertungen kristallisierte sich als dritter Parameter der Wasseranspruch w_c heraus. (Als Wasseranspruch des Zements bezeichnet man die auf den Zement bezogene Wassermenge, die zur Erzielung der Normsteife gemäß DIN 1164 Blatt 5 erforderlich ist.) Zemente gleicher Feinheit haben

häufig voneinander abweichenden Wasseranspruch, was u. a. auf eine unterschiedliche chemisch-mineralogische Zusammensetzung zurückzuführen ist. Wird als Einflußgröße für das Fließverhalten der Suspension der Differenz-Wasserzementwert $w - w_a$ gewählt, so wird damit die chemisch-mineralogische Zusammensetzung indirekt in die Berechnung einbezogen.

Mit dieser erweiterten Funktion ließ sich das Fließverhalten

$$\eta_d = 0,517 \cdot (w - w_a)^{-1,141} \cdot O_{\text{spez}}^{0,320} - 0,757 \quad (2)$$

wesentlich genauer ausdrücken. Das Bestimmtheitsmaß wird von 71 % bei Gleichung (1) auf nun 93 % bei Gleichung (2) verbessert. Die Darstellung dieser Funktion nähert sich dem Verlauf einer Hyperbel (Bild 1). In der Praxis kann der Einfluß des Wasseranspruchs auf das Fließverhalten von Zementsuspensionen durch eine erhöhte Wasserzugabe kompensiert werden. Dies wirkt sich u. a. jedoch meist ungünstig auf das Sedimentierverhalten aus.

Als Bestimmungsform für die dynamische Viskosität von Zementsuspensionen ergab sich somit eine Potenzfunktion mit den Einflußgrößen Wasserzementwert, Wasseranspruch und spezifische Oberfläche nach DIN 1164 Blatt 4. Eine entsprechende Funktion, jedoch mit anderen Konstanten, ergab sich auch für die scheinbare Viskosität η_s . (Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß beide Gleichungen wie auch alle folgenden nicht dimensionsrein sind.)

Für die praktische Anwendung dieser Funktion reicht in vielen Fällen eine geringere Genauigkeit als die hier ermittelte aus. So soll nach [2] z. B. bei Injektionsarbeiten im Grund-, Wasser- und Bergbau die scheinbare Viskosität der verwendeten Zementsuspensionen im allgemeinen in der Größenordnung zwischen 10 cP und

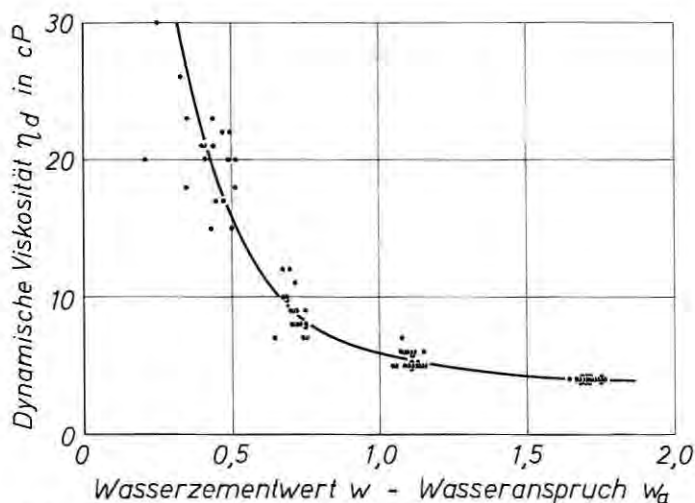


Bild 1 Fließverhalten von Zementsuspensionen in Abhängigkeit von der wirksamen Wassermenge

30 cP liegen. Hierfür kann Gleichung (2) in guter Annäherung auch in der folgenden Darstellung verwendet werden

$$\eta_d \approx \frac{1}{2 \cdot (w - w_a)} \cdot \sqrt[3]{O_{\text{spez}}} - 1 \quad (3)$$

Diese Funktion ist graphisch nur in Form einer Kurvenschar darstellbar. Eine anschauliche Darstellung wäre möglich, wenn man die drei Einflußgrößen Wasserzementwert w , Wasseranspruch w_a und spezifische Oberfläche O_{spez} in einem einzigen Parameter zusammenfassen könnte.

