

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ  
KLEINERE MITTEILUNGEN

Nr. 50

**Einfluss der Beschallung auf Körnung,  
rheologische Eigenschaften, Sedimentations-  
verhalten und Injizierbarkeit wässriger  
Opalit-Suspensionen**

von

M. MÜLLER-VONMOOS und F. JENNY

## Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Herr Dr. M. Müller legte der Kommission ein Manuskript „Einfluss der Beschallung auf Körnung, rheologische Eigenschaften, Sedimentationsverhalten und Injizierbarkeit wässriger Opalit-Suspensionen“, verfasst von Max Müller-Vonmoos und Felix Jenny, vor. Die Untersuchung befasst sich mit neuartigen Versuchen zur Verbesserung der Eigenschaften des aus Opalinuston gewonnenen Produktes „Opalit“, das für Dichtungs- und Injektionszwecke von grosser Bedeutung ist. Die Kommission nahm die Arbeit für die „Kleineren Mitteilungen“ entgegen und dankt den Autoren vielmals für ihre interessante Untersuchung.

Für den Inhalt von Text und Figuren sind die Autoren allein verantwortlich.

Zürich, September 1970.

Der Präsident der  
Schweiz. Geotechnischen Kommission

Prof. F. DE QUERVAIN

Erscheint gleichzeitig in  
„Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen“  
Band 50, Heft 2, 1970

# **Einfluss der Beschallung auf Körnung, rheologische Eigenschaften, Sedimentationsverhalten und Injizierbarkeit wässriger Opalit-Suspensionen\*)**

Von *Max Müller-Vonmoos* und *Felix Jenny* (Zürich)\*\*)

Mit 7 Figuren und 3 Tabellen im Text

## **Abstract**

Opalinuston forms one of the most important occurrences of clay in Switzerland. Predried and ground it is available commercially as "Opalit" and is used in earth works principally as sealing material. Wider use in earth works would be possible if, above all, the proportion of the fine fractions and the stability of Opalit-suspensions could be increased. This can be achieved by short ultrasonic treatment using a frequency of 20 kHz (20 000 cps). The fraction  $> 63 \mu$  falls from 24 to 2% and the fractions  $< 20 \mu$  and  $< 2 \mu$  rise from 56 to 95% and from 21 to 58% respectively. This is mainly caused by the breaking of calcite bridges between the flake-shaped minerals, resulting in the disintegration of the aggregates into single grains. This greatly increases the rheological properties, shifts the transition from laminary to turbulent flow towards higher pressures and significantly improves the stability of the suspensions and makes it considerably more suitable for injections. The influence on the Atterberg limits is relatively small, because the aggregates will be largely destroyed during kneading the samples.

Electronic production of ultrasonic is too expensive for large scale technical preparation of Opalit-suspensions. High frequencies can, however, be produced less expensively by sonic motors (10 kHz, 10 000 cps). Because aggregates can be decomposed by low cavitation energies, it should be proved whether such suspensions can be prepared by using ultrasonic pipes.

## **EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG**

Der Opalinuston bildet eines der bedeutendsten Tonvorkommen der Schweiz. Seine Ablagerungen sind sehr gleichförmig und können im Tagebau

---

\*) Erscheint gleichzeitig als „Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleinere Mitteilungen Nr. 50“.

\*\*\*) Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH, Zürich.

gewonnen werden. Vorgetrocknet und gemahlen kommt er als „Opalit“ (Tonwarenfabrik Holderbank AG) in den Handel. In dieser Form wird er im Erdbau vorwiegend für Dichtungszwecke verwendet. Zum ersten Mal setzte man Opalit in grossen Mengen beim Bau des Staudammes Göschenenalp (Schüttvolumen 9 Millionen m<sup>3</sup>) ein. Dabei wurde der Damm-Kern mit 215 000 t Opalit abgedichtet.

Eine weitgehendere Verwendung von Opalit im Erdbau wäre möglich, wenn Feinanteil, Viskosität und Fliessgrenze erhöht und vor allem die Sedimentationsstabilität verbessert werden könnten. Es stellte sich also die Aufgabe, die oben erwähnten Eigenschaften des Opalit durch grosstechnisch anwendbare und wirtschaftliche Massnahmen zu verbessern.

Der Tonanteil ( $< 2 \mu$ ) im Opalit wird meistens mit etwa 20% angegeben. Nach Entkarbonatung steigt er auf über 50%. Das stimmt auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen überein, nach denen der Opalit wesentlich feinkörniger ist, als allgemein angenommen wird. Eine Entkarbonatung kommt jedoch grosstechnisch wegen zu hoher Kosten nicht in Frage.

In den letzten Jahren wurde verschiedentlich von der erfolgreichen Anwendung des Ultraschalls zur Dispergierung tonreicher Proben berichtet (MATTIAT, 1962 und 1964; EDWARDS und BREMNER, 1965; FAGNOUL, 1966). Wir untersuchten deshalb den Einfluss der Beschallung auf Körnung, rheologische Eigenschaften, Sedimentationsverhalten und Injizierbarkeit von Opalit-Suspensionen und prüften die heute bestehenden Möglichkeiten einer grosstechnischen Aufbereitung mit Ultraschall.

## METHODEN

### **Einfluss der Standbeschallung auf die Körnung**

Alle Proben wurden mit einem Ultraschall-Gerät der Firma Schoeller (Frankfurt a. M.) beschallt. Es besteht aus dem Generator zur Erzeugung der Hochfrequenzwechselfeldspannung, dem magnetostriktiven Geber zur Umwandlung der Spannung in mechanische Schwingungen der Frequenz 20 kHz und dem Koppelschwinger zur Übertragung der Schwingungen auf die verschiedenen Exponentialvorsätze. Nach Angaben des Herstellers sollen etwa 100 Watt/cm<sup>2</sup> Geber abgegeben werden. Die Amplitude lässt sich mit einem Leistungsregler verändern und wurde auf induktivem Wege wie folgt gemessen. Ein am Koppelschwinger befestigter ferromagnetischer Stift tauchte entsprechend der Schwingungsamplitude in zwei gekoppelte und mit einer Hochfrequenzwechselfeldspannung von 100 kHz gespiesene Spulen. Dabei wurden Kopplung und dementsprechend Hochfrequenzamplitude verändert. Man eichte die Eintauchtiefe mit einer Tastschublehre. Durch Ausmessen der auf

dem Kathodenstrahloszillographen abgebildeten Hochfrequenzamplitude liess sich mit Hilfe der oben erwähnten Eichung die halbe Schwingungsweite der Stufen des Leistungsreglers bestimmen und man erhielt folgende Werte:

Leistungsstufe 3	etwa	9 $\mu$
		14 $\mu$
		21 $\mu$
		28 $\mu$
Maximum		34 $\mu$

Wenn nicht anders angegeben, wurden 5 g Opalit und 50 cm<sup>3</sup> 0,01-proz. Calgon (Natriumhexametaphosphat) in einem 100-cm<sup>3</sup>-Becherglas (innere Weite 4,5 cm) 3, 6 und 12 Min. auf Leistungsstufe 3, 5, 7, 9 und Maximum beschallt. Die kreisförmige Abstrahlfläche des Exponentialvorsatzes hatte einen Durchmesser von 3 cm und war etwa 1 cm über dem Boden des Becherglases. Zum Vergleich wurde eine unbeschallte Probe in 0,01-proz. Calgon über Nacht stehen gelassen und dann 1 Stunde geschüttelt.

