

DER EINFLUSS VON FROST-TAU-ZYKLEN AUF DAS GEFÜGE VON TONEN

Influence of Freeze-Thaw-Cycles on Clay Structures

R. SCHABABERLE, J.-F. WAGNER, K. A. CZURDA

Lehrstuhl für Angewandte Geologie
Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12, 7500 Karlsruhe

KURZFASSUNG

Um die strukturellen Veränderungen des Tongefüges bei Einwirkung von Frost-Tau-Zyklen zu klären, wurden im Labor und im Gelände Experimente durchgeführt. Die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Tone, die Art der an den Tonoberflächen adsorbierten Kationen sowie die Zusammensetzung des Porenwassers sind die Hauptparameter für die Strukturänderungen und die Gefügestabilität. Beim Transport von Wasser zur Eislinse hin werden auch Ionen mittransportiert. Die Ionen werden nicht in das Eiskristallgitter aufgenommen, sondern verursachen unterhalb der Gefrierfront eine Erhöhung der Elektrolytkonzentration.

ABSTRACT

Freezing experiments were performed in laboratory and field in order to clarify the structural changes of the clay fabric. The different mineralogical composition of the investigated clays, the type of cations adsorbed on the clay surface and the composition of the

bulk solution are the main parameters for the structural changes and the stability of fabric. Coupled with the movement of water to the ice lens is the transport of ions. These ions are not absorbed into the crystal lattice of the ice, but they cause an increase of the electrolyte concentration below the freezing front.

## 1. EINLEITUNG

Der Bodenfrost ist für die Landwirtschaft von entscheidender Bedeutung. Besonders bei Tonböden hat der Frost eine günstige Wirkung auf die Bodeneigenschaften. Die Veränderung der Bodenstruktur führt zu einer verbesserten Bearbeitbarkeit und Durchwurzelbarkeit und zu einem gesteigerten Luft-, Wasser- und Nährstoffhaushalt.

Dieser in der Landwirtschaft als "Frostgare" geschätzter Vorgang wirkt für die Ingenieurgeologie und die Geotechnik eine Reihe von Problemen auf. Hier werden Tone als natürliche, umweltverträgliche Dichtungsmaterialien beispielsweise im Deponie- oder Dammbau eingesetzt. Bei dieser Anwendung ist es wünschenswert, daß der Ton in keiner Weise verändert wird. Die Änderung des Tongefüges durch Frost hat indes eine nachhaltige Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften wie Scherfestigkeit, Druckfestigkeit und Plastizität zur Folge. Die Erhöhung der Permeabilität kann katastrophale Ausmaße annehmen, wenn als Dichtungsmaterialien vorgesehene Tone, z. B. bei Deponie-Oberflächenabdichtungen, dem Frost ausgesetzt werden. Die Bildung von Eislinsen führt zu einem Wassertransport von der ungefrorenen zur gefrorenen Zone. Ungeklärt ist bisher, in welchem Ausmaß im Porenwasser gelöste Stoffe, beispielsweise Schadstoffe aus einem Deponekörper, hierbei mittransportiert werden.

## 2. PROBLEMSTELLUNG

Wird ein wassergesättigter Ton gefroren, so kristallisiert zunächst das in den groben Poren enthaltene freie Wasser. Schließlich wird der Gefrierfront weiteres Wasser sowohl aus dem gefrorenen als auch dem ungefrorenen Boden zugeführt. Dies führt zur Bildung von Eislinsen und dreidimensionalen Netzwerken aus Eis. Durch den Wasserentzug einerseits und das Eiswachstum andererseits kommt es zur Gefügetransformation im Mikro- und Makrobereich. Die Bodenpartikel regeln sich neu ein, die Eisstrukturen zerteilen den Boden in dichte Aggregate. Unterhalb der Frostfront kann es zur Bildung von Schrumpfrissen kommen. Gekoppelt mit der Wasserbewegung ist der Transport von im Porenwasser gelösten Stoffen.

Um diese Prozesse zu erforschen, wurden Labor- und Feldversuche durchgeführt. Zwei Fragen standen im Mittelpunkt des Interesses:

Welche Rolle spielt die mineralogische Zusammensetzung bei der Gefügetransformation?

Werden bei dem durch die Eislinsenbildung angeregten Wassertransport Ionen mitgeführt?

## 3. FELDVERSUCHE

### 3.1 Lokalität und geologische Position des Testfeldes

Die Feldversuche wurden während drei Winterperioden von 1983 bis 86 nordöstlich von Salzburg im Testfeld Renigen (Oberösterreich) durchgeführt (Abb. 1).

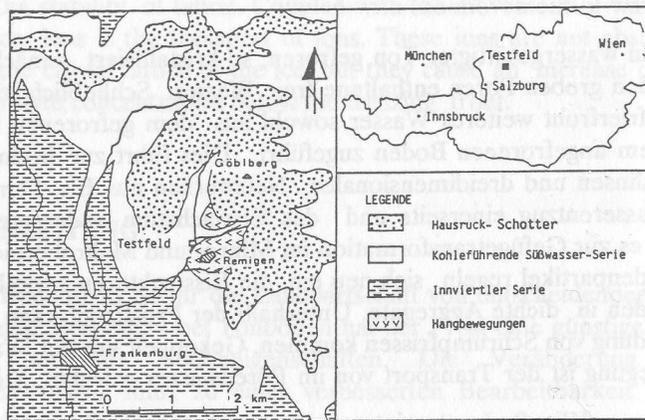


Abb. 1: Geographische Lage des Testfeldes und geologische Übersichtskarte.

### 3.2 Beschreibung der untersuchten Tone

Bei den untersuchten Tönen handelt es sich um Smectit-reiche plastische Tone der alpinen obermiozänen Süßwassermolasse (CZURDA, 1978). Die mineralogische Zusammensetzung ist der Tabelle 1 zu entnehmen (nach WAGNER & CZURDA 1986).

Tab. 1: Mineralogische Zusammensetzung des untersuchten Süßwassertones.

Quarz	6-20 %	Illit	35-48 %
Feldspat	1-5 %	Chlorit	6-21 %
Kalzit	4-21 %	Kaolinit	1-5 %
Dolomit	0-23 %	Ca-Montmorillonit	16-39 %

Detaillierte Untersuchungen der Tone sind in CZURDA & WAGNER (1984, 1985) angeführt.

### 3.3 Meßvorrichtungen auf dem Testfeld

Die in situ Beobachtungen wurden in einem möglichst ungestörten, zuvor niemals gefrorenen Ton durchgeführt. In diesem Ton wurde eine Grube von 110 cm Tiefe ausgehoben. In verschiedenen Tiefen wurden folgende Meßgeräte installiert:

8 Sensoren zur Registrierung von axialen Volumensänderungen

3 Temperaturfühler

5 Einstechthermometer

Zusätzlich wurden die Schwankungen des Grundwasserspiegels, die Lufttemperatur, die Verdunstung und die Höhe der Schneebedeckung registriert. Nach Installation der Geräte wurde die Grube wieder sorgfältig verfüllt.

