

Die Mechanik  
der periglazialen Strukturböden

Von  
**Erwin Schenk**  
Wiesbaden

Mit 10 Tafeln, 21 Abbildungen, 13 Tabellen

*unvollständig. 2x.  
Tafel 4 unvoll-  
ständig!*

Herausgegeben von  
der Direktion des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung

**Wiesbaden 1955**

Im Vertrieb beim Hessischen Landesamt für Bodenforschung

Wiesbaden, Mainzer Straße 25

Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung

Herausgegeben von  
der Direktion des Hessischen Landesamtes  
für Bodenforschung

Heft 13

# Die Mechanik der periglazialen Strukturböden

Von

**Erwin Schenk**

Wiesbaden

Mit 10 Tafeln, 21 Abbildungen, 13 Tabellen

Herausgegeben von

der Direktion des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung

**Wiesbaden 1955**

Im Vertrieb beim Hessischen Landesamt für Bodenforschung

Wiesbaden, Mainzer Straße 25



## Inhalt

I. Vorbemerkungen .....	7
1. Einführung .....	7
2. Probleme .....	7
II. Die Formen .....	10
1. Die fossile Form .....	10
a) Der Fundort .....	10
b) Der Aufschluß .....	10
c) Form und Inhalt .....	11
d) Folgerungen .....	12
2. Die rezenten Formen .....	13
a) Die arktische Winterform .....	13
b) Die Frostform im tropischen Hochgebirge .....	14
c) Die arktische Sommerform (Auftauform) .....	14
d) Die Auftauform in außerarktischen Gebieten .....	17
e) Ergebnis .....	17
3. Die Dauerform .....	18
III. Die wirkenden Faktoren .....	19
1. Das Wasser .....	19
a) Wasserhaushalt .....	20
b) Verteilung des Wassers im Boden .....	24
c) Eigenschaften und Verhalten des Wassers .....	26
2. Der Boden .....	32
a) Bodenbildung und Froststruktur .....	32
b) Korngröße und Frostgefährlichkeit .....	33
3. Die Frosteinwirkung auf Wasser und Boden .....	38
4. Ergebnisse .....	40
IV. Die Gesetze des Bodenfrostes .....	42
1. Verhalten des Bodenwassers .....	42
2. Frosthebung .....	43
3. Frosteindringung .....	45
4. Der Frostgefährlichkeitsgrad .....	46
5. Gefriergeschwindigkeit .....	47
6. Temperatureinfluß .....	48
7. Mineralgehalt .....	48
8. Eigenschaftsänderung .....	49
9. Wärmeleitfähigkeit .....	50
10. Frosteindringung unter natürlichen Verhältnissen .....	51

11. Das Auffrieren .....	53
12. Zusammenfassung .....	54
V. Die Mechanik der Polygonstrukturen .....	55
1. Größenordnung der Frosthebung im Strukturfeld .....	55
2. Bildung der Frostform .....	56
3. Die Bildung der Auftauforn .....	58
4. Sekundäre Polygone .....	59
5. Das Sortierungsprinzip .....	60
6. Der Bildungsimpuls .....	63
7. Spaltenbildung .....	64
VI. Die Strukturbodentypen .....	69
1. Grundgesetz und Grundform .....	69
2. „Kuchenböden“ .....	71
3. Bülten und Thufur .....	72
4. Palse .....	73
5. Strang- und Ringmoore .....	74
6. Taimyripolygone und Eiskeilnetze .....	75
7. Die Solifunktionsformen der Hänge .....	76
VII. Zur Systematik .....	79
1. Die Entwicklung des Formenschatzes .....	79
2. Die Kräfte .....	82
Rückblick .....	84
Zusammenfassung .....	85
Schriftenverzeichnis .....	87
Tafeln .....	93

# I. Vorbemerkungen

## 1. Einführung

Als Strukturboden wird der Boden bezeichnet, in dem unter der Einwirkung des Frostes eine Sortierung und Musterung entstanden ist. Dabei ist vielfach eine Sonderung der steinigen und erdigen Bodenbestandteile erfolgt in der Weise, daß mehr oder weniger regelmäßige, kleine und große, stets schöne und sehr eindrucksvolle Musterungen an der Bodenoberfläche in Erscheinung treten: Steinringe und Steinnetze umgeben Feinerdehügel, ringförmig angeordnete Pflanzenpolster umschließen breite Erdkessel, Stein- und Erdstreifen ziehen sich hin über wenige bis zu vielen hundert Meter Länge in paralleler Anordnung, regelmäßig verteilte Erdflecken und Buckel teilen eine sonst geschlossene Vegetationsdecke auf. Guirlanden, inselartige hohe Aufbeulungen, Spalten- und Reißnetze, Eiswälle usw. mustern regelmäßig, einzeln und gehäuft, die Böden polarer Gebiete und der Hochgebirge der Erde.

Die wissenschaftlichen Beobachtungen dieser Strukturen reichen über 100 Jahre zurück, jedoch erst um die Jahrhundertwende, insbesondere seit dem Geologenkongreß 1910, der viele Teilnehmer nach Spitzbergen führte, wurde der ganze daran geknüpfte allgemein-geologische und paläogeographische Fragenkomplex eingehender behandelt. In den letzten drei Jahrzehnten entdeckte man erst die Verbreitung der Frostmuster in den Hochgebirgen der Tropen, und erst mit der wirtschaftlichen und militärischen Erschließung der Nordpolargebiete gewannen die Lösungen dieser geologischen Probleme für den Bergbau und die Bautechnik große anerkannte Bedeutung. Damit entstand auch eine Vielzahl von Theorien. Die nach der zusammenfassenden Abhandlung von TROLL (1944) in Deutschland, sowie von MÜLLER (1947) und WASHBURN (1950) (s. a. SYMPOSIUM 1952) in Nordamerika erschienenen Arbeiten geben aber bereits zu erkennen, daß keine bisher befriedigt, obwohl viele Lösungen von Einzelfragen als richtig und gesichert anzuerkennen sind (s. a. BLACK 1953).

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die Grundfrage nach der Mechanik der Strukturbildungen unter Berücksichtigung der Hydratationsvorgänge im Boden zu lösen. Das Problem wird dabei vorangetragen bis zu dem der Entropievermehrung, das sich letztlich aus der Entmischung des Bodens als Folge der thermischen Dynamik ergibt.

## 2. Probleme

Die eingehende Darstellung von TROLL über Strukturböden und Solifluktion (1944) hat durch die Sichtung und Ordnung der Beobachtungen von rezenten und fossilen Froststrukturböden aus der ganzen Welt die Problemstellungen teils verringert, teils vermehrt und verlagert. In überzeugender und anschaulicher Weise ist gezeigt worden, daß Froststrukturböden keine ausschließlich die Polarbereiche auszeichnenden Phänomene sind, sondern daß sie im subnivalen Bereich auf der ganzen Welt auf-

treten und zwar dort, wo der Frost bei bestimmten Bodenverhältnissen formend wirksam werden kann. Die Gegensätzlichkeit, die TROLL an den zahlreichen Formen der polaren Bereiche und der tropischen Hochgebirge aufweist, wirft einerseits die Frage nach den bestimmenden und entscheidenden und andererseits nach den nur lokal und regional variierend wirkenden Faktoren auf und damit schließlich nach dem einfachen Grundgesetz, nach dem sich der Boden durch Frostwirkung ordnet und mustert. TROLL vertritt auf Grund seiner Untersuchungen (1944, S. 560 u. 647) die Meinung, daß in der Dynamik der Frost- und Strukturbodenbildungen in den einzelnen subnivalen Klimaten ein grundsätzlicher Unterschied bestehen müsse, daß also nicht nur quantitative, sondern auch qualitative Unterschiede in der Dynamik die jeweiligen Formen entwickeln. Dieses Ergebnis überrascht, jedenfalls vom geologisch-physikalischen Blickpunkt aus, und scheint einer Überprüfung wert.

Auch die Arbeiten der letzten Jahre (RUTTEN 1951, RICHMOND 1949, SCHÄFER 1949, DÜCKER 1951, TABER 1943, ROMANOWSKY u. CAILLEUX 1942, PATERSON 1940, GRIPP 1952, CORBEL 1954 u. a.) und vor allem das Symposium über die Frostwirkung im Boden (1952) zeigen, daß die bisherigen zahlreichen Lösungsversuche, die oft auf zu enger Basis angestellt wurden, noch nicht ganz befriedigen, obwohl Hauptmomente allgemein anerkannt werden.

Von einer geographischen Behandlung kann die endgültige Lösung nicht erwartet werden, wohl aber vermehrt und sichert sie die Grundlagen zur Klärung der Strukturbodenprobleme. Bezeichnend ist, daß die Lösung der Hauptprobleme und die entscheidenden Fortschritte auf dem Wege der physikalischen Untersuchung, und zwar durch das Experiment erreicht wurden. Die u. a. im Symposium „Frostaction in soils“ (1952) veröffentlichten Arbeiten geben zu erkennen, in welchem Umfange und mit welcher Intensität die physikalischen Untersuchungen verfeinert und ausgedehnt worden sind.

Einerseits erscheint es heute schon fast möglich, auf Grund der bisherigen Ergebnisse die Mannigfaltigkeit der Strukturformen und ihre geographische Ordnung weitgehend als Abwandlungen ein und desselben physikalischen Prozesses aufzufassen, andererseits aber entspricht der Vermehrung der Probleme durch die Verfeinerung und Ausdehnung der physikalischen Messungen wohl eine Entwicklung in die Breite, aber nicht in die Tiefe. Hier fehlt der neue Impuls, der ihr m. E. von der Kolloidchemie und -physik gegeben werden kann. Es ist überraschend, daß die Ergebnisse der modernen Bodenkunde seit MITSCHERLICH und VAGELER bei der Untersuchung der Frostböden bis heute noch nicht herangezogen worden sind. Wohl sind einige Ansätze zu bemerken, aber ihre Bedeutung für die Frostbodenforschung scheint noch nicht klar erkannt zu sein. Hier wird das Arbeitsfeld der zukünftigen experimentellen Frostbodenforschung liegen. Dabei ist die Spaltenbildung im Frostboden in den Vordergrund zu stellen.

Die Verlegung der experimentellen Untersuchung aus dem Eisschrank in den Kälteraum, die die amerikanischen Straßenbauer vorgenommen haben, bietet dabei auch neue und bessere Möglichkeiten für die Untersuchung der Frage, welche Rolle die einzelnen Faktoren bei der Entwicklung der vielen Typen spielen.

Durch die Gegenüberstellung von arktischen Strukturtypen und solchen der tropischen Hochgebirge ist auch die wichtige Frage aufgeworfen worden, ob und wie weit

für die Frostböden in den Hochgebirgen der Tropen die Bindung an stark wasserhaltige Böden ein besonderes Kennzeichen ist, wie TROLL meint (1944, S. 560 f.). Sind tatsächlich nur diese durch eine besonders klare Materialsortierung ausgezeichnet? Welche Bedeutung kommt der dauernden Gefornnis oder ihrem Fehlen zu? Welche Rolle spielt der Tiefgang des Frostes, das Fehlen oder Vorhandensein von Grundwasser bei der Strukturbildung im allgemeinen und bei der Typenentwicklung insbesondere? Welche tieferen Zusammenhänge bestehen zwischen Wasserverhältnis, Bodenmaterial und Geländeneigung als schon aus der Beziehung der Korngröße zur Frostwirkung bekannt ist? Ist den Konvektions- und Quellungskräften tatsächlich eine Bedeutung zuzumessen, wie TROLL und andere noch behaupten (TROLL 1944, S. 674 und GRIPP 1952)? Könnte es nicht vielleicht für die diluvial-geologische und paläoklimatische Auswertung des Strukturbodenphänomens und der Solifluktsformen von größerer Wichtigkeit und Bedeutung sein, eine Trennung auf genetischer Basis durchzuführen als nach Klimazonen und morphologischen Gesichtspunkten? Der Vergleich von Bildern der Eiskeilspaltenetze von der Taimyrhalbinsel mit solchen von Polygonalfeldern auf Spitzbergen, Grönland oder in Alaska drängt geradezu die Frage auf, ob es nicht ganz wesentliche Unterschiede im Impuls und der Mechanik bei der Bildung der Strukturen gibt, so wie sich die Gruppe der Würge- und Taschenböden als eigentlich amorphe Bildungen deutlich abhebt von den klar gezeichneten Strukturbodennetzen. Schließlich lehren die ungeheuren Frostschäden in unseren Straßen, daß auch im gemäßigtem Klima die froststrukturbildenden Kräfte in höchstem Maße wirksam sind. Der Rahmen, der ihnen mit der Beschränkung auf den periglazialen oder subnivalen Bereich gegeben war, scheint damit durchbrochen. Es ergibt sich mithin die Frage, ob es nicht einen „kritischen Punkt“ gibt, mit dem die Frostwirkung in allen Klimazonen einsetzen muß. Welches sind seine Bedingungen?

Ausgangspunkt in der vorliegenden Arbeit sind eigene Beobachtungen in Spitzbergen, in den Alpen, Karpathen, in Norwegen, Schweden, im Wartheland und in den Pripjetsümpfen. Die Entdeckung eines günstig aufschließbaren fossilen Strukturbodenfeldes im Wartheland im Jahre 1941 führte mich dabei zu neuen Standpunkten und Perspektiven. Die Einzigartigkeit dieses Aufschlusses dürfte seine nachfolgende Behandlung als ein Musterbeispiel für die fossilen Formen rechtfertigen. Unter den zahlreichen Arbeiten über fossile Formen sei besonders auf die Abhandlungen von BENNHOLD (1929), PFUHL (1932), DÜCKER (1933), EDELMANN, FLORSCHÜTZ, HUNDT, VAN DER VLERK, KELHACK, SCHÖNHALS, GALLWITZ, SELZER, WITTMANN, WEINBERGER, PICARD u. a. hingewiesen, zumal die fossilen Formen auch umgekehrt für die Bodenkunde besonders aufschlußreich sind. Ihre eingehende Behandlung aber wäre ein zu großer Umweg zur Ergründung der Mechanik der Strukturböden. Erst mit der Erforschung der fossilen Böden im letzten Jahrhundert ist auch die Bedeutung der rezenten Formen für die Quartärgeologie größer geworden. Ermöglichen einerseits die mächtigen homogenen Lößdecken die Erforschung der Entwicklung von Bodentypen und ihrer klimatischen Bedingungen, so sind andererseits die Lagerungsbeziehungen zu den fossilen Strukturen von entscheidender Wichtigkeit für klimatische, stratigraphische und geographische Fragen und Deutungen geworden.

## II. Die Formen

### 1. Die fossile Form

#### a) Der Fundort

Halben Weges von Welun nach Tschenschow liegt unweit des Warthetales am Kalkofen bei Parshimiechy ein fossiles Strukturbodenfeld. Durch ein Nebentälchen an der Südseite des Warthetales ist die alte Hochfläche durch junge, ungleiche Abtragung angeschnitten, und der sonst von diluvialen Sanden bedeckte Jurakalk tritt dort zutage. In einem Steinbruch wird er gebrochen und in unmittelbarer Nähe davon gebrannt. Das Gebiet liegt im Moränengürtel des Warthe-Eiszeitstadiums, und zwar im unmittelbaren Bereich einer Haupteisrandlage der zwischen Kalisch und Lodz nach Süden vorgestoßenen Eiszunge (WOLDSTEDT 1929).

#### b) Der Aufschluß

Der Steinbruchaufschluß (Taf. 1 Fig. 1), den ich 1941 und 1942 verfolgte, zeigte nicht nur die gebankten hellgrauen, klüftigen Kalke des oberen Jura mit Kieselgeröllen, sondern barg auch einen interessanten und wichtigen Formenschatz fossilen Frostbodens aus der Zeit des Pleistozäns.

Die Schichtfugen des in Meterstärke gebankten Kalkes sind mit Manganabsätzen tertiärer Verwitterungslösungen belegt und deutlich nachgezeichnet. Der feste, aber sehr zerklüftete Stein geht nach oben über in das Trümmerwerk der Verwitterungszone aus zersetztem Kalkstein und schließlich in die festgepackte, aus braunrotem Lehm und groben Kalksteinbrocken zusammengesetzte tertiäre Schuttdecke.

Sie ist bis knapp 2 m mächtig. Darüber liegen etwa 50 cm mächtige graugelbe pleistozäne Sande. Die den Kalksteinaufschluß kappende Hochfläche ist dort nahezu eben. Soweit dies die Schnitte des Steinbruches zu beurteilen erlauben, gilt dasselbe auch für die tertiäre Landoberfläche, die die sehr flach nach Norden einfallenden Kalksteinschichten horizontal schneidet und der tertiären Schuttdecke und Zertrümmerungszone damit eine ziemlich gleichmäßige Mächtigkeit gibt.

In der Schuttdecke, und teilweise ihre ganze Mächtigkeit übertiefend, sehen wir taschen- und kesselförmige Gebilde, die von Lehm und Sand erfüllt sind. In wechselnden Dimensionen und wechselnden Abständen sind sie durch den Abbau ringsum angeschnitten. Wie Säulen oder Wände aus Lehm mit unregelmäßigen Kalksteinbrocken ragt die Schuttdeckung zwischen ihnen steil empor (Tafel 1 Fig. 1). Sehr ähnliche und bis in die Einzelheiten vergleichbare Bildungen kennen wir u. a. von Château de Jeurre bei Etampes (DE LAPPARENT 1942 und WITTMANN 1950). Wer fossile „Brodeltöpfe“ sah und der Mannigfaltigkeit der rezenten Strukturformen in arktischen Zonen nachging, wird nicht daran zweifeln, daß hier „Brodeltöpfe“ – um den Ausdruck GRIPPS (1929) zu gebrauchen – oder Steinnetzböden mit tiefen Feinerdekesseln in fossiler Form vorliegen. Ihre Deutung als Formausfüllungen von tertiären Schloten im Kalkstein oder als pleistozäne Eiskeile oder ähnliches und auch ihre Bildung durch strudelndes Wasser scheidet in Anbetracht des Füllmaterials und seiner Abgrenzung und Sortierung und der vielfachen Wiederholung

einfach aus. Wer den Steinbruch betritt, steht mitten in einem pleistozänen Strukturbodenfeld, und zwar in einem Niveau, das in polaren Regionen der unmittelbaren Beobachtung nur schwer zugänglich, meist verschlossen bleibt. In seltener und vielversprechender Klarheit bietet es sich hier dem überraschten Beobachter und versetzt ihn in jene Gefilde, in deren Einöde der Frost die eindringlichste Sprache spricht.

### c) Form und Inhalt

Schürfen wir am Rande einer der schmalen tiefen Taschen, so schälen wir einen zunächst immer breiter werdenden Lehmkern heraus. Fig. 1 der Tafel 1 zeigt drei verschiedene Schnitte durch Strukturen, die an der Erdoberfläche in nahezu gleicher Größe durch ringförmige Steinanreicherungen gezeichnet sind. Wir erkennen, daß der gegebene Aufschluß nur der schmale periphere Schnitt eines zylinder- bis kegelförmigen Körpers ist. Heben wir oben die sandige Deckschicht ab, so erblicken wir in dünner, 20–30 cm mächtiger Lehmschicht seinen eckig-rundlichen Grundriß oder Querschnitt, den deutlich ein Kranz aus Steinen und Steinchen nachzeichnet und umwallt: es ist die bekannte und gewohnte Form arktischer Steinnetzpolygone. Es sind Durchmesser von mehr als 1 m zu messen.

Ein Steinkranz krönt die Schuttwände, welche die einzelnen Formen trennen und aus braunrotem Lehm mit faustgroßen Kalksteinen bestehen, in ihrer ganzen Breite (20–50 cm). Lehm füllt die Räume zwischen den Steinchen, doch die Steinanreicherung bis in 30–40 cm Tiefe hebt sich deutlich ab von der darunterliegenden Schuttpackung; man kann ihr folgen wie an einer Perlenschnur bis in den Grund des Kessels; mit einer bis zu 10 cm starken Lage aus Steinen sind die steilen Wände des Kessels belegt. Soweit die Formen der Steine es ermöglichen, liegen sie stets mit ihren flachen Seiten den Wänden an und bilden so als Verkleidung eine scharfe Grenze zwischen Schuttpackung und Kesselfüllung (Tafel 1 Fig. 2). Auf dem Grund des Kessels erscheinen sie gesammelt in einem bis zu 30 cm hohen Haufwerk.

Die Kesselfüllung besteht aus dem typisch rotbraunen Lehm tertiärer Verwitterung, der überall sonst im Aufschluß die regellos verteilten Steine zur Schuttpackung verkittet und auch tief in Klüfte und Schichtfugen der Kalkbänke reicht. Die untere Hälfte des Kessels links im Bilde (Tafel 1 Fig. 1) füllt er ganz aus; in der oberen Hälfte bildet er nur eine nach oben langsam dünner werdende Schicht an der Wandung, während der Kern aus pleistozänem graugelbem Sand besteht, demselben, der die oberste Deckschicht im Aufschluß bildet. Der mittlere Kessel (Tafel 1 Fig. 1) zeigt die Lehmfüllung in ziemlich gleichmäßiger Stärke von 25 cm, aber auch hier am Grunde stärker als an der Wandung. Nur wenige Steine und Steinchen finden wir in ihr. Indem sie sich über die Zwischenwand legt oder im unteren Teil des Steinkranzes die Zwischenräume ausfüllt, reicht sie von einem Kessel in den anderen. So scheint sie im Kessel rechts zwei Drittel des Raumes einzunehmen und dem Sandkern nur wenig Raum zu lassen. Doch auch hier ist es nur die Wandverkleidung des soeben randlich angeschürften Kessels, die in Erscheinung tritt. Alle drei Kesselprofile (Tafel 1 Fig. 1) stellen verschiedene Schnitte dar; der mittlere geht ungefähr durch den Durchmesser und gibt uns mit den beiden anderen ein klares Bild vom symmetrischen Bau der „Brodeltöpfe“.

Neben den vollausgereiften großen Formen finden sich am westlichen und östlichen Rande des Aufschlusses auch einige kleine, scheinbar „embryonale“ Ausbildungen. Doch unterscheiden sie sich von den erstgenannten allein – und das nur wenig – in ihren Dimensionen, in sonst nichts. 30, 40, 70 und 80 cm sind sie zur Tiefe hin abgeschlossen, ihr Durchmesser ist kaum kleiner, manchmal sogar größer als bei den anderen Bildungen. Nachgraben bringt vermutlich auch hier eine gleichgroße Form zutage wie dort, wo tatsächlich nachgegraben wurde. Die Lehmschicht ist der Höhenlage des Schnittes entsprechend etwas dünner, die Steinwallbildung deutlich, wenn auch nicht ganz gleichmäßig ausgeprägt. Und stets findet sich der Steinbelag an der Wandung, der Grenzfläche zwischen Lehm und Schuttsäule.

#### d) Folgerungen

Strukturböden sind nicht nur aus polaren Gebieten bekannt, sondern auch aus den Hochgebirgen der Tropen. Wir kennen sie auch als fossile Gebilde. In zahlreichen Arbeiten sind sie beschrieben worden (s. o. S. 9). Sie können nicht schlechthin als Indikation für arktische Verhältnisse angesprochen werden. Da jedoch die beschriebenen geologischen Erscheinungen den eigenartigen polaren, bzw. periglazialen Strukturformen des Bodens in Symmetrie, Größe und Bodensortierung gleichen, und da weiterhin die Tatsache besteht, daß der Fundpunkt im Moränen-gürtel am Eisrand des Warthestadiums liegt und die Strukturen selbst ein Teilstück der pleistozänen Bildungen sind, so kann kein Zweifel mehr bleiben an den klimatischen Voraussetzungen für die hier einstmals wirkenden, gestaltenden und strukturbildenden Kräfte im Boden. Wir dürfen also zur Ergänzung und Belebung der fossilen Form, insbesondere in Anbetracht der hydrogeologischen Gegebenheiten, annehmen, daß einst hier – wie heute im periglazialen Bereich der Strukturböden – eine ständige Gefrorenis das ganze Jahr über im Boden vorhanden war und daß die obere Bodenschicht nur etwa in der Mächtigkeit, die der Tiefe der Brodelkessel entspricht, im Sommer aufgetaut und mit Einbruch des Winters wieder gefroren ist. Die Tiefe dieser Aktionszone und Sortierungstiefe ist hier aber größer als wir sie sonst aus den arktischen Ländern kennen (HÖGBOM, NORDENSKJÖLD, GRIPP, SAPPER, POSER, ELTON u. a.). Wir müssen ferner schließen, daß der Wasserhaushalt und die Eigenschaften des Bodens im Aufschlußgebiet, hier also im tertiären Verwitterungsboden, den Vorbedingungen der Strukturbildung vollauf genügten. Die fossile Form ergänzt so ganz wesentlich unsere Kenntnis über den Formenschatz arktischer Bodenstrukturen. Sie ordnet sich neben die jahreszeitlichen Formen der polaren Gebiete und neben die tageszeitlichen Formen in den tropischen Hochgebirgen der Erde.

Form und Inhalt von Brodelkesseln liegen vor uns in seltener Klarheit, befreit von den Bindungen der sie einst gestaltenden exogenen Kräfte, gelöst von der Herrschaft des Ortes und der Zeit. Sie können uns somit eine bedeutungsvolle Grundlage zur Lösung mancher Probleme des periglazialen bzw. subnivalen Strukturbodens geben. In dieser doppelten Beleuchtung, von Vergangenheit und Gegenwart her, soll hier versucht werden, des Wesens Kern herauszuschälen.

## 8. Die rezenten Formen

Wenn wir aus unserer fossilen Form die fremde, später eingebrachte Sandfüllung entfernen und dann so viel Wasser zugeben, bis der Lehm eine Suspension bildet, die bis an den Rand des Kessels reicht und auch die dünne Lehmkruste des Steinwalles auflöst, so erhalten wir das bekannte Bild arktischer Steinpolygone oder Steinnetze (Tafel 2), so wie wir sie im Sommer dort sehen: die breiigen, weichen Feinerdeflecken in einem sonst steinigen Boden oder umrahmt von Steinkränzen oder Steinguirlanden oder Pflanzenwällen. Wir wissen, ihr Aussehen und ihre Gestaltung ist sehr wechselnd. Und der aufmerksame Beobachter, der im Sommer den arktischen Boden betritt, findet sie in allen Zuständen und Formen: groß und klein, flach und aufgewölbt, weich und fest, glatt und rissig, trocken und feucht. Bei dieser reichen und verwirrenden Fülle der Zustände, zu denen sich die große Mannigfaltigkeit der Formen hinzugesellt, müssen wir die charakteristischen Bildungen unterscheiden und klar trennen. Keiner, der die Mannigfaltigkeit der Formen der Strukturböden in arktischen Gebieten beobachtet hat, kann sich des Eindrucks erwehren, daß es offensichtlich sehr aktive Formen gibt, neben solchen, die wie fossil erscheinen. Dazwischen liegen alle Übergänge in dynamischer Hinsicht. Wer dieselben Strukturen zwischen Winter und Sommer oder zwischen Sommer und Winter beobachten konnte, kann die Bedeutung der Jahreszeiten für die Zustandsform ermessen. Von vielen Forschern ist sie gewürdigt worden. In Anbetracht der Formenfülle mit ihren scheinbaren Widersprüchen blieben aber die Voraussetzungen und Vorbedingungen der Zustandsformen unklar. Eine einheitliche Auffassung über die Beziehungen zwischen Jahreszeit und Zustandsform hat sich bis heute noch nicht durchgesetzt. Im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Lösung der Probleme der Mechanik und Dynamik der Strukturböden und schließlich ihrer Genetik sind diese Fragen aber zuallererst zu klären. Zunächst muß deshalb versucht werden, die jahreszeitlichen bzw. periodischen Formen von Dauerformen in dem rezenten Formenschatz auseinanderzuhalten.

### a) Die arktische Winterform

zeigt stets eine Aufwölbung. Die sehr umfangreiche Literatur berichtet nirgends von im Winter absolut flachen oder gar eingedellten, nach unten gewölbten Feinerdeflecken. Der Feinerdehügel überragt mehr oder weniger den Steinkranz oder die flache, steinige Umgebung. Die Wölbung ist sehr verschieden und wechselt zwischen schwach und stark. Bei kleinen Formen ist die Krümmung der Oberfläche am stärksten. Fast stets ist sie begleitet von einer Rissigkeit und Spaltung, die zu polyedrischen Absonderungen und durch die jeder einzelnen Zelle eigenen konvexen Krümmung zu blumenkohlformiger Gestaltung führt (Tafel 3 Fig. 1). Dieselbe Erscheinung finden wir auch da, wo die Feinerde nicht durch eine steinige Oberflächenschicht dringt, sondern weite Flächen einnimmt, so daß sich ein Polygonhügel eng an den anderen schließt.

Der Hügel ist Werk und Form des Winters, also des Frostes [s. a. ABOLIN (1913) und MEINARDUS (1930), Handbuch III, S. 72]. Aufgrabungen dieser Hügel, die ich in der Vogelbucht (Nord-Spitzbergen) machte, zeigten, wie auch viele andere Beobachter anderenorts früher festgestellt haben (s. a. Symposium 1952), in der Horizontalen sich ausdehnende Eislin sen, Eisblätter und stehende dünne Fugenaus-

füllungen von Millimeter- bis mehr als Zentimeterstärke, die der im übrigen massiv gefrorenen Feinerde den Charakter einer fast regelmäßigen, flachliegenden bis flach aufgebogenen Schichtung oder gneisartigen Flaserung verleihen. Steine waren von einer Eisschicht umhüllt. Diese Erscheinungen sind bereits gut bekannt und von POSER (1931 u. 1933), GRIPP, ELTON, ABOLIN, KOKKONEN, BESKOW, TABER, HAMBURG, SCHOSTAKOWITSCH u. a. ausführlich beschrieben.

Mit Einbruch der Herbstfröste konnte ich Ende August 1936 im Seetal an der Wide-Bay die Bildung einiger Hügel beobachten. Der Feinerdeboden am periodisch überschwemmten Rande des Talsees war glatt und eben (Schluff) und nur durch Polygonrisse und längliche Dellen aufgeteilt. Als der Frost etwa 10 cm tief in den Boden gedrunken war, wölbten sich dort mehrere größere und kleinere Hügel auf, mit einer polygonalen Felderteilung durch Risse und Spalten, wo wir noch 3 Tage vorher nichts als die großzügige ovale Felderteilung und Dellenbildung gesehen hatten (Tafel 3 Fig. 2). Die Bildung der Spalten und Hügel muß also ziemlich plötzlich erfolgt sein. Bis zu etwa 50 cm Höhe wölbte sich das größte, etwa 3 m lange Feld auf. Zentral war die Aufwölbung am stärksten; an der dem Talrand zugewandten Seite war der größte der Hügel im mittleren Teil zerbrochen und die ganze Flanke wieder eingesackt. Wie ein Pfropfen ragte sie, von hier gesehen, aus dem Boden. Die Erde im Kern aus Schluff mit Kleinschutt war noch nicht gefroren, sondern feucht und bildsam, abgesehen von der dünnen gefrorenen Kruste. Die anderen Hügel waren ziemlich gleichmäßig hochgewölbt und ihre Oberfläche in polygonale Felder zerlegt. Die Zerlegung fand sich dort am stärksten, wo die Wölbungen am größten waren.

Hügelformen sind nun auch im Sommer häufig zu sehen, Hügelbildungen während des Sommers sind dagegen nie beobachtet und beschrieben worden, ebenso wenig wie typische Sommerformen im Winter beobachtet worden sind. Die Hügel- und Aufwölbungsformen der polaren Strukturböden sind also Frostformen.

#### b) Die Frostform im tropischen Hochgebirge

In den tropischen Hochgebirgen wird die winterliche Frostzeit durch die nächtliche vertreten. Die Frostwirkung ist häufiger, der Frosttiefgang wesentlich geringer. Die Strukturen sind im allgemeinen kleiner. Die Beschreibungen und Bilder [s. zusammenfassende Darstellung von TROLL (1944) S. 600–613] lassen keinen Zweifel, daß Hebungen und Aufwölbungen auch dort die Frostform sind. Die Feinerde, sowohl in den Steinnetzen als auch zwischen den polygonalen Spaltensystemen (Furchen) und auch zwischen den Streifen, wird durch Eisbildungen während der Nacht gehoben.

So klar und selbstverständlich die Beulen- oder Hochform hier als Frostform und Frostwirkung erscheint, so zweifelhaft und verwirrend ist es, daß sie im arktischen Gebiet auch während des Sommers höchst auffällig in Erscheinung tritt.

#### c) Die arktische Sommerform (Auftauform)

Die Sommerform steht der Winterform so klar und deutlich gegenüber wie der Sommer dem Winter. Während die Erscheinung der Winterform im Sommer wohl

möglich ist, ist dagegen die Erhaltung der Sommerform im Winter ausgeschlossen. Verfolgen wir ihre Entwicklung von der Winterform her: Mit Beginn des Sommers – es seien auch hier eigene Beobachtungen in Spitzbergen vorangestellt – ändert sich langsam die oberflächlich sichtbare Form. Die Erde beginnt zu tauen und wird feucht und weich. Während die oberste Schicht schon plastisch ist, ist die darunterliegende noch steinhart gefroren. Zunächst wird der freie Feuchtigkeitsgehalt zuoberst am größten, nach der Tiefe hin wird er immer kleiner. Es muß dabei derselbe Spannungszustand herrschen wie bei „Tontüten“, deren trockene Seite sich konkav, und deren feuchte Seite sich konvex wölbt. Dann aber führt Verdunstung zur Trocknung und Schrumpfung der Kruste oben, und der Feuchtigkeitsgehalt ist in der Tiefe größer. Bei diesen Verhältnissen vergrößern sich, wohl unter dem Zwang osmotischer Kräfte, die Risse und Spalten tatsächlich zunächst etwas, wie Verfasser an dem in Tafel 3 Fig. 1 wiedergegebenen Erdhügel und mehreren anderen in der Nähe seines Lagers an der Vogelbucht beobachten konnte (SCHENK 1937). Der Meßstab ging während der ersten sieben Tage immer einige Millimeter tiefer in die Spalten, aber mit der Zunahme der Trockenheit und der Abnahme der Schmelzwassermengen schien dieser Prozeß zum Stillstand zu kommen und das Ende einer Schrumpfung anzudeuten. Die Oberfläche wurde infolge der Verdunstung trocken und steinhart. Die Wölbungen blieben erhalten. Länger konnten diese Erdhügel, die den Sommer überdauern, nicht beobachtet werden. Dafür aber ergänzten Beobachtungen in einem Strukturfeld auf dem Vorland von Grahuk (südöstlich der Fängerhütte) diejenigen der Vogelbucht in schönster und bester Weise.

Als unsere Expedition Anfang Juli 1936 dort ankam, war der Höhepunkt der Schneeschmelze vorbei. Die Senken und Bodenwannen der Terrassen zwischen den Strandwällen des Vorlandes waren mit Schmelzwasser gefüllt. In ihnen und an ihrem Rande wölften sich noch Feinerdehügel flach empor (Tafel 4 Fig. 1). An anderen Strukturen, die zum Teil an den Rändern eine schütterere und spärliche Vegetation trugen, waren die obersten 4–5 cm des Bodens beinahe breiig aufgeweicht. Auch hier nahm die Feuchtigkeit von oben nach unten ab. Mit der wasserreichsten und obersten Erdhaut glitten Pflänzchen (Flechten und Moos) und Steinchen ab und stauten sich vor dem Steinkranz zu kleinen Wülsten und Falten (Tafel 4 Fig. 2). Das war Solifluktion der wasserübersättigten obersten Bodenschicht, die – im allgemeinen nur im großen beobachtet – sich hier im kleinsten Bereich abspielte. In kurzer Zeit sanken die Hügel ganz zusammen, und zwar zentral zuerst und am stärksten (Tafel 5 Fig. 1). Schließlich bildeten sich Einsenkungen mit tiefster Stelle im Zentrum des Feinerdfleckes, so daß zuletzt nur ein Netzwerk von Steinguirlanden und Steinwällen und Steinhügeln zwischen Feinerdeflecken aus dem inzwischen nahezu ganz verdunsteten Tümpel über den Wasserspiegel ragte (Tafel 6 Fig. 1). Dies erweckte den Eindruck, als ob die Steinaufhäufungen hier das Wesentliche der Strukturbildung wären und den Feinerdehügeln andernorts entsprächen.

Die in den letzten Augusttagen durch Niederschläge wieder erfolgte, aber noch geringe Wasseranreicherung änderte nichts an dem Zustand der Strukturen. In dem noch vom Wasser bedeckten Teil der Wanne charakterisierte die dünnbreiige und gefühlsmäßig sehr lockere Konsistenz die Feinerde, während sie im übrigen weiten Feld wohl auch locker und elastisch, aber zäher war.

Zweifach erscheint so die Sommerform: als Hügel und als Delle; im ersten eingangs beschriebenen Fall (S. 15) war die Hügelform bewahrt, im zweiten Fall die Hügelform zerstört. Letztere, d. h. das im Steinboden versenkte Feinerdefeld, ist als die typisch aktive, d. h. lebendige Sommerform des arktischen Bereiches anzusehen.

Damit haben wir in den jahreszeitlichen Erscheinungsformen auch den jahreszeitlichen Rhythmus von aktiven, lebendigen Strukturbodenzellen gekennzeichnet.

Selbst, wenn jene oben mitgeteilte Hügelbildung im Seetal und jenes Zusammensacken der Aufwölbungen in den Schmelzwasserwannen von Grahuk und auch andernorts nicht beobachtet worden wäre, so ist der Befund doch eindeutig: Aufwölbung und polygonale Zerlegung des Gewölbes aus Feinerde erfolgt nur im Winter, Zusammensinken und Auflösung der Wölbung und ihrer sekundären zelligen Struktur erfolgt nur im Sommer.

Die Aussortierung, Sammlung und Ordnung der Steine zu Wällen und Hügeln zwischen den tiefer liegenden sommerlichen Feinerdeflecken kann durch nichts anderes als durch ein Emporwölben der Erde im Winter und eine seitliche Verfrachtung mittels der Solifluktion zur Zeit der Auftauperiode erfolgen. Diese Verfrachtung geht naturgemäß schnell, und nur bei besonderer Gunst ist sie unmittelbar selbst oder ihre Spuren als Fältelungen oder an zarten Gleitstreifen zu beobachten.

Die Steinwälle des beschriebenen und abgebildeten Feldes bei Grahuk ragten tief in den Boden. In die Feinerdezentren konnte man den Eispickel 60–70 cm eindringen, ehe es merklich fester wurde. In die Steinwälle tief hineinzukommen, war naturgemäß beschwerlich. Soweit man sehen konnte, waren sie frei von Feinerde, und klares Wasser sickerte in ihnen. Arbeitete man sich aber mit der Hand tiefer hinein, so konnte man auch Erde feststellen, inhomogenen Schuttboden. Am Rande der Feinerdeflecken lagen indes die Steine einzeln auf der Feinerde, und bei Wasserbedeckung kostete es keine Mühe, ihre Oberfläche oft um doppelte Handbreite durch Abheben oder Zurseiteschieben der Steine zu vergrößern. Offensichtlich stellen die Steine ein bewegliches Glied in der Mechanik der Polygonstrukturen dar, indem sie möglicherweise schon bei Aufwölbung, bestimmt aber bei Beginn des Tauens auf den Wall zu bewegt werden, mit dem Zusammensinken der Hügelform jedoch – soweit es möglich ist – sich ein Stückchen wieder zurückverlagern. Dem Aufwölbungsvorgang müssen sie auch ihre von mir selbst öfters beobachtete und von vielen Autoren beschriebene steile Stellung in den Randzonen (s. a. Tafel 4 Fig. 1 und Tafel 7 Fig. 2) verdanken, indem sie durch irgendwelche Umstände, Verklümmungen, Überlagerung usw. festgehalten werden, während der Hügel zurücksinkt. Druck bei der wiederholten Aufwölbung kann sie vollends steil stellen.

Etwa 5 km südlich vom Kap Grahuk vertraten Pflanzenpolster die Rolle der Steinkränze in einem Strukturbodenfeld hinter dem Strandwall. Unmittelbar am Strand, wo das Grundwasser von den höheren Strandterrassen ins Meer mündet und dadurch gestaut war, waren die Feinerdefelder sehr dünnbreiig, vollkommen flach und dabei tief eingesenkt zwischen den Pflanzenumwallungen. Die Pflanzenumrahmungen zeigten alle die Formen der Stauung, Fältelung, Raffung, kurz einer Bewegung, die bei der ebenen und tieferen Lage der Oberfläche der Feinerdefelder unverständlich blieb,

bis ich eindeutig den Vorgang der Gleitung beobachtet hatte. Auf einer etwas höheren und trockenen Terrasse fanden sich feuchte, schwach eingedellte, dann flach gewölbte und noch höher schließlich trockene, polyedrisch zerlegte, stark gewölbte Formen. Diese und ähnliche Übergänge, die HÖGBOM (1910) schon früh bekanntmachte, weisen hin auf die Bedeutung des Wassers für die Strukturbildungen.