Nach der Beschallung spülte man die Suspension mit 0,01-proz. Calgon in einen Pipetten-Apparat und bestimmte den Anteil 20–2 und < 2  $\mu$ . Den Anteil > 63  $\mu$  erhielt man durch nasse Siebung. Die ofentrockenen (105°) Fraktionen wurden in Prozent der auf Ofentrocknung umgerechneten Einwaage angegeben.

Um den Einfluss des Stehenlassens in Wasser auf die Beschallung zu prüfen, wurden 5 g Opalit 7 Tage in 50 cm<sup>3</sup> entsalztem Wasser stehen gelassen und dann 1 Stunde geschüttelt bzw. 3 Min. auf Stufe 3, 5, 7, 9 und Maximum beschallt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Umwandlung von Opalit in die Na-Form (Aktivierung), wurden 5 g Opalit in 50 cm<sup>3</sup> verdünnter Natronlauge (pH 9), die 0,5 g Natriumchlorid enthielt, suspendiert und während 8 Stunden alle 30 Min. von Hand vorsichtig umgeschwenkt. Nach Sedimentation über Nacht hebte man die überstehende klare Lösung ab, gab 40 cm<sup>3</sup> 0,01-proz. Calgon zu und schüttelte 1 Stunde bzw. beschallte 3 Min. auf Stufe 3, 5, 7, 9 und Maximum. Der in der Suspension verbliebene NaCl-Gehalt wurde flammphotometrisch bestimmt und bei der Auswertung der Pipetten-Analyse berücksichtigt.

#### **Einfluss der Durchlaufbeschallung auf Körnung, rheologische Eigenschaften und Sedimentationsverhalten**

Die Suspensionen wurden mit einer Schlauchquetschpumpe durch einen kegelförmigen, 5 mm breiten, oben vom Exponentialvorsatz begrenzten Spalt einer wassergekühlten Beschallungskammer (Fig. 1) gedrückt. Es wurden folgende Opalit-Suspensionen verwendet:

Opalit g	Leitungswasser g	Wassergehalt %*	Opalit- Konzentration %**
250	2000	800	11
250	1000	400	20
250	500	200	33
250	250	100	50

\* Wasser (g) durch Opalit-Anteil (g) mal 100

\*\* Opalit (g) in 100 g Suspension

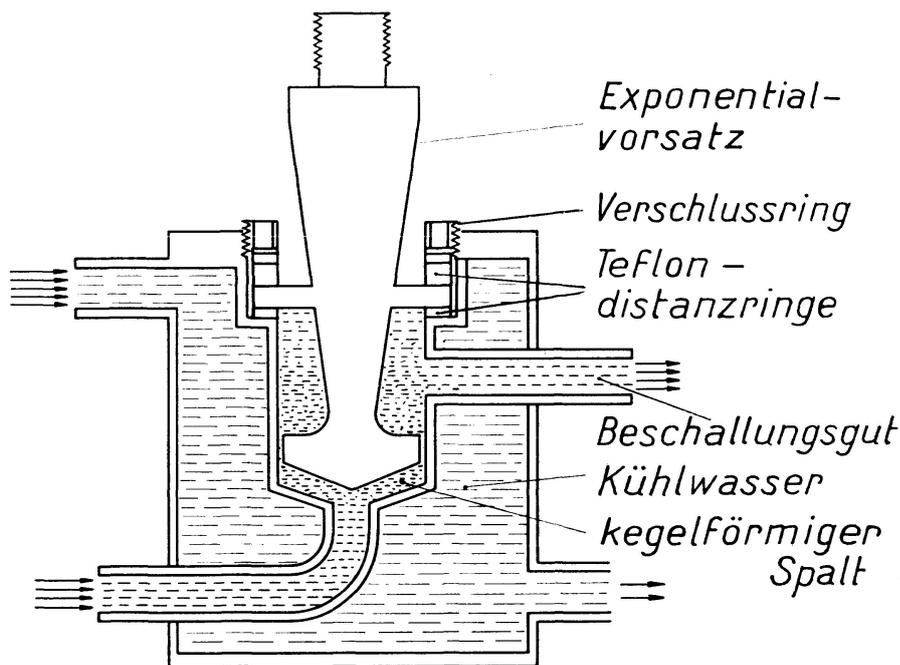


Fig. 1. Durchlaufbeschallungskammer, Massstab 1 : 2.

Die Suspension wurde 15 Min. mit einem Magnetrührer gemischt und bei einer Durchlaufgeschwindigkeit von 16–17, 9–10 bzw. 5 cm<sup>3</sup>/Min. auf Stufe 9 beschallt. Ausgenommen die 50-proz. Suspension, wurde nach dem ersten Durchgang ein zweites Mal beschallt. Zum Vergleich wurde nur 15 Min. gerührt.

Körnung, rheologische Fließgrenze, Viskosität, Plastizität und Sedimentationsverhalten wurden wie folgt bestimmt:

Es wurden Proben mit einem Opalit-Gehalt von etwa 5 g entnommen und der Anteil 20–2 und < 2  $\mu$  in 0,01-proz. Calgon im Pipetten-Apparat und der Anteil > 63  $\mu$  durch nasse Siebung bestimmt. Der Gehalt der ofentrockenen Fraktionen wurde in Prozent des auf Ofentrocknung umgerechneten Opalit-Anteils angegeben.

Rheologische Fließgrenze und Viskosität wurden mit einem Rotationsviskosimeter mit 15 Geschwindigkeitsstufen (Epprecht-Rheomat 15) bestimmt.

Die beschallten Suspensionen wurden bei 3–3,5 atü auf einen Wassergehalt

etwas unter Fließgrenze entwässert. Fließ- und Ausrollgrenze wurden nach der Atterberg-Casagrande-Methode (LAMBE, 1951) bestimmt.

Je 500 cm<sup>3</sup> Suspension wurden in 500-cm<sup>3</sup>-Messzylinder gefüllt. Die Höhe der Suspension betrug 25–26 cm. Nach 1/4, 1, 4 und 24 Stunden wurden 10 cm<sup>3</sup> in 6, 12, 18 und 24 cm abgesaugt und das Trockengewicht nach Ofentrocknung bestimmt.

#### **Untersuchung des Fließverhaltens in Poren mit dem Kapillarviskosimeter**

Man presste die Suspensionen mit einem bestimmten Druck durch Glaskapillaren von 0,33 bis 2,05 mm Innendurchmesser. Die Durchflussmenge wurde in Abhängigkeit des Druckes gemessen. Nach experimenteller Bestimmung des laminaren Fließbereiches wurde die kinematische Zähigkeit aus Messungen in diesem Bereich ermittelt. Aus der kinematischen Zähigkeit liessen sich die rheologische Fließgrenze und Viskosität berechnen.

