

**Zur Kenntnis der Vorgänge im Erdboden beim Gefrieren und Auftauen sowie Bemerkungen über die erste Kristallisation des Eises in Wasser.**

Von

AXEL HAMBERG.

Viele Erscheinungen, die beim Gefrieren und Tauen des Erdbodens auftreten, sind von Alters her bekannt. In den letzten Jahrzehnten hat sich aber die Literatur über diesen Gegenstand bedeutend vermehrt, wohl in erster Linie angeregt durch die Beobachtungen, die während der NATHORST'schen Expedition nach Beeren Eiland, Spitzbergen und Kung Karls Land 1898 gemacht wurden. Durch die Spitzbergenfahrt des XI. internationalen Geologenkongresses in Stockholm 1910 wurde die Aufmerksamkeit mehrerer hervorragender Gelehrten verschiedener Länder auf hierhergehörige Erscheinungen gelenkt. Im folgenden Jahre wurde in der Berliner Gesellschaft für Erdkunde sogar eine lebhaftere Diskussion über dasselbe Thema gehalten. Diese Studien blieben zwar nicht auf die auf Frost beruhenden Erscheinungen beschränkt, sondern widmeten sich verschiedenen, mit Durchnässen, Trocknen, Gefrieren und Auftauen in Verbindung stehenden Bewegungs- und Strukturerscheinungen der losen Erdschichten. Aus den letzten Jahren stammen mehrere systematische Übersichten hierhergehöriger Beobachtungen, unter denen diejenigen von SAPPER<sup>1</sup> und B. HÖGBOM<sup>2</sup> wohl die vollständigsten

<sup>1</sup> Erdfließen und Strukturboden in polaren und subpolaren Gebieten. — Internationale Mitteilungen für Bodenkunde 1914.

<sup>2</sup> Über die geologische Bedeutung des Frostes. — Bull. Geol. Inst. of Upsala Vol. 12, 1914.

sind. Man kann diesen Zusammenstellungen entnehmen, dass auf dem fraglichen Gebiete eine stattliche Reihe Beobachtungen vorliegen, dass aber die theoretische Erklärung derselben manchmal viel zu wünschen übrig lässt.

#### Eindringen der Temperaturschwankungen in den Erdboden.

Das Eindringen der Temperaturschwankungen in den Erdboden ist von dem Wärmeleitungsvermögen und der spezifischen Wärme des Materiales abhängig. Die meisten kompakten Gesteine haben ein Wärmeleitungsvermögen<sup>1</sup> von etwa 0,005. In pulverförmigen, lockeren Ablagerungen, wo die Zwischenräume zwischen den Körnern etwa 30—50% des ganzen Volumens betragen und von Luft ausgefüllt sind, kann das Wärmeleitungsvermögen bis auf  $\frac{1}{100}$  desjenigen des kompakten Gesteins herabgesetzt sein. Wenn die Poren mit Wasser gefüllt werden, so steigt das Wärmeleitungsvermögen beträchtlich und kann sich dem Wert des kompakten Gesteins nähern. Gefriert das Wasser, so steigt die Wärmeleitung noch mehr und wird derjenigen der festen Gesteine ungefähr gleich. Die Wärmeleitungsfähigkeit des Wassers ist nämlich etwa 0,0015 und diejenige des Eises bei mässigen Kältegraden etwa 0,005.

Die spezifische Wärme der wichtigsten Gesteine scheint etwa bei 0,2, diejenige des Eises ungefähr bei 0,5 zu liegen. Für flüssiges Wasser ist diese Konstante = 1. Alle diese Werte beziehen sich auf Temperaturen in der Nähe von 0° und auf die Gewichtseinheit.

Rechnen wir mit gleichen Volumen von kompaktem Gestein, Eis und flüssigem Wasser, so müssen wir die zur Erwärmung der Gesteine nötige Wärmemenge verdreifachen, da das spezifische Gewicht derselben etwa bei 3 liegt. Nach Vo-

<sup>1</sup> = die Wärmemenge, die in der Sekunde per cm<sup>2</sup> zwischen zwei von einander 1 cm entfernten Ebenen übergeht, deren Temperaturunterschied 1° ist.

lumina berechnet wird die Wärmekapazität der Gesteine und des Eises ungefähr gleich und diejenige des Wassers nicht völlig doppelt so gross. In lockerem Material (Sand, Lehm usw.) tritt, da das Porenvolumen auf etwa 30% des Gesamtvolumens geschätzt werden kann, kein besonders grosser Unterschied auf.

Diesen Daten kann man zunächst folgendes entnehmen: Trockene lockere Erdschichten müssen des Luftgehaltes wegen stark wärmeisolierend wirken und die darunterliegenden Schichten gegen die Temperaturschwankungen der Atmosphäre schützen. Wenn die auf etwa 30 Volumprozent geschätzten Zwischenräume zwischen den Körnern mit flüssigem Wasser gefüllt sind, ist die wärmeisolierende Wirkung der lockeren Erdschicht nur wenig grösser als diejenige des festen Gesteins. Sind die Zwischenräume von Eis ausgefüllt, so besteht in fraglicher Beziehung kein wesentlicher Unterschied gegenüber dem festen Gestein.

Wenn aber die Erdschichten Wasser oder Eis enthalten, so können die Verdampfungswärme des Wassers und die Schmelzwärme des Eises mit hineinspielen. Falls im Laufe einer Temperaturerhöhung Wasser aus der Erdoberfläche verdunstet, wird die Temperaturerhöhung im Erdboden abgeschwächt; während einer Temperatursenkung wird diese im Erdboden verstärkt.

Viel grösser dürfte aber die Einwirkung der Schmelzwärme sein. Ein g Eis verbraucht beim Schmelzen 80 Kalorien, und ebensoviel wird beim Gefrieren frei. Die Schmelzwärme ist also etwa 80 mal so gross wie die zum Erwärmen der gleichen Quantität Wasser um 1° nötige Wärmemenge und etwa 150 mal so gross wie die zum Erwärmen von Eis nötige Wärme. Wenn nasse Erdschichten Temperaturschwankungen ausgesetzt werden, die zu beiden Seiten von 0° liegen, so müssen die Fortleitung derselben durch die Schmelzwärme des Eises ausserordentlich verlangsamt werden. In der gefrier-

enden oder schmelzenden Schicht pflanzt sich die Temperaturveränderung nur äusserst langsam fort.

Hinsichtlich der Wärmeverbreitung im Erdboden dürfte man zwei Typen annehmen können:

A. *Verhältnismässige gleichmässige Wärmeverbreitung.*

Hierher gehören die Bodenschichten, wenn die Zwischenräume zwischen den Mineralpartikeln entweder mit Wasser oder mit Eis ausgefüllt sind und die Temperaturen entweder völlig über oder völlig unter 0° liegen. Die Schwankungen der Temperatur müssen sich dann etwa gleich schnell in feinkörnigem Boden wie in eingeschlossenen grösseren Steinen fortpflanzen.

B. *Ungleichmässige Wärmeverbreitung.*

Diese findet in trockenem Boden statt, der um so besser wärmeisolierend wirkt, je lufthaltiger er ist. Eingeschlossene Steine leiten viel schneller.

Eine ungleichmässige Wärmeverbreitung muss ebenfalls in gefrierendem oder tauendem wasserhaltigem Boden folgenderweise stattfinden. In der unmittelbaren Nähe der gefrierenden oder schmelzenden Schicht schreitet eine Temperatursenkung oder -steigerung äusserst langsam fort, während sich dieselbe oberhalb und unterhalb der Schicht sowie in eingeschlossenen Steinen verhältnismässig schnell fortpflanzt.

Über die Bildung von Eisfilamenten (= Kammeis, schwed.: Pipkrake).

Auf von Schnee unbedecktem feuchtem Boden können bei starkem Frost faserige Eismassen hervorschiessen, die häufig nach einer Seite umgebogen erscheinen. Solche Bildungen sind schon längst beobachtet worden von S. T. RIGAUD<sup>1</sup> auf nicht ganz getrocknetem Mörtel, von Sir JOHN HERSCHEL<sup>2</sup> auf

<sup>1</sup> 1821. Vergl. London and Edinburgh Philos. Magazine. Bd. 2, 1833, S. 190.

<sup>2</sup> Notice of a remarkable Deposition of Ice round the decaying Stems of Vegetables during Frost. L. a. E. Philos. Magazine. Bd. 2, 1833, S. 110.

frischen sowie auf verwelkten Pflanzen, von J. LE CONTE<sup>1</sup> und B. SCHWALBE<sup>2</sup> auf Böden verschiedener Art sowie auf Pflanzen, von R. PRINZ<sup>3</sup> in zementierten Fugen zwischen den Ziegelsteinen einer Terrasse sowie von einer ganzen Reihe anderer älterer Forscher. In Schweden sind diese Bildungen von H. HESSELMAN<sup>4</sup> und B. HÖGBOM<sup>5</sup> erwähnt worden.

Die meisten Verfasser scheinen darüber einig zu sein, dass diese Eisfilamente nicht im Inneren der Pflanzen oder unter der Erdoberfläche entstehen und nicht etwa durch die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren aus dem Inneren hervorgepresst werden. Bei der Bildung sitzen sie ganz lose auf der Oberfläche der Gegenstände. Unter den Böden sind Ton und Humus die für ihre Bildung geeignetsten Bodenarten.

Es sind verschiedene Versuche zur Erklärung der Eisfilamente gemacht worden. LE CONTE dachte sich (1850), dass infolge der etwa konischen Mündung der kleinen Löcher im Boden oder an den Pflanzen bei der Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren eine Kraft entstehe, die das Eisprisma hervorschiebe.

Eine andere Erklärung, der sich H. HESSELMAN angeschlossen hat, ist bereits 1860 von dem berühmten Pflanzenphysiologen J. SACHS<sup>6</sup> aufgestellt worden: Körper, die viel Wasser aufsaugen, umgeben sich mit einer dünnen Schicht von Wasser. Wenn diese Schicht gefriert, bildet sich zwischen

<sup>1</sup> Observations on a remarkable Exudation of Ice from the Stems of Vegetables, and on a singular Protrusion of Ice Columns from certain kinds of earth during frosty weather. — London, Edinburgh a. Dublin Philos. Magazine. Bd. 36, 1850.

