

Untersuchungen zur Klassifikation spät- und nacheiszeitlicher Sedimente aus dem Zürichsee

Autor(en): **Gyger, Max / Müller-Vonmoos, Max / Schindler, Conrad**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen
= Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie**

Band (Jahr): **56 (1976)**

Heft 2

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-43692>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Untersuchungen zur Klassifikation spät- und nacheiszeitlicher Sedimente aus dem Zürichsee

Von *Max Gyger* *), *Max Müller-Vonmoos* **) und *Conrad Schindler* *)

Mit 10 Abbildungen und 5 Tabellen

Abstract

The present study gives a general view of the sedimentation in the Lake of Zürich at the end and after the last glaciation. It gives data on the unit weight, granulometry, plasticity, failure conditions and sensitivity of lacustrine chalk, lake bottom loam and similar sediments. Based on the mineralogical composition, the granulometry after ultrasonic treatment, the porosity, the surface area and the investigation with the scanning electron micrograph the soil mechanical behaviour of the sediments is discussed. A classification according to the lime content and the plasticity is proposed. The value of the conventional grain size analysis is discussed.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gibt eine Übersicht über die spät- und nacheiszeitliche Sedimentation im Zürichsee und enthält Darstellungen der Gewichtsverhältnisse, Körnung, Plastizität, Bruchfestigkeit und Strukturempfindlichkeit von Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen sowie basalem Faulschlamm und Seebodenlehm. Aus der Auswertung zahlreicher Probenuntersuchungen resultiert ein Vorschlag zur Klassifikation von Seekreide und seekreideartigen Sedimenten nach Kalkgehalt und Plastizität. Die konventionellen Laborversuche an feinkörnigen Lockergesteinen werden durch mineralogische Analysen, Untersuchungen der Körnung nach Beschallung, Oberflächen- und Porositätsmessungen sowie Rasterelektronenmikroskopaufnahmen ergänzt. Am Beispiel von Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen werden die Aussagekraft herkömmlicher Kornverteilungsanalysen diskutiert und Grenzen der klassischen Erklärung der Plastizitätseigenschaften aufgezeigt.

Einleitung

Bauvorhaben auf jungen Seeablagerungen haben den Geologen und Ingenieur seit je vor grosse Probleme gestellt. Bei vielen grösseren und kleineren

*) Dr. von Moos AG, Geotechnisches Büro, Bachofnerstrasse 5, 8037 Zürich.

**) Institut für Grundbau und Bodenmechanik und Institut für Kristallographie und Petrographie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

geotechnischen Untersuchungen wurden dem Zürichsee und seinen Ufern zahlreiche Bodenproben entnommen und vielfältige interessante Unterlagen gesammelt. Im Laufe der Zeit immer wieder aufgetretene scheinbare Widersprüche weckten das Bedürfnis nach einer systematischen, kritischen Sichtung und Auswertung des vorhandenen umfangreichen Datenmaterials. Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch in dieser Richtung dar. Sie wurde möglich durch die enge und anregende Zusammenarbeit von Vertretern dreier verschiedener Fachgebiete: C. SCHINDLER hat die Geologie des Zürichsees untersucht und in bisher zwei Publikationen (1974, 1976) dargestellt, M. GYGER befasste sich als Bauingenieur mit technischen und bodenmechanischen Fragen, während M. MÜLLER-VONMOOS als Tonmineraloge Untersuchungen zur Feinstruktur, Körnung und Mineralogie beisteuerte.

Die ausgewerteten Laboruntersuchungen wurden am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der ETH (IGB, vormals VAWE) durchgeführt, teilweise (Seetunnel bei Zürich, Unterwasserschüttung bei Richterswil) im Auftrag der Dr. von Moos AG, Geotechnisches Büro.

Die vorliegende Arbeit erhebt keinen Anspruch auf abschliessende Behandlung der angesprochenen Probleme oder auf umfassende Gültigkeit für den gesamten Zürichsee und vergleichbare Alpenrandseen. Als Versuch der Auswertung von beschränkten, primär auf bautechnische Bedürfnisse zugeschnittenen Stichproben soll sie der Anregung weiterer Untersuchungen dienen.

Geologie

Die Ablagerung im Zürichsee wurde weitgehend durch die Geschehnisse seit der auslaufenden, letzten Eiszeit bestimmt. Vorerst kamen nahe der Gletscherstirn sehr heterogene Lockergesteine zur Sedimentation, die gletschernahen eiszeitlichen Seeablagerungen. Meist bestehen sie aus Feinsand und Silt mit wechselndem Anteil von Kies. Sie können aber auch sehr grobkörnig werden oder als Wechsellagerung von Lehm und Silt oder Feinsand auftreten. Im Gegensatz zur Moräne sind sie oft geschichtet und relativ locker gelagert.

Nachdem sich die Gletscher aus der näheren Umgebung zurückgezogen hatten, das Klima jedoch weiterhin sehr kühl blieb und Eisberge auf dem Zürichsee schwammen, setzte die Bildung der späteiszeitlichen Seebodenlehme ein. In ihrer typischen Ausbildung sind dies flachgeschichtete, stark tonige Silte, welche gelegentlich etwas Glazialkies enthalten. Sie entsprechen abgelagerten Schwebstoffen aus der Gletschermilch mit eingestreuten Eisbergsedimenten. Recht häufig dürften sie mit Ablagerungen der Seitenbäche vermengt sein und in ihrer Kornverteilung entsprechend schwanken. In der obersten, jüngsten Schicht verschwinden die Eisbergsedimente.

Als Folge einer massgeblichen Klimaverbesserung und des Rückzugs des

Linthgletschers in das hintere Glarnerland beginnt vor ca. 13500 Jahren (BÖLLING) die Bildung des basalen Faulschlamm. Dieser enthält bereits grössere Mengen von pflanzlichen Resten und oft fein verteiltes Eisensulfid.

Mit der weiteren Erwärmung setzt später die Ausfällung von Kalk im Zürichsee ein. Sie führt in bedeutenden Teilen des Sees zur Bildung von Seekreide oder seekreideähnlichen Sedimenten. Wo grössere Bäche oder der Wellenschlag am Ufer viel detritisches Material zuführen, entstehen allerdings auch andere Ablagerungen, wie Sand, Silte und junge Seebodenlehme (C. SCHINDLER, 1974). Im Einflussbereich grosser, schuttreicher Bäche fehlen deshalb die Seekreide und seekreideartigen Sedimente teilweise oder gänzlich, wie dies die Untersuchungen von U. FÖRSTNER, G. MÜLLER und H. REINECK (1968) sowie von G. MÜLLER (1971) im Bodensee und von M. STURM und A. MATTER (1972) im Thunersee gezeigt haben.

Bodenmechanische Untersuchungen

GEOTECHNISCHES ÜBERSICHTSPROFIL

Bodenmechanische Untersuchungen bestätigen die geotechnische Zweckmässigkeit der vom Geologen aus entstehungsgeschichtlicher Sicht ausgeschiedenen Schichtfolge. Späteiszeitlicher Seebodenlehm, basaler Faulschlamm, Seekreide und seekreideartige Ablagerungen unterschieden sich in den von uns untersuchten Fällen in auffallender Weise durch ihre bodenphysikalischen Eigenschaften. Dies gilt ausdrücklich nur für Sedimente ausserhalb des Einflussbereichs von grösseren Bächen und von Ufereinschwemmungen. Mit der Auswertung von im Seebecken von Richterswil ausgeführten Kernbohrungen zeigt Abb. 1 ein typisches geotechnisches Profil der spät- und nacheiszeitlichen feinkörnigen Ablagerungen:

- Der extrem hohe Wassergehalt¹⁾ der seekreideartigen Ablagerungen nimmt an der Schichtgrenze zum basalen Faulschlamm von ca. 70% auf ca. 30% ab und steigt beim Schichtwechsel zum Seebodenlehm wieder deutlich an. Sowohl Seekreide wie Seebodenlehm veranschaulichen durch mit zunehmender Tiefe abnehmendem Wassergehalt die mit dem natürlichen Überlagerungsdruck zunehmende Lagerungsdichte des Seebodens.
- Das ausserordentlich niedrige Feuchtraumgewicht²⁾ der seekreideartigen Ablagerungen von ca. 1,5 t/m³ nimmt beim Übergang zum basalen Faul-

¹⁾ Gewichtsanteil des in der Bodenprobe enthaltenen Wassers in Prozent des Gewichts der getrockneten Probe.

²⁾ Einheitsgewicht des Bodens einschliesslich Hohlräume bei natürlichem Wassergehalt.

schlamm auf ca. $1,9 \text{ t/m}^3$ zu. Die Grenze Faulschlamm/Seebodenlehm zeichnet sich durch eine Gewichtsverminderung ab. Das aus Wassergehalt und Feuchtraumgewicht berechnete Trockenraumgewicht³⁾ verhält sich analog. Bei einem spezifischen Gewicht der am Aufbau des Bodens beteiligten Mineralien von über $2,7 \text{ t/m}^3$ ist das mittels Pyknometeranalyse bestimmte spezifische Gewicht⁴⁾ seekreideartiger Ablagerungen von $2,5\text{--}2,6 \text{ t/m}^3$ erstaunlich niedrig und deshalb fragwürdig.

