

Experimentelle Untersuchungen über den Bodenfrost

VON DER

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
IN ZÜRICH ZUR ERLANGUNG DER WÜRDE EINES
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE

PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON

FRANCO BALDUZZI

dipl. Physiker

von Zürich

Referent: Herr Prof. G. Schnitter

Korreferent: Herr Prof. Dr. E. Brandenberger



Erscheint als Mitteilung Nr. 44 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau
an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

„So sehr es dem heutigen Modebegriff Forschung und seiner falschen Universalität widersprechen mag, sollte nämlich — und zwar vorab um der *wahren* Forschung willen — allgemein wieder entschiedener respektiert werden, daß Beobachten, Messen und Beschreiben noch längst nicht Erklären, Kenntnisse durchaus noch keine Erkenntnisse sind.“

E. Brandenberger

(Vom Ursprung des technischen Fortschrittes, Zürich 1955.)

Herrn Dr. R. Ruckli, Eidg. Oberbauinspektor, welcher die Initiative ergriffen hat, das Problem des Bodenfrostes zu stellen und zu untersuchen, ist für die Förderung der weiteren Forschung auf diesem Gebiete größte Anerkennung zu zollen.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der VAWE ausgeführt, deren Aufgabe es ist, die Grundlagen für die Lösung der ihr gestellten technischen Probleme zu beschaffen. Herrn Prof. G. Schnitter, Direktor der VAWE, danke ich für die Überlassung von Resultaten aus meinen Untersuchungen.

Ich danke ihm auch für seine persönliche Förderung meiner Arbeit und für den tatkräftigen Enthusiasmus, den er mir wie allen seinen engeren Mitarbeitern mitzuteilen weiß.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	5
2. Bestimmung der Scherfestigkeit gesättigter Böden	9
3. Bestimmung der Frosteigenschaften gesättigter Böden	12
4. Diskussion der Resultate	16

1. Einführung

Das Eindringen des Frostes in den Boden verursacht Änderungen der Eigenschaften desselben, deren augenscheinlichste und technisch bedeutsamste die sich in der Frosthebung auswirkende Volumenvergrößerung ist.

Eine Untersuchung der Frosthebung zeigt, daß in der Mehrzahl der Fälle die ihr zugrundeliegende Volumenvergrößerung beim Gefrieren größer ist als diejenige, die sich durch die Volumenausdehnung des im Boden vorhandenen Wassers ergeben kann.

Die Ursache der Frosthebung liegt vielmehr ebenso sehr in der Verlagerung und Anhäufung von Porenwasser oder Grundwasser in der Nähe der Frostgrenze, wo dieses beim Gefrieren mehr oder weniger zusammenhängende Eisschichten bildet. Die primären Folgen der Frosteinwirkung in den Boden sind zunächst:

- die Abscheidung (Segregation) und die Bewegung (Migration) des Wassers;
- Änderungen der Bodenstruktur durch diese Abscheidung und Bewegung des Wassers und durch dessen Ausdehnung beim Gefrieren.

Sekundäre Folgen der Einwirkung des Frostes sind darnach Verformungen des Bodens und Veränderungen seiner Tragfähigkeit beim Gefrieren und Auftauen. Vorab diese letzteren haben auf Bauwerke, die auf solchen Böden fundiert sind, nachteiligen Einfluß. Führen sie zu Zerstörungen der Bauwerke, so werden diese Zerstörungen neben anderen als Frostschäden bezeichnet.

Zur Kenntnis dieser Erscheinungen haben bisher zur Hauptsache Schadenuntersuchungen an Straßen beigetragen, bei denen sowohl eigentliche, durch die Hebung selber verursachte Frostschäden bestehen können, als auch uneigentliche, durch Tragfähigkeitsverlust beim Auftauen verursachte. Die Art des Schadens ist aus solchen Berichten selten zuverlässig zu ermitteln, wird doch zumeist lediglich festgestellt, daß der Sitz der Schadenursache in feinkörnigen Lockergesteinen liegt, in grob- oder mittelkörnigen nur dann, wenn sie Anteile von feinkörnigen enthalten.

Eine Korrelation zwischen Größe des Schadens und seiner Ursache kann infolge der Vielfalt mitwirkender Umstände nicht aufgestellt werden, ebensowenig eine solche zwischen bestimmten klimatischen und topographischen Gegebenheiten und den Schadenursachen. Vielmehr kann die Gesamtheit der Erfahrungen so zusammengefaßt werden: „Bei der Möglichkeit eines genügenden Wassernachschubes (Grund- oder Porenwasser) ist eine wesentliche Frosthebung dann zu erwarten, wenn ungleichförmige Lockergesteine mehr als drei Gewichtsprozent Teilchen vom Durchmesser kleiner als 0,02 Millimeter und sehr gleichförmige dagegen mehr als zehn Gewichtsprozent Teilchen von Durchmesser kleiner als 0,02 Millimeter enthalten. Bei Lockergesteinen mit weniger als einem Gewichtsprozent Teilchen von Durchmesser

kleiner als 0,02 Millimeter wurde kein Eiswachstum beobachtet, und zwar selbst dann nicht, wenn der Grundwasserspiegel im Frostbereich lag.“

Die in dieser Erfahrungstatsache enthaltenen Aussagen finden als *Casagrande*-Kriterium [1]* weiteste Anwendung bei der Prüfung von Lockergesteinen. Es sind bisher keine Beobachtungen gemacht worden, die den hier formulierten widersprechen.

Die Untersuchung dieser Erscheinung im Laboratorium ist von *Taber* [2] dazu benützt worden, um festzustellen, welche Lockergesteine für die Eisbildung verantwortlich sind. Er konnte nachweisen, daß in bindigen und schwachbindigen, feinkörnigen Lockergesteinen die Bildung von Eiszwischenschichten am deutlichsten, eine solche dagegen in mittelkörnigen und grobkörnigen, nichtbindigen Lockergesteinen nicht nachweisbar ist. Am eindrucklichsten zeigt dies jener Versuch *Tabers*, bei welchem das Verhalten beim Gefrieren einer zylindrischen Probe, die im Querschnitt zu einer Hälfte aus Sand, zu einer Hälfte aus frosthebendem Boden besteht, untersucht wird (Fig. 1). Beim Eindringen der ebenen „Frostgrenze“

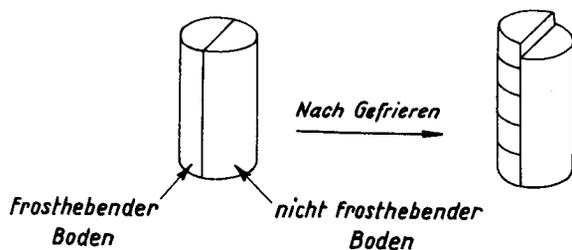


Fig. 1. Gefrierversuch nach *Taber*

senkrecht zur Zylinderachse in die Probe bilden sich in der aus frosthebendem Boden bestehenden Hälfte des Zylinders erhebliche Eiszwischenschichten und resultiert hieraus eine Volumenvergrößerung senkrecht zur Frostgrenze, während die aus Sand bestehende Hälfte keine wahrnehmbaren Veränderungen zeigt. Ferner hat *Taber* mit seinen Laborversuchen nachweisen können, daß die Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren für die Bildung der Eiszwischenschichten unwesentlich ist. Er ersetzte nämlich Wasser durch eine organische Flüssigkeit, die beim Gefrieren keine Volumenvergrößerung zeigt, und fand darnach in einer aus frosthebendem Boden bestehenden zylindrischen Probe beim Eindringen der für die verwendete Flüssigkeit maßgebenden Gefriergrenze Zwischen-schichten der erstarrten organischen Phase völlig analog den Eislinsen. *Beskow* [3], *Dücker* [4] und *Péltier* [5] konnten ferner bei Gefrierversuchen feststellen, daß

* Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturangaben S. 17.

gefrierende Proben, die mit einem Wasserreservoir in Verbindung stehen, diesem beim Eindringen des Frostes unter Umständen Wasser entziehen können. Die von diesen Autoren zum Teil vermuteten gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen Wassernachschub und Hebung sind jedoch bereits reichlich hypothetisch, ebenso die bei diesen Untersuchungen stellenweise versuchten Messungen der kapillaren Steighöhe oder des Unterdruckes im Wasser. Damit sind unsere heute feststehenden Kenntnisse über den Bodenfrost umschrieben, haben doch alle weiteren, oft recht zeitraubenden Laboruntersuchungen bisher keine Gesetzmäßigkeiten von allgemeiner Gültigkeit und Anwendbarkeit aufgedeckt, sondern nur die erwähnten Erfahrungstatsachen zu bestätigen vermocht.

Der Bodenfrost ist offenbar eine komplexe Erscheinung, deren Wesen mit den zuvor geschilderten Erfahrungen noch nicht erfaßt wird. Aus dem Bedürfnis nach einer greifbaren Vorstellung sind immerhin einige Hypothesen entstanden, welche wenigstens die augenscheinlichsten Merkmale der Erscheinung zu deuten versuchen. Dabei wurde das Vorstellungsvermögen am meisten ange regert durch das Phänomen eines Wassertransports an die Eiszwischenschicht (Eislinse), weshalb sich nahezu alle einschlägigen Hypothesen vorab mit diesem Problem be fassen. Es sind dies die Theorien von *Beskow* [3], *Péltier* [5], *Jumikis* [6], welche alle versuchen, die Größe der Hebung mit Hilfe eines Ansatzes zu erklären, welcher die Durchlässigkeit des Materials, den Abstand Grundwasser spiegel/Frostgrenze und einen Gradienten (Kapillaren Steighöhe, Unterdruck usw.) berücksichtigt und, dem gestellten Problem entsprechend, nach der allgemeinen Form des Darcy-Gesetzes aufgebaut ist. Zur Überprüfung dieser Hypothesen wurden Versuchsgерäte für Gefrier versuche gebaut, die alle auf einen gemeinsamen Proto typ zurückgehen, nämlich das Enslin-Gerät (Fig. 2). Hier-

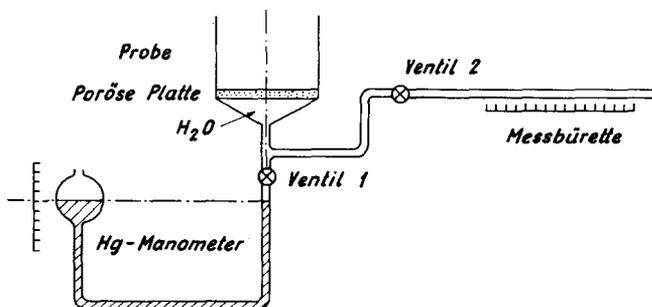


Fig. 2. Enslin-Gerät

bei wird eine Materialprobe zur Ermittlung der Wasser aufnahmefähigkeit auf die poröse Platte gelegt, entweder die aufgesaugte Wassermenge gemessen (Ventil 1 ge schlossen, Ventil 2 offen) oder mittels dem Hg-Manometer jene Wassersäule, mit der die Probe im Gleichgewicht ist (Ventil 1 offen, Ventil 2 geschlossen). Für die Durch führung von Gefrierversuchen wird der Probebehälter gekühlt, entweder die Probe durchgefroren oder eine 0° Isotherme stationär innerhalb der Probe gehalten (mit tels separater Thermostatisierung der unteren und oberen Hälfte der Probe). Im einzelnen sind bisher Versuche folgender Anordnung durchgeführt worden:

1. Messung der Kapillarität (*Beskow*).
2. Messung des Wassernachschubes und der Hebung (*Dücker*, *Péltier*).
3. Dito mit Belastung der Probe (A. C. of Engineers, *Jumikis*).

4. Dito mit Gefrier- und Auftauzyklen sowohl mit natür lichen Böden, wie mit Fraktionen von bestimmter Körnung und petrographischer Beschaffenheit.