#### d) Die Auftauperioden in außerarktischen Gebieten

Die arktische Auftauperiode des Sommers ist in den tropischen Hochgebirgen durch die täglichen Einwirkungen der Sonnenwärme vertreten. Die Vorgänge des Zusammensinkens der Nachtfrostformen werden von TROLL (1944) nicht näher erörtert. Die Beschreibungen und Erklärungen der Materialtransporte vom Feinerdekern zum steinigen Rand usw., sowie die Betonung der Hebung und Wölbung der Feinerdekerne (Kuchenböden) durch den Frost lassen jedoch keinen Zweifel, daß die Frostform mit Beginn des Tages zerstört wird und mehr oder weniger mit der Wasserübersättigung zusammensinkt. Insbesondere wird die Wirkung des Eises in der Form des Kammeises als das transportierende Medium hervorgehoben, indem mit der Bildung der Eisnadeln Erdpartikel und Steinchen gehoben und bereits nach außen verlagert werden und so eine besondere Form der Solifluktion kennzeichnen, aus der letzten Endes eine Materialsortierung resultiert mit groben Partikeln am Rande und Feinerde im Zentrum der Strukturen. Solche Bilder können aber nur entstehen, wenn Wölbungen der Frostformen vorhanden sind. Ohne sie kann nur eine wirre Verlagerung stattfinden, sofern nicht Wind und Sonnenstrahlung eine einseitige Regelung bewirken.

#### e) Ergebnis

Durchbruch, Aufwölbung und polyedrische Zerlegung im Winter, Zusammensinken im Sommer, das ist das klare Geschehen im aktiven periglazialen Polygonboden der Polargebiete. Für die Steinstreifen und Erdstreifen gilt dasselbe, wie u. a. aus den Beschreibungen aktiver Böden von HAY (1936) klar hervorgeht. In den tropischen Hochgebirgen wird die winterliche Frostperiode durch die nächtliche und die sommerliche Auftauperiode durch die tägliche vertreten. Abgleiten der groben Korngrößen auf der wasserübersättigten, fließfähigen aufgetauten Erdhaut des aufgewölbten Erdhügels oder Erdstreifens, sowie nebenbei die den Transport begünstigende Eisbildung unter den Steinen, Steinchen und Bodenkrumen, sei es als dünne Schicht oder Kammeis, führt zur randlichen Anreicherung des groben Materials, zur Korngrößen-sortierung, zur Bildung der Stein- und Pflanzenwälle und -streifen. Die sich ständig wiederholende Solifluktion an den auftauenden Erdhügeln verhindert natürlich die Entwicklung einer Pflanzendecke. Sie bleibt günstigenfalls auf die Randzonen beschränkt.

Während die rezenten Bildungen das oberflächige Geschehen der Beobachtung zugänglich machen, bleiben die Vorgänge in der Tiefe und im Innern der Strukturen durchweg verborgen oder nur schwer zugänglich.

Die fossile Form dagegen gibt uns nicht nur klar den Leistungseffekt in der Sortierung von Steinen und Feinerde durch das wechselweise Aufwölben, Auftauen und Zusammensinken, sondern auch die ganze Raumgestaltung in der Tiefe eindeutig zu

erkennen; Befund und Sinn erscheint einfach und eindeutig, doch ehe wir nach der Mechanik der Bodensortierung und nach dem Impuls und Antrieb der Raumgestaltung fragen, müssen wir uns den scheinbar unveränderlichen Strukturformen zuwenden, die in weiten Flächen in den arktischen Gebieten auftreten, und dann den Vorbedingungen der Strukturbildungen überhaupt.

Die vielfach, ja meist beschriebenen und auch von mir selbst wohl am häufigsten beobachteten Formen und Zustände der Polygonstrukturen mit und ohne Stein- oder Pflanzenumwallung, mit flacher Wölbung nach oben und nur feuchter, sehr steifer Konsistenz oder gar steinharter Kruste und der sekundären, beinahe regelmäßigen Zerlegung in kleine polygonale Zellen und Steinnetze, widersprechen sie nicht unserer Formulierung und Einteilung nach dem jahreszeitlichen Rhythmus?

### 3. Die Dauerform

Zweifellos stellt die scheinbar unveränderliche Form der Strukturen ein Problem dar, das als solches nicht erkannt oder aber in seiner Bedeutung überschätzt wurde und daher die Lösung des Gesamtproblems erschwerte und die Forschung auf Nebenwege leitete. Die ältere Literatur behandelt in der Hauptsache nur sie, und fast stets steht sie im Vordergrund des Interesses, nicht zuletzt wegen ihrer ausgeprägten, schönen und imposanten Gestaltung. Den Blick des Beobachters fängt sie daher am leichtesten, und er ist enttäuscht, wenn im Laufe eines ganzen Jahres keine Veränderungen wahrzunehmen sind, abgesehen von einer gewissen Zu- und Abnahme der Feuchtigkeit oder auch einem Steinhartwerden der Kruste und vielleicht einer Verstärkung der Rissigkeit. Aus zahllosen Mitteilungen sind uns diese Erscheinungen bekannt.

Wir finden diese Formen überall und in allen Größen: auf Terrassen nahe der Küste, in Tälern und auf den Hochflächen der Berge (Tafel 6 Fig. 2).

Zwischen den Steinwällen liegt ein flacher oder mehr oder weniger gewölbter Feinerdekern und das Ganze mitten im inhomogenen, vielfach durch Steinpflaster bedeckten Schuttboden. Niemals aber finden wir bei ihnen die auffälligen Wassermengen und die Konsistenz des Bodens wie bei aktiven, lebendigen Formen. Bei Beachtung dieser Beziehung kommen wir der Lösung des Problems näher.

Eine Kartierung der Strukturböden und der Wasserverhältnisse, die ich auf dem Vorland der Andréahalbinsel entlang der Wide-Bay und Liefde-Bay u. a. ausführte, gab hierauf die entscheidende Antwort: Aktive, offensichtlich dem Jahreszyklus streng folgende Formen finden sich nur da, wo das ganze Jahr über, vor allen Dingen bei Einbruch des Winters, dem Einsetzen des Frostes, sehr reichlich Wasser im Boden vorhanden ist. Viel Wasser ist die entscheidende Vorbedingung der Strukturbildungen. Fehlt der überreichliche Wassergehalt bei Einsatz des Frostes, so finden wir träge und tote, im Laufe des Jahres scheinbar unveränderliche Formen des Strukturbodens. Natürlich unterliegen auch sie den jährlichen Temperaturschwankungen und Wassergehaltsschwankungen, doch viel weniger deutlich und sichtbar und vielleicht auch noch abhängig von der von Jahr zu Jahr schwankenden Niederschlagsmenge im Herbst. Ich möchte sie als Dauerformen bezeichnen: ihrer

Position nach scheinen sie bereits vor sehr langer Zeit entstanden und durch Veränderungen der Morphologie, die eine Veränderung des ganzen Wasserhaushaltes, insbesondere des Grundwasserzufflusses, zur Folge hatten, außer Funktion gesetzt zu sein und nur gelegentlich wieder deutlich aktiv zu werden – infolge der unmittelbaren Wasseraufnahme im Herbst nach Regen oder wieder schmelzendem Schnee.

Es ist bezeichnend, daß gerade in den großdimensionierten Strukturen der Dauerformen kleine Steinnetze und polygonale Felderteilungen als sekundäre Bildungen auftreten. Da die Wassermengen offenbar nicht mehr zur Aktivierung der Großform ausreichen und auf eine obere Bodenschicht bei den herbstlichen Niederschlägen oder Schneeschmelzen beschränkt bleiben, bilden sich kleindimensionierte neue Strukturen. Sie finden sich sonst vorzugsweise nur an solchen Stellen, wo die Bodendecke flachgründig ist oder Fröste während der Tauperiode oder vor dem Wintereinbruch, wenn der Boden wasserdurchtränkt ist, auftreten. Auf diese Fälle soll später noch eingegangen werden.

### III. Die wirkenden Faktoren

#### 1. Das Wasser

Im Symposium der Highway Research Board (1952) über „Frost Action in Soils“ wird über die Ergebnisse einer Rundfrage an die amerikanischen Fachleute nach den erforderlichen Untersuchungen auf dem Gebiete der Frostbodenforschung berichtet. Die Untersuchung der Bodenfeuchtigkeit und Wasserbewegung ergab sich dabei als eine der drei dringlichsten Aufgaben (OLMSTEAD 1952). Auch JOHNSON (1952) hält die Behandlung dieses Fragenkomplexes für vordringlicher als andere Frostprobleme.

Die bisherigen Forschungen haben eindeutig ergeben, daß in der Gefrierzone das Wasser aus den tiefen Bodenschichten angereichert, angesaugt wird. Man hat Beziehungen zwischen diesem Vorgang und der Größe der Bodenpartikel und seine Verknüpfung mit dem Wachstum der Eiskristalle festgestellt. Die Auswirkung dieser Verknüpfung ist unzweideutig die Frosthebung und der Frostschaden in den Bauwerken. Aber trotz allem kennt man weder die wahre Bedeutung des Wassers im Boden, noch den eigentlichen Vorgang der Wasserbewegung. Da die Grundgesetze der Statik und Dynamik des Wassers im gefrierenden Boden noch nicht bekannt sind, ist man auch in der Technik nicht in der Lage, die Wasserbewegung zu steuern und die Frostwirkungen zu unterbinden.

Ohne Zweifel wird bei Frosteinwirkung auf den Boden das Wasser in die Gefrierzone transportiert. Aber woher kommt das Wasser? Stammt es aus dem Grundwasser der Tiefe, oder ist es Schmelz- und Sickerwasser von oben? Ist es vielleicht das Wasser, das die Bodenfeuchtigkeit, das Hydratwasser der Bodenteilchen, bedingt? Welche Beziehung besteht zur minimalen und maximalen Wasserkapazität des Bodens? Wird es unmittelbar durch die Kapillaren bewegt oder durch die Wasserhüllen der Bodenpartikel? Oder erfolgt der Transport in Form des Wasserdampfes? Welche Rolle spielen dabei die Bodenpartikel nach Größe, Oberfläche, Mineralart, Kationenbelegung, Kolloidgehalt? Wie weit greifen dabei Druck- und Temperaturänderungen

in die Mechanik der Wasserbewegung und Eiskristallbildung ein? Das sind die Kernprobleme, die heute die Frostbodenforschung zuerst behandeln muß. Durch ihre Lösung werden die Ziele für alle anderen Aufgaben und Untersuchungen gesetzt. Die Maßnahmen in der Technik müssen Stückwerk bleiben, solange nicht die Rolle des Wassers im Boden und die Wasserbewegung beim Gefrierprozeß in allen Einzelheiten genau erkannt sind.

#### a) Der Wasserhaushalt

Eine der Haupttheorien zur Erklärung der Polygonstrukturen setzt mit den Konvektionsströmungen einen Gehalt von mindestens 60% Wasser im „Brodeltopf“ voraus (GRIPP, SÖRENSEN, LOW u. a.). Bereits THORODDSEN (1913) formuliert klar, daß Polygonböden dort fehlen, wo der Untergrund „porös“ ist und aus tonfreiem Sand besteht, d. h. also dort, wo u. a. Faktoren auch das Wasser fehlt. Die entscheidende Bedeutung des Wassers für alle Strukturen liegt jedoch – wie bereits bemerkt – in seiner Menge im Boden bei Eintritt der Frostperiode. Es ist daher nötig, auf das Wesentliche und Grundsätzliche der Wasserversorgung im periglazialen bzw. subnivalen Bereich einzugehen.

Regen ist im Wasserhaushalt der Arktis, bzw. des periglazialen Bereichs, ein nicht sehr wesentlicher Faktor. Die Gesamtmenge der jährlichen Niederschläge liegt beispielsweise in Spitzbergen unter 200 mm. Die Hauptmenge des Wassers liefert die Schmelze des Schnees und der Gletscher. Diese setzt im Frühjahr ein, und in wenigen Wochen ist die Schneedecke verschwunden bis auf die Schneeflecken in Schattenzonen. Überall sickert das Schmelzwasser, überall ist der Boden sehr aufgeweicht; zudem taut ja auch das Eis im Boden. In Bodenwannen und Senken sammelt sich das Schmelzwasser jeder Art, und es bleibt dort mehr oder weniger lange erhalten. Alle Strukturen sind reichlich, teils bis zur Bildung von dünnflüssigen Breien, mit Wasser versorgt. Das Schmelzwasser verläuft sich jedoch dank der allgemein nicht tief unter der Erdoberfläche liegenden Schicht, die das Grundwasser bzw. Sickerwasser staut, d. h. dem gefrorenen Untergrund, ziemlich schnell in Bäche, Flüsse und Seen. Zu einem großen Teil verdunstet es schnell, dank der Lebhaftigkeit der Winde; der Boden trocknet ab.

Damit wird auch der größte Teil der Strukturen in seiner Konsistenz zäher und schließlich hart. Nur in den kleinen und großen Tümpeln oder Seen und am Fuße von Schneefeldern oder im Bereich von Grundwassersammelstellen, z. B. dicht vor dem Strand des Meeres oder eines Sees usw., oder im Bereich von Grundwasserströmen, die von Schneeflecken oder Gletschern lange oder gar ständig genährt werden, bleibt die breiige Konsistenz erhalten. Der erste Schneefall im Herbst, der wieder schmilzt, und auch Regen kurz vor der Frostperiode führen neue Wassermengen dem Boden und damit auch den vielen bereits stark abgetrockneten Strukturen zu. Diese Mengen sind nicht unbedeutend, wie das Steigen der Bäche und Flüsse vor Einbruch des Winters recht anschaulich macht. Viele Strukturen nehmen so, dank ihres besonderen Wasseraufnahme- und Wasserbindungsvermögens, wieder die notwendige Wassermenge auf, die sie zur Aktivität befähigt, sobald der Frost in den Boden dringt und bald jede Wasserbewegung an der Erdoberfläche, und später auch im Boden, zum Stillstand bringt. Die Frostwechsel-



In einem umgekehrten Verhältnis dazu steht nach Ansicht mancher Forscher die kapillare Steighöhe oder Kapillarität (H) der Böden. Von ihnen werden die Poren­gänge im Boden als Kapillarröhrchen wie in der Physik betrachtet. Aus der Ober­flächen­spannung des Wassers und dem Durchmesser der Kapillaren berechnen sie dementsprechend die Steighöhen im Boden (s. Tab. 3). Es ergeben sich damit für

Tabelle 3. Die kapillare Steighöhe in verschiedenen Bodenarten;  
nach KÖGLER-SCHIEDIG (1944)

Feiner Sand . . . . .	H = 0,1— 0,5 m
Schluffsand . . . . .	= 0,5— 2,0 m
Löß (gestörte Bodenprobe) . . . . .	= 2,0— 5,0 m
Lehm . . . . .	= 5,0—15,0 m
Magerer Ton . . . . .	= 15,0—50,0 m
Fetter Ton . . . . .	= 50,0 m u. mehr

die praktisch schwerstdurchlässigen Böden außerordentliche Steighöhen. Bereits für Schluff und Löß sind Werte angegeben, die mit den tatsächlichen Steighöhen in keiner Weise übereinstimmen. Wie VAGELER (1932) gezeigt hat, liegen die größten Steighöhen des Wassers im Boden unter 2 m. Außerdem hat er nachgewiesen, daß die Steighöhe des Wassers und seine Bewegung im Boden nur zum allergeringsten Teil durch Kapillarwirkungen verursacht ist, sondern daß vielmehr osmotische Kräfte die Wasseraufnahme und Wasserbewegung im Boden steuern. Diese Kräfte ergeben sich aus der Kationenbelegung der Bodenteilchen. Damit unterliegt auch die Wasserbewegung im Frostboden nicht nur dem Gesetz der Schwerkraft, sondern – was in diesem Zusammenhang entscheidend ist – auch denselben elektrischen Grundgesetzen, die alle übrigen Prozesse in der Materie beherrschen:

Gleiche elektrische Ladungen, Massenteilchen oder Pole, stoßen sich ab, ungleiche ziehen sich an.

Das Maß der Anziehung oder Abstoßung ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung (COULOMB).

Auf Grund der oben geschilderten morphologischen Verhältnisse und der Beschaffenheit des Bodens ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Gebieten oder Feldern, die das ganze Jahr über dank der Spende schmelzender Schneefelder und Gletscher reichlich Wasser haben, und solchen, die nur zur Zeit der Frühjahrsschmelze und je nach den Umständen bei den kleinen einzelnen Schneeschmelzen zur Herbst-Winterzeit mit Wasser versorgt sind. Und drittens gibt es Stellen, die durch Lage, Exposition und Untergrundverhältnisse u. a. Lokalbedingungen bereits sehr schnell relativ trocken sind und nur ausnahmsweise oder gelegentlich in sehr niederschlagsreichen Jahren auch naß sind, wie schmale Schutterrassen außerhalb des Bereiches von Firnfeldern oder Gletscherbächen.

Die Grundwasserverhältnisse sind sich also weithin insofern sehr ähnlich, als überall die Gefornis in geringer Tiefe den Grundwasserstauer abgibt und die geringe Mächtigkeit des Grundwasserhorizontes bestimmt. Hieraus ergibt sich die große und besondere Bedeutung des Reliefs für den Wasserhaushalt in der Arktis. Gelegentlich

wird der Grundwasserstauer auch durch den festen Fels vertreten, wie ich u. a. vor einem kleinen Gletscher im ersten südlichen Nebental des Köcherfliegentalles an der Liefde-Bay beobachten konnte. Dort war in einem Kessel aus festem Fels von 0,5 m Durchmesser ein einziger, der felsigen Kesselform angepaßter „Brodeltopf“ mit schwacher Wölbung und dickbreiiger Konsistenz der Kesselfüllung (Juli 1936) vorhanden. Der Eispickel ließ sich leicht bis auf den Grund eindrücken, der hier bei der Tiefe von 0,3 m zweifellos noch über der Bodengefrorenis lag.

Den so im wesentlichen dargelegten Grundwasserverhältnissen der Arktis entspricht grundsätzlich die Verbreitung und Ausbildung der Polygonstrukturen, der Netze, Ringe und Streifen:

Den im Frühsommer und bis in den Spätherbst hinein trockenen Gebieten fehlen die ringförmigen oder polygonalen Strukturböden überhaupt. An den im Sommer und bei Einsatz des Frostes nur mäßig feuchten Stellen treten die trägen, sich scheinbar nicht verändernden Strukturen auf, bei denen die Wassermengen nicht ausreichen, um im Winter eine starke Wölbung hervorzubringen und auch nicht, um Wölbung und Spaltenbildung im Frühjahr rückgängig zu machen. Im Gegenteil: Verdunstung führt hier zur vollkommenen Verhärtung der Kruste im Strukturfeld und Erhaltung der Winterform während des Sommers, wobei dann gelegentliche Durchfeuchtung und Gefrieren der Oberflächenschicht die Krümmung der Einzelzellen verstärkt. „Blumenkohlformen“ (Taf. 3 Fig. 1) und die sekundären wie auch tertiären Steinnetzstrukturen sind die entsprechenden Bildungen.

In jenen Zonen aber, die bis zum Beginn der Frostperiode durch Grundwasserzuflüsse oder -speicherungen mit Wasser reichlich versorgt sind, breiten sich die aufwölbenden und zusammensinkenden Frostbodenstrukturen aus. Die geeignete Position – horizontale oder nur sehr schwach geneigte Flächen – ist dabei für alle regelmäßigen Polygone die *conditio sine qua non*. Das ist das nicht mißzuverstehende Ergebnis meiner Kartierung des Küstenstreifens des Andréelandes an Liefde-Bay und Wide-Bay, sowie in seinen Tälern und auf seinen Hochflächen.

Damit haben wir auch eine Erklärung für das Auftreten der typischen kleinen Frostbodenmuster in außerarktischen Gebieten, für die Miniaturbildungen der Hochgebirge der Tropen insbesondere und die Variationsbreite der Polygonböden überhaupt. Sowohl eine tiefgehende, aber oben gut durchnäßte, als auch eine geringmächtige Bodenschicht auf undurchlässigem, wasserstauendem festem Untergrund antwortet bei ausreichend guter Wasserversorgung auf Frosteinwirkungen durch Frostmusterbildungen, wobei als erstes mechanisches Mittel die Wölbung und ihre Zerstörung bzw. Rückbildung in Funktion tritt.

Wie die Wasserverhältnisse gestaltet sind an den Örtlichkeiten, wo Froststrukturböden in den tropischen und subtropischen Gebieten vorkommen, geht aus den Berichten in der Literatur nicht klar hervor. An reichlicher Durchnässung der Böden vor Beginn des Gefrierprozesses bleibt jedoch kein Zweifel. Der Regen, also unmittelbarer Niederschlag, scheint keine ausschlaggebende Rolle zu spielen. Das für die Bildung der Strukturen notwendige Wasser wird der Schnee- und Gletscherschmelze entstammen. Denkbar ist auch eine Durchnässung der obersten Bodenschicht durch die Hygroskopizität des Bodens und den Tau, dessen Bildung dem Gefriervorgang

vorangeht. Der wasserstauende Horizont ist z. T. vertreten durch festen Fels, z. T. durch tonige, schwer durchlässige Bodenschichten. Die Wasseranreicherung in der Bodenkrume durch den Frost ist überdies auch hier der Träger der Solifluktion im Kleinen und im Großen.

Zwischen den tropischen und polaren Formen der Strukturböden scheint also auch in diesem Punkte volle Übereinstimmung zu bestehen.

Widerspricht dem aber nun nicht – wenigstens im arktischen Gebiet – das vielfache Fehlen der Strukturbildungen in stets nassen und zudem mehr oder weniger horizontalen Talböden? Maßgebend für die Auswirkung des Frostes erscheint jedenfalls der klimatisch bedingte Wasserhaushalt des Bodens. Somit ist das Kleinklima neben dem Relief von größter Bedeutung, d. h. also ein primärer Faktor. Die Ergebnisse der Untersuchungen von SIPLE (1952) und CRAWFORD (1952) über das Zusammenwirken von Ein- und Ausstrahlung, Wärmeleitung und -strömung, Windwirkung, Luft- und Bodenfeuchtigkeit sind als Bestätigung dieser Feststellung zu werten.

Andererseits entstehen Froststrukturen in den verschiedenartigsten Böden, wie sich aus der Literatur ergibt, und wie eingangs an der fossilen Struktur gezeigt worden ist. Also ist nicht allein das Klima, sondern auch die Bodenart, und zwar durch ihr Wasserbindungsvermögen, maßgebend für die Entwicklung des Bodenprofils und der Froststrukturen. Damit kommen wir zu den Beziehungen zwischen der Bodenbeschaffenheit und dem Wasser und sind genötigt, zunächst die Eigenschaften des Wassers und dann den Boden, das strukturbildende Substrat, und seine Eigenschaften näher zu betrachten.

#### b) Die Verteilung des Wassers im Boden

Mit der Bodenart ist die Verteilung des Wassers im Boden aufs engste verknüpft. Über seine Statik und Kinematik gelten heute die Vorstellungen, die von ZUNKER und VAGELER entwickelt worden sind.

Die einzelnen Bodenpartikel sind infolge der Adsorptionskräfte ihrer Kationenbelegung von Wasserhäutchen umhüllt. Das Wasser dieser Häutchen steht dementsprechend unter einem osmotischem Druck, der den Ladungen der Kationen entspricht (s. S. 22). Sie bilden sich mit der hygroskopischen Adsorption (hygroskopisches Wasser). Die Zahl der Hüllen ist sehr groß und um so größer, je stärker die Ladung des Kations ist. Nur die äußersten Hüllen sind von den Partikeln schwach gebunden. Mit der Vergrößerung des Abstandes der Häutchen vom Partikel werden Oberflächenspannung und Schwerkraft wirksam. Es bilden sich Menisken, und zwar zunächst in den Winkeln zwischen den sich berührenden Partikeln mit ihren Hüllen. Ist auch der übrige Raum voll Wasser, so daß nesterweise alle Poren gefüllt sind, so haben wir (funiculäres und penduläres) Kapillarwasser, das gewissermaßen nach allen Seiten offen liegt. VAGELER bezeichnet es als offenes Kapillarwasser. Durch Oberflächenspannung und Gravitation wird es gehalten oder bewegt in dem von Adsorptionskräften freien Raum zwischen den Partikeln und ihren Hüllen, in dem sogenannten spannungsfreien Porenvolumen. Dieses ist naturgemäß umso enger bemessen, je feiner die Partikel und je stärker ihre Ladungen sind.

Bestimmt die Gravitation die Wasserbewegung, so handelt es sich um Sickerwasser. Es staut sich auf schwer- oder undurchlässigen Schichten und erfüllt alle Poren so, daß die wasserbindenden Kräfte abgesättigt sind. Es ist frei beweglich und fließt in etwa vorhandene Hohlräume. Der Spiegel dieses Wassers kennzeichnet den Grundwasserspiegel. In einem schmalen Bereich darüber sind sämtliche Poren nach Maßgabe der Oberflächenspannung mit Wasser gefüllt. Es ist der geschlossene, unter Unterdruck stehende Kapillarwassersaum. Der offene Kapillarwassersaum kennzeichnet den Bereich, in dem die Sorptionskräfte der Bodenpartikel das Wasser noch entgegen der Gravitation bewegen können, also etwaigen Verbrauch in Oberflächenschichten durch Nachschub aus der Tiefe auszugleichen bestrebt sind. Der Punkt, bei dem diese Bewegung merklich langsamer wird, wird als lentokapillarer Punkt bezeichnet. Eine Aufwärtsbewegung des Wassers in die spannungsfreien Porenräume zwischen den Bodenpartikeln mit ihren Hüllen ist also nur sehr begrenzt. Ebenso ist auch die Wasserbewegung im offenen Kapillarwassersaum durch Austausch und Transport von Wassermolekülen von Hülle zu Hülle durch die Sorptionskräfte der Kationen beschränkt. VAGELER hat überzeugend dargelegt, daß diese Sorptionskräfte dem osmotischen Unterdruck gleichzusetzen sind. Die Wasserbewegung im Boden ist also osmotischer Natur. Im Froststrukturen bildenden Boden steht, wie die bisherigen Untersuchungen gezeigt haben, zunächst reichlich Kapillarwasser zur Verfügung. Mit fortdauernder Frosteinwirkung aber wird dieses Wasser durch die Eisbildung schnell verbraucht. Wasseraustausch von Hülle zu Hülle der Partikel muß dann einsetzen. Dem stehen die Sorptionskräfte der Bodenpartikel entgegen. Außerdem zeigen gerade die Böden mit feineren Bestandteilen größte Frostwirkung, während das Volumen für echtes Kapillarwasser im spannungsfreien Porenraum mit zunehmender Kornfeinheit kleiner und damit auch die Reibung für die Wasserbewegung immer größer wird. In diesem Befunde scheinen Widersprüche zu liegen, die sich aber bei Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften des Wassers unter Frosteinwirkung auflösen. Darauf ist noch einzugehen.

Um das Wasser nach oben zu bewegen, muß die Oberflächenspannung der Menisken, die Schwerkraft und auch die bei den Bewegungen auftretende Reibung überwunden werden. Die Beobachtungen lehren aber auch, daß nicht nur das Kapillarwasser zur Gefrierzone bewegt wird, sondern daß sich überhaupt der ganze Wassergehalt des Bodens beträchtlich vermindert zugunsten der Wasseranreicherung im Gefrierbereich. Die Zahlen von WEGER (s. S. 39) lassen z. B. deutlich erkennen, daß bereits bei geringer Frosteinwirkung die von den Bodenteilchen zur Absättigung der wasserbindenden Kräfte festgehaltene Wassermenge, das ist die minimale Wasserkapazität, die hier bei 20—25% liegen wird, angegriffen ist. Auch aus der neueren amerikanischen Literatur lassen sich ähnliche Zahlen anführen (s. SYMPOSIUM 1952). Die Wasserbewegung im Frostboden muß also auch die wasserbindenden Kräfte der Bodenpartikel überwinden. Es erscheint demnach unmöglich, die Kapillarkräfte zur Erklärung der Wasserbewegung im Frostboden heranzuziehen. Alle sich hierauf gründenden Deutungen der Strukturbildung müssen deshalb zweifelhaft sein. Es ist deshalb notwendig, die weitere Untersuchung auf die Eigenschaften des Wassers, auf sein normales Verhalten und seine normale Verteilung im Boden zu gründen.

## c) Eigenschaften und Verhalten des Wassers

Wasser ist durch seine Anomalien, die durch seinen Schmelz- und Siedepunkt, die Temperatur- und Druckabhängigkeit seines Volumens, seiner Viskosität, seiner Ionenbeweglichkeit u. a. zum Ausdruck kommen, eine der „sonderbarsten Flüssigkeiten“ (ULICH 1935).

Auf Grund der Dichteanomalie des Wassers und Eises vermutete RÖNTGEN (1892) als erster, daß flüssiges Wasser in der Nähe der Gefrieretemperatur eine große Menge „Eismoleküle“ enthalte. Da diese voluminöser sind als die Moleküle des eigentlichen Wassers, setzen sie die Dichte der Flüssigkeit herab. Temperatur- und Druckerhöhungen, sowie die elektrischen Ionenfelder lösen die Eismoleküle zunehmend auf. TAMMANN (1910) stützte diese Vorstellung durch die Entdeckung, daß bei Drucken von 2000 at aus Wasser weit dichteres Eis auskristallisiert. Auch die hohe Schmelztemperatur konnte durch den Bedarf an Wärme für das Schmelzen der Eismoleküle im tieftemperierten flüssigen Wasser erklärt werden. Man glaubte in dieser Zeit, im Eis „Trihydrol“ ( $\text{H}_2\text{O}$ )<sub>3</sub>, im flüssigen Wasser „Dihydrol“ ( $\text{H}_2\text{O}$ )<sub>2</sub> und im Dampf „Monohydrol“ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) vor sich zu haben. Dieses Problem wurde aber erst später durch BERNAL und FOWLER (1933) gelöst. Durch Analyse des Röntgenspektrums gelang es ihnen, eine Vorstellung von den Molekülformen und ihren mengenmäßigen Anteilen im Wasser zu gewinnen. Von grundsätzlicher Bedeutung sind außerdem die Arbeiten von BRIDGMANN (1912), ULICH (1936), TAMMANN (1938), REMY (1939), DEBEYE (1929 und 1939) und KALLE (1942 und 1943).

Im Wassermolekül (H–O–H) liegen die positiv geladenen H-Kerne nicht einander gegenüber, sondern sie bilden mit den doppelt positiv geladenen O-Kernen einen Winkel von ungefähr 110°; der theoretisch berechnete Winkel hat eine Größe von 109° (BERNAL und FOWLER). Infolge dieses unsymmetrischen Baues und der ungleichen Lage der Ladungen ist eine starke Polwirkung gegeben, und zwar ein Dipol.

Den elektrischen Kräften entsprechend sind solche Moleküle, wie sie für das Wasser eigentümlich sind, bestrebt, sich tetraedrisch zusammenzulagern, d. h. zu assoziieren (s. Abb. 1) und ein Tridymitgitter (Wasser I) zu bilden, in dem jedem O-Atom vier H-Atome zugeordnet sind. Seine großmaschige Struktur bedingt die geringe Dichte des gewöhnlichen Wassers (I) und zugleich des Eises (I). Daneben gibt es die dichtere Packung mit quarzitähnlicher Anordnung der Moleküle (Wasser II) und eine noch dichtere, in der die Wassermoleküle eine „Kugelpackung“ haben, (Wasser III)

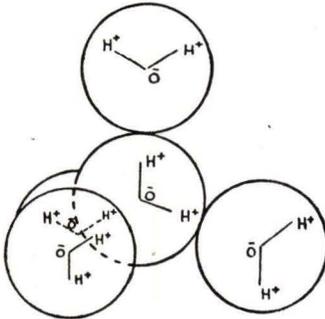


Abb. 1. Bau und tetraedrische Koordination der Wassermoleküle (nach BERNAL und FOWLER 1933). Die Wasserstoffatome liegen im Wassermolekül sich nicht gegenüber, sondern bilden mit dem Sauerstoffatom einen Winkel von rd. 109°. Infolgedessen ist eine starke Dipolwirkung gegeben, die zu tetraedrischer Koordination und zur Bildung eines Gitters wie bei Tridymit führt. In der Darstellung ist das unter der Zeichenebene liegende Molekül durch den Bogen links angedeutet, während das vor der Zeichenebene liegende Molekül ausgezeichnet ist und das darunter liegende zum Teil verdeckt (in der Zeichnung gestrichelt).

Während das Wasser (I) bzw. Eis (I) in Tridymitform das größte Volumen hat, ist dem Wasser (III) mit Kugelpackung die größte Dichte eigen. Dank der starken Dipolwirkung lagern sich die Moleküle im flüssigen Wasser zu Aggregaten, zu „Schwärmen“ zusammen.

Da bei steigenden Temperaturen die elektrostatischen Kräfte gegenüber den wachsenden thermischen Energien (Bewegungsenergien) sich nicht durchzusetzen vermögen, lösen sich die Gitter des Wassers (I) und (II) auf, und es kommt zu der Kugelpackung des Wassers (III). Der besondere Charakter des Wassers beruht also auf seiner Neigung zur tetraedrischen Koordination; dadurch zeichnet es sich vor verwandten Stoffen aus (ULICH 1936). In seiner flüssigen Phase besitzt es bei niedrigen Temperaturen noch eine halb kristalline Struktur (flüssige Kristalle). Mit der Abnahme der Temperatur, d. h. der thermischen Energie setzen sich die

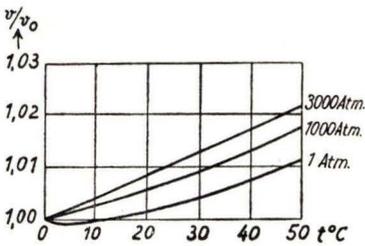


Abb. 2 Thermische Ausdehnung des Wassers bei verschiedenen Temperaturen und Drucken (nach TAMMANN (1938))

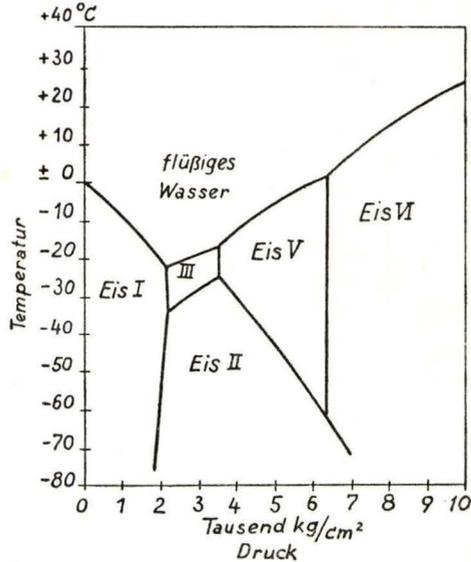


Abb. 3 Zustandsdiagramm des Wassers (nach TAMMANN und BRIDGMANN aus KALLE 1943)

elektrostatischen Kräfte durch, und es bilden sich zunehmend die Tetraederstrukturen der Eiskristalle.

Die Veränderung der inneren Struktur des Wassers mit der Änderung der Temperatur erklärt das ungewöhnliche Verhalten des Wassers. Da dies gerade im Bereich um den Gefrierpunkt am stärksten in Erscheinung tritt, hat es für die Vorgänge im gefrierenden Boden erhöhte und entscheidende Bedeutung. Die thermische Ausdehnung wird bei steigender Temperatur überlagert von der Auflösung der lockeren Strukturform (Wasser I) und der Entwicklung der dichtesten Packung (Wasser III). Im Bereich von 0° bis 4° wird diese Ausdehnung überkompensiert (KALLE 1942, 1943). Hieraus ergibt sich die größte Dichte des Wassers bei 4° und das gleiche Volumen für 0° und 10° C unter einem Druck von 1 at (Abb. 2). Unter hohen Drucken ist diese Anomalie ausgeglichen. Das ist für die Beweglichkeit des Wassers unter der Frostschrift wichtig. Der Frostdruck kann bekanntlich sehr hohe Werte erreichen, was zweifellos bei den Froststrukturen der Fall ist. Auch das Hüllwasser der Bodenpartikel steht unter außerordentlich hohen Drucken (VÄGELER 1932).

Es sind osmotische Drucke von vielen Tausend Atmosphären. Sie sind umso größer, je näher das Wasserhäutchen an den Bodenpartikelchen liegt. Soweit es sich nicht um erstes echtes Kapillarwasser in spannungsfreien Poren handelt, das beim Gefrieren bewegt wird, gibt es im Frostboden kein Wasser, das unter normalen Bedingungen in Eiskristalle umgewandelt wird. Das Zustandsdiagramm des Wassers (Abb. 3) läßt deutlich erkennen, daß unter hohen Drucken nicht nur verschiedene Eisarten auftreten, sondern daß bei Temperaturen bis zu  $-20^{\circ}$  noch flüssiges, bewegliches Wasser

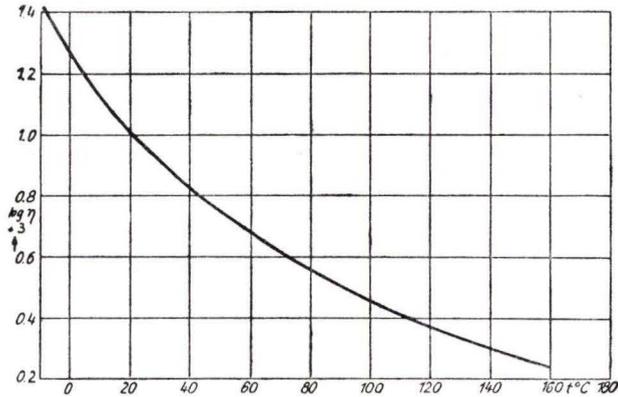


Abb. 4. Die Abhängigkeit der Viskosität des Wassers von der Temperatur (nach Ulich 1936)

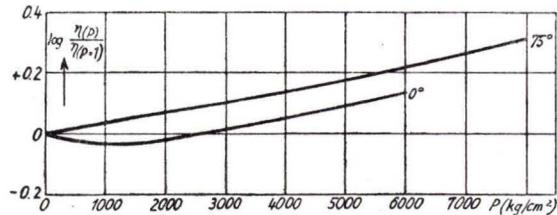


Abb. 5. Die Abhängigkeit der Viskosität des Wassers vom Druck (nach Ulich 1936)

vorhanden ist, wobei der Druck nur rund 2 Tausend  $\text{kg/cm}^2$  zu betragen braucht (TAMMANN 1910, 1938, BRIDGMANN 1912, REMY 1939). Möglicherweise ändert sich die innere Struktur des Eises im Frostboden bei der Fortdauer und dem tieferen Eindringen des Frostes.

Die Viskosität des Wassers nimmt mit sinkender Temperatur zu, und zwar ist ihre Zunahme zwischen  $100^{\circ}$  und  $60^{\circ}$  konstant, mit Annäherung an den Gefrierpunkt aber steigt sie ganz stark an (Abb. 4). Ganz anormal ist die Viskosität des Wassers bei Druckbeanspruchung (Abb. 5), indem sie schon bei geringem Druck negativ ist. Die Viskositäts-Druckkurve des Wassers von  $0^{\circ}$  C läßt keinen Zweifel, daß das Wasser im Frostboden sehr beweglich ist.

Dagegen ändert sich die Oberflächenspannung des Wassers in der Weise, daß mit Annäherung an den Gefrierpunkt, also der zunehmenden Entwicklung der Mole-

külarten des Wassers I, eine Abnahme erfolgt (Abb. 6; TAMMANN 1938). Auch das fördert die Beweglichkeit des Wassers im gefrierenden Boden.

Unter der Einwirkung des Druckes verschwindet das dem Wasser bei 4° C und 1 at Druck ganz eigentümliche Dichtemaximum. Das Verhalten des Wassers ist in diesem Punkte ganz entgegengesetzt dem anderer Flüssigkeiten. Elektrolytzusatz hat denselben Effekt. Dem äußeren Druck entspricht der innere Dampfdruck (Abb. 7).

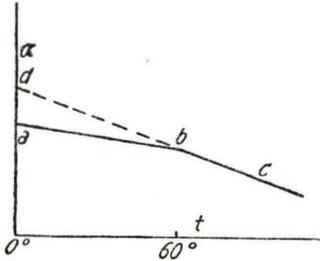


Abb. 6. Die Abhängigkeit der Oberflächenspannung des Wassers von der Temperatur (nach TAMMANN 1938)

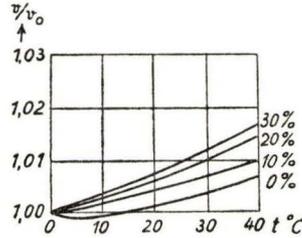


Abb. 7. Die thermische Ausdehnung des Wassers bei verschiedenen Elektrolytzusätzen ( $\text{CaCl}_2$ ) (nach TAMMANN 1938)

Unter hohem Druck und durch Elektrolytzusatz wird also die Vierer-Koordination des Wassers, die Eismolekülstruktur, aufgelöst und zerstört und das Wasser beweglicher.