### 3.4. Diskussion der Ergebnisse

In Abb. 2 sind die Ergebnisse der Feldmessungen zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß es erst ab einer Lufttemperatur von -4 Grad Celsius zu Frosthebungen kam. Diese Gefrierpunkterniedrigung ist auf den hohen Anteil an Mikroporen im Gestein zurückzuführen. Zur Bildung von Eislinsen kam es nur zwischen den oberen beiden Sensoren (zwischen Oberfläche und 10 cm Tiefe). Die maximale Frosthebung betrug 61 mm. In der ungefrorenen Zone konnte während des Gefrierens eine leichte Schrumpfung (0.5 mm) aufgrund der Migration von Bodenwasser in die gefrorene Zone beobachtet werden. Während der Tau-Periode kam es zu einer raschen Schrumpfung des gefrorenen Bereiches. Dabei wurden die

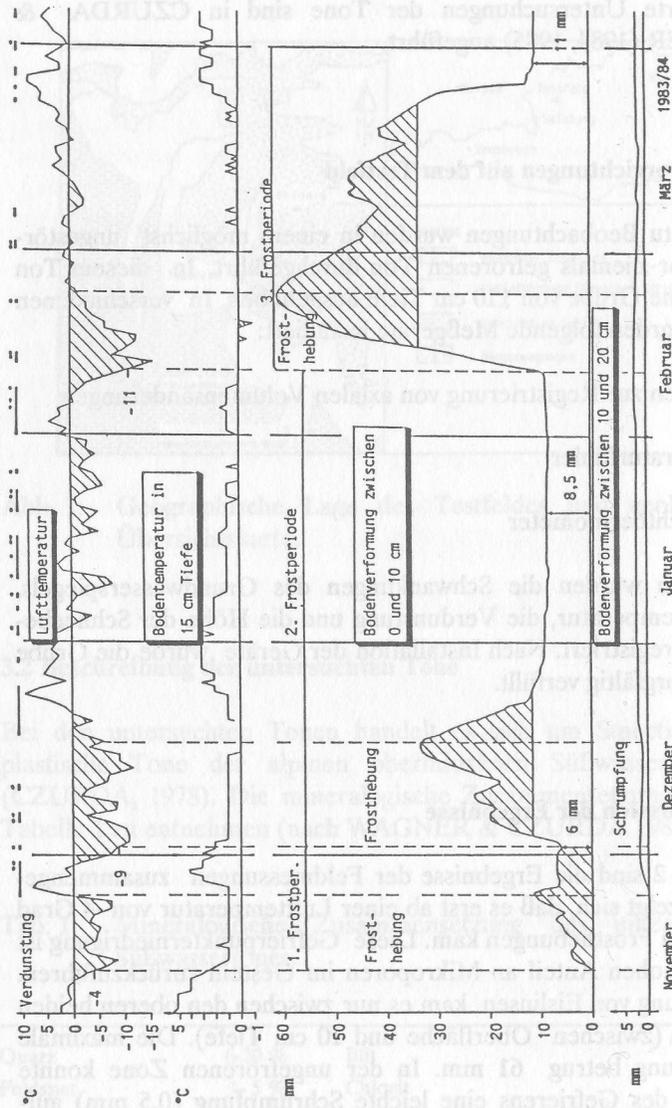


Abb. 2: Ergebnisse der Feldversuche (Winter 1983/84)

Ausgangswerte jedoch nicht mehr erreicht. Nach jedem Frost-Tau-Wechsel war eine Volumenzunahme zu verzeichnen. Der Boden wurde durch die Eisstrukturen in Segregate zerteilt, der Anteil der Makroporen nahm auf Kosten der Mikroporen zu. Eine Zunahme der Makroporen führt zu einer verringerten Feldkapazität, der Boden kann nicht mehr soviel Wasser gegen die Schwerkraft halten wie zuvor. Das überschüssige Wasser diffundiert nach unten in den ungefrorenen und zuvor an Wasser verarmten Bodenbereich. So war in der ungefrorenen Zone eine leichte Quellung (1.0-1.5 mm) zu verzeichnen. Der Wassergehalt war somit nach dem Tauen höher als vor Frostbeginn.

Die Schneebedeckung wirkte als Isolationsschicht. So war beispielsweise bei einer Schneehöhe von 20 cm eine Lufttemperatur von -14 Grad Celsius nötig, um Bodenfrost zu erzeugen.

#### 4. LABORVERSUCHE

##### 4.1. Versuchsaufbauten und Probenmaterialien

Zur Durchführung der Frostversuche wurden verschiedene Apparaturen konzipiert, um den unterschiedlichen Fragestellungen gerecht zu werden.

Zur Untersuchung der Frosthebung und der Gefügeänderungen stehen 10 Plexiglassäulen zu Verfügung ( $r=2.5$  cm,  $l=6$  cm). An der Oberseite der Proben liegt jeweils eine bewegliche Kühlplatte auf, an der Unterseite befindet sich ein Wasserzulauf. Die axiale Volumensänderung kann mit Meßuhren registriert werden.

Zur Erfassung der physikalischen Randbedingungen eines Frostversuches wurde eine Plexiglassäule ( $r=7$  cm,  $l=40$  cm) mit Meßfühlern ausgestattet, um die Frosthebung, den Wasserverbrauch, den Temperaturverlauf in der Probe und die Saugspannung unterhalb der Frostgrenze zu erfassen. Die Ablesung der Daten erfolgt Computer-gesteuert über eine Meßdatenerfassungsanlage.

Angewandte jedoch nicht mehr erreicht. Nach jedem Frost-Tau-Wechsel war eine Volumenzunahme zu verzeichnen. Der Boden wurde durch die Eiskristalle in separate Zellen der Artell der