- Deutliche Unterscheidungsmerkmale liefert auch die Klassifikation nach Korngrößenanteilen⁵⁾: Beim Übergang von seekreideartigen Sedimenten zu basalem Faulschlamm nimmt der Anteil der Ton- und Siltfraktion auf Kosten der Sandfraktion zu. Der Seebodenlehm unterscheidet sich vom Faulschlamm durch einen erhöhten Anteil der Tonfraktion und einen entsprechend reduzierten Siltgehalt.
- Bei den Konsistenzgrenzen⁶⁾ zeichnet sich an der Grenze seekreideartige Ablagerungen/basaler Faulschlamm trotz deutlicher Zunahme des Tongehaltes eine Abnahme von Fließ- und Ausrollgrenze ab. Trotz ca. 4fachem Anteil der Tonfraktion liegen sowohl Fließ- wie Ausrollgrenze beim Seebodenlehm erstaunlicherweise wesentlich tiefer als beim seekreideartigen Sediment.
- Eindeutige Schichtgrenzen lassen sich auch auf Grund von mit Flügelsondierungen⁷⁾ ermittelten Scherfestigkeitsprofilen ziehen. Die undrainierte Scherfestigkeit des ungestörten Bodens nimmt beim Übergang seekreideartige Ablagerungen/basaler Faulschlamm schlagartig ab und beim Schichtwechsel Faulschlamm/Seebodenlehm wieder deutlich zu. Auffallende Unterschiede zeigt auch die als Verhältnis des Bruchwiderstandes des ungestörten zum gestörten Boden definierte Strukturempfindlichkeit oder Sensitivität. Sie ist im basalen Faulschlamm vor allem im Vergleich zu den seekreideartigen Ablagerungen, aber auch zum Seebodenlehm, ausgesprochen niedrig.

³⁾ Einheitsgewicht des Bodens einschliesslich Hohlräume nach Wasserentzug durch Trocknung.

⁴⁾ Einheitsgewicht der hohlraumfreien Festsubstanz des Bodens.

⁵⁾ Tonfraktion: Korndurchmesser $< 0,002 \text{ mm}$, Siltfraktion: Korndurchmesser $0,002\text{--}0,06 \text{ mm}$, Sandfraktion: Korndurchmesser $0,06\text{--}2,00 \text{ mm}$.

⁶⁾ Konsistenzgrenzen nach ATTERBERG: Fließgrenze = Wassergehalt des Bodens beim Übergang vom plastischen zum flüssigen Zustand, Ausrollgrenze = Wassergehalt des Bodens beim Übergang vom plastischen zum festen Zustand, Plastizität = Differenz zwischen Fließ- und Ausrollgrenze.

⁷⁾ Messung der Bruchfestigkeit des Bodens in situ beim Abscheren einer rotationszylinderförmigen Probe mit dem Drehflügel. Der hohen Belastungsgeschwindigkeit entsprechend bauen sich dabei beträchtliche Porenwasserspannungen auf (undrainierter Zustand). Nach Durchführung des Versuchs im ungestörten Boden wird der Boden durch rasche Drehungen des Flügels gestört und anschliessend die verbleibende Restscherfestigkeit gemessen.

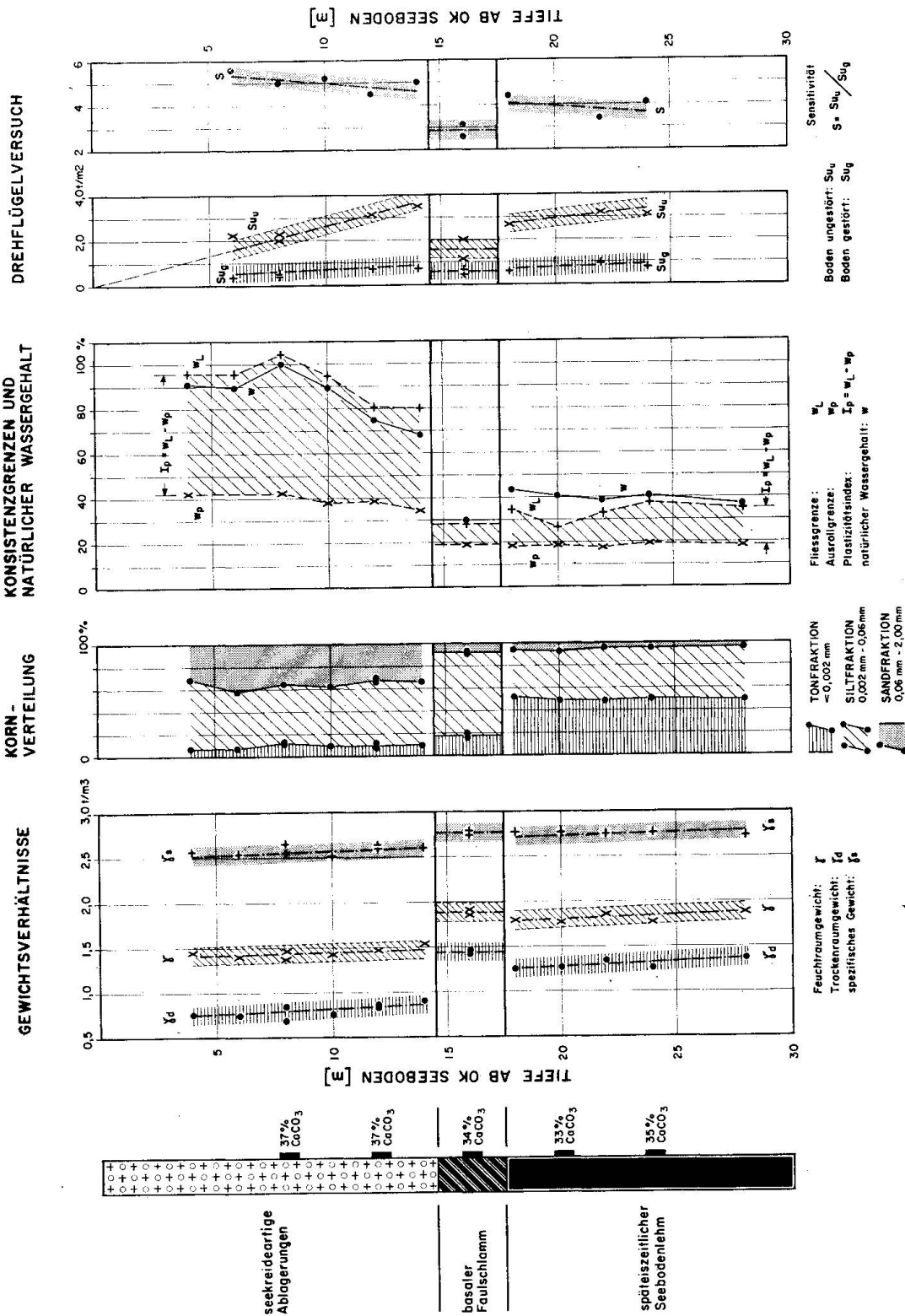


Abb. 1. Spät- und nacheiszeitliche Sedimente im Seebecken von Richterswil. Geotechnisches Übersichtsprofil.

Als zweckmässiges Klassifikationsmittel erweist sich die Darstellung der Kornverteilungen in Summationskurven. Abb. 2 zeigt, dass sich – soweit untersucht – Seekreide und seekreideartige Sedimente, basaler Faulschlamm und Seebodenlehm auf Grund charakteristischer Kornverteilungen eindeutig auseinanderhalten lassen. Die als Auswertung zahlreicher Untersuchungen angegebenen Streubereiche überschneiden sich kaum und die typischen Summationskurven der drei geologischen Formationen unterscheiden sich durch spezifische Krümmungsverhältnisse.

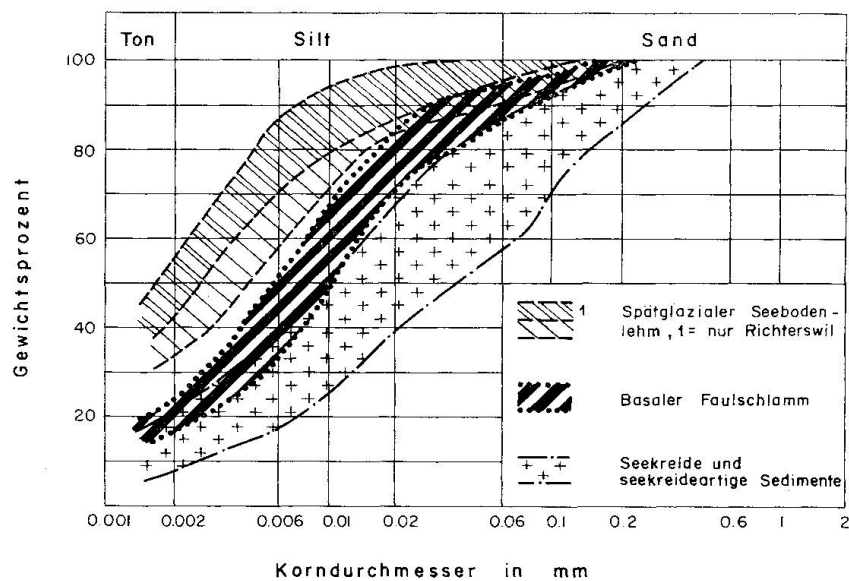


Abb. 2. Summationskurven der Kornverteilung: Charakteristischer Streubereich von Seebodenlehm, basalem Faulschlamm sowie Seekreide und seekreideartigen Sedimenten.

