Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 103 (1985)

Heft: 19: 50 Jahre Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich

Artikel: Geotechnische Eigenschaften von gefrorenen Lockergesteinen

Autor: Herzog, Peter / Hofer, Andreas

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75781

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

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

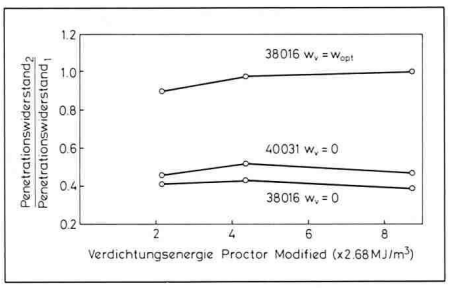


Bild 4. Stabilität der Penetrationswiderstände gegen Durchnässen in Abhängigkeit der aufgebrachten Verdichtungsenergie. Parameter: Verdichtungswassergehalt, Kornhärte (Material 40031 geringere Kornfestigkeit als Material 38016)

Verdichtungswassergehalt einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität gegen Durchnässen und Frost hat, obwohl bei der Trockenverdichtung dieselben Trockenrohdichten erzielt werden. Das Beispiel zeigt aber auch, dass mit der Trockenrohdichte allein keine genügende Aussage über das Materialverhalten gemacht werden kann. Es sind weitere Versuche, wie CBR-Versuche, nötig, um die Verbesserungen bezüglich Scherfestigkeitsverhalten messbar zu machen.

Die Sekundärstruktur kann auch bei zementstabilisierten Proben festgestellt werden. Wird eine zementstabilisierte Bodenprobe belastet, so nehmen die Korngrössen der entstehenden Bruchkörner eine Verteilung grösster Dichte nach Talbot (ähnlich Fullerkurve) ein. Die richtig dosierte und verdichtete Zementstabilisierung verhält sich im Bruchzustand wie ein gut abgestuftes, hochverdichtetes Lockergesteinsmaterial mit allen dessen Vorteilen. Das ist vor allem die grosse Dilatanz, welche einer Auflockerungskraft entgegenwirkt. Es kann aber auch gezeigt werden, dass eine abgebundene zementstabilisierte Bodenprobe unter dynamischer Belastung nachverdichtet wird. Wie bei Lockergesteinen bewirkt eine Wiederbelastung von zementstabilisierten Proben eine Konsolidation und eine entsprechende Verfestigung.

Auswirkung auf die Bemessung

Das Tragverhalten einer zementstabilisierten oder einer hochverdichteten Brechschotterschicht kann mit den erhaltenen Labor- und Feldergebnissen gedeutet werden. Es kann nicht analytisch genau erfasst werden, weil das elastisch-plastische Kraft-Verformungsverhalten eines mehrschichtigen Aufbaus ein sehr komplexes Problem ist, welches auch mit numerischen Rechenmethoden nicht genauer lösbar ist als das Aufstellen und Eingeben von realistischen nichtlinearen und zeitlich veränderlichen Materialkennziffern.

Durch das höhere Verdichten von Zementstabilisierung und Brechschotter verhalten sich diese Materialien wie stark überkonsolidierte bzw. vorgespannte Materialien. Zug- und Schubspannungen, welche infolge Belastung induziert werden, bauen zuerst die vorhandene Vorspannung ab, bevor sie als positive Zug- und Schubspannungen in Erscheinung treten. Durch die äussere Belastung entsteht eine Spannungsumlagerung im Druckspannungsbereich. Solange das geschieht, können sich in diesen Materialien keine offenen Risse bilden, und die Schichten bleiben intakt. Für die Bemessung solcher Trag- und Fundationsschichten heisst das, dass die Verdichtung möglichst gross sein sollte bzw. dass die Verdichtung der Beanspruchung angepasst werden müsste, damit sie ein Element der Bemessung wird. Die Verdichtung ist zwar heute schon in unseren Normenwerken vorgeschrieben. Die verlangten Verdichtungsanforderungen genügen aber nicht, um die Reserven von hochwertigen Materialien vollständig auszunützen und entsprechen auch nicht mehr den heutigen Möglichkeiten vom maschinellen Gesichtspunkt her. Die heute bestehenden Verdichtungsanforderungen sind allzu einseitig auf eine Begünstigung dicker bituminöser oder hydraulisch gebundener Schichten ausgerichtet, zum Teil sogar in der Meinung, dass durch höhere Bindemittelgehalte dieselbe Qualität, wie wir sie nur durch zusätzliches Verdichten gefunden haben, erreicht werde. Zurzeit werden von den zuständigen Normenkommissionen der VSS die Normenpakete über Verdichtung und Verdichtungsanforderungen revidiert.