Als Folge der Vierer-Koordination der Wassermoleküle zu dem weitmaschigen tridymitartigen Kristallgitter bewirkt die Erhöhung des Druckes eine Erniedrigung des

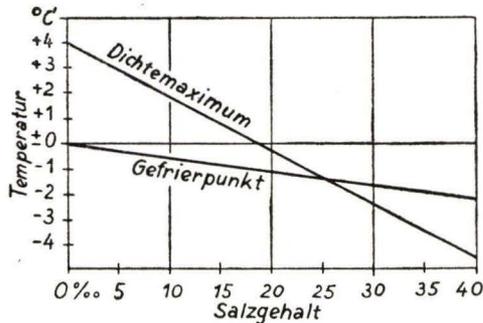


Abb. 8. Die Abhängigkeit des Gefrierpunktes und des Dichtemaximums des Meerwassers vom Salzgehalt (nach KALLE 1943)

Gefrierpunktes (s. Abb. 3). Bei normalen Flüssigkeiten ist das Gegenteil der Fall. Eine Erhöhung des Salzgehaltes wirkt in gleicher Weise wie die Druckerhöhung infolge Erniedrigung des Dampfdruckes. Gefrierpunkt und Dichtemaximum verschieben sich in Richtung der zunehmenden Konzentration und gleichzeitig in den Bereich der Temperatur unter 0° C (Abb. 8). Bereits bei einem Salzgehalt von weniger als 2‰ liegt das Dichte-Maximum bei 0° C und der Gefrierpunkt bei -1° C. Das gilt

für Eisbildung unter normalem Druck. Bei Drucken über  $2000 \text{ kg/cm}^2$  bildet sich Eis, das dichter ist als gewöhnliches Eis und größtenteils dichter als flüssiges Wasser bei höherer Temperatur (TAMMANN 1910) (s. a. Abb. 3).

Bekanntlich übersteigt die Sprengkraft des Eises die normalen Drucke im Boden und Gestein ganz erheblich. Bei  $-22^\circ \text{ C}$  erreicht sie z. B. bereits  $2100 \text{ kg/cm}^2$  (BRINKMANN 1950, S. 9). Der Ausdehnungskoeffizient des Wassers unter normalen Verhältnissen wächst mit Annäherung an den Gefrierpunkt an. Bei wachsendem Druck nimmt er nur langsam ab. Im Mittel kommt auf  $1 \text{ kg/cm}^2$  Druck eine Gefrierpunktserniedrigung von  $0,008^\circ \text{ C}$ .

Die Kompressibilität des Wassers nimmt bei steigenden Drucken zwar ab, doch mit fallender Temperatur zu (Abb. 9). Unter hohen Drucken zeigt auch die Volumenkurve nicht mehr das Minimum bei  $4^\circ \text{ C}$  und die Volumengleichheit bei  $0$  und  $+10^\circ \text{ C}$ , wie bei einem Druck von  $1 \text{ kg/cm}^2$ , sondern sie ist linear. Bedingt ist dies dadurch, daß unter hohem Druck die Molekülaggregate I und II verschwinden und nur die Molekülarart III (Kugelpackung) übrigbleibt.

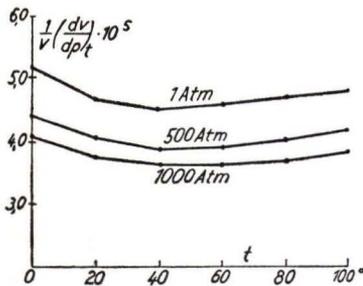


Abb. 9. Die Abhängigkeit der Kompressibilität des Wassers von der Temperatur bei verschiedenen Drucken (nach TAMMANN 1937)

Mit wachsendem Druck verschiebt sich das Minimum des Volumens nach den tieferen Temperaturen hin bis zum  $0$ -Punkt. Bereits bei  $300 \text{ kg/cm}^2$  ist es verschwunden.

Der Wert  $l$  der spezifischen Wärme ist im Vergleich mit anderen Flüssigkeiten hoch, ebenso Schmelzwärme ( $79 \text{ cal/g}$ ) und Verdampfungswärme ( $540 \text{ cal/g}$ ). Auch sie erklären sich durch die besondere Molekülstruktur, bzw. -assoziation. Bei

der Eisbildung ordnen sich sämtliche Wassermoleküle in Vierer-Koordination zu dem weitmaschigen tridymitartigen Kristallgitternetz. Die Diagramme lehren, daß der Gefriervorgang im Boden ein sehr komplizierter Prozeß ist. Praktisch werden die einzelnen Momente überhaupt nicht präzise erfaßbar sein. Nichtsdestoweniger muß man sie voll berücksichtigen, wenn man das Verhalten des Wassers und des Bodens unter Frosteinwirkung verstehen und schließlich beherrschen will. Es zeigt sich damit schon, in welcher Richtung zukünftige Aufgaben der Frostbodenforschung liegen.

Zu weiterem Verständnis des ungewöhnlichen Verhaltens des Wassers führen uns die von dem Nobelpreisträger DEBYE in den Arbeiten „über polare Molekeln“ (1929) und „die Struktur der Materie“ (1933) entwickelten Vorstellungen. Für unseren speziellen Fall ist darüber hinaus nach den von VAGELER (1932) durchgeführten Untersuchungen über den Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens auch der Frostboden als polydisperses System von Bodenteilchen, Wasser und Luft zu betrachten. Im Frostboden nimmt das Wasser in diesem System in allen drei Phasen teil: als festes Eis, flüssiges Lösungsmittel und als gasförmiger Stoff, d. h. als Wasserdampf neben der Luft. Für die Vorgänge, die Statik und Dynamik in einem solchen System, ist das elektrolytische Verhalten seiner Komponenten auch als Diëlektrika maßgebend.

Als Diëlektrikum wird ein Stoff bezeichnet, in dem ohne beständige Zufuhr einer elektrischen Ladung ein statisches elektrisches Feld bestehen bleibt. Dies ist dadurch möglich, daß die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen infolge einer gleichmäßigen Anordnung im Molekül zusammenfallen. Das Molekül wirkt dementsprechend neutral. Sobald es aber in ein elektrisches Feld gelangt, wird es polarisiert, d. h. der Schwerpunkt der positiven Ladung wird nach der einen, der Schwerpunkt der negativen Ladung nach der anderen Seite verschoben. Damit erfolgt eine Verdichtung der Ladungen. Es besitzt damit aber auch ein induziertes elektrisches Feld, wie wenn es zwischen zwei Kondensatorplatten gebracht wird. Dieses zusätzliche Feld wiederum wirkt sich auf die Kondensatorplatten durch Erhöhung ihrer Kapazität aus, und zwar um einen bestimmten Betrag, nämlich die Diëlektrizitätskonstante ( $\epsilon$ ). Sie kennzeichnet das Verhältnis der diëlektrischen Verschiebungsdichte ( $D$  bzw.  $\epsilon_{\text{rel}}$ ) zur elektrischen Feldstärke ( $E$ ). Die Beziehung ist:  $D : E = E : \epsilon_{\text{rel}}$ .

Die relative Diëlektrizitätskonstante ist eine reine Zahl, eine Materialkonstante.  $\epsilon_0$  ist die absolute Diëlektrizitätskonstante des Vakuums. Sie ist bestimmt mit  $8,8543 \cdot 10^{-12}$  Asec/Vm. Die relative Diëlektrizitätskonstante des Wassers ist 80,8, die des Eises ist 2 bis 3.

Der Wert des Wassers ist nicht nur ungewöhnlich hoch, sondern auch ganz erheblich größer als der des Eises. Da nun zwischen der Kapazität  $C$ , der Ladung (Elektrizitätsmenge)  $E$  und dem Potential  $P$  eines Kondensators die Beziehung

$$E = CP = \epsilon C_0 P$$

besteht, so ändert sich bei gleichbleibender Ladung, aber wechselndem Diëlektrikum das Potential im umgekehrten Verhältnis zur Diëlektrizitätskonstante  $\epsilon$ , so daß

$$P = \frac{E}{\epsilon C_0}$$

Nun ist die Kapazität eines Partikels gleich dem Produkt von Diëlektrizitätskonstante und Teilchenradius ( $r$ ), also  $C = \epsilon \cdot r$ . Daraus ergibt sich für das Potential

$$P = \frac{E}{\epsilon \cdot r}$$

Nach dem COULOMBSchen Gesetz ist dann die Kraft  $K$ , mit der die Anziehung oder Abstoßung zwischen zwei Teilchen, bzw. Ladungen erfolgt

$$K = \frac{E_1 \cdot E_2}{\epsilon \cdot r^2}$$

Das bedeutet, daß die anziehenden oder abstoßenden Kräfte zwischen den positiven und negativen Ladungen sich proportional der Vergrößerung der Diëlektrizitätskonstante vermindern. Da die Diëlektrizitätskonstante für Wasser rund 81 ist, ergibt sich beim Gefrierprozeß in dem polydispersen System Boden eine erhebliche Vergrößerung der anziehenden Kraft, d. h. ein größeres Potential für das Eis. Aus dem vorher stabilen System entwickelt sich unter Einwirkung des Frostes das instabile System mit dem Kräfteverhältnis

$$\frac{E}{81 \cdot r} \neq \frac{E}{2 \cdot r}$$

Die anziehenden Kräfte des Eises sind also rund 27 bis 40 mal größer als die des Wassers. Da das flüssige und gasförmige Wasser beweglich ist, das gefrorene aber fest sitzt und im Gitter der Eiskristalle zwischen den Bodenpartikeln eingebaut ist, so ergibt sich ohne weiteres die an sich erstaunlich starke Wasserbewegung zur Gefrierfront entgegen der dabei unbeträchtlich erscheinenden und auf das Wassermolekül einwirkenden Schwerkraft. Größerer Widerstand aber ist zu erwarten von den wasserbindenden Bodenpartikeln, die ja ebenfalls elektrische Ladungen haben. Außerdem muß die durch die Packung und Lagerung der Bodenpartikel bedingte Reibung von größter Bedeutung sein.

## 2. Der Boden

### a) Bodenbildung und Froststruktur

Der in der fossilen Struktur im Wartheland bei Parschmiechy konservierte Inhalt besteht aus braunrotem Verwitterungslehm des Tertiärs und pleistozänem graugelbem Sand. Der Lehm ist stark porös, klüftig und rissig und entsprechend kantigkrümelig. Die Hauptbruchflächen stehen etwa radial bis fächerförmig zur Mitte bzw. zum sandigen Kern. Die Absonderungsform erscheint somit schalig und säulig (Tafel 1 Fig. 2).

Zur Feststellung der Korngrößen wurde (im Labor des damaligen Reichsamtes für Bodenforschung, Berlin) eine Schlämmanalyse durchgeführt. Sie ergab die in Tab. 4 wiedergegebene Korngrößenverteilung.

Tabelle 4. Korngrößenanteile im Boden der Strukturkessel von Parschmiechy  
Korngrößen in  $\mu$  und %

	20	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2	Summe 10-0,2
Probe aus d. lehmigen Kesselfüllg.	39,4	7,1	10,8	4,1	8,7	8,3	9,2	12,4	53,5
Probe aus d. lehmigen Schuttpekg.	59,8	4,4	3,9	5,2	7,0	7,1	4,2	8,4	35,8
Probe aus d. sandigen Deckschicht	67,8	1,7	4,7	1,6	5,6	7,0	3,6	8,0	30,5

Hieraus geht hervor, daß in der lehmigen Kesselfüllung die Korngrößen unter  $10\mu = 0,01$  mm einen Anteil von mehr als 53% haben. Sie sind angereichert oder entwickelt worden in einem Schuttboden, der primär dieselben Korngrößen nur zu 35,8% enthält (s. zweite Zeile in Tabelle 4).

Die Tatsache, daß die Substanz unseres fossilen Brodelkessels an der Warthe aus tertiärem Verwitterungslehm, also aus dem Produkt eines warmen und damit chemisch sehr aktiven Klimas besteht, beweist, daß die Verwitterung und Bodenbildung unter polarem oder subnivalem Klima keine Voraussetzung und Vorbedingung für

periglaziale Strukturböden ist, d. h. so sehr die Bodenbildung auch die Funktion des Klimas darstellt, so wenig ist sie auf Grund dieser Beziehung der Träger des Strukturphänomens. Dagegen ergibt sich aus der obigen Analyse eine unmittelbare Beziehung zwischen Korngröße und Strukturbildung.

Physikalische und chemische Verwitterung, d. i. die Bildung des Bodens nach Bodenart und Bodentyp, sind für die Ermöglichung der Strukturbildung demnach als gleichwertig anzusehen. Nicht in den grundsätzlichen, verschiedenen Bodenbildungsformen und -vorgängen liegt das Geheimnis der Strukturbodenerscheinungen, sondern im Boden an sich, in seinen Eigenschaften und besonderen Eigenarten, die unter bestimmten uns schon bekannten äußeren Bedingungen, also dem Wasser und Frost, formgebend in Erscheinung treten. Die Suche nach den spezifischen Eigenschaften des Bodens, die unter jenen besonderen Bedingungen des hohen Wassergehaltes bei Frosteinwirkung zur Strukturbildung führen, aber muß – das lehrt eindringlich das Studium der fossilen Form – geleitet werden von der Frage: Welches ist die Mechanik der Strukturbildung?

Die Auswirkungen des Frostes auf technische Anlagen, speziell auf Wege und Straßen, gaben in den nordischen Ländern bereits früh den Anlaß zur experimentellen Untersuchung der Frostbeulen und ähnlicher zerstörender Frostwirkungen. In Nordamerika und schließlich später auch in Deutschland folgte man dem Zwang, Herr über die unerwünschten Straßenschäden zu werden, und man stellte eingehende Laboratoriumsuntersuchungen an, die zu sehr schönen Erfolgen führten und die Lösung der Strukturbodenprobleme weitgehend befruchteten. TABER, BESKOW, CASAGRANDE und DÜCKER sind hier vor allem zu nennen. Ihre Ergebnisse werden neben denen älterer Forscher im nachfolgenden zugrunde gelegt.

Die Eigenschaften des Bodens sind komplexer Art und, soweit sie uns hier für das System Wasser-Eis interessieren, gebunden an die einzelnen Bodenpartikel.

## b) Korngröße und Frostgefährlichkeit

Die Korngrößen des Bodens bestimmen in erster Linie seine Eigenschaften. Durchlässigkeit, Wasseraufnahmefähigkeit, Porenvolumen, Schwinden, Plastizität und Festigkeit sind durch sie bereits wesentlich und scharf umrissen, wie die vielen experimentellen Untersuchungen der Bodenmechaniker und Bodenkundler ergeben haben. Auch für die Gefriervorgänge sind sie, wie bereits JOHANSON und BESKOW früh gezeigt haben, von entscheidender Bedeutung. Die Korngrößenanalysen unseres fossilen Strukturbodens von der Warthe reihen sich ohne weiteres in die anderer fossiler Strukturböden und neben diejenigen von rezenten Brodel- und Fließerdeböden (BESKOW, DÜCKER 1939, JOHANSSON, KOKKONEN und SÖRENSEN). Sie alle zeigen uns, daß die Partikelgrößen von 0,1 bis 0,06 mm oft den Hauptbestandteil bilden, stets aber einen sehr hohen prozentualen Anteil ausmachen. Die nachfolgenden beiden Beispiele von vielen anderen sollen dies belegen. SÖRENSEN (1935) und MOOS stellten die in Tabelle 5 wiedergegebene typische Korngrößenzusammensetzung in arktischen Strukturböden fest. Diese Befunde sind seitdem immer wieder bestätigt worden.

Tabelle 5. Korngrößenverteilung in arktischen Strukturböden;  
nach MOOS und SÖRENSEN (1935)

Korngrößen in mm	SÖRENSEN				MOOS
über 20 .....	—	—			13
20—2 .....	—	—			16
2,0—1,0 .....	1,6	9,0	0,2	1,4	10
1,0—0,2 .....	48,2	33,2	11,0	10,4	41
0,2—0,002 .....	33,0	31,4	19,0	25,6	29
0,002—0,0002 .....	9,3	20,0	37,9	28,6	3
unter 0,0002 .....	7,9	6,4	31,9	34,0	?

Daß diese Partikelgrößen auch in solchen Böden vorkommen, die nicht durch Strukturbildung ausgezeichnet sind, besagt lediglich, daß die andere Voraussetzung fehlt, nämlich eine reiche oder gar überreiche Wasserversorgung zu Beginn und während des Gefrierens. Die Auswirkungen des Frostes in unserem gemäßigten Klima bestätigen dies. Hier beobachten wir besonders umfangreiche Schäden dann, wenn die Witterungsverhältnisse durch schnelle Schneeschmelzen und Frostwechsel zu großen Wasseranreicherungen im Boden führen, wie z. B. im Winter 1954/55.

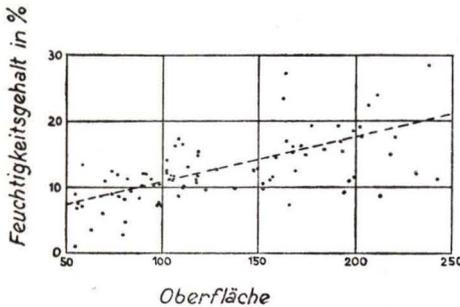


Abb. 10. Wassergehalt und Oberflächenentwicklung in einer Bodenprobe (nach HVEEM 1952). Das Diagramm zeigt die für die Wasserbewegung im Frostboden in Frage kommende Beziehung zwischen dem Wassergehalt und dem Ausmaß der adsorbierenden Oberflächen der Bodenpartikel. Die Oberfläche ist eine Funktion der Korngröße. Die Streuung um die gestrichelte Linie ist auf das unterschiedliche Hydratationsvermögen der Kationenbelegung der Bodenpartikel zurückzuführen. Auf der Abszisse sind die Oberflächen in Quadratfuß (= 0,0929 qm) pro amerikanische Pfund (= 0,454 kg) aufgetragen.

Die bekannte Fähigkeit der Partikel der feinen Größenordnungen, also speziell der Tonteilchen, Wassermoleküle an sich zu reißen, sehr schnell Hydrathüllen zu bilden und ihrer gewaltigen Oberfläche entsprechend enorme Wassermengen anzulagern (VAGELER 1932), ist entscheidend für Ausbildung und Wirkung des Frostes im Boden. Neuerdings hat HVEEM (1952) die Beziehung zwischen den Oberflächen der Partikel und dem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens dargestellt (Abb. 10).

Von größter Bedeutung sind dabei Art und Menge der die Bindigkeit des Bodens bestimmenden Tonminerale: Na-haltiger Boden ist weit mehr befähigt, Wassermoleküle anzulagern und deshalb zu quellen, als z. B. Al'- und Fe''-haltiger Boden, während das Aufnahmevermögen des Ca- und Mg-Bodens wohl geringer, aber immer-

hin noch sehr beträchtlich ist (ENDELL 1935 nach DÜCKER 1940). Das Wasseranlagerungsvermögen, d. h. die Hydratationsenergie ist für Lithium > Natrium > Kalium > Rubidium > Caesium; und für Magnesium > Calcium. Damit haben wir eine klare Beziehung zwischen Größe, Oberfläche, Hydratationsvermögen und, wie noch zu zeigen ist, der „Frostgefährlichkeit“ der Bodenpartikel.

In der Praxis haben die Untersuchungen der Krongrößen zur Trennung in frostgefährliche und frostungefährliche Böden geführt (BESKOW, CASAGRANDE 1934, ENDELL) und die Straßenbauer –zuerst in Schweden und Finnland, dann in Amerika und bei uns – zu systematischen experimentellen Untersuchungen veranlaßt. Es war dabei erkannt worden, daß die Frosthebung auf dem Gehalt des Bodens an feinkörnigen Bestandteilen und der davon abhängigen Wasseraufnahme durch ihr „Ansaugvermögen“ beruht, was dann bei Frost zur Bildung der beobachteten Eisschichten führt (HOLMQUIST 1898, JOHANSSON 1913, KOKKONEN 1926 u. a.). Die Wasseraufnahme führt an sich schon zur Volumenvergrößerung, indem das Korngefüge gelockert wird oder bei Tonmineralien Wasser sogar in das Gitter tritt, wie bei Montmorillonit (DÜCKER 1940). Darüber hinaus tritt aber eine Volumenzunahme von 9% ein, sobald sich das Wasser in Eis umbildet (TABER 1918 und 1930, BESKOW 1930). Die absolute Volumenzunahme wurde von den letztgenannten Forschern nachgewiesen als eine Funktion der gefrierenden Wassermenge, die ihrerseits abhängig ist von dem Kornfeinheitsgrad des Bodens, bzw. seiner Durchlässigkeit und „Kapillarität“ und dem Zufluß aus dem Wasservorrat in der nicht gefrierenden Nachbarschaft. Größe, Form und Verteilung der einzelnen Bodenpartikel und schließlich auch ihre Mineralart haben also eine klare Beziehung zur Volumenzunahme bei Frost, die durch Hebung, Beulung, Zerreißen und Zerrüttung als zerstörender Faktor bei technischen Anlagen in Erscheinung tritt. In Anbetracht dieser Befunde haben dann die Techniker die Kriterien der Frostgefährlichkeit formuliert.

Zunächst stellte KOKKONEN (1926) bei seinen Untersuchungen der Strukturen des Frostes in Sand-, Mo-, Feinmo- und Tonböden fest, daß der geschichtete Bodenrost, d. h. die Bildung von Eislagen im Boden, in sämtlichen Bodenarten auftreten kann, daß dabei die Dicke der Eisblätter abhängig ist vom Gesamtvolumen des Eises, daß ihr Verlauf sich im allgemeinen nach der Erdoberfläche richtet und daß in Moböden eine Abnahme des Wassergehaltes von oben nach unten zu beobachten ist (Tab. 7, S. 39). Diese Tatsache berichtete auch SERNANDER bereits 1905. KOKKONEN (1926) formulierte, wenn auch weniger scharf, aber wohl als erster, daß bei geringem Wassergehalt im „einkörnigen Boden“, wie z. B. im Sand, massiver Frostboden entsteht, wobei das Wasser als Film um die einzelnen Körner gefriert, und daß dagegen ein „geschichteter Bodenrost“, d. h. solcher mit Eislinsen, sich bildet, wenn die Wassermenge des Bodens den „normalen spezifischen Wassergehalt“ übersteigt.

Zu der Bildung des Eisfilms um die einzelnen Sandkörnchen können wir heute sagen, daß es sich um das Gefrieren des aus Häutchen- und Porenwinkelwasser bestehenden Haftwassers im Boden handelt. Auch das hygroskopische, durch Grenzflächenkräfte adsorbierte und verdichtete Wasser unterliegt dabei dem Gefriervorgang. Etwa vorhandenes echtes Kapillarwasser muß infolge der geringen kapillaren Kräfte (s. S. 25) schnell verbraucht sein.

Taber (1930) fand dann als obere Grenze die Korngröße von 0,07 mm, bei der sich Eisschichten unter frostgünstigen Bedingungen entwickeln können. CASAGRANDE (1934) formulierte endlich schärfer die Abhängigkeit der Frostgefährlichkeit von der Korngröße und den Korngrößenanteilen im Boden. Nach ihm ist ein ungleichförmiger Boden als frostgefährlich zu bezeichnen, wenn er mehr als 3 Gewichtsprozent von



Böden beträgt die Frosthebung 5–10 cm, bei einem mehr als 25%igen Anteil bis 24 cm. In gleichförmigen Böden aus Kornfraktionen von 0,05 bis 0,005 mm ergeben sich Hebungsbeträge bis zu 35 mm. Mit der Zunahme des Anteils der feinen und feinsten Korngrößen im gefrierenden Boden steigt also die Frostgefährlichkeit, d. h. das Ausmaß der Frosthebung. Die angeführten Zahlen beleuchten zudem die Variationsbreite der Frostgefährlichkeit in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeit des Bodens.

Der Umstand, daß die sogenannte „Kapillarität“ als entscheidendes Moment hier in Rechnung gesetzt ist, steht in Widerspruch zu den Untersuchungen VAGELERS, der festgestellt hat, daß die tatsächlichen Steighöhen in allen Böden unter 2 m

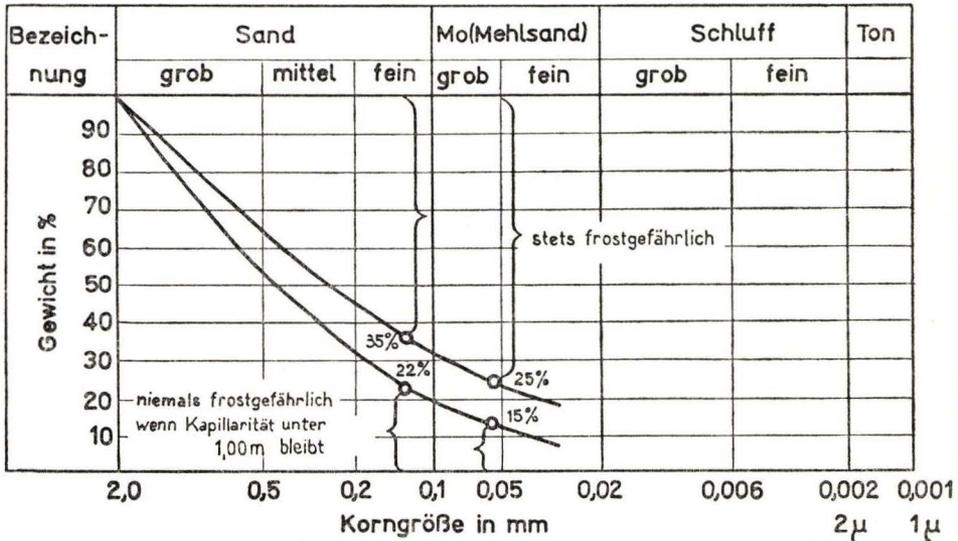


Abb. 12. Frostkriterium für ungleichförmige Böden (nach BESKOW 1930)

bleiben und 1,5 m selten übersteigen (1932). Daraus ergibt sich deutlich, daß nicht die Kapillarkräfte die Wasserbewegung im gefrierenden Boden steuern, denn sonst müßten Sande, die ein erheblich größeres Porenvolumen haben, und zwar ein spannungsfreies Porenvolumen, auch die größere Frostgefährlichkeit aufweisen. Frostgefährlicher aber sind die Böden, deren Partikel starke Hydratationskräfte besitzen, wie aus den Untersuchungen von BESKOW an Lehm Böden mit verschiedenen Salzgehalten und von DÜCKER an Na- und Ca-Bentoniten (1939) klar hervorgeht. Die Beziehung zwischen Korngröße und den errechneten kapillaren Steighöhen ist nur eine mittelbare, in dem die Korngröße auch das Maß der Kornoberfläche bedingt. Am Beispiel eines Würfels von 1 cm Kantenlänge läßt sich die zunehmende Vergrößerung der Oberflächen bei fortlaufender Aufteilung in kleinere Würfel leicht berechnen.

Aus all diesen Befunden ergibt sich eindeutig:

1. daß ausreichend Wasser im Boden vorhanden sein muß und
2. daß Bodenpartikel a) von bestimmter Größe und b) mit gutem Hydratationsvermögen vorhanden sein müssen, wenn Frostwirkungen und Strukturen entstehen



Frosthebungen angeführt. SCHAIBLE (1941, S. 541) teilt in seiner lesenswerten Arbeit über Frostschäden aus der Straßenbaupraxis mit:

„So wies ein verwitterter Tonschiefer, der unterhalb der Frostgrenze einen Wassergehalt von ca. 38% hatte, im Frostbereich eine deutlich sichtbare Eisenanreicherung mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 83% auf, so daß die Verdoppelung des Wassergehaltes innerhalb des Frostbereiches eine Hebung der Straße bis zu 28 cm zur Folge hatte. Noch stärker war die Erscheinung bei einem stark verwitterten Tonschiefer ausgeprägt, bei dem der ursprüngliche Wassergehalt von 18% auf 22,0 bis 29,0% in gefrorenem Boden anwuchs. In einem Lößlehmeinschnitt ergab die Nachprüfung, daß der Boden mit 28,7% ursprünglicher Feuchtigkeit im Frostbereich 145% Wasser, also die fünffache Menge, aufgenommen hatte. Schließlich sei noch ein Fall angeführt, in dem ein zu Lehm verwitterter Silurschiefer im Frostbereich einen Wassergehalt bis zu 96% aufwies, was seine Fließgrenze, die bei 40,4% lag, um mehr als das Doppelte überstieg.“

WEGER (1954) hat neuerdings die Verschiebungen des Wassergehaltes bei Frostwirkung in verschiedenen Bodentiefen in unserem Klimagürtel (Geisenheim) untersucht. Er stellte den Wassergehalt in einem mächtigen Lößboden, dessen Korngrößenanteile in Tabelle 6 wiedergegeben sind, in verschiedenen Tiefen, vor und nach einer Frostperiode, fest. Der Boden war nur bis in 20 cm Tiefe gefroren. Der Wassergehalt betrug vor dem Gefrieren 21 bis 25%. Nach dem Gefrieren war er im Frostbereich auf 30% gestiegen und im darunterliegenden Bodenraum auf 18–19% gesunken. Diese Wasseranreicherung in der Gefrierzone erfolgte ohne Mitwirkung einer Wasserreserve von Sicker- oder Grundwasser, sondern lediglich aus dem eigenen Vorrat des Bodens, d. h. dem Hydratwasser.

Tabelle 6. Korngrößenanteile in einem Lößboden bei Geisenheim;  
nach WEGER (1954)

Grobsand .....	2,0 — 0,2 mm	9% Anteil
Feinsand .....	0,2 — 0,02 mm	66,6% „
Schluff .....	0,02 — 0,002 mm	18,1% „
Ton .....	unter 0,002 mm	6,3% „

Vor beinahe 30 Jahren teilte KOKKONEN (1926) und schon vor 42 Jahren JOHANSSON (1913) diese höchst bedeutsamen Tatsachen in Zahlen mit (Tab. 7).

Tabelle 7. Verteilung des Wassergehaltes in gefrorenem Boden;  
nach JOHANSSON (1913)

Bodentiefe cm	Wassergehalt		Bodentiefe cm	Wassergehalt		Bodentiefe cm	Wassergehalt	
	Vol.%	Gew.%		Vol.%	Gew.%		Vol.%	Gew.%
0,0— 3,0	83,6	76,7	— 2,0	76,1	77,0	— 2,5	84,3	82,0
3,0— 5,8	70,0	54,3	— 4,1	67,5	54,2	— 5,0	71,7	54,0
5,8— 9,0	74,1	59,3	— 7,3	71,8	57,3	— 8,6	71,7	63,3
9,0—12,2	70,6	54,4	— 10,5	73,7	62,9	— 11,7	75,0	39,3
12,2—15,1	58,9	37,7	— 12,5	65,5	43,7	— 14,7	61,9	45,1
15,1—17,6	59,0	41,1	— 15,6	64,2	44,4	— 17,5	65,3	29,4
						— 18,9	57,2	

KOKKONEN (1926, S. 46) fand auch schon eine sehr wichtige kritische Grenze der Wasseranreicherung und Eislinnenbildung:

„Sinkt der Wassergehalt unter ein bestimmtes Maß, so bilden sich keine reinen Eisschichten mehr, sondern das Wasser gefriert um die Erdpartikelchen herum, und es entsteht massiver Bodenfrosts.“

„Genau so verhält es sich auch beim Tonboden. Jede Bodenart hat ein spezifisches Wasserbindungs- und -aufnahmevermögen, bzw. eine spezifische Wasserdurchlässigkeit und Kapillarität in Abhängigkeit von der Korngröße; für die Eisblätterbildung besteht somit eine kritische Grenze.“

Wir müssen diese grundlegende Erkenntnis heute anders formulieren und sagen, daß die Menge der Tonminerale der Bodenarten dank ihrer Hydratationsenergie das Wasserbindungs- und Wasseraufnahmevermögen bestimmen. Diese Energie tritt aber auch dem Wassertransport durch Frosteinwirkung entgegen, indem sie eine bestimmte Wassermenge im tieferen Boden festhält. Sobald keine Wasserzufuhr mehr erfolgt, gefriert der Boden massiv. Die Hebung hält sich dann in den Grenzen der Zustandsänderung vom Wasser in Eis, entsprechend der Volumenzunahme von 9%, wie BESKOW (1930) auch experimentell feststellt. Seine Untersuchungen ergaben auch, daß die Eisschichten sich senkrecht zum geringsten Druck (s. S. 29) und parallel zu den Isothermen orientieren. In den Polygonböden stehen sie oft mit 30–40° schief gegen die Wandung.

Schließlich geht bereits aus den Untersuchungen von BESKOW hervor, daß die Wasseranreicherung dadurch erfolgt, daß die Wassermoleküle aus den Bodenporen auswandern und in den Kontakt zwischen wachsende Eiskristalle und Bodenpartikel treten. Das geschieht umso mehr, je langsamer es gefriert, während schnelles Gefrieren nur zu geringen Wasserüberschüssen und infolgedessen nur zur Bildung dünner Eisschichten auf große Abstände führt, (s. auch JUNG 1932). Unterdrucke im Gefrierbereich, sowie Spannungen, die mit der Frosthebung auftreten, verursachen Gefrierpunktserniedrigungen, so daß das Wasser auch unter 0° C noch beweglich ist. Dem Wasserzustrom ist der Hebungsbetrag durch den Frost ungefähr proportional, (9:10 nach BESKOW). TABER (1930) und DÜCKER (1939) erzielten bei ihren Experimenten die gleichen Ergebnisse.

#### 4. Ergebnisse

1. Der Wasservorrat des Bodens bei Beginn des Gefrierprozesses entscheidet über die Bildung der Strukturen und über das Ausmaß der Frosthebung. Dabei sind die kleinklimatischen und morphologischen Umstände, sowie die Bodenart und das Bodenprofil bzw. das Wasseraufnahme-, Wasserspeicher- und das Wasserhaltevermögen des Bodens maßgebend. Sie bestimmen in erster Linie den Wasserhaushalt im Frostboden.

2. Bei der Wasserbewegung im Frostboden kommt dem Kapillarwasser nur eine sehr untergeordnete Bedeutung zu. Durch die Abnahme der Oberflächenspannung und der ungewöhnlichen Zunahme der Viskosität des Wassers werden die an sich nur geringen Steighöhen noch mehr vermindert. Andererseits zeigen Lehm-, Schluff- und Tonböden trotz ihrer geringen und zum Teil überhaupt nicht vorhandenen

Kapillarität sehr beträchtliche Wasseranreicherungen und Frosthebungen, während der porenreichste Boden, nämlich Sand mit reichlich Kapillarräumen, nur geringe oder gar keine Wasserbewegung zur Gefrierfront aufweist und damit auch keine Strukturen bildet.

3. Die Wasserbewegung, d. h. der Transport der Wassermoleküle wird bestimmt von den Sorptionskräften und der Hydratationsenergie der Bodenpartikelchen. Wie die Messungen des Wassergehaltes in lehmigen und tonigen Böden lehren, wird bei Frosteinwirkung das Hydratwasser der Bodenpartikel angegriffen und zur Gefrierzone transportiert.

4. Die besonderen anomalen Eigenschaften des Wassers, die durch den Molekülbau und die Molekülassoziation bedingt sind, machen den Gefriervorgang zu einem höchst komplizierten Prozeß. Durch Druckerhöhung im gefrierenden Boden und die temperaturbedingten Eigenschaftsänderungen des Wassers ist das Wasser im Strukturboden recht beweglich. Seine Beweglichkeit wird gesteuert von den Differenzen zwischen den Hydratationsenergien der Bodenteilchen und dem elektrischen Potential der Eiskristalle. Ihr Maß ist bestimmt von den Dielektrizitätskonstanten im gefrierenden Boden. Infolge der Unterdrucke osmotischer Art ist auch die Dampfphase an dem Wassertransport zur Gefrierzone beteiligt. Die Wasserdampfpartikel reißen infolge ihres hohen Dipolmoments Moleküle aus der Hydrathülle der Bodenpartikel und wandern durch die Poren zu den Eiskristallen. Im übrigen erfolgt der Wassertransport von Hydrathülle zu Hydrathülle durch Austausch der Moleküle.

5. Die Strukturbildung steht nach den bisherigen Untersuchungen in engster Beziehung zu den Korngrößen aller möglichen Bodenarten und Bodentypen. Diese Beziehung ist aber nur eine mittelbare. Die Wasseraufnahme und Wasseranlagerung im Boden ist abhängig von den Kornoberflächen, d. h. von den Grenzflächenkräften zwischen der festen und flüssigen Phase, also der Hydratationsenergie der beteiligten Partikel. Infolgedessen ist für die Frostwirkung der Tonmineralgehalt im Boden maßgebend.

Das Gefrieren des restlichen Hüllwassers der Bodenpartikel führt zur Bildung des kompakten Frostbodens. Die Frostgefährlichkeit ist eine unmittelbare Funktion der Oberflächen der Bodenpartikel und damit weitgehend abhängig von der Korngröße.

6. Auch unter Berücksichtigung der Wasserverteilung im Boden ergibt sich, daß die Wasseranreicherung in der Gefrierzone nicht von dem vorhandenen Kapillarwasser und von den Kapillarwirkungen abhängig ist. Der Kapillarwasserfaden muß bald abreißen, da die Tonminerale das Wasser für die Bildung von Hydrathüllen festzuhalten streben.

7. Der Frosthebungsbetrag, der der 9%igen Volumenzunahme bei der Metamorphose des Wassers in Eis entspricht, erscheint somit als eine Funktion der Oberflächen der hydratisierten Bodenteilchen.

Im folgenden soll nun versucht werden, die Beziehungen zwischen den Bodenteilchen, dem Wasser und den Eiskristallen zu prüfen. Dabei sollen insbesondere die für die Straßenbaupraxis durchgeführten Untersuchungen von DÜCKER (1939/40) zugrunde gelegt werden.

## IV. Die Gesetze des Bodenfrostes

### 1. Verhalten des Bodenwassers

So überraschend eigentlich die Wasserzuströmung zur Frostfront im Boden ist, wie dies die Messungen von KOKKONEN (1926), die Angaben SCHAIBLES (1941) und die Untersuchungen von WEGER (1954) lehren, so überraschend ist aber auch, daß bei bestimmten Korngrößen eine entgegengesetzte Wasserbewegung stattfindet. Nach TABER (1918), DÜCKER (1939) und BESKOW (1930) sind es die Kornfraktionen 0,5 bis

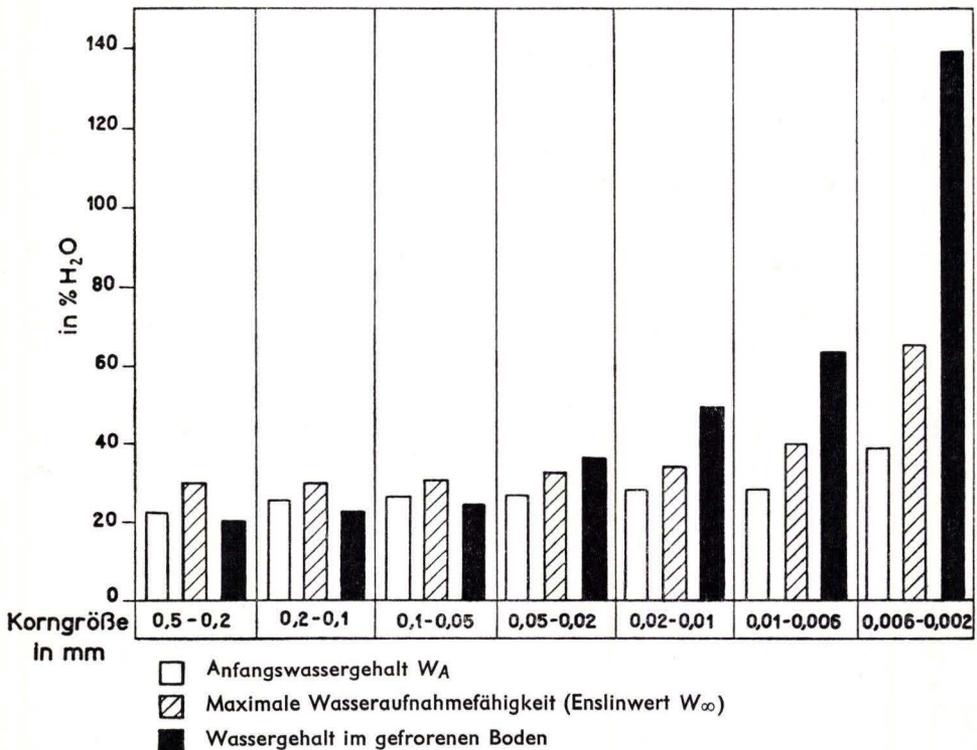


Abb. 13. Anfangswassergehalt  $W_A$  (Mittelwert) im Vergleich zu der im Endzustand im gefrorenen Boden vorhandenen Wassermenge  $W_E$  (Mittelwerte) und zum Enslinwert  $W_\infty$ , nach DÜCKER (1939)

0,05 mm, bei denen das Bodenwasser von der Frostfront weg in den Untergrund gedrängt wird. Die unter 0,05 mm liegenden Korngrößen aber nehmen ausnahmslos beträchtliche Wassermengen mit zunehmender Kornfeinheit auf (Abb. 13). So steigt bei der Korngröße 0,05–0,02 mm der ursprüngliche Wassergehalt von 26,5% auf 37%, bei der Korngröße 0,006–0,002 mm von 39,5% bis auf 140%. Aber auch die in der Zeiteinheit geförderte Wassermenge nimmt mit der Kornfeinheit erheblich zu

(Abb. 14). Bei Fraktionsmischungen, die uns mit Rücksicht auf die Bodensubstanz unserer Strukturen besonders interessieren, ist die in der Zeiteinheit in Eis umgewandelte Wassermenge unabhängig von dem Mischungsverhältnis und konstant, dagegen abhängig von der Temperatur. Aber ein Abstoßen von Wasser aus der Gefrierzone tritt bei ungleichförmigen Böden nicht auf, wenn hinreichend Feinbestandteile vorhanden sind, die das verhindern, d. h. wenn also Partikel mit beträchtlicher Hydrationsenergie im Boden vorhanden sind. Es erfolgt jedoch eine wesentliche Herab-

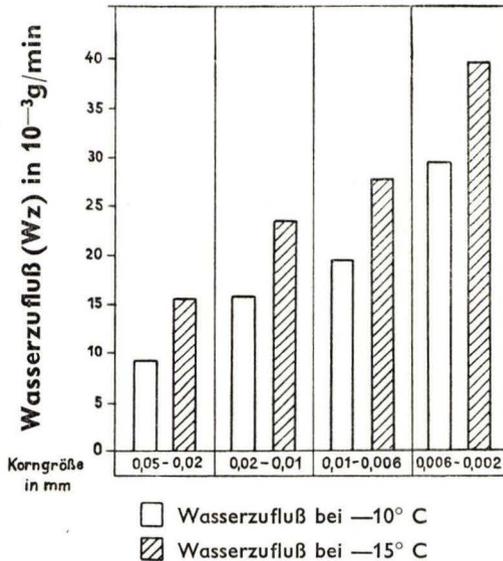


Abb. 14. Zusätzlich während des Gefrierens zur Frostzone geförderte Wassermenge  $W_z$  bei den Körnungen 0,05 bis 0,002 mm, nach DÜCKER (1939)

setzung des Frostgefährlichkeitsgrades durch hohe Anteile der Korngrößen über 0,05 mm. Die zusätzlich durch die Frosteinwirkung aus dem Untergrund geförderte Wassermenge ist abhängig von der Kornverteilung im Boden, und zwar ist ausschlaggebend der Prozentsatz der feinsten Kornfraktionen.