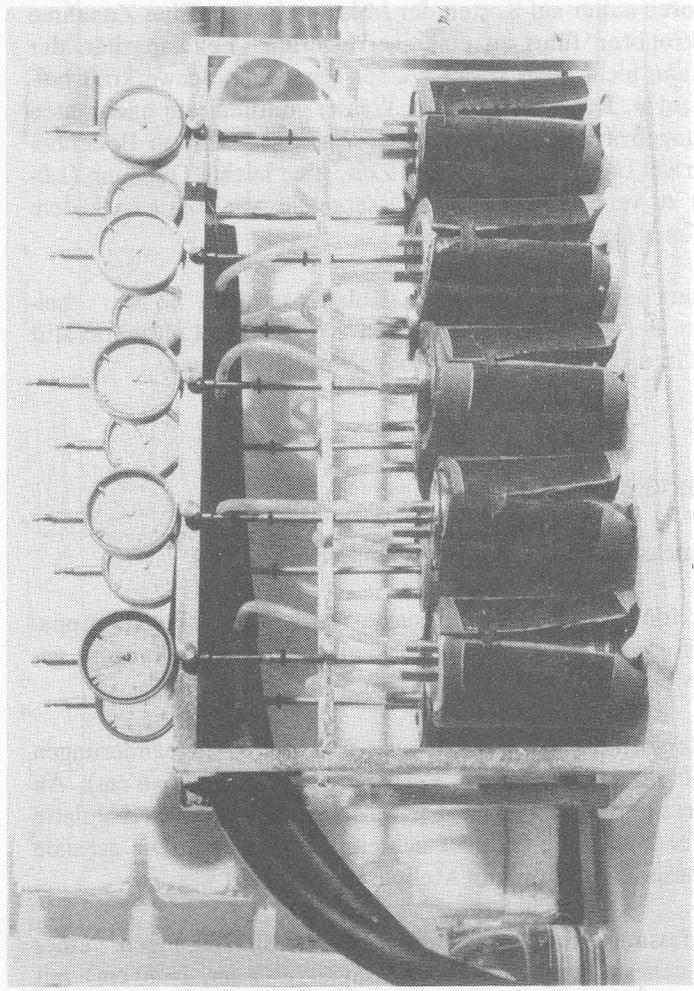


Abb. 3: Versuchseinrichtung zur Durchführung von Frostversuchen. Die Plexiglassäulen sind mit einem isolierenden Schaumstoff gefüllt.

Mehreren abgestattet, um die Frosthebung des Wasser-Druck, den Temperaturverlauf in der Probe und die Saugspannung unterhalb der Frostgrenze zu erfassen. Die Ableitung der Daten erfolgt Computer-gesteuert über eine Meßdatenerfassungsanlage.

Zur Lasterhöhung des Ionentransportes wurden 4 weitere Säulen (10 cm) in den Bereich eingebaut. Am Ende der Säulen wurde so konzipiert, daß die Säulen mit Wasser gefüllt werden können. Die Versuchsanlage ist durch die Eiskristalle in separate Zellen der Artell der

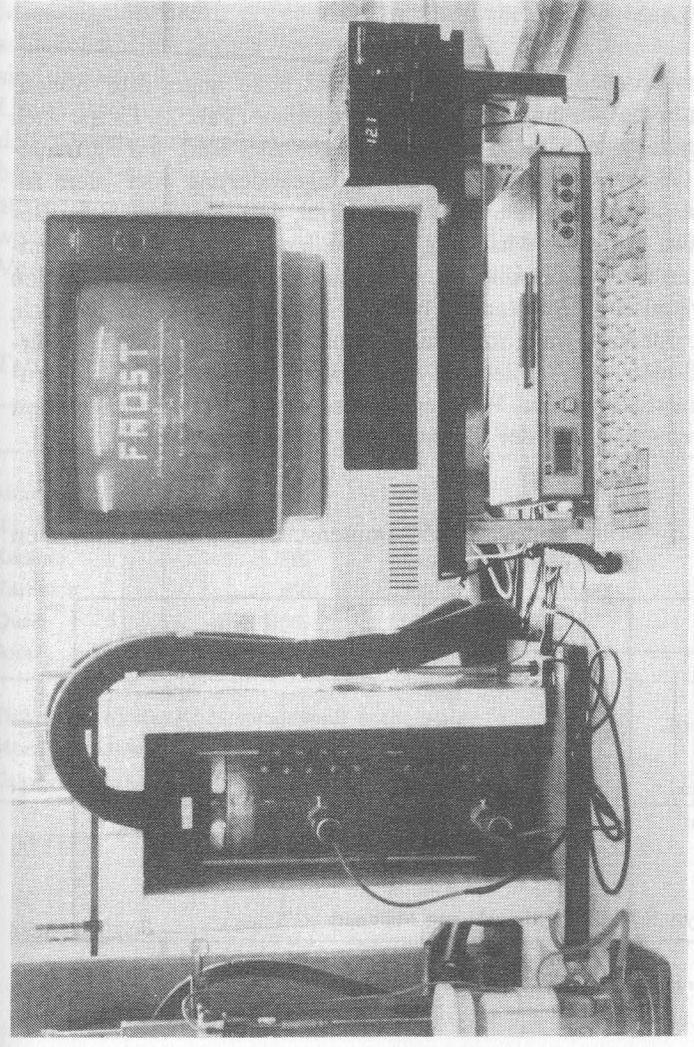


Abb. 4: Computer-kontrollierte Versuchsanlage zur Durchführung von Frostversuchen.

Zur Untersuchung des Ionentransportes wurden 4 weitere Säulen ( $r=5$  cm,  $l=40$  cm) in Betrieb genommen. Der Aufbau der Säulen wurde so konzipiert, daß ein einfacher und rationeller Aus- und Einbau des Probenmaterials möglich ist. Nach Versuchsende werden die Säulen jeweils in etwa 2 cm dicke Scheiben zersägt und analysiert.

In Vorversuchen wurden zunächst natürliche ungestörte Bodenproben in die Versuchsanordnungen eingebaut (Tab. 2). Es hat sich dabei gezeigt, daß diese Tone wenig geeignet sind, um grundlegende Gesetzmäßigkeiten bei der Gefügeänderung oder dem Ionentransport abzuleiten. Dies liegt daran, daß der natürliche Boden meist aus einer Mischung verschiedener mineralischer Komponenten wie Schichtsilikaten, Karbonaten, Gerüstsilikaten, Oxiden und organischen Substanzen besteht. Somit ist es kaum möglich, die Frostphänomene einzelnen Komponenten zuzuordnen. Natürliche Böden sind außerdem inhomogen hinsichtlich der Korngrößenverteilung, des Wassergehaltes, der Lösungskonzentration im Porenwasser und der Orientierung der Mineralpartikel.

Tab. 2: Mineralogische Zusammensetzung der natürlichen untersuchten Tone

	Bodenseeton <sup>1</sup>	Wieslochton <sup>2</sup>
Quarz	18%	18%
Montmorill.	10%	18%
Kaolinit	8%	28%
Illit/Musk.	20%	20%
Karbonat	35%	10%
Chlorit	5%	-
Sonstige	4%	6%
(Gips, Pyrit, Fe-Oxide/Hydroxide, org. Material)		

<sup>1</sup>: quartärer gebänderter Seeton; <sup>2</sup>: tertiärer mariner Mergel

Es empfiehlt sich deshalb, die Untersuchungen mit möglichst homogenen monomineralischen Proben zu beginnen, hierbei grundlegende Zusammenhänge zwischen Frostphänomen und Materialeigenschaften abzuleiten und schließlich die Versuche auf Mineralgemische zu erweitern. Zur Untersuchung wurden 5 verschiedene Mineraltypen verwendet (Tab. 3). Tixoton und Montigel sind industriell aktivierte hochquellfähige Bentonite, die in der Umwelttechnik weite Verbreitung als Dichtungsmaterialien gefunden haben. Calcigel ist ein in weitgehend natürlichem Zustand belassener niedrigquellender Ca-Bentonit. Kaolin besteht zu 90% aus dem nichtquellenden Zweischnittsilikat Kaolinit. Der Quarz wurde in pulverisiertem Zustand (feinsandiger Schluff) zu den Versuchen herangezogen.