<sup>2</sup> Ueber Eisfilamente. — Meteor. Zeitschr. Bd. 2, 1885.

<sup>3</sup> Production de filaments de glace à la surface du sol. — Ciel et Terre, Juli 1885.

<sup>4</sup> Studier öfver skogsväxt å mossar. — Skogsvårdsföreningens tidskrift 1907, S. 32.

<sup>5</sup> Über die geologische Bedeutung des Frostes. — Bull. Geol. Inst. Upsala. Bd. 12, 1914.

<sup>6</sup> Krystallbildungen bei dem Gefrieren und der Veränderung der Zellhäute bei dem Auftauen saftiger Pflanzenteile. Ber. d. mathemat.-physischen Klasse d. K. Sächs. Gesellsch. d. Wissenschaften Bd 12, 1860.

der Pflanzenwand und der Eisschicht eine neue Wasserschicht, die ihrerseits auch gefriert. In dieser Weise geht es fort; das Wasser wandert aus den Zellen der Pflanze und bildet Stengel von Eis, die der Oberfläche der Pflanze aufsitzen.

*Die Eisfilamente auf Ton und Humusböden.*

Die Theorie von SACHS wendet HESSELMAN auf die Bildung der Pipkrake der nordischen Hochmoore an. Die äusserste Oberflächenschicht ist meist einigermassen trocken und gefriert zuerst. Darunter kommt eine Wasserschicht, die die gefrorene Kruste von dem nassen Torf trennt. In dieser Wasserschicht bildet sich fast reines Eis, das in vertikaler Richtung anwächst, indem neues Wasser immerfort aus dem Torf herauswandert und dann gefriert. Dieses Eis bildet poröse vertikalstengelige Massen, die eine dünne gefrorene wasserarme Torfschicht tragen (vergl. Fig. 1). Unterhalb des porösen vertikalstengeligen Eises ist der Torf ungefroren selbst in kalten Wintern, was auf das wärmeisolierende Vermögen des lufthaltigen Eises zurückzuführen sei.

Meiner Meinung nach sind diese Theorien von SACHS und HESSELMAN der Hauptsache nach richtig. Mir scheint jedoch die Annahme einer Schicht reinen Wassers (wenn die Verfasser wirklich das gemeint haben) an der Oberfläche der Pflanzen und zwischen dem trockenen und feuchten Torfe

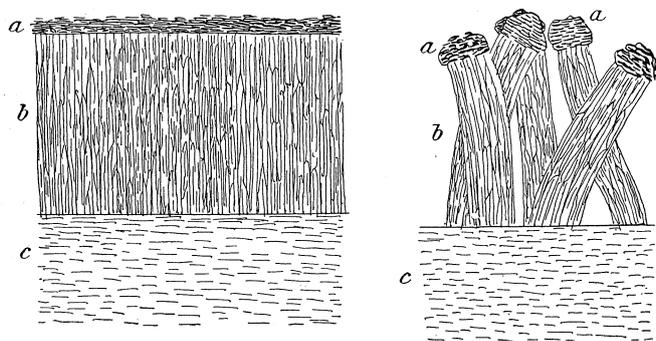


Fig. 1. Schematische Bilder von Eisfilamenten (Pipkrake): a gefrorener Torf, b poröses Eis, c nicht gefrorener Torf. Nach HESSELMAN.

nur eine Arbeitshypothese zu sein, die zu stande gekommen, ist, um die Erklärung zu ermöglichen. An und für sich ist es nicht wahrscheinlich, dass der Torf oder die Pflanzen sich mit einer solchen Schicht reinen Wassers umgeben.

Der Zellsaft der Pflanzen enthält eine Menge organischer und anorganischer Verbindungen gelöst, und es ist nicht möglich, dass die Pflanze durch die Zellenwände oder durch die Spaltöffnungen der Blätter reines Wasser ausscheiden kann; verschiedene gelöste Stoffe müssen mitgehen. Dann erklärt sich aber die Wanderung des Wassers vom Inneren der Pflanze nach den an der Pflanzenoberfläche sich ausscheidenden Eisstengeln hin durch einen infolge des Gefrierens des Wassers vermehrten osmotischen Druck.

Der Vorgang, der die Ausscheidung der Eisfilamente auf nassem Humusboden herbeiführt, ist meiner Meinung nach ähnlich, aber einfacher, insofern als das Eis durch keine Membran von der wasserspennenden Substanz getrennt ist. Der Humus ist eine Mischung verschiedener organischer Verbindungen ganz überwiegend kolloidaler Natur.<sup>1</sup> Diese Kolloide quellen in Wasser stark und bilden dabei halb feste Lösungen (Gallerten), während gleichzeitig überschüssiges Wasser schwache kolloidale Lösungen bildet, die als braune Moorwasser wegfließen. Wenn eine Torfgallerte hinreichend niedrigen Temperaturen ausgesetzt wird, kristallisiert reines Eis aus der Gallerte aus und die Gallerte wird »konzentrierter«, genau in derselben Weise, wie Eis sich aus einer Salzlösung ausscheidet und letztere dabei konzentrierter wird. R. E. LIESEGANG<sup>2</sup> hat durch Abkühlen stark wasserhaltiger Gelatine Eiskristalle darin erzeugt, die beim Verdunsten ausgezeichnete Abdrücke ihrer Gestalt hinterliessen. Wie in der Salzlösung, so tritt auch in der Gallerte eine Gefrierpunkterniedrigung auf. Wie gross diese ist,

<sup>1</sup> Vergl. S. ODÉN, Kolloidkemiska undersökningar öfver humusämnen. — Arkiv för Kemi, Mineralogi o. Geol. Bd. 4, N:r 24.

<sup>2</sup> Wo. OSTWALD, Die Welt der vernachlässigten Dimensionen, S. 91. Dresden 1915.

dürfte unbekannt sein; sehr gross ist sie jedenfalls nicht, könnte aber möglicherweise etwa einen Celsiusgrad betragen.

Für die Bildung der Eisfilamente dürfte eine obere trockene Schicht bedeutungslos sein. Die Hauptsache ist ein grosser Wassergehalt des Humus. An der Oberfläche desselben scheidet sich das Eis etwa in derselben Weise aus wie auf einer Wasserfläche. Es scheinen sich in beiden Fällen Kristalle mit senkrechten Hauptachsen auszubilden. Wie im Wasser die anwachsenden Kristalle die Mutterlauge von sich schieben, so dürften die anwachsenden Eisfilamente die Oberfläche der immer konzentrierteren Humusgallerten herabdrücken. Die Annahme, dass die Oberfläche des Torfes sich in unveränderter Höhe erhalte und die stengelige [Eisschicht in ihrer ganzen Dicke darüber *gehoben* werde, dürfte *nicht* richtig sein.

Etwa wie Torf dürften sich auch sehr feine Tone beim Gefrieren verhalten, wenn sie genügend viel Wasser enthalten. Feine Tone quellen mit Wasser auf wie die echten kolloiden Stoffe und bilden zähe, stark klebende Massen, aus denen der Frost gewiss Eis in derselben Weise aus dem Humus ausscheiden kann, d. h. in der Form von Eisfilamenten. Durch die Ausscheidung von Eis wird der Ton allmählich trockener. Wie in einer Salzlösung und in einer Gallerte muss auch im Ton eine Gefrierpunkterniedrigung eintreten. Diese soll nach WOLFGANG OSTWALD<sup>1</sup> 0,7 betragen können. Hiermit ist nicht eine eventuelle Unterkühlung gemeint, die selbstverständlich viel grössere Beträge annehmen kann.

In Zusammenhang mit der kolloidalen Beschaffenheit der Torfe und der Tone steht eine Frage von grösster praktischer Bedeutung, nämlich ihre Drainierung. Wenn der Torf eine Gallerte ist, die in Berührung mit Wasser quillt, so scheint eine Entfernung des Wassers durch Abflussgräben aussichtslos, denn von einer Gallerte etwa wie gequollener Gelatine oder gequollenem Leim tropft das Wasser nicht ab. Wenn der

<sup>1</sup> Die Welt der vernachlässigten Dimensionen, S. 60. Dresden 1915.

Torf keine homogene Gallertstruktur besitzt, sondern daneben eine gewisse Krümelung oder Porosität zeigt, so ist eine Drainierung durch Abfluss von Wasser schon möglich. Liegt aber eine homogene Gallerte vor, so dürfte Wasser hauptsächlich nur von der Oberfläche abfliessen können. Auf horizontalem oder konkavem Boden dürfte dann die Entwässerung des Torfes fast nur durch Verdunstung oder durch Ausfrieren von Eis zustande kommen. Es dürfte bekannt sein, dass die Moore die Niederschläge ausserordentlich fest halten und nur wenig Wasser abfliessen lassen. Dies scheint besonders mit den Sphagnummooren der Fall zu sein.<sup>1</sup>

#### *Eisfilamente auf gröberen Bodenarten.*

Wenn stengeliges Eis auch wirklich auf grobkörnigerem Boden entstehen kann, so muss seine Bildung eine andere sein als auf dem Humus. Der trockene Sand quillt nicht

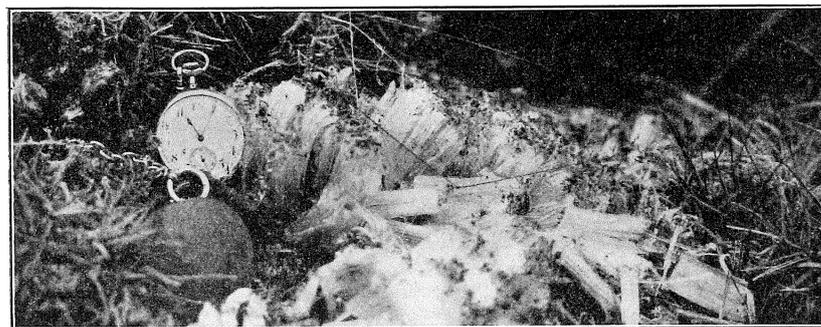


Fig. 2. Eisfilamente oder Pipkrake von Gustafs in Dalarna. Nach BERTIL HÖGBOM.

beim Feuchtwerden, und der nasse Sand kann sich deshalb beim Gefrieren auch nicht konzentrieren oder zusammenziehen, um für die Ausscheidungen von Eis Platz zu bereiten.