Die Resultate dieser Untersuchungen gestatten jedoch nicht, irgendwelche Gesetzmäßigkeit zwischen den Klassi fikationseigenschaften der Lockergesteine und ihrem Verhalten beim Frostversuch aufzustellen, insbesondere nicht im Falle siltiger oder toniger Kiese. Vielmehr ist bei allen diesen Versuchen allein bedeutsam, ob es zur Bil dung von Eiszwischenschichten kommt oder nicht. Bei den Versuchen mit reinen Fraktionen gilt sodann, daß das bodenmechanische Verhalten einer aus dem natür lichen Verband gelösten Fraktion in allen jenen Fällen, da sie nicht die maßgebliche Fraktion darstellt, für das Gesamtverhalten des Verbandes sicher nicht repräsen tativ ist.

Die erste und wesentlichste Kritik an den zuvor for mulierten Hypothesen betrifft den Umstand, daß sie alle nur das Verhalten des Wassers und des Eises berücksich tigen. Wasser und Eis als Bodenbestandteile verhalten sich aber in erster Näherung in allen Böden gleich und doch reagieren die Böden verschieden auf das Eindringen des Frostes. Das wesentliche Kriterium, welches das Frost verhalten der Böden bestimmt, muß deshalb eine Boden eigenschaft sein und nicht Eigenschaften des Wassers betreffen. Eine Beziehung zwischen Hebung und Wasser nachschub kann nur unter der Annahme bestehen, daß der Boden keine andere Strukturänderung als jene durch die Bildung von Eislin sen erfährt. Diese Annahme ist nicht beweisbar. Auf alle Fälle läßt eine solche Beziehung zwischen Hebung und Frostgefährlichkeitsgrad die wesentliche Tatsache außer Betracht, daß bestimmte Böden ohne Hebung Eiszwischenschichten bilden. Ferner muß ein Erklärungsversuch auf Grund der Kapillarität deshalb scheitern, weil auch in kapillargesättigten oder total gesättigten Böden Eiszwischenschichten entstehen, also auch in Böden, in denen die Kapillarität als solche nicht wirken kann. Alles in allem erscheint damit jede „hydraulische“ Erklärung des Bodenfrostes als unge nügend. Im besonderen kann sie auch die Unterschiede zwischen frostgefährlichen und anderen Böden nicht er klären, müßten doch im Rahmen solcher Hypothesen sämtliche Böden frostgefährlich sein und im Maße ihrer Frostgefährdung sich voneinander unterscheiden in Ab hängigkeit von Förderweg, Durchlässigkeit usw. Nie kann daher auf dieser Grundlage eine Aussage über die Entstehung der Eiszwischenschichten gemacht werden. Die nach diesen Hypothesen aufgestellten Versuchs apparaturen messen zum größten Teil Erscheinungen, die von der Versuchsapparatur abhängig sind — so die Hebung und der Wassernachschub — oder aber Erschei nungen, die für die gesuchte Größe nicht repräsentativ sind, wie z. B. die Unterdruckmessung bei ungesättigten Proben.

Neben den vielen Diskussionen über das Verhalten des Wassers und seinem Nachschub an die Eislin sen sind in der früheren Literatur auch vereinzelte Angaben über das Verhalten des Bodens beim Gefrieren zu finden. *Taber* beobachtete die Bildung von Spannungsrissen in Tonen bei Gefrierversuchen ohne Wassernachschub, falls dem ungefrorenen Teil der Probe das von der Eislinse ver brauchte Wasser entzogen wird. *Terzaghi* [7] zeigte, daß die Kräfte, die notwendig sind, um das Wasser aus dem ungefrorenen Boden an die Eiszwischenschichten zu för dern, jenen äußeren Drücken gleich (nämlich sehr groß) sein müssen, die notwendig sind, um im ungefrorenen Boden eine gleiche Volumenänderung zu erzeugen. *Casa-*

grande [8] versuchte dies durch Bestimmung des Wassergehaltes des zwischen nachfolgenden Eiszwischenschichten verbleibenden „ungefrorenen“ Tones und Vergleich mit der Wassergehalt-Konsolidationskurve desselben Materials experimentell nachzuweisen. Leider ist nur ein einziger solcher Versuch, nämlich ein Frosteindringungsversuch, veröffentlicht, der jedoch nicht beweiskräftig ist, weil der Temperaturgradient nicht lange genug stationär gehalten wurde, um die vollständige Konsolidation des Materials zu bewirken. Immerhin zeigte es sich dabei, daß infolge Frosteindringung Drücke der Größenordnung 4—8 kg/cm² auftreten können. *Ruckli* [9] hat in seiner Unterdruckhypothese zur Erklärung der Bildung von Eislinsen eine Saugkraft p definiert, die eine spezifische Bodenkennziffer sein soll. Zur Bestimmung dieser Bodenkennziffer wird eine Messung des Unterdruckes unmittelbar unter der Eislinse vorgeschlagen, eine Messung, die in dieser Form praktisch kaum durchführbar ist. Diese Beobachtungen führen zu den einzigen Ansätzen, die nicht a priori ausgeschaltet werden können. Insbesondere enthalten sie den Kern zu einer Unterscheidung zwischen frostgefährdeten und nicht gefährdeten Böden; während für die „hydraulischen“ Hypothesen, wie bereits betont, in letzter Konsequenz alle Böden frostgefährlich sein müßten, gibt die „bodenmechanische“ Anschauung die Möglichkeit, zwei oder mehrere Klassen frostgefährdeter und nicht frostgefährdeter Böden zu unterscheiden und, falls die vermutete Bodenkennziffer eine reelle Bedeutung hat, unabhängig von allen anderen Faktoren einen quantitativen, potentiellen Grad der Frostgefährlichkeit eines Bodens anzugeben. Allein schon diese Möglichkeit rechtfertigt die Durchführung von weiteren Arbeiten in der durch diese Anregungen skizzierten Richtung.

Das Verhältnis zwischen Aufwand an Arbeit und Verwendbarkeit der Resultate ist bei der Frostforschung hier und anderswo ausgesprochen schlecht. Das bisherige Scheitern eines empirischen wie spekulativen Vorgehens kann einzig durch die mangelhafte Kenntnis der Grundlagen der Erscheinung selber erklärt werden. Dies hat ja auch zur Folge, daß die Resultate nicht auf einheitlicher Grundlage interpretiert werden können. Die Frage nach der Ursache des Entstehens von Eiszwischenschichten ist heute so wenig beantwortet wie die Frage nach dem Maß der potentiellen Frostgefährdung eines Bodens. Solange aber über den Mechanismus der Erscheinung keine Klarheit herrscht, gibt es auch keine Möglichkeit, den Vorgang auf irgendeine Weise geeignet zu beeinflussen.

Unsere Arbeit hat zum Ziel, die Grundlagen der Erscheinung des Bodenfrostes so zu klären, daß eine Bestimmung des potentiellen Grades der Frostgefährdung eines Bodens gelingt und damit vernünftige Maßnahmen zur Verhütung der Frostauswirkung möglich werden. Dies bedingt sowohl gedanklich wie meßtechnisch eine Vertiefung in das Problem, die sich von der modellmäßigen Darstellung und Versuchstechnik soweit entfernt, daß im Laufe der Untersuchung die Zusammenhänge zwischen Untersuchungsobjekt und praktischer Lösung nicht immer so deutlich hervortreten, wie es der Praktiker wünschen möchte. Das Fehlen elementarster Angaben über die beim Bodenfrost auftretenden Kräfte und ihre Auswirkungen auf den Boden zwingt dazu, die Erscheinung zunächst in ihrer Ganzheit zu betrachten, um so die geeigneten Ansatzpunkte zur experimentellen Untersuchung zu finden. Dazu ist es notwendig, die Kräfte, die beim Phänomen des Frostes auf Boden und Wasser wirken, mit Hilfe der klassischen Methoden direkt zu messen. Dies bedingt Vorstudien, um zunächst die

Bedingungen, unter denen die direkten Messungen durchführbar werden, zu finden und zu beweisen, daß diese Bedingungen — weder sie selbst noch die Messungen als solche — den untersuchten Vorgang nicht beeinflussen. Die Resultate dieser Vorarbeit und der ersten Untersuchungen sollen darnach erlauben, die für das Frostverhalten maßgebenden Bodeneigenschaften als solche zu erkennen und näher zu untersuchen. Einer Anregung von Prof. Dr. *P. Niggli* folgend, werden die Untersuchungen mit einem monomineralischen Material begonnen und nach und nach auf relativ homogene, repräsentative Lockergesteine ausgedehnt.

Die zur Planung dieser Arbeit gemachten Voraussetzungen und die sich daraus ergebende Anschauung über den Vorgang lassen sich folgendermaßen umschreiben: die „hydraulische“ Anschauung betrachtet den Bodenfrost als ein reines Problem des Wassernachschubes, wobei der Boden als solcher die Rolle eines passiven Mediums spielt, in welchem lediglich eine Wanderung und ein Phasenwechsel flüssig → fest des Wassers stattfindet. Als logische Folgerung hieraus ergeben sich die Hebungsmessung zur Ermittlung der Menge des nachgeschobenen Wassers, die Anwendung des Darcy-Gesetzes zur Ermittlung des für diesen Nachschub verantwortlichen Gradienten und endlich der Versuch, die Böden auf Grund ihrer Durchlässigkeitseigenschaften in Klassen verschiedener Frostgefährdung einzureihen. Die einzige Bodenkennziffer, die dabei berücksichtigt werden kann, ist die Durchlässigkeit. Bereits die Betrachtung der Kapillarität erfolgt unter einer zusätzlichen, unbewiesenen Annahme. Die einzig verfügbare Messung betrifft die Menge des Wassernachschubes oder die Hebung, insofern zusätzlich angenommen wird, es bestehe zwischen dieser und der Wassermenge eine eindeutige Korrelation.

Im folgenden soll im Gegensatz dazu der Boden als Träger der Erscheinung des Bodenfrostes betrachtet werden, ergibt sich diese doch ausschließlich beim Eindringen des Frostes in *bestimmte* Böden, deren Besonderheit in Funktion ihrer Bodenkennziffern zu kennzeichnen sein wird. Zudem wird bei Frosteindringung im allgemeinen und Auftreten von Bodenfrost im besonderen der Zustand des Bodens naturgemäß verändert. Zwei Hauptfragen werden uns daher in besonderer Weise beschäftigen müssen:

- Welche Charakterisierung der Böden ist zur Betrachtung ihrer Frosteigenschaften sinnvoll und zweckmäßig?
- Welche Kräfte wirken beim Eindringen des Frostes auf den Boden?

Darnach werden in erster Linie die Messung dieser Kräfte, die beim Eindringen des Frostes auf den Boden wirken — also des Hebungsdruckes statt der Hebung, des Druckes in der flüssigen Phase (Porenwasser) an Stelle des Wassernachschubes —, zur Charakterisierung des Bodens die Ermittlung seiner mechanischen Festigkeitseigenschaften statt seiner Durchlässigkeit (Klassifikationseigenschaft) und ferner die Bestimmung des Zustandes eines Bodens vor und nach dem Eindringen des Frostes interessieren. Während ein Teil dieser Messungen mit bekannten Mitteln durchgeführt werden kann, mußte der größere Teil, sowohl in grundsätzlicher als meßtechnischer Beziehung für die Zwecke dieser Arbeit entwickelt und erprobt werden.

Aus unseren bisherigen Kenntnissen des Bodenfrostes können als erstes Böden, die beim Eindringen des Frostes eine Hebung zeigen, gegenüber jenen, die keine Hebung aufweisen, unterschieden werden. Laboruntersuchungen

gestatten außerdem eine Einteilung der Böden in solche mit und ohne Bildung von Eiszwischenschichten. Zwischen beiden Kriterien besteht keine Korrelation, so daß sich vorerst drei Klassen von Böden ergeben.

Hebende	—	Eislinsenbildende
Nicht-Hebende	—	Eislinsenbildende
Nicht-Hebende	—	Nicht-Eislinsenbildende

Die Klasse der nicht-hebenden — nicht-eislinsenbildenden Böden kann endlich noch weiter gegliedert werden in Böden *mit* und *ohne* Verlagerung des Wassers.