## 2. Frosthebung

Die Frosthebung entspricht direkt der Wasseranreicherung in der Gefrierzone. Sie wächst also mit dem Anteil feiner Korngrößen. Ihr prozentualer Anteil am Boden ist entscheidend (Abb. 15). Der Frosthebungsbetrag ist stets größer als das Maß der Ausdehnung des bei der Umwandlung in Eis normalerweise im Boden vorhandenen Wassers. Diese Volumenvergrößerung beträgt rund 9%. Die dementsprechende Vergrößerung des Bodenvolumens bleibt nur bei den Korngrößen über 0,05 mm dahinter zurück. Aber auch hier bleibt bei Sand von der Korngröße 1,0 bis 0,1 mm die Möglichkeit erheblicher Volumenvergrößerungen, und zwar durch das Gefrieren des Porenwinkelwassers (BESKOW 1935). Diese Volumenvergrößerung kann mehr als das

Zweieinhalbfache der Volumenvergrößerung des Wassers bei der Umbildung in Eis betragen. Sie resultiert aus der Bildung kleiner Eissäulchen zwischen den einzelnen

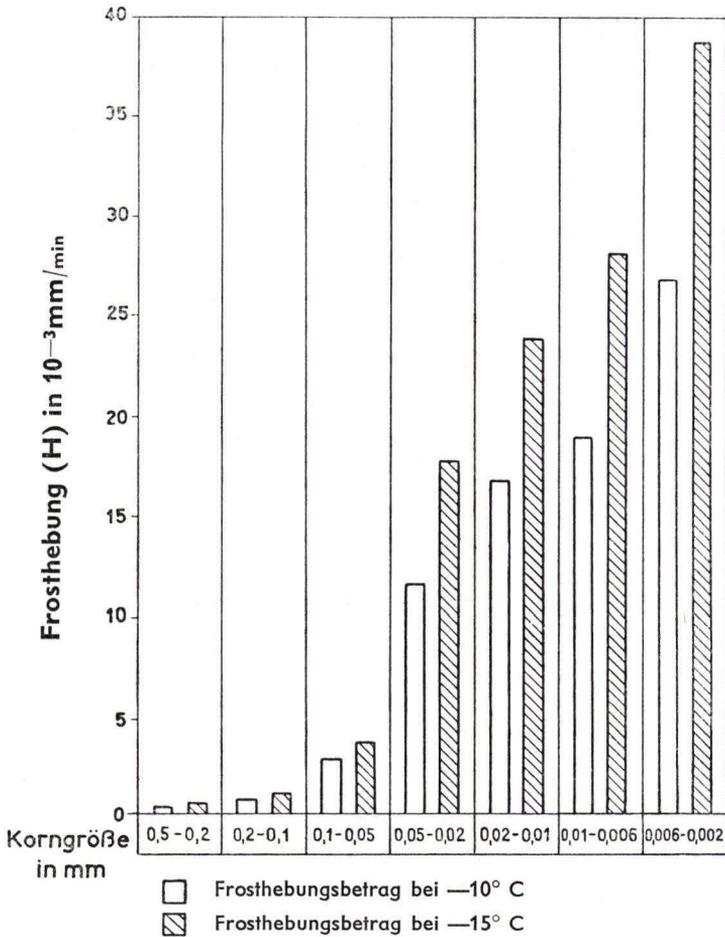


Abb. 15. In der Zeiteinheit erreichte Frosthebungsbeiträge bei den Kornfraktionen 0,5 bis 0,002 mm für  $t = -10^{\circ}\text{C}$  und  $t = -15^{\circ}\text{C}$ , nach DÜCKER (1939)

Körnern, bzw. den Bodenteilchen (s. o. Aufblähung der Kryokonitkrümel auf den Eisnadeln S. 38).

So ergibt sich der Betrag der Frosthebung einmal aus der Volumenausdehnung von rund 9% der vor der Frosteinwirkung im Boden vorhandenen Wassermenge, zum andern aus der während des Gefrierens zuströmenden Wassermenge und schließlich aus der Volumenvergrößerung dieses durch Gefrieren angesaugten Wassers (exzessive Volumenvergrößerung im Sinne von TABER).

## 3. Frosteindringung

Wesentlich für die Frosthebung ist die Frosteindringung, d. h. die Geschwindigkeit, mit der die Frostfront in den Boden eindringt. Abgesehen davon, daß diese Eindringungsgeschwindigkeit von der Wärmeleitfähigkeit und vom Temperaturgefälle

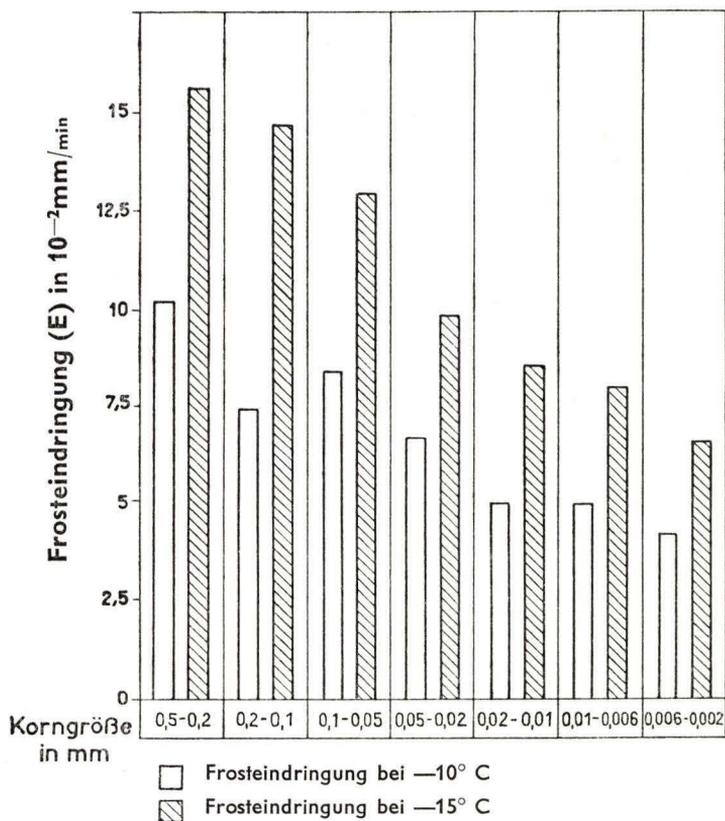


Abb. 16. In der Zeiteinheit erreichte Frosteindringungsgeschwindigkeit bei den Kornfraktionen 0,5 bis 0,002 mm für  $t = -10^{\circ}\text{C}$  und  $t = -15^{\circ}\text{C}$ , nach DÜCKER (1939)

bestimmt wird, besteht auch hier eine Proportionalität zur Korngröße, indem mit zunehmender Kornfeinheit die Frosteindringungsgeschwindigkeit abnimmt (Abb.16).

Diese Beziehung ist keine unmittelbare, sondern sie ist bestimmt durch die funktionelle Abhängigkeit der Wassermenge von der Kornfeinheit einerseits und der konstanten Größe der in der Zeiteinheit gefrierenden Wassermenge im Boden andererseits. Das bedeutet: Die in einem sehr feinkörnigen Boden bereits angereicherte und auch noch zuströmende Wassermenge ist größer und braucht daher für die Umwandlung in Eis eine längere Zeit. Wiederum ist die Wärmeleitfähigkeit des Bodens (Tab.9, S. 51) weitgehend abhängig vom Wassergehalt. Beim Wasser ist sie ihrerseits nun relativ hoch, und mit zunehmendem Wassergehalt des Bodens nimmt auch sie zu.

Durch die Umwandlung des Wassers in Eis wird jedoch ständig Wärme frei (s. S. 30), die nun erst verbraucht sein muß, ehe die Frostfront tiefer eindringen kann. Damit ist aber auch dieses Kräftespiel, dessen Phasen auch auf die Eisblätterbildungen einwirken, für die Frosteindringung um so ungünstiger, je feiner die Korngrößen des Bodens sind. In unserem Zusammenhang bedeutet das nichts weiter, als daß im Steinkranz und in den inhomogenen Randzonen der Strukturböden der Frost schneller in die Tiefe dringt als in den Feinerdekernen.

#### 4. Der Frostgefährlichkeitsgrad

Die bisher beschriebenen Auswirkungen des Frostes werden also vereint wirksam, sobald Korngrößen unter 0,05 mm im Boden in bestimmter Menge vorhanden sind, und zwar umso stärker, je feiner die Körnung und je größer ihr Anteil ist. Wie bereits geschildert, äußern sie sich als Hebung des gefrierenden Bodens durch die Volumenvergrößerung bei der Metamorphose Wasser in Eis, insbesondere bei der Umwandlung des infolge des Frostes zuströmenden Wassers und seiner ungewöhnlichen Anreicherung zu Eisblättern und Eisschichten. Diese Eigenschaft des feinkörnigen Bodens wurde als Frostgefährlichkeit bezeichnet.

Das gesetzmäßige Verhältnis der Frosthebung (H) zur Frosteindringungstiefe (E), ausgedrückt in Prozenten, formulierte DÜCKER (1939) zahlenmäßig als den Frostgefährlichkeitsgrad (F):

$$F = \frac{H}{E} \cdot 100\%$$

Sobald F größer als 3 bis 4% ist, ist die Grenze des frostsicheren Bodens überschritten, und die Feinkörnigkeit beherrscht absolut die Frosthebung (Tab. 8).

Tabelle 8. Frostgefährlichkeitsgrad F der Kornfraktionen 0,5 bis 0,002 für  $t = -10^\circ$  und  $t = -15^\circ$  C, nach DÜCKER (1939)

t	0,5–0,2	0,2–0,1	0,1–0,05	0,05–0,02	0,02–0,01	0,01–0,006	0,006–0,002
– 10°	0,5%	1,2%	2,4%	16,3%	32,8%	38,1%	64,8%
– 15°	0,4%	0,8%	2,1%	17,8%	28,1%	34,5%	57,9%

Die Zahlen der Tabelle 8 zeigen, daß entsprechend der starken Oberflächenvergrößerung der Körnung von 0,05–0,02 gegenüber der Fraktion 0,1–0,05 in denselben Mineralbodenproben der Frostgefährlichkeitsgrad auf das rund 8fache ansteigt. Die Partikelzahl wächst dabei nur auf das Doppelte an. Die Beziehung zur hydratisierenden Oberfläche der Partikel tritt damit deutlich hervor.

Diese Herrschaft der Feinkörnigkeit gilt nach DÜCKER nur so lange, wie ein Wasser-nachstrom möglich ist, d. h. solange der Frost auf den Boden als „offenes System“ (DÜCKER) wirkt. Damit soll gesagt sein, daß ein Wasserzstrom aus einem Grundwasserreservoir möglich sein muß. Tatsächlich aber sind osmotische Druckdifferenzen, Durchlässigkeit bzw. das spannungsfreie Porenvolumen und der Wasservorrat im tieferen Bereich entscheidend. Diese Umstände beleuchten die Bindung der Strukturbodenfelder an sehr wasserreiche Gebiete einerseits und das Fehlen von Strukturen in den sonst in gleicher Weise feinkörnigen Böden andererseits. So ergab es auch die

Kartierung. Weiterhin wird damit sowohl das Auftreten als auch das Fehlen von Eisblättern und Eislinsen verständlich. Bei dichtgepackten, feinen Bodenpartikeln läßt die Hydratationsenergie kaum Raum für ein spannungsfreies Porenvolumen. Die Reibung für die Wasserbewegung ist dann größer als die adsorptiven Kräfte der wachsenden Eiskristalle, und für einen Austausch von Wassermolekülen in den Hüllen der Partikel, d. h. für die Wasserbewegung zur Gefrierfront, steht kein Nachschub zur Verfügung. Die Versuchsergebnisse von DÜCKER, BESKOW, TABER, GIVEN und JUNG lassen die Abhängigkeit der Strukturen des Bodenfrostes sowohl von der Korngröße als auch von der Temperatur bzw. der Gefriergeschwindigkeit und schließlich dem Belastungsdruck erkennen.

### 5. Gefriergeschwindigkeit

Bei geringer Gefriergeschwindigkeit – abhängig von dem Temperaturgefälle einerseits und dem Wasserzustrom andererseits – entstehen nur wenige Kristallisationskerne. Die langsam wachsenden Eiskristalle stoßen die Erdpartikel ab. Zutreffender muß man sagen, daß die wachsenden Eiskristalle sich von den Erdpartikeln abdrücken und die Partikel nicht in das Kristallgitter einbauen. Die seitliche Verwachsung der sich vornehmlich in der Vertikalen entwickelnden Kristalle führt zur Bildung der Eislinsen und der Eisblätter. Bei schnellem Gefrieren dagegen bilden sich unzählige kleine Kristallisationskerne, so daß die Erdpartikel von ihnen umhüllt erscheinen. Es entsteht der massive oder homogene Frostboden gegenüber dem geschichteten

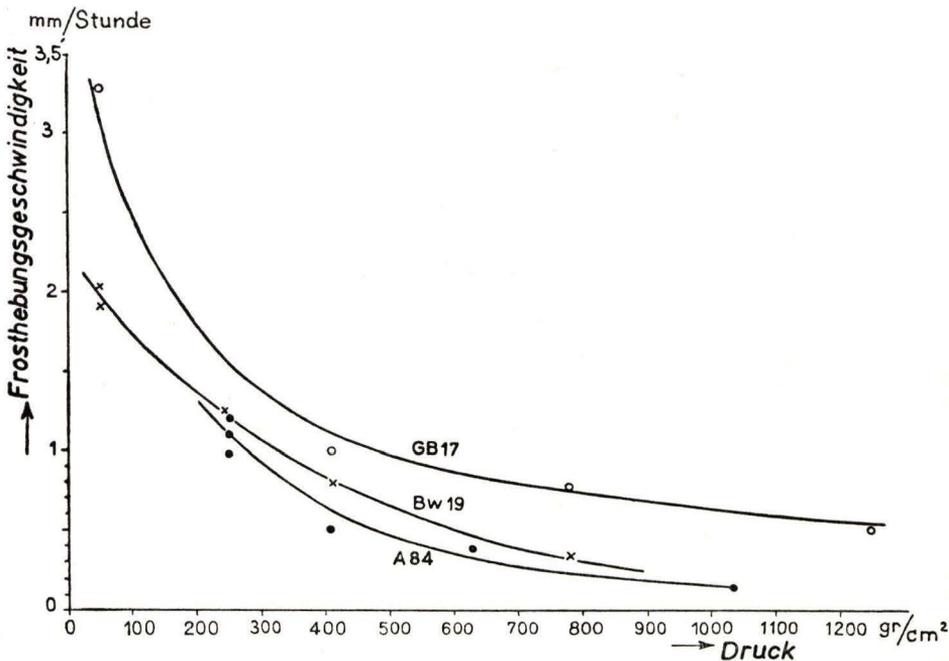


Abb. 17. Die funktionelle Abhängigkeit der Frosthebung vom Druck, nach BESKOW (1935)

oder inhomogenen. „So sind z. B. bei sehr tiefen Temperaturen selbst die frostgefährlichsten Böden nicht mehr imstande, Eisschichten hervorzubringen“ [DÜCKER (1939) s. auch KOKKONEN (1926)]. Die Erklärung für diese nun schon lange bekannte Tatsache liegt darin, daß der Wassernachschub infolge der Reibung mit dem Kristallwachstum, d. h. dem Wasserverbrauch, nicht Schritt halten kann.

TABER (1918) fand eine weitere Grenze der Eisschichtenbildung in der Druckbelastung (s. a. Abb. 17). Selbst in einem Boden aus den Kornfraktionen von  $2\mu$  können sich unter einem Druck von  $2,11 \text{ kg/cm}^2$  keine Eisschichten mehr bilden. Damit scheint sogar ein Maß gefunden zu sein für die Kristallisationskraft bzw. Hydratationsenergie des Eises im Boden. Selbstverständlich muß die Eisschichtenbildung auch aufhören, sobald dem Wassernachschub ein Ende gesetzt ist, wie oben bereits vermerkt wurde. Sowohl der homogene als auch der inhomogene Frostboden können sich damit neben und vor allem übereinander entwickeln.

### 6. Temperatureinfluß

Das Ausmaß und die Intensität der Eisbildung werden wesentlich mitbestimmt von der Temperatur, denn von der Gefrieretemperatur wiederum abhängige Größen sind: die Frosthebung, die zusätzlich zur Frostzone geförderte Wassermenge, die Eisschichtenbildung, die Menge des in der Zeiteinheit gefrierenden Wassers und die Frosteindringungsgeschwindigkeit. In diesem Zusammenhang ergibt sich, daß ein langsames Frieren am günstigsten auf die Entwicklung und die Aktivität eines Strukturbodenfeldes wirkt. DÜCKER betont, daß „eine scharfe Grenzziehung zwischen frostgefährlichen und frostsicheren Böden nicht durchführbar ist, da die eislinienbildenden „Korngrößen“ je nach den Gefrierbedingungen zwischen den Kornbereichen von 0,1 bis 0,05 mm schwanken.“ „Jeder nichtbindige Boden ist, unabhängig von seinem Gleichförmigkeitsgrad, als frostgefährlich anzusprechen, wenn er mehr als 3 Gew.-% an Korngrößen unter 0,02 mm enthält“ [DÜCKER (1939), S. 78; s. a. CASAGRANDE].

Der Einfluß der Temperatur auf die Wasserbewegung in den Poren des Bodens ist hauptsächlich durch die Veränderlichkeit der Zähigkeit des Wassers, der Entwicklung der Moleküle des Wassers I bedingt. Mit fallender Temperatur nimmt die Viererkoordination zu. Auch zieht sich die Bodenluft mit fallender Temperatur zusammen. Demzufolge wird die Durchlässigkeit zwar begünstigt, durch die größere Zähigkeit aber wird die Wasserbewegung gehemmt. Zur Förderung einer gleichgroßen Wassermenge ist also bei niedriger Temperatur eine längere Zeit bzw. Einwirkungsdauer des Frostes erforderlich.

### 7. Mineralgehalt

Unter den bindigen Böden erweisen sich als stark hebende Böden solche, die einen wesentlichen Mineralgehalt von Kaolinit und Montmorillonit haben. Im einzelnen ist auch dieser Mineralgehalt von Einfluß auf die Froststruktur, indem sich bei jenem horizontale Eisschichten bilden, bei diesem ein polygonales Netzwerk [s. Abb. in TABER (1930), DÜCKER (1940) und KOKKONEN (1926)]. Im übrigen aber ist die Art der zu Tonteilchen zerstörten und zertrümmerten gesteinsbildenden Mineralien in den Böden offenbar von großer Bedeutung (s. S. 34). Mit der Verwitterung der Gesteinsminerale werden die Kationen für die Belegung und damit für die Hydra-

tation der Bodenpartikel geliefert. An diesen freibewegliches Wasser vorbeizuführen oder es ihnen gar zu entreißen, muß mit der Verarmung des Grundwasservorrates auf zunehmenden Widerstand stoßen. Die Hydrathüllen der Tonminerale gefrieren schließlich in großer Stärke an den Bodenpartikeln.

Außerordentlich aufschlußreich über die Bedeutung des Mineralgehaltes, aber in ihrem Umfang leider zu begrenzt, sind die Untersuchungen von BESKOW (1935) und DÜCKER (1939/40) an bindigen Böden, denen Salze bzw. Lösungen in verschiedenen Konzentrationen zugegeben worden waren. Dabei ergab sich, daß die Wasseranreicherung und damit die Frosthebung in keiner definierbaren Beziehung zur Durchlässigkeit steht, andererseits aber bei Quarzmehl – Tonmineralgemischen die Frosthebung mit zunehmendem Wasseraufnahmevermögen abnimmt. Außerdem zeigen die Nahlaltigen Böden stärkere Wasseranreicherung in der Gefrierzone und damit stärkere Frosthebung als Ca-haltige Böden. Bei größerer Konzentration schließlich ist die Frosthebung beträchtlich geringer als bei stark dissoziierten Lösungen. Das unterschiedliche Hydratationsvermögen der Tonminerale bzw. ihrer Kationenbelegung (s. S. 34) erklärt diese Erscheinungen zwanglos. Bodenpartikel mit Na-Belegung bilden erheblich stärkere Wasserhüllen als bei Ca-Belegung. Mit der Bildung der Wasserhüllen quellen die Böden. Ein spannungsfreies Porenvolumen kann sich nicht entwickeln, und damit ist selbstverständlich die Durchlässigkeit sehr schlecht, denn die Kationen sind bestrebt, alles erreichbare Wasser festzuhalten und anzulagern. Für eine kapillare Wasserbewegung ist deshalb überhaupt kein Raum vorhanden. Infolge der stärkeren Wasserhülle der mit Na-Ionen belegten Partikel ist wiederum ein leichter und schnellerer Austausch und Transport der Wassermoleküle von Hülle zu Hülle bis zur Gefrierzone möglich. Dabei ist die Reibung geringer als bei Partikeln mit Ca-Belegung, denn hier werden die enger anliegenden Hüllen stärker festgehalten.

Ähnlich ist die Wirkung der Konzentration der Lösungen (Abb. 18). Zunehmende Konzentration bedeutet nichts anderes als zunehmende Dehydratation der Moleküle und Kationen, also Wasserentzug. Umso fester und stärker werden die vorhandenen Wassermoleküle gebunden, die Wasserbewegung gehemmt und schließlich unterbunden.

Die Veränderungen in der Konzentration während des Gefrierprozesses wirken sich letztlich wieder auf die anomalen Eigenschaften des Wassers aus, wie oben dargelegt worden ist. Diese Vorgänge erklären schließlich auch das „Abdrängen“ des Wassers von der Gefrierzone in reinen Sandböden. Mit der Verringerung der Oberflächenspannung des Wassers bei abnehmender Temperatur (ca. 25%) sinkt die Kapillarsäule zurück. Der Meniskus kann sie nicht mehr halten und nicht mehr tragen. Die Kationenbelegung der Quarzkörnchen ist zu schwach, um stärkere Hüllen zu bilden. Die zunehmende Tetraederkoordination der Wassermoleküle bei abnehmender Temperatur muß diesen Vorgang begünstigen.

### 8. Eigenschaftsänderung

Es sei noch darauf hingewiesen, daß in Anbetracht der mechanischen Wirkung des Frostes, sowie wohl auch durch den Transport und die Anreicherung feinsten Korngrößen, durch das Abstoßen von Gesteinssplittern durch wachsende Eiskristalle, kurz durch die Frostverwitterung im Laufe der Jahre sich aus frostungefährlichen Böden

frostgefährliche entwickeln können und schließlich müssen. Hierauf ist auch von anderer Seite schon hingewiesen worden.

Auch Druck und Konzentration der Salzlösungen sind beim Gefrieren von Bedeutung (s. S. 29). Beide Faktoren verändern die zu Anfang bestehenden Verhältnisse und greifen damit ebenfalls modifizierend in die Strukturbildung ein. Druckzunahme (Abb. 17) und Konzentrationserhöhungen (Abb. 18) wirken dem Wassertransport zur Gefrierzone und damit der Frosthebung beträchtlich entgegen. In polaren, wie überhaupt in subnivalen Bereichen, sind aber die Wässer arm an Elektrolyten. In dieser Hinsicht sind sie also von vornherein gewissermaßen frostgefährlich.

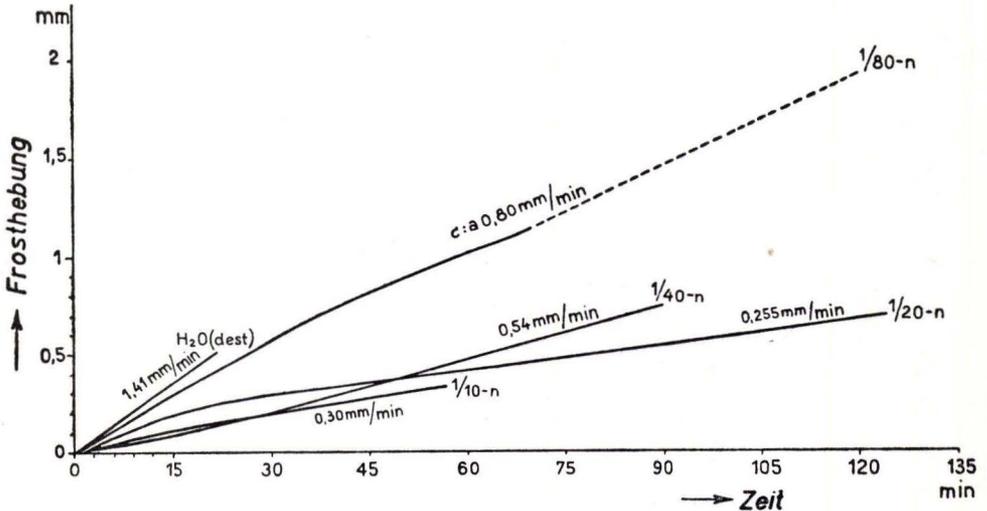


Abb. 18. Die Frosthebung nimmt in der Zeiteinheit ab mit der Zunahme der Konzentration von Lösungen, nach BESKOW (1935).

Was die Drucke anbetrifft, so werden durch das Gefrieren erhebliche Kräfte entwickelt. Sie stehen, wie Abb. 17 zeigt, der Frosthebung entgegen. Bereits ein Druck von  $0,250 \text{ kg/cm}^2$  setzt den Hebungsbetrag um etwa 50% herab. Nach BESKOW (1935) treten infolge der „Kapillarität“ Unterdrucke mit Vorzug im Bereich von  $0,05$  bis  $1,5 \text{ kg/cm}^2$  auf. Die Beziehung zwischen Unterdruck durch „Kapillarität“, d. h. hier nichts anderes als Hydratationsenergie, und dem Frostdruck bei der Strukturbildung ist schwer abzuschätzen. Nach den Diagrammen von BESKOW (s. auch Abb. 2) sind Böden selbst bei 22% Anteil der Korngrößen unter 2 mm niemals frostgefährlich, wenn ihre „Kapillarität“ unter 1 m bleibt. Die Wasserbewegung zur Gefrierfront muß jedenfalls zum Stillstand kommen, sobald die Druckunterschiede ausgeglichen sind.

### 9. Wärmeleitfähigkeit

Sehr verschieden ist die Wärmeleitfähigkeit der Böden (Tab. 9), die ebenso wie bei den Gesteinen eine sehr komplexe Größe ist, da sie nicht nur von der Korngröße bzw. der Füllung der Poren mit Luft und Wasser, der Lagerung u. a. Faktoren, sondern

auch noch von der Mineralart und deren Farbe abhängt, und was hier wichtig ist, vom Wasser- bzw. Eisgehalt. Mit dem Gefriervorgang sind entsprechende Veränderungen verbunden.

Bei den mineralisch gut gemischten Böden und Gesteinen wird sich die verschiedene Leitfähigkeit der Minerale kaum auswirken. Denkbar und wahrscheinlich ist, daß sie im allgemeinen von Natur temperaturkompensiert sind, d. h. daß bei der unregelmäßigen Mineralverteilung und -orientierung die mit der Temperaturänderung zusammenhängende Volumenänderung sich ausgleicht. Entscheidend aber für die Strukturbodenbildung sind die Unterschiede in der Wärmeleitung und Wärmekapazität zwischen Gestein und Feinerde einerseits und zwischen den Gesteinen bzw. relativ trockenen Bodenteilen und den wassererfüllten andererseits. Hieraus läßt sich leicht ableiten, daß das Auftauen und Gefrieren im Steinkranz schneller erfolgt als im Feinerdekern und Pflanzenpolster. Die Untersuchungen von KREUTZ (1942) zeigen dies auch ganz eindeutig und sehr eindrucksvoll (s. Abb. 21).

Tabelle 9. Wärmeleitfähigkeit verschiedener Böden und Gesteine  
nach ISRAEL aus REICH u. VON ZWARGER (1943),  
sowie des Wassers und der Luft nach BESKOW (1935)

Quarzsand (trocken)	K = ca.	0,006
Quarzsand (feucht)	bis	0,008
Lehm		0,002
Ton		0,001 – 0,003
Torf		0,0001–0,0003
tonige Kalke		0,003 – 0,008
Quarzit		0,007
Sandstein		0,003 – 0,008
Tonschiefer		0,003 – 0,005
Granit		0,008 – 0,01
Basalt		0,003 – 0,007
Luft 0° C		0,000057
Wasser 0° C		0,0014
Eis 0–10° C		0,0054

## 10. Frosteindringung unter natürlichen Verhältnissen

Die experimentellen Ergebnisse über Frosteindringungstiefe und Frosteindringungsgeschwindigkeit stimmen überein mit den Messungen in Böden unter natürlichen Verhältnissen. KREUTZ untersuchte sie in verschiedenen Böden unter gleichen und verschiedenen Witterungsbedingungen während des sehr kalten Winters 1939/40 in der Zeit vom 1. 12. 1939 bis 31. 3. 1940. Der Vergleich der Lufttemperatur in 2 m Höhe, der Gang der Schneehöhe und der Verlauf der Temperatur an der Oberfläche und in verschiedenen Tiefen der einzelnen Bodenarten zeigten, daß die Eindringungstiefe des Frostes und der Temperaturgrad im Boden ganz wesentlich von den Korngrößen und dem Wassergehalt der verschiedenen Bodenarten bestimmt sind. Am kältesten war es im Basaltgrus, dann folgte der Sand und erst an letzter Stelle der Humusboden. Auch die täglichen Temperaturschwankungen sind im Basaltgrus und im Sand am größten, im Lehm und im lehmigen Sand schwächer, und im Humus-

boden werden sie kaum bemerkbar. Am frühesten drang der Frost in den Sand, und kurze Zeit darauf in den Basaltgrus ein. In den lehmigen Böden erreichte der Frost erst nach 4 und 5 Tagen eine Tiefe von 10 cm und erst nach 7 und 8 Tagen eine Tiefe von 20 cm, während er im Humusboden sogar 19 Tage bzw. 27 Tage brauchte, um diese Tiefen zu erreichen. Die Frosteindringungstiefen beliefen sich im ganzen auf 67 cm bei Basaltgrus, 52 cm bei Sand und Lehm, 40 cm bei lehmigem Sand und 32 cm bei Humus. Die Eindringungsgeschwindigkeit betrug pro Tag 2,0 cm im Basaltgrus, 1,7 cm in Sand, 1,1 cm in den lehmigen Böden und 0,6 cm im Humusboden (Abb. 19).

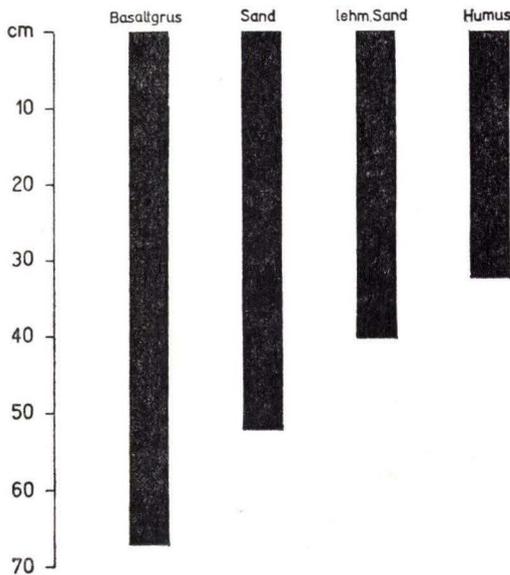


Abb. 19. Frosteindringung in verschiedenen Böden bei gleicher Einwirkungszeit [dargest. nach Angaben von KREUTZ (1942)].

In entsprechendem Tempo erfolgte der Rückschritt der Frostfront, so daß zuerst der Basaltgrus, bald danach der Sand frostfrei waren, 8 Tage später der lehmige Sand, 17 Tage später der Humusboden. In weiteren natürlichen unbearbeiteten und vegetationslosen Böden wurden Frosteindringungsgeschwindigkeiten zwischen 1,2 und 2,5 cm pro Tag bis in Tiefen zwischen 40 und 89 cm festgestellt.

Wenn diese Zahlen vielleicht auch nur ungefähr den Verhältnissen im periglazialen arktischen Bereich entsprechen, vor allem wegen des Fehlens der Tjäle, der tief im Boden liegenden, von unten wirkenden Frostfront, so geben sie doch immerhin eine sehr anschauliche Vorstellung über Gefriereschwindigkeiten und Auftau- geschwindigkeiten unter natürlichen

Bedingungen bei verschiedenen Böden. Auch für die tropischen und subtropischen Gebiete sind sie grundsätzlich maßgebend.

Aus dem Amurgebiet berichtet SSUKATSCHEW über eine Gefrierzeit von 26 Tagen für eine Tiefe von 1,5 m und über eine Auftauzeit von 126 Tagen für die gleiche Tiefe. Aus der Treurenberg-Bay sind folgende Messungen bekannt (s. Tab. 10):

Tabelle 10. Eindringen des Frostes im Boden der Arktis, Treurenberg-Bay; nach J. HANN (1908)

Maximum der Temperatur in ° C in den Monaten	in Luft	im Boden bei		
		50 cm	100 cm	142 cm
Juli .....	+ 1,2	+ 0,3	— 1,8	— 2,8
August .....	+ 2,1	+ 1,6	+ 0,2	— 0,3
September .....	+ 0,3	+ 0,4	— 0,4	— 0,5
Oktober .....	— 10,5	— 4,7	— 3,2	— 3,0

## 11. Das Auffrieren

Noch ein Effekt des Verhaltens des Wassers im Boden bei Frost muß in seiner Bedeutung für den Strukturboden gewürdigt werden: es ist das Auffrieren der Steine. Bekannt ist in nordischen Ländern, wo die jährliche Frosthebung durchschnittlich 20 cm beträgt (BESKOW 1930), das Ausheben von Zaunpfählen und anderen im Boden eingegrabenen Gegenständen durch den Frost. Am Smerenburgsund fand ich Särge, die z. Zt. des 7-jährigen Krieges eingebettet worden waren, vom Frost wieder an die Erdoberfläche gehoben (Taf. 7 Fig. 1). Geologen wurden auf diesen Vorgang des Ausfrierens aufmerksam, als sie den an der Oberfläche liegenden Fossilien nachgruben, ohne weitere in der Tiefe zu finden.

Dieses Auf- oder Ausfrieren, die Anreicherung von Steinen an der Erdoberfläche, ist eine Folge der Frosthebung. Mit dem gefrierenden Boden wird auch ein im Boden eingebetteter Stein gehoben. Beim Tauen jedoch macht er seine eigene Bewegung, indem er erst dann zurücksinkt, wenn der Boden auch an seiner Basis aufgetaut ist. Während der Boden über seiner Basis um ihn herum schon auftaut und zurücksinkt, ist er eingespannt. Vielleicht ist der Stein auch durch Einschlämmung von Boden-

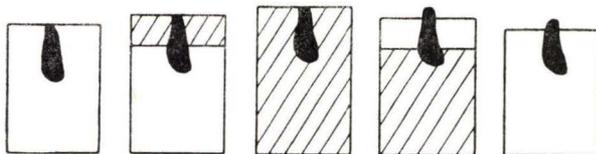


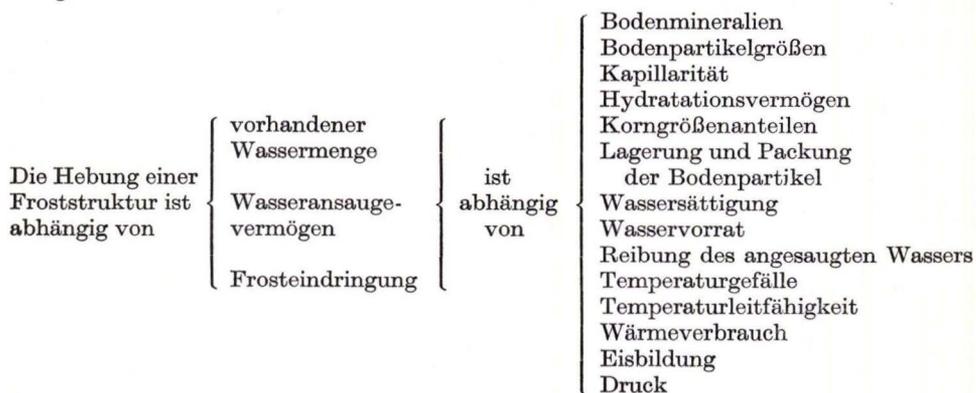
Abb. 20. Schema des Auffrierens von Steinen nach A. HAMBERG (gefrorener Boden schraffiert).

partikeln teilweise unterlagert worden, so daß er in seiner Lage festgehalten wird. Jedenfalls ist sein Zurücksinken dadurch ganz oder zum Teil gehemmt (Abb. 20). Mit jedem Gefrieren und Auftauen wiederholt sich dieser rechnerisch erfaßbare Prozeß [STECHE (1933), TABER (1930)], der nach BESKOW (1930) eine Hebung, d. h. einen Transport in der Vertikalen von 1 cm pro Meter Frosthebung bewirkt. Auch die Eisbildung an der Auflagefläche der Steine wirkt hebend mit. Da die Frostwirkung an der Erdoberfläche und in der oberen Bodenschicht häufiger ist als in der Tiefe, so wandern hier die Steine auch schneller aufwärts als in den tieferen Lagen. Sie werden schließlich aussortiert und an der Erdoberfläche angereichert. Die Folge ist eine Steinschicht, ein Steinpflaster, an der Erdoberfläche und eine darunter befindliche Erdschicht mit relativ weniger Steinen als in den tieferen Zonen. Ihre Mächtigkeit erscheint damit als eine Funktion der klimabedingten Frostwechsel, d. h. sie ändert sich mit dem geographischen Ort und dem dort herrschenden Klima. Entsprechend dem jeweiligen Frostwechsel und der vorherrschenden Tiefenwirkung wird sich eine Schicht bestimmter Mächtigkeit herausbilden, aus der die Steine schneller ausfrieren [s. a. DÜCKER (1933)]. Bereits ein einziger Frostwechsel mehr in der oberen Schicht bedeutet eine doppelt so schnelle Aussortierung und übrigens auch Frostverwitterung der Steine als in einer tieferen Schicht, die nur einmal im Jahr auffriert und auftaut. Hierin liegt die Erklärung für die dreifache Schichtung des Bodens arktischer Regionen: das Steinpflaster über der Feinerde-

schicht auf inhomogenem Schuttboden. Die Bildung der arktischen Steinwüste, die man bisher als ein Werk des Windes und spülenden Wassers ansah (PHILIPP 1914), ist in erster Linie ein Werk des Frostes.