Unsere Untersuchungen späteiszeitlichen Seebodenlehms des Zürichsees beschränken sich vorläufig auf Bohrungen in der Bucht von Richterswil und im unteren Seebecken bei Zürich. Sie konzentrieren sich, der bautechnischen Fragestellung entsprechend, auf die oberste Partie des bis zu 100 m mächtigen Schichtstosses. Basaler Faulschlamm und Seekreide sowie seekreideartige Ablagerungen wurden dagegen auch bei zahlreichen Aufschlüssen für Seeuferbauten angetroffen und untersucht. Unser spezielles Interesse gilt im folgenden den Produkten der Kalkausfällung der jüngsten, rezenten Sedimentationsepoche.

SEEKREIDE UND SEEKREIDEARTIGE ABLAGERUNGEN

Als Seekreide werden junge Seeablagerungen von ausgesprochen hohem Kalkgehalt, niedrigem Raumgewicht und hoher Strukturempfindlichkeit bezeichnet. Über die Frage, bis zu welcher unteren Grenze des Kalkgehaltes von

Seekreide gesprochen werden soll, herrscht, wie aus nachfolgender Übersicht hervorgeht, keine Einigkeit:

Tabelle 1. Abgrenzung des Begriffs Seekreide nach dem Kalkgehalt

	E. WASMUND (1930)	A. VON MOOS (1949)	H. ZÜLLIG (1956) W. LÜDI (1957)	G. MÜLLER (1971)
Seekreide	80–100%	50–100%	40–100%	75–100%
Seemergel	20– 80%	–	unter 40%	50– 75%

Anteil CaCO₃ in Gewichtsprozenten

Wie unsere Ausführungen zeigen werden, ist es durchaus sinnvoll, den Begriff Seekreide mit hohem Kalkgehalt in Verbindung zu bringen. Für weniger karbonatreiche, strukturell seekreideähnliche Böden wird im folgenden anstelle des Begriffs «Seemergel» die Bezeichnung «seekreideartige Ablagerung» verwendet, weil der Begriff Mergel in der Schweiz zur Bezeichnung einer Felsart verwendet wird.

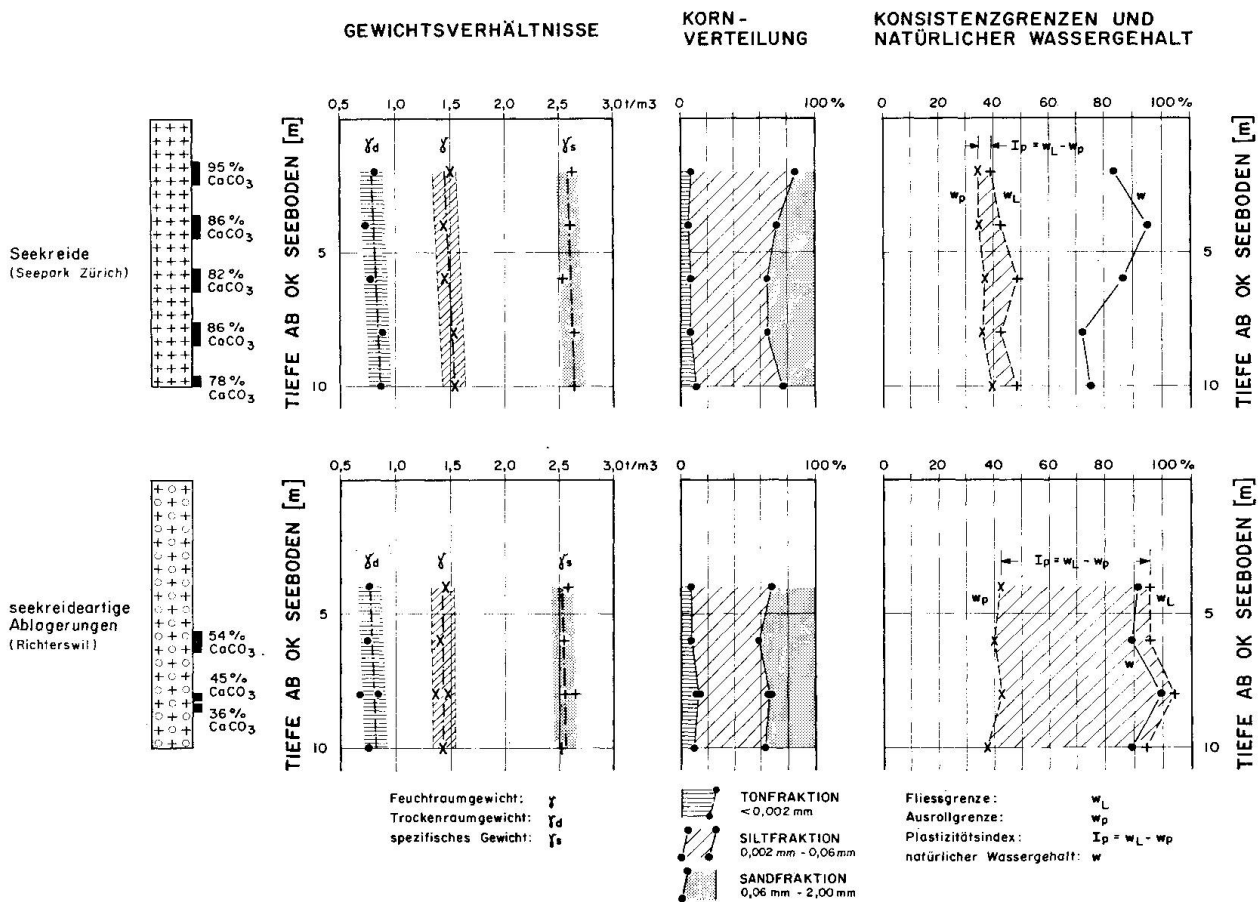


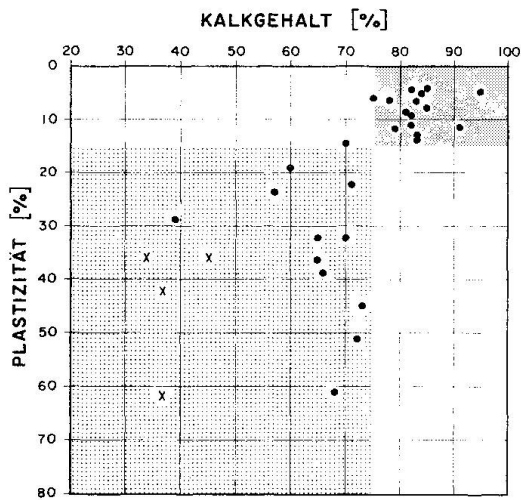
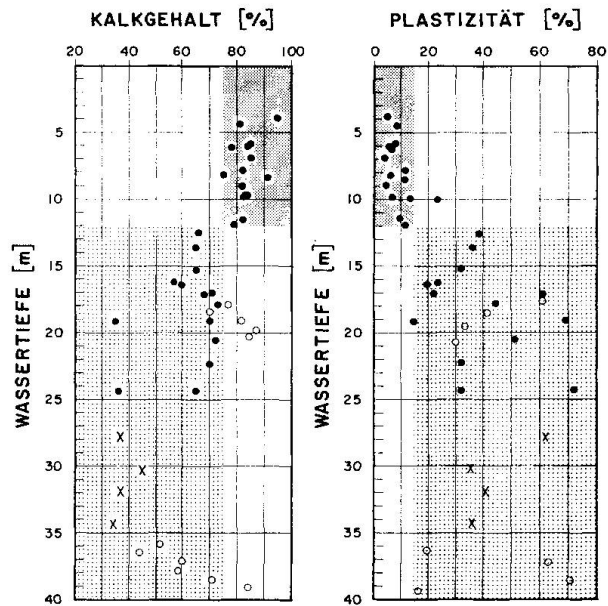
Abb. 3. Seekreide und seekreideartige Ablagerungen. Vergleich der bodenphysikalischen Eigenschaften.