Die Bestimmung der Größenordnung jener Kräfte, die beim Eindringen des Frostes in einer Bodenprobe auftreten, gelingt am einfachsten durch Messung des Hebungsdruckes. Dieselbe Messung kann an hebenden eislinsenbildenden Materialien erfolgen. Sie wird bei unbehinderter seitlicher Ausdehnung senkrecht zur Krafrichtung ausgeführt und der stationäre Temperaturgradient in der Krafrichtung so gewählt, daß die 0°C -Isotherme innerhalb der Probe verläuft. Der ungefrorene Teil derselben steht mit einem Wasserreservoir in Verbindung. Für eine zylindrische Probe ergibt sich, gestützt hierauf, die in Fig. 3

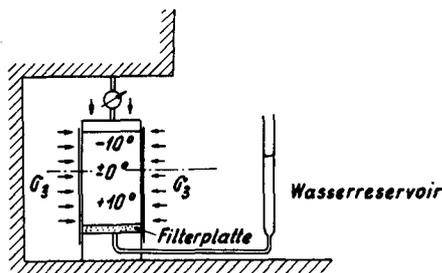


Fig. 3. Messung des Hebungsdruckes

gezeigte Meßanordnung: die Probe ruht auf einer auf 10°C erwärmten Filterplatte, welche den Wassernachschub aus einem Reservoir gewährleistet, und wird an der Oberseite durch eine Waage an der Ausdehnung in axialer Richtung gehindert. Gemessen wird die eben dazu benötigte Kraft beim Eindringen des Frostes. Maßgebend ist dabei der konstante Wert, der sich bei stationärer Lage der 0°C -Isotherme in der Probe einstellt. Die Durchführung einer solchen Messung an einem Testmaterial zeigt, daß Kräfte von der Größenordnung von 10 kg/cm^2 auftreten können. Bei unbehinderter allseitiger Ausdehnung der Probe, jedoch behindertem Wassernachschub ist demzufolge mit dem Auftreten eines Unterdruckes von derselben Größenordnung in der flüssigen Phase zu rechnen. Da eine Messung des Unterdruckes nur möglich ist, wenn die flüssige Phase ein Kontinuum bildet und auch in diesem Falle nur dann, falls keine Kavitation auftritt, stellen sich bei dieser Aufgabe einige besondere Probleme meßtechnischer und prinzipieller Art. Die Forderung, daß die flüssige Phase ein Kontinuum darstellen soll, läßt sich nur erfüllen, wenn die Messung innerhalb eines Sättigungsbereichs durchgeführt werden kann, der einerseits mit der Meßsonde und andererseits mit der Eiszwischenschicht in Berührung ist (als Sättigungsbereich bezeichnen wir jenen Bereich einer ungesättigten Bodenprobe, innerhalb welchem die flüssige Phase kontinuierlich ist und dessen Grenzfläche nur mit einer gasförmigen Phase oder mit Bodenteilchen in Kontakt steht). In einem ungesättigten Boden sind die Abmessungen der lokalen Sättigungsbereiche jedoch nicht bekannt. Die einzige, meßtechnisch durchführbare Lösung der Messung des Unterdruckes im lokalen Sättigungsbereiche einer ungesättigten Probe besteht deshalb darin, den Sätti-

gungsbereich so zu vergrößern, daß er die ganze Probe umfaßt (d. h. es wird die Messung des Unterdruckes im 2-Phasensystem Boden/Wasser durchgeführt). Hierfür ist allerdings zu beweisen, daß im 2-Phasensystem die gleichen Kräfte wirken wie in den lokalen Sättigungsbereichen der ungesättigten Proben, also im 3-Phasensystem, und zwar sowohl für den Fall der Erscheinungen beim Eindringen des Frostes wie bei den hierfür maßgeblichen mechanischen Eigenschaften der Proben. Ein solcher Beweis ist gleichbedeutend mit der Aussage, daß im Boden als 3-Phasensystem die Gasphase (Luft) „akzidentelle“ Phase ist (*Ruckli*) (d. h. daß sämtliche Erscheinungen, die ausschließlich bei Anwesenheit der gasförmigen Phase auftreten, nur von sekundärer Bedeutung oder Störungen des jeweiligen Vorganges sind). Dies betrifft unter anderem den „kapillaren Anteil“ der Kohäsion der Lockergesteine und die „Kapillarität“ der Lockergesteine, der von verschiedenen Autoren bei der Erklärung des Bodenfrosts Bedeutung beigegeben wird. Die Forderung, daß keine Kavitation in der flüssigen Phase auftreten darf, verschärft die bereits begründete Forderung dahin, daß das untersuchte System, das in seinem Anfangszustand ein 2-Phasensystem darstellt, dies während der ganzen Messung bleiben muß — gleichgültig der Druckbereiche, welche durchschritten werden müssen. Aus dem hier Erörterten geht hervor, daß die Auswirkungen des Eindringens des Frostes (bei der Klasse der hebenden, eislinsenbildenden Böden) bei ungesättigten Proben nur durch Messung des Hebungsdruckes erfaßt werden können, bei gesättigten Proben sowohl durch Messung des Hebungsdruckes wie des Unterdruckes, der auf die flüssige Phase wirkt (oder allgemeiner des Druckes, der in der flüssigen Phase auftritt). Zur Erfassung der Erscheinung des Bodenfrosts in seiner Gesamtheit ist diese Messung unumgänglich; ihre Durchführung bildet daher die erste Etappe dieser Arbeit.

Aus allem zuvor Gesagten ergibt sich als zweckmäßiger

Arbeitsplan

- Herstellung gesättigter Proben von Lockergesteinen und Nachweis ihrer Sättigung;
- Einfluß der Sättigung auf die mechanischen Eigenschaften von Lockergesteinen und Messung derselben bei Sättigung;
- Durchführung von Gefrierversuchen an gesättigten Proben unter Messung des Druckes in der flüssigen Phase;
- Messung weiterer Frosteigenschaften der Lockergesteine.

Das monomineralische Material für die ersten Versuche sollte folgende Eigenschaften besitzen: es muß inert sein, von ähnlicher Kornverteilung wie natürliche Materialien, benetzbar und bei Eindringen des Frostes Eiszwischenschichten bilden; dazu kommen alle Anforderungen betreffend Verarbeitbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Nach Prüfung der zur Verfügung stehenden Materialien erwies sich Titandioxyd, wie es in der Farbenindustrie als Pigment verwendet wird, als dazu geeignet. Das benutzte Material Nr. 6618 besteht aus isodiametrischen Anataskörnern mit $1,2\%$ Rutil*.

* Diese Daten sind Untersuchungen entnommen, die in verdankenswerter Weise von den Herren Dr. Hochweber und Dr. Preis der Eidg. Material-Prüfungsanstalt durchgeführt wurden.

Als weitere Versuchsmaterialien werden dienen: homogenisierter Uetliberglehm 4002 der VAWE — ein für schweizerische Verhältnisse repräsentativer toniger Silt — und ein natürlich vorkommender, reiner Silt 8699 aus Sufers. Zur Prüfung des Einflusses der Sättigung auf die mechanischen Eigenschaften allein wurde endlich ein strukturempfindliches Material — ungestörte See- kreide 7071 aus dem Zürichsee — verwendet, das gegen- über Manipulationen als besonders empfindlich gilt. Die Klassifikation dieser Materialien ist aus Tabelle 1 er- sichtlich.

Tabelle 1. Klassifikation der Versuchsmaterialien

Labor-Nr.	4002	6618	7071	8699
Fließgrenze	40,9	29,5	45,1	— %W
Plastizitätszahl	24,0	7,2	16,7	— %W
<i>Kornverteilung</i>				
Kleiner 2 mm	100,0	—	100,0	100,0%
Kleiner 0,2 „	99,6	100,0	84,8	98,3%
Kleiner 0,02 „	88,2	95,0	93,1	74,1%
Kleiner 0,002 „	35,8	85,0	4,6	4,6%

2. Bestimmung der Scherfestigkeit gesättigter Böden

Eine natürliche oder künstlich zubereitete Bodenprobe besteht aus einer festen Phase (dem Boden), einer flüssigen Phase (dem Wasser) und einer gasförmigen (der Luft). Durch besondere Umstände kann bei den natürlichen, durch besondere Manipulationen aber auch bei den künstlichen Bodenproben der Anteil an gasförmiger Phase mehr oder weniger stark variieren. In den seltensten Fällen jedoch wird dieser Anteil völlig verschwinden. Die verschiedensten Vorschläge sind gemacht worden, um aus Böden vollständig gesättigte Proben zu erhalten. Dabei ist immerhin nachgewiesen, daß weder eine Durchspülung (auch nicht unter Druck) noch langjährige Konsolidation oder Sedimentation unter Wasser erlauben, dieses Ziel ganz zu erreichen.

Das gleiche gilt von den „chemischen“ Methoden, welche die Luft vor der Durchspülung durch ein besser wasserlösliches Gas ersetzen. Diese Methode zeigt immerhin einen möglichen Weg: anstatt die Luft durch ein lösliches Gas zu ersetzen, kann die Löslichkeit der Luft im Wasser dadurch erhöht werden, daß das Wasser unter Druck gesetzt wird. Diese auf Grund der Gesetze von Boyle und Henry erreichbare Kompression und Lösung der Luft läßt sich im praktischen Fall einer Bodenprobe auf doppelte Art erreichen:

1. Die Bodenprobe kann durch eine Membrane luft- und wasserdicht abgeschlossen, darnach unter steigendem allseitigen Druck deformiert werden, bis der Druckzunahme keine Volumenänderung der Probe mehr entspricht. Eine Messung des Druckes der flüssigen Phase in der Probe (Porenwasser) zeigt, daß einer weiteren Erhöhung des allseitigen Druckes eine gleiche Erhöhung des Druckes im Porenwasser entspricht (d. h. daß der effektive Spannungszustand sich nicht mehr ändert).

(Bedeutet

σ die totale Normalspannung auf einer Ebene,
 σ' der mittlere Korn-zu-Korndruck pro Flächeneinheit, d. h. die effektive Spannung,
 u der hydrostatische Druck in der flüssigen Phase, die von nun an als Porenwasser bezeichnet wird, und
 a_r die effektive Kornberührungsfäche pro Flächeneinheit, so ist $\sigma = \sigma' + (1 - a_r)u$ (1).

Sei $(1 - a_r) \sim 1$, so vereinfacht sich (1) zu $\sigma' = \sigma - u$.

Sei $C_c = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta \sigma'}$ die Kompressibilität des Bodens und

$C_u = -\frac{1}{nV} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta u}$ diejenige des Porenwassers und

n die Porosität des Bodens, so muß gelten $\Delta \sigma' = n \cdot \frac{C_c}{C_u} \cdot \Delta u$

mit $B = 1 / (1 + n \frac{C_u}{C_c})$, $\Delta u = B \cdot \Delta \sigma$,

wobei bei Sättigung $B=1$ (nach Bishop und Eldin [10]).

Ist auf diese Weise zwar Sättigung erzielt worden, so ist allerdings in Kauf zu nehmen, daß die Probe dabei deformiert wird und ihre Sättigung erst von einem bestimmten, vom ursprünglichen Sättigungsgrad abhängigen Wert des allseitigen Druckes an besteht.

2. Die Bodenprobe kann auch dadurch gesättigt werden, daß sie, durch eine Membrane luft- und wasserdicht abgeschlossen, mit einem Wasserreservoir verbunden wird, dessen Druck im Anfangszustand gleich dem allseitigen Druck auf die Probe ist. Werden in diesem Falle der allseitige Druck und der Druck des mit dem Porenwasser verbundenen Wasserreservoirs gemeinsam um einen bestimmten, vom Sättigungsgrad der Probe abhängigen Betrag erhöht, so ist es möglich, ohne Deformation der Probe Sättigung zu erreichen. Die Kontrolle, ob Sättigung herrscht oder nicht, kann durch Bestimmung der einer Steigerung des allseitigen Druckes entsprechenden Druckzunahme des Porenwassers bei konstantem Wasservolumen (B -Faktor) erfolgen (nach Bjerrum und Huder [11]).