## 12. Zusammenfassung

Rückblickend ist also für die Frosthebung, insbesondere für die Hebung und Wölbung einer Frostbodenstruktur, eine Mannigfaltigkeit sich überschneidender Systemfunktionen festzustellen, indem ein System abhängig ist von anderen, die wiederum in funktionaler Beziehung zu weiteren Systemen stehen. Für die Zwecke der Veranschaulichung und ohne Anspruch auf letzte Genauigkeit können wir die Beziehungen formulieren:



Die Zahl der bestimmenden Faktoren wird aber noch verstärkt durch Vegetation, morphologische Verhältnisse und andere schwer faßbare Momente. Die Berücksichtigung der Hauptfaktoren ergibt für ein gut entwickeltes Strukturbodenfeld das folgende Schema der Vorgänge in den Strukturzellen:

Pflanzenwall	Feinerdekern	Steinkranz
Pflanzen mit Wurzelboden auf Schuttboden aus vorwiegend groben Kornfraktionen:	Feinerde mit durchweg feinen Korngrößen	Steine auf unsortiertem Schuttboden aus vorwiegend groben Kornfraktionen
zuerst sehr langsames Gefrieren - Bildung langer Eiskristalle u. entspr. Hebung - dann schnelles Gefrieren - Volumenzunahme - viele Kristallisationskeime - massiver Frostboden (geringste Frosteindringungstiefe)	langsames Gefrieren - Wasseransaugung - Kristallisat. u. Eisschichtenbildung - Hebung u. zusätzliche Volumenzunahme - verlangsamtes Gefrieren durch freiwerdende Wärme - Eisblattbildung - geschichteter Frostboden - schnelleres Gefrieren mit Nachlassen des Wasserstromes - massiver Frostboden	schnelles Gefrieren - geringe Volumenzunahme - zunehmende Gefriereschwindigkeit - viele Kristallisationskeime - massiver Frostboden (größte Eindringungstiefe)

## V. Die Mechanik der Polygonstrukturen

### 1. Größenordnung der Frosthebung im Strukturfeld

Auf Grund der behandelten physikalischen Eigenschaften des Bodens, des Verhaltens des Wassers im Boden und seiner Wirkung auf den Boden, muß es nunmehr möglich sein, die fossilen und die rezenten aktiven Polygonstrukturen gedanklich in Bewegung zu bringen. Nur um zu einer Vorstellung über die Größenordnung der Frosthebung zu kommen, sei einmal der Versuch einer Synthese auf Grund der experimentellen Untersuchungsergebnisse gemacht.

In Anbetracht des großen Wasserüberschusses rezenter aktiver Steinpolygone dürfen wir die fossile Füllung der eingangs beschriebenen Frostbodenbildung bei Parachimiechy so in Wasser auflösen, daß sie einen dünnen Brei, eine Suspension darstellt. 60–70% des Volumens des Kessels wird somit sicherlich das Wasser einnehmen. Wir müssen weiterhin einen Eisboden im Untergrund und damit auch eine Gefrierfront unter dem Grund des Kessels berücksichtigen. Weiterhin sind uns die Gesetze des Frostes, sowie Größe, Form, Inhalt und stoffliche Ordnung einer Froststruktur soweit bekannt, daß wir eine qualitative und auch größenordnungsmäßige Behandlung der Vorgänge in einer gegebenen Struktur versuchen können.

Legen wir eine Struktur von 1,2 m Tiefe und 1 m Durchmesser zugrunde, so haben wir einen Kesselinhalt von 0,942 cm<sup>3</sup>. Macht der Wassergehalt  $\frac{2}{3}$  davon aus, so ist die Feinerde in 0,628 cm<sup>3</sup> Wasser aufgeschwemmt. Etwa zur Hälfte besteht diese, unserer Analyse entsprechend, aus Kornfraktionen unter 0,01 mm. Die Frostgeschwindigkeit beträgt bei diesen Fraktionen weniger als 0,048 m/sec bei einer Temperatur von  $-10^{\circ}$  C (DÜCKER 1939, S. 34) oder rund 0,005 mm pro Minute und pro Grad Celsius. Nehmen wir an, daß von unten, d. h. von der Tjäle her, eine Temperatur von  $-1^{\circ}$  C wirkt, so würde die Wirkung der unteren Frostfront etwa  $\frac{1}{10}$  der oberen betragen. Es würden pro Minute zusammen 0,053 mm gefrieren, d. h. zur Durchfrierung des 1,2 m tiefen Kessels wären 22641 Minuten notwendig oder rund 157 Tage – wenn die anfangs herrschenden Verhältnisse eines möglichen Wasserzustromes gewahrt blieben und keine Druckveränderungen aufträten. Das zeigt schon, daß die natürlichen Verhältnisse quantitativ schwer zu fassen sind. Ein Vergleich mit den Angaben von KREUTZ lehrt jedoch, daß unser Rechenergebnis nicht zuviel von der Wirklichkeit entfernt ist. Nach ihnen wäre der 120 cm tiefe Kessel nach etwa 100 Tagen durchgefroren gewesen ohne Berücksichtigung eines Wasserzustromes. Diese mögliche Gefrierzeit interessiert nur soweit, als sie uns vergewissert, daß viele Wochen hindurch Wasser zu den Gefrierfronten strömt, sofern ein entsprechend großes Wasserreservoir zur Versorgung der Struktur vorhanden ist. Immerhin ist auch diese Möglichkeit in arktischen Bereichen vielfach gegeben, zumindest in den Strandzonen, also im Bereich der schönsten und gleichmäßigsten Strukturfelder. Aber auch von den Hängen sickert so lange Wasser zu tieferem Gelände, d. h. in die Terrassen- und Talböden, bis der Bodenfrost tiefer reicht und es bindet. Auch Schutthalden, und vor allem die Terrassenseen, bilden Wasserreservoirs. An einer Wasserzirkulation im Boden, auch nach Einsatz der Frostperiode, kann also kaum gezweifelt werden. Ohne den Zufluß würde nun das Volumen des Kesselinhaltes

gemäß des primären Wassergehaltes durch die Eiskristallisation vergrößert werden, d. h. die  $0,628 \text{ m}^3$  Wasser würden sich um 9% und der Kesselinhalt damit schon um  $0,05652$  auf  $0,999 \text{ cm}^3$  oder rund  $1 \text{ m}^3$  ausdehnen. Das bedeutet ein Höhenwachstum auf 128 cm; die Kesseloberfläche hätte sich also um 8 cm gleichmäßig gehoben. Wir können jedoch wohl für einen Maximalwert etwa die Hälfte bis  $\frac{2}{3}$  mehr annehmen, wenn wir das Höhenwachstum auf eine Wölbung verteilen. Die Hebung kann aber noch größer sein, auch wenn wir keinen Fremdwasserzustrom berücksichtigen. Bereits das im Feinerdekessel aufgespeicherte und verteilte Wasser muß sich an den Frostfronten anreichern und bei der Kristallisation durch die Eisschichtenbildung in der obersten Krustenzone eine ganz erhebliche zusätzliche Volumenvergrößerung, also um mehr als 9%, bewerkstelligen. Mit Rücksicht auf die Versuchsergebnisse DÜCKERS und die Angaben SCHAIBLES ist eine Wasseranreicherung auf das Doppelte nach kurzer Frosteinwirkungsdauer höchstens ein Tiefstwert. Bei ausreichendem, stetem Wasserzustrom aus einem Grundwasserspeicher wäre bei unserer Korngrößenzusammensetzung mit einer Hebung von 2,7 cm/Tag oder bei nur 10 Tage währendem Wasserzustrom mit einer Hebung von 27 cm zu rechnen, wenn wir den Hebungsbetrag von rund  $4,5 \text{ mm}/4 \text{ Std.}$  nach DÜCKERSchen Versuchsergebnissen einsetzen. Mit Rücksicht auf die größere Bedeutung, die den noch feineren Korngrößen zukommt, ist dies keineswegs als ein Höchstwert anzusehen. Auch bleibt die Wirkung des möglichen Porenwinkelwassers noch ganz unberücksichtigt. Daß dies aber wirkt und gestaltet, davon überzeugt auch die oben beschriebene Aufblähung der Kryokonitflocken auf den Gletschereisnadeln! Schließlich sind auch die schnellen kräftigen Aufbeulungen in den Straßendecken beredter Ausdruck der Frosteindringung und Wasseransaugung, kurz der schnellen Frosthebung. Aus all dem ist zu ersehen, daß die bei den Experimenten und den Beobachtungen an natürlichen Objekten gewonnenen Zahlenwerte von der Größenordnung der Faktoren der Frosthebung genügen, um ein Strukturbodenfeld aktiv zu halten.

Während nun der Feinerdekern eines Brodelkessels sich durch den Frost stark heraushebt, bleibt der Bereich des Steinkranzes relativ zurück, und es werden somit jene hochentwickelten Felder mit herausgehobenen, von Steinwällen und -gürländen umzogenen Feinerdehügeln vollauf verständlich.

## 2. Bildung der Frostform

Mit Beginn des Winters rücken von oben und dort, wo Dauerfrostboden im Untergrund besteht, auch von unten die Frostfronten vor (Abb. 21). Entsprechend der besseren Wärmeleitfähigkeit der Steine und der angereicherten groben Korngrößen gegenüber der wasserübersättigten Feinerde, die zudem bei der Eiskristallisation größere Wärmemengen freigibt und damit den Gefrierfortschritt hemmt, dringt der Frost im Bereich des Steinwalles schneller in die Tiefe als im Feinerdekern. Die Frostfronten in einem Strukturfeld sind also in jeder vertikalen Schnittfläche gewellt. Das Poren- und Hydrathüllenwasser strömt auf die Gefrierfronten zu, und entsprechend der Kornbeschaffenheit, den osmotischen Druckdifferenzen und dem Wasserreichtum der Feinerde bilden sich hier Eislagen und -blättchen durch das vertikale Wachstum der Eiskristalle und ihr seitliches Zusammenwachsen. Dieses Kristallwachstum führt

zu zusätzlichen Volumenvergrößerungen und zur Aussonderung und Abstoßung der Bodenbestandteile und damit zur Hebung, die im Feinerdebereich bei dem großen Wasserreichtum der aufgeschlämmten feinstkörnigen Erde viel größer sein muß als in dem grob gepackten, an grobkörnigen Bestandteilen reichen Steinwallbereich und in der Schuttpackung unter ihm. Der Effekt ist also eine wesentlich stärkere Aufbeulung der Feinerde gegenüber dem Steinkranz oder Pflanzenpolster, wobei die Beulenform bereits durch die Einbiegung der Frostfront im Steinkranz nach unten und die damit vorgezeichnete Richtung der Ausdehnung zum Zentrum des Feinerde-

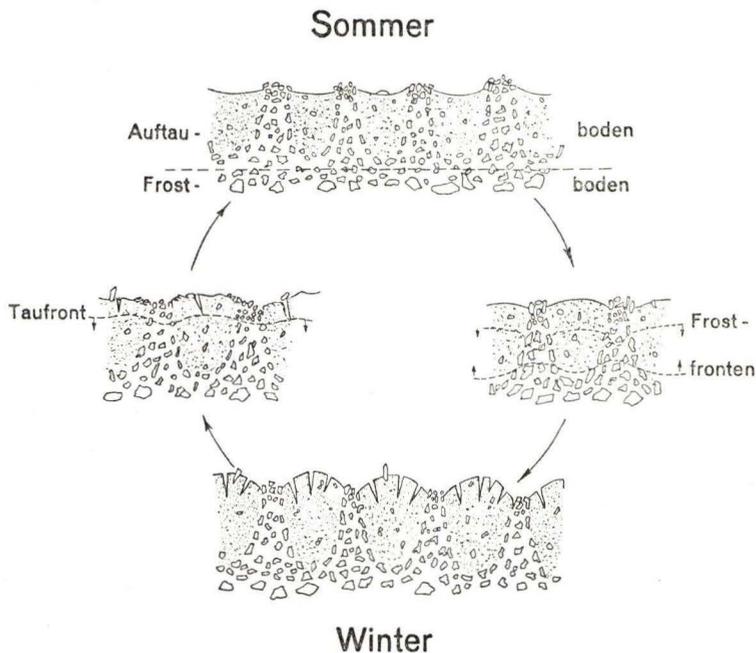


Abb. 21. Schema der Entwicklungszustände von Polygonstrukturen im Laufe eines Jahres.

kerns gegeben ist. Sie wird noch verstärkt durch die Gefriervorgänge am Grunde des Kessels. Auch hier bilden sich, soweit der Belastungsdruck dem nicht entgegenwirkt, Eisschichten durch das vertikale Wachstum der Eiskristalle. Es findet also auch hier eine Wasseranreicherung statt und eine entsprechende Volumenvergrößerung beim Gefrieren. Damit ergibt sich ein Abdrücken der Bodenbestandteile von der unteren Gefrierfront, und es resultiert eine Gesamthebung der Kesselfüllung.

Die Frostfronten rücken weiter gegeneinander vor. Zum Schluß bleibt inmitten des Kessels eine noch frostfreie, mehr oder weniger kugel- oder linsenförmige Zone übrig, die relativ arm an Wasser ist, da das Wasser allseitig abgesaugt wurde. Die Folge muß eine durch die „kapillaren“ Unterdrucke bzw. osmotischen Druckdifferenzen und den Kristallisationsdruck zusätzlich zum Belastungsdruck erzeugte Gefrierpunktniedrigung sein. Dieses Zentrum gefriert aber schließlich, und zwar massiv, nicht zuletzt auch unter dem Einfluß zunehmender Gefriereschwindigkeit

infolge der Abnahme des Wassergehaltes, des Temperaturgefälles oder durch eine plötzliche Entspannung infolge von Riß- und Spaltenbildungen im Gewölbe und Schwundrissen im entwässerten innersten Kern. Aber auch das Gefrieren des restlichen Porenwinkelwassers kann ja noch erhebliche Volumenvergrößerungen, also Hebungen, erzeugen. Es erscheint selbstverständlich, daß die Aufbeulung und die damit zusammenhängende Dehnung des bereits gefrorenen Gewölbes mit Bruchbildung verbunden ist. Beim Aufbrechen mächtiger Wölbungen, großen Hügeln in Sibirien, berichtet schon SCHOSTAKOWITSCH (1927) vom Ausfließen des Inhaltes, dessen breiige Konsistenz zweifellos auf das angesaugte Grundwasser zurückzuführen ist [s. a. QUERVAIN-MERKANDON (1920)]; solche Aufbrüche werden als „Erdquellen“ bezeichnet. Auch aus Nordamerika sind sie gut bekannt.

Die Bruchbildung im Gewölbe muß umso regelmäßiger sein – radial und konzentrisch –, je gleichmäßiger die Aufpressung und je homogener das Material ist. Außerdem dürfte ihr der durch die zunehmende Temperaturerniedrigung bewirkte Volumenschwund des Eises, bzw. des schon gefrorenen Bodens, zugute kommen. Die Auswirkungen solcher Spannungen kennen wir von den Abkühlungsformen der schmelzflüssigen Gesteine. Das Hexagon, bzw. die hexagonale Säule, entspricht, wie beim sich abkühlenden Basalt, der Beanspruchung durch allseitige Spannungen unter vollkommener Raumaufteilung. Damit wäre also die Zustandsform der Polygonstrukturen im Winter erreicht. Größere Temperaturerniedrigungen können sie nur unwesentlich beeinflussen. Tiefere Kältegrade verursachen Volumenschwund und damit womöglich eine Erweiterung oder Neubildung der Spalten. Auf die Bildung der Risse und Spalten muß aber noch näher eingegangen werden.

Die Strukturbodenbildungen im subnivalen Bereich der Hochgebirge lehren, daß die Tjäle keine notwendige Voraussetzung für ihre Entwicklung ist. Hierzu genügt vollauf die Einwirkung des Frostes von der Erdoberfläche her, wenn die übrigen Bedingungen erfüllt sind.

### 3. Die Bildung der Auftaform

Das hereinbrechende Frühjahr, bzw. die einsetzende Auftauperiode, findet das allgemeine Niveau überragende Aufwölbungen vor, die schon ihrer Exposition nach und dank ihres besseren Wärmeaufnahmevermögens (dunkle Farbe) und ihrer früheren Schneefreiheit zuerst auftauen. Die Wärmeleitfähigkeit der gefrorenen, mit Wasser bzw. Eis durchsetzten, gesättigten Erde ist größer als die der ungefrorenen und wasserfreien Steine. Infolge des fast stets lebhaften Windes in der Arktis ist das Eis größtenteils auch verdunstet. Die Poren der obersten Kruste sind z. T. jedenfalls leer. Sie nehmen Feuchtigkeit begierig auf. Ihr durch Frost geschaffenes Gefüge bricht dann zusammen, und wir haben nun, wie bei uns bei den bekannten „Tontüten“ in ausgetrockneten Pfützen, infolge der „Kapillarspannungen“ eine konvexe feuchte und eine konkave trockene Seite. Die dabei wirksamen „Kapillarkräfte“ und die Regelationswirkungen – Volumenzunahme der nassen und dann gefrierenden Schicht – können eine Verstärkung der Wölbungen der einzelnen Schollen, der sekundären Zellen, verursachen, d. h. die Bildung der sekundären Polygone, die bei reinen Feinerdestrukturen erst mit der stärkeren Aufnahme der Schneeschmelzwässer verschwin-

den. Die Oberkruste wird dann ganz weich und flüssig, und Steine und Pflanzen usw. gleiten ab (s. Tafel 4 Fig. 2), die Gewölbeform bricht langsam zusammen und sinkt zurück (s. Tafel 4 Fig. 1 u. Tafel 5 Fig. 1 u. 2). Die Regelation wirkt dabei fördernd auf das Abgleiten der Steine, ihren Transport seitlich abwärts zum Steinkranz. Auch Kammeis, für das bei gelegentlichen Zwischenfrösten unter Umständen Entwicklungsmöglichkeiten (Krümelstruktur des Bodens ist sicherlich Voraussetzung!) gegeben sein dürften, kann dabei zur Geltung kommen. Die Auftaufront dringt nun in den Wölbungen der Feinerde zuerst ein, jedoch bald langsamer vor als in den Steinwällen und wiederum schneller als in Pflanzenwällen oder -polstern [GRIPP (1926), ELTON (1927) und eigene Beobachtungen (1936)], bis ihr mit dem Nachlassen der endogenen Wärmezuführung ein Halt geboten wird. Sie erreicht also mit einer vorverlegten (dagegen bei BÜLTEN z. B. mit zurückgebliebener) Front den Kesselboden.

Mit der Zeit gleicht sich diese Wellung der Taufont aus zu einer annähernd gradlinigen, der Geländeoberfläche parallel gehenden Isotherme. Der ganze Kessel hat durch den Tauprozeß und die Zuführung von fremden Schmelzwässern den Zustand der Suspension wieder erreicht, er bewahrt ihn dann mehr oder weniger bis zum Beginn des Winters, je nach hydrogeologischer Position usw. Die Auflösung des stützenden inneren Gerüsts der Gewölbe – durch das Schmelzen der Eisschichten und -blätter und des gefrorenen Porenwinkelwassers – führt zum Zusammensinken der ganzen Form und bedingt das fühlbar lockere, elastische Gefüge aufgetauter Polygonböden. Bei Steinringen erreicht der Zusammenbruch zuerst sein Ende, unter Pflanzenpolstern zuletzt. Auch sie sind also bewegliche Gebilde, Zwischengelenke im Strukturbodenfeld.

#### 4. Sekundäre Polygone

Als eine Besonderheit von Bedeutung muß allgemein die Bildung der „Blumenkohlformen“ (Tafel 3 Fig. 1) angesehen werden, jene Zerlegung von Lehmbeulen oder Erdhügeln durch ein sekundäres polygonales Spaltennetz, wobei jede Zelle durch eine eigene konvexe Wölbung ausgezeichnet ist. Diese Erscheinungen finden wir immer dort, wo Feinerde in Blockhalden durchgebrochen ist, und überhaupt da, wo die hügelige Winterform den Sommer überdauert. Die Oberfläche dieser Polygone ist im Sommer erstaunlich hart und dick. Dieser Befund ist mit STECHE (1933) auf die Dichtschlammung der Feinerde, die Dispersionsvergrößerung der Bodenkolloide infolge der Entführung der Elektrolyte durch die Schmelzwässer, vornehmlich im Frühjahr, zurückzuführen. Diese Dichtschlammung der Oberfläche bewahrt die Struktur weitgehend vor starker Verdunstung und damit vor der Schrumpfung tieferer Teile, so daß sie im Sommer unveränderlich erscheint. Die Dichtschlammung wird erst durch elektrolytreichere Wässer im Herbst infolge der sommerlichen Verwitterung und Lösungsbildungen aufgehoben, die Kolloide quellen und geben damit dem Boden wieder gröbere Struktur. Mit Eintritt des Frostes aber werden die Salze durch das Gefrieren von der Oberfläche her ausgeschieden, bzw. als immer stärker werdende Lösungen in die Tiefe gedrängt, bis auch sie die Tjäle als Grenze erreichen und gefrieren. Salzlösungen aber erhöhen die Frostgefährlichkeit [BESKOW (1930)], d. h. sie verstärken die Hebung, da sie einen größeren Wassergehalt des Bodens vorher bedingten.

Während nun die Zellenbildung das polygonale Spaltennetz zweifellos durch die allseitig gleichmäßige Dehnung der Oberkruste bei der Wölbung beansprucht und durch Kontraktion infolge der Verdunstung im Sommer oder Volumenschwund bei großer Kälte im Winter und durch den Wasserentzug im tieferen Teil verstärkt ist, muß die Herausarbeitung der jeder Zelle eigenen Wölbung auch noch einem anderen Mechanismus unterliegen. Hier erscheint besonders die Verwitterung der Kanten, ihr Abbröckeln als Folge von Frost und Verdunstung, ihr Abschleifen durch Wind und Wasser von Bedeutung zu sein. An einmal vorgegebenen Formen können sich zudem die Spannungen auswirken, die uns von den Tontüten her bekannt sind. Außerdem muß sich aber in jeder Einzelzelle das Kräfte- und Bewegungsspiel wiederholen, das die Großform gestaltet hat. Da nicht genügend Feuchtigkeit zur Aktivierung der Großform vorhanden ist, ist die Gestaltung der Sekundärpolygone, der Blumenkohlformen und auch der kleinen sekundären und tertiären Steinnetze in einer Großform, nur das Ergebnis der Frosteinwirkung auf eine geringmächtige feuchte, bzw. nasse Oberschicht. Die Herausbildung der ganzen Großstruktur aber ist allein verursacht durch die Frosthebung der in größerer Tiefe wasserreichen Feinerde. Ihre Erhaltung während des Sommers ist nur möglich bei sehr kurzer Einwirkungszeit der Schmelzwässer im Frühjahr und sehr schnellem Abfluß oder Verbrauch des Grundwassers. Bezeichnend ist daher, daß auch bei den abgebildeten Strukturen (Tafel 3 Fig. 1) schon etwa 14 Tage nach Beginn der Schneeschmelze kein Wasser mehr an der Geländeoberfläche zu finden war.

Das Fehlen von Strukturböden in nassen, wasserreichen Talböden u. ä., wo die Vorbedingungen starker Frosthebung vorhanden zu sein scheinen, kann nur auf äußeren Gründen beruhen. In erster Linie dürfte hierfür die ständige Unruhe und Umschichtung des Bodens durch bewegtes Wasser und Eis in Frage kommen, wodurch die Entwicklung der Polygone verhindert wird. Die Keime und Anlagen werden in Hochwasserzeiten immer wieder zerstört. Daß sie aber auch hier nicht unmöglich sind, zeigt der Bericht HÖGBOMS (1927) über einen Steinring in einem Flußbett und die oben beschriebenen Hügelbildungen im Seetal (Tafel 3 Fig. 2), die zweifellos bei dem nächsten Hochwasser wieder eingeebnet worden sind.

### 5. Das Sortierungsprinzip

Das Bewegungsbild unserer Steinpolygone erscheint klar und widerspruchlos. Doch in diesem ganzen Prozeß tritt das sortierende Prinzip, die Absonderung und Sammlung der Feinerde in tief eingesenkten Kesseln und die Anhäufung der Steine zu Wällen und Kränzen, dem Scheine nach zurück. Hierbei lernten wir nur das spontane Abgleiten der Steine von den Hügelwölbungen als wesentlichstes Moment, als Solifluktion im kleinen, kennen, z. T. begünstigt durch den vorausgehenden Zusammenbruch im Steinring. Neben dieser seitlichen Verfrachtung, die zur vollkommenen Entfernung der Steinbedeckung der Hügel führen kann und muß, findet ein Transport in vertikaler Richtung statt. Wir beobachten offensichtlich nichts als das Auf- und Ausfrieren von Steinen, die nicht selten mitten auf dem Gewölbe in senkrechter Stellung hoch in die Luft ragend zu finden sind.

BESKOW (1930) und HAMBERG (1916) haben diesen Vorgang des Auffrierens anschaulich dargestellt (Abb. 20). Bereits HÖGBOM (1914) und viele andere Forscher

sahen in diesem Vorgang, dem Frosthuh, ein Hauptmoment zur Erklärung der Bodensortierung. Es ist auch klar, daß das Auffrieren im einmal gegebenen Feinerdekessel intensiver und reibungsloser vonstatten geht als im Bereich der stark inhomogenen Umwallung und an der Kesselwand. Die Hubhöhe ist im Kesselzentrum am größten, die Bewegungsrichtungen sind vertikal oder mehr oder weniger schräg aufwärts gegen die Wandung. In der Wandung des Kessels ist die Regelung in der flachen Anlagerung der Steine angedeutet. Man kann sich auch leicht vorstellen, daß im Laufe der Zeit die Steine aus dem „Brodelskessel“ auf diese Weise unter dem Einfluß häufiger Frostwechsel gänzlich verschwinden. Dabei ist es gleichgültig, ob es lange oder kurze, ob es winterliche oder nächtliche Frostperioden sind. Wesentlich ist, daß sie nicht nur die Oberflächenschicht betreffen, sondern auch in der Tiefe als oszillierende Frostfront wirksam sind, wie die Messungen von FRÖDIN (1912) ausweisen (Tab. 11).

Tabelle 11. Frosttage auf Kerguelen und Snow Hill (nach FRÖDIN 1913)

Ort	Frosttage	Eistage	Frostwechsel- tage	Frostfreie Tage
Kerguelen in Luft	140	20	120	225
Bodenoberfläche	248	10	238	117
Boden in 5 cm Tiefe	0	0	0	365
Snow Hill in Luft	364	266	98	—
Boden in 30 cm Tiefe	298	280	18	67
Boden in 50 cm Tiefe	363	356	7	2
Boden in 100 cm Tiefe	365	365	0	0

FRÖDIN hat der Frostwechselhäufigkeit bei der Bildung von Strukturen bereits besondere Bedeutung zugemessen. Letzthin hat TROLL (1943 und 1944) diese Beziehungen klar dargelegt.

Der Grad des Steinfreiseins des Feinerdekessels gegenüber dem inhomogenen Schuttboden, in dem er sich entwickelt hat, kann daher als Kriterium seines Alters gelten.

Im allgemeinen kommt den Frostwechseln im Boden der Polargebiete keine sehr große Bedeutung für das Strukturphänomen selbst zu. Einmal verhindern Schnee- oder Pflanzendecken das Tieferdringen des Frostwechsels, zum anderen ist die Temperaturveränderung im Boden langsamer als in der Luft, wie folgende Zahlen (Tab. 12) von der russischen Polarstation an der Lenamündung (1882/1883) zeigen.

Tabelle 12. Frostwechsel in Luft und Boden an der Lenamündung

Tägliche Temperaturschwankung	in Luft	in 40 cm Bodentiefe
September .....	1,4	0,1
Oktober .....	1,5	0,2
November .....	1,0	0,2
Dezember .....	1,0	0,4
Januar .....	0,5	0,1
Februar .....	1,5	0,0
März .....	4,7	0,2
April .....	6,4	0,2
Mai .....	4,6	0,7
Juni .....	2,6	0,3
Juli .....	2,6	0,5
August .....	3,7	0,3

Für die Herausbildung des Steinpflasters ist aber auch diese (s. S. 53) geringe Zahl sehr wichtig.

Neben dem vertikalen Frosthübel im Innern und der Solifluktion an der Oberfläche der Struktur ist der seitliche Frosthübel von untergeordneter Bedeutung. Er bewirkt jedoch, daß die sich in den Randzonen und Spaltensystemen ansammelnden Steine dicht gepackt werden und häufig Kantenstellung einnehmen. Auch im Inneren des Kessels werden sie an die Wandung gepreßt, so wie es der Aufschluß der fossilen Form in schönster Weise zeigt (s. Tafel 1 Fig. 1 u. 2).

Auch dem Kammeis kommt im arktischen Bereich keine so große Bedeutung zu, wie das offenbar in den Hochgebirgen der Tropen der Fall ist. Die Bildung von Eissäulchen und Eishäutchen unter Steinen und Bodenpartikeln darf aber auch im arktischen Gebiet nicht unterschätzt werden. Auch sie haben vertikale Struktur, d. h. die Eiskristalle stehen und wachsen senkrecht zur Abkühlungsfläche. Abgesehen davon, daß ihre Bildung auf gewölbten Oberflächen stets eine kleine seitliche Verlagerung bedeutet, haben sie dadurch eine wichtige Funktion, daß die Eisschicht beim Schmelzen zu einem Wasserfilm wird, der das Abgleiten unmittelbar ganz erheblich begünstigt und überhaupt erst ermöglicht.

Nach der Zeit der Schneeschmelze und im Winter fehlen in der Arktis die klimatischen Voraussetzungen für eine Kammeisbildung, nämlich ausreichende Krümelstruktur des Bodens, genügende Bodenfeuchtigkeit und intensives Ausstrahlungsklima. Sobald dies gegeben ist, entwickelt sich auch Kammeis, sogar auf Gletschern mit einer gewissen Umkehrung des Vorganges. Im polaren und subpolaren Bereich sind Auffrieren, Frosthübel und Solifluktion die maßgebenden Kräfte bei der Sortierung des Schuttbodens. Andererseits deutet die Vertikalstruktur der Eisblätter gewissermaßen kompaktes Kammeis an.

Von besonderem Interesse sind nun noch die Vorgänge am Kesselboden. In unserer fossilen Form müssen sie im Prinzip konserviert sein. Wir sehen (vgl. Tafel 1) die klare Linie der Wandung am Kesselgrunde übergehen in eine unregelmäßige, die auf und ab geht und nach den Seiten einbiegt. Der dunkle Lehm dringt apophysenartig, oft keilförmig in die Tiefe zwischen die Steine. Zum Teil sind diese schon dem Feinerebereich einverleibt, der sonst ziemlich steinfrei ist.

Wir müssen uns fragen: Wie vollzieht sich hier das „Auffrieren“ der Steine? Gilt auch hier, daß sie der Abkühlungsfläche der Tjäle, also der nächsten Frostfront entgegenwandern? Offensichtlich nein!

Die beim Aufrücken der unteren Frostfront sich um die Steine bildenden Eishüllen und die Volumenvergrößerungen des Kesselinhaltes durch Ansaugen von Wasser und dessen Kristallisation zu Eis und Eisschichten können die Steine von der naheliegenden tieferen Front nur wegdrücken, sie wahrscheinlich sogar beschleunigen, sie jedenfalls nicht der Tjälefront entgegenschieben. Beim Tauen werden sie dann in dieser Lage eingeschlammert. Auf diese Weise muß der Kessel in die Tiefe wachsen, bis ihm durch die Auftautiefe eine Grenze gesetzt ist. Die Wanderung der Steine folgt der Richtung des geringsten Widerstandes, tendiert also aufwärts und gegen die Wandung. Die Steine an der Wandung selbst zeigen mit ihrer steilen Stellung weiterhin die Anpassung an die Strömung oder Fließrichtung des ganzen Kesselinhaltes. In dieser Lage bereiten sie den aufwölbenden und einsinkenden Bewegungen

den geringsten Widerstand, die kleinste Reibung, und säumen damit, z. T. schon primär in Hochkantlagen, den Feinerdefleck. Dem Prinzip der kleinsten Reibung dient offensichtlich auch die in den Absonderungsflächen erhaltene schalige Struktur der Füllung, die nicht nur hier, sondern auch in sandigen fossilen Formen erhalten ist [v. GÄRTNER (1941)]. Wahrscheinlich stellten sie die Fugen der Eisblätter dar. KOKKONEN (1926) berichtet, daß in einmal gefrorenem Lehm die ersten Strukturen immer wieder vorherrschen [s. a. DÜCKER (1940), BESKOW (1935)]. Und diese wiederum fungieren als friktionsfreie bzw. friktionsarme Flächen, sowohl bei der Aufwölbung – vorzüglich so lange sich angesaugtes Wasser an den Eisblättern lagert – als auch beim Einsacken durch das Auftauen.

In den Polygonböden der Arktis und auch des subnivalen Bereiches der Hochgebirge sind Auffrieren (Frosthub) und Solifluktion im kleinen die entscheidenden Faktoren, die zur Materialsortierung führen, zur Trennung der groben und feinen Korngrößen für die Bildung der Steinnetze, Steinwälle und Feinerdeflecken. Als Kraftquelle der Strukturbildung ist die Volumenenergie des kristallisierenden, primär vorhandenen und sekundär angereicherten Wassers anzusehen. Diese Kraft wird gesteuert durch die aus der Metamorphose des Wassers in Eis resultierende Energie. Sie preßt den Kesselinhalt hoch. Entspannung, Reibungsminderung bei den oszillierenden Bewegungen infolge des Gefrierens und Auftauens ergibt sich dabei als herrschendes und gestaltendes Prinzip. Das ganze Problem der Strukturböden ist ein Raumproblem der Frostwirkungen im Boden, insbesondere der kristallisierenden, durch Frost angesaugten Wassermengen. Sie werden mobilisiert durch die osmotischen Druckdifferenzen, die in dem polydispersen System Boden unter der Frosteinwirkung, dem Eiskristallwachstum, entwickelt werden.

Die Steinwälle, bzw. Steinnetze, -knoten, -haufen und -guirlanden und die darunter befindlichen Wände inhomogenen Schuttes, sowie die Fugen der Polygone, sind die Stützen und Pfeiler und die Gelenke des sich hebenden und senkenden Bodens in den Strukturfeldern. Es ist nicht mehr schwer, sich die Bewegungen, Regelungen und Sortierungen in vorhandenen, bereits ausgebildeten Strukturböden vorzustellen. Wo aber liegt nun der erste Impuls zur Entwicklung und Bildung der Strukturen?

## 6. Der Bildungsimpuls

Als das mechanisch gestaltende Mittel der Bodensortierung herrscht das Auf- und Ausfrieren der Steine, bzw. der großen Korngrößen, die als die Elemente des Gefügewiderstandes im Boden bei der Frosthebung nach unserer Betrachtung anzusehen sind. Durch nichts kann klarer und anschaulicher die gewaltige Kraft des Aufrierens gezeigt werden, als mit dem durch den Frost langsam aus dem Boden gehobenen Sarg (Tafel 7 Fig. 1) im Gräberfeld auf dem Vorland zwischen dem Nordausgang des Smerenburgsundes und der Vogelbucht. Die Frosthebung im weitesten Sinne muß auch den Impuls zur Aufbeulung und allerersten Sortierung der Bodenkuste enthalten.

Unser Aufschluß der fossilen Form scheint die Merkmale anzudeuten: eine dünne lehmige Schicht trennt hier und da den Schuttboden von einem oberflächlichen Stein-

streifen, bzw. einer Steinlage (Tafel I Fig. 1). Sie erinnert an die polare „Hammada“ [PHILIPP (1914)], das Steinpflaster der arktischen Wüste [POSER (1931), SALOMON (1929)]. Sie soll nach bisheriger Anschauung entstehen durch Ausblasung und Auswaschung der steinigen Oberflächenschicht. Ihre Bildung ist aber vor allem auf das Ausfrieren der Steine (s. a. S. 53) zurückzuführen. Auch fossil wurde sie mehrfach gefunden [s. a. STECHE (1933), DÜCKER (1933); eigene Beobachtungen im Vogelsberg]. Dieses Moment, die Bildung des Steinpflasters durch Ausfrieren der Steine und der damit verbundenen Anreicherung der Feinerde unter ihr, erscheint besonders wichtig. Im Andréeland sah ich oft Aufschlüsse einer an Steinen armen Feinerdeschicht von 10–20 cm Mächtigkeit unter einer 5 und 10 cm starken Schicht, die nur aus Steinen bestand, selbst bei stärkeren Geländeneigungen. Auch die abgebildeten Strukturfelder (Tafel 4 und 5) zeigten diese Feinerdeschicht. Sie ist als die erste Wirkung des Frostes und als Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung der Bodensortierung und Strukturierung anzusehen. Ihre Mächtigkeit ist im wesentlichen eine Funktion des Kleinklimas, der lokal häufigeren Frostwechsel in der oberen Bodenschicht gegenüber der tieferen Schicht. Ein häufigerer Frostwechsel in der oberen Bodenschicht muß sich nämlich solange auswirken, wie Steine von der Oberfläche aus in den gefrierenden Boden hineinragen. Durch die Steine dringt die Frostfront schneller vor; durch die Eisbildung an ihrer Unterfläche und mit der Frosthebung der Feinerde gefrieren sie allmählich aus, und es bildet sich das Steinpflaster und darunter eine Feinerdeschicht bestimmter Mächtigkeit. Die Frostverwitterung kommt ihrer Bildung, der Anreicherung feinsten Korngrößen, entgegen. Damit wird sie ein ganz bevorzugter Wasserspeicher. Ihr Auftreten ist genau wie die Verbreitung der Polygonböden gebunden an Zonen dauernder oder jedenfalls bevorzugter Feuchtigkeit und somit auch eine Funktion des Wassergehaltes.

In die an Feinerde und Wasser reiche Schicht dringt die Frostfront mehr oder weniger gleichmäßig ein. Diese Gebiete liegen natürlich am tiefsten. Hier muß sich das Steinpflaster und die Feinerdeschicht am besten und stärksten entwickeln, zumal in diesen Teilen auch Feinerde sedimentiert wird durch Wind und Wasser. Bei Frost bilden sich Eislinsen und -blättchen entsprechend der Korngrößenverteilung und -anreicherung, dem Wassergehalt und dem Temperatureinfluß. Mit fortschreitender Frost- und Volumenzunahme in der Feinerdeschicht über dem inhomogenen Schuttboden treten immer größer werdende Spannungen auf. Kleine örtliche Ungleichheiten, flache Erhöhungen und Dellen, Blöcke, primär frostgefährliche Feinerdeanreicherungen können Anlaß zu ersten Druckentlastungen, zu Aufbrüchen der Feinerde werden und so die Entwicklung eines Strukturbodens einleiten. Mit den ersten, gewissermaßen selektiven Aufbrüchen sind die Möglichkeiten zur Tieferentwicklung und weiteren Materialsortierung gegeben. Auch die Entwicklung einzelner großer Strukturen von 3–8 m Durchmesser in flachen Dellen ist so durchaus verständlich. Die Riß- und Spaltenbildung, die Entwicklung von Ablösungsflächen, auf die noch einzugehen ist, kommt noch dazu als unentbehrliches und entscheidendes Moment.

### 7. Spaltenbildung

Problematischer dagegen erscheint die Entwicklung eines Strukturbodens aus homogener Feinerde ohne Steine, wie sie oft hinter Strandzonen zu finden sind, in

Becken hinter Strandwällen, die aufgefüllt wurden mit der feinen Trübe der Bäche und Schmelzwässer. Ihre regelmäßige polygonale Felderteilung ist ganz besonders auffallend. Ebenso problematisch erscheinen bis heute noch die polygonalen Felderteilungen im Großen und im Kleinen auf Terrassenflächen und Talböden mit geringmächtiger Feinerdedecke. Zum Verständnis ihrer Entwicklung erscheint mir die Beobachtung eines kleinen Steinnetzbodens (Tafel 7 Fig. 2) in der Wood-Bay besonders aufschlußreich.

Das ungefähr 10 mal 10 m große Strukturbodenfeld lag unmittelbar nördlich des Mündungsdeltas vor dem Vaerdalen im Bereich periodischer Überflutungen. Bis 15 mm breite Spalten grenzten im kleinschuttreichen lehmigen Boden sauber gezeichnete Hexagone und Pentagone von 30–50 cm Durchmesser ab. Sie reichten 20 bis 30 cm in die Tiefe und fielen mit sehr steilem Winkel ein unter die einzelnen Schollen, die Zellen. Einzelne flache Steinchen waren schräg aufgerichtet in den Fugen festgehalten, wobei ihr Schwerpunkt vielfach eindeutig über der jeweiligen Zelle, nicht über der Spalte lag. In der Tiefe gingen die Spalten in eine horizontale Fuge über, die eine Materialgrenze darstellte zwischen schuttärmerem oberem Boden und schuttreicherem Boden in der Tiefe.