Die Diagramme der Abb. 3 vergleichen die bodenphysikalischen Eigenschaften typischer Seekreide und seekreideartiger Ablagerungen. Die als Seekreide klassifizierten Sedimente entstammen dem unteren Seebecken bei Zürich und enthalten über 80% CaCO_3 , die seekreideartigen Ablagerungen kommen aus der Bucht von Richterswil (35–50% CaCO_3). Trotz verhältnismässig niedrigem Kalkgehalt zeigen die Richterswiler Proben den hohen Wassergehalt und das niedrige Raumgewicht typischer Seekreide sowie deren charakteristische Kornverteilung. Beträchtliche Unterschiede offenbart dagegen der Vergleich der Konsistenzgrenzen. Bei vergleichbarem Wassergehalt an der Ausrollgrenze liegt der Wassergehalt an der Fliessgrenze bei den seekreideartigen Ablagerungen etwa doppelt so hoch wie bei echter Seekreide. Damit ergibt sich für die seekreideartigen Sedimente ein unwahrscheinlich hoher Plastizitätsindex von zirka 50% – gegenüber 10–15% von Seekreide –, welcher in offensichtlichem Widerspruch zum bescheidenen Anteil der Tonfraktion an der Kornverteilung steht. Es scheint uns deshalb naheliegend, zur Abgrenzung des Begriffs Seekreide nebst dem Kalkgehalt den als Differenz von Fliess- und Ausrollgrenze definierten Plastizitätsindex beizuziehen.

In den Diagrammen der Abb. 4 sind Kalkgehalt und Plastizität in Abhängigkeit der Wassertiefe aufgetragen. Zieht man die Grenze zwischen Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen bei einem Karbonatgehalt von 75% und einem Plastizitätsindex von 15%, so sedimentiert Seekreide zur Hauptsache nur bis zu einer Wassertiefe von 12 m. Unterhalb der 12-m-Grenze entstehen in der Regel seekreideartige Ablagerungen mit einem – offensichtlich von der weiteren Wassertiefe unabhängigen – grossen Streubereich des Kalkgehalts und der Plastizität. Abb. 5 veranschaulicht, dass sich mit der Klassifikation nach Kalkgehalt und Plastizität eine eindeutige Grenze zwischen Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen ziehen lässt. Wir empfehlen, in diesem Sinne die Definition Seekreide mit einem minimalen Kalkgehalt von 75% und einem maximalen Plastizitätsindex von 15% zu verknüpfen. In struktureller und bodenmechanischer Hinsicht mit Seekreide vergleichbare Sedimente von niedrigerem Kalkgehalt und höherer Plastizität können als seekreideartige Ablagerungen bezeichnet werden.

Die aus Kalkgehalt und Plastizität abgeleitete sedimentologische Grenze bei 12 m Wassertiefe hängt offensichtlich mit der Lage der Sprungschicht und mit dem Chemismus des Zürichseewassers als Randbedingungen zusammen (C. SCHINDLER, 1976). Seekreideähnliche Struktur und entsprechende bodenphysikalische Eigenschaften wurden bisher bei Proben festgestellt, welche minimal 32% Karbonat enthielten, wobei dies nicht dem Extremwert entsprechen muss. Andererseits treten beim basalen Faulschlamm, bei späteiszeitlichen Seebodenlehmen und sogar bei gletschernahen Seeablagerungen sehr oft Karbonatgehalte um 30–35% auf, wobei es sich hier um detritisches, zugeführtes Material handeln muss. Die für Seekreide und seekreideartige Sedimente charakteristi-

Abb. 4. Seekreide und seekreideartige Ablagerungen: Kalkgehalt und Plastizität in Abhängigkeit der Wassertiefe. Charakteristische Grenzen bei 12 m Wassertiefe, 75% Kalkgehalt und einem Plastizitätsindex von 15%.



HERKUNFT DER PROBEN: ● Zürich: Seepark ○ Zürich: Seetunnel X Richterswil

Seekreide
seekreideartige Ablagerungen

Abb. 5. Vorschlag zur Klassifikation von Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen nach Kalkgehalt und Plastizität: Seekreide: $\text{CaCO}_3 > 75\%$, $I_p < 15\%$; seekreideartige Ablagerung: $\text{CaCO}_3 < 75\%$, $I_p > 15\%$.

sehen Erscheinungen hängen also offensichtlich nicht direkt vom Karbonatgehalt, sondern vom autigen aus dem Seewasser ausgefallten Kalk ab, dessen Anteil am Gesamtsediment recht niedrig sein kann.

Durch unterschiedliche Bruchfestigkeit und Strukturempfindlichkeit unterscheiden sich Seekreide und seekreideartige Ablagerungen auch in bautechnisch relevanter Weise. In Abb. 6 sind mit der Flügelsonde in situ gemessene undrainierte Scherfestigkeiten und die entsprechenden Sensitivitäten in Abhängigkeit des natürlichen Überlagerungsdrucks p_0 aufgetragen. Als typisches Merkmal des nicht vorbelasteten, normalkonsolidierten Bodens nimmt die Scherfestigkeit linear mit dem wachsenden Überlagerungsdruck zu. Mit Bruchfestigkeiten des ungestörten Bodens von $0,3 p_0$ bis $0,4 p_0$ der echten Seekreide und $0,5 p_0$ bis

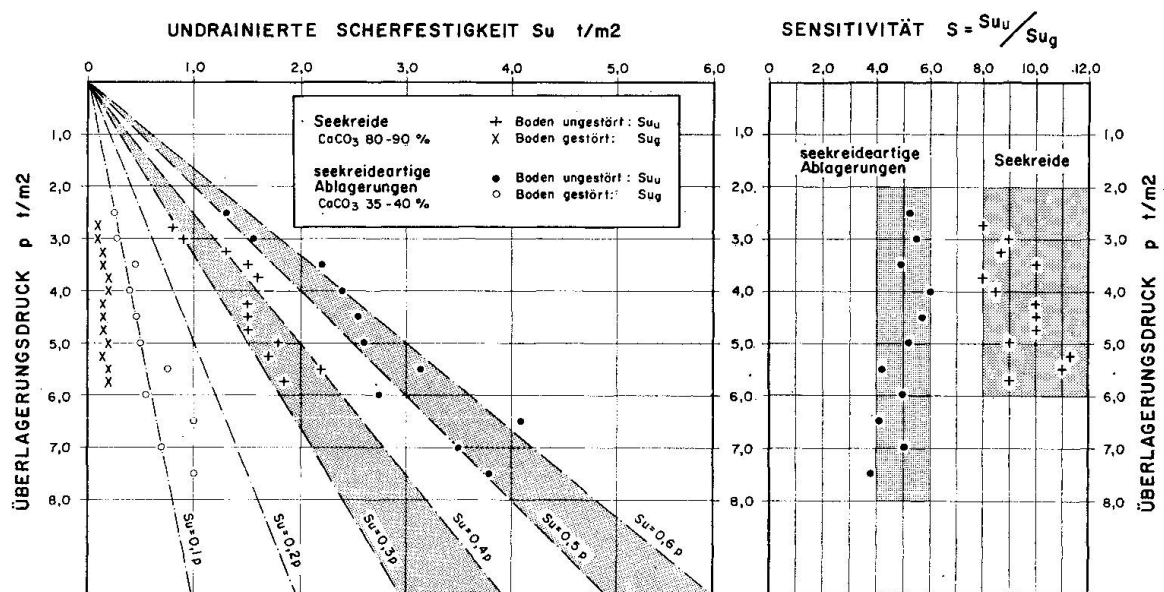


Abb. 6. Undrainierte Scherfestigkeit und Sensitivität von Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen in Abhängigkeit des natürlichen Überlagerungsdrucks. Die seekreideartigen Ablagerungen zeigen eine höhere Bruchfestigkeit und geringere Strukturempfindlichkeit als Seekreide.

0,6 p_0 der seekreideartigen Ablagerungen zeigen die kalkärmeren Sedimente einen beträchtlich höheren Bruchwiderstand. Die Restscherfestigkeit des gestörten Bodens erreicht bei den seekreideartigen Ablagerungen von Richterswil den ca. 3fachen Wert derjenigen typischer Seekreide aus dem unteren Seebekken. Mit Werten von 8–12 bei Seekreide gegenüber 4–6 bei seekreideartigen Ablagerungen ist die Sensitivität des kalzitärmeren Gefüges nur halb so gross. J. HUDER gibt 1963 für die Scherfestigkeit von Seekreide von Tiefenbrunnen (CaCO₃ 80%, Plastizität 14%, Strukturempfindlichkeit 10) 0,34 p_0 an.

Im späteiszeitlichen Seebodenlehm der Bucht von Richterswil wurden vergleichsweise Sensitivitäten von 3–4 und Scherfestigkeiten des ungestörten Bodens von 0,15 p_0 bis 0,20 p_0 gemessen.

Die an den seekreideartigen Ablagerungen zutage getretenen Widersprüche zwischen Kornverteilung und Plastizität, das Versagen der Pyknometeranalyse bei Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen sowie die Frage nach der Ursache der seekreideähnlichen Eigenschaften verhältnismässig kalzitärmer Sedimente gaben Anlass zu verfeinerten Laboruntersuchungen.