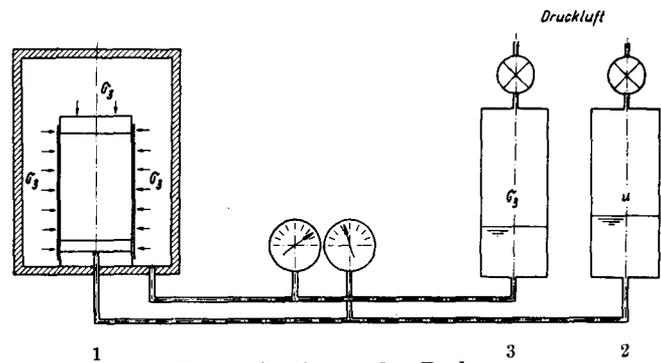


Fig. 4. Sättigung der Proben

Eine praktische Ausführung der Methode ist in Fig. 4 dargestellt: die Probe 1 ist in einer Druckzelle eingebaut und mit einem Wasserreservoir 2 verbunden; Reservoir 3 steht mit der die Probe in der Druckzelle umgebenden Flüssigkeit in Verbindung.

Von den mechanischen Eigenschaften der Lockergesteine reagiert die Scherfestigkeit am empfindlichsten auf die Versuchsbedingungen. Für bestimmte Versuchsbedingungen wird die Scherfestigkeit einer Bodenprobe bekanntlich definiert als die größte Scherspannung, welche eine Probe auszuhalten vermag. Die Untersuchung der Scherfestigkeit besteht allgemein in einer Analyse des Einflusses des allseitigen Druckes, der Belastungsgeschwindigkeit, der Volumenänderung und des Druckes im Porenwasser auf die Festigkeit der Böden (Skempton [12]), wozu triaxiale Scherversuche dienen. Für die Zwecke dieser Arbeit findet der konsolidierte, undrai-

nierte, zylindrische Druckversuch Anwendung, in welchem die erste Hauptspannung in axialer Richtung auf die Probe wirkt, die zweite Hauptspannung gleich der dritten gewählt wird und diese beiden durch den allseitigen hydraulischen Druck gegeben sind. Die Bodenprobe wird, von der Umgebung durch eine Membrane isoliert, in einer Druckzelle eingebaut und ist über eine poröse Platte mit einem Wasserreservoir verbunden. Für die Konsolidation (d. h. für die Einstellung des einem gegebenen allseitigen Druck entsprechenden Volumen und Wassergehaltes) ist die Verbindung mit dem Wasserreservoir offen, die Probe ist drainiert. Nach Beendigung der Konsolidation wird die Verbindung geschlossen und hernach der Druckversuch bei konstantem Wasservolumen durchgeführt. Der Druck im Porenwasser wird bei konstantem Volumen mittels eines Kompensationsmanometers, der allseitige Druck mit einem Manometer, die zusätzliche axiale Belastung mit einer Ringwaage und die axiale Deformation der Probe schließlich mittels einer Meßuhr gemessen.

Als erstes Versuchsmaterial wurde TiO_2 6618 (siehe oben) verwendet. Die Probengröße ist bei allen Versuchen gleich, ebenso bei den ersten 4 Versuchen die Deformationsgeschwindigkeit. Vorgegeben wird der allseitige Druck. Gemessen werden:

$$\begin{aligned} \sigma_3 & \text{ in kg/cm}^2, \\ \sigma_1 - \sigma_3 & \text{ in kg/cm}^2, \\ & \text{die Deformation in cm und} \\ & \text{der Druck im Porenwasser in kg/cm}^2. \end{aligned}$$

Aus diesen Messungen kann zu jeder Deformation der entsprechende effektive Spannungszustand bestimmt und als Mohrsches Diagramm aufgezeichnet werden. Der Verlauf der Belastungszunahme und des Druckes im Porenwasser können durch Spannungs-/Deformationsdiagramme dargestellt werden. Die Analyse der Versuchsergebnisse wird aber erleichtert durch die Verwendung einer von *Casagrande* eingeführten Darstellung, die als Vektorkurve bezeichnet wird. Diese Darstellung berücksichtigt für jeden Verformungszustand der Probe (und zwar vom Anfang der Verformung an bis zum Bruch) gleichzeitig den allseitigen Druck, die zusätzliche axiale Belastung und den Druck im Porenwasser. Dies wird dadurch erreicht, daß der Verlauf des resultierenden Vektors der effektiven Normalspannung und der effektiven Scherspannung in der $(45^\circ + \varphi/2)$ Ebene durch eine Kurve beschrieben wird, welche die Endpunkte aller Vektoren (vom Anfangszustand der Probe bis zum Versuchsende) verbindet. Die Konstruktion der Vektorkurve für einen jeden Versuch ist aus der Darstellung in Fig. 5a-e ersichtlich. Fig. 5a zeigt den resultierenden Vektor eines Spannungszustandes, Fig. 5b die resultierenden Vektoren aller während eines Versuches durchlaufenen Spannungszustände in der Bruchebene, Fig. 5c die daraus gewonnene Vektorkurve für einen typischen Versuch. Durch Berücksichtigung der effektiven Spannungen werden implizit auch die Volumenänderungen der Poren in Abhängigkeit vom Spannungszustand und vom Sättigungsgrad des Materials erfaßt. Erzeugt z. B. die zusätzliche axiale Belastung bis zum Bruch keine Änderung des Druckes im Porenwasser (Fig. 5d), so bleibt der effektive allseitige Druck konstant und die Vektorkurve ist demnach eine Gerade. Vom Standpunkt der Beschreibung des Materialzustandes aus gesehen hat die Probe entweder bei vollständiger Sättigung keine Änderung des Porenvolumens erlitten, oder es war der Sättigungsgrad der Probe sehr klein. Erzeugt dagegen die zusätzliche axiale Belastung bei jedem Verformungszustand eine

Aenderung des Druckes im Porenwasser, so ändert auch der effektive allseitige Druck und wird das Verhältnis der Druckänderung im Porenwasser zur Zunahme der axialen Belastung als Porenwasser-Spannungsparameter A bezeichnet ($A = \frac{\Delta u}{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}$), so ergibt sich damit folgendes: Der Parameter A ist bei vollständiger Sättigung nur von den Materialeigenschaften abhängig. Jeder Änderung desselben entspricht, bei Sättigung, eine Änderung der Deformationseigenschaften des Materials, oder bei bestimmtem Sättigungsgrad eine Änderung der Deformationseigenschaften *und* des Sättigungsgrades des Materials. Der Einfluß des Sättigungsgrades auf die Vektorkurve äußert sich in einer Abweichung derselben vom gradlinigen Verlauf, ebenso auch eine Änderung der Deformationseigenschaften des Materials, die ihrerseits wiederum vom Sättigungsgrad abhängig sind. Die allgemeine Form der Vektorkurve eines ungesättigten Materials hat daher ein Aussehen nach Fig. 5e. Die Änderung von A zwischen 0-1 ist abhängig vom Sättigungsgrad des Materials, wobei dieser durch die Erhöhung des Druckes im Porenwasser verändert wird, bis Sättigung erreicht ist. Zwischen 1-2 wird A nur durch die Deformationseigenschaften der Struktur des Materials beeinflußt. Zwischen 2-3 (nach Eintreten des Bruchs) ist A von den Deformationseigenschaften des Materials und vom Sättigungsgrad abhängig, welcher letzterer bei sinkendem Druck im Porenwasser in Abhängigkeit von diesem wiederum ändert. Zusammenfassend ist die als

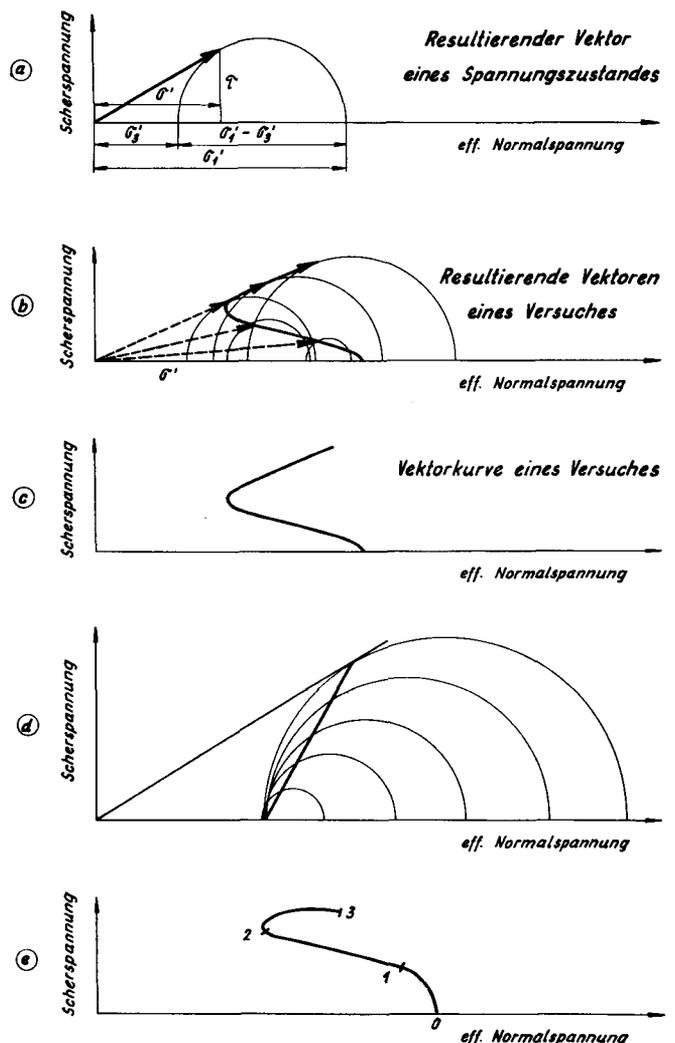


Fig. 5. Darstellung der Vektorkurve

Vektorkurve bezeichnete Darstellung des triaxialen Scherversuches eine Beschreibung der Deformationseigenschaften des Materials und damit auch seiner Struktur, und zwar in Abhängigkeit dieser Eigenschaften vom Sättigungsgrad wie unter Berücksichtigung des Sättigungsgrades selbst.

Bei unseren Versuchen zur Bestimmung der Scherfestigkeit sind demzufolge die 2 Fälle *Sättigungsgrad kleiner als 100%* und *Sättigung* zu unterscheiden. Im ersten Falle ist zu berücksichtigen, daß bei jeder Deformation und Änderung des Spannungszustandes des Materials eine Wanderung der flüssigen Phase stattfindet. Diese Wanderung äußert sich in einer Vergrößerung oder Verkleinerung der lokalen Sättigungsbereiche, je nachdem der Druck im Porenwasser ansteigt oder fällt. Diese Änderungen der Grenzen der Sättigungsbereiche entsprechen Änderungen des lokalen Wassergehaltes der Probe. Die Geschwindigkeit, mit der sie eintreten, wird durch die Durchlässigkeit des Materials und die Größe der Oberfläche der Sättigungsbereiche bestimmt. Bei jeder Änderung des Spannungszustandes ist dann der Gleichgewichtszustand erreicht, wenn die Spannungen aller lokalen Sättigungsbereiche gleich sind. Die Zeitabhängigkeit dieses Vorgangs kann bei kontinuierlicher Deformation mit konstanter Geschwindigkeit dadurch bestimmt werden, daß die Abhängigkeit der Deformationseigenschaften von der Geschwindigkeit untersucht wird. Bei Sättigung müssen hingegen die Deformationseigenschaften des Materials von der Geschwindigkeit der Deformation unabhängig sein.

