

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 68 (1976)  
**Heft:** 11-12

**Artikel:** Die Teilchengrösseverteilung als charakteristische Schlammkenngrösse  
**Autor:** Luggen, E. / Widmer, F. / Wuhrmann, K.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-939307>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.05.2025

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

E. Luggen, F. Widmer und K. Wuhrmann

## 1. Einleitung

In Abwasserreinigungsanlagen fällt Frischschlamm mit einem Wassergehalt von 95 bis 99 Massenprozenten an. Sofern dieser Schlamm nicht direkt der Landwirtschaft als Düngemittel zugeführt werden kann, ist eine Volumenverminderung, d. h. eine teilweise Entwässerung, wesentliche Voraussetzung für die Weiterbehandlung wie Stapelung, Kompostierung, Deponie oder Verbrennung des Schlammes. In der Praxis zeigt es sich immer wieder, dass Schlamm von scheinbar gleicher Art, Herkunft und Zusammensetzung das Wasser verschieden stark bindet und demzufolge einen sehr unterschiedlichen Entwässerungsaufwand erfordert. Bis anhin ist noch nicht genau geklärt, worauf dies zurückzuführen ist. Aufgrund von Erfahrungen mit Suspensionen und mineralischen Schlämmen muss angenommen werden, dass die Teilchengrösseverteilung und eventuell das Fliessverhalten auch bei Klärschlamm einen wesentlichen Einfluss auf dessen Entwässerbarkeit haben. Im Rahmen des EUROCOOP-COST Projektes 68 (European Cooperation and Coordination in the field of Scientific and Technical Research) wurde daher angeregt, die Teilchengrösseverteilung und das Fliessverhalten von Klärschlamm näher zu untersuchen.

## 2. Phänomenologische Beschreibung von Klärschlamm

Klärschlamm setzt sich aus toten und lebenden Kleinstlebewesen, Pflanzenresten, Schleimstoffen, Sandpartikeln und dergleichen zusammen. Diese Schlammstoffe sind in Wasser suspendiert, das mit Salzen, Phosphaten und gelösten organischen Substanzen usw. angereichert ist. Mikroskopische Betrachtungen zeigen, dass diese Teilchen unregelmässige Formen aufweisen (Bild 1) und einen sehr breiten Grössebereich von einigen Millimetern bis zu Bruchteilen von Mikrometern umfassen. Die Schlammteilchen sind

<sup>1)</sup> Auszug aus der Dissertation Nr. 5740, ETH Zürich (1976) von E. Luggen [1].

oft nicht starr und treten häufig als leicht zerstörbare Koagulate oder Flocken in Erscheinung. Ihre mittlere Dichte liegt bei etwa 2000 kg/m<sup>3</sup>. Die einzelnen Teilchen weisen aber grosse Dichteunterschiede auf, weil Pflanzenreste, Bakterienstämme usw. im Schlamm mit Wasser gefüllt sind und demzufolge vornehmlich kleinere scheinbare Dichten aufweisen als die mittels Volumeter aus dem Trockenrückstand ermittelte Dichte.

Aufgrund dieser Eigenschaften der Schlammteilchen resultieren für ein und denselben Schlamm verschiedene Ergebnisse, je nach Messmethode, die zur Messung der Teilchengrösse angewendet wird. So liefert etwa die Sedimentationsanalyse infolge Koagulation der Teilchen während der Messung gegenüber der Siebanalyse eine deutlich in Richtung von grossen Teilchen verschobene Verteilungskurve mit relativ wenig Feinanteil. Welche der beiden genannten Verteilungen nun die richtige ist, hängt vor allem von deren Anwendung ab, denn beide geben die Teilchengrösseverteilung des Schlammes unter spezifischen Bedingungen aussagekräftig wieder. So ist z. B. die Teilchengrösseverteilung, wie sie die Sedimentationsanalyse liefert, als Hilfsgrösse zur Auslegung eines Dekanters sicher besser geeignet als das Ergebnis der Siebanalyse, da sie direkt auf der Sinkgeschwindigkeit der Teilchen beruht. Zur Bildung charakteristischer Schlammkenngrössen eignet sich hingegen eher die Verteilung der Siebanalyse, da diese auf der von der Teilchendichte unabhängigen Abmessung der Teilchen beruht und ihre Ergebnisse — wie sich aus den Messungen ergab — besser reproduzierbar sind.