Literatur

[1] Forschungsauftrag 26/81 des EVED, Bundesamt für Strassenbau, 1985. Geotechnische Untersuchung von Brechschotter.
[2] *Balduzzi, F.:* Vorlesungsnotizen «Erdbau» der Abteilung für Bauingenieurwesen an der ETH Zürich, 1984.
[3] *Balduzzi, F.:* Vorlesungsnotizen «Tropische Böden» der Abteilung für Bauingenieurwesen an der ETH Zürich, 1984.
[4] *Caprez, M.:* Projektbezogene Untersuchung der Tragwirkung von zementstabilisierten Bodenmaterialien, Forschungsbericht Nr. 54 des Eidgenössischen Departementes des Innern, 1983.
[5] *Bender, H.:* Befahrbarkeit und Endverdichtung von Zweischichtsystemen, Forschungsbericht Nr. 53 des Eidgenössischen Departementes des Innern, 1982.
[6] *Honold, P.:* Neue Versuchsmethoden auf der Basis der Moisture Condition-Verdichtung zur Stabilisierung von Lateritkiesen ohne Bindemittel im tropischen Strassenbau Westafrikas. Diss. ETH 7718, 1985

Adresse der Autoren: Dr. *Markus Caprez;* Dr. *Heinz Bender,* Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Geotechnische Eigenschaften von gefrorenen Lockergesteinen

Von Peter Herzog und Andreas Hofer, Zürich

Einleitung

In den letzten Jahren hat das Gefrierverfahren mehr und mehr an Bedeutung gewonnen und ist auch in der Schweiz mit Erfolg angewendet worden. Dabei wird der Gefrierkörper nicht mehr nur als Abdichtung gegen Wasser, sondern auf Grund der Erhöhung der Festigkeit durch das Gefrieren des anstehenden Bodens vermehrt auch als tragendes Element, vor allem im Schacht- und Tunnelbau, und für die Sicherung extrem tiefer Baugruben verwendet. Bei der Bemessung solcher Gefrierkörper ist davon auszugehen, dass einerseits eine genügende Sicherheit gegen Versagen vorhanden ist, anderseits die Verformungen ein zulässiges Mass nicht überschreiten dürfen. Daraus folgt, dass für jedes Gefrierprojekt in erster Linie die Festigkeits- und Deformationseigenschaften des gefrorenen Bodens bestimmt werden müssen, damit diese mit den vorhandenen mathematischen Methoden erfasst und in die statischen Berechnungen eingeführt werden können. Diese Eigenschaften sind neben der Art, Struktur und Dichte des Untergrundes von der Gefrierdauer, der Eissättigung und vor allem von der Temperatur und der Belastungsdauer abhängig. Aufgrund dieser vielen Parameter und der immer

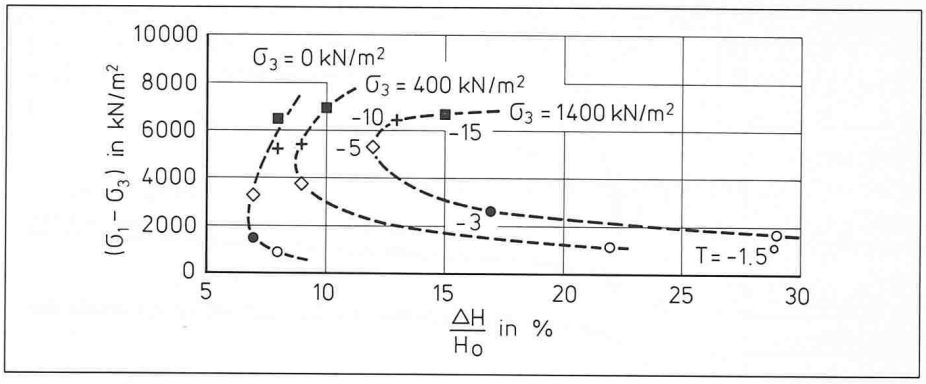


Bild 1. Abhängigkeit der Bruchfestigkeit und der Bruchdeformation von der Temperatur und dem Seitendruck