Indem die Spalten jeweils unter die einzelnen Zellen einfielen, ergab sich zwischen ihnen eine Art Mauer aus schuttreicherem Material, das aber mit den oben locker gelagerten Steinchen der Netze nicht in Verbindung stand. Die Lage der Schwerpunkte der aufgerichteten, in den Spalten festgehaltenen Steinchen läßt keinen Zweifel daran, daß die beobachteten ebenen Zellenoberflächen Wölbungen gehabt haben müssen, die der Neigung der Steinchen entsprochen haben. Weder Wind und Wasser, noch Schnee und Eis können für diese Stellung und Ordnung in Anbetracht der häufigen Wiederholungen verantwortlich gemacht werden. Vielmehr zeigt sich hier eindeutig, daß die Steinnetze Miniaturstrukturen in statu nascendi darstellen, als Folge kurzer lokaler Frostperioden oder eines begrenzten Wasservorrates.

Ihre innere Verwandtschaft mit den von Pflanzen besetzten Feinerdepolygonen zeigte ein unweit davon liegender Aufschluß, der durch einen kleinen Erdbeben geschaffen worden war und sich leicht weiter freilegen ließ. Auch hier standen die Feinerdezellen wie zwischen einem Netz aus Leisten von feinem Schutt. Die Materialsortierung war dem Steingehalt der Feinerde entsprechend günstigenfalls nur angedeutet. Die Beschränkung des Pflanzenwuchses auf die Randzonen der Polygone zeigte aber, daß sie aktiv, d. h. lebendig sind, zur Frostperiode gewölbt werden und daß Regelation und Solifluktion eine Bewachsung der Wölbungen verhindern [SCHENK (1955), Abb. 2]. Die Böden in beiden Feldern waren feucht. Eine größere Feuchtigkeit werden sie zweifellos durch herbstliche Niederschläge bekommen, eine größere Durchnässung erfahren sie aber erst durch Schneeschmelzen.

Da das Feld mit den Steinnetzen in periodisch überflutetem Gelände lag, zwingt sich die Vorstellung auf, daß es erst nach der Frühjahrsschmelze durch kurze Fröste entstanden ist. Wahrscheinlich fällt die Aktivität der Pflanzenpolygone gerade in die Zeit kurzperiodischer Herbstfröste bei größerer Bodenfeuchtigkeit. In beiden Fällen wäre die entscheidende Frage nach der Entstehung des Spaltennetzes als mechanisches Mittel der Raumlagerung und Aufwölbung wohl ziemlich klar zu beantworten. Als sommerliche Trockenrisse sind sie nicht zu deuten. Dazu fehlt an beiden Stellen

die Voraussetzung. Außerdem gibt es große Strukturfelder mit Spalten, bei denen an eine Austrocknung überhaupt nicht zu denken ist. Die Spalten müssen also Wirkungen des Frostes sein. Offen aber bleibt zunächst die Frage, ob sie durch die Frosteinwirkung vor oder während der Wölbung entstanden sind. Der Befund des Steinnetzfeldes spricht für eine Entwicklung der Spalten während der Aufwölbung der Strukturen, also während des Gefrierens. Deshalb darf man wohl annehmen, daß ausgedehnte Feinerdepolygonfelder mit größerer Bodenmächtigkeit ihr Spaltennetz auch bei der Aufwölbung durch Frostwirkung entwickeln und, einmal angelegt, immer wieder benutzen. Die bisherigen experimentellen Ergebnisse von KOKKONEN, JOHANSSON, TABER und DÜCKER lassen noch nicht klar erkennen, welche Beziehungen bestehen zwischen Bodenmächtigkeit, Polygongröße, Gefriereschwindigkeit, Temperaturgefälle, Korngrößen, Wassergehalt, Aufwölbungsdruck und Spaltenbildung. Die vorwiegende und auf Gebiete mit schnell auftretenden sehr tiefen Temperaturen (Taimyrhalbinsel, Alaska) beschränkte Verbreitung der Eiskeilspaltennetze deutet überdies modifizierend wirkende Unterschiede an.

Die Untersuchung und Beurteilung der Spaltenbildung muß ausgehen von den Eisblättern und Eisschichten, dem aus Eis bestehenden Netz- und Zellenwerk im Frostboden. Die vertikalen Eisblättchen und -gänge sind ja nichts anderes als die von Eis aufgefüllten und verheilten Risse im Boden, die wiederum durch das Gefrieren entstanden sind. Die Experimente [TABER (1943), DÜCKER (1939)] lehren, daß fugenfrei eingebrachte feinkörnige Böden während des Gefriervorganges ein wabenartiges Gewirr von Eisblättern entwickeln, wobei vielfach hexagonale Formen angedeutet erscheinen. TABER (1943) hat auch in den bergbaulichen Aufschlüssen in Alaska sehr eingehend die Eisstrukturen studiert. Er stellte u. a. fest, daß die horizontalen Eisschichten nicht von den vertikalen Blättern durchkreuzt werden. Vielmehr enden die Blätter stets an den Schichten. Daraus ergibt sich, wie TABER zeigte, eine Alters- bzw. Entwicklungsfolge. Zuerst entstehen die horizontalen Lagen mit Eiskristallen, die senkrecht zur Abkühlungsfront wachsen. Dem Boden im Liegenden der wachsenden Eisschichten wird dabei Wasser entzogen, und zwar je nach der Gefriereschwindigkeit in beträchtlicher Menge [s. o. S. 39, WEGER (1954)]. Dies muß einen Volumenschwund der noch nicht gefrorenen Bodenmasse zur Folge haben [s. a. VAGELER (1932)]. Zunächst muß die kapillare Verbindung zur Tiefe – bei gleichförmigen Böden im gleichen Niveau – abreißen, und damit wird die Oberfläche der später sich entwickelnden weiteren horizontalen Eisschicht bestimmt. In der darüber liegenden Schicht dauert die Wasseransaugung aber noch fort. Mit fortschreitendem Wasserentzug entstehen dann Kontraktions- bzw. Schwundrisse in vertikaler Richtung. In diese Risse können die Eiskristalle leichter hineinwachsen, auch von den Seiten her Wassermoleküle einbauen, nach der Tiefe dringend die Fugen erweitern und so Eisblätter bilden. Damit und durch die Vorgänge beim Auftauen werden denn auch die Verbiegungen und Verschleppungen an den Eisblättern und Eisspalten, Eiskeilen usw. verständlich, die an rezenten und fossilen Bildungen so oft beschrieben worden sind [DÜCKER (1951), WEINBERGER (1944), SELZER (1936), SÖRGE (1936), WEGER (1954) u. a.].

Diese Kontraktion und ihre Folgen müssen getrennt werden von dem Volumenschwund des Eises und gefrorenen Bodens bei fortgehender Temperaturerniedrigung

oder plötzlichen tiefen Kälteeinwirkungen. Die Bildung dieser Spalten ist von v. BUNGE (1902), LEFFINGWELL (1915, 1919), TABER (1943) u. a. beschrieben worden. Sie war Ausgang der bisherigen Erörterungen [SOERGEL (1936), SELZER, G. (1936), TABER (1943), TROLL (1944), GALLWITZ (1949), DÜCKER (1951)], die aber zu keinem befriedigenden Ergebnis hinsichtlich der Eiswabenstruktur in den Frostböden führten. TABER verdanken wir hierbei eine volle Klärung der Verhältnisse und die sichere Schlußfolgerung, daß die Eisschichten und Eisblätter nicht durch Kontraktion als unmittelbare Wirkung des Frostes entstanden sein können. Seine Argumente sollen hier wiedergegeben werden:

1. Die Eisschichten liegen parallel zur Erdoberfläche.
2. Die Eisblätter gehen von Eisschicht zu Eisschicht.
3. Die Eisblätter bilden ein Netzwerk um mehr oder weniger polygonale Feinerdesäulen.
4. Die Feinerde gefriert nach der Bildung der Eisblätter.
5. Die Eisschichten oben und unten bilden mit dem Netzwerk der Eisblätter eine Zellen- und Wabenstruktur.
6. Das große Eisvolumen der Zwischenräume macht die Bildung der Eisblätter nach der Entstehung des Dauerfrostbodens unwahrscheinlich.

TABER kommt zu dem überzeugenden Ergebnis, daß die Kontraktion des gefrorenen Bodens nicht Ursache der Strukturbildung sein kann, denn ehe Schmelzwässer wirksam werden könnten, ist die Kontraktion rückgängig gemacht. Dies gilt übrigens auch für die Entwicklung und Entstehung der Taimyrrpolygone (Tafel 9, Fig. 2).

Für kleine und große Polygonfelder mit größerer Bodenmächtigkeit in Dellen und flachen Becken erscheint als einfachste und gemeinsame Lösung die Polygonentstehung durch aufwölbende Wirkung der ganzen Beckenauffüllung infolge der Linsenform des ungefrorenen Untergrundes, die sich bei dem Vorrücken der Frostfronten als Durchgangsstadium entwickeln muß. Bei der Spannung und Dehnung der Oberflächenschichten entstehen dann Spalten und Zellenbildungen in ziemlich gleichmäßiger Größe. Die von einem Punkt ausgehende dreistrahlige Reißbildung ist als untrügliches Zeichen solcher Spannungen anzusehen. Zu dieser Beanspruchung tritt mehr oder weniger gleichzeitig der durch die osmotischen Kräfte, die Dehydratation, verursachte Volumenschwund im noch gefrierenden Boden und die entsprechende Reiß- und Spaltenbildung, die die Eiswabenstruktur zur Folge hat.

Dem Volumenschwund des Bodens als Folge des Gefriervorganges, d. h. des Wasserentzuges durch den Frost, hat man bis heute für die Reiß- und Spaltenbildung keine Bedeutung beigemessen. Das bedeutet nichts weniger, als daß man an dem Einbau der Wasserteilchen im Boden vorbeigegangen ist, jedenfalls die Ergebnisse bodenkundlicher Forschung nicht voll ausgeschöpft hat.

Entscheidend für das Verhalten des Bodens bei dem Gefrieren ist, daß bereits mit dem Absaugen des Wassers aus einer tiefen Bodenschicht durch die Kapillaren der mechanische Druck auf die Bodenteilchen wächst infolge des Fortfalles des Auftriebs und der in höheren Schichten wachsenden Eiskristalle. Der Durchgang durch die Kapillaren wird eingeengt, das spannungsfreie Porenvolumen verringert, der Wasseranschub läßt nach, und schließlich reißen die kapillaren Fäden ab. Unter Bildung

von Menisken zieht sich das Porenwasser zunächst in die feineren Porenschlote und endlich in die Porenwinkel zurück. Dementsprechend entstehen Unterdrucke und Kapillardrucke, die sich letztlich auch auf die hygroskopische Wasserhülle der Bodenteilchen auswirken und diese so weit verringern, wie die Adsorptionskräfte es zulassen. Mit der Verringerung der hygroskopischen Hüllschicht wird der Abstand der Bodenteilchen immer geringer. Wir bemerken dies als Schwindung. Ihr Maß ist gegeben durch die Gleichung

$$E_q = \frac{p - p_1}{p_1} \quad (\text{nach ZUNKER 1930}),$$

worin  $p$  das Porenvolumen zu Beginn und  $p_1$  das Porenvolumen am Ende des Schwindungsvorganges bezeichnet. ZUNKER (1930, S. 85) hat für eine große Anzahl von Böden die kubische Schwindung berechnet. Bei einem Porenvolumen von 51,4% und einem Wassergehalt von 46 Vol.% beträgt sie 29,6%. Bei einem Porenvolumen von 32,3% und einem Wassergehalt von nur 25,5 Vol.% beträgt sie immer noch 9,5%. Diese Zahlen beweisen bereits, daß die Schwindung des seines Wassers beraubten Bodens im Strukturbodengebiet (s. S. 39, Tab. 7) ganz beträchtlich ist und ohne weiteres die Riß- und Spaltenbildung und damit die große Tiefenwirkung auch von „Eiskeilen“ (*ice-wedges* im amerikanischen Sprachgebrauch) verständlich macht. Zum anderen erklärt das geschilderte Verhalten des Wassers im Boden auch den sogenannten massiven Frostboden. Hier ist das adsorptiv an den Bodenteilchen festgehaltene, von der Saugkraft der wachsenden Eiskristalle und den Kapillaren nicht mehr bewältigte Hüll- oder Haftwasser gefroren, verstärkt durch die restliche Dampfphase. Dementsprechend wird es zweckmäßigerweise als Hafteis bezeichnet.

Mit der Spaltenbildung wird auch die jeweilige Größe und die regelmäßige Form der Polygone in den verschiedenen Feldern verständlich, die kein Altersstadium darstellen kann. Das einmal angelegte Spaltennetz wird beim Auftauen mit Wasser, Schnee, Erde, Pflanzen und Steinen usw. erfüllt. Auch ohnedies wird es beim Zurücksinken der Wölbung zur Strukturfläche, die bei einem wiederholten Gefrier- und Hebungsvorgang – übrigens auch beim Austrocknen! – immer wieder in Funktion tritt. Die Größe der Polygone, ihr Durchmesser, erscheint damit als eine Funktion der Mächtigkeit der frostgefährlichen Bodenschicht, ihrer adsorptiven Eigenschaften und des Grundwasservorrates. Zweifellos ist der unvermeidliche Abriß des kapillaren Wasserfadens und das Aufhören der Hüllwasserbewegung auch für die Tiefenentwicklung der Struktur entscheidend. Die Strukturfelder können demnach gewissermaßen auch spontan entstehen, wobei von vornherein die Größe der einzelnen Strukturen nahezu festliegt. Eine Weiterentwicklung ist neben der Ordnung an der Oberfläche nur nach der Tiefe hin möglich, es sei denn, daß Veränderungen der äußeren Bedingungen auftreten, wie verstärkter Grundwasserzufluß, Sedimentation usw.

## VI. Die Strukturbodentypen

### 7. Grundgesetz und Grundform

Die große Mannigfaltigkeit der Frostmusterböden zwingt zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit der festgestellten physikalischen bzw. allgemein-geologischen Beziehungen zwischen Boden, Wasser und Temperaturgang, insbesondere im Hinblick auf die Bildungsimpulse der einzelnen Typen. Die eigentlichen Frostmusterböden, Steinringe, Steinnetze, Pflanzenwälle, Lehmbeulen, Spaltennetzpolygone als Einzelform und Gesamtstruktur weiter Flächen in jeder Form und Größe ordnen sich zwanglos in das entworfene Entwicklungsbild. Das Steinpflaster erscheint dabei nur als erste notwendige Bildung des inhomogenen Schuttbodens. In mehr oder weniger homogenen Böden können sich natürlich keine Steinringe entwickeln, dafür aber entstehen unter Umständen Pflanzenpolster. Auch die Netzböden der außerarktischen Gebiete, die TROLL (1944) als besonderen Typ den arktischen Gebilden scharf gegenüberstellt, haben mit den arktischen die Vorbedingungen der Bildungsvorgänge grundsätzlich gemeinsam. Die Entwicklung der Formen in den Tropen folgt keinen anderen Prinzipien als in der Arktis. Verschieden sind nur die Bildungsumstände, die Jahres- bzw. Tageszeiten, zum anderen aber nicht einmal die Effekte in der Landschaft.

Die Sortierung des feinen und groben Materials erfolgt im tropischen Bereich vielfach wohl unter begünstigender Mitwirkung des Kammeises, zu dessen Bildung in den arktischen Gebieten im allgemeinen die Voraussetzungen, d. h. sehr große Bodenfeuchtigkeit in entsprechender Krümelstruktur und große Strahlungskräfte, fehlen. Diese sind aber keine entscheidend gestaltenden Faktoren. Im Grunde ist die Kammeisbildung nichts anderes als die extreme Entfaltung einer der verschiedenen wirksamen Systemfunktionen. Indem der Frost in seiner Tiefenwirkung und Eindringung beschränkt ist, bilden sich an seiner Front Eisschichten, und zwar in der Form, daß das Poren- und Porenwinkelwasser der Erdkrumen zur Eisnadelbildung angesaugt und verbraucht wird. Daß es sich in der Arktis bei gegebenen Voraussetzungen aber auch entwickelt, zeigt die oben geschilderte Beobachtung der ausgefrorenen und aufgeblähten Kryokonitkrümel auf dem Gletschereis (s. S. 38). Die Eisnadelbildung dort läßt eindeutig den Mechanismus des Gefriervorganges erkennen. Das Wasser in den nußgroßen Löchern im Eis, in denen die Kryokonitflocken wirbelten und die sie durch ihre große Wärmeaufnahmefähigkeit und Bewegung selbst geschaffen hatten, gefror, sobald die Sonnenbestrahlung aufhörte. Dabei wurden die Krümel ausgestoßen, und ihr eigener Wärme- und Porenwasservorrat diente nun zur Bildung der Eisnadeln, die sich an der Seite der größten Wärmeabgabe, d. h. zuerst an der Auflagefläche zum Gletschereis entwickeln mußten und die dann wuchsen in der Grenzzone zwischen Nadelspitze und Oberfläche der Krümel. Die auffallende Vergrößerung und Aufblähung der gefrorenen porösen Krümel auf den Nadeln kann nur auf die Wirkung des Porenwinkelwassers zurückgeführt werden. Dieser Umstand beleuchtet, wie die durch die Eisnadeln gehobenen Bodenpartikel aktiv an der Bildung des Kammeises im tropischen Bereich beteiligt sind und daß ihre Größe vielleicht doch mehr Bodenwasser vortäuscht als wirklich von der Verlagerung be-

troffen wird. Natürlich hat die vielfache Wiederholung dieses Vorganges einen gewaltigen Endeffekt, und zwar durch die Lösung der oberen Bodenschicht und weniger durch die Verlagerung der Partikel infolge der Eisnadelbildung. Dieser Transport ist nur sehr klein, da das zusammengebrochene Nadelgewirr weite Abrollbewegungen verhindert.

Auf den Begriff und die Definition der Solifluktion, des Bodenfließens, auch an dieser Stelle einzugehen, ist der Vollständigkeit wegen erforderlich. Als ANDERSSON (1906) die Solifluktion definierte, erschien ihm das Phänomen an die Dauergefrorennis gebunden, und noch lange Jahre herrschte die Vorstellung, daß diese Erscheinung dadurch bedingt sei, daß der wasserreiche Auftauboden deshalb zum Fließen komme, weil das Wasser nicht in den gefrorenen Untergrund versickern kann und ihn deshalb bei geeigneter Lage (Hang) in Bewegung bringt [SERNANDER (1905), O. NORDENSKJÖLD (1909), HÖGBOM (1910 und 1914), FRÖDIN (1914 und 1918), DE GEER (1910)]. Erst SÖRENSEN (1935) dachte an Bodenfließbewegung im Strukturbodenfeld. Neuerdings dehnte TROLL (1944 und 1947) den Begriff der Solifluktion in Anbetracht des Effektes, d. h. des Transportes der Bodenkrümel durch ständig wiederholte Eisnadelbildung, auch auf das Kammeis aus. Die durch die Kammeisbildung bewirkte Bodenbewegung ist zweifellos von so besonderer Art, daß sie als solche gekennzeichnet werden muß. Hierbei muß aber bedacht werden, daß nicht das Kammeis selbst, d. h. unmittelbar, die Bodenverfrachtung bewirkt, sondern die durch die Eisbildung erfolgte Wasseranreicherung, bzw. die wasserübersättigte Bodenhaut. Diese Bildung einer fließ- und gleitfähigen und damit für Transporte bereiten Schicht – und sei sie noch so dünn – ist für jede echte Solifluktion die maßgebende Grundvoraussetzung. Die Kammeisbildung begünstigt die Abtragung durch die Lösung der Boden- oder Pflanzendecke vom Untergrund. Das entscheidende transportierende Mittel aber ist die feine schlammige Bodenschicht. Solifluktion ist demnach zu definieren als die von der Gravitation bestimmte Fortbewegung des Bodens auf Grund der durch den Tauprozeß freiwerdenden Wassermenge, die durch den Gefrierprozeß im Boden in Eisbildungen vorher angereichert worden ist (SCHENK 1954). Die bisherigen Definitionen gehen hieran vorbei. Nur unter Berücksichtigung dieser grundlegenden Tatsache sollten weitere Kennzeichnungen im kleinen und großen oder in besonderen Bereichen vorgenommen werden.

Daß unmittelbar durch das Kammeis polygonale Felderteilungen und Streifenböden entstehen, ist bisher nicht entfernt wahrscheinlich gemacht. Sie fehlen bezeichnenderweise z. B. dort, wo das Kammeis nur zum Rasenschälen, zur Lösung der Vegetationsdecke, führt. Ebenso fehlen Strukturbildungen dort, wo durch den Frost der ganze Boden oder einzelne Bodenkrümel und Steine nur gehoben und gesenkt werden. Frosthub und Frostschub sind hierbei also nur von untergeordneter Bedeutung für die Strukturbildung. Ihr Effekt ist u. a. die Steinpflasterbildung. Damit rühren wir an den Kern des Problems:

Solifluktion ist das Grundprinzip aller Froststrukturenbildungen. Sie können sich aber nur dort entfalten, wo durch den Frost auch die Grundform, eine Wölbung, entwickelt wird.

### 8. „Kuchenböden“

Von den Bodenstrukturen in den Hochgebirgen der Tropen wird immer wieder die lockere Krümelstruktur und der Hohlraumreichtum der Feinerde hervorgehoben [TROLL (1944), BOBEK (1939/40)]. Diese poröse Struktur der Kuchenböden erklärt sich zwanglos aus dem Verbrauch und der Frostwirkung des Hüll- und Porenwinkelwassers. Der hohe Elektrolytgehalt, der höhere Gehalt an Bodenkolloiden gegenüber den polaren Böden wird sie zweifelsohne begünstigen. TROLL (1944, S. 609) beschreibt aber auch, daß die Feinerdekuchen mit Eiskristallen bedeckt sind. In den Zeichnungen und Bildern erkennt man die Wölbungen der Oberflächen zwischen den Steinnetzen. Es kann somit kein Zweifel bleiben, daß bei dem Tauprozeß zuerst die Oberfläche schmilzt und sich ein Wasserfilm und damit eine das Abgleiten und Bodenfließen begünstigende Oberflächenschicht bildet, ehe die Frostform, die Wölbung, zusammenbricht, und daß damit aufgefrorene gröbere Korngrößen, der Schwerkraft folgend, zum Rande, zum Steinnetz hin, gleiten.

Nur dort, wo Winde und Sonnenbestrahlung immer wieder in gleicher Richtung auf die Kammeisnadeln einwirken und sie zusammenbrechen lassen, erscheint eine Korngrößen-sortierung unmittelbar durch die Eisnadelbildungen möglich, und zwar eine orientierte, einseitige Anreicherung. Das kann aber auch in der Arktis gelten. Im allgemeinen hindert die krümelige Struktur der Bodenteilchen und das Gewirr zusammenbrechender Nadeln einen orientierten Materialtransport. Es ist auch nirgends zu erkennen, daß dieser Transport durch Kammeis feldermäßig begrenzt ist. Auch die Stein- und Erdstreifen in den tropischen Hochgebirgen weichen ebenso wenig wie die Steinnetzböden, weder in Form noch im Mechanismus, von den arktischen ab. Es sind dieselben Kräfte, die sie erzeugen. Nur ein gradueller Unterschied im Frosttiefgang kommt in der Dynamik zur Geltung. Die Wasserübersättigung, die breiige Konsistenz des Bodens nach dem Schmelzen des Eises ist sowohl in den tropischen Gebirgen als auch in den polaren Regionen, bei den Kammeisböden wie bei der Tjåle, die maßgebende und gemeinsame Grundvoraussetzung für die Bildung der Strukturformen und -größen durch die Einwirkung des Frostes. Zu vergleichen sind natürlich nur die aktiven Strukturböden dieser und jener Gebiete miteinander, nicht aber die trägen und fossilen Formen, die Dauerformen der Arktis mit den lebendigen der Tropen. Wahrscheinlich gibt es aber auch solche in den Hochgebirgen der Tropen.

Die Bildung der Kleinformen wurde in der Arktis als Funktion der Mächtigkeit der gefrierenden Feinerdeschicht und ihrer Wasserversorgung erkannt. Da die Dauergefornis keine grundsätzliche Bedeutung für die Strukturbildung hat und durch festen, aber wasserstauenden Untergrund jeder Art vertreten werden kann, müßten folgerichtig die Miniaturnetze der Arktis als tropischer Typus in der Arktis bezeichnet werden. Da offensichtlich auch die Spalten- bzw. Rillenbildung bei den tropischen Netzböden eine Frostwirkung ist und zur Mechanik der Frosthebung und Wölbung der Polygone gehört, besteht kein genetischer Unterschied zwischen tropischen und arktischen Typen. Vielleicht bilden die reinen Kammeiswirkungen eine Ausnahme. In Anbetracht der großen Variationsbreite von Miniaturnetzen bis zu Großformen im gleichen Raum je nach Bodenmächtigkeit, Wasserversorgung und Frosteinwirkungstiefe und je nach Geländelage und Bodenmaterial, unter der Einwirkung von

Groß- und Kleinklima, läßt sich eine Einteilung in tropische und hochpolare Typen der polygonalen und „translatorischen“ (TROLL 1944) Formen nach geographischen bzw. klimatischen Gesichtspunkten ohne Berücksichtigung der Genese in der bisherigen Weise wohl nicht länger vertreten. Maßgebend im wahrsten Sinne des Wortes ist in erster Linie der Wechsel und die Einwirkungstiefe von Gefrieren und Auftauen einer wasserreichen Bodenschicht, wobei es gleichgültig ist, ob die Perioden jährlich oder täglich auftreten; die Mittel und Ergebnisse sind dieselben. Damit soll der Wert einer Einteilung nach klimatischen Gesichtspunkten keineswegs in Frage gestellt werden, denn die geographischen Momente sind schließlich die Faktoren, die die Variationsbreite der Strukturböden – im weitesten Sinne des Wortes – bestimmen, sei es durch die Bodenbildung, den Wasserhaushalt, die Frosteinwirkung, die Vegetation usw. Wir müssen uns aber dabei bewußt sein, daß die Genese überall nach den gleichen physikalischen und allgemeinen geologischen Gesetzen abläuft. Erst die Begünstigung oder Benachteiligung der einen oder anderen Systemfunktion durch das Klima im großen und kleinen Bereich führt zur Entfaltung des Formenschatzes. Dieser aber ist allein in den hochpolaren Gebieten in seiner ganzen und reichen Fülle entwickelt. Demgegenüber treten in allen anderen Gebieten der Erde nur beschränkt entwickelte Formen in Erscheinung. Ausgangspunkt einer Typeneinteilung sollte daher das Polargebiet sein. Dies ist besonders wichtig im Hinblick auf den diluvial-geologischen Wert der Kriterien zur Ausdeutung von diluvialen Frostbodenstrukturen. Es ist ein Verdienst von TROLL, die Bedeutung des Kamm-eises für die durch Solifluktion geprägten Landschaften in den Gebieten niederer Breiten hervorgehoben und ihren Reichtum an Froststrukturen dem polaren Formenschatz gegenübergestellt zu haben.

### 3. Bülden und Thufur

Von stark abwandelndem Einfluß auf die Strukturbildung ist die Pflanzendecke. Eine primär kärgliche Vegetation hat für die Strukturbildung keine wesentliche Bedeutung. Bei dichterem Pflanzenpolster beobachtete ich im westlichen Spitzbergen und im Andréeland immer wieder die Entwicklung von Bülden (Taf. 8, Fig. 1), und zwar dort, wo offenbar die Vorbedingungen für Polygonbildungen gegeben wären. Die einzelnen, in kleinen Gruppen zusammengefaßten Pflanzenpolster standen auf hohen, z. T. torfreichen Wurzelballen in nassen Böden an relativ warmen Stellen. Umgeben waren sie von sehr nasser, breiiger Feinerde, die in schmalen, ebenen oder flach eingedellten Streifen 10–20 und 30 cm tiefer lag. Sie wird zweifellos erst durch das Auftauen des gefrorenen Bodens so tief abgesunken sein. Das bedeutet: das ganze Feld wird durch den Frost, vielleicht unter Spalten- und Hügelbildungen, gehoben. Beim Auftauen, das unter der Vegetation viel langsamer erfolgt, bleiben die Pflanzenpolster in dieser Lage zurück. Die Pflanzenpolster mit ihren Wurzelballen übernehmen also die Rolle der Steine und frieren aus. Aber dank ihrer Eigenschaft, erst später und langsamer den Frost eindringen zu lassen und vor allem erst später aufzutauen als die umgebende Feinerde, werden ihre tiefreichenden Wurzeln verhältnismäßig geschont und der ganze plastische Wurzelraum zwischen den gefrierenden Feinerdezonen emporgedrückt. Damit bleiben sie lebensfähig und in der Lage,

die Entwicklung regelmäßiger Polygone zu verhindern und die Hauptfrostbewegung auf die Räume zwischen ihnen zu beschränken. Eine Beziehung der Größe der Pflanzenpolster bzw. Bülden zur Bodenmächtigkeit wird sicherlich bestehen. Die besonders große Feuchtigkeit ist auffallend und bestimmend.

Trockener sind die isländischen Thufur-Bildungen (Büldenböden der Tundra; Höcker-, Hügel-, Buckelwiesen; Verf. konnte im Pripjetgebiet solche Bildungen untersuchen). Sie sind dort am schönsten, wo die Pflanzendecke am gleichmäßigsten und das Wurzelgeflecht so dicht ist, daß keine bevorzugten Schwächestellen entstehen. Hier entwickeln sich bei langsam eindringendem Frost – die Abhängigkeit der Bildungen vom Grundwasserspiegel ist längst erkannt und wird praktisch bei der Bekämpfung der Thufurbildung durch Grundwassersenkung angewendet – die Hügel in so regelmäßiger Ordnung wie in den Polygonfeldern. Unter dem Schutz der stützenden Pflanzendecke bleiben die jährlichen kleinen Aufwölbungen beim Auftauen erhalten – und damit entfällt bereits die Materialsortierung –, so daß sich im Laufe der Zeit durch die zusätzliche Hebung in jedem Jahr allmählich große Hügel entwickeln, die der Bewirtschaftung größte Schwierigkeiten bereiten. Daß sie lokal einzeln und in größeren Dimensionen auftreten, ist so verständlich wie die Entwicklung einzelner Steinringe oder Feinerdeaufbrüche.

Die Entwicklung der Thufur kann aber so weit gehen, daß die Pflanzendecke aufreißt und platzt, die Feinerde unter der Frostwirkung also durchbricht. Abgesehen davon, daß dann Wind und Wasser angreifen kann, verhindert die oszillierende Bewegung der Feinerde das Wiederaufkommen einer neuen Pflanzendecke. Die Feinerdedurchbrüche der Thufur bedeuten somit die Vernichtung der Pflanzendecke. In den geschützten und relativ warmen Tälern Spitzbergens kann man ähnliches beobachten und gleichzeitig die Übergänge zu Strukturfeldern mit polygonalen Felderteilungen verfolgen, wobei in den Randzonen Pflanzenleben festzustellen ist, während das Zentrum der Strukturen vegetationslos bleibt. Die Fleckentundra kann als ein solches Endstadium angesehen werden.

#### 4. Palse

Neben diesen Bildungen relativ wenig nasser Böden stehen die Frostmuster sehr nasser torfreicher Böden, und zwar einmal die Froststrukturen der Tundra, zum anderen die Frostmuster der Hochmoore. Der charakteristische Gehalt an zerstörten und vertorften Pflanzenresten unter der Rasendecke der Thufur und Bülden leitet über zu den Palsen (Taf. 8, Fig. 2) der winterkalten kontinentalen Sumpffregionen des Nordens. Unter den dort herrschenden und bestimmenden klimatischen Bedingungen wachsen sie an zu erstaunlich großen Gebilden, einzeln und vergesellschaftet, inmitten von Mooren [s. zusammenfassende Darstellung von TROLL (1944), S. 633]. Ihrem Entwicklungsort entsprechend bilden Torf und Wasser bzw. Eis und – nur sofern sie den Moorgrund erreichen – auch mineralischer Boden ihr aufbauendes Gerüst. Genetisch wären sie mit Recht von Polygonmusterböden und ihren Abarten zu trennen, wenn ihre Entwicklung von primären, tiefergehenden, schneefreien Unebenheiten des Moores ausginge. Denkbar und wahrscheinlich ist aber, daß ihre Hochentwicklung über dem Tiefsten des Moores – dafür spricht ihre zentrale

Lage – durch den Frostdruck auf das dort noch ungefrorene Moor eingeleitet wird, indem die noch ungefrorene Masse unter hydrostatischem Druck nach oben durchbricht und dort gefriert. Die jährliche Höhenzunahme und das „Nachwachsen“ ist auf andere Weise schwer vorstellbar und verständlich. Damit wird auch die Förderung von Bodenschichten aus dem Liegenden des Moores erklärt, die AUER und AARIO pollenanalytisch nachgewiesen haben. Ganz entsprechende Bildungen sind die „pingos“ und „frostmounds“ in Nordamerika, die letzthin von R. E. FROST (1952) beschrieben worden sind. Daß sich diese „pingos“, wie auch die Palsen, unserem Rhythmus des Gefrierens und Auftauens, des Wachsens und Zusammensinkens, zwanglos einfügen, hat K. HALLEN (1913) bereits nachgewiesen. Aus dem Nebeneinander von Palsen im Moor und gewöhnlichen Feinerdeaufbrüchen im festeren mineralischen Boden geht hervor, daß hier der Stoff und nicht das besonders kalte Klima ihre Entwicklung wesentlich bestimmt. Auf dem Bild (Taf. 8, Fig. 17) ist das schön zu sehen, bei bisherigen Erörterungen aber unbeachtet geblieben,

### 5. Strang- und Ringmoore

Die Bedeutung der Vegetation als abwechselnder Faktor tritt durch nichts so sehr in Erscheinung als durch die Froststrukturbildungen in den Mooren des polaren Bereiches. Während des Krieges hatte ich Gelegenheit, an zahlreichen ausgezeichneten Luftbildern die Strang- und Ringmoore (Tafel 9, Fig. 1) der baltischen Gebiete und des Pripjetgebietes auch durch stereoskopische Betrachtungen zu studieren. Bereits C. ANDERSON und HESSELMANN (1907) erkannten die Parallelität der Vorgänge in den Fließerdeterrassen und den Moorsträngen und TANTTU (1915) die Differenzierung der Frosteindringung durch das Pflanzenpolster, wie sie sich in gleicher Weise in den Bültensümpfen und den Feinerdepolygonen mit Pflanzenringen in Spitzbergen abspielt [s. a. TROLL (1944), S. 641 f.]. Aufbeulung durch Frosteinwirkung und Solifluktion zu Beginn der Auftauperiode sind auch hier die primär gestaltenden Faktoren, während die Pflanzendecke mit ihren Wurzeln die modifizierenden Faktoren sind. Von entscheidender Bedeutung ist dabei sowohl für die Entwicklung als überhaupt für die Entstehung des Froststrukturmoores die Frosteindringung, indem eine primäre Wölbung und Erstreckung bereits vorgegeben ist. Soweit nicht ohnehin gezielte Zerreißen mit dem Wachsen der Hochmoore verbunden sind, an die die Froststrukturbildung anschließen kann, ist eine primäre Entstehung durch Gewölbedehnung und damit verknüpfte Rißbildung infolge des Frostes sowohl für die Strangmoore als auch für die Ringmoore leicht denkbar. Genetisch werden also die Steinwälle der Schuttböden durch die Torf- und Moorsubstanz vertreten, wobei diese vielleicht das Auffrieren betont, die Solifluktion dagegen hemmt. Bei einer phänomenologischen Typeneinteilung sind sie also jedenfalls neben die Polygonböden oder Steinstreifenböden zu stellen mit Modifikation des Ausgangsmaterials. Der Variation dort entspricht die Abwandlung und Vergesellschaftung hier.

Als extremste Bildung der Entwicklungsreihe aus diesem Ausgangsmaterial sind die Aufeshügel anzusehen, deren Vorkommen sich mit der Verbreitung der Palse überschneidet [s. TROLL (1944), S. 633 f. und STECHE (1933)]. In ihnen haben wir wohl das unter Frostdruck, ähnlich wie bei Palsen und Pingos, aus unterirdischen

Wannen und Becken ausgepreßte und dann gefrierende freie Bodenwasser als Hügelbildung vor uns, soweit nicht ohnehin echte Quellaustritte vorliegen. Auf einem Gletscher südlich von Grahuk habe ich einen derartigen Aufeshügel, der sich um einen Quellaustritt gebildet hatte, beobachten können (Taf. 10).

### 6. Taimyrrpolygone und Eiskeilnetze

Diesen zuletzt behandelten extremen Bildungen jener Kälteregeonen stehen die in gleicher Weise faszinierenden Eiskeilspaltennetze gegenüber, die seit der Fahrt des Zeppelins im Jahre 1930 geradezu berühmt geworden sind (WEICKMANN 1932). Über ihre Entdeckungsgeschichte und Erforschung berichtet ausführlich TROLL (1944, S. 634f.). Neueste und in wesentlichen Punkten ergänzende Beobachtungen wurden von TABER (1943), BLACK (1952) und FROST (1952) mitgeteilt aus Alaska, wo sie der Bergbau in großartiger Weise aufgeschlossen hat. In jüngster Zeit ist DÜCKER (1951) darauf eingegangen, wobei er die Problematik der fossilen Eiskeile aufs neue beleuchtet. Nach den Beobachtungen von TABER lassen sich die bisherigen Deutungen nicht mehr aufrecht erhalten.

Die Taimyrrpolygone (Tafel 9, Fig. 2) überziehen Ebenen, Hügel und Hänge in vielfacher Vergrößerung der formal ähnlichen Frostmusterböden Spitzbergens, Grönlands usw. Doch hier sind die umgrenzenden Wälle tiefreichende, meist keilförmige Eiskörper, die im Winter aufgewölbte, im Sommer zusammengesunkene und zerstörte, in Schmelzwasser aufgelöste Hügelbildungen des Auftaubodens umschließen. Sie machen den Eindruck von Entartungen des hocharktischen Polygonbodens, von Hypertrophien der Spalten unter der schnellen und langdauernden Einwirkung hoher Kältegrade. Die in ihnen gesammelte Kältemenge wird während der Schmelzperiode nicht verbraucht, und durch die Zufuhr neuer Kälte wachsen die Eiskeile in die Tiefe und in die Breite. TABER (1943) berichtet, wie auf ihnen sogar neue Polygonstrukturen sich entwickelt haben.

Auffallend sind die tetragonalen Formen mit lang hinziehenden geradlinigen Wällen, die im Scheitel tief gefurcht sind. Soweit die Beschreibungen und Bilder hierzu ein Urteil erlauben, treten die tetragonalen Formen vorzugsweise in geneigtem Gelände, vielleicht sogar auf dieses beschränkt, auf. Unter Berücksichtigung eigener Beobachtungen in lang hinziehenden Spaltennetzen in Spitzbergen scheinen diese mir die Formen des Streifenbodens, die Bildungen der Feinerde- und Steinstreifen, zu vertreten, während die polygonalen Formen nichts anderes sind als riesig dimensionierte Strukturen. Die Furchen auf den trennenden Wällen stellen m. E. die eigentliche Grenze benachbarter Formen dar. In ihnen sammelt sich das von den Hügeln zwischen den Wällen zur Zeit des Auftauens abfließende Bodenmaterial, das sich dann in den Eiskeil einschmilzt und beim Gefrieren wieder ausgestoßen wird und unter Umständen dabei wieder Strukturen bildet, wie TABER (1943) beschreibt.