Eine andere Entstehungsart ist aber denkbar, die auf der Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren beruhen würde.

<sup>1</sup> Vergl. HJ. VON FEILITZEN in Svenska Mosskulturforeningens Tidskrift 1915. S. 105.

Eine solche Erklärungsweise gibt W. PRINZ<sup>1</sup> bezüglich der Bildung von Eisfilamenten in den Fugen der Pflastersteine auf einer Terrasse (des Observatoriums zu Uccle?). Er denkt sich, dass das Eis in gefrorenem Zustande aus den engen Mündungskanälen der inneren Hohlräume infolge eines beim Gefrieren entstandenen Druckes hervorgepresst wird. Möglicherweise kann ein solcher Vorgang in seltenen Fällen sich abspielen. Gewöhnlich dürfte aber beim Gefrieren von wassergefüllten Hohlräumen, die durch enge Kanäle mit der äusseren Luft in Verbindung stehen, eine sog. Frostsprengung stattfinden.

In homogenen lockeren Sandböden ist bei gleichmässigem Gefrieren der Oberfläche eine Hervorpressung von Eisfilamenten infolge der Volumvergrösserung beim Gefrieren nicht denkbar. Stattdessen muss sich die gefrorene Schicht, die sowohl Eis als Sandpartikeln enthält, ausdehnen. Wenn aber das Gefrieren nicht gleichmässig stattfindet, ist die Sache schon eher möglich. Man könnte sich denken, dass, wenn an vereinzelt Punkten Laub oder andere wärmeisolierende Gegenstände liegen, das Gefrieren daselbst erschwert wird, und dass infolge einer Druckvergrösserung beim Gefrieren des grössten, gegen die Abkühlung nicht geschützten Teiles der Erdoberfläche Wasser durch die ungefrorenen Stellen hervorgepresst werden könnte, das dann in der kalten Luft zu stengeligem Eis gefröre. Jedenfalls würde ein solcher Vorgang ein seltener Ausnahmefall sein.

Ist der Sandboden nicht gleichkörnig, sondern enthält er lehmige oder humusreiche Partien so dürften an letzteren Eisfilamente durch die im Vorhergehenden geschilderte Kristallisation entstehen können.

<sup>1</sup> I. c. Einen Abdruck dieser in Schweden nicht aufzutreibenden Abhandlung verdanke ich Herrn A. B. DOBROWOLSKI.

### Die Bildung der Schuttinseln in den lappländischen Hochgebirgen.

Die hohen Berge von Schwedisch-Lappland sind meist vom Frost derartig zersprengt, dass fester Felsen häufig kaum sichtbar ist. Die losgesprengten Stücke sind meist gross und liegen, wo die Oberfläche nur schwache Neigung zeigt, ungefähr in ihrer ursprünglichen Lage. Wo der Untergrund aus verschiedenen Gesteinen der Amphibolitformation besteht, findet man, dass die losen Blöcke der verschiedenen Gesteine auf der Gipfeloberfläche dem Untergrund entsprechende Figuren bilden.

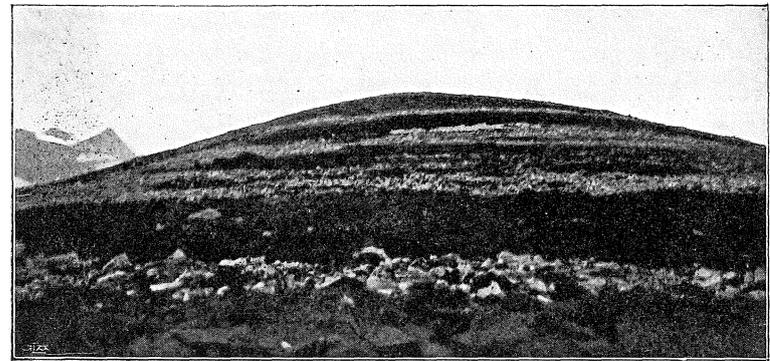


Fig. 3. Die Verwitterungsprodukte der flachen Felsenmeere der Gipfel bleiben liegen und zeigen die stratigraphische Zusammensetzung des Untergrundes. Aus dem Pärtetjåkko bei etwa 1,800 m. Verf. phot. 9. Juli 1909.

In diesen »Blockmeeren« trifft man jedoch häufig rundliche Flecke von kleine Steine enthaltendem Lehm an. Diese Schuttinseln, die einen Durchmesser von etwa 1 m zu haben pflegen, kommen meist vereinzelt vor, hie und da bilden sie kleine Kolonien von einer geringen Zahl Individuen.

Woher diese vereinzelt Schuttinseln im Blockmeere gekommen sind, ist noch ein Rätsel. Man könnte sich zwei Möglichkeiten denken:

1) Die Schuttinseln sind Reste leichter verwitternder erratischer Blöcke. Es ist möglich, dass eine solche Bildungsweise vorkommt, ich glaube jedoch nicht, dass sie die normale ist, denn in den Blockmeeren von Amphibolitgesteinen trifft man vorzugsweise kleine Amphibolitsteine in den lehmartigen Massen der Schuttinseln an.



Fig. 4. Schuttinseln auf dem Pärtetjäkko. Verf. phot. Juli 1909.

2) Der Lehm war ursprünglich gleichmässiger zwischen den grösseren Steinen der Blockmeere verbreitet, ist aber nunmehr durch einen Konzentrationsprozess vorzugsweise in den Schuttinseln gesammelt.

Die Verhältnisse, unter denen die fraglichen Bildungen in der Natur auftreten, sprechen mehr für letztere Auffassung. Es bleibt dann übrig nachzuweisen, wie eine solche Konzentration möglich sei. Bei den Konzentrationen von kleineren vereinzelt Partikeln zu grösseren Haufen spielen in der Natur molekulare Kräfte eine Hauptrolle, so z. B. bei der Bildung von Kalkknollen in Tonschiefern, bei dem Wachstum der Kristalle, bei schwebenden Tropfen, lebenden Organismen usw.

Da die Schlammteilchen nicht in Lösung gehen, können sie sich nicht wie Kristallmoleküle anhäufen, wohl aber kann im Schlamm ausgeschiedenes Eis wie ein Kristall fortwachsen und neue Eismoleküle mit sich vereinigen. Konzentrationen oder Konkretionen von Eis würden also in dieser Weise entstehen können; an und für sich können solche doch keine Konzentrationen von steinigem Schutt oder Lehm herbeiführen. Auch dürfte ein Wachstum der Tonflecke auf Grund einer Oberflächenspannung kaum möglich sein, da es sich um Tonmassen handelt, die im Querschnitt  $\frac{1}{2}$ , 1 oder mehr  $m$  betragen.

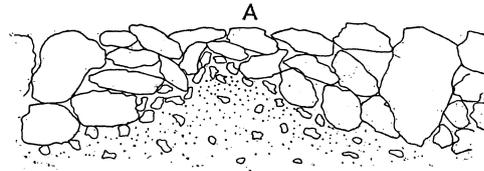


Fig. 5. Schematisches Bild von Schuttmassen im unteren Teile der Blockmeere.

Ein naheliegender Erklärungsgrund wäre in der Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren zu suchen. Man könnte sich da zuerst die Schuttinseln als durch einen Überdruck von unten hervorgepresst denken. Nehmen wir an, dass der Schutt eine kontinuierliche Schicht bilde, deren Oberfläche mit grösseren Steinen beladen ist, etwa in der Weise, wie es über grosse Areale der lappländischen Hochebenen hin und auf arktischen Tundren häufig der Fall zu sein scheint. Wenn nun die Oberfläche des Schuttes nicht der Oberfläche der Blockmassen etwa parallel läuft, sondern sich an gewissen Punkten letzteren, z. B. durch Anschwellungen wie bei A in der Fig. 5, nähert, und man beweisen könnte, dass diese Erhabenheiten in der Schuttmasse durch den beim Gefrieren entstandenen Druck anwachsen könnten, so würde die fragliche Erklärungsweise bestätigt. Aber damit die Erhabenheiten des Schuttes durch einen Überdruck von unten anwachsen sollten, müsste man voraussetzen, dass die im Anfang des Herbstes gebildete

Eisschicht in den Vertiefungen des Schuttes dicker wäre als an den Erhebungen. In diesem Falle könnte nämlich der vermehrte Druck in den tiefer liegenden Schuttmassen die Erhabenheiten vergrössern, weil sie einen geringeren Widerstand leisteten. Allein es ist nicht wahrscheinlich, dass die erste Eiskruste der Erhebungen dünner ist als diejenige der Vertiefungen, sondern vielmehr das Gegenteil.

Der Vorgang muss also ein anderer sein. Der einzig mögliche, den ich habe ergründen können, ist folgender:

Wenn die Schlammassen, die zuletzt die Schuttinseln bilden, anfänglich ein gleichmässigeres Lager hauptsächlich im unteren Teile der Blockmassen gebildet haben und die Oberfläche des Schuttes vereinzelte Erhabenheiten, etwa wie bei A in der Fig. 5, gehabt hat, so ist es wahrscheinlich, dass im Anfang jeder Frostperiode die dickste Gefrierkruste sich an diesen der Oberfläche am nächsten liegenden Erhabenheiten bildet. Diese Kruste hat eine gewölbeartige Form, und kann man nachweisen, dass die Kruste sich im Laufe des Gefrierprozesses *ausdehnt*, so hat man eine Erklärung für die fragliche Erscheinung gefunden. Da die Kruste wohl häufig luft- und wasserdicht ist, würde die Erklärungsweise darauf hinauslaufen, ein *Hinaufpumpen* des Schuttmaterials von unten anzunehmen.

#### *Das Gefrieren einer Wasserfläche.*

Bei der Abkühlung einer Wasserfläche unterhalb 0° scheiden sich Eiskristalle aus, die *keine bestimmte kristallographische Orientierung* haben. Die Vorstellung, dass die Eiskristalle schon bei anfangendem Gefrieren eine bestimmte kristallographische Orientierung hätten, und zwar in der Weise, dass die Hauptachsen zur Abkühlungsfläche senkrecht stünden, scheint mit dem tatsächlichen Verhalten im allgemeinen nicht übereinzustimmen.