#### **Untersuchung der Injizierbarkeit in Quarzsande und Glaskugelpackungen**

Die Injizierbarkeit in Quarzsande und Glaskugelpackungen wurde in einem Ödometer untersucht. Mit Ödometern werden im Erdbau Last-Setzungskurven von Böden gemessen. Dazu wird die Probe in einen Zylinder eingebaut und durch einen Kolben belastet. Dabei presst man Porenwasser nach unten durch einen Filter aus und misst die Setzung, d. h. den Weg des Kolbens. Der Querschnitt des von uns verwendeten Gerätes betrug 25 cm<sup>2</sup>, die Probenhöhe 2 cm. Um eine möglichst dichte Lagerung zu erreichen, wurden die Quarzkörner bzw. Glaskugeln mit viel Wasser eingeschlämmt und einvibriert. Nach Vorverdichtung mit 2 kg/cm<sup>2</sup> wurde die Opalit-Suspension eingefüllt und mit 1 kg/cm<sup>2</sup> in die Quarzsande bzw. Glaskugelpackungen injiziert.

## ERGEBNISSE

### **Einfluss der Standbeschallung auf die Körnung**

Durch die Standbeschallung wurde der Anteil  $> 63 \mu$  von 24 auf weniger als 2% gesenkt und der Anteil  $< 20 \mu$  von 56 auf 95% und  $< 2 \mu$  von 21 auf 58% erhöht (Tabelle 1, Fig. 2).

Der Feinanteil wurde bereits durch geringe Beschallungsenergien wesentlich erhöht (Fig. 3). Dabei war es ohne Bedeutung, ob der Opalit vor der Beschallung mehrere Tage in Wasser stehen gelassen oder unmittelbar nach der Vermischung mit dem Wasser beschallt wurde. Auch eine Umwandlung in die Na-Form (Aktivierung) hatte keinen deutlichen Einfluss auf die Körnung nach Beschallung.

Tabelle 1. *Einfluss der Standbeschallung auf die Körnung einer Opalit-Suspension*  
Wassergehalt 1000 %, Frequenz 20 kHz.

Beschallung		Körnung			
halbe Schwingungsweite $\mu$	Zeit Min.	$> 63 \mu$ %	$< 20 \mu$ %	$20-2 \mu$ %	$< 2 \mu$ %
unbeschallt		23,6	57,1	36,3	20,8
unbeschallt		23,8	55,7	34,9	20,8
9	3	2,8	91,0	46,2	44,9
9	6	1,9	93,0	45,4	47,6
14	3	1,9	95,6	47,0	48,6
14	6	1,4	93,2	40,4	52,8
21	3	1,6	92,2	42,0	50,2
21	6	1,8	93,7	40,5	53,2
28	3	1,5	93,6	41,9	51,7
28	6	1,7	93,9	38,7	55,2
28	12	1,3	93,6	36,3	57,3
34	3	1,6	93,1	41,0	52,1
34	6	1,7	91,0	35,3	55,5
34	12	1,3	94,5	36,6	57,9

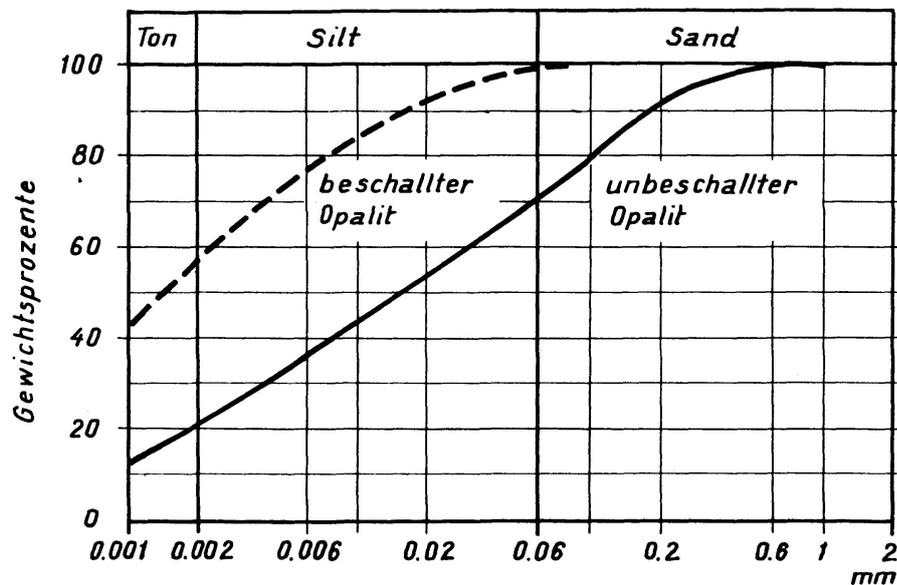


Fig. 2. Körnung einer unbeschallten und beschallten Opalit-Suspension. Wassergehalt 1000 %, Frequenz 20 kHz, halbe Schwingungsweite  $28 \mu$ , Beschallungszeit 6 Min.

#### **Einfluss der Durchlaufbeschallung auf Körnung, rheologische Eigenschaften und Sedimentationsverhalten**

Bereits beim ersten Durchlauf, d. h. bei Beschallungsenergien unter  $4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ , stieg der Anteil  $< 20$  und  $< 2 \mu$  auf über 92 und 53 % (Tabelle 2). Die rheologische Fließgrenze wurde bis auf das mehr als 10fache und die Viskosität bis auf das 4- bis 5fache erhöht. Die Atterberg-Fließgrenze stieg von 40 auf über 50 %, dagegen wurde die Ausrollgrenze kaum verändert.

Bis zum Wassergehalt 800 % blieben Opalit-Suspensionen bereits nach dem ersten Beschallungsdurchlauf über 24 Stunden sedimentationsstabil. Unbeschallte Suspensionen mit  $W = 400$  und 800 % waren dagegen bereits nach