Sedimentpetrographische Untersuchungen

PROBEN UND PROBENTEILUNG

Aus den Untersuchungen von M. MÜLLER-VONMOOS und G. KAHR (1976) greifen wir folgende charakteristischen Proben heraus:

Tabelle 2. *Laborklassifikation*

Probe Nr.	1	2	3	4	
Geotechnische Bezeichnung	Seekreide	seekreide- artig	basaler Faulschlamm	Seeboden- lehm	
Wassergehalt	%	85	124	30	41
Feuchtraumgewicht	t/m ³	1,48	1,36	1,86	1,77
Trockenraumgewicht	t/m ³	0,80	0,61	1,43	1,26
Spezifisches Gewicht	t/m ³	2,63	2,57	2,74	2,76
Porosität	%	70	76	48	54
Kalkgehalt CaCO ₃	%	88	50	38	35
Fliessgrenze	%	44	74	32	38
Ausrollgrenze	%	32	42	20	19
Plastizitätsindex	%	12	32	12	19
USCS-Klassifikation	OL	MH	CL	CL	

Die Proben wurden bei Raumtemperatur getrocknet, kleiner als 2 mm gebrochen und mit dem Probenteiler wie folgt aufgeteilt:

100 g	Bestimmung der Körnung nach SNV
300 g	Bestimmung der Konsistenzgrenzen
Rest	Untersuchung im tonmineralogischen Labor, mit Probenteiler weiter aufgeteilt

KORNVERTEILUNGSANALYSEN

Die Bestimmung der Kornverteilung an Lockergesteinen für Korngrößen zwischen 0,1 und 0,001 mm mit der Aräometermethode durch Sedimentation des Materials aus einer Suspension wird im SNV-Normblatt 70816 umschrieben. Zur Dispergierung der zu analysierenden Schlämme schreibt die Norm eine Durchwirbelung von 15 Minuten Dauer mittels mechanischem Rührwerk vor. Es stellt sich die Frage, ob der Normversuch für die untersuchten Böden reproduzierbare Ergebnisse liefert bzw. ob und in welchem Masse die Anwendung erhöhter Dispergierungsenergie Änderungen der Kornverteilung hervorruft. Als Alternative zur verhältnismässig milden Dispergierung des Normversuchs wurden die Suspensionen der Proben vorgängig der Sedimentationsanalyse mit Ultraschall (Frequenz 20 kHz) behandelt.

1,5–3,5 g wurden in 50 ml 0,1prozentigem Calgon wie folgt beschallt:

	Beschallungsenergie
3 Min. Stufe 5	$3,53 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$
3 Min. Stufe 7	$7,94 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$
3 Min. Stufe 9	$14,11 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$
6 Min. Stufe 9	$28,22 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$
6 Min. Stufe Maximum	$41,62 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$

Die Proben wurden bei 63 μ nass gesiebt. Den Anteil < 20 und < 2 μ bestimmte man im Pipettenapparat. Der Anteil der ofentrockenen Fraktionen wurde in Gewichtsprozenten der ofentrockenen Proben angegeben.

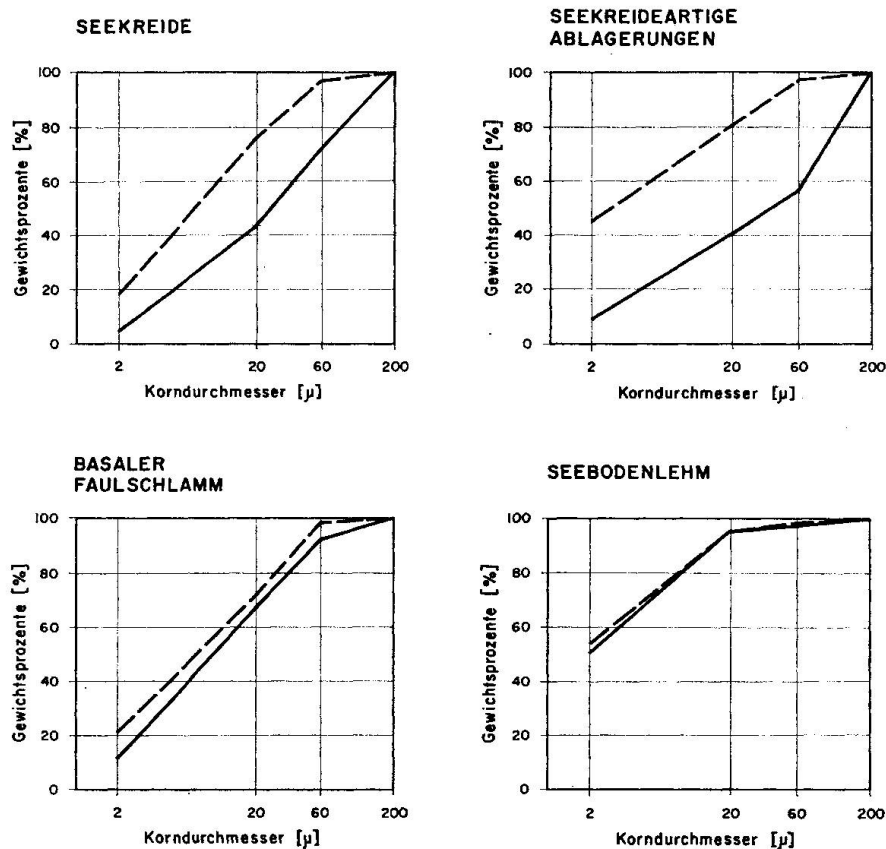


Abb. 7. Summationskurven der Kornverteilung:

———— Dispergierung nach SNV 70816
 - - - - - Dispergierung durch Beschallung

Bei Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen bewirkt die Beschallung eine beträchtliche Erhöhung des Feinkornanteils. Beim basalen Faulschlamm und Seebodenlehm erweisen sich dagegen die nach der SNV-Norm bestimmten Kornverteilungen gegenüber der Zufuhr erhöhter Dispergierungsenergie als stabil.

Die Ergebnisse der Kornverteilungsanalysen nach SNV und Beschallung sind in Abb. 7 verglichen. Abb. 8 veranschaulicht den Einfluss zunehmender Beschallungsenergie auf die Körnung.

Bei Seekreide und seekreideartigen Proben bewirkte die Beschallung eine beträchtliche zusätzliche Dispergierung: Bei Probe 1 (Seekreide) wurde der Anteil $< 2 \mu$ von 4% auf 15%, bei Probe 2 (seekreideartig) sogar von 9% auf 46% erhöht. Diese Zunahme der Feinkörnigkeit stellte sich weitgehend schon bei geringer Beschallung ein. Eine Steigerung der Beschallungsenergie blieb ohne nennenswerten Einfluss auf die Körnung. Beim basalen Faulschlamm (Probe 3) und Seebodenlehm (Probe 4) stimmen die Kornverteilungen nach SNV und nach Beschallung weitgehend überein.

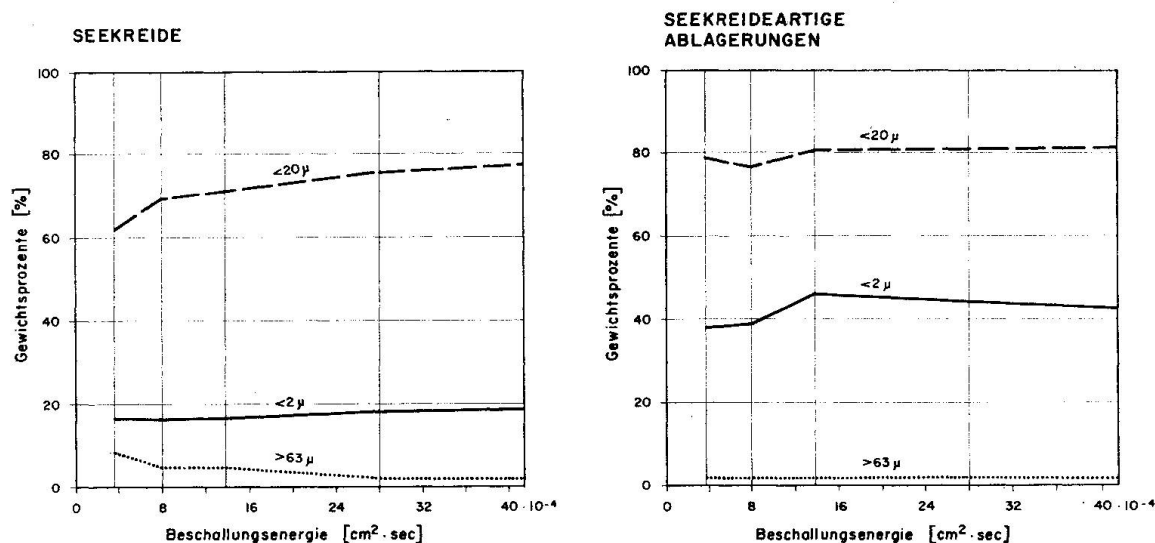


Abb. 8. Körnung von Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen in Abhängigkeit der Beschallungsenergie: Eine Steigerung der Beschallungsenergie bleibt ohne nennenswerten Einfluss auf die Körnung.