Am 12. April 1909 nahm ich eine Untersuchung des in der vorhergehenden Nacht (bei der die Lufttemperatur bis auf — 7.8

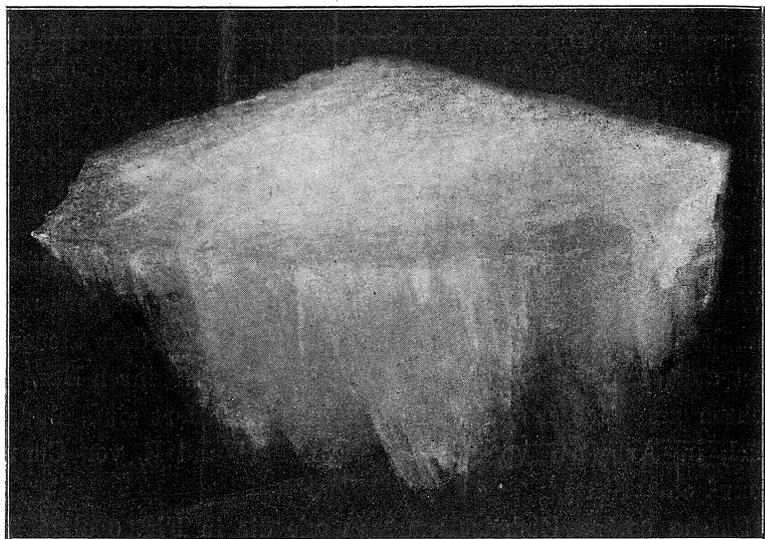
sank) auf dem durch Uppsala fliessenden Fyriså neugebildeten ganz porösen Eises vor. Ein Stück davon ist in der Fig. 6, wo die obere ebene Fläche der Wasseroberfläche entspricht, in etwa  $\frac{1}{4}$  der natürlichen Grösse wiedergegeben. Das Gerüst besteht aus tafelförmigen Kristallen, die meist beinahe senkrecht zur Wasserfläche stehen. Die optische Untersuchung der Kristalle lehrte, dass senkrecht zur Tafelfläche eine positive Achse austrat. Die Kristalle waren folglich als mit der kristallographischen Hauptachse etwa horizontal orientierte basale Tafeln entwickelt. Eine genau bestimmte kristallographische Orientierung konnte aber weder in Bezug auf die Wasserfläche noch in der Verwachsung der verschiedenen Individuen mit einander nachgewiesen werden. Die linienförmigen Abschnitte mit der Wasseroberfläche kreuzten sich unter allen möglichen Winkeln, und die Tafeln waren keineswegs genau, sondern nur annähernd senkrecht orientiert. Meine Ansicht, dass die zuerst ausgeschiedenen Eiskristalle keineswegs mit ihren Hauptachsen zur Wasseroberfläche senkrecht orientiert sind, findet auch in Arbeiten von E. VON DRYGALSKI<sup>1</sup> und E. VON CHOLNOKY<sup>2</sup> eine Stütze.

Solche poröse Eiskristallmassen wie die in Fig. 6 abgebildeten sind offenbar labile Gebilde, s. g. Kristallskelette, die durch eine sehr rasche Kristallisation aus einer unterkühlten Wassermasse entstehen. Der Vorgang dürfte folgender sein. Die Wasseroberfläche wird durch die nächtliche Ausstrahlung sowie durch Berührung mit kalter Luft abgekühlt. Bevor Kristallisation eintritt, muss eine gewisse Unterkühlung vorliegen. Wenn diese einen genügend grossen Betrag angenommen hat, tritt Kristallisation an einer grossen Zahl etwa gleich weit von einander entfernter Punkte ein, und in dem mit Eismolekülen übersättigten Wasser wachsen die Kristalle

<sup>1</sup> Grönland-Expedition der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin 1891—1893. Bd. I, S. 411. Berlin 1897.

<sup>2</sup> Das Eis des Balatonsees. — Resultate der wissenschaftl. Erforsch. d. Balatonsees, Bd. I. Teil 5, Sect. IV, S. 38. Budapest 1909.

sehr schnell aus. Da die Basis die einzige widerstandsfähige Fläche des Eises zu sein scheint, bilden sich tafelförmige Kristalle aus. Eine kristallographische Orientierung in den Kristallisationszentren kann kaum vorhanden sein, deshalb sind die Kristalltafeln nach allen möglichen Ebenen orientiert. Diejenigen, die zur Wasseroberfläche etwa parallel orientiert



Verf. phot.

Fig. 6. Gerüst von basalen, beinahe senkrecht zur Wasserfläche stehenden Eiskristallen, auf dem Fyriså in Uppsala 11.—12. April 1909 gebildet.

sind, wachsen bald mit anderen zusammen und können darum nur an Dicke zunehmen. Diejenigen, die etwa senkrecht stehen, wachsen dagegen nach unten unbehindert fort, an der Unterseite der porösen Masse ragen diese Tafeln heraus und machen den Eindruck als ob sie dominierten.

Die erste Kristallisation im gefrierenden Wasser bildet — wenigstens unter Umständen — eine Ausnahme von der alten Regel, dass die Eiskristalle mit ihren Hauptachsen zur Abkühlungsfläche senkrecht stehen. Wie diese erste unregelmässige Kristallisation in die als normal angesehene Anordnung übergeht, scheint unbekannt zu sein. Ich glaube die

Sache geht folgenderweise vor. Die Oberflächenspannungen aller Kristallflächen des Eises mit Ausnahme derjenigen der Basisfläche sind im Wasser verhältnismässig gross, deshalb bildet sich hauptsächlich die Basisfläche aus. Im Kristallskelett der Fig. 6 sind ja auch sämtliche Kristalle nach der Basis äusserst dünn tafelförmig. Ein dickes Gerüst solcher Kristalle war der für die gegebenen Bedingungen geeignetste Kristallisationstypus. Allein dieser Typus kann nicht stabil sein. Nachdem die Unterkühlung durch die Ausscheidung von Kristallen beseitigt ist, hält die Kristallisation mit der Abkühlung gleichen Schritt und schreitet hauptsächlich nur von der Oberfläche aus fort. Da alle Kristalle nach der Basis tafelförmig sind und nur diejenigen, deren Hauptachsen senkrecht zur Wasseroberfläche stehen, mit dieser zusammenfallen können, so geht die fortgesetzte Kristallisation von ihnen aus. Die dünnen, fast senkrecht stehenden Tafeln können die Abkühlung der grossen Distanz wegen nicht nennenswert leiten. Die zur Wasseroberfläche parallel orientierten Tafeln übernehmen fast die ganze fortgesetzte Kristallisation; es ist sogar möglich, dass die nach unten weit hinausragenden Tafeln allmählich verzehrt werden, weil ihre schmalen Randflächen weniger widerstandsfähig sind als die Basisflächen der horizontal orientierten Tafeln. Letztere dagegen sind äusserst günstig begrenzt, denn an ihnen kommen die Pyramiden- und Prismenflächen überhaupt kaum vor. An der ebenen Unterseite der Eisdecke eines Sees dürfte, nachdem die zuerst ausgeschiedenen, nicht orientierten Kristalle in orientiertem Eis eingeschlossen sind, fast nur die Basisfläche vorkommen. Die Begrenzung ist dann die stabilstmögliche.

Bei der ersten plötzlichen Ausbildung des Eiskristallskelettes dürften ausnahmsweise Partien flüssigen Wassers zwischen den Kristalltafeln eingeschlossen werden; diese vermuteten Räume dürften wohl bei dem fortgesetzten Wachstum bald wieder durch den in ihnen entstandenen Druck und davon

herrührendes Zerbersten der dünnen Eistafeln eröffnet werden. Hat einmal die regelmässig nach unten fortschreitende Kristallisation angefangen, so können keine Wasserpartien mehr eingeschlossen werden. Eine horizontale Druckspannung infolge der Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren kann also während des normalen Wachstums der Eisdecke nicht entstehen und ist auch nicht bekannt.

Dagegen kennt man durch Untersuchungen von S. K. GILBERT,<sup>1)</sup> J. P. GUSTAFSSON<sup>2)</sup> u. a., dass die Eisdecke der Seen durch Kontraktion bei sehr niedrigen Temperaturen Kontraktionsspalten bekommen kann, die, wenn sie mit Wasser gefüllt werden, das erstarrt, bei einer nachfolgenden Temperaturerhöhung eine Ausdehnung der Eisdecke von möglicherweise 0.1 % hervorrufen können.

#### *Das Gefrieren inhomogener Schuttmassen.*

Die Bildung der Eisfilamente zu Beginn des Gefrierens von Humus und Ton und vielleicht auch von anderen Bodenarten ist bereits erwähnt worden. Ein wirkliches Gefrieren der nassen, unter den Eisfilamenten befindlichen Torfmassen wird von einigen Verfassern in Frage gezogen. Dass nasse Tone und Sande wirklich zu festen Massen sowohl im mittelschwedischen Klima als auch in demjenigen der lappländischen Hochgebirge gefrieren, ist eine bekannte Tatsache. Im Sarekgebirge ist der Sandboden bei 500 m ü. d. M. Ende des Winters bis zu einer Tiefe von etwa 1½ m gefroren, während die in derselben Höhe liegenden Moore nur eine ziemlich dünne gefrorene Decke tragen.

Die Kristallisation des Eises in Schuttmassen dürfte wohl kaum näher bekannt sein. Man sagt, dass das Eis sich ganz allgemein in Kristallindividuen ausscheidet, deren Hauptachsen senkrecht zur Abkühlungsfläche stehen. Ich glaube,

<sup>1)</sup> Lake Bonneville. — U. S. Geol. Surv. Monographs I. 1890. S. 71.