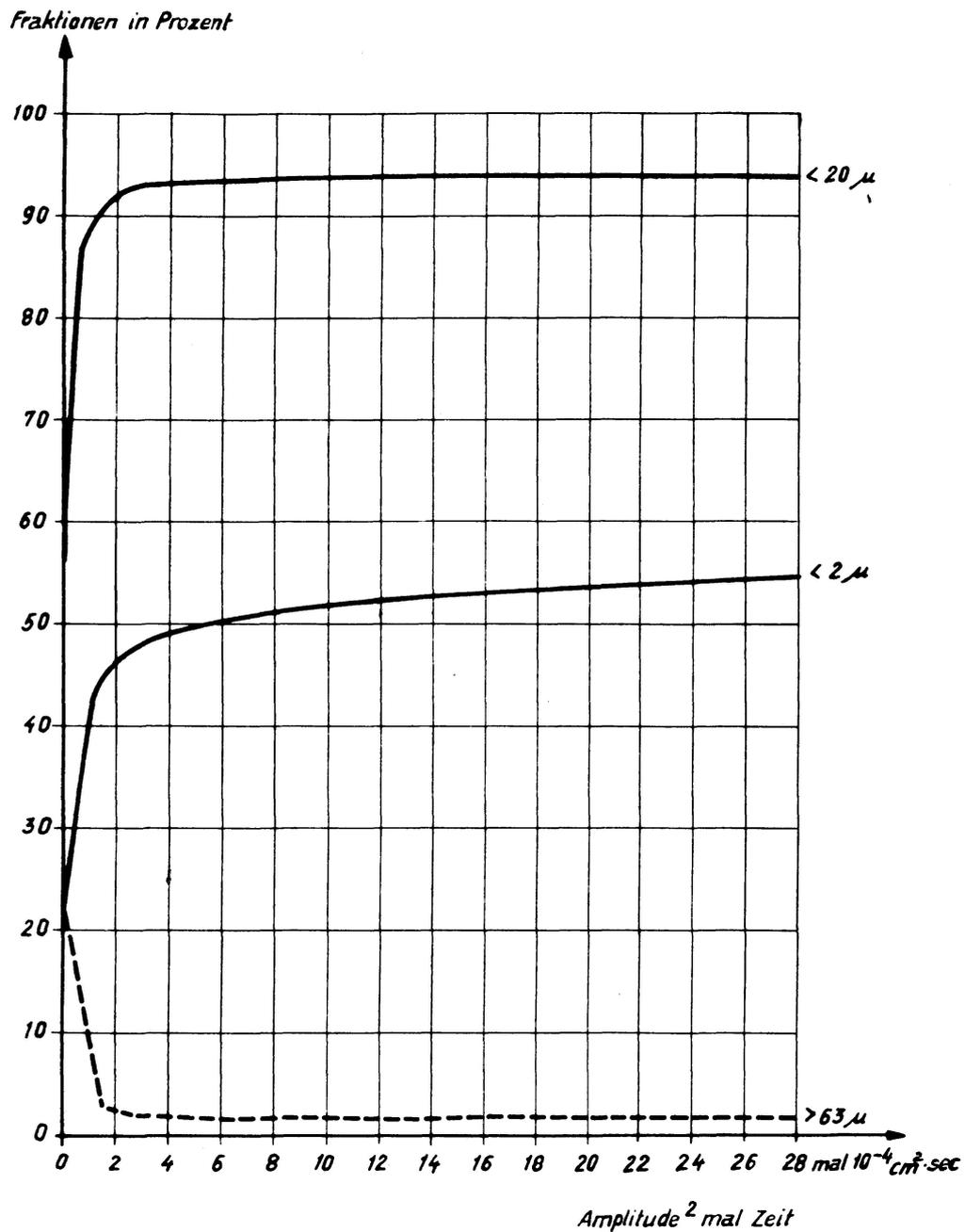


Fig. 3. Körnung einer Opalit-Suspension in Abhängigkeit der Beschallungsenergie. Wassergehalt 1000 %, Frequenz 20 kHz.

einer Stunde instabil (Tabelle 3) und bei den höher konzentrierten Opalit-Suspensionen wurde Sedimentation nach 4 bzw. 24 Stunden festgestellt.

#### Untersuchung des Fließverhaltens in Poren mit dem Kapillarviskosimeter

Die unbeschallten Suspensionen ließen sich durch Kapillaren mit Innendurchmesser  $> 0,75$  mm drücken. In dünneren Kapillaren wurde der Durchfluss meist kurz nach Versuchsbeginn blockiert. Die beschallten Suspensionen

Tabelle 2. Körnung und rheologische Eigenschaften von Opalit-Suspensionen nach Durchlaufbeschallung

Frequenz 20 kHz, halbe Schwingungsweite 28  $\mu$ 

Suspension	Körnung				Viskosität		Plastizität		
	>63 $\mu$ %	<20 $\mu$ %	20-2 $\mu$ %	<2 $\mu$ %	$\eta$ cP	$\tau_F$ dyn/cm <sup>2</sup>	$W_L$ %	$W_p$ %	$I_p$ %
$W = 400\%$ unbeschallt							41,0	17,7	23,3
$W = 400\%$ 1 $\times$ beschallt	1	96	43	53					
$W = 400\%$ 2 $\times$ beschallt	1	93	38	55	6	41	54,2	18,7	35,5
$W = 200\%$ unbeschallt					6	0	41,0	17,7	23,3
$W = 200\%$ 1 $\times$ beschallt	1	96	41	55					
$W = 200\%$ 2 $\times$ beschallt	1	95	38	57	22	327	50,7	18,0	32,7
$W = 100\%$ unbeschallt					90	205	41,0	17,7	23,3
$W = 100\%$ 1 $\times$ beschallt	1	92	34	58	405	2877	52,5	18,7	33,8

 $W$  = Wassergehalt $\eta$  = Viskosität $\tau_F$  = rheologische Fließgrenze $W_L$  = Fließgrenze $W_p$  = Ausrollgrenze $I_p$  = Plastizitätsindex

Tabelle 3. Sedimentationsstabilität unbeschallter Opalit-Suspensionen

Wassergehalt %	Probeentnahme nach 1, 4 und 24 Stunden	Feststoff-Anteil in g/10 cm <sup>3</sup> Suspension nach Ofentrocknung. Entnahmetiefe in cm			
		6	12	18	24
100	24	7,1	6,9	7,4	8,2
200	4	4,2	4,3	4,8	5,7
200	24	4,3	4,4	4,6	5,9
400	1	1,2	1,2	1,5	5,4
400	24	0	0	3,3	6,3
800	1	0	0	0,7	2,9
800	24	0	0	0	3,8

konnten durch alle verfügbaren Kapillaren, d. h. bis 0,33 mm Innendurchmesser, gepresst werden.

Die rheologische Fließgrenze und Viskosität wurden durch die Beschallung stark erhöht (Fig. 4), wobei der Unterschied zwischen den nicht beschallten und beschallten Suspensionen mit steigender Opalit-Konzentration grösser wurde.

Im laminaren Bereich war die Durchflussmenge bei gleichem Druck nach Beschallung kleiner (Fig. 5). Der Unterschied zwischen den unbeschallten und beschallten Suspensionen nahm mit steigender Opalit-Konzentration zu. Die Grenzgeschwindigkeit zwischen laminarem und turbulentem Fließen wurde durch die Beschallung erhöht. Deshalb beobachtete man bei höheren Drucken kleiner werdende Unterschiede in den Durchflussmengen unbeschallter und beschallter Suspensionen.