BERECHNUNG DES MITTLEREN KORNDURCHMESSERS AUS DER OBERFLÄCHE

Die Oberfläche der bei 150° im Hochvakuum getrockneten Proben wurde durch Stickstoff-Tiefemperatur-Adsorption nach Brunauer, Emmett und Teller (BET) mit einer Ströhlein-Apparatur (Ein-Punkt-Methode) bestimmt. Die mittlere Teilchengrösse wurde nach folgender Formel berechnet:

$$d = \frac{6}{O \cdot \gamma_s}$$

γ_s spezifisches Gewicht der Festsubstanz
 d Teilchendurchmesser
 O BET-Oberfläche

Dabei wurden folgende Oberflächen und mittlere Teilchendurchmesser bestimmt:

Tabelle 3. Oberflächen und mittlere Teilchendurchmesser

Probe		γ_s (t/m³)	O (m²/g)	d (μ)
1	Seekreide	2,63	2,8	0,82
2	seekreideartig	2,57	6,9	0,34
3	basaler Faulschlamm	2,74	7,9	0,28
4	Seebodenlehm	2,76	15,6	0,14

Mit erheblich grösserer Oberfläche und entsprechend kleinerem mittleren Teilchendurchmesser erwiesen sich bei sämtlichen untersuchten Proben die seekreideartigen Sedimente als bedeutend feinkörniger als typische Seekreide. Ersetzt man das im Pycnometerversuch als zu niedrig bestimmte spezifische Ge-

wicht der Festsubstanz durch dasjenige von Kalzit ($2,72 \text{ t/m}^3$), so reduziert sich der berechnete Teilchendurchmesser zusätzlich um ca. 5%.

POROSITÄT

Der Streubereich der Porosität⁸⁾ von Seekreide und seekreideartigen Sedimenten kann als Ergebnis zahlreicher Probenuntersuchungen mit 60–75% angegeben werden. An Probe 1 (Seekreide) und Probe 2 (seekreideartig) wurden folgende Volumenverhältnisse bestimmt:

Tabelle 4. *Gewicht, Volumen und Porosität*

Probe	1	2
	Seekreide	seekreideartig
Trockenraumgewicht	0,80 g/cm ³	0,61 g/cm ³
spezifisches Gewicht	2,63 g/cm ³	2,57 g/cm ³
Porosität	70%	76%
spezifisches Probenvolumen	1,25 cm ³ /g	1,64 cm ³ /g
spezifisches Porenvolumen	0,88 cm ³ /g	1,25 cm ³ /g

Als Folge des zu niedrig gemessenen spezifischen Gewichts wurde dabei die Porosität geringfügig unterschätzt. Das extrem niedrige Trockenraumgewicht und entsprechend hohe Proben- und Porenvolumen von Probe 2 dürfen nicht als typisches Merkmal des seekreideartigen Sediments betrachtet werden.

Zwischen Seekreide und seekreideartigen Ablagerungen bestehen allgemein keine charakteristischen Unterschiede der Gewichts- und Volumenverhältnisse.

Mit einem Quecksilberdruckporosimeter wurde die Porenvolumen-Porenradialen-Verteilung der beiden Proben ermittelt. Bei einer Oberflächenspannung von $480 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-1}$ und einem Benetzungswinkel von 130° füllt Quecksilber unter Atmosphärendruck alle Poren vom Radius grösser als $6,3 \mu$. Die Darstellung von Abb. 9 beschränkt sich deshalb auf die Verteilung der Porenradialen kleiner als $6,3 \mu$. Poren vom Radius kleiner als $0,01 \mu$ kamen kaum vor. Bei der Seekreide betrug der Anteil der Porenradialen unter $6,3 \mu$ 44%, beim seekreideartigen Sediment 33% des Porenvolumens der eingewogenen Probe. Der Anteil von Porenradialen kleiner als $0,6 \mu$ wurde an Probe 1 mit 14% und an Probe 2 mit 32% bestimmt. Damit erwies sich die seekreideartige Probe gegenüber der typischen Seekreide als deutlich feinporiger. Eine Porenradialenlücke zwischen $1,0$ – $6,3 \mu$ unterteilt die Hohlräume des seekreideartigen Sediments in Grob- und Feinporen. Die Summationskurve der für die Seekreide von Probe 1 ermittelten Porenradialenverteilung verläuft dagegen verhältnismässig gleichförmig.

⁸⁾ Prozentualer Anteil des Porenvolumens am Gesamtvolumen der Probe, berechnet aus dem Trockenraumgewicht der Probe und dem spezifischen Gewicht der Festsubstanz, ohne Berücksichtigung der Schrumpfung bei der Lufttrocknung.

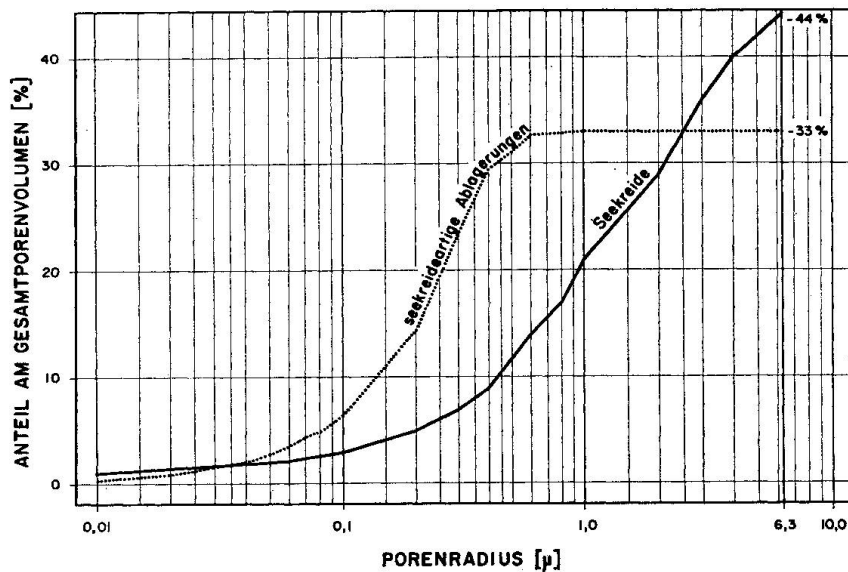


Abb. 9. Summationskurven der Porenradienverteilung: seekreideartige Ablagerungen sind wesentlich feinporiger als Seekreide.

MINERALOGIE

Am unfraktionierten Material bestimmte man röntgenographisch den Gehalt an Quarz, Kalzit und Dolomit. Zur Ermittlung des Tonmineralgehalts wurde die Tonfraktion, d. h. die Körner vom Durchmesser $< 2 \mu$, abgetrennt (Sedimentation aus einer durch Beschallung dispergierten Suspension in Calgonlösung). Neben eigentlichen Tonmineralen enthielt die Tonfraktion Quarz und Kalzit. Der Quarzgehalt wurde diffraktometrisch, der Kalzitgehalt titrimetrisch (nach Aufschluss mit HCl) bestimmt. Beim nachstehend angegebenen Tonmineralgehalt handelt es sich um den Gewichtsanteil der Tonfraktion nach Abzug ihres Quarz- und Kalzitgehalts.

Tabelle 5. Mineralogie, Vergleich Tonmineralgehalt/Tonfraktion

Probe		1 Seekreide	2 seekreide- artig	3 basaler Faul- schlamm	4 Seeboden- lehm	
Quarz	%	4	14	23	11	
Kalzit	%	85	46	33	33	
Dolomit	%	1	3	8	4	
Tonminerale	%	5	20	17	35	
Ton-	nach SNV	%	4	9	11	52
fraktion	beschallt	%	18	46	21	55

Zwischen dem vom Dispergierungsgrad der analysierten Suspensionen abhängigen, als Tonfraktion definierten Anteil der Korndurchmesser $< 2 \mu$ und dem effektiven Gehalt an Tonmineralen offenbarten sich erhebliche Unterschiede. Diese hängen unter anderem auch von der Art des untersuchten Lok-

kergesteins ab (vgl. z. B. Seebodenlehm/Seekreide). Diffraktometrisch und durch IR-Absorption wurde die Art der Tonminerale bestimmt. Alle Proben enthielten vorwiegend Illit und Chlorit. Der Gehalt an Kaolinit betrug im seekreideartigen Sediment sowie im basalen Faulschlamm und im Seebodenlehm weniger als 10% des Tonanteils. Der basale Faulschlamm wies einen deutlichen Anteil quellfähiger Tonminerale auf.