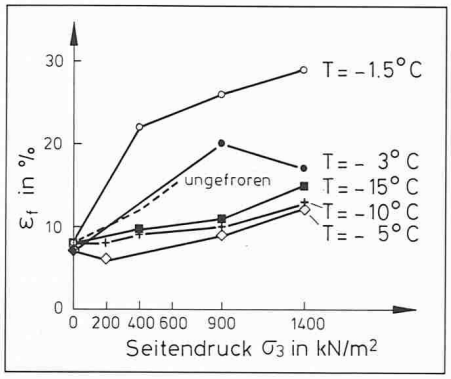


Bild 2 Verlauf der Bruchdeformation in Funktion des Seitendruckes und der Temperatur

wieder festgestellten Streuung der Versuchsergebnisse ist es unerlässlich, für jedes Projekt das Versuchsprogramm so festzulegen, dass es die tatsächlichen Verhältnisse möglichst gut erfasst. Im vorliegenden Beitrag soll ein Überblick über die an unserem Institut hauptsächlich durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Festigkeits- und Deformationseigenschaften und die daraus erhaltenen Ergebnisse gegeben werden. Auf die Berechnungsmethoden zur Frostausbreitung um die Gefrierrohre bis zum Schliessen des Frostkörpers und die Probleme, die sich im Zusammenhang mit den zu erwartenden Frosthebungen ergeben können, wird hier nicht weiter eingegangen.

Laborversuche

Wie allgemein üblich, werden auch an unserem Institut zur Beschreibung des Deformations- und Festigkeitsverhaltens gefrorener Proben die Ergebnisse aus ein- oder dreiaxialen Kriechversuchen und aus Triaxversuchen verwendet. Standardmässig werden die Versuche an Probenkörpern der Abmessungen $F = 25\ cm^2$, $H = 11{,}5$ cm in für diesen Zweck besonders entwickelten Gefrierzellen durchgeführt [1, 2]. Wenn immer möglich sollten für die Untersuchungen ungestörte Proben verwendet werden können, eine Forderung, die oft allein schon wegen der notwendigen grossen Anzahl von Versuchen nicht erfüllt werden kann. Muss auf gestörte oder künstlich aufbereitete Proben zurückgegriffen werden, so sind im allgemeinen, auch wenn Raumgewicht, Wassergehalt und Sättigungsgrad den tatsächlichen Verhältnissen weitgehend entsprechen, Ergebnisse zu erwarten, mit denen die Deformations- und Festigkeitseigenschaften zu ungünstig beurteilt werden.