Versuche mit TiO_2 6618

Die ersten drei Versuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit bei nicht gesättigtem TiO_2 sind im Diagramm Fig. 6a zusammengefaßt. Gleiche Proben dieses Materials sind bei den allseitigen Drucken von 2, 6, 12 kg/cm^2 konsolidiert und bei denselben Drucken bis zum Bruch belastet worden. Die Vektorkurven der Versuche bei 2 und 6 kg/cm^2 zeigen grundsätzlich ähnliches Verhalten, diejenige des Versuches bei 12 kg/cm^2 läßt hingegen den großen Einfluß des Sättigungsgrades der Probe auf den Versuchsverlauf erkennen. In Anwendung der ersten erwähnten Methode zur Erzeugung gesättigter Proben wurde ein vierter Versuch durchgeführt, bei welchem nach Konsolidation bei 6 kg/cm^2 der allseitige Druck gesteigert wurde, bis $\Delta u = \Delta \sigma_3$, und nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes — bei dem dann bestehenden allseitigen Druck von 9 kg/cm^2 (effektiver allseitiger Druck 7 kg/cm^2) — bis zum Bruch axial belastet wurde (Fig. 6b). Dieses Resultat bestätigt die oben wiedergegebenen Anschauungen über den Einfluß der Sättigung auf den Versuchsverlauf und gestattet, den Plan einer Versuchsserie zur systematischen Überprüfung der Erscheinung aufzustellen. Unser Experiment soll nämlich beweisen, daß beim 2-Phasensystem Boden/Wasser, bei welchem der elementare Sättigungsbereich die ganze Probe umfaßt, dessen Verformungseigenschaften von der Belastungs- oder Deformationsgeschwindigkeit unabhängig sind. Zu diesem Zweck wurden 3 Versuche unter sonst gleichen Bedingungen mit Geschwindigkeiten von 10, 100 und 1000 Minuten/10 mm durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Fig. 6c zusammengefaßt und liefern innerhalb der Genauigkeitsgrenzen tatsächlich den gesuchten Beweis. Zusätzlich zu diesem Resultat zeigt die Diskussion der Vektorkurve folgendes: sie besteht aus 3 Teilstrecken, deren jede durch eine bestimmte Spannung und Deformation charakterisiert wird. Zur Erklärung

der beiden ersten Teilstrecken müssen über die strukturellen und die Kompressibilitätseigenschaften des Materials bestimmte Annahmen gemacht werden. Unter dem Aspekten dieser Arbeit interessiert hauptsächlich die Eigenschaft des Materials nach erfolgtem Bruch, in welchem Zustand nur noch die Reibungseigenschaften wirksam sind. Die Volumenänderung nach Bruch des Materials unter Scherbeanspruchung ist nach der Vektorkurve ausschließlich vom Winkel φ der Scherfestigkeit abhängig. Dies ergibt zugleich ein neues Bruchkriterium, das auch der allgemeinen Untersuchung der Scherfestigkeit nutzbar gemacht werden kann. Die weiteren Versuche über die Abhängigkeit der Materialeigenschaften vom allseitigen Druck sind alle bei der kleinsten Deformationsgeschwindigkeit (1000 Minuten/cm) der vorangehenden Versuchsreihe durchgeführt worden. Fig. 5c zeigt, daß die Untersuchung der Scherfestigkeit im 2-Phasensystem bei Sättigung denselben Winkel der Scherfestigkeit ergibt, wie bei der Untersuchung im 3-Phasensystem (d. h. daß die Ausdehnung des elementaren Sättigungsbereichs auf die ganze Probe keinen Einfluß auf ihre Scherfestigkeit ausübt). Wie erwartet können die Versuche bei vollständiger Sättigung bei jeder Geschwindigkeit der Zustandsänderung durchgeführt werden, ohne daß dadurch die interessierenden Materialeigenschaften an sich beeinflußt werden — eine besonders im Hinblick auf die Durchführung

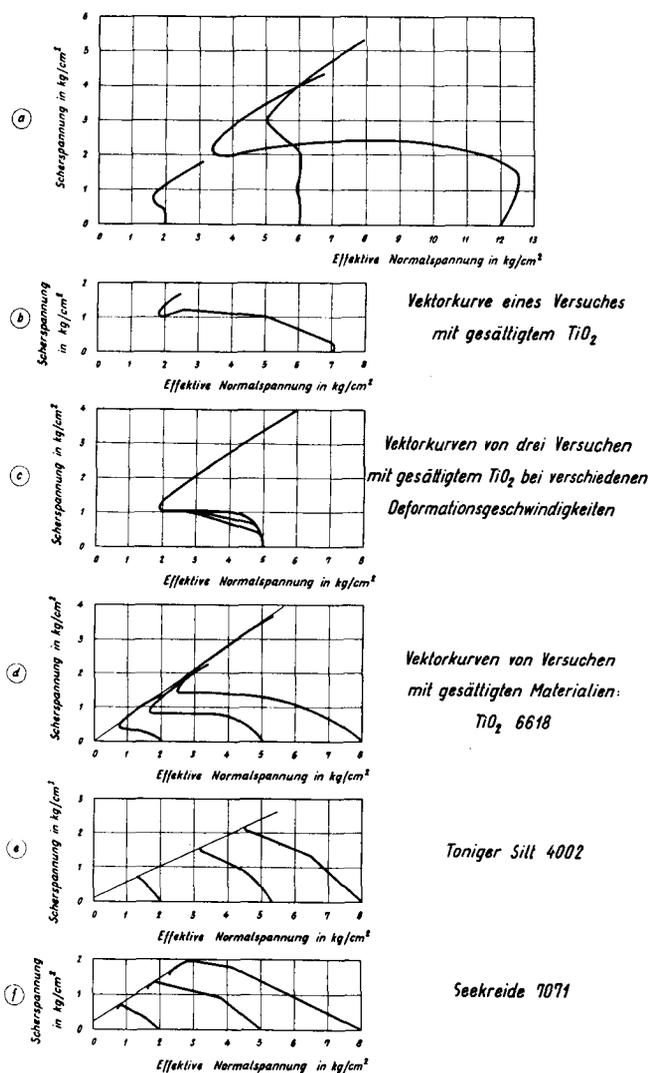


Fig. 6.

Vektorkurven der Versuche mit ungesättigtem TiO_2 6618 (a) und mit den gesättigten Materialien TiO_2 6618 (b, c, d), Toniger Silt 4002 (e) und Seekreide 7071 (f).

von Versuchen unter Änderung des thermischen Zustandes wichtige Tatsache. Naturgemäß bleibt zu untersuchen, ob diese Resultate allgemein gelten und für jedes Material charakteristisch sind.

Versuche mit typischen Böden

Zur Klärung dieser Frage war es notwendig, die gleiche Bestimmung der Materialeigenschaften an Bodenproben selber, also an tonigem Silt 4002 und Seekreide 7071, durchzuführen. Die Resultate dieser Untersuchung sind in Fig. 6e und f festgehalten. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Vektorkurve in der Tat eine geeignete Beschreibung der Materialeigenschaften liefert und lassen die oben gestellte Frage positiv beantworten: die Vektorkurve eines bei Sättigung untersuchten Materials erfaßt allgemein dessen volumetrisches Verhalten bei Beanspruchung, wobei die Geschwindigkeit der Zustandsänderung allgemein die Bestimmung der Scherfestigkeit nicht beeinflusst. Die Diskussion der Vektorkurve über jene Teilstrecke, welche der Deformation der Probe nach dem Bruch entspricht, ergibt folgendes: während TiO_2 6618 bei weiterer Deformation mit konstanter Geschwindigkeit eine Vergrößerung des Porenvolumens — und eine Zunahme des effektiven allseitigen Druckes infolge Abnahme der Porenwasserspannung — aufweist, der eine Zunahme der axialen Belastung entspricht, zeigt die äußerst empfindliche Seekreide gerade entgegengesetztes Verhalten, indem sich bei Deformation mit konstanter

Geschwindigkeit eine Verkleinerung des Porenvolumens einstellt — zugleich eine Abnahme des effektiven allseitigen Druckes infolge Zunahme der Porenwasserspannung — und eine entsprechende Abnahme der axialen Belastung. In beiden Fällen weist aber die Vektorkurve die gleiche Neigung auf wie der Winkel der Scherfestigkeit. Der siltige Ton 4002 ergibt bei Deformation mit konstanter Geschwindigkeit nach dem Bruch konstantes Porenvolumen — also konstanten, effektiven, allseitigen Druck und Porenwasserspannung —, dem auch eine konstante axiale Belastung entspricht. In diesem Falle entartet die Vektorkurve zu einem Punkt: das Material deformiert sich plastisch. Allgemein sind zwei Stoffklassen zu unterscheiden, nämlich dilatante und plastische Materialien. Bei den dilatanten besteht Korn-zu-Korndruck und erfolgt hier nach Abbau der strukturell bedingten Festigkeit die Deformation durch gegenseitige Verschiebung der Körner, was entweder eine losere oder eine engere Packung zur Folge hat. Bei den plastischen Materialien verläuft dagegen die Deformation nach dem Bruch bei gleichbleibendem Porenvolumen. Dies ist nur möglich, wenn die fluide, scherfestigkeitslose Hülle um jedes Einzelkorn geschlossen ist, also wenn *kein* Korn-zu-Korndruck besteht. Nur in diesem Falle können die Einzelkörner ihre gegenseitige Lage ändern, ohne auch ihre Kontaktfläche zu ändern (diese ist und bleibt hier gleich null; in allen andern Fällen wird die Verschiebung mit einer Änderung der Kontaktflächen und demzufolge mit einer Änderung des Porenvolumens verbunden sein).

3. Bestimmung der Frosteigenschaften gesättigter Böden

Die Planung unserer Frostversuche stützt sich auf die in der Einführung erwähnten Erfahrungen anderer Autoren sowie auf eigene Untersuchungen. Aus Gründen der Zweckmäßigkeit sind bisher in der Mehrzahl der Versuchsanordnungen zylindrische Proben verwendet worden, bei denen der Temperaturgradient in Richtung der Zylinderachse stationär oder nichtstationär verläuft. In der Literatur sind verschiedene Anordnungen seitlicher Isolierung oder gesteuerter seitlicher Abkühlung beschrieben, die alle den Zweck verfolgen, eine 0°C -Isothermenebene senkrecht zur Zylinderachse zu erhalten. Die für die Zwecke dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, daß bei einem Zylinder, dessen Länge dem zweifachen Durchmesser entspricht, die 0°C -Isotherme auch ohne zusätzliche Isolierungen oder Steuerungen eine senkrecht

zur Zylinderachse stehende Ebene bildet (auf solche wird mit Vorteil auch deshalb verzichtet, weil sie das Eintreten eines Gleichgewichtszustandes verzögern). Als Probenanordnung ergibt sich demzufolge die in Fig. 7a wiedergegebene. Ist die Messung des Druckes im Porenwasser nur bei vollständig gesättigter Probe eindeutig, so verlangt das Auftreten eines Unterdruckes zusätzlich, daß der ganze bestrichene Druckbereich innerhalb des Sättigungsgebietes liegt. Dies kann dadurch verwirklicht werden, daß zusätzlich zum hydrostatischen Druck auf Probe und Porenwasser, wie er notwendig ist, um Sättigung zu erzeugen, eine dem erwarteten Druckunterschied gleiche Vorspannung des Porenwassers vorgegeben und diese, um den effektiven Spannungszustand konstant zu halten, auch der Probe selbst erteilt wird. Weil die Größe der auftretenden Unterdrucke zunächst nicht bekannt ist, kann sich in einzelnen Versuchen die vorausgewählte Vorspannung als ungenügend erweisen. In diesen Fällen sind die Versuche mit größerer Vorspannung zu wiederholen. All dies führt zu folgendem Vorgehen: die Bodenprobe wird in eine ähnliche Druckzelle eingebaut, wie sie für die Durchführung der Scherfestigkeit-Untersuchung benutzt wird. Die Einrichtungen für die Messung der Porenwasserspannung, für den allseitigen Druck und für die Erzeugung des zusätzlichen Druckes zur Sättigung der Probe bleiben dieselben. Naturgemäß ist die Flüssigkeit, mittels welcher der allseitige Druck auf die Probe erzeugt wird, zu ändern — Alkohol statt Wasser — und wird außerdem eine zusätzliche Vorrichtung zur Kühlung der oberen Probefälfte eingebaut sowie eine Heizung für den unteren Teil der Probe. Kühlung und Heizung werden durch ein poröses Schaumgummi-Diaphragma getrennt; eine Temperaturmessung innerhalb der Probe ist nicht vorgesehen, weil sie (Penner [14]) den Vorgang