<sup>2)</sup> Om stranden vid några småländska sjöar. — Geol. Fören. Förh. Bd 26, 1904, S. 145.

dass dieses Gesetz schlecht formuliert ist. Es sollte folgenderweise lauten: Das Eis kristallisiert meistens so, dass die Basisfläche die grösstmögliche Area gegen die Mutterlauge einnimmt. Wahrscheinlich haben die Eiskörner im gefrorenen Schutt keine bestimmte Orientierung, denn die Mineralpartikeln und Luftblasen heben den Zusammenhang zwischen den wassergefüllten Poren stellenweise fast vollständig auf. In den tonigen Partien liegt der Gefrierpunkt niedriger und es tritt da Unterkühlung leichter auf als in den grobkörnigeren. Das Wärmeleitungsvermögen wechselt von Punkt zu Punkt. Vieles trägt also dazu bei, ein sehr unregelmässiges Wachstum der gefrorenen Kruste von oben nach unten herbeizuführen. In den meisten Poren dürfte eine selbständige Kristallisation des Wassers stattfinden. Das Wichtigste ist aber, dass das Wasser in Poren eingeschlossen ist und deshalb *beim Gefrieren die kleinen Zwischenräume zwischen den Mineralpartikeln erweitern muss*. Diese innere Ausdehnung der Schlammmasse muss sehr unregelmässig sein und Verschiebungen und Sprünge verursachen. Der inneren allseitigen Ausdehnung der Massen wegen muss in der gefrierenden Kruste eine Tendenz vorliegen, sich nach allen Richtungen auszudehnen und nicht nur in der vertikalen.

Wichtig für die Frage betreffs der Ausdehnung der gefrierenden Erdschichten ist ein von S. JOHANSSON<sup>1)</sup> ausgeführtes Experiment: Eine Bodenprobe von der Feuchtigkeit 31.6 % wurde in eine Holzrinne eingestampft, die mit dem oberen Ende in einen gut isolierten Zinkkasten hineingesteckt wurde, in welchem die Luft mittelst einer den Kasten umgebenden Kältemischung abgekühlt gehalten wurde. Die Temperatur in dem Kasten war — 5°. Die kalte Luft in dem Zinkkasten kam mit der oberen Fläche der Erdsäule in Berührung, die auf analoge Weise wie in der Natur gefror. Nach eintägigem Frieren wurde die Feuchtigkeit in ver-

<sup>1)</sup> Die Festigkeit der Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt usw. — Sveriges Geol. Unders. Årsbok 7, 1913, S. 94.

schiedenen Niveaus der Erdsäule bestimmt. Es wurden, bei Versuch mit einer Bodenprobe, deren Anfangsfeuchtigkeit 31.6 Prozent betrug, folgende Wassergehalte in verschiedenen Niveaus nach eintägigem Frieren erhalten:»

0—3	cm gefroren . . . . .	46.0	Prozent
3—6	» . . . . .	28.3	»
10—13	» . . . . .	28.9	»
20—23	» . . . . .	29.6	»

Der Verfasser meint, dass Wasser beim Gefrieren durch seine Volumenzunahme zerteilend auf die Bodenpartikeln einwirke. Die Fähigkeit des Bodens, Wasser einzuschliessen, wird dadurch gesteigert und Wasser von den darunterliegenden Schichten je nach dem Wasserleitungsvermögen der Schichten aufgesaugt. Über die Ausdehnung der Bodenprobe liegen keine Messungen vor, aber es ist selbstverständlich, dass sie mindestens so gross gewesen ist wie diejenige des eingeschlossenen Wassers.

Die inhomogene Beschaffenheit des Schuttes und zwar besonders das von Punkt zu Punkt wechselnde Wärmeleitungsvermögen muss mit sich bringen, dass sich der Frost sehr unregelmässig verbreitet. In grobkörnigerem Material und in der Nähe von wärmeleitenden Steinen muss sich der Gefrierprozess rascher entwickeln, in Lehmflecken und in lufthaltigem Material dagegen muss derselbe verlangsamt werden. Es ist dann wohl nicht zu vermeiden, dass ungefrorene Wasserpforten hier und da mit eingeschlossen werden. Später wenn diese ebenfalls gefrieren, dehnen sie sich aus und zersprengen die umgebenden Schichten. Infolgedessen muss eine fernere Ausdehnung der gefrorenen Kruste auftreten. Die Sprünge können später mit Wasser gefüllt werden und zersprengen dann beim Gefrieren noch weitere Partien. Erst allmählich und nachdem die gefrorenen Kruste genügende Dicke angenommen hat, gewinnt sie eine beständige äussere Form. Ob diese für den ganzen Winter stetig ist, dürfte jedoch unsicher sein, da

durch grössere Temperaturschwankungen eventuell Kontraktionsrisse entstehen können, die, wenn mit Wasser gefüllt, beim Wiedergefrieren neue Verschiebungen herbeiführen können. Auch durch Tauungsprozesse und Wiedergefrieren sind fernere Erweiterungen der gefrorenen Kruste denkbar.

Die Möglichkeiten der Erdschichten, sich der Oberfläche parallel auszudehnen, sind sehr verschieden. Wenn eine horizontale Ebene durch einen Abhang abgeschnitten wird, kann sich die gefrorene Kruste durch Hinausschieben über die steile Wand ausdehnen. Stossen die Ränder gegen widerstandsfähiges Gebiet an, so kann eine Ausdehnung nur durch Bildung »tektonischer« Störungen (Gewölbe und Muldenbildung, Überschiebungen usw.) zu stande kommen. Ein durch Gefrieren entstandenes Gewölbe dürfte sich, wenn der Boden nicht feucht genug ist, von seiner Unterlage trennen können. B. HÖGBOM<sup>1</sup> berichtet von solchen Erscheinungen. Er hat in den ersten Frosttagen eines Herbstes »zugestürzte, leere Höhlungen« gefunden, »die aber nicht durch Auftauen, sondern durch Frieren der oberen Bodenschichten entstanden waren. Man bekam den Eindruck, dass die gefrorene Schicht durch ihre Volumenzunahme blasenartig aufgetrieben war«. Er sagt ferner: »Es kommt übrigens im Vorwinter recht allgemein vor, dass der Boden, besonders die Wege, einen hohlen Laut gibt, der auf derartige Aufblähungen deutet.«

Ich meine nun, dass die Schuttinseln der Blockmeere solche Gewölbebildungen sind. Wenn der Schutt vor dem Gefrieren durchnässt ist, dürfte das Gewölbe wasser- und luftdicht werden und kann dann den darunterliegenden teigartigen Schutt heraufpumpen. Unter konkaven Flächen der Schuttmassen entsteht infolge der Ausdehnung ein entsprechender Druck. *Viele Umstände tragen also dazu bei, den nassen Schlamm der untersten Teile der Blockmeere in ursprüngliche Erhabenheiten zu konzentrieren, die dann auf*

<sup>1</sup> Über die geologische Bedeutung des Frostes. — Bull. Geol. Inst. Upsala. Bd. 12, 1914, S. 305 u. 306.

*Kosten der niedriger liegenden Schlamm Massen anwachsen und sich einen Weg zur Oberfläche bahnen, indem sie überliegende Steinblöcke zur Seite schieben.* Beim Auftauen im Sommer müssen die Schlamm Massen zwar wieder schrumpfen, die Massenverschiebung, die durch den Gefrierprozess stattgefunden hat, dürfte aber wenigstens in der Hauptsache bestehen bleiben.

Persönlich kenne ich die fraglichen Gebilde nur durch Beobachtungen im Sommer, wo sie aufgetaut waren. Nach dem, was W. ULE in seiner Studie über »Glazialen Karree- und Polygonboden«<sup>1</sup> berichtet, scheint aber im Winter eine Aufwölbung der Schuttinseln über das Niveau der umliegenden Steine und dann im Sommer eine Senkung der Oberfläche etwa bis auf dieses Niveau stattzufinden.

#### Wanderung der Steine in den Schuttinseln und anderen Schlamm Massen beim Gefrieren und Auftauen.

Die Schuttinseln der Blockmeere in den lappländischen Hochgebirgen treten — meiner Erfahrung nach — vorzugsweise vereinzelt auf. Würden sie so zahlreich vorkommen, dass sie unmittelbar an einander angrenzen, so hätten wir es mit einer Erscheinung zu tun, die Polygonboden nach B. HÖGBOM<sup>2</sup> oder Steinnetze (nach MEINARDUS)<sup>3</sup> genannt wird. Diese Ausbildungsform kommt wohl auch in Lappland vor, scheint aber auf den fast vegetationslosen Tundren der rein arktischen Gegenden, wie Spitzbergen, Sibirien u. s. w., häufiger zu sein. Dort wurden sie schon von SCORRESBY und später von der schwedischen Polarexpedition 1868 auf Beeren Eiland beobachtet<sup>4</sup>. Es ist verschiedenen Auto-

<sup>1</sup> Zeitschr. d. Gesellsch. f. Erdkunde zu Berlin. 1911, S. 259.

<sup>2</sup> I. c. Bull. Geol. Inst. Upsala. Bd 12, S. 308.

<sup>3</sup> Beobachtungen über Detritussortierung und Struktur Boden auf Spitzbergen. — Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin. 1912. S. 257.

<sup>4</sup> TH. M. FRIES u. C. NYSTRÖM, Svenska Polarexpeditionen år 1868. S. 30. Stockholm 1869. Vergl. auch TH. M. FRIES, Några ord om rutmarken (Polygonboden) på Spetsbergen och Beeren Eiland. — Geol. Fören. Förh. Bd 24, 1902, S. 370.

ren aufgefallen, dass Steine und Lehm offenbar anfänglich mit einander mehr gemischt gewesen sind, und dass später eine Sortierung, wodurch die Lehmflecke beinahe steinfrei geworden, stattgefunden hat. Bis jetzt hat man umsonst versucht, eine annehmbare Theorie für diese Sonderung der Steine aus dem Lehm zu ersinnen. Nach MEINARDUS<sup>1</sup> sind nicht weniger als 18 verschiedene Hypothesen aufgestellt, »d. h. beinahe ebensoviele Meinungen, wie Beobachter existieren«. Am meisten Beifall scheint ein Erklärungsversuch von B. HÖGBOM<sup>2</sup> gefunden zu haben: »Wenn der Erdboden ursprünglich aus einer Mischung von feineren und gröberen Bestandteilen besteht, so dürfte diese immer ein wenig ungleichmässig sein, so dass es gewisse Flecke gibt, wo das feinere Material reichlicher ist. Dank der Kapillarität nehmen dann diese Stellen mehr Wasser auf als ihre Umgebung. Bei der Eisbildung wird dann das Material von hier aus centrifugal verschoben. Wenn nachher Schmelzung und damit folgende Volumenverminderung eintritt, wird das feinere Material von der Adhäsion mitgezogen, während die Steine peripherisch zurückbleiben. Wenn hinreichend oft wiederholt, muss eine merkbare Sortierung resultieren. Hierdurch werden auch die Bedingungen für die Arbeitsintensität immer zunehmen, indem der Ausgangspunkt für die Volumenveränderungen mehr fixiert wird und dabei auch die Wasserkapazität der zentralen Partien vermehrt wird.«

Eine wirkliche Erklärung der Wanderung des gröberen Materials innerhalb des feineren gibt diese Theorie jedoch nicht, denn es bleibt nach derselben unbegreiflich, warum das gröbere Material, das zwar bei der Ausdehnung beim Gefrieren zentrifugal verschoben wird, nicht bei der Kontraktion beim Schmelzen die zentripetale Bewegung des feineren Materials mitmacht und zum Ausgangspunkt zurückkehrt.