Wie aber entsteht der Eiskeil? TABER hat gezeigt, daß man ihn nicht auf Kontraktion als unmittelbare Frostwirkung zurückführen kann, da die dabei mit einem Krach entstehenden Spalten durch Rückgängigwerden des Volumenschwundes infolge tiefer Temperaturen wieder geschlossen sind, ehe Schmelzwasser sie füllen könnte. Er weist darauf hin, daß solche Kontraktionsspalten in denjenigen Böden

fehlen, die einen höheren Kontraktions- bzw. Expansionskoeffizienten haben, und daß vertikale Eisblätter niemals horizontale Eisschichten schneiden. Ich sehe deshalb keine andere Möglichkeit, als die Entwicklung der Eiskeile ebenfalls auf die Spaltenbildung durch Wölbung – und an den Hängen durch Abrisse des fließenden Bodens – und vor allem auf den Volumenschwund infolge der kapillaren bzw. osmotischen Wasserbewegung als Folge der Frosteinwirkung zurückzuführen. Schon die allerersten feinen Spalten, die sich so bilden, können unter gegebenen Umständen der Keim für einen riesigen Eiskeil sein, wenn er am Rande einer Struktur liegt. Es ist zu bedenken, daß der Eiskeil und der Dauerfrostboden Jahrtausende für seine Entwicklung zur Verfügung hatte und daß das heutige Klima nicht als Maßstab gelten muß und kann! In die einmal gebildeten Risse können die Eiskristalle leicht hineinwachsen. Durch die Solifluktion an der Oberfläche der Struktur werden die Eisbildungen am Rande zugedeckt, z. T. durch Pflanzen, und damit länger vor dem Schmelzen geschützt. Schließlich sind sie mit dem Vorrücken der Vereisung ganz konserviert worden. Damit aber wurden sie zum Kristallisationsherd des Eiskeils, indem von dem überreichlich zur Verfügung stehenden Wasser immer neue Moleküle eingebaut wurden, und zwar unter dem Einfluß der großen Kälte mehr, als in der Auftauperiode abschmelzen konnte. Die Bodenpartikel wurden dabei aus- und abgestoßen. Für die Tiefenentwicklung ist es dabei wichtig, daß die Wasseransaugung zur Frostfront auch dann noch möglich ist, wenn die Einzelkörner im Boden schon gefroren sind (TABER 1943). Wie weit das für die Dimensionierung der Eiskeile tatsächlich von Bedeutung ist, bleibt dahingestellt. Da sie um ein Vielfaches tiefer geht als der Auftauboden, so ist die Zeit, d. h. die Dauer des eindringenden Glazials, entscheidend für das Wachstum der Eiskeile.

### 7. Die Solifluktionsformen der Hänge

Der hier gegebene Anschluß der Hangsolifluktion an die tetragonalen Taimyropolygone mag gewagt erscheinen. Eine zu wenig beachtete Tatsache scheint mir jedoch die großzügige Gliederung nicht steiler Hänge mit unsortiertem Block- und Feinschutt zu sein, wie sie mir insbesondere in der Wood-Bay aufgefallen ist. Der z. B. unmittelbar am Vaerdalen anschließende, nach Norden sich hinziehende Hang (nach Westen exponiert) weist in fast regelmäßigem Abstand von etwa 15 m durchgehende Runsen mit z. T. tiefen Spalten auf, die in Richtung des Hanggefälles verlaufen. Zwischen je zwei von ihnen ist der Boden beachtlich aufgewölbt. Der ganze Hang zeigt außerdem die Spuren der Bodengleitung und Turbulenz, eine Solifluktion im großen. Die Wölbungen weisen gelegentlich Querspalten und Trennfugen auf, wobei die gelösten Schollen bergwärts einsinken und sich talwärts heben. Der Mechanismus ist an Kleinformen leicht zu erkennen. Die Solifluktion findet bei diesen nur statt zu der Zeit, wo die obere Bodenschicht mit den Polygonen aufgetaut ist, während die darunter liegenden lehmigen Schotter und der Schutt noch gefroren sind und somit das Wasser stauen. Sobald das Wasser in ihnen versickern kann, hört die Solifluktion auf.

Die regelmäßige Wellung des Hanges in Richtung des Gefälles ist wohl eine Wirkung des Frostdruckes. Die wasserreichen Hangschuttmassen dehnen sich aus durch

den Frost und wölben sich dabei wie ein Wellblech. Man kann sich vorstellen, daß sich unter entsprechendem Klima und Wasserverhältnissen Tetragone mit tiefreichenden Eiskeilen wie auf der Taimyrhalbinsel aus solchen Hangbewegungen entwickeln können, soweit nicht ohnehin ihre Dimensionierung durch Bodenmächtigkeit, Wasserversorgung und Frosteinwirkung bestimmt ist.

Den Übergang von der Solifluktion im kleinen Bereich zur Solifluktion im großen, d. h. dem Bodenfließen am Hang, lehren bereits eindrucksvoll und überzeugend alle auf flach geneigtem Gelände auftretenden Steinnetzpolygone, die an ein schön regelmäßig geordnetes Polygonfeld der Ebene anschließen. Mit Verstärkung der Hangneigung längen sich die Steinringe und Steinnetze (Tafel 2, Fig. 2), Erdwälle und Pflanzenwülste bis zur Zerreißung und Neuordnung zu Streifen in der Richtung des größten Gefälles. Dieser Übergang illustriert den Wechsel der maßgebend gestaltenden Kräfte im Frostmusterboden, indem der im stationären Polygon oder Ring vorherrschend gestaltende Frosthübel überspielt wird von dem Erdfließen. Während im einzelnen Polygon wie im Polygonfeld das Erdfließen nur im beschränkten Bereich radial wirksam wird und durch die periphere Begrenzung in der auffallenden Ordnung der Spalten und Wälle und schließlich in der Materialsortierung zum Ausdruck kommt, wird am Hang die gesamte Bodenmasse von den das Fließen bewirkenden Kräften betroffen. Der Unterschied in der Kinematik und Dynamik ist kein grundsätzlicher, sondern nur ein gradueller als funktionale Beziehung zum Gelände; überall ist daneben noch die Frostausrückung, d. h. die Strukturbildung im weiteren Sinne, der Ausdruck der Systemfunktion: Bodenart – Bodenmächtigkeit – Wasserversorgung – Frosteinwirkung, die dementsprechend in großer Variationsbreite und Mannigfaltigkeit zur Entwicklung gelangt. Wie die Miniaturstrukturen geringmächtiger, frostgefährlicher, fließfähiger Böden Spitzbergens über relativ trockenem Auftauboden belegen, spielt die Dauergefrorenis dabei keine entscheidende Rolle. Eine Unterscheidung von Jahreszeitensolifluktion und Tageszeitensolifluktion als typenbildende Faktoren [TROLL (1944), S. 567] läßt sich daher nicht länger vertreten. Wichtiger wird die Unterscheidung nach den bodenmechanischen Gegebenheiten und Mitteln, die sowohl beim Erdfließen als auch bei der Polygonbildung im weiteren Sinne zu Extremen führen, so daß neue reine Typen hervortreten. Stetiges, kontinuierliches Massenfließen steht der Schollengleitung diametral gegenüber. Während hier der Boden in der Gefällsrichtung liegende wellige Streifen aus Feinerde mit und ohne Steinaussortierung entwickelt, entstehen dort mehr oder weniger quer zum Hanggefälle orientierte Formen, Stufungen mit und ohne Materialsortierung, primäre Abrisse in der Vegetationsdecke, Gleitung, Kippung und Drehung der vorgegebenen Froststrukturzellen, Steinguirlanden usw. [TROLL (1944), S. 609]. Stets erscheint hierbei die Vegetationsdecke als wesentlicher Faktor, indem die Verfilzung des Wurzelbodens Größe, Form und Ausmaß der Bodengliederung und Bodenbewegung abwandelt und auch von großem Einfluß ist auf die Lage der Zone größten Wassergehaltes, in der sich stets die Hauptbewegung als dem Bereich kleinster Reibung abspielt. Diese Zone bestimmt überhaupt den Bewegungsvorgang: reicht sie nämlich bis an die Bodenoberfläche, so fließt diese Schicht überrollend, turbulent; liegt sie tief, so erfolgt das Fließen an Gleitflächen, laminar, und die Oberfläche, bzw. die Oberschicht, wird dabei antithetisch bewegt, so daß Stufen, Schollentreppen, entstehen.

Kleine Dimensionierung dieses Vorganges als Folge des Grades der Frosteinwirkung kann zur vollkommenen Vernichtung der Vegetationsdecke führen (vgl. Abb. 7, 9, 20, 28 in TROLL (1944)). Hierbei wird offensichtlich, daß diese Art der Frostauswirkung Zeugnis ablegt von Klimaveränderungen, sofern nicht hydrogeologische oder morphologische Veränderungen sie schon erklären.

So überzeugend eine primäre Entwicklung der Streifenböden aus dem oft vorgegebenen stationären Frostmusterboden auch ist, so wenig kann sie Allgemeingültigkeit haben. Streifenböden entstehen auch dort, wo niemals die Bildung von Steinnetzen usw. möglich war. Wasservorrat und Mächtigkeit des frostgefährlichen Bodens entwickeln und bestimmen, wie bei den stationären Strukturen, das Maß der Frosthebung und Wölbung und des Durchmessers bzw. des Abstandes der Streifen, hier jedoch unter einseitiger Orientierung nach den durch das primäre Gefälle bestimmten Bewegungsrichtungen. Die Schwerkraft ist in allen Strukturen in gleicher Weise wirksam, die Bewegungsmöglichkeit aber ist nicht in gleicher Weise gegeben. Indem durch den Frostdruck irgendwelche Aufwölbungen und Aufbrüche am Hang entstehen, müssen sich beim Auftauen und nachfolgender Solifluktion an den Seiten in Richtung der Hangneigung die größeren und schwersten der aufgefrorenen Bodenbestandteile, d. h. diejenigen mit der größeren potentiellen Energie anreichern. Es entstehen damit die wechselnden, in ihrer Länge begrenzten oder viele hundert Meter langen, die lockeren und die dichtgepackten Steinstreifen. In der Auftauform liegen sie, wie die Steinringe, höher als die Feinerde, wenn es sich um sehr aktiven Boden handelt; sie bleiben rinnenartig versenkt, wenn „alte“, träge Strukturen vorliegen, die den Dauerformen der Polygonfelder entsprechen. Der Aufbruch von Feinerdestreifen durch Steinpflasterdecken lehrt, daß das Maß der Aufwölbung des Bodens durch den Frostdruck – abhängig von der Mächtigkeit der wasserreichen Feinerde – bestimmt, ob Erd- oder Steinstreifen die Solifluktion charakterisieren. Ihre konstante Größe über weite Flächen spiegelt ihre enge Bindung an die Untergrund- und Frostbedingungen. Über die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen des Bodenfließens, einschließlich der Bewegungen in Mooren, und über die unterschiedlichen Erklärungen dieser Phänomene durch die vielen Forscher und Beobachter gibt die Darstellung von TROLL (1944) einen umfassenden Überblick, so daß sich hier weitere Einzelheiten erübrigen.

Wie bereits bei den Froststrukturen der Moore dargelegt, läßt sich die Fließbewegung der Torf- und Pflanzenmassen zwanglos in das allgemeine Bewegungs- und Entwicklungsbild einordnen. Die Auswirkungen der Strukturbildungen auf den Mooruntergrund sind noch z. T. offene Fragen, insbesondere inwieweit die Wasserhaltung des Torfes und Wurzelfilzes die Funktion der Feinerde als frostgefährlichen Faktor vertreten kann.

Der geordneten, durch sanfte Hangneigung regulierten Solifluktion steht das massive, amorphe Bodenfließen gegenüber, indem die hangabwärtige Bewegung z. Zt. des Auftauens die durch die Frostwirkung geschaffenen Keime und Anlagen zu einer Ordnung des Bodenmaterials zerstört und verwischt. Damit kommt der Faktor Zeit in bestimmender Weise zum Ausdruck. Ist die Geschwindigkeit der hangabwärtigen Massenverlagerungen größer als die der auffrierenden und selektierenden Bewegungen, so kann sich kein Frostmusterboden entwickeln, und es

herrschen die gewaltigen, höchst eindrucksvollen gletscherartigen Erdmassenbewegungen ausgedehnter Hänge, enger Schluchten und Tälchen. Hierbei können neue Ordnungen entstehen, die aber nicht unmittelbar zu den Frostmusterböden gehören. In den Randzonen solcher fließenden und gleitenden Bodenmassen nehmen nämlich große flache Steine oft die der Fluidalstruktur entsprechende Stellung ein, d. h. sie ordnen sich mit Hochkantlage ein in die Richtung geringsten Widerstandes, geringster Reibung. Frostdruck wirkt hierbei u. U. fördernd mit. Im Andréeland beobachtete ich mehrfach Betten von periodischen Wasserläufen und Bahnen rutschenden Firnes, deren Ränder durch lange Reihen hochkantig gestellter Steine begrenzt waren. Offensichtlich waren an der Schaffung ihrer Lage sowohl die fließenden Massen des Schnees und Bodens beteiligt als auch der Frostdruck. Daß die fließende Bewegung gänzlich entbehrt werden kann bei dem Steilstellen der Steine, geht aus der Bildung der überraschend schönen Frost- oder Steinrosetten hervor. In Spitzbergen beobachtet man sehr oft auf ebenem, trockenem Gelände, auch da wo Wasser, Wind und Schnee nicht zu den gestaltenden Faktoren gezählt werden können, große und kleine Blöcke, die von steil stehenden, flachen Steinen dicht und eng eingefaßt sind [vgl. Abb. 26 und 27 in TROLL (1944), S. 598f.], während in ihrem Umkreis die Steine flach liegen. Durch ungleiche Frosthebung sind sie zunächst in steile Lage gebettet und später durch Frostdruck eng an und um den Block gepreßt worden. Die Mitwirkung von Solifluktion in kleinsten Ausmaßen wird dabei hier und da auch zur Geltung kommen, notwendig ist sie nicht. KNETSCH und VON GAERTNER photographierten solche ohne Frost entstandenen Rosetten am Strand Norwegens [TROLL (1944), S. 598f.]. Sie ist Gefügeregelung durch häufig sich wiederholende gleichsinnige Bewegungen des Wassers. Die Frostrosette demonstriert jedenfalls die andere Grenze der Bedeutung des Faktors Zeit, indem hier der Quotient von Geschwindigkeit des Bodenfließens zur Frosthebung unendlich klein oder sogar Null wird.

## VII. Zur Systematik

### 1. Die Entwicklung des Formenschatzes

Gesetzmäßige Aussonderung und Anordnung von Steinen und Feinerde in horizontaler und vertikaler Richtung als Folge der Frosthebung unter Bildung von Beulen, Spalten und welligen Aufbrüchen und der Solifluktion im Rhythmus des Gefrierens und Auftauens sind die charakteristischen und eindrucksvollen Erscheinungen des Bodens im periglazialen bzw. subnivalen Bereich. Als Steinpflaster, Steinringe, Steinnetze, Steinstreifen, Schuttinseln, Schlammpolygone, Spaltenpolygone, Zellenboden, Kuchenboden, Taimyrpolygone und außerdem als Bülden, Ring- und Streifenmoore, als Palse, Aufeishügel usw. wurde die Vielfalt ihrer Erscheinungsformen im Laufe einer 150-jährigen Kenntnis und Forschung unterschieden, als Strukturböden erstmalig von MEINARDUS zusammengefaßt. Seit den grundlegenden Arbeiten von HÖGBOM (1908 und 1914) und der Spitzbergen-Exkursion des Geologenkongresses 1910 lenkten sie in gesteigertem Maße die Aufmerksamkeit auf sich, nicht nur in den polaren Dauerfrostgebieten, sondern auch in Gebieten großer Höhe, und

schließlich erkannte man sie auch in den Ablagerungen des Pleistozäns, wodurch sie für geologische und paläoklimatische Probleme erhöhte Bedeutung gewannen (TROLL 1944). Ihre nahe Beziehung zur Schneegrenze (POSER 1933) wurde schließlich in Verbindung mit ihrer weltweiten Verbreitung festgestellt.

Im Zuge dieser großen Linien schwanken die klimatischen Verknüpfungen, wie auch die Art und Beschaffenheit der Böden im einzelnen, doch sobald Frost, Boden und Wasser in den Bereich des „frostgefährlichen“ Systems treten, regieren die Gesetze der Strukturbildung selbst in den Zonen gemäßigten Klimas. So groß auch die Zahl der Formen ist, so kann nicht mehr bezweifelt werden, daß sie alle den Prinzipien des gleichen Gesetzes folgen und nur durch die Faktoren: Ort (Morphologie und Lage), Stoff (Boden und Wasser) und Zeit (Geschwindigkeit der Frosteinwirkung und der Fließbewegungen) wesentlich modifiziert werden.

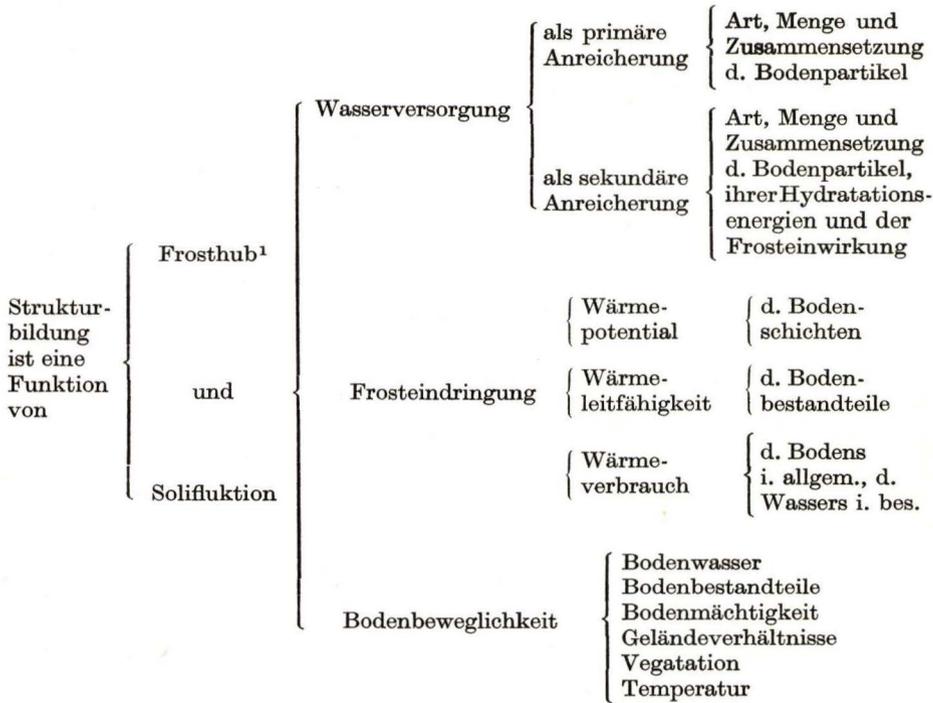
Der Ort, definiert durch die geographischen Koordinaten und die Lage als Landschaftsteilstück über dem Meeresspiegel und zur Sonne kennzeichnet den Wirkungsraum und möglichen Wirkungsgrad der endogenen Kräfte, sowie seine spezielle Bereitschaft zu Frostmusterbildungen. Damit ist nicht nur der Großklimaraum einbezogen, sondern vor allem das wesentliche und wichtigere Kleinklima des subnivalen Bereiches, das nicht nur für die Aufbereitung des Bodens und die Entfaltung des Pflanzenlebens, sondern auch für die Häufigkeit und Tiefenwirkung des Gefrierens und Auftauens von entscheidender Bedeutung ist.

Der Stoff als aufbereitetes und unaufbereitetes frostgefährliches Produkt der Gesteinsverwitterung und als Träger sowohl der Pflanzengesellschaft als auch des Wassergehaltes nach Maßgabe des Ortes bestimmt die geometrischen Elemente, Art und Dimensionierung der Froststrukturen.

Die Zeit als Ausdruck des Temperaturgefälles und seiner Einwirkungsdauer und des Verhältnisses von Frosthöhe zur Solifluktion kennzeichnet die Trennung der großen Gruppen der stationären von den fließenden Froststrukturen.

Die genannten drei Faktoren umfassen den ganzen Bereich der Entwicklung und Entfaltung der Froststrukturen und damit ihre Systematik. Im einzelnen enthalten sie eine ganze Anzahl weiterer Faktoren mit wiederholten und ineinandergreifenden Beziehungen physikalischer Größen: Die Frosteinwirkung ist sowohl eine Funktion des Temperaturgefälles zwischen der Kaltluft und dem Boden (dessen Wärmeabgabe wiederum in komplizierter Weise von Art, Größe, Verteilung und Zusammensetzung des Mineralbestandes abhängt), als auch des Wassergehaltes und der Vegetation.

Die Wasserversorgung, eine Funktion der allgemeinen hydrogeologischen Verhältnisse, hängt mit ihrem Durchdringungs- und Nachflußvermögen und bei der Umwandlung des Wassers in Eis maßgebend ab sowohl von der Art und Größe der Bodenkörnung und ihrer Oberflächen und von dem Verhältnis der Fraktionsanteile mit ihrer Kationenbelegung als auch von dem Temperaturgefälle und der in der Nachbarschaft aufgespeicherten Wassermenge. Systemfunktionen beherrschen also die Gefügeänderung des Bodens bei Frost. Durch die ungewöhnlichen Eigenschaften des Wassers werden sie gesteuert von den Differenzen der Hydratationsenergien der Eiskristalle und der Bodenpartikel. Die Zusammenstellung im nachfolgenden Schema mag eine, wenn auch nur grobe Übersicht geben über die Faktoren des gefrierenden polydispersen Systems Boden-Wasser-Eis.



Eine feinere Unterteilung und Weiterentwicklung, die man in Gedanken leicht vornehmen kann, zeigt die Wiederholung verschiedener Komponenten bei den einzelnen Faktoren. Berücksichtigt man nun die Beteiligung der einzelnen Faktoren bei der Gestaltung und Ausprägung, d. h. der Artenbildungen der Strukturböden, so kommt man zu folgender Aufstellung:

Typenbildung

Schuttböden

Ebene

- Feinerdeaufbrüche
- Steinnetze
- Steinringe
- Taimyripolygone

Steinpflaster

Hang

- Feinerdestreifen
- Steinstreifen
- Steinguirlanden
- Taimyripolygone

Feinerdeböden

Ebene

- Kuchenböden
- Rautenböden
- Schlammkessel (Brodelkessel)
- Taimyripolygone

Hang

- Feinerdestreifen
- gestreckte polygonale Böden
- Schlammströme
- Taimyripolygone

<sup>1)</sup> Der Frosthub ist definiert als der Hebungsbetrag, der aus dem Kristallwachstum und der Volumenvermehrung des kristallisierenden Wassers resultiert.

## Vegetationsboden

Ebene	Hang
Spaltenpolygone mit Pflanzenringen	Abrißstreifen
Bülten	Guirlanden
Thufur	polygonale Schollen
Palse	tetragonale Schollen
Ringmoore	Strangmoore

Die Mannigfaltigkeit der vorgegebenen örtlichen Boden- und Wasserverhältnisse behindert eine strenge Scheidung und Klassifizierung. Die aufgestellten Reihen sind deshalb nur Möglichkeiten und nur z. T. eine zwangsläufige Entwicklung, wie vom Steinpflaster zum Steinring. Zum Teil sind auch Entwicklungen in seitlicher Richtung möglich. Der Umstand, daß die Vegetation eine wesentliche Funktion des Klimas ist, legt daher den Gedanken einer Trennung nach Klimazonen nahe. Keineswegs ist ja das subnivale Klima der tropischen Gebirge mit dem subnivalem Klima der polaren Gebiete zu vergleichen. Doch die Tatsache, daß in beiden Regionen bei gleichen örtlichen Boden- und Wasserverhältnissen gleiche Strukturen entstehen, läßt die Sonnenstrahlungswärme während der Tauperiode in den Hintergrund treten. Das Klima, sowohl des großen als auch des kleinen Bereiches, gehört zu den allgemein vorgegebenen, nicht zu den speziell gestaltenden und variierenden Faktoren im Gebiet der Frostmusterböden; einzig und allein entscheidend sind Boden- und Wasserverhältnisse bei Einsatz des Frostes. Sie unterliegen dem gleichen dynamischen Prinzip. Der Umstand, daß Frostmusterböden bei entsprechenden Verhältnissen in unseren Breiten, und zwar nicht nur im Hochgebirge, sondern überall sich entwickeln, wie die Frostaufbrüche in Straßen und Weiden und die azonalen und extrazonalen Strukturen (TROLL 1944) eindringlich darlegen, legt die Überschneidung der Klimagrenzen durch die Froststrukturen ganz und gar offen. Das unmittelbare Neben- und Ineinander von Groß- und Kleinstformen in der Arktis läßt daran keinen Zweifel.

Eine Typenabgrenzung und Systematik muß also in erster Linie die Wasser- und Bodenverhältnisse zugrunde legen. Der Stoff, d. h. die Bodensubstanz, bestimmt wesentlich das Gefüge, das durch Frosteinwirkung entwickelt wird. Damit wird die genetische Typeneinteilung zu einer gefügekundlichen Angelegenheit. Minderung des Gefügewiderstandes eines Bodens bei den Bewegungen für die durch Kristallisation und Schmelzen bedingten Volumenänderungen erscheint als gestaltendes Prinzip bei allen Bodenfrostmusterbildungen. Sie sind das Ergebnis des statischen und dynamischen Verhaltens des Wassers im Boden bei Frosteinwirkung und damit der osmotischen Druckdifferenzen im Boden als einem polydispersen System.

## 2. Die Kräfte

Bei der Gruppe der Hangfließböden tritt die Schwerkraft als wesentlich gestaltendes Moment ganz in den Vordergrund. Mannigfaltig sind aber auch die äußeren Faktoren, die modifizierend und gestaltend den Prozeß der Strukturbildung berühren oder gar in ihn eingreifen, wie Wind, Regen, Schnee, Eis, Vegetation und ihre unmittelbaren

Folgen: Verdunstung, Ablagerung, Abtragung, Gesteinszerkleinerung usw. Und manche Forscher haben in diesen Vorgängen und der so gestaltenden Tätigkeit der Natur Hauptmomente der Strukturbildung gesehen (NANSEN, HUXLEY, ODELL u. a.), wieder andere suchten im Kräftespiel der Quellung und Dichtschlammung des Wesens Kern zu finden (STECHE 1933), und schließlich sind auch die thermodynamischen Effekte und Möglichkeiten untersucht und zur Erklärung der Strukturbildungen der Mechanismus der Konvektionsströmung herangezogen worden (GRIPP, MORTENSEN, DÜCKER 1933). Es ist hier nicht der Platz, all den Autoren gerecht zu werden, die in verdienstvoller Weise beitrugen, ein vollständiges Bild vom Formenschatz und Kräftespiel im periglazialen Boden zu geben, zumal eingehende Übersichten bestehen (STECHE, MEINARDUS 1930, TROLL 1944, MÜLLER 1943, Symposium 1952, BLACK 1950).

Alle die genannten Faktoren wirken mit bei der Herausbildung der Frostmuster, doch das wesentliche Moment liegt in der Frosthebung und Beulenbildung als Vorspiel für die mittels Solifluktion sortierend und sammelnd wirkende Schwerkraft. Damit komme ich zu ähnlichen Ergebnissen wie HÖGBOM, HAMERG, ELTON, BESKOW u. a. Konvektionsströme aber sind an der Mechanik des Froststrukturbodens nicht beteiligt. Weder die fossile noch die aktive Sommerform läßt den Schluß zu, daß Steine im Kreise oder gar über das Niveau der Feinerde getragen werden. Die Steinringbildung durch Konvektionsströme setzt aber voraus, daß der aktive „Brodessel“ im Sommer, d. h. in der Auftauperiode eine Oberfläche hat, die mindestens im gleichen Niveau liegt wie die Oberkante des Steinringes, wenn dort die Steine oder große Korngrößen abgelagert werden sollen. Diese Voraussetzung ist aber nicht gegeben; die Oberfläche der tätigen, breiigen Polygone liegt tiefer als die der Steinwälle, sie ist eingewölbt. Und die Befunde der Gefügebildung zeigen eindeutig, daß nicht die gesamte breiige, gänzlich aufgetaute Substanz der Träger der sortierenden Bewegung ist, sondern nur die oberste aufgetaute, fließfähige Bodenhaut der im übrigen gefrorenen festen Beule.

Es bleibt das unbestrittene Verdienst von LOW, GRIPP, ROMANOWSKY u. a., die Möglichkeiten der Konvektionsströmungen bis in alle Einzelheiten konsequent untersucht zu haben. Die Entwicklung der Konvektionshypothese wird jedem verständlich sein, der in den Polargebieten die bisher unentwirrte Fülle der Formen und Zustände der Froststrukturen und die dünnbreiigen aktiven Feinerdekessel mit den eindeutigen Spuren eines nach den Rändern erfolgten Transportes gesehen hat. Sie legen den Gedanken eines Aufbrodelns und die Vorstellung von Konvektionsströmungen tatsächlich nahe. Nach der Unterscheidung in aktive und inaktive Strukturen und der Erkenntnis der Hydrationsvorgänge aber muß sie endgültig aufgegeben werden.

An unseren Befunden scheitert auch der Versuch einer Deutung auf Grund der Kräfte der Quellung. Sie wirken mit, ja sogar ganz erheblich, durch die Anlagerung von Wasserhüllen um die Bodenpartikel, aber sie sind nicht entscheidend. Wie sollen die Kräfte der Quellfähigkeit sich nach der Tiefe hin gestaltend auswirken, wenn sie unter zunehmender Belastung abnehmen und schon bald ihre Grenze erreicht haben, wie die nachfolgende Feststellung von GREEN zeigt!

Anreicherung des Wassergehaltes in verschiedenen Bodentiefen durch Überstauung (Tab. 13) nach GREEN (1928, in Handbuch Bodenkunde, 1. Erg. Bd., S. 192)

Tabelle 13. Wasseranreicherung in überstautem Boden; nach GREEN (1928)

Schichttiefe	Vor der Überstauung	nach 3 Tg.	Zunahme	nach 14 Tg.	Zunahme gegenüber derjenigen nach 3 Tg.
0,0–0,30 m	13,80	25,60	+ 21,80	33,50	— 2,10
–0,60 m	17,90	32,30	+ 14,30	33,40	+ 1,20
–0,90 m	18,80	26,00	+ 7,20	32,00	+ 6,00
–1,20 m	21,60	32,10	+ 1,50	26,20	+ 3,10
–1,50 m	22,20	22,20	0,00	22,00	— 0,20
–1,80 m	21,30	21,40	+ 0,10	21,20	— 0,30

Die Lösung der Strukturbodenprobleme wurde ganz bedeutend gefördert durch notwendige Untersuchungen für die Technik, speziell für den Straßenbau, wie eingangs dargelegt wurde. Hierbei erkannte man erst die entscheidende Bedeutung der Korngrößen und der Art der Tonminerale für die Frosthebung und damit den Kern des Problems, den KOKKONEN als erster berührte. Es hat dennoch Jahre gedauert, bis man zu den tieferen Fragen vordrang. Jede weitergehende Forschung in der Systematik und in den spezielleren Fragen der Strukturen aber muß diesen experimentellen Weg weitergehen, wenn sie sich nicht in die Breite verlieren will. Jede weitere Sondierung des Reichtums der Erscheinungen im Strukturboden wird die Erkenntnis bestätigen, daß überall das gleiche, einfache, große Naturgesetz herrscht, um den Bodenraum zu gestalten: Mechanische Entmischung des Bodens durch Gefügebildung zur Erreichung einer Funktionsbereitschaft und eines Gleichgewichtes erscheint als letzter Sinn, d. h. als letzte Folge dieser eindrucksvollen, in ihrem Tempo sinnlich kaum wahrnehmbaren Vorgänge in der allerobersten Erdkruste des periglazialen bzw. subnivalen Bereiches.

### Rückblick

In den einleitenden Kapiteln (I) wurde kurz über den Gang, den Stand und die praktische Bedeutung der Frostbodenforschung berichtet und dabei hervorgehoben, daß die wirklich wesentlichen Fortschritte in erster Linie den geologisch-physikalischen Experimentaluntersuchungen zu verdanken sind und nur durch diese Methode weitere entscheidende Ergebnisse erwartet werden können.

Im Gange dieser Untersuchung wurde dargelegt, daß die bekannten Tatsachen der Froststrukturbildung, die Beziehungen zwischen Korngröße, Wasser und Gefrieren, kolloidchemisch zu betrachten sind und die Erkenntnisse der modernen physikalischen Chemie nicht länger unberücksichtigt bleiben dürfen. Hier liegen noch Aufgaben experimenteller Art vor. Ihre Lösungen versprechen, die Frostwirkungen präziser fassen zu können als bisher. Voraussetzung für die Lösung der Strukturbodenprobleme aber ist, die Mechanik herauszuarbeiten, die für alle Strukturen gültig ist. Dazu mußten die grundlegenden Experimente und Erkenntnisse aufgeführt, und, soweit hier für die Mechanik wichtig, kurz kolloidchemisch beleuchtet werden.

In den beiden ersten Hauptkapiteln (II und III) wurde deshalb die Statik des Frostbodens behandelt. Die fossilen Formen wurden einbezogen, wobei der Fund einer besonders schönen Struktur den Ausgangspunkt bildete. Es wurden die Formen und wirkenden Faktoren betrachtet, und nach der dabei erreichten Klärung und Entwicklung der zutreffenden Problemstellung wurde in einem anschließenden Kapitel (IV) die Dynamik des Frostbodens und dann die Kinematik (V) untersucht. Anschließend (Kap. VI), wurde aufgezeigt, daß die mannigfaltigen Strukturbodentypen sich alle gemäß den Grundgesetzen der Hydratation entwickeln. Auch das bislang ungelöste Problem der Eiskeilbildung erscheint hierdurch lösbar. Im nachfolgenden Kapitel (VII) konnten dann Gesichtspunkte für eine Systematik entwickelt werden.

Nach diesem kurzen Rückblick (VIII) sollen die Ergebnisse und Folgerungen zusammengefaßt herausgestellt werden:

### Zusammenfassung

1. Eine der wohl schönsten bisher bekannten fossilen Steinringstrukturen wird eingehend beschrieben. Diese und andere eigene Beobachtungen an rezenten Strukturen sind, unter Auswertung der diesbezüglichen Literatur, die Ausgangspunkte für
2. eine allgemein gültige Einteilung der Strukturen nach Zustandsformen, und zwar in aktive und inaktive. Die aktiven Strukturen sind durch Gefrier- und Auftauformen ausgezeichnet. Die inaktiven dagegen geben nur träge Bewegungen zu erkennen und leiten bereits über zu den fossilen Formen.  
Maßgebend für diese Einteilung sind:
  - a) die morphologische und hydrologische Position der Strukturen,
  - b) die Aufbeulung der Strukturen bei Frosteinwirkung,
  - c) der Zusammenbruch und die Einsenkung der Strukturen beim Auftauen,
  - d) Bewegungsspuren auf der Oberfläche und an den Rändern der Strukturen
  - e) die Erhaltung der Beulenform und der polyedrischen (blumenkohlförmigen) Zerlegung der inaktiven, trägen Strukturen während der Auftauperiode,
  - f) die Beschränkung der Vegetation in den trägen Strukturen auf breite Randzonen.
3. Die Feststellungen unter 2. machen eine Unterscheidung von typisch arktischen und tropischen Strukturen in dynamischer und kinematischer Hinsicht hinfällig.
4. Die Materialsortierung, bzw. die Anreicherung von Steinen und Pflanzen an den Rändern der Strukturen durch Solifluktion und Abgleiten an den wasserübersättigten aufgetauten Wölbungen der Frostformen wurde beobachtet und durch Fotos ausgewiesen. Bei dieser Materialsortierung wirkt kein Frosthübel oder -schub in irgendeiner Form (Eisnadeln) wesentlich und primär mit, auch keine Quellung oder Konvektionsbewegung.
5. Die Bedeutung des Wassergehaltes im Boden für die Wirkung des Frostes und die Strukturbildung war zwar bekannt, hier aber erst wird gezeigt, daß das Wasser von gleicher, entscheidender Bedeutung für das Ausmaß und die Aktivität der Strukturen ist, wie die Korngrößen für das Ausmaß der Kornober-

flächen. Nur das Wasser ist maßgebend, das zu Beginn der Frostperiode als Grund-, Sicker- und Hydratwasser zur Verfügung steht. Damit und durch die anomalen Eigenschaften des Wassers erklärt sich auch die Beschränkung der Strukturen auf abgegrenzte Bereiche.

6. Die experimentell (von BESKOW, CASAGRANDE, DÜCKER, TABER u. a.) ermittelten Beziehungen zwischen Korngröße und Frostwirkung (Frostgefährlichkeit) beweisen die Gültigkeit der Gesetze der Hydratationsvorgänge und -kräfte (VAGELER, ZUNKER) an den Phasengrenzflächen im gefrierenden polydispersen System des Bodens. Die Wasseranreicherung im Frostboden ist primär verursacht durch die Hydratationsenergie der Eiskristalle bzw. ihrer elektrischen Potentiale. Sie sind so groß (Dielektrizitätskonstante des Wassers 81, des Eises 2), daß die benachbarten Bodenpartikel soweit wie möglich dehydratisiert werden. Die auftretenden osmotischen Druckdifferenzen bringen das ganze Bodenwasser in Bewegung, und zwar in Richtung auf die Gefrierfront für den Einbau der Wassermoleküle in das Kristallgitter des Eises. Damit wird das dynamische Gleichgewicht im gefrierenden System hergestellt.
7. Die Wasserbewegung und Wasseranreicherung im Frostboden ist kein Phänomen der Kapillarität, sondern der Osmose, wie sich aus den Untersuchungen von VAGELER über den Wasser- und Kationenhaushalt der Mineralböden ergibt.
8. Die Art des Frostbodens (massiver oder geschichteter Frostboden) ist bestimmt durch das Ausmaß der Hydratation der Bodenpartikel, d. h. der Größe ihrer Wasserhüllen und der Energie, mit der sie angelagert werden.
9. Das spannungsfreie Porenvolumen im gefrierenden Boden bestimmt das Maß der Reibung und damit das Maß und die Geschwindigkeit des Wassernachschubes zur Gefrierfront. Dadurch sind die sogenannte Kapillarität, die Wasseranreicherung in der Gefrierzone zu Schichten in vertikaler und horizontaler Lage, die Frosteindringung und Gefriergeschwindigkeit abhängig von den Oberflächen, bzw. Phasengrenzflächen der Bodenpartikel und insbesondere von dem Gehalt an Tonteilchen.
10. Die Eisschichtenbildung erfolgt umso rhythmischer, je gleichmäßiger der tonhaltige Boden ist. Sie wird in Dicke und Abstand von der Reibung beim Wassernachschub, d. h. von dem spannungsfreien Porenvolumen und dem Widerstand beim Austausch und Transport der Wassermoleküle von Hülle zu Hülle bestimmt. Sie kennzeichnet gewissermaßen den Wirkungsradius des osmotischen Systems bei der Frosteinwirkung.
11. Die Kinematik des Frostbodens beginnt, soweit inhomogener Schuttboden vorgegeben, mit der Herausbildung eines Steinpflasters, der „arktischen Hammada“, nach dem bekannten, von HAMBERG so schön dargestellten Vorgang des Aufrierens der Steine und der groben Korngrößen. Dadurch entsteht eine dreifache Schichtung aus aufgefrorenen groben Bestandteilen, zurückgebliebenen Feinbestandteilen und unsortiertem Boden.
12. Aufbeulungen und Aufwölbungen des frostgefährlichen Bodens sind die *conditio sine qua non* der Materialsortierung an den Rändern der Strukturen. Diese erfolgt mittels Solifluktion und Gleitung an der aufgetauten Oberfläche der Strukturen. Die Bewegungsvorgänge im Zyklus des Gefrierens und Auftauens sind

als Schema für die stationären Strukturen dargestellt. Die Ableitung der Streifen- und Guirlandenbildungen ergibt sich daraus zwanglos in der bekannten Art und Weise.

13. Die Solifluktion muß streng geologisch-physikalisch definiert sein als die fließende Bewegung des Bodens beim Auftauen infolge der Übersättigung mit Wasser, das beim Gefrieren angereichert wurde (vollkommene Hydratation der Bodenpartikel). Hebende und versetzende Wirkungen des Kammeises können nicht als Solifluktion aufgefaßt werden.
14. Die Dynamik der Froststrukturen ist bestimmt durch die Kristallisationskraft (die Dipolmomente) des Eises und der dadurch entwickelbaren Volumenenergie bei den Wasseranreicherungen (= der normalen und der exzessiven Frosthebung im Sinne TABERS).
15. Der Impuls zur Strukturbildung ist einmal in großen und kleinen Inhomogenitäten des Bodens zu suchen, zum anderen in den unter 14. genannten Momenten und den sich daraus ergebenden Spannungen. Es ist gut denkbar, daß sie zur Bildung einzelner Strukturen wie zur Entwicklung von Strukturfeldern führen.
16. Spalteneis und Eiskeilbildung sind Folgen der Schrumpfung, d. h. der Dehydratation der Bodenteilchen. Sie allein schafft die Möglichkeit zu perennierenden, die Auftauperiode überdauernden Eisbildungen und deren Anwachsen zu Eiskeilen und Eiskeilnetzen, sowie der späteren Ausfüllung der Spalten mit Lehm und Löß. Wie TABER bereits darlegte, kommen thermische Kontraktionsrisse infolge zunehmender Kälte dafür nicht in Frage.
17. Die Eiskeilnetze der hocharktischen Gebiete sind durchweg als sehr alte und z. T. fossile Bildungen anzusehen, da ihre Tiefenentwicklung ebenso wenig wie die des Dauerfrostbodens bei den heutigen Klimaverhältnissen im derzeitigen Umfange möglich erscheint. Die Aktivität dieser Strukturen ist oft durch sekundäre Bildungen in den medialen Rinnen auf den Eiskeilen gekennzeichnet, sowie durch das Auftauen und Aufwölben der Feinerde zwischen den Eiskeilen.
18. Die Vorgänge im Frostboden stellen eine Entmischung des Bodens dar, die irreversibel ist und zu einer Konsolidation führt, die bei wohldefinierbaren physikalischen Bedingungen charakteristisch ist. Sie stellen damit Beispiele und Probleme der Entropievermehrung dar.