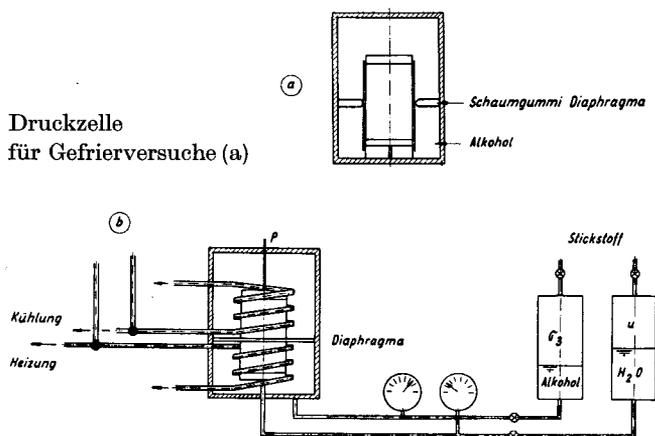


Fig. 7. Apparatur für Gefrierversuche (b)

stört und es durchaus genügt zu wissen, daß die Gefrier-
grenze innerhalb der Probe verläuft. Eine Änderung des
Temperaturgradienten hat höchstens eine Verschiebung
der Gefriergrenze zur Folge. Das Schema unserer für die
Frostversuche benutzten Apparatur zeigt Fig. 7b. Die
praktische Durchführung des Frostversuches erfolgte in
drei Schritten:

Konsolidation des Materials,
Sättigung der Probe,
eigentlicher Frostversuch.

Der eigentliche Frostversuch wird damit eingeleitet,
daß der obere Teil der konsolidierten und gesättigten
Probe gekühlt, der untere auf konstanter Temperatur
gehalten wird unter gleichzeitiger Messung der axialen
Deformation oder des Hebungsdruckes und des Druckes
im Porenwasser oder des Wassernachschubes. Daraus
ergeben sich die in Fig. 8a, b, c, d dargestellten Versuchs-
führungen:

- Messung der Deformation und des Wassernachschubes, unbehinderte axiale Ausdehnung, unbehinderter Wassernachschub (Drainage offen).
- Messung des Hebungsdruckes und des Wassernachschubes, behinderte axiale Ausdehnung, unbehinderter Wassernachschub (Drainage offen).
- Messung des Druckes im Porenwasser und der Deformation, unbehinderte axiale Ausdehnung, konstantes Wasservolumen (Drainage geschlossen).
- Messung des Hebungsdruckes und des Druckes im Porenwasser, behinderte axiale Ausdehnung, konstantes Wasservolumen (Drainage geschlossen).

Ein anschließender Auftauversuch endlich soll die
Veränderung des Materialzustandes durch Gefrieren und
Auftauen erfassen. Da es sich aber als wertvoll erwies, den
gefrorenen Zustand der Probe als solchen zu untersuchen,
wurden Auftauversuche im Rahmen dieser Arbeit nur
ausnahmsweise durchgeführt.

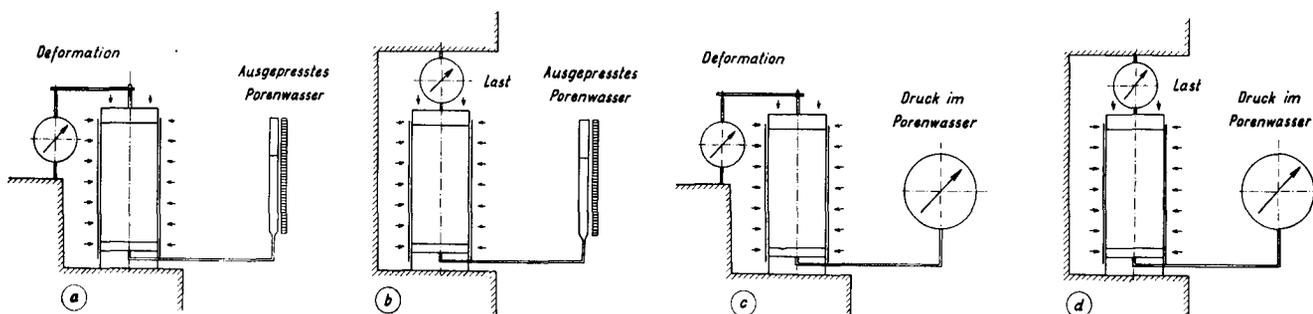


Fig. 8. Gefrierversuche

Versuche mit TiO_2 6618

Einfache Versuche hatten gezeigt, daß dieses Material
beim Eindringen des Frostes eine Bildung von Eiszwischen-
schichten und Hebung aufweist. Als erste Erweiterung der
von *Taber* eingeführten Versuchstechnik wurde an diesem
Material der Hebungsdruck einer *nicht gesättigten* Probe
gemessen. Das Resultat des im Diagramm Fig. 9a dargestellten Versuches
ergab einen Hebungsdruck von 7 kg/cm^2 . Die Kontrolle
des Wassergehaltes des ungefrorenen Teiles der Probe
mit der Wassergehalt-Konsolidationskurve des Materials
lieferte das gleiche Resultat. Die weiteren Versuche,
deren Resultate in Tabelle 2 enthalten sind, wurden bei
vollständiger Sättigung durchgeführt. Die Bestimmung
des Druckes im Porenwasser bei unbehinderter axialer
Deformation und konstantem Wasservolumen in Versuch 6
ergab einen Unterdruck im Porenwasser von $6,9 \text{ kg/cm}^2$.
Aus der Gegenüberstellung der Resultate des Versuchs im
ungesättigten Zustand (Fig. 9a) und des Versuches 6
lassen sich zwei wesentliche Folgerungen ziehen:

Tabelle 2. Gefrierversuche mit TiO_2 6618

Versuch Nr.	Versuchs- Bedingungen	Gemessen				
		σ_3 kg/cm ²	u kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	Def. mm	$\Delta u + (\sigma_1 - \sigma_3)$ kg/cm ²
3	1	4,0	3,2	—	—	7,2
4	1	3,7	3,0	—	—	6,7
6	1	6,9	—	—	3,0	6,9
16	1	4,4	2,8	—	—	7,2

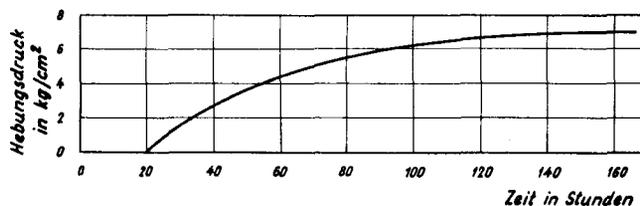


Fig. 9a. Hebungsdruk von ungesättigtem TiO_2 6618

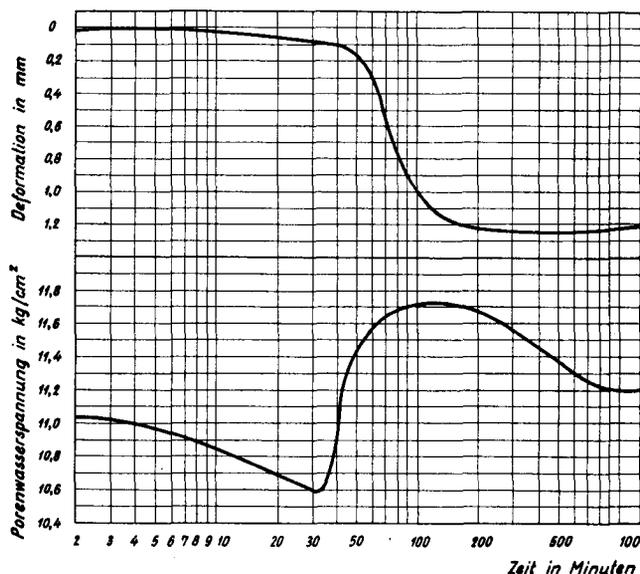


Fig. 9b. Versuch Nr. 9 mit Silt 8699

- Der Unterdruck im Porenwasser bei unbehinderter axialer Deformation und konstantem Wasservolumen ist dem Hebungsdruck bei unbehindertem Wasser- nachschub gleich.
- Die Kräfte, die in den elementaren Sättigungsbereichen auftreten, sind unabhängig von der Größe dieser Bereiche. Insbesondere kann der Sättigungsbereich auch die ganze Probe umfassen.

Zugleich stellen sich jedoch weitere Fragen, so vor allem:

- Ist der Unterdruck von der Vorspannung im Porenwasser abhängig? (Der Hebungsdruck ist es nicht!)
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen Hebungsdruck und Druck im Porenwasser?
- Was geschieht beim Auftauen?

Die erste Frage ist gestützt auf die Versuche 3 und 4, die mit verschiedenen, dem allseitigen Druck und dem Druck im Porenwasser überlagerten Vorspannungen durchgeführt wurden, zu verneinen. Die zweite Frage wird durch die Versuche 3, 4, 6 und 16 mit behinderter axialer Deformation bei konstantem Wassergehalt beantwortet. Sie beweisen, daß bei diesen Versuchen der gemessene Unterdruck im Porenwasser um den Betrag des Hebungsdruckes kleiner ausfällt als bei dem Versuch mit unbehinderter axialer Deformation. Die beiden Kräfte verhalten sich additiv, was bedeutet, daß der durch Eindringen des Frostes in die Probe verursachte Spannungszustand im ungefrorenen Teil der Probe, gleichgültig welche Versuchsanordnung gewählt wird, stets derselbe ist. Die letzte Frage wird durch Versuch 6 entschieden, bei welchem nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes und Bestimmung des Druckes im Porenwasser die Kühlung ausgeschaltet wurde. Die Deformation ging dabei nicht nur zurück, sondern die Probe wies darüber hinaus eine Setzung von 0,5% auf. Gleichzeitig ergab die Messung des Druckes im Porenwasser einen Überdruck, der 82% des effektiven allseitigen Druckes ausmacht. Dies allein genügt schon, um die Tragfähigkeit der Probe zu zerstören (das Überraschende ist dabei, daß offenbar ein einziger Frost/Auftau-Zyklus genügt, um diesen Zustand herbeizuführen). Damit folgt aus den eigentlichen Gefrier- versuchen an TiO_2 , daß direkte Messungen mit klassischen Methoden in eine Erscheinung Einsichten vermitteln können, die über die Erfahrung hinausgehen, ohne dieser zu widersprechen. Die damit hinreichend erprobten Meß- methoden selber sollen nunmehr auf die ausgewählten andern Versuchsmaterialien angewendet werden.

Versuche mit Silt 8699

Als erstes der natürlichen Materialien wurde Silt, vielfacher Erfahrung gemäß als frostgefährlichstes Unter- grundmaterial bekannt und gefürchtet, untersucht. Betreffend der Klassifikationseigenschaften des natürlich vorkommenden Materials unserer Versuche siehe Tabelle 1. Die Vektorkurve des Materials weist auf ein dilatantes Material hin. Für den ersten Versuch (Nr. 9), der in Fig. 9b dargestellt ist, wurde die Probe nicht unter allseitigem Druck, sondern anisotrop, unter einem bestimmten Ver- hältnis zwischen Vertikallast p und Seitendruck $k \cdot p$, wobei $k < 1$, konsolidiert. Der Gefrierversuch wurde her- nach bei konstantem Wasservolumen und behinderter axialer Ausdehnung durchgeführt. Der Versuch ergab, daß sich nach Auftreten eines kleinen Unterdruckes wäh- rend der Eindringung des Frostes im stationären Zustand

ein *Porenwasserüberdruck* einstellt; gleichzeitig bricht der ungefrorene Teil der Probe unter der gleichbleibenden Vertikallast, bei welcher er konsolidiert wurde, zusammen, sobald der Druck im Porenwasser ansteigt.