Tab. 3: Probenmaterialien für Frostversuche

	Quarz	Tixoton	Montigel	Calcigel	Kaolin
Montmorill.	-	60%	57%	59%	2%
Illit/Musk.	3%	14%	13%	13%	8%
Kaolinit	-	8%	7%	8%	90%
Karbonat	-	6%	12%	8%	-
Quarz	97%	10%	9%	10%	-
Sonst.	-	2%	2%	2%	-
Tixoton: aktivierter Na-Montmorillonit, hochquellend Montigel: aktivierter Ca-Montmorillonit, hochquellend Calcigel: natürlicher Ca-Montmorillonit, niedrigquellend					

## 4.2 Diskussion der Ergebnisse

### 4.2.1 Gefügeänderungen

Die Versuche haben gezeigt, daß der Frost, konstante physikalische Randbedingungen vorausgesetzt, bei den unterschiedlichen Tönen völlig verschiedene Froststrukturen hervorbringt (Abb. 5).

Beim Kaolin (Zweischichtsilikat) bilden sich fast ausschließlich horizontale Eislinien. Die Frosthebung ist beträchtlich. Eislinien bilden sich ebenfalls bei Calcigel und Montigel (industriell behandelte, überwiegend Smectit-haltige Tone). Allerdings finden sich hier vermehrt vertikale, Schrumpfriß-ähnliche Strukturen. Beim Tixoton (Na-Montmorillonit-haltiger, industriell aktivierter Ton) schließlich sind fast nur noch vertikale Strukturelemente zu beobachten. Je quellfähiger ein Ton ist, um so mehr vertikale Eisrisse bilden sich. Nach dem Abtauen bleiben die Froststrukturen nur bei Calcigel und Montigel, den beiden Ca-Montmorilloniten, erhalten. Der Na-Montmorillonit (Tixoton) neigt dazu, die zuvor gebildeten Risse durch Quellen wieder zu verschließen. Die Quarzprobe zeigte keinerlei Froststrukturen.

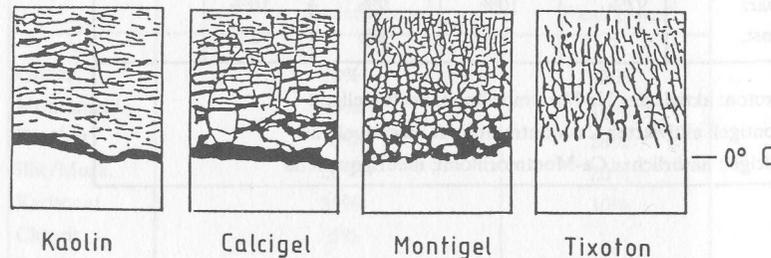


Abb. 5: Froststrukturen von Kaolin, Calcigel, Montigel und Tixoton

Die Verschiedenartigkeit dieser Froststrukturen kann durch die physiko-chemischen Eigenschaften der Tone erklärt werden. Die Smektite besitzen im Verhältnis zu den nichtquellenden Zweischichtsilikaten wegen ihrer sehr viel geringeren Größe, aber auch wegen des Vorhandenseins von interlamellaren Hohlräumen (Zwischenschichten) weitaus größere spezifische Oberflächen. Die Zwischenschichten können Wasser aufnehmen und sich beträchtlich aufweiten.

Mit Hilfe der "HALO"-Methode (Methylenblau-Adsorption) konnten die spezifischen Oberflächen der untersuchten Tone wie folgt bestimmt werden, wobei als Eichsubstanz Wyoming-Bentonit mit einer spezifischen Oberfläche von  $800 \text{ m}^2/\text{g}$  Ton zugrunde gelegt wurde:

Kaolin	Calcigel	Montigel	Tixoton	
25	432	490	500	$\text{m}^2/\text{g}$ Ton

Das Bodenwasser hat in der unmittelbaren Nähe von Oberflächen andere Eigenschaften als das freie Wasser. Über die Anordnung der Wassermoleküle besteht zwar keine einheitliche Ansicht, es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß der Ordnungsgrad der Wassermoleküle mit zunehmender Oberfläche ebenfalls zunimmt und das Wasser stärker gebunden wird. Hierbei spielt der Kristallbau eine wesentliche Rolle (SPOSITO 1984). Mit zunehmendem Ordnungsgrad der Wasserstruktur wird der Gefrierpunkt des Wassers erniedrigt.

Die Smektite besitzen negative Oberflächenladungen, die durch Anlagerung von Gegenionen (Kationen) an den äußeren und inneren Oberflächen (Zwischenschichten) neutralisiert werden. Diese austauschbar gebundenen Kationen beeinflussen in unterschiedlicher Weise die Stärke und die Ausbildung von Hydrathüllen mit ausgeprägter Struktur. Aus Untersuchungen von GRIM (1953) geht hervor, daß Na-Ionen mit bis zu zehn Molekülschichten, Ca-Ionen jedoch nur mit bis zu vier Molekülschichten hydratisiert sind. Da die Ionen den Abstand und die Anziehungskräfte zwischen den

Tonpartikeln und den Tonzwischenschichten bestimmen (VAN OLPHEN 1963), sind sie ganz wesentlich für das Quell-Schrumpfverhalten der Tone sowie die Mobilität des Wassers verantwortlich. Sind die Oberflächen der Smektite mit Na-Ionen belegt, so besitzen diese ein wesentlich höheres Quellvermögen als Ca-Smektite. Die Wasserleitfähigkeit der Tone nimmt durch Belegung der Oberflächen mit Na-Ionen ab, da der Ordnungsgrad der Wasserstruktur zunimmt und andererseits grobe Poren durch Quellen verschlossen werden. Permeameterversuche erbrachten für die untersuchten Tone folgende Durchlässigkeitsbeiwerte:

Kaolin	Calcigel	Montigel	Tixoton	
$1,4 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^{-9}$	$6,2 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	m/s

Verschiedene Autoren haben gezeigt, daß gebundenes Wasser erst bei tieferen Temperaturen gefriert (NERSESOVA & TSYTOVITCH 1963, ANDERSON & TICE 1971). Die Gefrierpunktserniedrigung korreliert mit der Bindungsstärke des Wassers. In Tonen finden sich somit weit unter dem Gefrierpunkt noch immer beträchtliche Mengen an ungefrorenem, relativ mobilem Wasser. Nach NERSESOVA & TSYTOVITCH (1963) nimmt der Gehalt an ungefrorenem Wasser generell in folgender Reihenfolge zu:

Kaolinit << Ca-Montmorillonit < Na-Montmorillonit

Beim Eindringen der Frostfront in den Ton gefriert zunächst das freie Wasser in den groben Poren. Das weitere Kristallwachstum setzt voraus, daß Wasser dem wachsenden Kristall zugeführt wird. In dem verhältnismäßig gut permeablen Kaolinit geht die Wasserwanderung vornehmlich im ungefrorenen Bereich unterhalb der Frostfront vor sich. Im Bereich oberhalb der Frostfront ist nur noch wenig ungefrorenes mobiles Wasser verfügbar. Das Eis lagert sich somit an der Unterseite der Frostfront linsenförmig in den Ton ein. Bei weiterem Vorrücken der Gefrierfront bilden sich weitere Eislinsen. Die Dicke dieser Strukturen wird sehr stark von

der Verweildauer der Frostfront in einer gewissen Tiefe im Boden bestimmt.