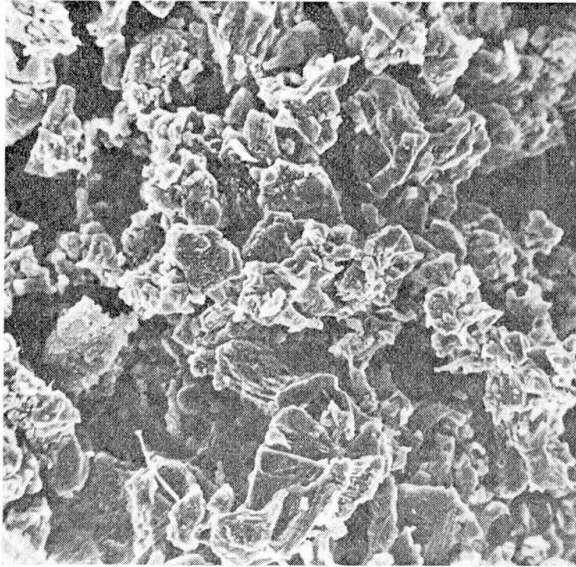


Abb. 10a. Bruchfläche ungestörter, luftgetrockneter Seekreide (Probe 1). Rasterelektronenmikroskop, 1300fach, die Bildbreite entspricht ca. 0,048 mm.

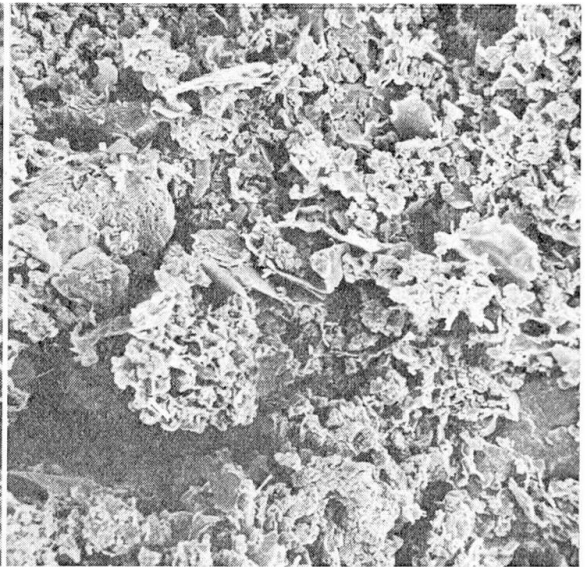


Abb. 10b. Bruchfläche ungestörter, luftgetrockneter seekreideartiger Ablagerung (Probe 2). Rasterelektronenmikroskop, 1250fach, die Bildbreite entspricht ca. 0,05 mm.

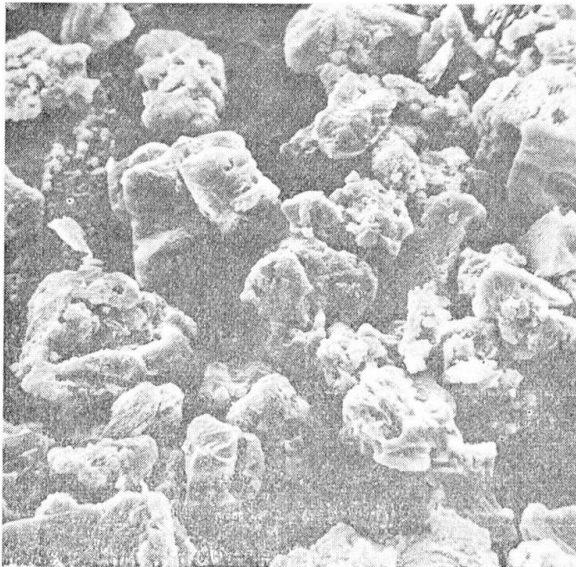


Abb. 10c. Fraktion 63–20 μ von Seekreide (Probe 1) nach Beschallung (6 Min. Stufe 9). Rasterelektronenmikroskop, 630fach, die Bildbreite entspricht ca. 0,1 mm.

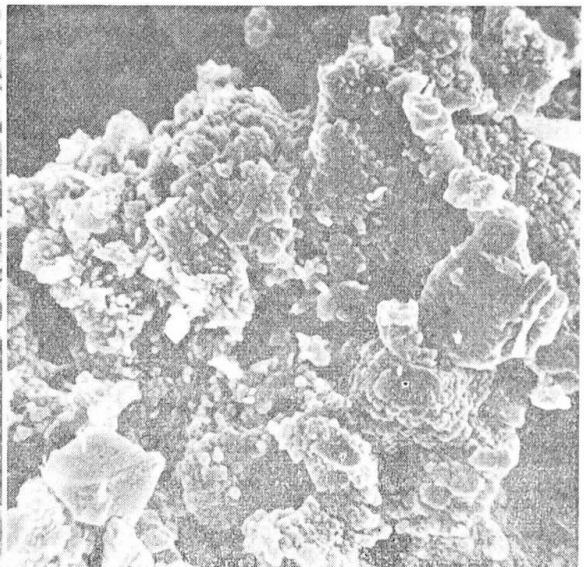


Abb. 10d. Seekreideartige Ablagerung (Probe 2), Teilchen mit reliefreicher, rauher Oberfläche, Rasterelektronenmikroskop, 3300fach, die Bildbreite entspricht ca. 0,019 mm.

ABBILDUNG VON GEFÜGE UND KORNFRAKTIONEN
MIT DEM RASTERELEKTRONENMIKROSKOP

Das Gefüge der Seekreide besteht aus locker aufeinandergelagerten, meist wenige μ grossen, sehr vielgestaltigen, porösen Teilchen (Abb. 10a). Demgegenüber sind die seekreideartigen Proben bedeutend feinkörniger, wobei der feinkörnige Kalzit mit nichtkarbonatischen Mineralen innig vermengt ist (Abb. 10b). Die stark porösen Teilchen sind bei beiden Lockergesteinsarten gegen Beschallung weitgehend stabil (Abb. 10c). Häufig wiesen die Teilchen sehr reliefreiche, rauhe Oberflächen auf (Abb. 10d).

Zusammenfassung und Diskussion

Abseits von Gebieten mit überdurchschnittlicher Zufuhr von detritischem Material wurden in grossen Teilen des Zürichsees über späteiszeitlichem Seebodenlehm der basale Faulschlamm und dann Seekreide oder seekreideartige Sedimente abgelagert. Diese Produkte dreier aufeinanderfolgender Sedimentationsepochen zeigen charakteristische Unterschiede in der Kornverteilung, im Wassergehalt, den Volumen- und Gewichtsverhältnissen, den Plastizitätseigenschaften und der Bruchfestigkeit.

Es wird vorgeschlagen, den Begriff «*Seekreide*» auf Ablagerungen mit einem minimalen Kalkgehalt von 75% und einem maximalen Plastizitätsindex von 15% zu beschränken. Solche Sedimente finden sich im Zürichsee zur Hauptsache nur in Wassertiefen bis zu 12 m, während unterhalb dieser Grenze *seekreideartige Ablagerungen* anzutreffen sind. Nebst niedrigerem Kalkgehalt und höherer Plastizität zeigen diese eine geringere Strukturempfindlichkeit und höhere Bruchfestigkeit als Seekreide. Dagegen stimmen der Wassergehalt, die Gewichtsverhältnisse und die Kornverteilung nach SNV weitgehend überein.

Seekreide besteht aus einem lockeren Gefüge von porösen, punktförmig verwachsenen Kalziteilchen. Bei den seekreideartigen Ablagerungen dürfte dagegen der im See autigen ausgefällte Kalzit vorwiegend als feinverteilte, poröse Kittsubstanz zwischen detritischem Material auftreten. Daraus entstehen grössere Berührungsflächen bzw. zahlreichere Kalzitbrücken zwischen den Teilchen, welche dem seekreideartigen Gefüge höhere Bruchfestigkeit und geringere Strukturempfindlichkeit verleihen. Zudem dürften die Kalzitbrücken zwischen den detritischen, silikatischen Körnern eine höhere Festigkeit erreichen als zwischen den Seekreidepartikeln.

Zur Bestimmung der *Kornverteilung* müssen bei beiden Sedimentarten Kalzitbrücken aufgebrochen werden. Mit dem Schlämmversuch nach SNV wird infolge relativ milder Dispergierung nur eine Verteilung von Aggregaten bestimmt, welche bei Beschallung in feinere, stabilere Körner zerfallen. Korn-

verteilungen können für diese Böden nur dann erhalten werden, wenn die zugeführte Dispergierungsenergie einen gewissen Minimalwert überschreitet. Eine weitere Steigerung der Energie ändert das Bild nicht mehr wesentlich.

Die von der SNV-Norm vorgeschriebene, allgemein angewandte Dispergierung liegt bei Seekreide und seekreideartigen Sedimenten offensichtlich unterhalb der kritischen Schwelle, genügt dagegen für Seebodenlehm und basalen Faulschlamm, wo keine Kalzitbrücken auftreten. Erstaunlicherweise liefert der Normversuch trotzdem – Konstanz der Dispergierungsenergie vorausgesetzt – auch bei Seekreide und seekreideähnlichen Sedimenten immer wieder ähnliche «Kornverteilungen», wobei der Streubereich für beide Lockergesteinsarten praktisch identisch ist. Der Vergleich von nach SNV-Methode und nach Beschallung ermittelten Körnungen kann zum Nachweis von Kalzitbrücken dienen und erklärt die grössere Gefügestabilität seekreideartiger Ablagerungen gegenüber Seekreide: Beim seekreideartigen Sediment, wo durch die Beschallung zahlreichere Kalzitbrücken aufgebrochen werden, unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Untersuchungsmethoden viel deutlicher.