Dieses unerwartete Resultat wurde durch die Versuche 10, 11, 17 und 22a (siehe Tabelle 3) überprüft. Dazu

Tabelle 3. Gefrierversuche mit Silt 8699

Ver- such Nr.	Versuchs- Bedingungen		Gemessen		
	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	u kg/cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kg/cm ²	ausgepreßtes Porenwasser cm ³
9	1,0	1,0	0,72	1,0	—
10	1,0	—	0,52	0,76	—
11	6,0	—	5,70	0,73	—
12	8,0	—	7,18	1,0	—
13	1,0	—	—	—	4,3
14a	6,0	—	—	0,08	10,8
15	1,0	—	—	0,58	6,5
17	1,0	—	0,6	0,26	—
22a	2,0	—	1,45	0,53	—

diente die Anordnung mit behinderter axialer Ausdeh- nung und konstantem Wasservolumen. Der bei diesen Versuchen gemessene Überdruck beträgt zwischen 60 und 90% des effektiven allseitigen Druckes. Zur Erhärtung der gefundenen Tatsache dienten die drainierten Versuche (13, 14a und 15), bei denen bei Eindringen des Frostes Porenwasser ausgepreßt wurde. Die Untersuchung der Proben im gefrorenen Zustand zeigte, daß in keinem Falle eine Bildung von Eiszwischenschichten besteht. Die Wassergehaltsbestimmungen ergaben, daß eine Migra- tion von Wasser an die Gefriergrenze von oben nach unten stattfindet. Die einzig mögliche Folgerung aus diesen Versuchen hat daher zu lauten, daß bei diesen nicht bindigen Böden im Falle einer Frosteindringung das Porenwasser aus den gefrierenden in die ungefrorenen Schichten abgedrängt wird. Da unter den nicht bindigen Materialien feine Sande und besonders Silte auf Ände- rungen des Wassergehaltes sehr empfindlich reagieren, liegen die Folgen dieser Erscheinung, nämlich die Ver- minderung der Festigkeit des Materials in den ungefro- renen Schichten, auf der Hand. Einzig eine feldmäßige Beobachtung von N. Goldstein bestätigt bisher diese Tatsache:

„Die Wirkung der (Wasser-) Migration in bindigen und nicht bindigen Böden ist nicht die gleiche. Beim Gefrie- ren der bindigen Böden wird die Feuchtigkeit immer an die Frostgrenze herangezogen: *in den nicht bindigen Böden sieht es beim Gefrieren so aus, als ob die Feuchtigkeit durch ständig wachsende Eiskristalle zurückgedrängt würde.* Durch diesen Umstand wird es möglich, sandige Böden als Unterbrecher für die Strömung des Wassers zu verwen- den, das der Frostgrenze zustrebt.“ (In der durch die Vorstellungen über die Wirkung der „Kapillarität“ bei der Eindringung des Frostes beeinflussten Literatur wird diese gleiche Schicht „kapillarbrechend“ genannt und hat möglicherweise diese falsche Vorstellung die richtige Beobachtung der Erscheinung erschwert).

Beim ersten der untersuchten Materialien, TiO_2 , war eine Wanderung des Wassers aus dem ungefrorenen Teil der Probe an die Gefriergrenze deutlich nachweisbar. Die Versuche mit Silt 8699 ergaben dagegen, daß Wasser aus den gefrierenden Schichten in den ungefrorenen Teil der Probe abgedrängt wird. Um dieses unterschiedliche

Verhalten zu erklären, muß im Falle des TiO_2 angenommen werden, daß die Eindringung des Frostes Änderungen in der Struktur der Probe verursacht, die sich in einer Vergrößerung des Porenvolumens äußern, wenn auch nur, um für das vorhandene, gefrierende und damit sich ausdehnende Porenwasser Platz zu schaffen. Diese, bereits beim raschen Eindringen des Frostes erfolgende Strukturänderung, kann die Ursache der im stationären Zustand sich ausbildenden, augenscheinlichen Eiszwischenschichten sein. Im Falle des Silts dagegen erfolgt *keine* solche Änderung der Struktur des Bodens beim Gefrieren, weshalb hier auch die wachsenden Eiskristalle das Wasser abdrängen können. Während beim TiO_2 der ungefrorene Teil der Probe konsolidiert, die Zerstörung der Festigkeit beim Auftauen im vorher gefrorenen Teil der Probe durch den Überdruck im Porenwasser verursacht wird, muß beim Silt der Zusammenbruch der Festigkeit auf die Eigenschaften des ungefrorenen Teils der Probe — ihre empfindliche Reaktion auf Änderungen des Wassergehaltes — zurückgeführt werden und kann eine durch Gefrieren unmittelbar verursachte Änderung der Eigenschaften des gefrorenen Teils der Probe nicht nachgewiesen werden.

Versuche mit tonigem Silt 4002

Dieses Material zeigt sowohl bei Eindringen des Frostes in Laborversuchen wie im Felde deutliche Bildung von Eiszwischenschichten, ohne daß ein Hebungsdruck festgestellt werden kann. Es sind aus diesem Grunde bei Gefrierversuchen mit unbehinderter axialer Ausdehnung und konstantem Wasservolumen keine oder höchstens sehr kleine Unterdrücke im Porenwasser zu erwarten. Die Resultate der Versuche 40 und 41 (Tabelle 4) zeigen

Tabelle 4. Gefrierversuche mit tonigem Silt 4002

Versuch Nr.	Versuchs-Bedingungen	Gemessen
	σ_3 kg/cm ²	u kg/cm ²
40	1	0,24
41	1	0,20
42	8	0,95
43	8	1,2

in der Tat einen Unterdruck im Porenwasser von nur 0,2 kg/cm². Diese Feststellung ist in Einklang zu bringen mit der weiteren Beobachtung, daß das Material Eiszwischenschichten bildet. Dabei ist vorerst zu untersuchen, ob der Unterdruck im Porenwasser vom Konsolidationsdruck, also vom Materialzustand, abhängt oder nicht. Die Versuche 42 und 43 ergeben, daß eine solche Abhängigkeit nur sehr unbedeutend ist. Als Ergebnis dieser Versuche zeigt sich, daß Bildung von Eiszwischenschichten und Unterdruck im Porenwasser nicht unmittelbar zusammenhängen. Ist also Eislinsenbildung eine notwendige Bedingung für das Auftreten eines Unterdruckes, so ist sie dafür nicht hinreichend. Es müssen vielmehr weitere Bedingungen, die vom Medium abhängen, in welchem der Gefriervorgang stattfindet, erfüllt sein. Andererseits weist gerade diese Eislinsenbildung auf eine radikale Änderung in der Struktur des Bodens als Folge des Eindringens des Frostes hin, die auch ohne (oder bei nur unbedeutender) Migration von Wasser aus dem ungefrorenen Teil der Probe auftreten kann.

Änderung der Bodenstruktur beim Eindringen des Frostes

Um die zur Erklärung der bisherigen Gefrierversuche angenommene Strukturänderung des Bodens beim Gefrieren direkt nachzuweisen, wurde folgende Methode angewendet: eine Anzahl Proben der drei untersuchten Materialien wurde entweder mit dem Proctor-Apparat oder durch Konsolidation in einem großen Ödometer zubereitet und durch Druckversuch bei unbehinderter seitlicher Ausdehnung geprüft. Die dabei erhaltenen Resultate werden mit den Resultaten von Proben derselben Materialien verglichen, die auf gleiche Weise hergestellt wurden, aber vorgängig ihrer Prüfung auf Druckfestigkeit einen Gefrier- und Auftauzyklus durchlaufen. Dieser besteht aus:

- raschem Durchfrieren der durch eine Gummihülle geschützten Probe in einem Alkohol-Kohlensäureeisbad von -70°C und
- langsamem Auftauen bei einer konstanten Temperatur von 20°C .

Tabelle 5. Druckfestigkeiten von Bodenproben vor und nach einem Gefrier- und Auftauzyklus

Versuchsmaterial	$\sigma_{\text{max.}}$ vor Gefrieren und Auftauen kg/cm ²	$\sigma_{\text{max.}}$ nach Gefrieren und Auftauen kg/cm ²
toniger Silt 4002	0,6	0,4
Silt 8699	1,67	1,56
TiO_2 6618	4,71	2,91

Die Proben werden deshalb unter derart extremen Temperaturbedingungen gefroren, damit während des Gefrierprozesses, welcher hier nur wenige Minuten beansprucht, keine Migration des Wassers erfolgen kann. Die Resultate der Druckversuche sind in Tabelle 5 enthalten:

Die Versuche zeigen eindrucklich die unterschiedliche Wirkung des Eindringens des Frostes auf die drei untersuchten Materialien. Das bedeutsamste Resultat ergab die Prüfung des Siltes, zeigt sich doch hier, daß der Gefrier- und Auftauzyklus auch ohne Einfluß auf den Materialzustand sein kann, was die Aussage der beiden andern Versuchsreihen bekräftigt. Die Verminderung der Druckfestigkeit beim tonigen Silt 4002 und beim TiO_2 ist derart, daß sie als wesentliche Änderung zu gelten hat. Der Wechsel vom ungefrorenen zum gefrorenen Zustand erfolgt hier, im Gegensatz zu den vorherigen Gefrierversuchen, in derart kurzer Zeit, daß keine Migration des Wassers über größere Bereiche möglich gewesen sein kann.

Daraus kann gefolgert werden, daß die Strukturänderung eine lokal begrenzte ist, die in jedem Einflußbereich nur die unmittelbar benachbarten Teilchen betreffen wird. Diese Tatsache deutet auf einen Koagulationsvorgang [16], bei welchem vorher gebundenes, von den festen Bodenbestandteilen abgestoßenes Wasser in Verbindung mit einer gleichzeitig erfolgenden Strukturänderung des Bodens selber dessen Druckfestigkeit vermindert. Dies bestätigt unseren aus den Resultaten der Gefrierversuche gezogenen Schluß, daß bei Materialien, die bei Eindringen des Frostes Eiszwischenschichten bilden, bereits das rasche Eindringen eine Strukturänderung bewirkt, welche bei langsam fortschreitender oder stationärer Gefriergrenze in die augenscheinliche Strukturänderung der Eislinsen übergeht.

Es ist noch zu bemerken, daß die in Tabelle 5 ent-

haltenen Resultate rein qualitativer Natur sind. Das infolge Änderung der Bodenstruktur und Koagulation frei gewordene Wasser beeinflusst naturgemäß die Druck-

festigkeit der Proben. Die gemessenen Werte sind immerhin ein qualitativer Nachweis dieser Reaktion des Bodens auf rasches Eindringen des Frostes.

4. Diskussion der Resultate

Unsere Versuche sind durchwegs in drei Schritten durchgeführt worden:

- Sättigung der Proben,
- Untersuchung des Einflusses der Sättigung auf die Scherfestigkeit der Proben.
- Untersuchung des Gefrierens gesättigter Proben.

Die untersuchten Materialien sind entweder ihrer besonders interessanten — so das TiO_2 und die Seekreide — oder doch typischen Eigenschaften — so der Silt und tonige Silt — wegen ausgewählt worden. Obwohl die experimentelle Basis eine begrenzte ist, darf ein Teil der aus den Resultaten sich ergebenden Folgerungen, nämlich diejenigen, die sich auf die Untersuchungsmethoden beziehen, Allgemeingültigkeit beanspruchen. Die anderen Folgerungen hingegen, die auf Eigenschaften der Materialien selbst hinweisen, gelten zunächst streng nur für die untersuchten Materialien; als qualitative Hinweise auf das Verhalten verschiedener Bodenarten können indes auch diese letzteren Folgerungen auf alle Böden, die denselben Klassen wie die untersuchten angehören, ausgedehnt werden.