In den quellbaren, wenig permeablen Smektiten können aufgrund der Gefrierpunktserniedrigung noch beträchtliche Mengen Wasser aus der direkten Umgebung der Eiskristalle innerhalb der gefrorenen Zone mobilisiert werden. Diese Wasserentnahme hat eine Schrumpfung des Tones zur Folge. Entsprechend der Schrumpfrißbildung bei Austrocknung entstehen überwiegend vertikale Risse, der entwässerte Ton bildet dichte Aggregate. Die Risse dienen als bevorzugte Wachstumspfade der Eisstrukturen. Das Schrumpfen der Aggregate und das Eiswachstum setzt sich auch noch fort, wenn die Frostfront schon tiefer in den Boden eingedrungen ist. Eine Wasserentnahme findet in Abhängigkeit von der Mobilität des Wassers auch aus der ungefrorenen Zone statt. Das Eis lagert sich hier ebenfalls linsenförmig ein. Je höher die Wasserleitfähigkeit der Tone, um so dicker werden die Eislinsen. Beim Ca-Montmorillonit bilden sich ebenso dicke Eislinsen wie beim Kaolin, beim gering-leitenden Tixoton (Na-Montmorillonit) hingegen sind keine Eislinsen zu beobachten. Bei der Wasserentnahme aus der ungefrorenen Zone bilden sich ebenfalls Schrumpfrisse, die beim weiteren Eindringen der Frostzone in den Boden mit Eis gefüllt werden. Die vertikalen Schrumpfrisse und die horizontalen Eislinsen stehen miteinander in Verbindung und bilden dreidimensionale Netzwerke.

Beim Auftauen kehrt sich die Richtung der Wasserbewegung um. Das in den Eisstrukturen gebundene Wasser schmilzt und diffundiert in die ausgetrockneten Bereiche. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Vorgänge nicht völlig reversibel sind. Bei allen als Schlamm eingebauten Proben resultierte ein dichter Ton als bei Versuchbeginn. Bei den ungestörten natürlichen Proben dagegen war insgesamt eine Volumenzunahme zu verzeichnen (Abb. 6).

Bei den mit Ca-Ionen belegten Smektiten ist die Klammerwirkung der Kationen so stark, daß die Zwischenschichtabstände nach dem Gefrieren nicht mehr ihre ursprünglichen Dimensionen einnehmen können. Die Tone bewahren ihre Segregat-Struktur, der Anteil von Mikroporen hat sich zugunsten von Grobporen verringert. Beim Kaolinit fehlen solche bindenden Kräfte, beim Na-Montmorillonit

werden die Froststrukturen durch Quellen wieder überprägt. Aber auch diese Tone erreichen ihr ursprüngliches Volumen nicht mehr ganz.

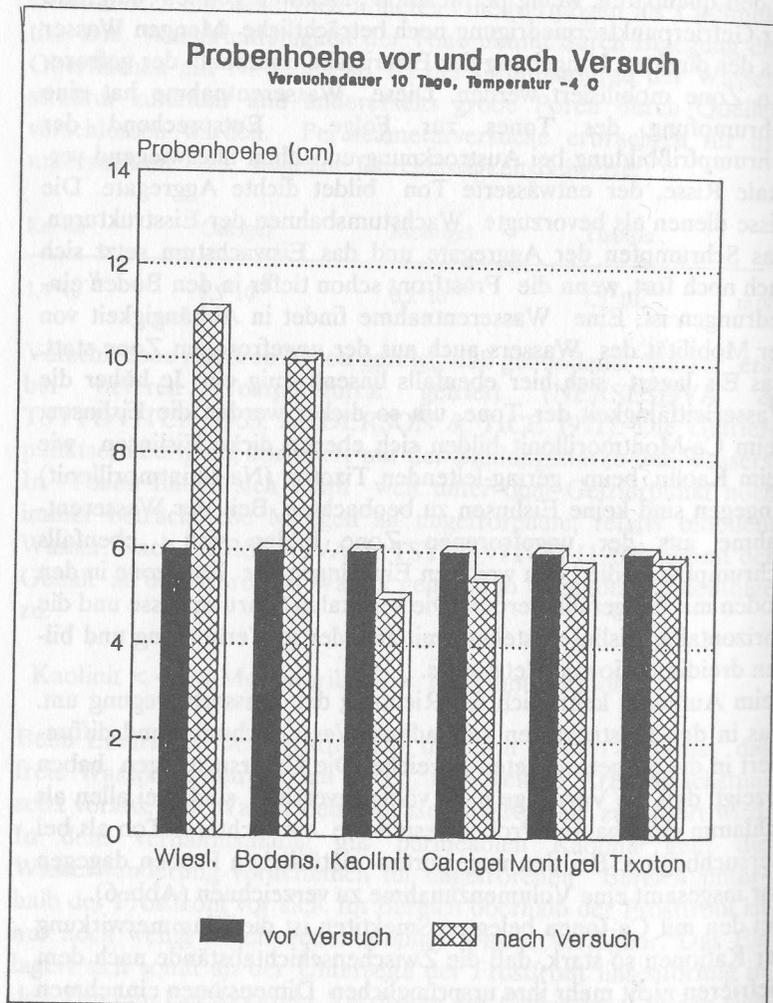


Abb. 6: Verdichtung von Tonschlämmen und Auflockerung von natürlichen ungestörten Tönen durch Gefrieren.

In weiteren Versuchsreihen wurden jeweils zwei Mineralkomponenten mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen partiell gefroren. Als Probenmaterial wurde Kaolin als Vertreter der Zwischichtminerale, Montigel als Vertreter der stark quellfähigen Smektite und Quarzmehl als Nichttonkomponente gewählt. Die Ergebnisse der Frosthebungsversuche sind der Abb. 7 zu entnehmen.