## 3. Siebung von Klärschlamm

Die Teilchengrösseverteilung von mehreren Schlämmen wurde auf einer planschwingenden JEL-(J. Engelsmann Ludwigshafen) Siebmaschine mit dem Siebsatz der Maschinenweiten: 1000, 500, 250, 160, 100, 63 und 40  $\mu\text{m}$  ermittelt. Als Siebhilfen dienten je 4 ca. 1 cm<sup>3</sup> grosse Gummiwürfel auf den Sieben mit den Maschenweiten: 160, 100, 63 und 40  $\mu\text{m}$ .

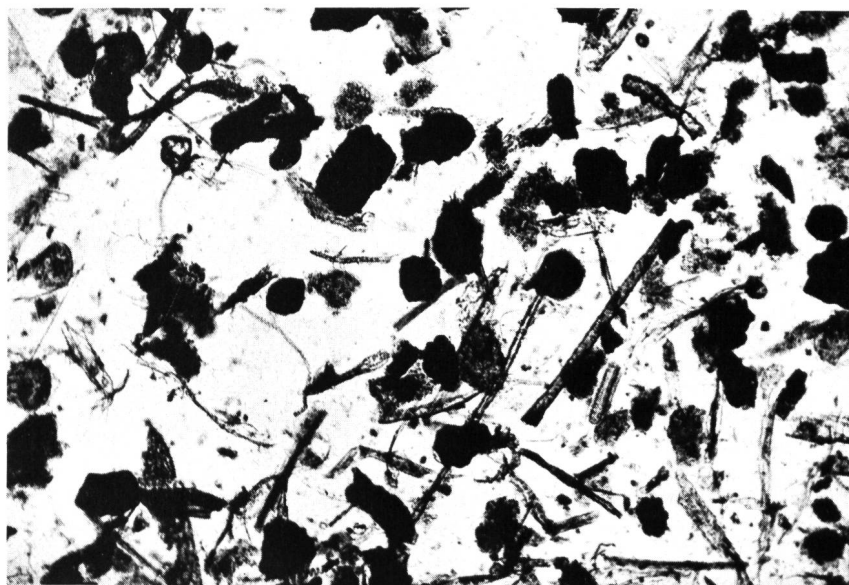


Bild 1. Siebrückstand auf einem 100- $\mu\text{m}$ -Sieb, etwa 60mal vergrössert.

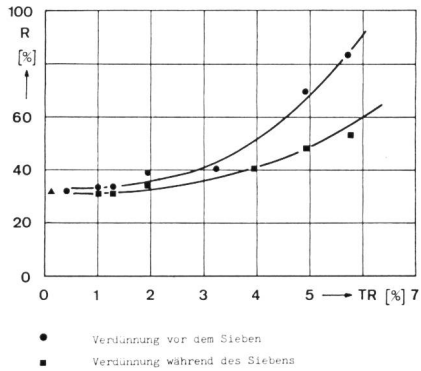


Bild 2, links. Einfluss der Verdünnung auf den Siebrückstand, ausgedrückt durch die Summe aller Siebrückstände R in Abhängigkeit des Trockenrückstandes TR.

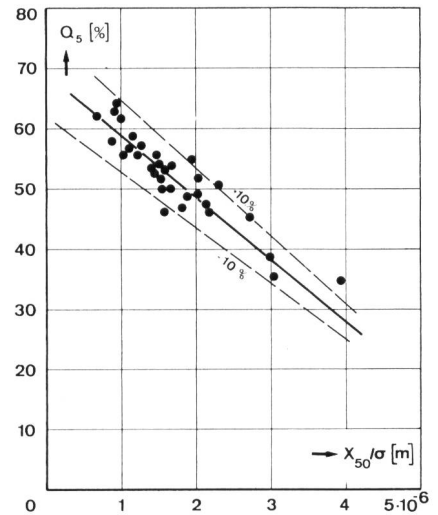


Bild 5, rechts. Zusammenhang zwischen dem Siebdurchgang  $Q_5$  und dem Quotienten  $(x_{50}/\sigma)$  aus der mittleren Teilchengröße und der Standardabweichung  $\sigma$ .