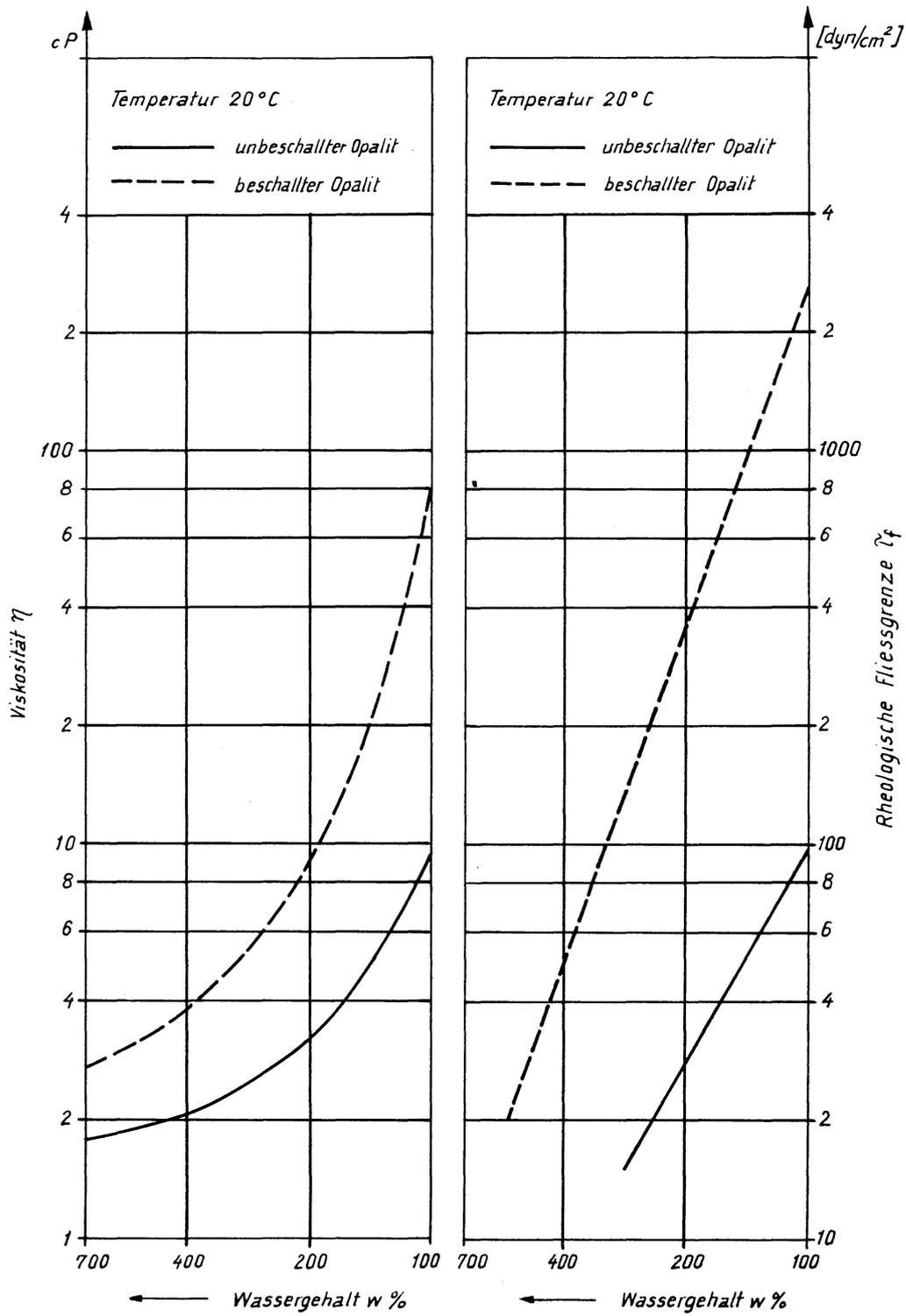


Fig. 4. Rheologische Fließgrenze und Viskosität unbeschallter und beschallter Opalit-Suspensionen nach Bestimmung mit dem Kapillarviskosimeter.

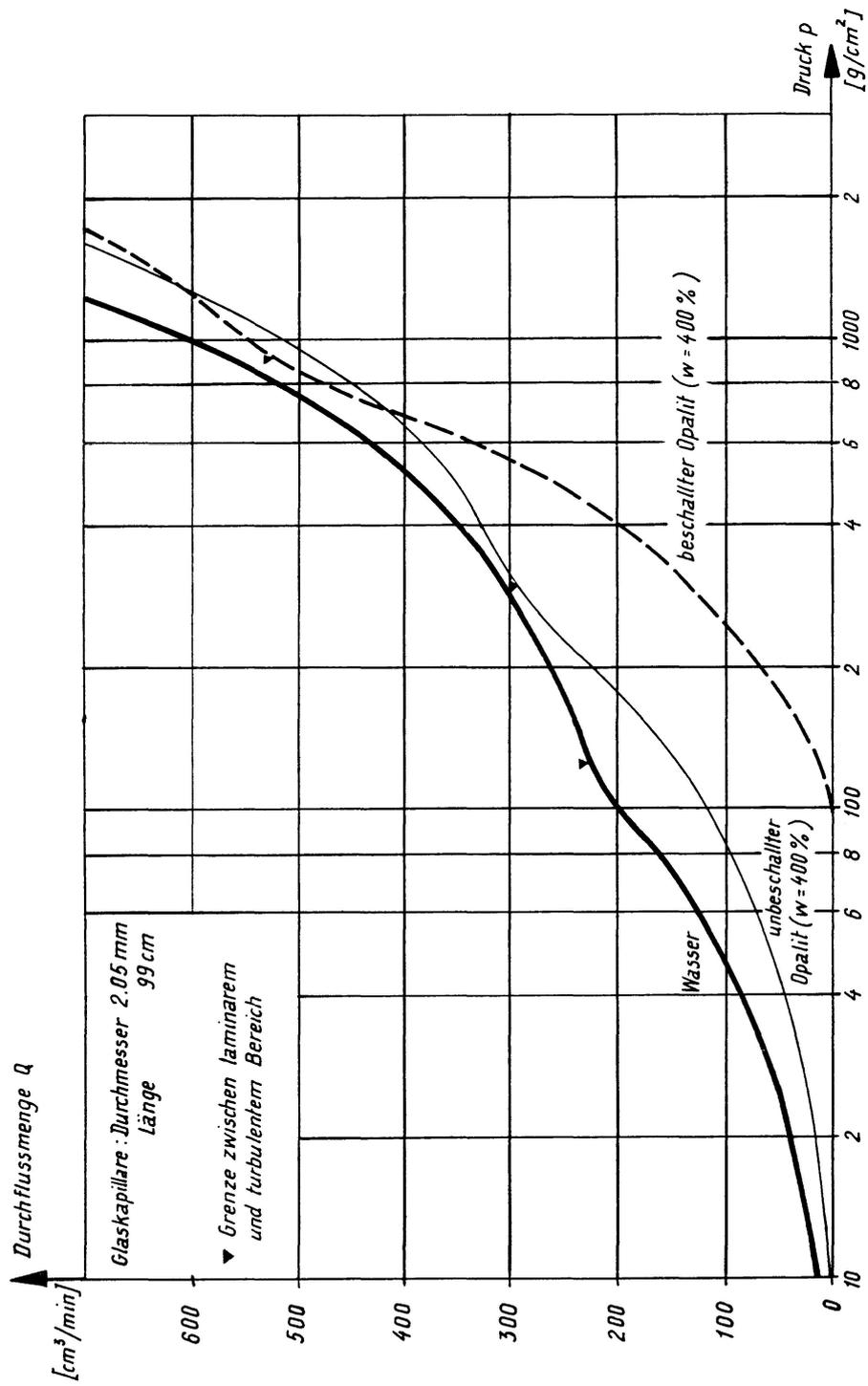


Fig. 5. Durchflussmengen von Wasser, unbeschalteten und beschalteten Opalit-Suspensionen  $W = 400\%$  in Abhängigkeit des Druckes nach Bestimmung mit dem Kapillarviskosimeter. Durchlaufbeschallung, Frequenz 20 kHz, halbe Schwingungswerte  $28 \mu$ .

### Untersuchung der Injizierbarkeit in Quarzsande und Glaskugelpackungen

Unbeschallte Opalit-Suspensionen liessen sich in Quarzsande und Glaskugelpackungen bis zum Korndurchmesser 0,8 mm ( $k$ -Wert nach Darcy  $5 \cdot 10^{-1}$  cm/sec) und nach Beschallen bis 0,3 mm ( $10^{-1}$  cm/sec) injizieren. Entfernte man aus den unbeschallten Suspensionen die Fraktion  $> 63 \mu$ , beobachtete man die gleiche Eindringfähigkeit wie nach Beschallung. Umgekehrt wurde sie durch die Beimischung weniger Prozente der grobkörnigen Fraktion zu beschallten Opalit-Suspensionen wesentlich herabgesetzt.