J. P. Bomble [7] hat in Untersuchungen festgestellt, daß die in einer Suspension wirkenden physikalischen Kräfte sehr stark von der Verteilung des Feststoffs in der Suspension abhängen. Die Verteilung des Feststoffs Zement in einer wässrigen Suspension stellten Terrier und Moriau [13] durch den mittleren Zementkornabstand δ als Funktion von Wasserzementwert und spezifischer Oberfläche dar

$$\delta = \frac{2 \cdot W}{Z \cdot O_{\text{spez}}} \quad (4)$$

Kaiser stellte in [1] fest, daß die Abhängigkeit der dynamischen Viskosität vom mittleren Zementkornabstand δ , der bei den untersuchten Zementen und Wasserzementwerten zwischen $1 \mu\text{m}$ und $15 \mu\text{m}$ lag, für Werte $< 4 \mu\text{m}$ nur unzureichend wiedergegeben werden konnte. Um auch diesen Bereich ausreichend genau erfassen zu können, führte er die Abstandskenngröße

$$\delta' = \frac{\left(\frac{W}{Z}\right)^2}{O_{\text{spez}}} \cdot 10^4 \quad (5)$$

ein.

Wählt man den um den Wasseranspruch w_a verminderten Wasserzementwert $(w - w_a)$, so erhält man die „indirekte Abstandskenngröße“

$$\delta'_i = \frac{(w - w_a)^2}{O_{\text{spez}}} \cdot 10^4 \quad (6)$$

und damit eine mathematische Beziehung zwischen den oben aufgeführten drei Einflußgrößen.

Die mit dieser indirekten Abstandskenngröße ermittelte Regressionsgleichung

$$\eta_d = 12,660 \cdot \delta'_i^{-0,565} - 1,012 \quad (7)$$

besitzt erwartungsgemäß das gleiche Bestimmtheitsmaß wie Gleichung (2), da die Gleichungen linear abhängig sind. Die Funktion ist in dieser Darstellung jedoch durch eine einzige Variable zu kennzeichnen. Auch diese Gleichung genügt in einer vereinfachten Darstellung

$$\eta_d = 13 \cdot \delta'_i^{-0,6} - 1 \quad (8)$$

in der Regel der in der Praxis erforderlichen Genauigkeit.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß sich bei Zementsuspensionen mit indirekter Abstandskenngröße $\delta'_i > 5 \mu\text{m}$ die Viskosität η_d

kaum noch ändert und bei den hier betrachteten Zementen eine Viskosität $\eta_d = 4 \text{ cP}$ unabhängig von der Feinheit der Zemente und vom Wasserzementwert als Grenzwert angesehen werden kann (Bild 2).

Dies entspricht einer für das Fließverhalten maßgebenden Wassermenge ($w - w_0$) von etwa 140 % des Zementgewichts bei einer mittleren spezifischen Oberfläche nach DIN 1164 Blatt 4 von etwa $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Dies stimmt in sehr guter Annäherung auch mit dem in Bild 1 dargestellten Kurvenverlauf überein.