Versuche zeigten, dass unverdünnter Schlamm nicht siebbar ist, da der Feststoff vornehmlich auf den ersten Sieben zurückgehalten wird und diese verstopft. Durch Verdünnen des Schlammes hingegen werden die feinen Teilchen aus dem Schlamm herausgewaschen und im Siebsatz in mehrere Grösseklassen aufgeteilt.

Die Verdünnung kann vor oder während des Siebens erfolgen. Im ersten Fall gelangt mit Wasser vermischter Schlamm aus einem Rührgefäß kontinuierlich auf den Siebsatz. Besondere Aufmerksamkeit ist der Dosierung zu schenken, da bei zu grossem Zulauf auf den feineren Sieben ein Rückstau entsteht, der zu Rekoagulation und damit zu Verstopfung der Siebe führen kann. Ein Sieb wirkt dann nicht mehr als definierte Trenneinrichtung, sondern als Filterträger für den sich darauf aufbauenden Kuchen. Dieser Effekt konnte unabhängig vom Feststoffgehalt des aufgegebenen Schlammes beobachtet werden. Hingegen hat neben der Art des Schlammes auch die total pro Quadratzentimeter Siebfläche aufgegebene Feststoffmenge einen bedeutenden Einfluss.

Bei der Verdünnung während der Siebung wird eine bestimmte Menge Schlamm auf den Siebsatz gegeben und dann mit Wasser durch die Siebe gespült.

In Bild 2 ist die Summenkurve der Siebrückstände in Abhängigkeit der Verdünnung, ausgedrückt durch den Trockenrückstand, TR, dargestellt. Der Trockenrückstand wird dabei auf die Masse des Ausgangsschlammes bezogen, unabhängig, ob das Wasser vor der Siebung oder als Spülwasser während der Siebung beigegeben wurde. Aus dem Verlauf der Rückstandskurven ist ersichtlich, dass die günstigste Verdünnung bei 1 bis 1,5 % Trockenrückstand liegt. Bei diesem Verdünnungsgrad führen beide Verfahren auf gleiche, auch durch weitere Verdünnung nicht merklich ändernde Resultate, und eine stärkere Verdünnung würde nur den Volumenstrom durch die Siebe unnötig vergrössern. Die unterschiedlichen Siebdurchgänge bei kleinerer Verdünnung rühren vor allem von der schwierigen Dosierbarkeit des vor der Siebung verdünnten Schlammes auf den Siebsatz her.

Aus Bild 2 ist weiter ersichtlich, dass nur rund 30 % des aufgegebenen Feststoffgehaltes auf dem Siebsatz zurückbleiben, d.h. dass 70 % nicht analysiert werden. Eine Erweiterung der Analyse auf kleinere Fraktionen unter  $32 \mu\text{m}$  war mit dieser Siebapparatur wie auch mit einer vertikal schwingenden Haver-Boecker Siebmaschine trotz Anwendung von oberflächenaktiven Substanzen nur in Ausnahmefällen

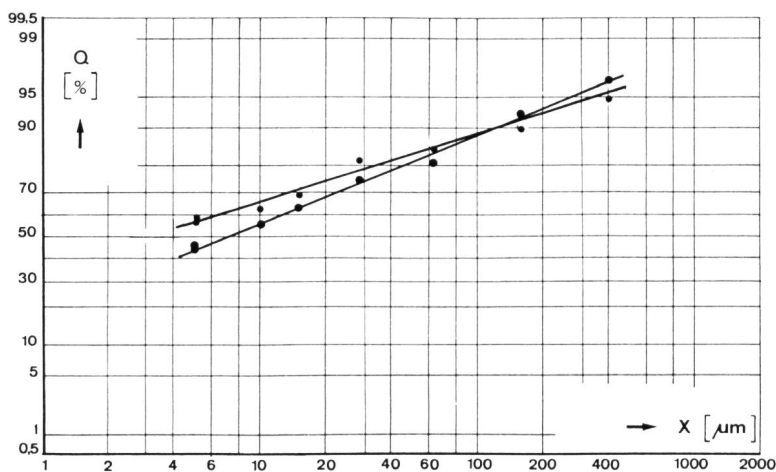


Bild 3. Siebdurchgangssummenkurve von zwei verschiedenen Faulschlämmen im log. Wahrscheinlichkeitspapier.