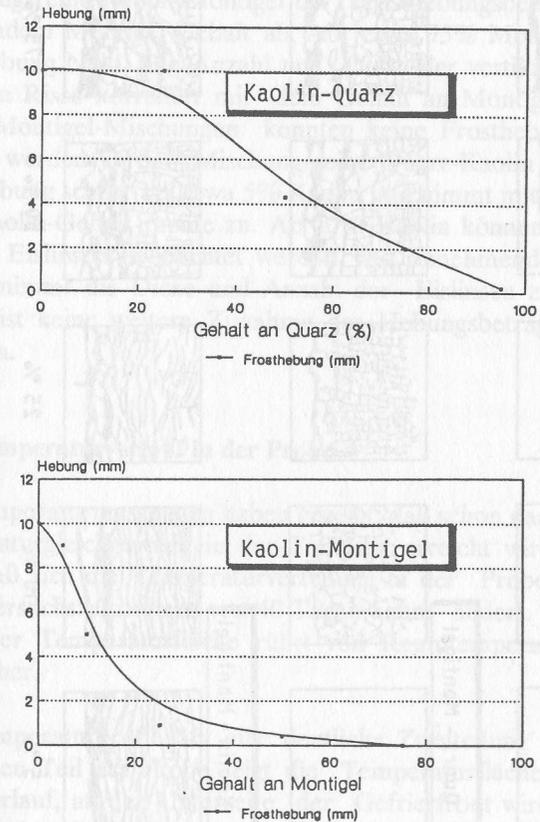


Abb. 7: Frosthebungen bei den Mischungen Kaolin-Quarz und Kaolin-Montigel (Temperatur  $-4^{\circ}\text{C}$ , Versuchsdauer 10 Tage, Einbau als wassergesättigter Schlamm). In der Mischungsreihe Quarz-Montigel waren keinerlei axiale Volumensänderungen zu verzeichnen.

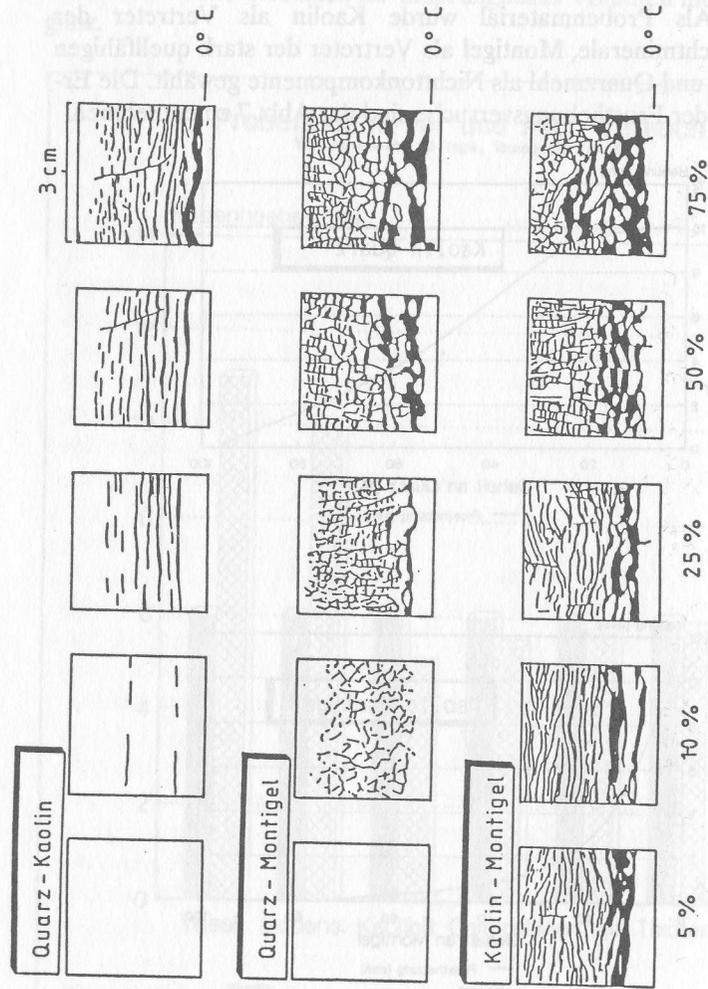


Abb. 8: Froststrukturen von Gemischen mit Quarz-Kaolin, Quarz-Montigel und Kaolin-Montigel (Versuchsdauer 10 Tage, Temperatur an Probenoberseite  $-4^{\circ}\text{C}$ , Einbau im wassergesättigten Zustand)

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß das Frosthebungsverhalten der Tone ganz wesentlich mit der Froststrukturbildung (Abb. 8) verknüpft ist. Die Frosthebung nimmt generell mit zunehmendem Anteil an quellfähigen Mineralen ab. Die Volumenzunahme durch Eisbildung wird durch Schrumpfen der Tone in der gefrorenen und ungefrorenen Zone zunehmend kompensiert. So nimmt in der Mischungsreihe Kaolin-Montigel der Frosthebungsbetrag mit zunehmendem Montigel-Gehalt ab. Ab etwa 75% Montigel ist die Frosthebung Null. Die Anzahl und Dicke der vertikalen mit Eis gefüllten Risse korreliert mit dem Gehalt an Montigel. Bei den Quarz-Montigel-Mischungen konnten keine Frosthebungen beobachtet werden. In der Mischungsreihe Quarz-Kaolin beginnt die Frosthebung schon bei etwa 5% Kaolin und nimmt mit zunehmendem Kaolin-Gehalt rapide zu. Ab 10% Kaolin können die ersten dünnen Eislinnen beobachtet werden. Mit zunehmendem Kaolin-Gehalt nimmt die Dicke und Anzahl der Eislinnen zu. Ab 80% Kaolin ist keine weitere Zunahme des Hebungsbetrages zu verzeichnen.

#### 4.2.2 Temperaturverlauf in der Probe

Die Temperaturmessungen haben gezeigt, daß schon nach 24 h ein Temperaturgleichgewicht in der Tonsäule erreicht wird. Abb. 9 zeigt, daß sich die Temperaturverteilung in der Probe innerhalb eines Versuchszeitraumes von 40 Tagen kaum ändert. Die Undulation der Temperaturfläche rührt von Raumtemperaturschwankungen her.

Das Temperaturprofil läßt eine deutliche Zweiteilung erkennen. Im oberen Teil der Probe zeigt die Temperaturfläche einen flachen Verlauf, an der Unterseite der Gefrierfront wird sie rasch steiler und verläuft nach unten hin fast vertikal. Der Knickpunkt zwischen oberem und unterem Teil der Temperaturfläche hat zwei Ursachen. Zur Umwandlung von Wasser in Eis an der Gefrierfront müssen etwa  $79,7 \text{ cal/g}$  abgeführt werden (latente Umwandlungswärme). Gefrorener und ungefrorener Boden haben

verschiedene Wärmeleitzahlen (Wasser:  $0,5 \cdot \text{Kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}$ , Eis:  $1,8 \text{ Kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}$ ).