Die *Oberfläche* ist bei seekreideartigen Sedimenten grösser als bei Seekreide und nähert sich den Werten für den basalen Faulschlamm, also einem siltig-tonigen, detritischen Gestein.

Aus der Oberfläche und dem spezifischen Gewicht lassen sich für Seekreide und seekreideartige Ablagerungen *mittlere Teilchendurchmesser* berechnen, welche weit niedriger sind als jene der Kornverteilung nach Beschallung. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die gegen Beschallung weitgehend stabilen Körner eine rauhe, reliefreiche Oberfläche aufweisen und zudem eine grosse innere Porosität besitzen. Wegen der inneren Oberfläche der porösen Teilchen muss ihr aus der Gesamtoberfläche berechneter mittlerer Durchmesser wesentlich kleiner sein als ihr Stokescher Durchmesser.

Porositätsmessungen an Seekreide ergeben eine gleichmässige Verteilung der Porenradien über einen breiten Streubereich. Die Porenradienverteilung seekreideartiger Sedimente zeigt dagegen einen extrem hohen Feinporenanteil und eine auffallende Lücke im Bereich mittlerer Porendurchmesser. Diese Beobachtungen stimmen mit den Ergebnissen der Oberflächenmessungen überein.

Die Aufnahmen vom intakten Gefüge und von beschallten Körnern durch das *Rasterelektronenmikroskop* veranschaulichen und erhärten die gemachten Aussagen auf eindruckliche Weise, wobei insbesondere auf die Unterschiede zwischen Seekreide und seekreideartigen Sedimenten sowie auf die rauhe Oberfläche und die Porosität der einzelnen Körner hingewiesen sei. Sie erklären auch die Erscheinung, dass bei Seekreide und – noch extremer – bei seekreideartigen Sedimenten die Pyknometeranalyse ein zu niedriges *spezifisches Gewicht* ergibt, bleibt doch während des Versuchs in den feinsten Poren innerhalb der Körner Luft eingeschlossen.

Interessant sind die Ergebnisse in bezug auf die *Plastizität*: Der späteiszeit-

liche Seebodenlehm und der basale Faulschlamm zeigen bei vergleichbarer Ausrollgrenze die charakteristische Abhängigkeit der Fliessgrenze vom Tongehalt. Der Plastizitätsindex ist hier Ausdruck echter Verformbarkeit, hervorgerufen durch das Wechselspiel der zwischen den Teilchen wirkenden Kräfte der Massenanziehung und der elektrischen Doppelschichten. In offensichtlichem Widerspruch zu diesen Gesetzmässigkeiten weist die an Tonmineralien sehr arme Seekreide eine auffällig hohe Fliess- und Ausrollgrenze auf. Bei einem Tongehalt ähnlich dem basalen Faulschlamm erreicht die Ausrollgrenze, besonders aber die Fliessgrenze, bei den seekreideartigen Sedimenten extrem hohe Werte, was zu einer erstaunlichen Plastizität führt. Diese Erscheinungen lassen sich auf jeden Fall nicht mit dem Gehalt an Tonmineralien oder deren Aktivität erklären. Vielmehr handelt es sich bei der Verformbarkeit dieser Böden um eine *scheinbare Plastizität*.

Nach DUMBLETON und WEST (1966) haben Kornform und Rauhigkeit einen grossen Einfluss auf die Konsistenzgrenzen. Diese nehmen bei gleicher Körnung von kugelförmigen über eckige zu plättchenförmigen Teilchen und bei steigender Rauhigkeit zu. Es ist deshalb anzunehmen, dass die hohe Fliessgrenze von Seekreide und seekreideartigen Sedimenten vor allem auf die grosse Rauhigkeit der Teilchen und das in den porösen Partikeln eingeschlossene, am Schervorgang nicht beteiligte Wasser zurückzuführen ist. Eine im Verhältnis zur Fliessgrenze hohe Ausrollgrenze und ein entsprechend kleiner Plastizitätsindex, wie er bei Seekreide angetroffen wird, sind für Lockergesteine mit porösen Teilchen, wie vulkanische Asche, Hallyosit, Sepiolit und Palygorskit, typisch.

Wir vermuten, dass bei der Ausrollgrenze grössere Wassermengen durch die porösen Körner und Aggregate schwammartig aufgesogen werden. Die freie Verschiebbarkeit der Teilchen an der Fliessgrenze erfordert, der rauhen, unregelmässigen Oberflächenbeschaffenheit entsprechend, die Zugabe weiterer beträchtlicher Wassermengen. Diese Annahme wird durch den Umstand gestützt, dass die porösen Teilchen bei der Ermittlung der Konsistenzgrenzen nicht zerstört werden, sondern dass sogar grössere Aggregate erhalten bleiben können. Die Beschallung von Seekreide bewirkt nur eine geringfügige Erhöhung der Konsistenzgrenzen und bleibt ohne nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse von Porositätsmessungen.

Die summarischen *mineralogischen Untersuchungen* ergaben beim späteiszeitlichen Seebodenlehm und dem basalen Faulschlamm einen beträchtlichen Gehalt an Quarz und Kalzit, während der Dolomit etwas zurücktritt. Der Gehalt an Tonmineralien liegt deutlich unter dem Kornanteil mit Durchmesser unter 2μ , sofern dieser nach Beschallung bestimmt wurde, stimmt aber auch nicht mit den Ergebnissen der Analyse nach SNV überein. Die Tonfraktion enthält nach Beschallung beträchtliche Anteile von Quarz und Kalzit. Es erstaunt nicht, dass bei Seekreide und seekreideartigen Sedimenten die Übereinstimmung besonders schlecht ist, wirken sich doch hier Kalzitbrücken aus,

welche je nach Dispergierungsgrad erhalten bleiben oder zusammenbrechen. Instruktiv ist das Beispiel der in Tabelle 5 aufgeführten Probe von seekreideartigem Sediment: Bei einem Gehalt von 20% Tonmineralien ergab sich nach SNV eine Tonfraktion von 9%, nach Beschallung eine solche von 46%!

Leider lässt sich der Kalzit vorläufig nicht nach Entstehungsart – detritisch oder autigen – trennen, doch dürfte in relativ kalkarmen, seekreideähnlichen Sedimenten der Prozentsatz an frisch ausgefälltem Kalzit kaum sehr hoch sein, enthalten doch im Zürichsee viele rein detritische Sedimente 30–35% CaCO₃.

Abschliessend sei nochmals betont, dass die vorliegenden Untersuchungen keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erheben und sich auf begrenztes Unterlagmaterial stützen. Sie stellen einen Versuch dar, komplexe, vielschichtige Probleme zu erfassen, wobei in verschiedenen Fällen (Kornverteilung, Plastizität, Tonfraktion) die Grenzen und der beschränkte Wert der üblicherweise verwendeten Denkmodelle sichtbar geworden sind.

Zitierte Literatur

- DUMBLETON, M. J. and G. WEST (1966): The influence of the coarse fraction on the plastic properties of clay soils. Road Research Laboratory, Report No. 36.
- FÖRSTNER, U., G. MÜLLER und H. E. REINECK (1968): Sedimente und Sedimentgefüge des Rheindeltas im Bodensee. N. Jb. Miner. Abh. 109.
- HUDER, J. (1963): Bestimmung der Scherfestigkeit strukturempfindlicher Böden unter besonderer Berücksichtigung der Seekreide. M. H. VAWE, ETH Zürich.
- LÜDI, W. (1957): Ein Pollendiagramm aus dem Untergrund des Zürichsees. Schweiz. Z. Hydrol. 19.
- VON MOOS, A. (1949): Der Baugrund der Stadt Zürich. Vjschr. Nat. Ges. Zürich 94.
- MÜLLER, G. (1971): Sediments of Lake Constance. Sedimentology of parts of Central Europe. Guidebook VIII. Int. Sediment. Congress.
- MÜLLER-VONMOOS, M. und G. KAHR (1976): Körnung und Plastizität von Seekreide. Interner Bericht 285 J, IGB/ETH Zürich.
- SCHINDLER, C. (1974): Zur Geologie des Zürichsees. Eclogae geol. Helv. 67/1.
- SCHINDLER, C. (1976): Eine geologische Karte des Zürichsees und ihre Deutung. Eclogae geol. Helv. 69/1.
- Schweiz. Normenvereinigung (SNV) (1964): Blatt 70816, Gesteinsmaterialien, Schlammversuch nach der Aräometermethode.
- STURM, M. und A. MATTER (1972): Sedimente und Sedimentationsvorgänge im Thunersee. Eclogae geol. Helv. 65/3.
- WASMUND, E. (1930): Lakustrische Unterwasserböden. In E. BLANK: Handbuch der Bodenlehre 5. Springer, Berlin.
- ZÜLLIG, H. (1956): Sedimente als Ausdruck des Zustands eines Gewässers. Schweiz. Z. Hydrol. 18.

Manuskript erhalten am 15. Juni 1976.