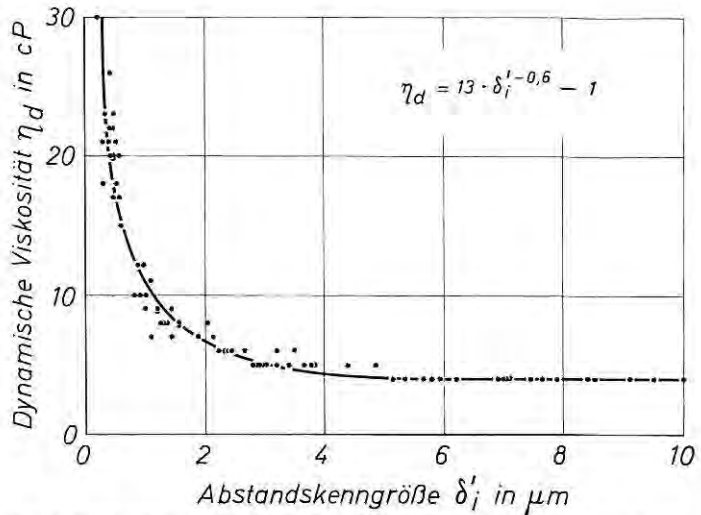


Bild 2 Fließverhalten von Zementsuspensionen in Abhängigkeit von der indirekten Abstandskenngröße δ'_i

Bei indirekten Abstandskenngrößen $\delta'_i < 0,20 \mu\text{m}$ steigt die Viskosität η_d sehr schnell an. Derartige steife Suspensionen sind z. B. für das Injizieren in Böden in der Regel kaum noch geeignet. Eine begrenzte Anwendung finden solche Suspensionen bei der Herstellung von Verpreßankern.

Die Ermittlung der zweiten Kenngröße einer Zementsuspension als Bingham'schen Körper, der Fließgrenze, ergab im Gegensatz zur Viskositätsbestimmung keine eindeutige Zuordnung zwischen Bingham'scher Fließgrenze τ_0 und den zementabhängigen Größen. Eine brauchbare mathematische Beziehung zwischen der Bingham'schen Fließgrenze und den Kennwerten des Zements scheint aufgrund dieser Untersuchungen nicht vorzuliegen. Diese Feststellung wird durch Untersuchungen bestätigt, nach denen die Fließgrenze τ_0 auch unter Anwendung modernster Versuchsanlagen noch nicht endgültig festgelegt werden konnte [14]. Die Bestimmung der Funktion für Fließkurven von Zementpasten war auch hierbei nur unter bestimmten Annahmen möglich.

5.2. Sedimentierverhalten

Das Entmischen von Zementsuspensionen läßt sich nach [2] durch eine Sedimentierkenngröße und die Sedimentiergeschwindigkeit erfassen und kennzeichnen. Die Sedimentierkenngröße H/S kann als Maß für die Stabilität der Suspension angesehen werden und ergibt sich als Quotient aus der Höhe des abgesonderten Wassers H und der ursprünglichen Einfüllhöhe der Suspension S . Die Sedimentiergeschwindigkeit v_{sed} drückt aus, wie schnell sich die Suspension entmischt.

Zur Untersuchung des Sedimentierens wurde eine Versuchsanlage mit senkrechtstehenden doppelwandigen Plexiglaszylindern verwendet, in die die Suspension unter Druck eingefüllt wurde (Versuchsdurchführung und Ergebnisse siehe [2]). Das Sedimentieren wurde so lange in bestimmten Zeitabständen abgelesen, bis die Höhe des Zementleimspiegels mindestens 30 min lang unverändert blieb. Die Sedimentiergeschwindigkeit v_{sed} wurde nach folgender Gleichung ermittelt [2, 15]:

$$v_{\text{sed}} = \frac{0,5 H}{T_{0,5 H}}$$

mit H = gesamte während eines Versuchs ermittelte Zementspiegelabsenkung,

$T_{0,5 H}$ = Zeit bis zur Hälfte der gesamten Zementspiegelabsenkung.

Das Sedimentieren wurde am stärksten durch den Wasserzementwert beeinflusst. Der Wasseranspruch des Zements war dagegen praktisch ohne Bedeutung. Wie die Viskosität, so wurde auch die Sedimentation von der Kornverteilung des Zements beeinflusst. Untersucht wurde außer einer Abhängigkeit des Entmischens von der spezifischen Oberfläche die Abhängigkeit von einzelnen Kornfeinheitsbereichen zwischen $200 \mu\text{m}$ und $< 2 \mu\text{m}$. Dabei zeigte sich, daß die Kornfraktionen $8 \mu\text{m}$ und kleiner einen besonders starken Einfluß auf das Sedimentieren ausüben. Mit größer werdendem Anteil dieser Fraktion sinkt die Sedimentierneigung der Suspension.