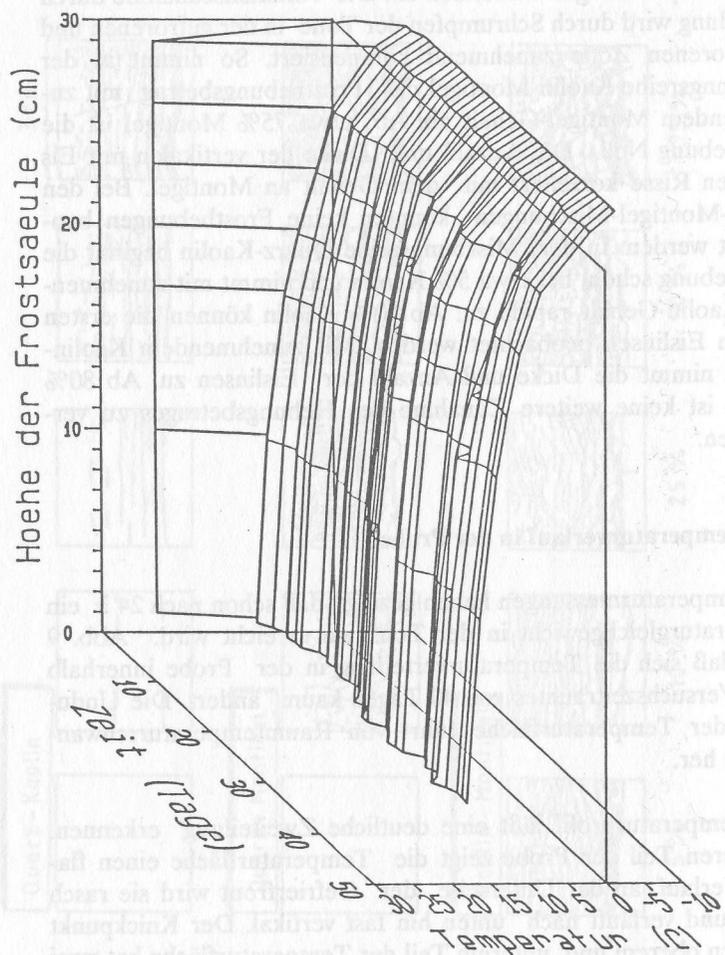


Abb. 9: Dreidimensionale Darstellung des Temperaturprofils in einer Frostsäule (Tixoton) während einer Versuchsdauer von 40 Tagen.

#### 4.2.3 Saugspannungen unterhalb der Gefrierfront

Die Bewegung von Bodenwasser hat bei der Strukturbildung in gefrierenden Tonen eine herausragende Bedeutung. Die wichtigste Antriebskraft für Wasserbewegungen beim Gefrieren ist die an der Grenzfläche Eis-Wasser entstehende Saugspannung. Kennt man die Größe dieses Parameters, lassen sich die Vorgänge beim Gefrieren von Tonen leichter erklären.

Die Saugspannung (Matrixpotential) unterhalb der Gefrierfront konnte mit Hilfe eines Tensiometers registriert werden, das etwa 10 cm unterhalb der Probenoberseite plaziert wurde. Ein weiteres Tensiometer wurde an der Probenunterseite in Höhe der Wasserspiegels im Vorratsgefäß installiert.

Die Saugspannungsmessungen haben ergeben, daß bei Beginn der Frostversuche zunächst ein Porenwasserüberdruck unterhalb der Eislinse aufgebaut wird (Abb.10). Diese Druckzunahme wurde auch von dem Tensiometer an der Probenunterseite registriert. Gleichzeitig war eine Wasserabgabe an das Vorratsgefäß zu verzeichnen.

Dieses Phänomen läßt sich dadurch erklären, daß es infolge der Kristallisation von Eis in den groben Poren zunächst zu einer Verdrängung von Porenwasser kommt. Ist alles in den Grobporen befindliche Wasser gefroren, wachsen die Eiskristalle weiter, indem ihnen weiteres Wasser aus dem ungefrorenen Teil des Bodens zugeführt wird. Die Saugspannungsmessungen belegen, daß dieser Zeitpunkt meist schon nach 2 bis 3 Tagen gekommen ist. Kurz nachdem an der Probenoberseite die ersten dünnen Eisstrukturen sichtbar geworden sind, wird der Porenwasserüberdruck rasch reduziert. Die Saugspannung nimmt schließlich negative Werte bis -50 mbar an. Gleichzeitig hört die Wasserabgabe an der Probenunterseite auf. Die an der Unterseite der Gefrierfront entstandene Potentialsenke führt zu einem stetigen Nachströmen von Wasser aus der ungefrorenen Zone.

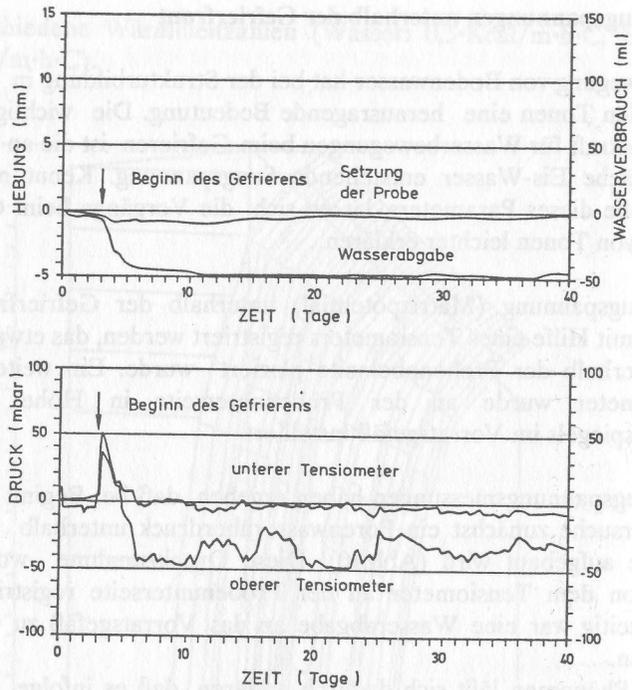


Abb. 10: Wasserabgabe an der Unterseite der Probe und Verlauf der Saugspannung in der ungefrorenen Zone beim partiellen Gefrieren einer wassergesättigten Tonsäule (Montigel)

Im weiteren Verlauf des Versuches nimmt die Höhe des Matrixpotentials kontinuierlich ab, das System nähert sich dem Potentialgleichgewicht. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Eisstrukturen nimmt ebenfalls ab und wird schließlich annähernd Null.

#### 4.2.4. Wasserbewegung und Ionentransport

Die an der Unterseite entstehende Saugspannung hat eine Bewegung von Porenwasser zur Folge. Die Analysen haben ergeben, daß die im Porenwasser enthaltenen Ionen mittransportiert und z. T. an den Tonoberflächen adsorbiert werden. Die einwertigen Li-, Na- und K-Ionen werden gegenüber den zweiwertigen Ionen bevorzugt mobilisiert. Die Ionen werden jedoch nicht in das Kristallgitter des Eises eingebaut, sondern verbleiben an der Grenze Eis-Wasser. Die Konzentrationserhöhungen sind beträchtlich (Abb. 11).