### DISKUSSION

Beim Ultrabeschallen von Flüssigkeiten werden durch Wellen hoher Frequenz ( $> 16$  kHz) Druck-Zug-Spannungen erzeugt. Es bilden sich Vakuumbläschen, die sofort wieder implotionsartig zerfallen (Kavitation). Die Flüssigkeit wird durchmischt und entgast. Die dispergierende Wirkung der Beschallung von Ton-Suspensionen beruht auf der mechanischen Beanspruchung der suspendierten Teilchen durch Druck und Zug, der Durchmischung und Entgasung der Suspension und damit der besseren Benetzung der Teilchen. Röntgenographische Korngrössenvergleiche und Bestimmungen der Kationenaustauschkapazität von unbeschallten und beschallten Tönen bestätigten die von MATTIAT (1964) und anderen gemachten Beobachtungen, nach denen bei der Dispergierung mit Frequenzen von etwa 20 kHz die beim Zerfall der Aggregate freiwerdenden Einzelkörner kaum verändert werden. Will man die Einzelkörner zerkleinern, muss die Wellenlänge etwa gleich dem Teilchendurchmesser sein, d. h. für Teilchen unter  $60 \mu$  wären Frequenzen von mehreren Megahertz nötig. Die Aufbereitung mit niedrigen Ultraschallfrequenzen beruht ausschliesslich auf der Wirkung der Kavitation.

Bereits durch kurzes Beschallen wurde die Körnung von Opalit-Suspensionen weitgehend verändert (Tabelle 1, Fig. 2 und 3). Der Anteil  $> 63 \mu$  sank von 24 auf 2%, der Anteil  $< 20$  und  $< 2 \mu$  stieg von 56 auf 95 und von 21 auf 58%. 7-tägiges Einweichen in Wasser, bzw. die Umwandlung in die Na-Form (Aktivierung) hatten keinen Einfluss auf die Körnung nach Beschallung. Vorbehandlungen also, die wegen der weitgehenden Benetzung der Tonpartikel und der Erhöhung ihres elektrischen Potentials für die Dispergierung feinkörniger Böden und Sedimente normalerweise ausschlaggebend sind, spielen bei der Beschallung von Opalit-Suspensionen kaum eine Rolle. Massgebend scheint die mechanische Beanspruchung der suspendierten Teilchen zu sein.

Der Opalinuston ist eine Ablagerung des Flachmeeres. Die Minerale wurden vom Festland eingeschwemmt und nach ihrer Sedimentation durch Kittsubstanzen und hohe Überlagerungsdrucke verfestigt. Dabei wirkten neben Pyrit und organischer Substanz vor allem der im Meerwasser als feiner Nieder-

schlag ausgeschiedene Kalzit. Beim Schütteln in Wasser zerfällt der Opalinuston deshalb nicht in Einzelkörner, sondern grösstenteils in Aggregate.

Fig. 6 zeigt ein 30–40  $\mu$  grosses Aggregat des Opalinustons (Raster-Elektronenmikroskop, 2000fach). Es besteht aus blättchenförmigen Mineralen mit dazwischen gelagertem Kalzit. Bei 10000facher Vergrösserung eines Ausschnittes erkennt man auch Teilchen der Tonfraktion (Fig. 7). Beim Beschallen werden solche Aggregate aufgebrochen und zerfallen in Einzelkörner. Entfernte man den Kalzit durch Lösen in verdünnter Salzsäure (pH 3–5), stieg der Anteil  $< 2 \mu$  auf über 50%. Durch anschliessende Oxidation des Pyrits und der organischen Substanz mit Wasserstoffperoxid wurde der Tonanteil nur um 2–3% erhöht. Die dispergierende Wirkung der Beschallung von Opalit-Suspensionen ist also vor allem auf eine Zerlegung der Aggregate in Einzelkörner durch Aufbrechen der Kalzitbrücken zurückzuführen. Wie unsere Versuche gezeigt haben, braucht es dazu nur wenig Energie (Fig. 3).

Nach Stehenlassen über Nacht und einstündigem Schütteln in 0,01-proz. Calgon betrug der Anteil  $< 20$  und  $< 2 \mu$  56 und 21% (Tabelle 1). Durch Beschallen stieg er auf 95 und 58%. Danach gibt die im Erdbau übliche Körnungsanalyse nicht die Einzelkornverteilung, sondern weitgehend die Verteilung von Aggregaten wieder.

Wie eigene Untersuchungen an Bohrproben aus 1800 und 2000 m gezeigt haben, liess sich diagenetisch verfestigter Opalinuston durch Beschallen nicht vollständig dispergieren. Die Proben zerfielen aber in wenigen Minuten in konzentrierter Hydrazinlösung. Das dürfte nach WEISS und Mitarbeitern (1963 und 1966) auf Reaktionen des stark polaren Hydrazins mit dem Kaolinit des Opalinustons zurückzuführen sein.

Die rheologischen Eigenschaften wässriger Tonsuspensionen beruhen vor allem auf der Anlagerung des Wassers an Tonmineraloberflächen. Beim Beschallen von Opalit-Suspensionen werden Tongehalt ( $< 2 \mu$ ) und Oberfläche erhöht. Dementsprechend nehmen auch die rheologischen Eigenschaften, d. h. Fliessgrenze und Viskosität, zu (Tabelle 2). Mit steigender Opalit-Konzentration nimmt der Unterschied im Tongehalt beschallter und nicht beschallter Suspensionen zu. Entsprechend wird auch der Unterschied in den rheologischen Eigenschaften grösser (Fig. 4). Durch die Erhöhung von Fliessgrenze und Viskosität wird das Pumpen beschallter Opalit-Suspensionen erschwert (Fig. 5). Dieser Nachteil gegenüber unbeschallten Opalit-Suspensionen lässt sich weitgehend vermeiden, wenn man die beschallten Suspensionen mit höheren Drucken pumpt.

Unerwartet klein war der Einfluss der Beschallung auf die Plastizität (Tabelle 2). Zur Bestimmung der Atterberg-Grenzen werden die Proben auf einen geeigneten Wassergehalt gebracht und dabei mehrmals durchgeknetet. Es wurde vermutet, dass bereits bei dieser Vorbehandlung die Aggregate weitgehend zerstört werden. Man untersuchte deshalb die Kornverteilung von

Opalit nach Vorbehandlung zur Bestimmung der Atterberg-Grenzen und erhielt  $< 20$  und  $< 2 \mu$  bei Fließgrenze 81 und 42% und bei Ausrollgrenze 86 und 48%. Ein grosser Teil der Aggregate wurde also bereits bei der Vorbehandlung zerstört. Die Wirkung der Ultrabeschallung war dementsprechend kleiner, als man erwarten konnte und die Atterberg-Grenzen des Opalit dürfen also nicht auf die im Erdbau bestimmte Kornverteilung bezogen werden.