Triaxialversuche

Alle bis jetzt am IGB in gefrorenem Zustand untersuchten Materialien zeigen im Triaxialversuch ein ähnliches Verhalten. Auffallend sind die nachstehend aufgeführten Feststellungen, die bei allen Untersuchungen qualitativ immer wieder bestätigt wurden: Die maximale Festigkeit nimmt mit fallender Temperatur und steigender Deformationsgeschwindigkeit ständig zu. Nach Erreichen des Maximalwertes sinkt sie anschliessend wieder auf einen Endwert ab, der bei grossen Deformationen erreicht wird und grösser ist, als die im ungefrorenen Zustand bestimmte maximale Festigkeit. Der Gewinn an Festigkeit durch das Gefrieren wird mit grösserem Seitendruck immer geringer, gleichzeitig nimmt auch der Einfluss der Gefriertemperatur ab. Das Volumenverhalten ist abhängig vom Seitendruck und der Deformationsgeschwindigkeit, wird aber von der Temperatur kaum beeinflusst. Grosse Seitendrücke und/oder kleine Deformationsgeschwindigkeiten führen zu stärkerer Verdichtung vor dem Bruch. Unabhängig vom Verhalten im ungefrorenen Zustand zeigten alle an unserem Institut untersuchten gefrorenen Proben Dilatanz und somit, bei kleinerem Winkel der inneren Reibung, hohe, mit fallender Temperatur linear ansteigende Kohäsionswerte. Wieweit dieses Verhalten allerdings abhängig ist von der Lagerungsdichte des ungefrorenen Bodens, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Im folgenden wird noch der Verlauf der Bruchfestigkeit und der Bruchdeformationen bei verschiedenen Temperaturen erläutert. In Bild 1 ist für einen tonigen Silt (10% Ton, 53% Silt, 1% Kies) der Zusammenhang dieser beiden Grössen jeweils für gleiche Seitendrücke aufgezeichnet. Aus Bild 2 kann der Verlauf der Bruchdeformationen mit der Änderung des Seitendrukkes direkt herausgelesen werden. Es ist offensichtlich, dass im Bereich von $T = -5$ °C die kleinsten Bruchdeformationen auftreten. Für fallende, wie auch in noch ausgeprägterem Mass für gegen 0 °C strebende Temperaturen nehmen die Bruchdeformationen wieder zu, und zwar um so stärker, je grösser der Seitendruck ist. Die in den Bildern 1 und 2 ersichtliche auffallende Änderung des Verhaltens bei Erreichen von rund $T = -5$ °C ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass in allen Böden, auch bei relativ tiefen Temperaturen, immer noch ein Anteil an ungefrorenem Wasser vorhanden ist. Dieser Anteil ist um so grösser, je feinkörniger der Boden ist und kann bei reinen Sanden und Kiesen praktisch vernachlässigt werden. Zwischen $T = 0$ °C und $T = -5$ °C nimmt die Menge an ungefrorenem Wasser sprunghaft ab, unterhalb etwa $T = -5$ °C hingegen wird nur noch wenig Wasser zusätzlich gefroren.

Kriechversuche

Wesentlich für gefrorene Böden ist die zeitbedingte Zunahme der bleibenden Verformungen unter konstanter Last. In Bild 3 ist dieses Verhalten für einen tonigen Silt bei $T = -10$ °C dargestellt, wobei darauf hinzuweisen ist, dass es sich bei den gezeigten Kurven jeweils um Mittelwerte aus mehreren Versuchen handelt. Anhand der Kurve für $\sigma = 3750\ kN/m^2$ lassen sich drei typische Phasen im Deformationsverlauf sehr gut unterscheiden. In die erste Phase gehören die unmittelbar nach der Belastung auftretenden initialen und die elasto-plastischen Verformungen. Phase zwei kann als die eigentliche Kriechphase angesprochen werden: die Verformungen nehmen kontinuierlich zu, während die Deformationsgeschwindigkeit ständig abnimmt, und zwar solange, bis bei genügend grossen Lasten beim Übergang zur dritten Phase wiederum eine Beschleunigung auftritt, welche weiter zunehmende Verformungen zur Folge hat, die innert kurzer Zeit zum vollständigen Versagen führen. Es hat sich gezeigt, dass diese Zunahme der Deformationsgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur unabhängig von der Last, bei der gleichen Deformation erfolgt. Bei den in Bild 3 dargestellten Versuchen liegt diese Deformation bei rund $\varepsilon = 7{,}5\%$. Dieser Umkehrpunkt der Deformationsgeschwindig-