Wählte man als Kennwert für die Feinheit des Zements anstelle des Anteils $\leq 8 \mu\text{m}$ die spezifische Oberfläche nach DIN 1164 Blatt 4, dann lieferte die Regression eine Funktion mit einem etwas geringeren Bestimmtheitsmaß. Da aber die Bestimmung der spezifischen Oberfläche wesentlich einfacher und zudem genormt ist, scheint es für die Praxis angebracht, auch hier die spezifische Oberfläche als Einflußgröße zu wählen.

Neben der zu erwartenden Abhängigkeit der Stabilität einer Zementsuspension von der Kornverteilung wurde auch ein Zusammenhang zwischen der Sedimentierkenngröße H/S und dem SiO_2 -Gehalt des Zements festgestellt. Aufgrund der Anordnung der Versuchsdaten konnte jedoch noch nicht endgültig geklärt werden, ob es sich tatsächlich um einen chemischen Einfluß handelt oder ob der SiO_2 -Gehalt nur ein stellvertretender Anzeiger für andere Eigenschaften ist, wie z. B. Anteil der Glasphase im Zement, unterschiedliche Bruchflächenbeschaffenheit u. a. m. Eine Zunahme dieser Kenngröße bewirkte bei gleicher Mahlfeinheit des Zements ein etwas stärkeres Entmischen der Suspension.

Damit ergab sich für die Stabilität von Suspensionen folgende Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß von 94 %

$$\frac{H}{S} = 33 \cdot w - 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot O_{\text{spez}} - \frac{5 \cdot 10^3}{(\text{SiO}_2)^2} + 25 \quad (9)$$

Da der Einfluß der Kornverteilung den Einfluß des SiO_2 -Gehalts deutlich überwiegt, kann sich bei entsprechender Feinermahlung des Zements, d. h. insbesondere durch eine Vergrößerung des Anteils $\leq 8 \mu\text{m}$, der Einfluß des SiO_2 -Gehalts kompensieren.

Die Sedimentiergeschwindigkeit v_{sed} wurde weder durch die chemische Zusammensetzung der Zemente noch durch deren Kornverteilungskurven signifikant beeinflusst. Die zwischen Sedimentiergeschwindigkeit und den zementabhängigen Einflußgrößen durchgeführten Regressionen ergaben, daß nur der Wasserelementwert w und die spezifische Oberfläche O_{spez} als wirksame Einflußgrößen von Bedeutung sind.

Bei den betrachteten Zementsuspensionen handelte es sich um Suspensionen, bei denen infolge der hohen Feststoffkonzentration kein freies Sedimentieren möglich war^{*)}. Zur Bestimmung der Sedimentiergeschwindigkeit eignete sich daher der bereits von Kaiser verwendete mittlere Zementkornabstand δ (Gleichung (4)).

Bereits die Funktion der verschobenen quadratischen Parabel

$$v_{\text{sed}} = 0,3882 \cdot \delta^2 - 0,0435 \quad (10)$$

lieferte mit einem Bestimmtheitsmaß von 86 % einen recht brauchbaren Zusammenhang zwischen den obengenannten Einflußgrößen