Die erste und bedeutsamste Folgerung lautet, daß es möglich ist, die beim Eindringen des Frostes auf den Boden und das Porenwasser wirkenden Kräfte bei Sättigung zu messen, wobei gleichzeitig der Nachweis erbracht wurde, daß die in Sättigungsbereichen wirkenden Kräfte unabhängig von der Größe dieser durch die Bodenbestandteile und Makroporen begrenzten Bereiche sind (der eingangs erläuterte und durch die Untersuchung bewiesene Gesichtspunkt über die Rolle der Sättigung bei der Prüfung der Scherfestigkeit und bei den Gefrierversuchen der Böden findet eine Bestätigung durch die Untersuchungen von *T. C. Powers* [17] und *T. C. Powers* und *R. A. Helmuth* [18] über Gefrierversuche mit Beton und Zement: auch dort wird der totale Sättigungsgrad einer Probe *nicht* als ein gültiges Maß für die in lokalen Sättigungsbereichen auftretende, maßgebliche Sättigung betrachtet). Die durch diese Versuche genügend untermauerten Methoden ermöglichen die allgemeine Untersuchung der Frosteigenschaften der Böden. Damit ist auch die weitere Möglichkeit gegeben, eine Beeinflussung dieser Frosteigenschaften entweder durch Veränderung der Eigenschaften der Bodenbestandteile — z. B. bei der Vermörtelung mit Zement — oder durch den teilweisen Ersatz der fluiden Phase — z. B. bei der Stabilisierung mit Öl — im Laboratorium zu studieren.

Die zweite Folgerung lautet, daß zwischen den volumetrischen Eigenschaften der Böden bei Scherbeanspruchung, wie sie durch die Vektorkurve beschrieben werden, und ihrem Verhalten beim Eindringen des Frostes eine Beziehung besteht. Die Anwendung der Vektorkurve zur Charakterisierung eines Systems Boden/Wasser bietet gegenüber einer Kennzeichnung durch die Klassifikationseigenschaften allein entschiedene Vorteile. Insbesondere gilt dies für die an Hand der Vektorkurve mögliche Trennung zwischen plastisch sich deformierenden und dilatanten Materialien.

Die Versuche mit TiO_2 6618 und tonigem Silt 4002 sowie Silt 8699 ergeben, daß beim Eindringen des Frostes

die auf den Boden und Porenwasser wirkenden Kräfte durch die charakteristischen Eigenschaften des Bodens mitbestimmt werden — eine Hypothese, die eingangs formuliert wurde. Sie geben Aufschluß über den Ursprung der Bildung von Eiszwischenschichten, die bei den untersuchten Materialien durch die Instabilität der Bodenstruktur gegenüber dem eindringenden Frost verursacht werden.

Die beiden untersuchten Materialien, die Eiszwischenschichten bilden, nämlich TiO_2 und toniger Silt, erlauben erstmals einen Zusammenhang zwischen Hebungsdruck und Unterdruck im Porenwasser nachzuweisen. Es wurde gefunden, daß Hebungsdruck und Unterdruck im Porenwasser sich additiv verhalten, d. h. daß bei Auftreten, sei es eines Hebungsdruckes (bei behinderter Deformation) oder eines Unterdruckes (bei behindertem Wassernachschub) oder beider Erscheinungen zur gleichen Zeit, die auf den ungefrorenen Teil der Probe wirkenden Kräfte stets gleich groß sind.

Die Versuche gestatten außerdem die weitere Aussage, daß Bildung von Eiszwischenschichten sowohl durch Wanderung (Migration) von Wasser aus den ungefrorenen Schichten — in unserem Falle beim dilatant sich deformierenden TiO_2 — als auch durch Abscheidung von Porenwasser in den gefrierenden Schichten — dies beim plastisch sich deformierenden tonigen Silt — verursacht werden kann. Die gemessenen Unterdrucke im Porenwasser — groß bei TiO_2 , verschwindend klein beim tonigen Silt — bestätigen diese Tatsache und ergeben, daß offenbar die Bildung von Eiszwischenschichten eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für das Auftreten eines Unterdruckes und einer dadurch verursachten Migration von Porenwasser darstellt. Daß beim dilatanten Material TiO_2 der Unterdruck groß ist, beim plastischen tonigen Silt verschwindend klein, führt dazu, das Auftreten und die Größe des Unterdruckes mit den volumetrischen Eigenschaften bei Scherbeanspruchung in Beziehung zu bringen. Die Versuche mit Silt 8699 ergaben die zunächst als merkwürdig empfundene Tatsache, daß bei Eindringen des Frostes in dieses Material das Porenwasser aus der gefrierenden Schicht in die ungefrorene abgedrängt wird — ein Verhalten, das mit der Annahme erklärt werden kann, daß der bereits sandigen Charakter aufweisende Silt eine gefrierfeste Struktur besitzt. Damit wird es möglich, daß das Wasser durch wachsende Eiskristalle abgedrängt wird — eine Erscheinung, die offenbar allen Böden mit gefrierfester Struktur, also auch den Sanden und Kiesen, zugeschrieben werden muß. Die Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes führt beim feinstkörnigen Vertreter der untersuchten gefrierfesten Böden — des Siltes — dazu, daß dieses Material durch den Verlust an Tragfähigkeit in den ungefrorenen Schichten bereits beim Eindringen des Frostes zusammenbricht. Diese Erklärung ist nicht im Widerspruch mit dem Verhalten der grobkörnigeren Vertreter gefrierfester Böden, die sich außerdem durch Unempfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes auszeichnen, woraus offensichtlich deren Unempfindlichkeit gegenüber dem Eindringen des Frostes überhaupt erklärt werden muß.

Die Frage der Frostgefährlichkeit der Böden kann mit den Begriffen der gefrierfesten Struktur und der Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes allgemein gedeutet werden. Während die Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes ein bodenmechanisches Problem ist, das mit der Größenordnung des spezifischen Korn-zu-Korndrucks im Zusammenhang steht und durch Betrachtung der geometrischen Eigenschaften des Bodens (Teilchengröße, Kornverteilung) erklärt werden kann, steht die Gefrierfestigkeit eines Bodens außerdem mit seinem petrographischen Charakter und dem Zustand des betreffenden Systems im Zusammenhang und erweist sich damit als das bodenphysikalische Problem der Koagulationseigenschaften eines Bodens.

Zusammenfassend erlaubt mindestens bei unseren Versuchen das Kriterium der Gefrierfestigkeit zwischen Böden, die bei Eindringen des Frostes Eiszwischenschichten bilden, und Böden, welche diese Erscheinung

nicht aufweisen, zu unterscheiden. Die Böden, welche Eiszwischenschichten ergeben, können durch Messung des Hebungsdruckes und des Unterdruckes weiter unterteilt werden in solche, bei denen eine Wanderung von Porenwasser aus den ungefrorenen Schichten an die Gefriergrenze erfolgt, und in solche, bei denen die Eiszwischenschichten vorwiegend durch Abscheidung (Segregation) von Porenwasser entstehen. Diese Unterteilung stimmt überein mit derjenigen, die auf Grund des plastischen oder dilatanten Charakters des Bodens beruht.

Das Kriterium der Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes gestattet weiter diejenigen Böden auszusondern, welche trotz gefrierfester Struktur infolge dieser Empfindlichkeit und der Abdrängung von Wasser aus den gefrierenden in die ungefrorenen Schichten bei Eindringen des Frostes einen Verlust an Tragfähigkeit erleiden. Damit wird es möglich, die in der Einführung unterschiedenen Klassen von frostempfindlichen Böden wie folgt ergänzend zu kennzeichnen:

I	II	III
Hebung. Bildung von Eisschichten. Nicht gefrierfest. Nicht plastisch. Migration von Porenwasser aus den ungefrorenen Schichten an die Frostgrenze.	Keine Hebung. Bildung von Eisschichten. Nicht gefrierfest. Plastisch. Segregation von Porenwasser in den gefrierenden Schichten an die Frostgrenze.	Keine Hebung. Keine Bildung von Eisschichten. Gefrierfest. Nicht plastisch. Abdrängung von Porenwasser aus den gefrierenden Schichten in die ungefrorenen.

Diese Materialien können Frostschäden verursachen durch:

I	II	III
Hebungsdruck. Tragfähigkeitsverlust beim Auftauen.	— Tragfähigkeitsverlust beim Auftauen.	— Tragfähigkeitsverlust beim Eindringen des Frostes falls empfindlich auf Änderungen des Wassergehaltes.

Allgemein ist es damit gelungen, jene meßbaren Eigenschaften des Bodens und des Systems Boden/Wasser zu erkennen und quantitativ zu bestimmen, welche auf

direkte Beziehungen zwischen Bodenfrost und Bodeneigenschaften führen, aber auch letztere mit geeigneten Messungen zu erfassen.

Literaturverzeichnis

1. *A. Casagrande*: Bodenuntersuchungen im Dienste des Straßenbaues. Der Straßenbau 1934, 25. Jahrg., Nr. 3.
2. *S. Taber*: Frost Heaving. Journal of Geology 1929, Vol. 37, No. 5.
3. *G. Beskow*: Soil Freezing. 1935 Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. C, No. 375.
4. *A. Dücker*: Untersuchungen über die frostgefährlichen Eigenschaften nicht bindiger Böden. 1939 Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Bd. 17.
5. *R. Peltier*: Théorie capillaire du gel des sols routiers. Proc. of the 3rd Int. Conference on Soil Mechanics, Switzerland 53.
6. *A. R. Jumikis*: The Frost Penetration Problem. New Brunswick 1955.
7. *K. Terzaghi*: Principles of Soil Mechanics. 1925, Eng. News Record, Vol. 95.
8. *A. Casagrande*, in: The Pressure Determination in Clay Soils. 1935, Eng. News Record, Vol. 115, No. 4.
9. *R. Ruckli*: Der Frost im Baugrund. Wien 1950.
10. *A. Bishop et G. Eldin*: Géotechnique, 1950, No. 2.
11. *L. Bjerrum and J. Huder*: Measurement of the Permeability of Clays. Proc. of the 4th Int. Conference on Soil Mechanics, London 1957.
12. *A. W. Skempton*: „Soils“ in: Building Materials Edit. Reiner, Amsterdam 1954.
13. *A. Casagrande*: Prestress Induced in Consolidated Quick Triaxial Test. Proc. of the 3rd Int. Conference on Soil Mechanics, Switzerland 1953.
14. *E. Penner*: Soil Moisture Tension and Ice Segregation, Washington D.C. H.R.B. Bull. 168, 1957.
15. *M. N. Goldstein*, in: Ordujanz, Gründungen für Bauwerke. Berlin 1954.
16. *E. Brandenberger*: Chemie des Ingenieurs. Berlin 1958.
17. *T. C. Powers*: Basic Consideration Pertaining to Freezing and Thawing Tests. Research Bulletin 58 of the Portland Cement Association, Chicago 1955.
18. *T. C. Powers and R. A. Helmuth*: Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste during Freezing. Research Bulletin 46 of the Portland Cement Association, Chicago 1953.

Lebens- und Bildungsgang

Als Sohn des Anton Balduzzi, Bauingenieurs, und der Lisa geborenen Laupper, wurde ich am 10. März 1923 in Zürich geboren. Die Schulen bis zur Reifeprüfung sowie während einiger Semester die Universität besuchte ich in Mailand. 1946 bis 1948 arbeitete ich in der Firma Brown Boveri & Co. in Baden und immatrikulierte mich anschließend an der Eidgenössischen Technischen Hochschule. Während des Studiums, das ich 1952 mit dem Diplom als Physiker abschloß, wurde ich von Herrn Prof. Dr. P. Niggli als wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigt. 1953 arbeitete ich in der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, 1954 bis 1956 in der Firma Eternit AG in Niederurnen.

Seit 1956 bin ich Physiker der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau.

F. Balduzzi