<sup>1</sup> Beobachtungen über Detritussortierung und Struktur Boden auf Spitzbergen. — Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin. 1912, S. 258.

<sup>2</sup> I. c. Bull. Geol. Inst. Upsala. Bd 9, 1910, S. 53.

» » » » » » 12, 1914, S. 315.

HÖGBOM hat übrigens selber seine Theorie nicht als eine definitive, sondern nur als ein Gedankenexperiment bezeichnet.

»Dass grössere Gegenstände, wie Steine und Knochen, durch Auffrieren aus den tieferliegenden Erd- und Tonmassen an die Oberfläche heraufkommen können«, ist übrigens — nach HÖGBOM — eine bekannte Tatsache, was ich bestätigen kann. Davon hat man auch in den bewohnten Teilen des nördlichen Schwedens reichliche Erfahrung. SAPPER sagt aber darüber: »Den Mechanismus dieser Erscheinung zu erklären, sind wir zurzeit nicht in der Lage.«<sup>1</sup> Nur so viel scheint allgemein angenommen zu sein, dass das wirksame Agens der Frost ist.

In dem Kapitel über die »Eisfilamente« habe ich die von mehreren gemachte Beobachtung hervorgehoben, dass das stengelige Eis, das auf feuchtem Humus und Ton hervorschießt, mitunter trockene Torfschichten, Laub, Steine usw. trägt. Eine Hebung von Steinen über die Oberfläche des Tones wäre wohl nach diesem Vorgang auch denkbar<sup>2</sup>, aber nach Schmelzen der Eisprismen würden die Steine wohl etwa an derselben Stelle niederfallen, wo sie früher lagen. Eine Wanderung der Steine *durch* den Schlamm scheint diese Auffassung jedenfalls nicht erklären zu können.

Eine annehmbare Erklärung findet man aber, wenn man bedenkt, welche Bewegungen gefrierende und schmelzende Schlammmassen einerseits und eingeschlossene feste Gegenstände andererseits ausführen.

Es genügt dabei aber nicht, beim Gefrieren eine gleichmässige Ausdehnung der Schlammmassen und beim Schmelzen eine ebenso gleichmässige Schrumpfung anzunehmen, denn alle Wärmeveränderungen des Schlammes kommen von aussen und pflanzen sich nach innen fort.<sup>3</sup> Beim Gefrieren bildet sich

<sup>1</sup> Erdfiessen und Strukturboden in polaren und subpolaren Gebieten. — Internationale Mitteilungen für Bodenkunde 1914.

<sup>2</sup> Eine solche Idee scheinen R. S. TARR und A. PENCK gehabt zu haben. Vergl. Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin 1912. S. 245.

<sup>3</sup> Die hier dargestellte Theorie wurde schon in der Sitzung des Geol. Vereins am 3. Dez. 1914 vorgetragen.

zuerst eine feste *gefrorene Schale*, die sich erweitert, indem sie nach innen an Dicke zunimmt. Beim Tauen bildet sich, wenn das Innere noch gefroren ist, eine *geschmolzene Schale*, die nach innen weiterwächst. Die Ausdehnung und Zusammenziehung geht deshalb keineswegs gleichmässig von statten, sondern pflanzt sich von aussen nach innen fort. Nun ist es aber klar, dass eingeschlossene Steine, die eine beträchtliche Ausdehnung haben, eine etwas andere Bewegung als die umgebenden Schlammmassen ausführen müssen, denn beim Gefrieren setzt sich ihr distales Ende zuerst in der gefrorenen Schale fest und beim Schmelzen kann das innere Ende im Eiskern noch festsitzen, wenn das äussere schon im geschmol-

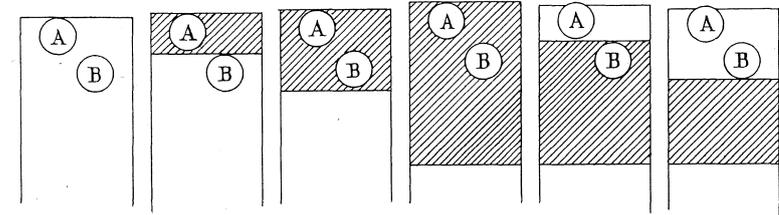


Fig. 7. Fig. 8. Fig. 9. Fig. 10. Fig. 11. Fig. 12.  
Schematische Darstellung der Bewegung von durchnässten Schlammmassen und eingeschlossenen Steinen (A u. B) beim Gefrieren (schraffiert) und Auftauen.

zenen Material steckt. Die Bewegungen des Steines stimmen also nicht mit denjenigen der Schlammmassen überein, die etwa um die Mitte des Steines liegen, sondern beim Gefrieren macht der Stein die Bewegung der Schlammmassen am äusseren Ende des Steines und beim Schmelzen die Bewegung der Schlammmassen am inneren Ende desselben mit. Der Stein macht also beim Gefrieren eine zentrifugale Bewegung, die grösser ist als die zentripetale Bewegung beim Schmelzen. Der bei jedem vollständigen Zyklus entstehende Bewegungsrest verursacht eine dauernde zentrifugale Verschiebung des Steines.

Der Vorgang wird leichter verständlich durch die Fig. 7—12, die vertikale Profile von Schlammmassen darstellen,

worin zwei runde Steine eingeschlossen liegen, von denen der eine die Oberfläche tangiert. Die gefrorenen Teile sind schraffiert. In Fig. 7 ist die Masse ungefroren gedacht. Wenn die Oberfläche gefriert, bleibt der Stein *A* in der Kruste stecken, folgt deren Bewegung und wird also gehoben (Fig. 8), indem sich die Schlammmassen beim Gefrieren ausdehnen. Der Abstand zwischen *A* und *B* wird dabei anfänglich vergrössert, bis auch *B* in der Kruste festsitzt. Von diesem Augenblick an ist der Abstand konstant und beide werden beim Fortschreiten des Gefrierprozesses gleichviel gehoben (Fig. 9 u. 10). Wenn nun Tauwetter eintritt, taut die Oberfläche wieder auf, anfänglich sitzen die Steine noch in den gefrorenen Massen fest. Wenn sie noch festsitzen, können sie nicht an der zusammenziehenden Bewegung der Schlammmassen teilnehmen. Solange *A* festsitzt, bleibt er in derselben Höhenlage wie in Fig. 10, und wenn er anfänglich eben die Oberfläche berührte, muss er sich nunmehr um eine Strecke über dieselbe erheben, die der Zusammenziehung der Schlammmassen von derselben Höhe wie *A* entspricht (Fig. 11). Im Verhältnis zur Oberfläche behält nun *A* diese Lage, folgt aber sonst der sinkenden Bewegung der Schlammmassen bei fortgesetztem Tauen. Der tieferliegende Stein *B* sitzt anfänglich fest, wenn aber *A* sich senkt, so wird der zwischen den beiden Steinen durch den Gefrierprozess vergrösserte Abstand wieder kleiner und geht allmählich wieder auf den ursprünglichen zurück (Fig. 12). Im Endzustand werden beim Tauen die ursprünglichen Abstände zwischen den Steinen wiederhergestellt, aber sämtliche Steine haben sich um eine Strecke gehoben, die von der »effektiven Höhe« der Steine und der Ausdehnung, bezw. Zusammenziehung, der Schlammmassen beim Gefrieren, bezw. Tauen, abhängt.

Folgendes Rechenbeispiel mag dazu dienen, eine Vorstellung von der Effektivität des Vorganges zu geben.

Die »kubische« Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren ist etwa 0.1, und die »lineare« ist demnach etwa 0.03. Die Grösse der Ausdehnung von nassen Schlammmassen ist unbekannt,

dürfte aber entstehender Sprünge wegen und dergl. (vergl. S. 601) nicht viel geringer sein als diejenige des reinen Wassers. Eine Schlammschicht von 10 *cm* würde sich dann um 3 *mm* ausdehnen. Bei einmaligem Gefrieren und Tauen würde ein Stein von 10 *cm* »effektiver Höhe«<sup>1</sup> einer bleibenden Hebung von 3 *mm* unterworfen sein. — Man findet, dass bei der angenommenen Ausdehnung des Schlammes die Hebung des Steines stets = die effektive Höhe mal 0.03. Ragt ein Teil des Steines aus dem Schlamm heraus, so ist die effektive Höhe desselben = derjenigen des in Schlamm eingeschlossenen Teiles. Grosse Steine wandern also schneller als kleinere. Die Geschwindigkeit ist im allgemeinen den linearen Dimensionen proportional; in der Oberfläche der Schlammmassen nimmt die Geschwindigkeit für jeden Gefrierzyklus ab, und die Steine werden daselbst konzentriert.