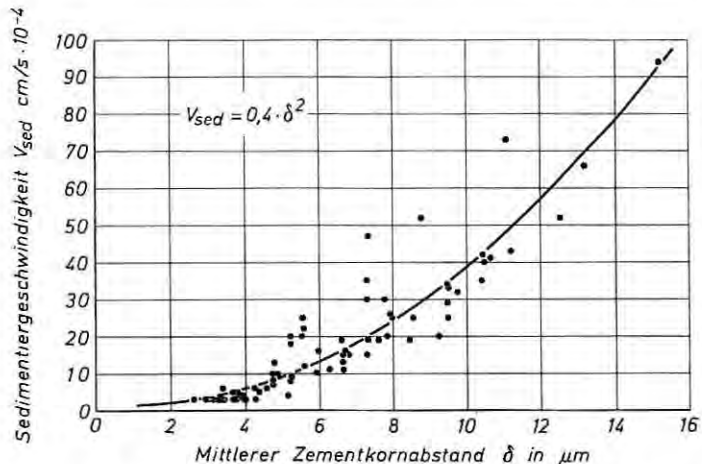


Bild 3 Sedimentiergeschwindigkeit v_{sed} in Abhängigkeit vom mittleren Zementkornabstand δ

^{*)} Unter „freiem Sedimentieren“ versteht man das Sedimentieren von Feststoff ohne gegenseitige Beeinflussung infolge Massenanziehung oder elektrokinetischen Kräften. Freies Sedimentieren kann bei einem Feststoffanteil von weniger als 0,3 Vol.-% in der Suspension angenommen werden.

und der Sedimentiergeschwindigkeit. Für die Praxis ergibt sich damit die in Bild 3 dargestellte Beziehung

$$v_{\text{sed}} = 0,4 \cdot \delta^2 \quad (11)$$

Diese Funktion stellt vor allem wegen des geringen Rechenaufwandes eine sinnvolle und ausreichend genaue Bestimmungsform der Sedimentiergeschwindigkeit dar, insbesondere da durch eine Erweiterung der Funktion durch ein lineares Glied oder auch mit Polynomen höherer Ordnung nur eine Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes von weniger als 1% erreicht wurde. Dies steht jedoch in keinem Verhältnis zu dem erhöhten Rechenaufwand.

6. Zusammenfassung

In den Jahren 1962 bis 1971 wurde im Otto-Graf-Institut der Technischen Universität Stuttgart und im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, der Einfluß von 19 verschiedenen Zementen unterschiedlicher Mahlfineinheit und chemischer Zusammensetzung auf das Fließverhalten und das Sedimentierverhalten von Zementsuspensionen mit 7 verschiedenen Wasserzementwerten von 0,5 bis 2,0 untersucht. Die Ergebnisse wurden von W. Kaiser sowie von J. Bonzel und J. Dahms veröffentlicht. Durch Regressionsgleichungen wurde aufbauend auf obigen Ergebnissen geprüft, welchen Einfluß die Eigenschaften des Zements auf die rheologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen mit Wasserzementwerten zwischen 0,6 und 2,0 ausüben. Die Auswertung ergab folgende Ergebnisse:

6.1. Die Fließfähigkeit von Zementsuspensionen, ausgedrückt durch die Viskosität η_d , kann ausreichend genau durch eine Funktion nach Gleichung (3) gekennzeichnet werden, in die der Wasserzementwert, der Wasseranspruch für die Normsteife des Zements und die Kornzusammensetzung eingehen. Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Zements wirkt sich nur begrenzt über den Wasseranspruch des Zements aus. Der die Viskosität beeinflussende Wasseranteil ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Wasserzementwert w und dem Wasseranspruch w_0 . Mit steigender Kornfeinheit wird die Fließfähigkeit bei konstantem Wasserzementwert geringer, d. h. die Viskosität der Suspension nimmt zu. Ein geeigneter Kennwert für die Kornzusammensetzung ist die spezifische Oberfläche nach DIN 1164 Blatt 4.

6.2. Die Bingham'sche Fließgrenze τ_0 für Zementsuspensionen läßt sich nicht eindeutig durch eine Funktion erfassen.

6.3. Die Stabilität von Zementsuspensionen mit Wasserzementwerten von 0,6 bis 2,0 läßt sich sehr genau durch eine Funktion mit den Variablen Wasserzementwert, Kornzusammensetzung und SiO_2 -Gehalt charakterisieren. Von den verschiedenen Kornfraktionen des Zements sind vor allem die Fraktionen $\leq 8 \mu_m$ für das Sedimentieren von Bedeutung. Mit steigendem Anteil verringert sich die Sedimentierneigung. Die Ermittlung der Stabilität unter Einbeziehung der spezifischen Oberfläche ergibt zwar eine geringfügig schwächere Abhängigkeit, jedoch sollte man der größeren

physikalischen Aussagekraft wegen dieser Funktion den Vorzug geben.