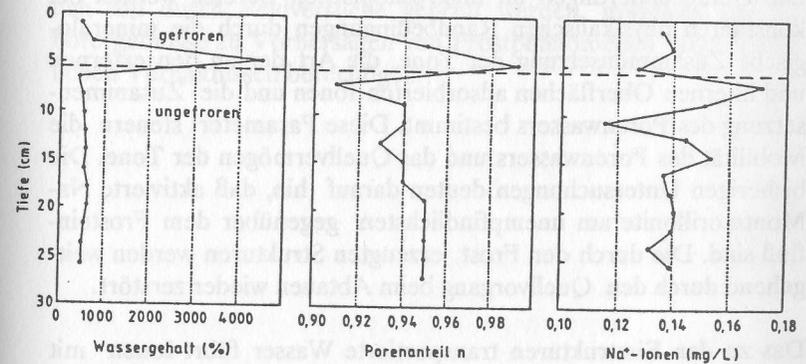


Abb. 11: Änderungen des Wassergehaltes, des Porenanteils und des Na-Gehaltes im Porenwasser durch partielles Gefrieren.

Diese Störung des Lösungsgleichgewichtes kann nicht ohne Folgen für den Bodenwasserhaushalt bleiben. Vermutlich trägt die erhöhte Lösungskonzentration mit zur Wasserbewegung zur Eislinse hin bei (osmotisches Potential). Tone reagieren sensibel auf Veränderungen der physiko-chemischen Randbedingungen. Das größere Angebot an einwertigen Ionen und der erhöhte Konzentrationsunterschied zwischen Innen- und Außenlösung führt zu einem Austausch von höherwertigen adsorbierten Ionen gegen ein-

wertige Ionen. Eine Konzentrationserhöhung führt zu einer Verringerung der diffusen Doppelschicht und erleichtert so die Annäherung der Bodenpartikel. So ist anzunehmen, daß die Konzentrationserhöhungen an den Gefügeänderungen in den ungefrorenen Bodenpartien beteiligt sind. Das Fortschreiten der Gefrierfront in den Boden wird durch den erhöhten Elektrolytgehalt behindert (Gefrierpunktserniedrigung).

### 5. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Gefügeänderungen im makroskopischen Bereich werden bei konstanten physikalischen Randbedingungen durch die mineralogische Zusammensetzung der Tone, die Art der an den externen und internen Oberflächen adsorbierten Ionen und die Zusammensetzung des Porenwassers bestimmt. Diese Parameter steuern die Mobilität des Porenwassers und das Quellvermögen der Tone. Die bisherigen Untersuchungen deuten darauf hin, daß aktivierte Na-Montmorillonite am unempfindlichsten gegenüber dem Frosteinfluß sind. Die durch den Frost erzeugten Strukturen werden weitgehend durch den Quellvorgang beim Abtauen wieder zerstört.

Das zu den Eisstrukturen transportierte Wasser führt Ionen mit sich, die sich unterhalb der Eislinse anreichern und einen Einfluß auf den Wassertransport, den Gefrierprozeß sowie die Gefügeänderungen im ungefrorenen Bereich haben müssen. Bei ungünstigen Bedingungen können durch Eislinnenbildung in einer Oberflächenabdichtung einem Deponiekörper Schadstoffe entzogen und in Nähe der Oberfläche transportiert werden.

### 6. AUSBLICK

Die bisherigen Untersuchungen erlauben nur eine begrenzte Quantifizierung der oben geschilderten Phänomene. Deswegen werden weitere Laborversuche mit Mischungen verschiedener Materialien durchgeführt. Dabei sollen die Wassergehalte und die Lagerungsdichten der Tone variiert werden. Bisher wurden überwiegend die Vorgänge beim Gefrieren untersucht. In Zukunft sollen die Prozesse beim Abtauen der Eisstrukturen verstärkt in die Betrachtungen mit einbezogen werden.

Einen Schwerpunkt der weiteren Arbeit werden Untersuchungen über Änderungen des Mikrogefüges durch Frost bilden. Schließlich soll durch Feldversuche geprüft werden, inwieweit die Laborergebnisse zu Vorhersagen von Frostphänomenen unter natürlichen Verhältnissen berechnen.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- ANDERSON, D.M. & TICE, A.R. (1971): Low-temperature phases of interfacial water in clay-water systems.- Soil. Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 35: 47-54.
- CZURDA, K. (1978): Sedimentologische Analyse und Ablagerungsmodell der miozänen Kohlemulden der österreichischen Molasse.- Jahrb. Geol. B.-A., Band 121, Heft 1: 123-154, Wien.
- CZURDA, K.A. & WAGNER, J.F. (1984): Processes of frost action in swelling clays.- Proc. Third Int. Offshore Mechanics and Arctic Eng. Symp., Vol. 3: 111-116, New Orleans, Louisiana, USA.
- CZURDA, K.A. & WAGNER, J.F. (1985): Frost heave and clay expansion in freshwater clays.- Proc. 4th Int. Symp. on Ground Freezing: 129-136, Sapporo, Japan.
- CZURDA, K.A. & SCHABABERLE, R. (1988): Influence of freezing and thawing on the physical and chemical properties of swelling clays.- Proc. 5th Int. Symp. on Ground Freezing, Vol. 1: 51-58, Nottingham, England.
- GRIM, R.E. (1952): Relation of frost action to the clay mineral composition of soil materials. - HRB Spec. Rep. 2: 167-172.
- NERSESOVA, Z. A. & TSYTOVITCH, V.A. (1963): Unfrozen water in frozen soils. - Proc. 1st. Internat. Conf. Perma frost: 230-234.

- SCHABABERLE, R., WAGNER, J.F. & CZURDA, K.A. (1988): Influence of freeze-thaw-cycles on clay structures. - Proc. 5th Int. Symp. on Ground Freezing, Nottingham, England (in Vorbereitung).
- SPOSITO, G. (1984): The surface chemistry of soils. - Oxford Univ. Press, New York, Clarendon Press, Oxford, 234 S.
- VAN OLPHEN, H. (1963): Clay colloid chemistry.- New York, London (Wiley).
- WAGNER, J.F. & CZURDA, K.A. (1986): In-situ observations on an expansive clay subjected to freezing and thawing. - Proc. 5th. Int. Congr. IAEG, Buenos Aires.

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Mikrogefüge von Bentonit-Zement-Wasser-Systemen wurde zur Vermeidung von Artefakten mittels schräger Kryofixation und Gefrierätzung untersucht. Dadurch wurden im Vergleich zum Rasterelektronenmikroskop feinere Strukturdetails sichtbar. An Bentonit-Wasser-Suspensionen wurden für allein flache/flache Anordnungen beobachtet, die bei hoher Elektrolyt-Konzentration flacher liegen. Im Vergleich mit einer Zement-Wasser-Suspension wird beim Bentonit-Zement-Wasser-System eine deutlich verzögerte Phasenbildung beobachtet. Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen lassen sich mit rheologischen Messungen korrelieren.