Die Sedimentationsstabilität einer Tonsuspension hängt vor allem vom elektrischen Potential der Tonteilchen ab. Seine Grösse wird bei einer gegebenen tonmineralischen Zusammensetzung von der Art und Menge der im Wasser gelösten und am Ton adsorbierten Ionen bestimmt. Eine Suspension wird stabil, wenn mit zunehmendem Potential die elektrostatische Abstossung der Teilchen grösser wird als ihre Massenanziehung. Die Tonteilchen können dann nicht mehr vollständig sedimentieren. Sie bilden im Gleichgewicht zwischen Gravitation und gegenseitiger Abstossung eine lockere Sedimentstruktur, in der auch die grösseren Teilchen nur langsam absinken. Dabei nimmt das Sedimentvolumen mit steigendem Potential und grösser werdender Oberfläche des suspendierten Materials zu.

Es kann angenommen werden, dass Konzentration und Verteilung der Ionen und damit das Potential der Tonteilchen durch die Beschallung kaum verändert wurden. Durch die starke Zunahme des Feinanteils und damit der spezifischen Oberfläche war aber ein Anwachsen des Sedimentvolumens zu erwarten. Das haben unsere Versuche auch gezeigt. So wurde noch nach 24 Stunden das Volumen beschallter Opalit-Suspensionen mit Wassergehalten bis 800% durch das Sedimentvolumen vollständig ausgefüllt und eine Sedimentation konnte nicht nachgewiesen werden. Bei unbeschallten Suspensionen stellte man dagegen eine geringe Sedimentation bereits bei einem Wassergehalt von 100% fest und Suspensionen mit 400% Wasser waren bereits nach einer Stunde fast vollständig sedimentiert (Tabelle 3). Die Verbesserung des Sedimentationsverhaltens von Opalit-Suspensionen durch Beschallen beruht also vor allem auf der Vergrösserung des Sedimentvolumens durch die Erhöhung des Anteils der Tonfraktion.

Wir dispergierten Opalit in Leitungswasser, d. h. das Wasser enthielt gelöste Ca- und Mg-Salze (60 mg CaO und 16 mg MgO pro Liter) und der Ton lag in der Ca-Form vor. Durch einen Zusatz von 0,25 g Calgon pro Liter Suspension wurde das gelöste Ca und Mg zum Teil komplex gebunden und der Ton teilweise in die Na-Form umgewandelt. Dementsprechend stieg das Potential und die Stabilität von Suspensionen mit Wassergehalten über 800% konnte verbessert werden. Verglichen mit Bentonit-Suspensionen lässt sich aber die Stabilität von Opalit-Suspensionen durch Änderung von Konzentration und Verteilung der Ionen weit weniger beeinflussen.

Unbeschallte Suspensionen liessen sich durch Kapillaren bis 0,8 mm Durchmesser pressen. Nach Beschallung lag der Grenzdurchmesser unter 0,3 mm.

Weniger deutlich war der Unterschied bei den Injektionsversuchen. Bei grösseren Probenhöhen sind deutlichere Unterschiede zu erwarten. Die Versuche lassen den grossen Einfluss der groben Fraktionen erkennen. Entfernte man sie aus unbeschallten Suspensionen, liessen sie sich genau so gut injizieren wie beschallte Suspensionen und umgekehrt. Die groben Körner blockierten die Injektionswege und verursachten die Bildung immer dichter werdender Filterschichten. Die Injizierbarkeit von Opalit-Suspensionen in feinporigere Systeme müsste durch die starke Abnahme des Anteils  $> 20 \mu$  durch Beschallen (44 auf 5%) wesentlich verbessert werden.

Tonsuspensionen werden im Erdbau vorwiegend als abstützende Flüssigkeiten in Schlitzwänden und Bohrlöchern und für abdichtende und festigkeits-erzeugende Injektionen verwendet. Abgesehen von den Kosten sind für ihre Verwendung massgebend: Körnung, rheologische Eigenschaften, Sedimentationsverhalten, Filtrationseigenschaften und Raumgewicht. Der weiteren Verwendung von Opalit im Erdbau stehen seine verhältnismässige Grobkörnigkeit und das schlechte Sedimentationsverhalten im Wege. Die rheologischen Eigenschaften liegen an der unteren Grenze. Durch Beschallen lassen sich Körnung und Sedimentationsverhalten von Opalit-Suspensionen wesentlich verbessern. Eine weitgehendere Verwendung von Opalit im Erdbau hängt deshalb vor allem von der Möglichkeit einer ökonomischen Beschallung auf Baustellen ab.

Wir verwendeten für unsere Versuche eine Ultraschall-Ausrüstung mit elektronisch erzeugter Hochfrequenzwechselfspannung von 20 kHz und einer Leistung von 700 bis 800 Watt. Zum Beschallen auf Baustellen braucht man robuste Geräte mit wesentlich höheren Leistungen (10–1000 PS). Solche Geräte sind aber noch nicht im Handel.

Nach Untersuchungen von KORNILOVICH und BELOKHVOSTIKOVA (1965) und VINNIK und Mitarbeitern (1965) binden Zementpasten nach Beschallung schneller ab und ihre Endfestigkeit nimmt um 30% und mehr zu. Kornilovich und Belokhvostikova verwendeten Geräte mit Frequenzen von 23–24 kHz, magnetostriktiven Gebern und Generatoren mit einem Ausgang von 10 Kilowatt. Nach ihren Angaben sollen mit solchen Geräten 1500 kg Zement pro Stunde mit einem Kraftverbrauch von 20 Kilowatt beschallt worden sein. Nach unseren Erkundigungen scheint der Einsatz elektronisch erzeugten Ultraschalls im Erdbau wegen zu hoher Kosten nicht in Frage zu kommen.

1966 veröffentlichten MOAVENZADEH und McMASTER aus dem Ultraschall-Laboratorium des Department of Welding Engineering der Ohio State University die Ergebnisse ihrer Untersuchungen über die Anwendung von Schall und Ultraschall im Strassenbau. Wir hatten im Herbst 1968 Gelegenheit, dieses Labor zu besuchen. Alle vorgeführten Geräte hatten eine Leistung von 10 bis 15 PS. Die Hochfrequenzwechselfspannung wurde von sehr robusten, in den USA im Handel erhältlichen Rotationsgeneratoren (sonic motors) geliefert.