Zemente mit hohem SiO_2 -Gehalt neigen mehr zum Sedimentieren als solche mit niedrigem SiO_2 -Gehalt. Dieser Einfluß ist jedoch durch entsprechende Änderung der Kornzusammensetzung, d. h. Vergrößerung des Kornanteils $\leq 8 \mu\text{m}$ bzw. der spezifischen Oberfläche, ausgleichbar.

6.4. Die Sedimentiergeschwindigkeit läßt sich mit ausreichender Genauigkeit in Abhängigkeit vom mittleren Zementkornabstand darstellen. Mit steigender Kornfeinheit wird die Sedimentiergeschwindigkeit geringer, mit wachsendem Wasserelementwert nimmt sie sehr schnell zu.

SCHRIFTTUM

- [1] Kaiser, W.: Die technologischen Eigenschaften von Zementsuspensionen und die daraus ableitbaren Folgerungen für die Praxis im Tiefbau. Dissertation, Univ. Stuttgart 1968; ebenso Schriftenreihe Otto-Graf-Institut der Universität Stuttgart, H. 42, Stuttgart 1969.
- [2] Bonzel, J., und J. Dahms: Über den Einfluß des Zements und der Eigenschaften der Zementsuspensionen auf die Injizierbarkeit in Lockergesteinsböden. Beton-Verlag, Düsseldorf 1972; ebenso beton 22 (1972) H. 3, S. 103/110, und H. 4, S. 156/166; ebenso Betontechnische Berichte 1972, Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 51/101.
- [3] Flatten, H.: Untersuchungen über das Fließverhalten von Zementleim. Dissertation, TH Aachen 1973.
- [4] Wesche, K., und W. vom Berg: Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton. beton 23 (1973) H. 1, S. 21/27; ebenso Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 21/40.
- [5] Papadakis, M.: Rhéologie des suspensions du ciment. Révue des Matériaux de Construction, Nr. 476 (1955) S. 121/137.
- [6] Walz, K., und H. Mathieu: Der Einfluß des Zements auf die Eigenschaften von Zementsuspensionen zum Auspressen von Hohlräumen. beton 11 (1961) H. 6, S. 411/420; ebenso Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 177/198.
- [7] Bombled, J. P.: Rhéologie du béton frais. Révue des Matériaux de Construction, Nr. 591 (1964) S. 339/351.
- [8] Hedinger, M.: Messungen rheologischer Eigenschaften. Contraves Industrie-Produkte GmbH, Stuttgart, Bulletin T 990 d – 69/2.
- [9] Burgers, J. M., und G. W. Scott-Blair: Report on the principles of rheological nomenclature. Proc. Int. Rheological Congress 1948, Amsterdam 1949.
- [10] Umstätter, H.: Einführung in die Viskosimetrie und Rheometrie. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1952.
- [11] Van Wazer, J. R., J. W. Lyons, K. Y. Kim und R. E. Cowell: Viscosity and flow measurement. Interscience Publishers, New York/London 1963.
- [12] Dixon, W. J. (Ed.): BMD – Biomedical computer programs. 2. Aufl., University of California Press, Berkeley/Los Angeles 1968.
- [13] Terrier, P., und M. Moreau: Examens au microscope de pâtes de ciment portland. Révue des Matériaux de Construction Nr. 584 (1964) S. 129/137.
- [14] Pierzschala, H.: Rheologische Eigenschaften von frischen Zementpasten aus Portland-Zementen. 2. Intern. Symposium für dampfgehärtete Calcium-Silikat-Baustoffe, Hannover, 25.–28. März 1969, Papier Nr. 55.
- [15] Vorläufiges Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau. beton 20 (1970) H. 1, S. 19/22; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 21/32.