In der Natur spielt sich der Vorgang jedoch nicht so einfach ab wie oben geschildert. Besonders wirkt der Umstand mit, dass Steine die Wärme besser leiten als gefrierende oder auftauende wasserhaltige Schlammmassen. Dies macht, dass sich beim Abkühlen ein Stein mit einer Rinde gefrorenen Materials umgibt, was aber wenig Einfluss auf das Resultat haben dürfte. Beim Schmelzen ist jedoch der Unterschied grösser. Die Steine können sich dann mit Höfen von getautem Schlamm umgeben und bleiben deshalb nicht so lange im Eiskeime festgehalten, wie wenn sie in gleichem Grade Wärme aufspeichern könnten wie der gefrorene Schlamm. Die Bildung der Schmelzhöfe kann jedoch die Hebung der Steine nicht vollkommen beseitigen, dürfte sie aber beträchtlich geringer machen als im vorigen, theoretischen Fall.

Da die Wärmeleitung und spezifische Wärme der im Schlamm eingeschlossenen Gegenstände in der Weise einzuwirken scheinen, dass, je grösser erstere und je kleiner letztere ist, desto

<sup>1</sup> Mit effektiver Höhe meine ich die Dimension des im Schlamm eingeschlossenen Steines, auf die Fortpflanzungsrichtung des Gefrierens und Auftaus projiziert.

langsamer die Gegenstände hinausgefroren werden, so wäre zu erwarten, dass Holzstücke schneller, Metallstücke langsamer als Steine aus dem Schlamm ausfröhen.

Obgleich die oben angeführten und noch andere hier nicht berücksichtigte Umstände die Erscheinung beträchtlich modifizieren, kann dies doch nicht die generelle Gültigkeit der hier geschilderten Auffassung aufheben.

Die fragliche Einwirkung des Frostes dürfte sich in subpolaren Gebieten bis zu der Tiefe, bis zu welcher der Boden im Winter gefriert, und in polaren Gebieten bis zu der Tiefe, in der die Erde im Sommer auftaut, geltend machen. In Wassijaure bei  $68^{\circ} 25'$  n. Br. und 500 m ü. d. M. geht der Winterfrost nur bis etwa  $1\frac{1}{2}$  m unterhalb der Oberfläche. Andererseits dürfte die aufgetaute Schicht auf Spitzbergen kaum mehr als  $\frac{1}{2}$  m betragen. Es dürfte sich bei den fraglichen Wanderungen der Steine selten um längere Wegstrecken als 1 m handeln.

Auf Falkland-islands sind riesige Stone-rivers von CHARLES DARWIN, SIR WYWILLE THOMSON, J. G. ANDERSSON<sup>1</sup> u. a. beschrieben worden. Diese Ströme haben eine Breite von etwa 100—1500 m, sie müssen wohl deshalb auch ziemlich mächtig sein, und Frostwirkungen können wohl in diesem Falle für die Konzentration der Steine auf die Oberfläche keine dominierende, sondern nur eine beitragende Rolle gespielt haben. Die Steine scheinen auch mitunter allzu gross gewesen zu sein, um durch gefrierende Schlammmassen gehoben werden zu können. Man darf also die Bedeutung des Auffrierungsprozesses nicht übertreiben.

#### Herausmodellieren der Steinnetze oder des Polygonbodens.

Die vereinzelt Schuttinseln der lappländischen Hochgebirge treten nur selten einander so nahe, dass sie an ein-

<sup>1</sup> Solifluction, a component of subaërial denudation. — Journ. of Geology. Bd. 14, 1906, S. 98.

ander angrenzen. Tun sie das, so entstehen Steinnetzwerke von ungefähr dem Aussehen, wie es O. NORDENSKJÖLD,<sup>1)</sup> B. HÖGBOM, ULE, MIETHE, PENCK, MEINARDUS, SAPPER, BERGSTRÖM<sup>2)</sup> und mehrere andere geschildert haben.

Die Schuttinseln haben aber selber eine Struktur, die als Polygone zweiter Ordnung bezeichnet werden könnte. Sie sind nämlich häufig in regelmässige 5- bis 6-eckige Felder geteilt die ihrerseits von kleineren Steinen begrenzt sind, während



Fig. 13. Schuttinsel mit Polygonteilung zweiter Ordnung. Pärtetjälkä (1850 m), Schwed. Lappland. Verf. phot. Ende Juli 1911.

die Mitte der Felder beinahe steinfrei ist. Ähnliche Bildungen zweiter Ordnung wurden auch von TH. M. FRIES schon im Jahre 1868 auf Beeren Eiland beobachtet.<sup>3)</sup> Die Grenzlinien zweiter Ordnung dürften wohl infolge eines der untenstehenden Vorgänge entstanden sein:

1) Die Steinstreifen, welche die Grenzlinien bilden, waren schon in der ursprünglichen Schlammmasse, aus der die Schutt-

<sup>1)</sup> Polarvärlden och dess grannländer, S. 75. Stockholm 1907.

<sup>2)</sup> En märklig form af rutmärk från barrskogsregionen i Lappland. — Geol. Fören. Förh. Bd. 34, 1912, S. 335.

<sup>3)</sup> l. c.

insel herkam, angelegt. In der neu entstandenen Schuttinsel war am Platze dieser Streifen ein grösseres Steinreichtum als sonst auf der Schuttoberfläche. Wenn zwischen den Steinen leere Räume waren, haben diese als Ausgangsflächen für die Abkühlung wirksam sein können, und da die *Richtung der Abkühlungsfläche* belanglos ist, sind im Schlamm eingeschlossene Steine allmählich nach derselben gewandert und haben sich dort angehäuft.



Fig. 14. Schuttinsel mit Polygoneilung zweiter Ordnung. Pärtetjälkä (1850 m), Schwed. Lappland. Verf. phot. Mitte Juli 1914.

2) Die neugebildete Erdinsel wurde beim Trocknen von Kontraktionsrissen durchzogen, die bekanntlich typisch  $120^\circ$  mit einander bilden. Beim Gefrieren hat die Temperatur-senkung nicht nur von der horizontalen Oberfläche, sondern auch von den vertikalen Wänden der klaffenden Kontraktions-spalten angefangen und sich in das Innere der Schuttmassen verbreitet. Deshalb hat eine Wanderung von Steinen nicht nur nach der Oberfläche, sondern auch nach den Spaltenwänden hin stattgefunden.

Bei der Bildung der grösseren Polygone erster Ordnung dürfte wohl der Vorgang 1 allein wirksam gewesen sein. In

den Richtungen von den Zentren der Erdflecke sind die Steine nach allen Seiten allmählich in oben geschilderter Weise ausgewandert. Die häufig ziemlich gleiche Grösse der Polygone muss dann auf einigermassen gleichmässigen Abständen zwischen den ursprünglichen Anlagen sowie auf Gleichartigkeit des Materials beruhen.

Sind dabei die Abstände zwischen den benachbarten Erdflecken einigermassen gross, so haben sich — je nach der

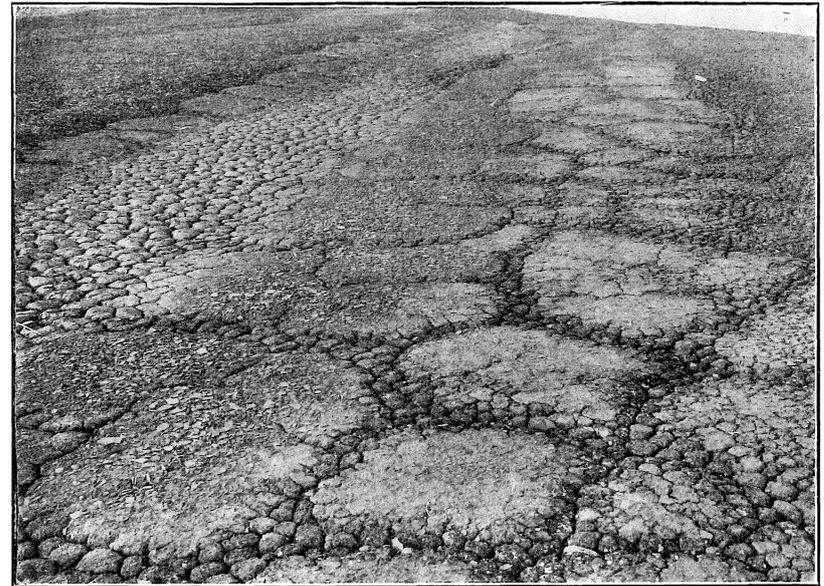


Fig. 15. Polygonboden hinter einem Strandwall an der Braganzabucht auf Spitzbergen. Nach BERTIL HÖGBOM.

Quantität der ausgeschiedenen Steine — entweder Schuttinseln oder s. g. Steinringe gebildet.

Steinnetze (Fig. 15) setzen so nahe an einander liegende Erdflecke voraus, dass ihre Wirkungsgebiete aneinander grenzen. Je nach der mehr oder weniger regelmässigen Lage der verschiedenen Polygonzentren zu einander können 6-, 5- oder 4-eckige oder aber ganz unregelmässige Grenzwälle entstehen.

### Pegellatten auf feuchtem und gefrierendem Boden.

Die Fixpunkte für das Nivellement sind im allgemeinen in festem Gestein oder in sogenannten erdfesten Steinen angebrachte Marken. Einfachere Pegel zur Beobachtung der Wasserstandsänderungen bestehen häufig aus emaillierten Eisenblechlatten, die auf hölzernen im Seeboden eingetriebenen Holzpfählen befestigt sind.

Bei meinem Vortrag über »die Wanderung der im Schlamm eingeschlossenen Steine«<sup>1</sup> lenkte Dr. A. WALLÉN, Vorstand des neuerrichteten hydrographischen Bureaus, die Aufmerksamkeit darauf, dass man, wenn obenangeführte Theorie richtig ist, die Unveränderlichkeit solcher Marken beargwöhnen könnte. Diese Bemerkung veranlasste mich zu einer Antwort, die ich hier in erweiterter Form wiedergeben will.