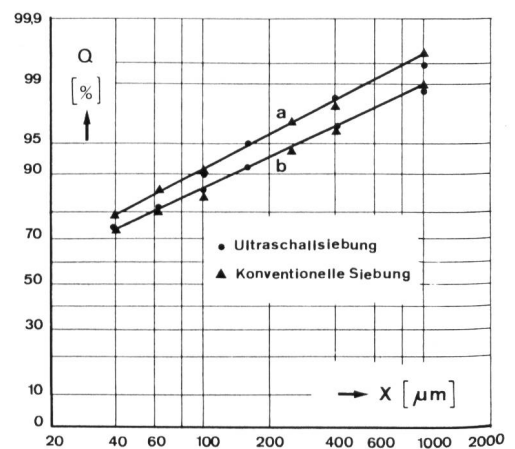


Bild 4. Vergleich der Siebdurchgangssummenkurve bei Ultraschallsiebung und konventioneller Siebung.

fällen möglich. Erst die Siebung im Ultraschallbad ermöglichte die Ausdehnung des Messbereiches für alle Schlämme auf 5  $\mu\text{m}$  und damit auf etwa 50 % des Feststoffgehaltes.

#### 4. Siebung des Klärschlammes im Ultraschallbad

Die Siebanlage besteht aus einer Ultraschallwanne mit Generator Typ TS 100 der Firma Elga SA, Biel. Das Wasser in der Wanne wird kontinuierlich erneuert und der Spiegel auf konstantem Niveau gehalten. Zum Sieben wird je ein Sieb in die Wanne gehängt und mit einer bestimmten Menge Schlamm beladen. Das Wasser in der Wanne überträgt die Schwingungen (25 kHz) an den Schlamm und lockert diesen auf. Der Feinanteil wird alsdann mit entmineralisiertem Wasser durch das Sieb gespült und gelangt über die Absaugvorrichtung aus der Ultraschallwanne. Getrocknet und gewogen wird nur der Siebrückstand. Für die Siebung kamen DIN-Normsiebe mit den Maschenweiten 1000, 400, 160, 63, 28, 15, 10 und 5  $\mu\text{m}$  zur Anwendung. (Die Siebe mit Maschenweite 15, 10 und 5  $\mu\text{m}$  sind galvanisch hergestellte Mikro-Präzisionsiebe der Firma Veco Zeefplattenfabriek, Eerbeek, Holland.)

Folgende spezifische Beladung der Siebe (ausgedrückt als Menge Feststofftrockenrückstand) erwies sich als günstig:

Sieb [ $\mu\text{m}$ ]	400	160	63	28	15	10	5
Beladung [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]	63	45	35	27	22	18	9

Um möglichst gleichmässige Ausgangsproben zu erhalten, wurde der Schlamm vor der Analyse auf einem 2-mm-Sieb abgesiebt, um allfällig vorkommende grosse Teilchen wie Fruchtkerne, Staniolpapier usw. zu entfernen.

Pro Sieb wird solange gesiebt bis das Spülwasser klar aus dem Sieb herausfliesst. Beim 400- $\mu\text{m}$ -Sieb tritt dies nach 2 bis 3 Minuten ein. Die Siebung auf dem 5- $\mu\text{m}$ -Sieb dauert rund 20 Minuten.

#### 5. Schlammkenngrössen der Teilchenverteilung und Ergebnisse der Siebanalyse

Die Teilchengrösseverteilung von 32 kommunalen Schlämmen aus 8 verschiedenen Abwasseranlagen wurde mittels Ultraschallsiebung analysiert und der prozentuale Siebdurchgang über der Siebmaschenweite aufgetragen. Die Resultate zeigen, dass die Messwerte von 81 % der untersuchten Schlämme im logarithmischen Wahrscheinlichkeitspapier in etwa auf einer Geraden liegen und 19 % zumindest durch eine Gerade angenähert werden können (Bild 3). Alle untersuchten Schlämme weisen eine ähnliche Verteilung auf und bei 70 % der Schlämme sind zwischen 50 und 60 % des Feststoffgehaltes (Trockenrückstand) im Teilchenbereich kleiner als 5  $\mu\text{m}$  zu finden.