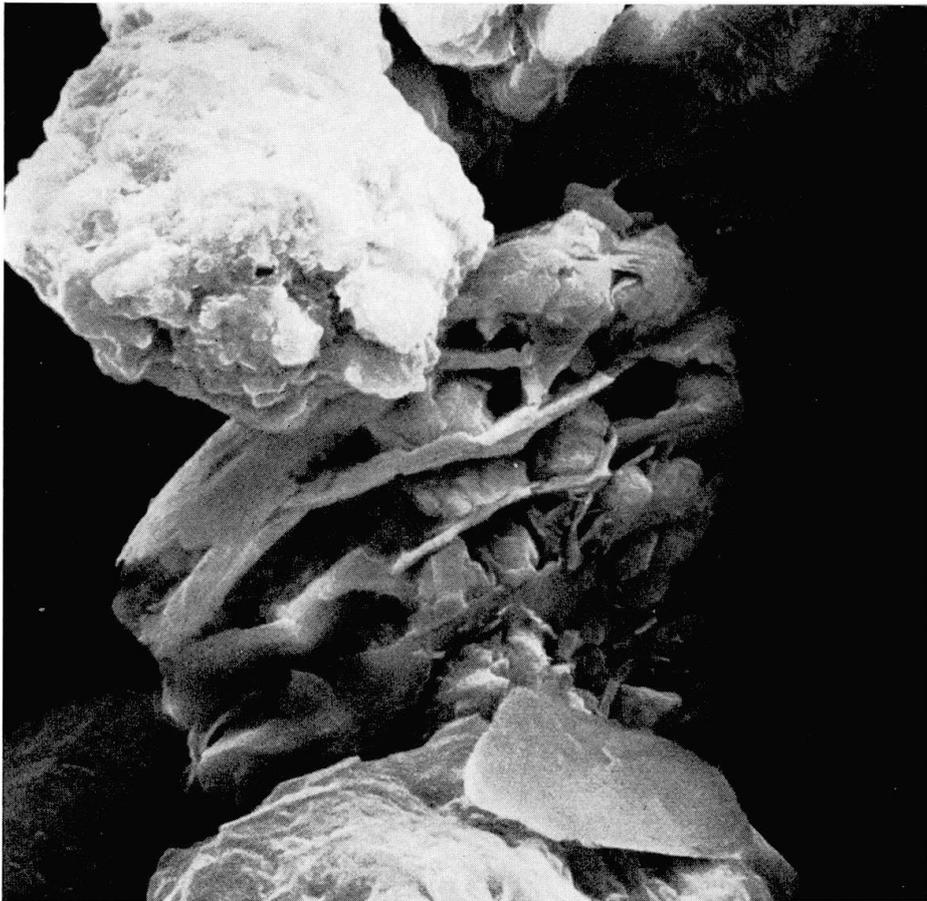


Fig. 6. 30–40  $\mu$  grosses Aggregat des Opalinustons. Raster-Elektronenmikroskop, 2000fach.

Verglichen mit der elektronischen Erzeugung war diese Spannung 4–5mal billiger aber in der Frequenz auf 10 kHz beschränkt. Alle Geräte waren mit piezoelektrischen Wandlern ausgerüstet. Ausrüstungen zum Beschallen von Tonsuspensionen oder anderen Injektionsmischungen auf Baustellen scheint es in den USA nicht im Handel zu geben. Ihre Herstellung würde aber heute keine ernstesten Probleme mehr stellen.

Wesentlich billiger lässt sich Ultraschall mechanisch erzeugen. In Labor und Industrie werden häufig Geräte verwendet, die nach dem Prinzip der Ultraschall-Sirenen arbeiten. Durch ein Aneinandervorbeigleiten von Rippen bzw. Flügeln werden in der Flüssigkeit Überdrucke und Zugspannungen hoher Frequenzen erzeugt. Die Wirksamkeit solcher Geräte zur Aufbereitung von Opalit-Suspensionen konnte nachgewiesen werden. Wegen des hohen Quarz-Anteils im Opalit ist aber mit einer starken Abnutzung der hochpräzisen Bauteile zu rechnen und die Rentabilität solcher Geräte ist für die Aufbereitung von Opalit-Suspensionen sehr fraglich (vgl. auch GREGUSS, 1963).



Fig. 7. Ausschnitt des Opalinuston-Aggregates. Raster-Elektronenmikroskop, 10 000 fach.

Wesentlich aussichtsreicher scheint uns die Anwendung der Ultraschall-Pfeifen nach Janovski und Pohlmann (BERGMANN, 1954). Die Flüssigkeit bzw. Suspension wird durch eine spaltförmige Öffnung gepresst und prallt auf die Schneide einer Metall-Platte, die in zwei Knotenpunkten so gelagert ist, dass sie Biegungsschwingungen ausführen kann. Bei richtiger Einstellung der Geschwindigkeit des austretenden Strahles und des Abstandes vom Spalt zur Schneide, kommt die Platte in Resonanzschwingungen und sendet Wellen mit einer Frequenz von 4–32 kHz in die umgebende Flüssigkeit bzw. Suspension. Durch den Aufprall der Mineralkörner, vor allem des Quarzes, ist mit einer Deformation der Schneide zu rechnen. Sie lässt sich aber leicht und ohne grössere Kosten auswechseln. Wie unsere Versuche gezeigt haben, lassen sich bei Opalitsuspensionen schon mit kleinen Beschallungsenergien grosse Änderungen im Kornaufbau und Sedimentationsverhalten erzielen. Deshalb und wegen der geringen Unterhaltskosten scheint uns die Anwendung von Ultraschall-Pfeifen zur Aufbereitung solcher Suspensionen auf Baustellen am aussichtsreichsten.

Wir danken Herrn Prof. H. J. Lang, Direktor der Erdbauabteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH, und Herrn Prof. Dr. R. Pohlmann, Direktor des Laboratoriums für Ultraschall der Technischen Hochschule Aachen, für Anregungen und Diskussionen, Frau E. De Zordi, Frau I. Reichenbach und Herrn A. Rub für experimentelle Mitarbeit, und Herrn R. Wessicken, Laboratorium für Elektronenmikroskopie der ETH, für die Aufnahmen mit dem Raster-Elektronenmikroskop.

## LITERATUR

- BERGMANN, L. (1954): Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik. 6. Auflage. Hirzel, Zürich.
- EDWARDS, A. P. and BREMNER, J. M. (1967): Dispersion of soil particles by sonic vibration. *J. Soil Sci.* 18.
- FAGNOUL, A. (1966): Granulométrie et plasticité de sols argileux soumis à des traitements par ultrasons. *Géotechnique* 16.
- GREGUSS, P. (1963): Critical notes on the applicability of ultrasound to chemical technology. *Int. Chemical Engineering* 3.
- KORNILOVICH, Y. E. and BELOKHVOSTIKOVA, V. I. (1965): Ultrasound in the production and inspection of concrete. Part I: Production applications. Translation from the Russian by Consultants Bureau, N. Y.
- LAMBE, T. W. (1951): Soil testing for engineers. Wiley, N. Y.
- MATTIAT, B. (1962): Ein neuer Weg zur Aufbereitung diagenetisch verfestigter, bituminöser Tone (Tonsteine). *Geol. Jb.* 79.
- (1964): Methodische Verbesserungen bei der routinemässigen Schlämmanalyse von Ton- und Bodenproben. *Beitr. Mineral. Petrog.* 10.
- MOAVENZADEH, F. and MCMASTER, R. C. (1966): Potential uses of sonic and ultrasonic devices in highway construction. Highway Research Board, National Cooperative Highway Research Program Report 25.
- VINNIK, V., PLJUSC, B., ZAPOROZEC, V. und BOBIL, V. (1965): Aktivierung von Zement durch Ultraschall. *Budivelni materialy i konstrukciji* 7.
- WEISS, A., THIELEPAPE, W., GÖRING, G., RITTER, W. und SCHÄFER, H. (1963): Kaolinit-Einlagerungsverbindungen. *Int. Clay Conf. 1963*, Pergamon Press, N. Y.
- WEISS, A., THIELEPAPE, W. und ORTH, H. (1966): Neue Kaolinit-Einlagerungsverbindungen. *Int. Clay Conf. 1966*, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.

Manuskript eingegangen am 29. Januar 1970.