Die Bewegung grosser erdfester Steine dürfte im allgemeinen im mittleren Schweden sehr gering sein, wenn die Steine nicht auf sehr feuchtem Boden liegen, und als Fixpunkte dürfte man wohl meist solche vermeiden. Der einigermassen trockene Boden dehnt sich wahrscheinlich beim Gefrieren nicht sehr stark aus, weil sich die vorhandenen Wasserpartikeln in den Zwischenräumen zwischen den Mineralpartikeln ausdehnen können. Wenn die Steine sehr gross sind und tief unterhalb der im Winter gefrorenen Schicht hinabreichen, kann wahrscheinlich diese sich ausdehnen, ohne die Steine zu heben. Ist der Boden nass und liegen die Steine auf dem Boden, so ist offenbar Gefahr vorhanden, dass die Steine die Bewegungen des Bodens mitmachen müssen, und dass diese beträchtlich sind. Im mittleren Schweden dürfte der Frost mitunter bis zu 1 m Tiefe hinabdringen können. Bei nassem Boden und dieser Mächtigkeit der gefrorenen Schicht kann man eine Hebung von mehreren *cm* erwarten. Beim Tauen

<sup>1</sup> In der Sitzung des Geol. Vereins am 3. Dez. 1914.

des Bodens geht aber die Oberfläche wohl ziemlich genau in die ursprüngliche Lage zurück.

Die Pfähle verhalten sich wahrscheinlich anders, weil sie verhältnismässig leichter sind als die Steine. Es ist aus dem nördlichen Schweden bekannt, dass Zaunpfähle aus dem Boden allmählich herausfrieren. Dasselbe dürfte gewiss auch bei Pfählen, die in die feuchten Ufer lappländischer Seen hineingetrieben sind, der Fall sein, wo der Frost bis zu etwa  $1\frac{1}{2}$  m Tiefe eindringt. Beim Tauen geht aber ein solcher Pfahl — nach obiger Darstellung (Seite 607) — keineswegs auf das ursprüngliche Niveau zurück, sondern dürfte jeden Winter um mehrere *cm* gehoben werden.

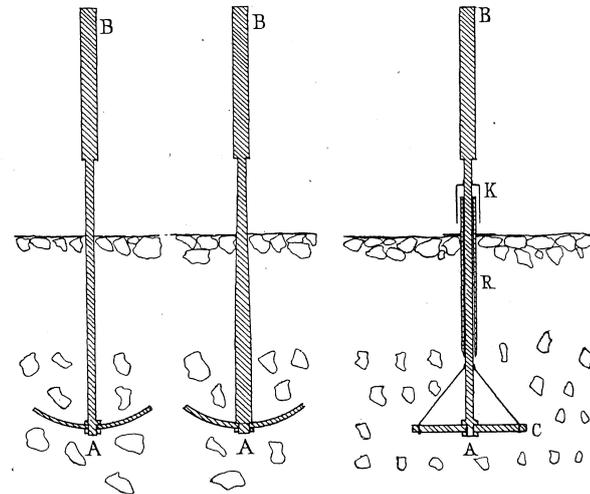


Fig. 16. Fig. 17. Fig. 18.  
Vorschläge zu Verankerung der Pfähle für Pegellatten  
auf feuchtem und gefrierendem Boden.

Man könnte sich aber möglicherweise Vorrichtungen denken, die diese Übelstände beseitigten. Eine solche wäre eine Stange, deren unteres Ende mit einer kräftigen Verankerungsschale, wie A in Fig. 16, versehen ist. Wenn diese Schale unterhalb der Tiefe, bis zu der der Frost hineindringt, vergraben ist, und die Belastung der Schale einen grösseren Widerstand

leistet, als die Friktion zwischen der Stange und der gefrorenen Schicht beträgt, so dürfte die Schale ihre Lage beibehalten. Wenn man diese Friktion herabsetzen kann, dürfte die Gefahr, dass die Schale beim Gefrieren der obersten Schicht gehoben würde, noch vermindert werden. Eine Herabsetzung der Friktion dürfte dadurch herbeigeführt werden, dass man der Stange eine konische Form gibt, wie in Fig. 17, oder dass man die zylindrische Stange mit einer gut geschmierten Röhre, wie R in Fig. 18, umgibt. Der obere Teil der Röhre muss durch eine auf der Stange AB befestigte Kappe K geschützt werden. Da die Röhre R durch die Gefrier- und Schmelzprozesse allmählich sich erheben dürfte, muss sie wahrscheinlich wiederholt heruntergedrückt werden. Letzere Konstruktion dürfte an Ufern, wo der Pegel von Wasser überspült werden kann, nicht verwendbar sein.

Die Vergrabung der Verankerungsschale muss sorgfältig gemacht und die darüber geworfene Erde gut gepackt werden oder man muss die nötige Zeit abwarten, bis die Erdschichten sich gesetzt haben, sonst kann die Stange während der Beobachtungsperiode ihre Lage ändern.

Obenstehende Vorschläge sind nur provisorische Projekte. Die Grösse der Verankerung, andere Details sowie die Brauchbarkeit der Methode überhaupt kann nur durch praktische Versuche ermittelt werden.

#### Die Entstehung der Palsen.

Auf den Mooren der subarktischen Gebiete kommen isolierte Torfhügel mit rundlichem, ellipsoidischem oder mehr langgestrecktem Grundplan vor. Wo sie gut entwickelt sind, erreichen sie eine Höhe von 2—3 m, ausnahmsweise können sie bis 7 m hoch werden. Sie sind in der schwedischen Literatur unter dem aus dem finnischen hergeleiteten Namen *Pals* bekannt. Die Russen sollen sie *bugrý* nennen; die kaninischen Samojeden nennen sie *Moga*, die timanischen *Ladj*.

In Schweden waren diese eigentümlichen Gebilde der wissenschaftlichen Welt unbekannt, bis TH. FRIES und E. BERGSTRÖM<sup>1)</sup> ihr Auftreten in den nördlichsten Kirchspielen Schwedens, Karesuando und Jukkasjärvi, nachwiesen. Aus demselben Gebiete stammen auch Beobachtungen über die Palsen von dem Wegebauingenieur K. HÄLLÉN. Im Sarekgebiet wurden diese Bildungen übersehen, bis ihr Vorkommen im nördlichsten Schweden bekannt wurde, sie dürften jedoch auch in jenem Gebiet nicht selten sein, erreichen aber daselbst nicht die auffallende Höhe wie in nördlicheren Gegenden.

Nach der übereinstimmenden Ansicht von FRIES, BERGSTRÖM und HÄLLÉN steht die Bildung der Palsen in Verbindung mit der Einwirkung des Frostes. Sie entstehen auf s. g. Winterwegen, wo die Schneebedeckung dünn ist, sowie an solchen Stellen der Moore, wo der Schnee durch den Wind entfernt wird.

In diesen nördlichen Gegenden ist der Boden stellenweise stetig gefroren. Eben die Palsen enthalten ewiges Eis, das im Sommer nur bis  $\frac{1}{2}$  m unterhalb der Oberfläche taut. Die umgebenden Moore mit horizontaler Fläche werden dagegen meist jeden Sommer eisfrei.

Nach der Untersuchung der schwedischen Beobachter enthalten die Palsen dieselben Schichten — oben *Sphagnum-Polytrichum*-Torf, unten *Carex*-Torf — wie das umliegende Moor, nur sind dieselben im Palse zu einem Gewölbe aufgebogen.

Die russischen Forscher<sup>3)</sup> scheinen indessen — soviel ich weiss — zu meinen, dass die s. g. Tundrarücken nicht durch Auffrierung, sondern durch rein biologische Prozesse entstan-

<sup>1)</sup> Några iakttagelser öfver palsar och deras förekomst i nordligaste Sverige. — Geol. Fören. Förh. Bd. 32, 1910, S. 195.

<sup>2)</sup> Undersökning af en frostknöl (pals) i en Kaitajänki myr i Karesuando socken. — Geol. Fören. Förh. Bd. 35, 1913, 81.

<sup>3)</sup> Vergl. R. POHLE, Pflanzengeographische Studien über die Halbinsel Kanin und das angrenzende Waldgebiet. — Acta Horti Petropolitani. Bd. 21, 1903, S. 98. — K. GLINKA, Die Typen der Bodenbildung, S. 240. Berlin 1914.

den sind. Nach TANFILIEW sollte der Hauptgrund darin liegen, dass »*Sphagnum* am besten in atmosphärischem nährstoffarmem Wasser wächst«, deshalb wuchere dieses Moos auf kleinen Hügeln, wo das mineralische Wasser nicht hinkommt, viel intensiver als in dem nassen Moor. Auch die nordrussischen Palsen sind gefroren und tauen im Sommer nur bis zu einer Tiefe von etwa 40 cm. Man gibt an, dass im Inneren der Palsen Reste von Bäumen gefunden wurden. Obgleich die



Fig. 19. Pals auf einem Tundramoor in der grossen Kanin-Tundra. Nach R. POHLE in »Vegetationsbilder«, herausgeg. v. G. KARSTEN u. H. SCHENCK. Bd. 5, Jena 1908.

Untersuchungsergebnisse divergieren, ist es klar, dass die fraglichen Gebilde aus dem subarktischen Russland mit denjenigen des nördlichsten Schwedens genetisch verwandt oder — vielleicht eher — genetisch identisch sind.

FRIES und BERGSTRÖM haben eine Erklärung versucht, nach welcher die Palsen infolge der geringeren Schneebedeckung durch ein tieferes Gefrieren im Winter an Höhe anwachsen, im Sommer tauen die Palsen zum Teil auch von unten, und

dabei werde unter dieselben aus dem Moore Torf in sie hineingepresst.

Dieser Erklärungsversuch enthält gewisse plausible Momente, ist aber nicht wissenschaftlich genug durchdacht.

Mir scheint, dass in den Palsen ein ganz gleicher Fall von sich ausdehnenden Gewölben vorliegt, wie er von mir oben (Seite 603) für die Bildung der Schuttinseln der Blockmeere angenommen worden ist. Die Palsen entstehen an anfänglich geringen Erhebungen der Mooroberfläche, wo die Schneedecke dünn ist. Dort bildet sich im Winter eine gewölbeförmige gefrorene Kruste, die in allen Richtungen anwächst und im Sommer gegen Tauen durch den in der Oberflächenschicht ziemlich trockenen lufthaltigen Torf geschützt wird. Im Winter gewinnt diese Kruste noch mehr an Höhe und Weite durch Ausdehnungsprozesse, die sowohl an ihrer Oberseite als an ihrer Unterseite stattfinden. In dem Raum unter dem Gewölbe wird in gleichem Schritt mit der Aufwölbung Material aus unter- und umliegenden Torfschichten emporgesaugt.