In Bild 4 sind der Siebdurchgang eines aerob stabilisierten Schlammes (Kurve a) und einer aus 4 Faulschlämmen zusammengesetzten Mischung (Kurve b) eingetragen. In beiden Fällen stimmen die Ergebnisse aus Ultraschall und konventioneller Siebung (Verdünnung 1 %) gut überein. Die Befürchtung, dass Schlammteilchen durch niederfrequenten Ultraschall stärker zerstört werden als bei konventionellem Sieben ist also unbegründet.

Die in Bild 3 dargestellte Teilchengrösseverteilungskurve eignet sich in der Form nur bedingt als Schlammkenngrösse. Es ist daher sinnvoller, diese durch signifikante Mittelwerte zu ersetzen, die sogenannten Momente der Verteilung. Als K-tes Moment  $M_K$  einer Verteilung wird das

Integral aus der K-ten Potenz der Teilchengrösse  $x$  und der Verteilungsdichte  $q(x)$  definiert

$$M_K = \int x^K q(x) dx \quad (1)$$

Aufgrund des speziellen Achsmaßstabes des logarithmischen Wahrscheinlichkeits-Netzes können das erste und zweite Moment direkt ermittelt werden. Das erste Moment gibt die Lage der Verteilungskurve (Mittelwert  $x_{50}$ ) und das zweite dessen Steigung (Varianz bzw. Standardabweichung  $\sigma$ ) an. Als weitere, zwar willkürlich gewählte, aber einfach zu messende Kenngrösse hat sich der Siebdurchgang  $Q_5$

$$Q_5 = \frac{\int_{x_{\min}}^{5 \mu\text{m}} q(x) dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} q(x) dx} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

durch das 5  $\mu\text{m}$  Sieb erwiesen.

Zur Charakterisierung der Teilchengrösseverteilung des Schlammes stehen somit die 3 Kenngrössen mittlerer Teilchendurchmesser  $x_{50}$ , Standardabweichung  $\sigma$  und der Siebdurchgang  $Q_5$  zur Verfügung.

Die Reproduzierbarkeit des Siebdurchganges  $Q_5$  ist besser als  $\pm 4$  %, während bei der Messung der mittleren Teilchengrösse  $x_{50}$  und der Standardabweichung  $\sigma$  doch Streuungen bis zu  $\pm 20$  % bzw.  $\pm 10$  % auftreten können.

In Bild 5 ist der Siebdurchgang  $Q_5$  als Funktion des Quotienten  $x_{50}/\sigma$  aus der mittleren Teilchengrösse und der Standardabweichung  $\sigma$  aufgetragen. Die Darstellung zeigt, dass bei allen untersuchten Schlämmen zwischen diesen an sich unabhängigen Grössen ein Zusammenhang besteht, und zwar derart, dass mit zunehmendem Quotienten  $x_{50}/\sigma$  der Siebdurchgang kleiner wird. Diese Beziehung beruht auf der Ähnlichkeit aller gemessenen Verteilungskurven und dem relativ engen Variationsbereich der Standardabweichung  $\sigma$ . Zur Charakterisierung der Teilchengrösseverteilung von Klärschlamm können folglich der Quotient  $x_{50}/\sigma$  oder der einfacher zu bestimmende Siebdurchgang  $Q_5$  herangezogen werden.

#### 6. Zusammenhang zwischen Teilchengrösseverteilungsparametern und anderen Schlammkenngrössen

Die erwähnten Grössen  $\sigma$ ,  $x_{50}$  und  $Q_5$  wurden systematisch mit anderen Schlammkenngrössen wie dem Filtrationswiderstand der Capillary Suction Time, dem Glühverlust und rheologischen Kenngrössen wie der Schlammviskosität und der spezifischen thixotropen Leistung korreliert, um eventuell vorhandene Abhängigkeiten aufzuzeigen [1]. Dabei musste festgestellt werden, dass gerade der spezifische Filtrationswiderstand und die Capillary Suction Time nicht wie angenommen signifikant von der Korngrösseverteilung abhängig sind. Der Grund für das beobachtete Fehlen eines statistisch gesicherten, für alle untersuchten Schlämme gültigen Zusammenhanges zwischen Teilchengrösse und Filtrationswiderstand mag zum Teil am betrachteten engen Teilchengrössebereich liegen. Andererseits ergaben Messungen des Druckabfalles über dem Filterkuchen, dass das bei der Filtration in der Nutsche angelegte Druckgefälle nicht, wie erwartet — und der Filtrationstheorie zugrundegelegt — im aufgebauten Kuchen abgebaut wird, sondern primär im Filterpapier, in dessen Poren sich mikroskopisch kaum sichtbare Schlammfraktionen (Schleimstoffe) anlagern und diese verstopfen.