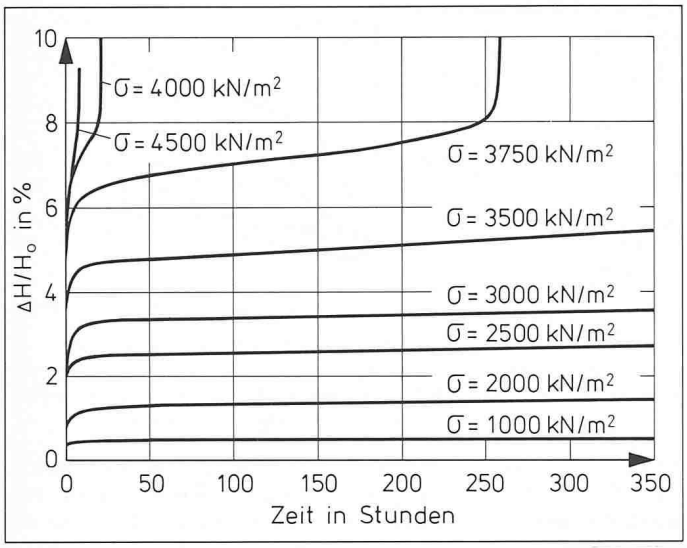


Bild 3 Kriechversuche an einem tonigen Silt für T = −10 °C und $\sigma_3 = 0$

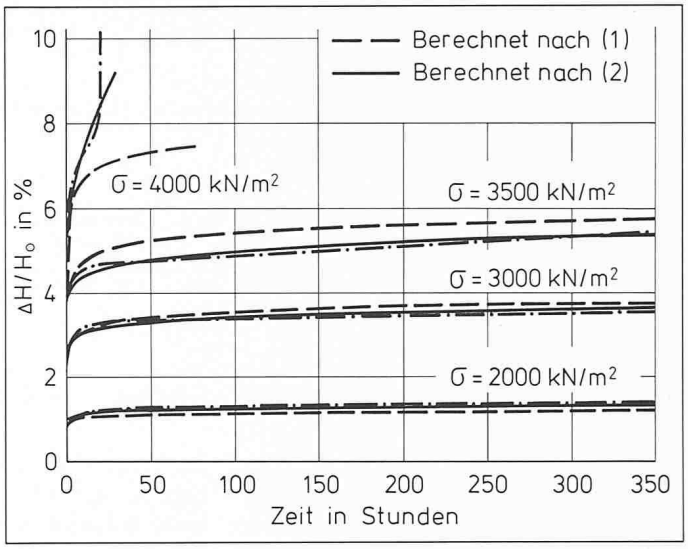
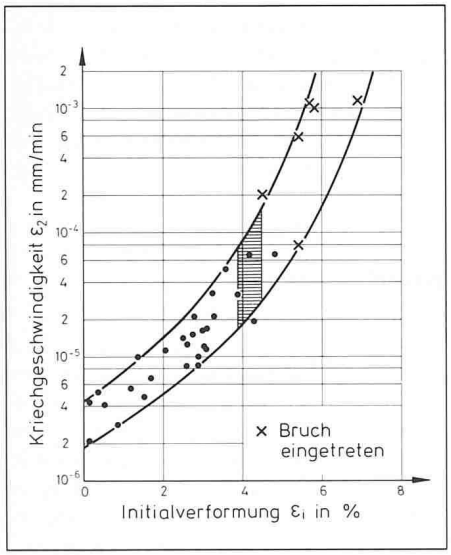


Bild 5 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungen nach (1) und (2)

Bild 4 Zusammenhang zwischen der mittleren Kriechgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}_2$ und der Initialverformung ε_i für eine Versuchsdauer von 350 Stunden



keit kann nun praktisch als Bruchpunkt definiert werden. Aufgrund dieser Tatsache lässt sich aus dem gleichen Diagramm für jede beliebige Last die Standzeit ebenfalls herauslesen. In Bild 4 ist für eine Versuchsdauer von 350 h der Zusammenhang der mittleren Kriechgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}_2$ und der Initialverformung ε_i, die als Verformung nach einer Stunde definiert ist, aufgezeichnet. Daraus ist ersichtlich, dass alle Versuche am obenerwähnten tonigen Silt, bei denen eine Initialverformung von $\varepsilon_i = 4\%$ und mehr erreicht wird, innerhalb der gewählten Versuchsdauer zum Bruch führen. Für eine längere Versuchsdauer würde sich der schraffierte Bereich nach unten verschieben. Allgemein kann festgestellt werden, dass je grösser die Initialverformung wird, desto grösser wird auch der Anteil der eigentlichen Kriechdeformationen, und um so rascher wird die Bruchdeformation erreicht. Die im Experiment gefundenen Kriechkurven können nach Sayles [3, 4] folgendermassen mathematisch beschrieben werden:

$$(1)\ \varepsilon_{(t)} = \dot{\varepsilon}_1 \left(\frac{M}{M-1}\right) \cdot \left(t^{(M-1)/M} - 1\right) + \varepsilon_1 .$$