### Schriftenverzeichnis

- AARIO, Leo: Die spätglaziale Entwicklung der Vegetation und des Klimas in Finnland. — Geol. Rdsch., **34**, S. 695–704, 1 Abb., Stuttgart 1944.
- Waldgrenzen und subrezente Pollenspektren in Petsamo, Lappland. — Ann. Acad. Scient. Fennicae, Ser. A, **54**, 1940 (a).
- ABOLIN, R. J.: Die Gefornis des Bodens und das fossile Eis. — Spiski Abt. Tschita Russ. Geogr. Gesellsch., **9**, Tschita 1913.
- ANDERSSON G. och H. HESSELMANN: Vegetation och flora i Hamra Kronopark. Meddel. fr. Statens Skogsförsöksanstalt. Stockholm 1907.
- ANDERSSON Joh. G.: Solifluction, a component of subaërial denudation. — Journ. of Geol., **14**, S. 90–112, 5 Abb., Chicago 1906.

- ARNOLD, H.: Ein aufgedecktes würmperiglaziales Frostspalten-Polygonnetz bei Gütersloh. – Z. Deutsch. geol. Ges. 1953, **105**, S. 137, Hannover 1954.
- AUER, VÄINÖ: Über die Entstehung der Stränge auf Torfmooren. – Acta Forest. Fenn., **12**, Helsinki 1920.
- Untersuchungen über die Waldgrenzen und Torfböden in Lappland. – Communicationes ex Instituto Quaestionum Forestalium Finlandiae editae, **12**, Helsinki 1927.
- BERNAL, J. D. und FOWLER, R. H.: A theorie of water and ionic solution with particular reference to hydrogen and hydroxylions. – J. chem. Physics, **1**, 515, S. 75, 1933.
- BESKOW, G.: Erdfließen und Strukturböden der Hochgebirge im Licht der Frosthebung. – Geol. Fören. i Stockholm Förhandl., **52**, S. 622–638, 11 Abb., Stockholm 1930.
- Tjälbildningen och tjällyftningen med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. – Sver. Geol. Undersökn., Ser. C, **375**, Stockholm 1935.
- BLACK, R. F.: Permafrost. – Applied Sedimentation, S. 247–275, New York (John Wiley and Sons, Inc.) 1950.
- Polygonal Patterns and Ground Conditions from Aerial Photograph. – Photogram. Eng., 1952.
- Permafrost – A Review. – Transact. New York Ac. of. Sc., Ser. II. Vol. 15, S. 126–131, New York 1953.
- BOBEK, H.: Die gegenwärtige und eiszeitliche Vergletscherung im zentralkurdischen Hochgebirge (Osttaurus, Ostanatolien). – Gletscherk. **27**, S. 50–87, 6. Fig., 12 Bilder, Berlin 1941.
- BRIDGMANN, P. W.: Verhalten des Wassers als Flüssigkeit und in fünf festen Formen unter Druck. – Z. anorg. Chemie, **77**, S. 377–455, 28 Fig., Leipzig und Hamburg 1912.
- BRINKMANN, R.: Abriß der Geologie. – I, Stuttgart 1950.
- v. BUNGE, Alex: Einige Worte zur Bodeneisfrage. – Russ. K. Mineral. Gesellsch., Verhdl. 2. Serie, **40**, 1902.
- CAILLEUX, A.: Etudes de cryopédologie. Expéd. polaires Françaises. Centre de document. univ. Paris, 1948.
- CASAGRANDE, A.: Bodenuntersuchungen im Dienste des neuzeitlichen Straßenbaues. – Der Straßenbau, **25**, S. 25–28, Halle/Saale 1934.
- CORBEL, J.: Les sols polygonaux. Observations, expériences, genèse. – Revue de Géomorphologie Dynamique, 5. Jg., No. 2, S. 49–68, Paris 1954.
- CRAWFORD, Carl B.: Soil Temperature and thermal properties of soils in Symposium: Frost action in Soils. – Spec. Rep. No 2 of the Highway Research Board, S. 17–43, Washington, D. C. 1952.
- DE GEER, G.: Guide de l'excursion au Spitzberg. – IX. Congr. Int. Géol., Stockholm 1910.
- DE LAPPARENT, A. F.: Excursions géologiques dans le bassin de Paris. Première Série: Les terrains tertiaires aux environs de Paris. Actualités scient. et industr. No 910 (Géologie régionale de la France) Paris 1942.
- DÜCKER, A.: Frostschub und Frosthebung. – Cbl. Mineral., Geol. u. Pal., Jg. 1933, B, S. 441–445, Stuttgart 1933.
- Untersuchungen über die frostgefährlichen Eigenschaften nichtbindiger Böden. – Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, **17**, Berlin 1939.
- Frosteinwirkung auf bindige Böden. – Straßenbau-Jahrh., 1939/40, Berlin 1940.
- Über die Entstehung von Frostspalten. – Schr. naturwiss. Ver. Schleswig-Holstein, **25**, KARL-GRIPP-Festschrift, S. 58–64, Kiel 1951.
- EDELMANN, C. H., FLORSCHÜTZ, F. und JESWIET, J.: Über spätpleistozäne und frühholozäne kryoturbate Ablagerungen in den östlichen Niederlanden. – Verh. Geol.-Mynbouwkundig Genoot. v. Nederl. en Kolonien, Geol.-Ser., **11**, 4, 1936.
- ELTON, Ch. S.: The nature and origin of Soil-Polygons in Spitsbergen. – The Quart. Journ. Geol. Soc. of London, **83**, S. 163–194, London 1927.

- FRÖDIN, J.: Beobachtungen über den Einfluß der Pflanzendecke auf die Bodentemperatur. – Lunds. Univers. Årsskrift, N. F. Avd., 2, Bd. 8, Nr. 9, 15 S., Lund und Leipzig 1912.
- Geografiska studier i St. Lule Alvs källområde. – Sver. Geol. Undersökn. Årsbok, 7, Ser. C. 257, Stockholm 1914.
- Über das Verhältnis zwischen Vegetation und Erdfließen in den alpinen Regionen des Schwedischen Lappland. – Meddel. Fran Lunds Univ. Geograf. Institution., Ser. A, 2, (Lunds Univ. Årsskrift, N. F., Avd. 2, 14, Nr. 24). Lund und Leipzig 1918.
- FROST, R. E.: Interpretation of Permafrost Features from Airphotos. – Frostaction in Soils, a symposium; Highway Res. Board Spec. Rep., No. 2, S. 223–245, Washington D. C. 1952.
- GAERTNER, H. R. v.: Brodelböden in der Gegend von Eger. – Ber. R.-Amt Bodenforsch., H. 1 u. 2, Wien 1941.
- GALLWITZ, H.: Eiskeile und glaziale Sedimentation. – Geologica, Schriftenr. geol. Inst. Univers. Berlin, Greifswald, Halle, Rostock, 2, 24 S., 2 Taf., Berlin 1949.
- GIVEN, G.: Kolloidale Eigenschaften des Tones und ihre Beeinflussung durch Kalksalze. Diss. Göttingen, 1915.
- GREGORY, J. W.: Stone Polygons beside Loch Lomond. – The Geogr. Journ., 76, 1930.
- GRIGORJEW, A. A.: Die Typen des Tundra-Mikroreliefs von Polar-Eurasien, ihre geographische Verbreitung und Genesis. – Geogr. Z., 31, 1925.
- Der ewige Frostboden und die diluviale Vereisung. – Sammelwerk, hrsg. v. d. Akad. d. Wiss. USSR., Leningrad 1930.
- GRIPP, K.: Über Frost und Strukturböden in Spitzbergen. – Z. Ges. Erdk., 1926, S. 351 bis 354, Berlin 1926.
- Beiträge zur Geologie von Spitzbergen. – Abh. naturw. Ver. Hamburg, 21/23, 1927.
- Glaziologische und geologische Ergebnisse der Hamburger Spitzbergen-Expedition 1927. – Abt. naturw. Ver. Hamburg, 22, Hamburg 1929.
- Zwei Beiträge zur Frage der periglazialen Vorgänge. – Meyniana, 1, S. 112 bis 118, 1952.
- GRIPP, K. und SIMON, W. G.: Experimente zum Brodelbodenproblem. – Cbl. Mineral. usw., Jg. 1933, B, S. 433–440, Stuttgart 1933.
- Die experimentelle Darstellung des Brodelbodens. – Die Naturwiss., 22, 1934.
- Nochmals zum Problem des Brodelbodens. – Cbl. Mineral., Jg. 1934, S. 283–286, Stuttgart 1934.
- HALLÉN, K.: Undersökning af en frostknöl (pals) a Kaitajänki myr i Karesuando socken. – Geol. Fören. Stockh. Förhandl., 35, S. 81–87, 5 Fig., Stockholm 1914.
- HAMBERG, Axel: Zur Kenntnis der Vorgänge im Erdboden beim Gefrieren und Auftauen, sowie Bemerkungen über die erste Kristallisation des Eises in Wasser. – Geol. Fören. Stockh. Förh. 37, S. 583–619, 19 Fig., Stockholm 1916.
- HAY, Thomas: Stone stripes. – Geogr. Journ., 87, 1936.
- HÖGBOM, B.: Einige Illustrationen zu den geologischen Wirkungen des Frostes auf Spitzbergen. – Bull. Geol. Inst. Upsala, 9, S. 41–58, 8 Fig., Upsala 1910.
- Über die geologische Bedeutung des Frostes. – Ebenda, 12, S. 257–390, 49 Fig., Upsala 1913–1914.
- Beobachtungen aus Nordschweden über den Frost als geologischen Faktor. – Ebenda, 20, 1927.
- HOLMQUIST, P.: Über mechanische Störungen und chemische Umsetzungen in dem Bänderthon Schwedens. – Bull. Geol. Inst. Upsala, 3, S. 412–432, Upsala 1898.
- HUNDT, R.: Diluviale Eiskeile im Saazer Becken. – Z. Geschiebeforsch. u. Flachlandsgeol., 17, H. 3, 1941.
- HUXLEY, J. S.: Les «sols polygonaux» et l'évolution des phénomènes de dénudation dans les pays arctiques. – Annales de Géogr., 34, 1925.

- HUXLEY, J. S. und ODELL, N. E.: Notes on Surface Markings in Spitsbergen. – *Geogr. Journ.*, **63**, 1924.
- HVEEM, F. N.: Water in Highway Subgrades and Foundations. – Frostaction in Soils, a symposium; Highway Res. Board Spec. Rep. No. 2, Washington D. C. 1952.
- ISRAEL, H.: in: REICH, H. und H. v. ZWERTGER, Taschenbuch der angewandten Geophysik, S. 104, Leipzig 1943.
- JOHANSSON, Simon: Die Festigkeit der Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt, nebst einem Vorschlag zu einer Klassifikation. – *Sver. Geol. Undersök. Arsbok*, **7**, (1913), Ser. C, 256, Stockholm 1914.
- JOHNSON, A. W.: Needed Research pertaining to frost action and related phenomena. – Symposium Frostaction, S. 380–383, Washington 1952.
- JUNG, Erhard: Weiterer Beitrag zur aggregierenden Einwirkung des Frostes auf den Erdboden. – *Z. Pflanzenernährg. Düngung u. Bodenkn.*, **A**, **24**, S. 1–20, 7 Abb., Berlin 1932.
- KALLE, K.: Das anomale Verhalten des Wassers in Bezug auf einige für die Meereskunde wichtige physikalische Eigenschaften. – *Ann. Hydr. u. maritim. Meteorol.*, **70**, 1942. — Der Stoffhaushalt des Meeres. Leipzig 1943.
- KÖGLER-SCHIEDIG: Baugrund und Bauwerk. 4. Aufl., Berlin 1944.
- KOKKONEN, P.: Beobachtungen über die Struktur des Bodenfrostes. – *Acta Forestalia Fennica*, **30**, Nr. 3, Helsingfors 1926.
- Beobachtungen über die durch den Bodenfrost verursachte Hebung der Erdoberfläche und in der Frostschicht befindlichen Gegenstände. – *Maataloustieteellinen Aikakauskirja*, Nr. 3, Helsinki 1930.
- KREUTZ: Das Eindringen des Frostes in Böden während des Winters 1939/40. Reichsamt für Wetterdienst, Wiss. Abh., **9**, Nr. 2, Berlin (Springer) 1942.
- LEFFINGWELL, E. de K.: Ground-Ice Wedges. The dominant Form of Ground-Ice on the North Coast of Alaska. – *The Journ. of Geol.*, **23**, S. 635–654, 23 Fig., Chicago 1915. — The Canning River Region, Northern Alaska. – *U. S. Geol. Survey, Prof. Pap.*, **109**, Washington 1919.
- LOW, A.: Instability of viscous fluid motion. – *Nature*, **65**, London 1925.
- MEINARDUS, W.: Arktische Böden. S. 27–96 in: *Handb. d. Bodenlehre*, hrsg. von E. BLANCK, **3**, Berlin 1930.
- MORTENSEN, H.: Über die physikalische Möglichkeit der „Brodel“-Hypothese. – *Cbl. Mineral. usw.*, Jg. 1932, B, S. 417–422, Stuttgart 1932.
- Einige Oberflächenformen in Chile und auf Spitzbergen im Rahmen einer verglichenen Morphologie der Klimazonen. – *Herm.-Wagner-Gedächtnisschrift. Peterm. Mitt., Erg.-H.*, **209**, Gotha 1930.
- MORTON, J. O.: The application of mechanics to highway foundation Engineering. – *Proced. Int. Conf. on Soil Mechanics a. Found., Eng.*, **1**, 1936.
- MÜLLER, SIEMON W.: Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. – Michigan 1947. – *U.S. Geol. Survey Special Report*, 1945.
- NANSEN, Fr.: Spitzbergen, Leipzig 1921.
- NORDENSKJÖLD, O.: Die Polarwelt und ihre Nachbarländer. Leipzig und Berlin 1909. — Die Schwedische Südpolarexpedition und ihre geographische Tätigkeit. – *Wiss. Ergebn. d. Schwed. Südpolarexpedition 1901–1903*, Stockholm 1911.
- ODELL, N. E.: Observations on the rocks and glaciers of Mount Everest. – *The Geogr. Journ.*, **66**, 1925.
- OLMSTEAD, Frank: Results of a questionnaire on needed research. – In *Symposium Frostaction in soils*, S. 373–379, Washington 1952.
- PATERSON, T. T.: The effect of frostaction and solifluction around Baffin Bay and in the Cambridge District. – *Geol. Soc. London Quart. Journ.*, Vol **96**, S. 99–127, 1940.

- PHILIPP, H.: Geologische Beobachtungen. Ergebn. d. Filchnerischen Vorexped. nach Spitzbergen. – *Peterm. Mitt., Erg.-Heft*, **179**, 1914.
- PICARD, K.: Eiskeile in Sanden bei Dülmen (Westfalen). – *Geol. Rdsch.*, **40**, S. 51–55, 3 Abb., Stuttgart 1952.
- POSER, Hans: Beiträge zur Kenntnis der arktischen Bodenformen. – *Geol. Rundsch.*, **22**, S. 200–221, 18 Abb., Berlin 1931.
- Das Problem des Strukturbodens. – *Geol. Rdsch.*, **24**, S. 105–121, Berlin 1933.
- REMY, H.: Lehrbuch der anorgan. Chemie. 2. Aufl., **1**, S. 27. Leipzig 1939.
- RICHMOND, Gerald, M.: Stone nets, stone stripes and soil stripes in the Wind River Mountains, Wyoming. – *The Journ. of Geol.*, **57**, 2, S. 143–153, Chicago 1949.
- ROMANOWSKY, V. und CALLIEUX, A.: Sols polygonaux et fentes de dessiccation. – *Bull. Soc. Geol. France*, (5) **12**, S. 321–327, Paris 1943.
- RUTTEN, M. G.: Polygon soils in Iceland. – *Geologie en Mijnbouw*, **13**, N. S., S. 161–167, 5 Fig. Leiden 1951.
- SALOMON, W.: Die Spitzbergenfahrt des Internationalen Geologenkongresses. – *Geol. Rdsch.*, **1**, S. 302–309, Leipzig 1910.
- Arktische Bodenformen in den Alpen. – *Ebenda* 1929.
- SCHÄFER, J. P.: Some periglacial features in Central Montana. – *The Journ. of Geol.*, Vol. **57**, S. 154–174, 10 Fig., Chicago 1949.
- SCHAIBLE, L.: Über Frostschäden. – *Die Bautechnik*, **19**, S. 529–531, 541–543, Berlin 1941.
- SCHENK, Erwin: Die Spitzbergen-Expedition Deutscher Studenten 1936. – *Petermanns Mitt.*, **83**, S. 15–17, Gotha 1937.
- Solifluktion. – *Z. deutsch. Geol. Ges.*, Jahrg. 1953, **105**, Hannover 1954.
- Die periglazialen Strukturbodenbildungen als Folgen der Hydratationsvorgänge im Boden. – *Eiszeitalter u. Gegenwart*, **6**, S. 170–184, Ohringen/Württ. 1955.
- SCHÖNHALS, E.: Diluviale Eiskeilfüllungen und andere Bodenfrosterscheinungen in Böhmen und Mähren. – *Ber. R.-Amt Bodenforsch.*, Jg. 1943, S. 170–175, Wien 1943.
- Reiß- und wärmezeitliche Frostbodenstrukturen aus der Magdeburger Börde. – *Geol. Jahrb.*, **65**, S. 589–602, Hannover 1950.
- Über fossile Böden im nichtverreisten Gebiet. – *Eiszeitalter und Gegenwart*, **1**, S. 109 bis 130, Ohringen/Württ. 1951.
- SCHOSTAKOWITSCH, W. B.: Der ewig gefrorene Boden Sibiriens. – *Z. Ges. Erdk.*, Berlin 1927. S. 394–427, Berlin 1927.
- SELZER, G.: Diluviale Lößkeile und Lößkeilnetze aus der Umgebung Göttingens. – *Geol. Rdsch.* **27**, S. 275–293, Stuttgart 1936.
- SERNANDER, Rutger: Flytjord i svenska fjälltrakter. – *Geol. Fören. Forenhandl.*, **27**, Nr. 232, S. 42–84, Stockholm 1905.
- SIPLE, P. A.: A theory of ice-blocked drainage as a principal factor in frostheave, slump and solifuction. In *Symposium: Frostaction in Soils*, S. 172–175, Washington 1952.
- SOERGEL, W.: Diluviale Eiskeile. – *Z. deutsch. geol. Ges.*, **88**, S. 223–247, Stuttgart 1936.
- SØRENSEN, Thorwald: Bodenformen und Pflanzendecke in Nordostgrönland. – *Medd. om Grønland*, **93**, 4, 69 S. Kobenhavn 1935.
- STECHE, Hans: Beiträge zur Frage der Strukturböden. – *Ber. Verhdl. sächs. Akad. Wiss., math.-phys. Kl.*, **85**, S. 193–272, 39 Abb., Leipzig 1933.
- SSUKATSCHEW, W. N.: Zur Frage vom Einflusse des gefrorenen Horizonts auf den Boden. – *Ber. Kais. Akad. Wiss., St. Petersburg*, (IV) **5**, Petersburg 1911.
- SUMGIN, M.: Über die ewige Gefrorenis des Bodens. – *Z. Ges. Erdk.* Berlin 1929, S. 27–32, Berlin 1929.
- Symposium der Highway Research Board. – *Spec. Report, No 2, Frost Action in Soils*, Washington D. C. 1952.

- TABER, St. M.: Ice Forming in Clay Soils will lift Surface Weights. – Eng. news records. **80**, 1918.
- The Mechanics of Frost Heaving. – Ebenda, **38**, 1930.
- Perennially Frozen Ground in Alaska: Its Origin and History. – Geol. Soc. America Bull., **54**, S. 1433–1548, 1943.
- TAMMANN, G.: Über das Verhalten des Wassers bei hohen Drucken und tiefen Temperaturen. – Z. phys. Chemie, **72**, S. 609–631, Leipzig 1910.
- Zur Kenntnis der molekularen Zusammensetzung des Wassers. – Z. anorg. u. allgem. Chemie, **158**, S. 1–24, 4 Fig., Leipzig 1926.
- Die abnormen Abhängigkeiten der Eigenschaften des Wassers von der Temperatur und dem Druck. – Z. anorg. u. allgem. Chemie, **235**, Leipzig 1938.
- TANTTU, A.: Über die Entstehung der Bülden und Stränge der Moore. – Acta Fennica, **4**, 1915.
- THORODDSEN, Th.: Polygonboden und „thufur“ auf Island. – Peterm. Mitt., **59**, S. 253 bis 255, Gotha 1913.
- TROLL, C.: Die Frostwechselhäufigkeit in den Luft- und Bodenklimaten der Erde. – Meteorol. Z., **60**, 1943.
- Strukturböden, Solifluktion und Frostklimate der Erde. – Geol. Rdsch., **34**, S. 545–694, 72 Abb., 1 Taf., Stuttgart 1944.
- Die Formen der Solifluktion und die periglaziale Bodenabtragung. – Erdkunde, **1**, S. 162–175, 3 Abb., 2 Fig., Bonn 1947.
- ULICH, H.: Neues vom Wasser, der sonderbarsten Flüssigkeit. – Angew. Chemie, **48**, 1935.
- Neue Anschauungen über die Besonderheiten des Wassers und der wässrigen Lösungen. – Angew. Chemie, **49**, 1936.
- VAGELER, P.: Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens. Berlin 1932. S. 60 bis 220.
- WASHBURN, A. L.: Patterned ground. – Revue Canadienne de Géogr. Vd. 4 nos 3–4 S.5 bis 59, 1950.
- WEGER, N.: Die Wasserbewegung und die Wassergehaltsbestimmung in gefrorenem Boden. – Meteorol. Rdsch., **7**, S. 45–47, 2 Abb., Berlin–Göttingen–Heidelberg 1954.
- WEICKMANN, L.: Beobachtungen von Strukturböden während der Polarfahrt des „Graf Zeppelin“. – Ber. sächs. Akad. Wiss., math.-phys. Kl., **84**, S. 121–122, 4 Taf., Leipzig 1932.
- WEINBERGER, L.: Frostspalten und Froststrukturen in Schottern bei Leipzig. – Geol. Rdsch., **34**, S. 539–544, 6 Abb., Stuttgart 1944.
- WITTMANN, Otto: Diluvialprofile mit periglazialen Erscheinungen von Château de Jeurre zwischen Etampes und Etrechy (Seine et Oise). – N. Jahrb. Geologie u. Paläont., Monatshefte. 1950, S. 65–79, 7 Abb., Stuttgart 1950.
- WOLDSTEDT, P.: Das Eiszeitalter. Stuttgart 1929.
- ZUNKER, F.: Das Verhalten des Bodens zum Wasser. S. 60–220. – In: Hdb. d. Bodenlehre, **6**, von E. BLANCK, Berlin 1930.

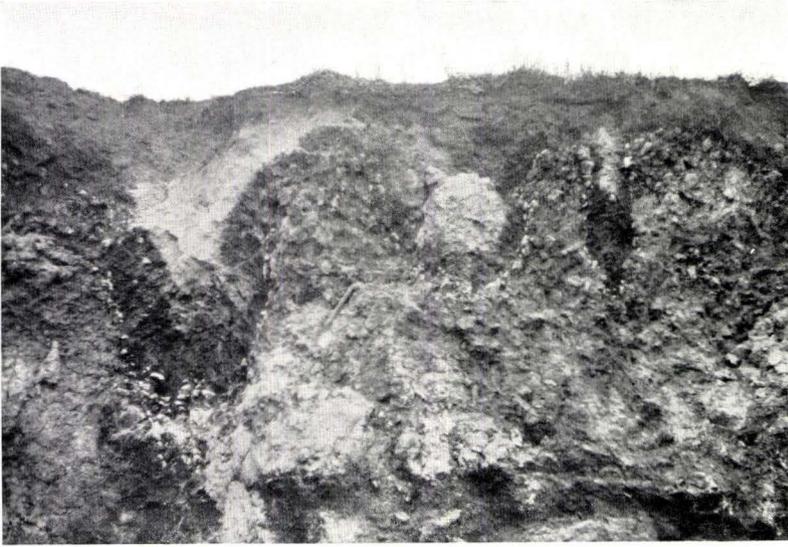
Manuskript eingegangen am 18. 11. 1954

Adresse des Autors: Dipl.-Geologe Dr. ERWIN SCHENK  
 Geologe beim Hessischen Landesamt für Bodenforschung, Gießen, Professorenweg 6  
 Für die Redaktion verantwortlich: Dipl.-Geol. Dr. FRITZ KUTSCHER, Regierungsgeologe  
 beim Hessischen Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden, Mainzer Straße 25.

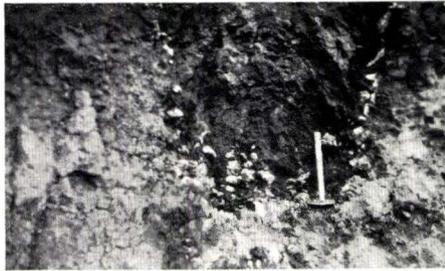
**Tafel 1**

## Tafel 1

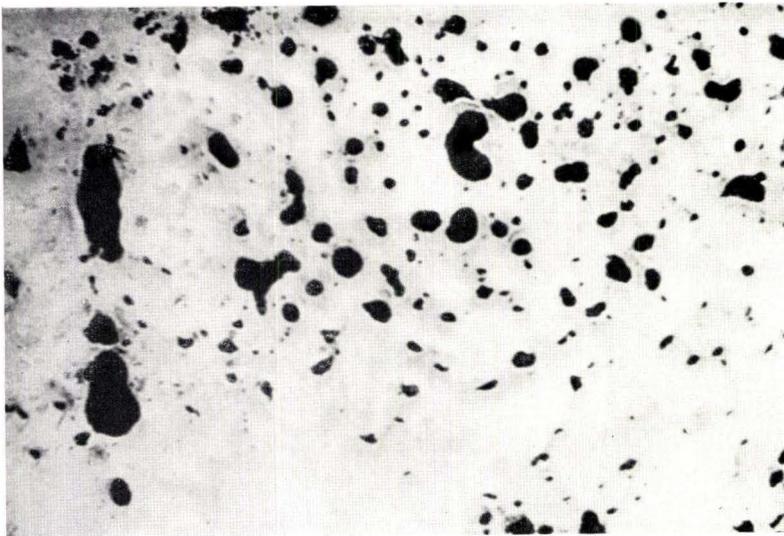
- Fig. 1 Steinbruch bei Parschimiechy. Tertiäre Schuttdecke über Jurakalken. Drei nebeneinanderliegende, verschiedene Schnitte durch Polygonstrukturen. Links und auch über der tertiären Schuttpackung zwischen den Kesseln ist deutlich ein Steinpflaster über einer feinerdereichen Schicht von etwa 30 cm Mächtigkeit zu erkennen. Die inhomogene Schuttpackung ist gegen die radialstrahlig und schalig struierten Feinerdekerne durch ein Steinpflaster bzw. eine Steinkachelung abgegrenzt. Das helle Innere besteht aus jüngeren pleistozänen Decksand. Deutlich hebt sich auf den Schuttwänden zwischen den Strukturen die aussortierte Steinpackung als Krone ab, darunter eine relativ steinarmer feinerdereiche Schicht und darunter der inhomogene Verwitterungsschutt. Steinhauwerk am Grunde des Kessels. Gebankte Kalke über dem unteren Rand des Bildes rechts.  
Aufn. v. Verf.
- Fig. 2 Schalige Struktur der Feinerde und Steinbelag an der Wandung des Strukturkessels.  
Aufn. v. Verf.
- Fig. 3 Kryokonitlöcher im Gletschereis südlich des Grahuk-Berges, Andréeland. Durch die größere Wärmeaufnahme des auf dem Gletscher abgelagerten Staubes haben sich Krümel in das Eis eingesenkt. Durch das Fließen der dünnen Schmelzwasserschicht auf dem Eise werden die Krümel, die im Wasser äußerst locker zusammengeballt sind, in den Löchern strudelnd bewegt. Dadurch werden die Löcher erweitert, wobei einzelne sogar zusammenwachsen. Beim Gefrieren werden die Krümel aus den Löchern herausgehoben und auf dünne Eisnadeln gestellt.  
Aufn. v. Verf.



1



2



3

**Tafel 2**

## Tafel 2

Fig. 1 Steinnetzpolygone im Andréeland an der Widebay (Spitzbergen).

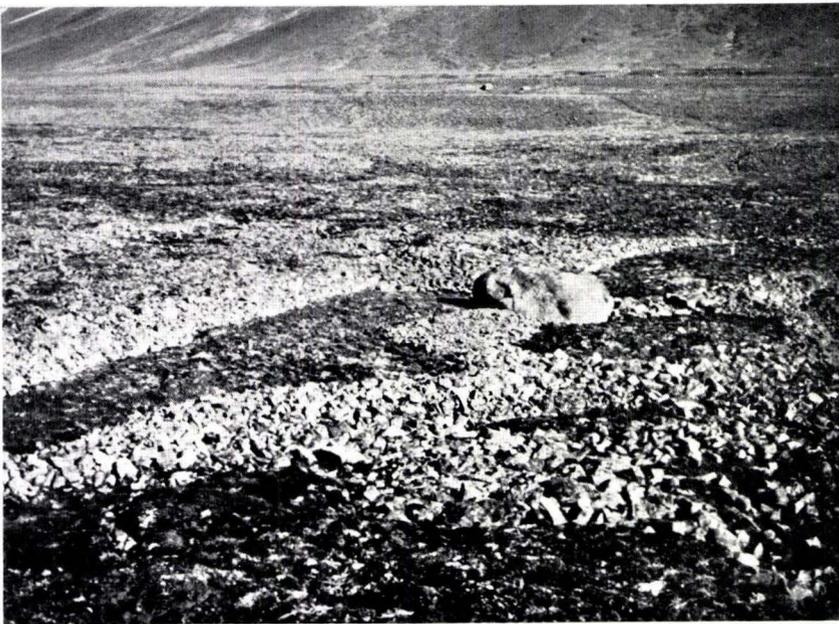
Aufn. v. Verf.

Fig. 2 Übergangstyp zwischen Ring- und Streifenstruktur infolge der Solifluktion auf einer schwach geneigten Terrassenfläche, Wydebay, südlich Andréedalen.

Aufn. v. Verf.



1



2

**Tafel 3**

### Tafel 3

Fig. 1 Polyedrische, zellige Zerlegung eines Feinerdedurchbruches infolge der Aufwölbung und Schrumpfung der Kruste. Die randlich gelegenen Zellen haben ebene Oberflächen, während die zentralen Teile eine eigene Wölbung haben, die zurückzuführen ist – wie im Bilde erkennbar – auf die Kantenabnutzung durch Wind und Wasser usw. Auf der Blockterrasse an der Vogelbucht, Spitzbergen.

Aufn. v. Verf.

Fig. 2 Plötzlich gebildete, große Feinerdehügel mit polyedrisch zerlegter Oberschicht am Rande eines Talsees an der Wide-Bay kurz nach Einbruch der Frostperiode. In Bildmitte (dunkle Linie im Aufbruch des Hügels) ist deutlich die Mächtigkeit und Wölbung der gefrorenen Schicht zu erkennen. Ende August, Seetal im Andréeland, Spitzbergen.

Aufn. v. Verf.



1



2

**Tafel 5**

## Tafel 5

- Fig. 1 Im zentralen Teil zusammengesunkene Feinerdehügel auf dem Vorland von Grahuk, Spitzbergen. Randlich ist noch deutlich die Stärke der Wölbung zu erkennen. Aufn. v. Verf.
- Fig. 2 Ganz zusammengesunkene Feinerdedurchbrüche bilden Dellen in der steinigen Bodenfläche, so daß oft die Steinhügel in den Vordergrund treten. Das Zusammensinken der Feinerdesuspension ist so stark, daß oft die Steine von den Rändern zurückgleiten und die Feinerde wieder locker bedecken. Steinhügel, Steinrosetten und Steingirlanden beherrschen dann scheinbar das aktive Strukturfeld im Sommer. Aufn. v. Verf.



1



2

**Tafel 6**

## Tafel 6

- Fig. 1 Typisches Bild eines aktiven Strukturbodenfeldes im Sommer. Die Feinerdeaufbrüche und -aufwölbungen des Winters sind zusammengesunken und im Steinpflaster der ausgetrockneten Schmelzwasserwanne auf dem Vorland von Grahuk eingesenkt. Andréland, Lifde-Bay (vgl. auch Tafel 8, Fig. 2). Aufn. v. Verf.
- Fig. 2 Träge Dauerformen der Feinerdedurchbrüche auf der Hochfläche des Grahuk-Berges. Die Steinwälle und auch die zentrale Feinerdeaufwölbung überragen das allgemeine Bodenniveau, wie die Neuschneedecke (im Juli) zu erkennen gibt. Die Feinerdehügel liegen etwas tiefer als die Oberkante des Steinwalles und sind nur schwach gewölbt. Wahrscheinlich sind es alt angelegte Formen, deren Aktivität durch Grundwassermangel beträchtlich nachgelassen hat. Aufn. v. Verf.



1

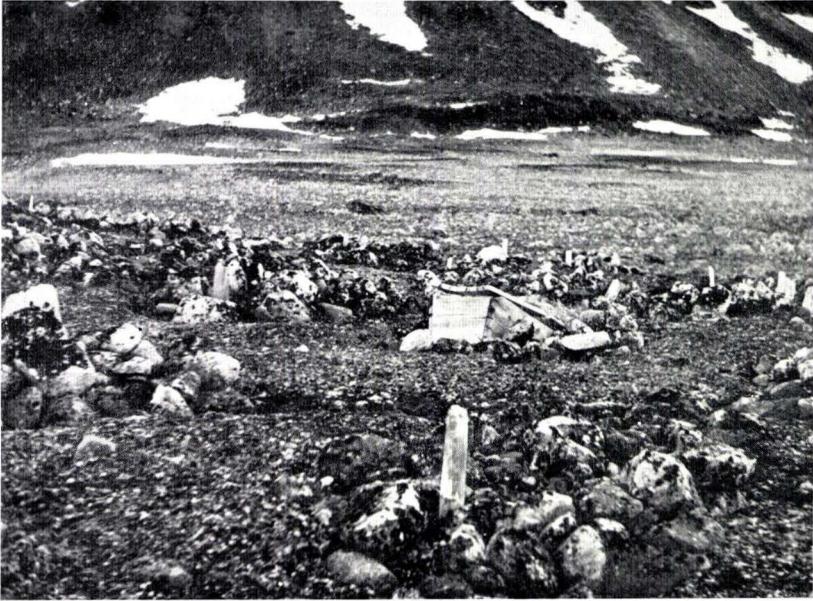


2

**Tafel 7**

## Tafel 7

- Fig. 1 Durch Frosteinwirkung aus dem Boden gehobener Sarg, der vor etwa 200 Jahren eingebettet worden ist, auf dem Vorland zwischen Vogelbucht und Smerenburgsund, Spitzbergen. Aufn. v. Verf.
- Fig. 2 Steinnetzstrukturen. Anreicherung und Steilstellung von Steinen in den durch Spalten gekennzeichneten Randzonen zusammengesunkener Feinerdepolygone; Wood-Bay, Spitzbergen. Aufn. v. Verf.



1



2

**Tafel 8**

## Tafel 8

Fig. 1 Bültenfeld an einem Talausgang an der Wide-Bay etwa 10 km südlich von Kap Grahuk, Spitzbergen. Die wasserreiche Feinerde hebt und wölbt sich durch den Frost. Während sie beim Tauen wieder zusammensackt, bleiben die Wurzelfilze und Pflanzenpolster zurück, d. h. sie überragen ihre Umgebung.

Aufn. v. Verf.

Fig. 2 Palse in Nordschweden, in der Mitte etwa 7 m hoch; nach STECHE 1933, aus Fries u. Bergström:  
Nagra jaktagelser öfver palsar och derast före komst; nordligste Sverige.



1



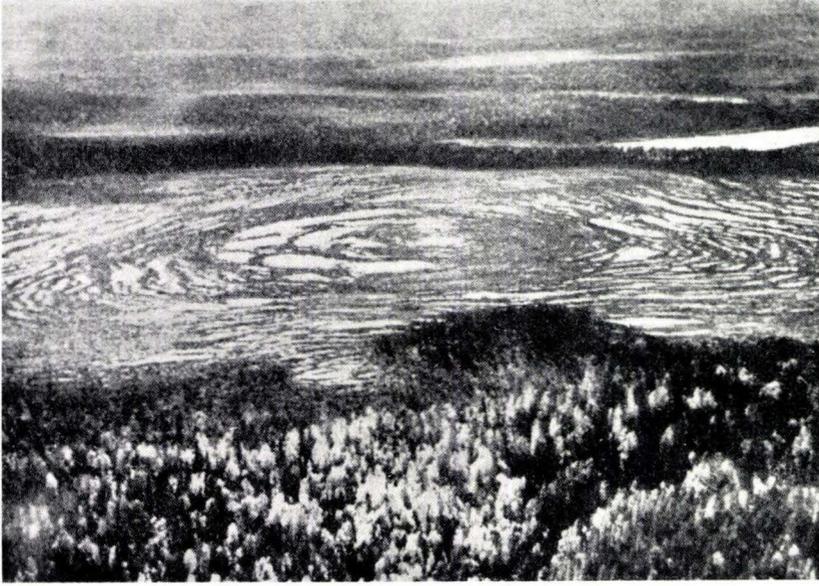
2

**Tafel 9**

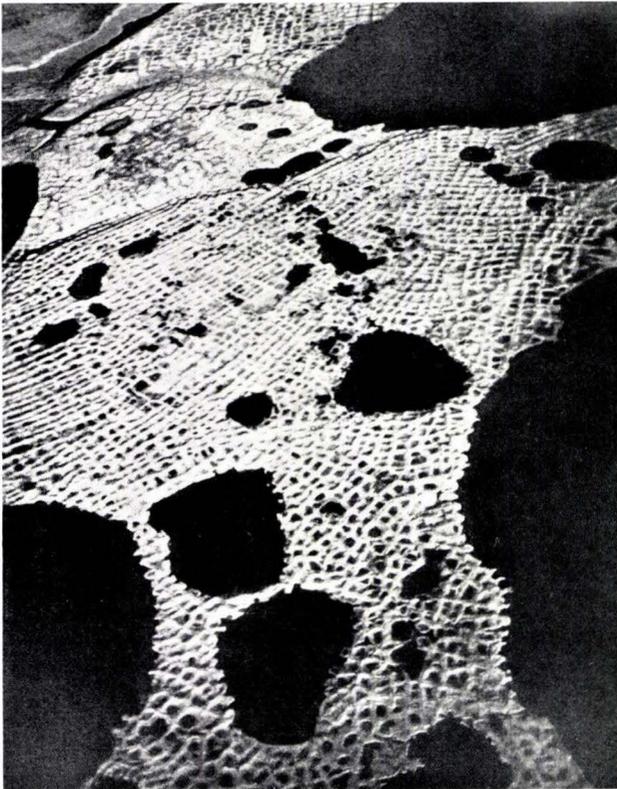
## Tafel 9

Fig. 1 Ringmoor; Aufnahme Arktisflug des „Graf Zeppelin“, aus TROLL (1944).

Fig. 2 Taimyrpolygone auf der Taimyrhalbinsel. Aufnahme beim Arktisflug des „Graf Zeppelin“, nach WEICKMANN (1932).



1



2

**Tafel 10**

## Tafel 10

Das Nordende des Andréelandes mit dem Grahuk-Berg (ganz links) zwischen Wide-Bay (oben) und Lifde-Bay (Vordergrund). Im Hintergrunde vorne die Halbinsel Ostfriesland, ganz im Hintergrunde oben links die Insel Nordostland.

Das Gebirgsmassiv des Andréelandes ist unmittelbar umrahmt von Schutthalden und Blockschutterrassen. Daran schließt sich ein bis über 1 km breites Vorland, die „strandflat“. Morphologisch ist das Vorland gegliedert durch zahlreiche Stufen von Strandwällen – im Bilde deutlich zu erkennen – Felsrippen, flache zum Teil verlandete Schmelzwasserseen und ganz jung eingeschnittenen Fluß- und Bachrinnen. Die Mündungen der breiten Gletschertäler sind ausgefüllt mit Schutt und Schlamm. Vor den Gletschern heben sich Endmoränenwälle ab, die den Rückzug des Eises kennzeichnen. Der runde Fleck auf dem vorderen Gletscher stellt einen Aufeshügel dar, der von einer stark strudelnden Quelle (schwarzer Mittelpunkt) gebildet ist.

Luftbild aus 3000 m Höhe.

Aufn. von Norger Svalbard og Ishavs Undersøkelse.