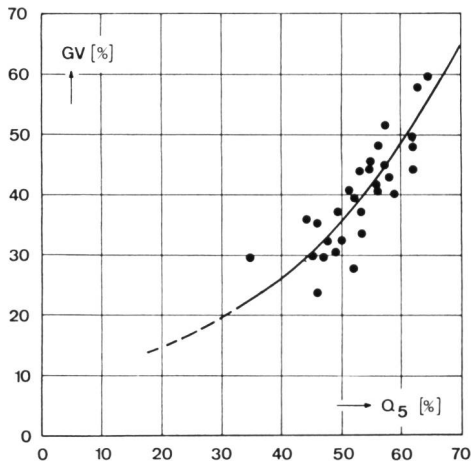


Bild 6. Der Glühverlust GV nimmt mit zunehmendem Siebdurchgang  $Q_5$  zu, d. h. dass die organischen Schlammanteile vor allem im Bereich kleiner als  $5 \mu\text{m}$  zu finden sind.

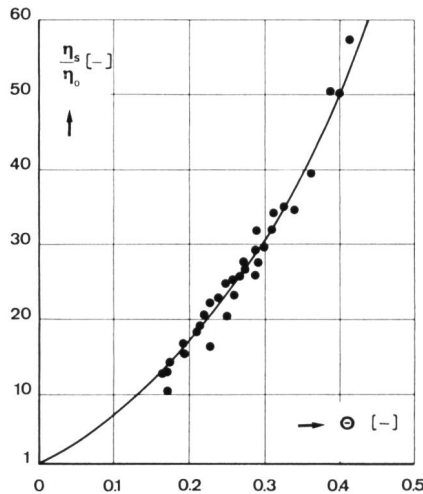


Bild 7. Abhängigkeit der relativen Schlammviskosität  $\eta_s/\eta_o$  vom volumetrischen Sedimentanteil  $\Theta$ .

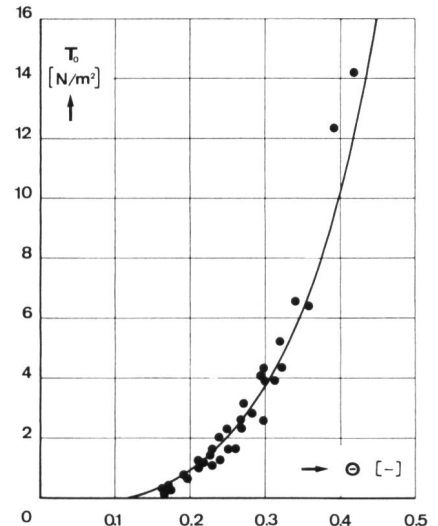


Bild 8. Abhängigkeit der Fließgrenze  $\tau_o$  vom volumetrischen Sedimentanteil  $\Theta$ .

In Bild 6 ist der Glühverlust GV über dem Siebdurchgang  $Q_5$  aufgetragen. Schlämme mit grossem Siebdurchgang  $Q_5$ , also viel Feinanteil, weisen danach einen grossen Glühverlust GV auf. Durch diesen Zusammenhang wird angedeutet, dass die organischen Anteile vornehmlich in den Schlammfraktionen mit Teilchenabmessungen von weniger als  $5 \mu\text{m}$  zu finden sind, in jenen Schlammfraktionen also, die den spezifischen Filtrationswiderstand dominierend beeinflussen. Die Vermutung, dass damit der Glühverlust, der ein Mass für die organischen Anteile im Schlamm ist, qualitativen Aufschluss geben könnte über den Anteil dieser Fraktionen, wurde durch das Experiment nicht bestätigt.