M bedeutet dabei eine Materialkonstante, die für jede gewählte Temperatur jeweils neu experimentell bestimmt werden muss. Diese Formel liefert für Lasten weit unterhalb der Bruchlast sehr gute Ergebnisse, hat aber den Nachteil, dass damit die eigentlichen Kriechverformungen, wie sie bei grösseren Lasten auftreten, nicht berücksichtigt werden können. Dieser Einfluss kann besser mit einem Potentialansatz, wie zum Beispiel in [5] beschrieben, erfasst werden.

$$(2)\ \varepsilon_{(t)} = \sigma^a \cdot t^b + d \cdot t$$

Darin bedeuten a, b und d temperaturabhängige Materialkonstanten. Durch Umformung dieser Formel kann zudem für eine gewählte Standzeit die dazugehörige Bruchlast direkt abgeschätzt werden.

Eine weitere Möglichkeit, den Verlauf solcher Kriechkurven theoretisch zu erfassen, besteht darin, passende rheologische Modelle zu bilden. Dies wird erreicht durch geeignete Kombination von Hook-, Newton- und St.-Venant-Elementen. Die Genauigkeit, aber auch der Rechenaufwand nehmen mit steigender Anzahl von Elementen stark zu. Aus diesem Grund sind der Verfeinerung der Modellbildung Grenzen gesetzt, und man wird sich in der Praxis eher mit einfacheren Ansätzen begnügen, nicht zuletzt auch weil wegen der grossen Streuungen in den Versuchsergebnissen trotz der Möglichkeit solcher Berechnungen kaum je für ein konkretes Projekt auf ein umfangreiches Versuchsprogramm verzichtet werden kann.

Schlussbemerkungen

Die vorgestellten Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Eigenschaften des gefrorenen Lockergesteins und seines Verhaltens unter Belastung sind ein wesentlicher Gesichtspunkt im Hinblick auf die ingenieurmässige Anwendung des Gefrierverfahrens. Zusätzlich sind aber immer auch die Auswirkungen des Gefriervorganges auf die Umgebung des Bauwerkes zu beachten.

Mehr und mehr geht die Tendenz dahin, das Festigkeits- und Verformungsverhalten mit verschiedenen Methoden numerisch nach- bzw. vorauszuberechnen, um in erster Linie den für ein konkretes Projekt notwendigen Untersuchungsaufwand zumindest etwas verringern zu können.

Im Verlauf der weiteren Arbeiten soll an unserem Institut der Einfluss der Lagerungsdichte des ungefrorenen Bodens auf das Verhalten des Frostkörpers untersucht werden. Dabei ist die genaue Erfassung der Volumenänderungen bei den Laboruntersuchungen besonders zu beachten.

Adresse der Verfasser: *P. Herzog*, dipl. Ing. ETH, und *A. Hofer*, dipl. Ing. ETH, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Literatur

[1] *Herzog P., Ramholt T.:* Deformations- und Festigkeitsuntersuchungen an Material aus dem Milchbucktunnel; Mitteilungen SBGF Nr. 100, 1979

[2] *Huder J.:* Technologie des gefrorenen Bodens; Mitteilungen SBGF Nr. 100, 1979

[3] *Sayles F.H.:* Creep of frozen Sands; Technical Report 190 CRREL; Hanover, New Hamsphire, 1968

[4] *Sayles F.H., Haines D.:* Creep of frozen Silt and Clay; Technical Report 252; CRREL; Hanover, New Hampshire, 1974

[5] *Herzog P., Hofer A.:* Uniaxial creep tests on a morainic material from Switzerland; The 2nd International Symposium on ground freezing, Trondheim, 1980