Die rheologischen Kenngrössen Viskosität  $\eta_s$  und Fließgrenze  $\tau_o$  des Schlammes werden überwiegend durch das Volumen, das der Feststoff in Form von Koagulaten und Flocken im Schlamm einnimmt, bestimmt. Als mögliches Mass für dieses Wirkvolumen wurde der sogenannte volumetrische Sedimentanteil definiert. Er ist gleich dem Sedimentanteil des Schlammes, der nach 30minütiger Zentrifugation bei 5000facher Erdbeschleunigung anfällt.

Wie die empirisch ermittelten Gleichungen (3) und (4) zeigen, können die Fließgrenze  $\tau_o$  und die relative, d. h. auf die Viskosität  $\eta_o$  des Wassers bezogene Viskosität  $\eta_s$  des Schlammes beim Umschlagpunkt von der laminaren zur turbulenten Strömung allein auf diesen Sedimentanteil zurückgeführt werden (Bilder 7 und 8).

$$\frac{\eta_s}{\eta_o} = 1 + \frac{57 \Theta}{1 - 1,23 \Theta^{0,98}} \quad (3)$$

$$\tau_o = 2,72 \cdot 10^2 \Theta^{3,56} \quad (4)$$

Der volumetrische Sedimentanteil  $\Theta$  lässt sich andererseits durch folgende empirische Gleichung als Funktion der Teilchengrösseverteilung ( $\sigma/x_{50}$ ) und des Trockenrückstandes TR darstellen:

$$\Theta = 5,7 \left( \frac{\text{TR}}{\rho_{\text{TR}}} \right)^{0,52} \left( \frac{\sigma}{x_{50}} \right)^{0,12} \quad (5)$$

Somit nehmen sowohl Fließgrenze  $\tau_o$  als auch Viskosität  $\eta_s$  mit zunehmendem Quotienten aus Standardabweichung und mittlere Teilchengrösse zu. Zwischen der Thixotropiezahl  $Th$ , die als Mass für das thixotrope Verhalten des Schlammes eingeführt wurde, und der Teilchengrösse konnte keine Beziehung gefunden werden.

#### Zusammenfassung

Durch Siebung im Ultraschallbad konnte Klärschlamm bis zu kleinsten Teilchen von  $5 \mu\text{m}$  Durchmesser analysiert werden. Eine Abhängigkeit der Teilchengrösseverteilung vom Filtrationswiderstand war nicht feststellbar, hingegen zeigte es sich, dass zwischen der Teilchengrösseverteilung und dem Fließverhalten des Schlammes Zusammenhänge vorhanden sind.

#### Bezeichnungen

R	Siebrückstand	[%]
TR	Trockenrückstand	[%]
$Q_5$	Siebdurchgang durch das $5\text{-}\mu\text{m}$ -Sieb	[%]
a	Umrechnungsfaktor	[ $10^6/\text{m}$ ]
q(x)	Verteilungsdichte	[ $\text{m}^{-1}$ ]
$x_{50}$	mittl. Teilchendurchmesser bzw. Masse	[m]
$\tau_o$	Fließgrenze	[ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
$\eta_s$	Viskosität des Schlammes beim Umschlagpunkt von laminarer zu turbulenter Strömung	[ $\text{Ns}/\text{m}^2$ ]
$\eta_o$	Viskosität des Wassers	[ $\text{Ns}/\text{m}^2$ ]
$\Theta$	volumetrischer Sedimentanteil	[-]
$\sigma$	Standardabweichung	[-]
$\rho_{\text{TR}}$	Dichte des Trockenrückstandes	[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

#### Literatur:

- [1] E. Luggen: Charakterisierung von Klärschlamm aufgrund des Fließverhaltens und der Teilchengrösseverteilung. Diss. Nr. 5740 ETH Zürich (1976).

Adressen der Verfasser: Dipl. Ing. E. Luggen, ETH, und Prof. Dr. F. Widmer, Institut für Verfahrenstechnik, Eidg. Technische Hochschule Zürich, Sonneggstrasse 3, 8092 Zürich; dipl. Ing. ETH K. Wuhrmann, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, EAWAG, 8600 Dübendorf.