Beiträge zur Geologie der Schweiz - Geotechnische Serie - Hydrologie
5. Lieferung

Herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission
Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft

Beitrag zu einer Gefügeanalyse des Schnees

Von H. P. Eugster

Kommissionsverlag Kümmerly & Frey, Bern — 1952
Druck von Aschmann & Scheller AG., Buchdruckerei zur Froschau, Zürich

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

An der Sitzung vom Dezember 1950 lag der Kommission ein Manuskript von Dr. H. P. Eugster «Beitrag zu einer Gefügeanalyse des Schnees» vor. Die Arbeit wurde vom Autor im Zusammenhang mit seiner Tätigkeit 1948/49 am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Weißfluhjoch-Davos durchgeführt. Die Kommission beschloß ihre Aufnahme in der Serie «Hydrologie», als weitern wertvollen Beitrag zur Erforschung der mit Lieferung 3 dieser Serie begonnenen Untersuchungen der winterlichen Schneedecke.

Die Kommission dankt dem Autor bestens für seine große Arbeit. Sie dankt ferner dem jetzigen Leiter des Institutes, Herrn Dr. M. de Quervain, für seine Unterstützung der Herausgabe. Die Eidg. Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei, welcher das Institut angeschlossen ist, leistete einen Beitrag an die Druckkosten. Herrn Oberforstinspektor A. J. Schlatter sei für sein Interesse und seine Bemühungen bestens gedankt.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Verfasser allein verantwortlich.

Zürich, Februar 1952.

Für die Schweizerische Geotechnische Kommission:
Der Präsident: *Prof. Dr. F. de Quervain.*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort IV

I. Zur Einführung 1

1. Problemstellung 1
2. Der Begriff «Metamorphose» 2
3. Wahl des Weges 3

II. Untersuchungen am Einzelkorn (insbesondere hochmetamorpher Schneearten) 4

1. Methodisches 4
2. Klassifikation der Kornformen 5
3. Kornformänderungen während eines Winters 13
4. Die genetische Bedeutung der Kornform 15
5. Abbau durch Schmelzwasser 26

III. Phänomenologie des Gefüges 27

1. Ueber die Beziehungen Einzelkorn—Gefüge während der Metamorphose . 27
2. Struktur und Textur hochmetamorpher Schneearten 28
3. Die wichtigsten Gefügetypen und ihre Beziehungen zur Metamorphose . 32

IV. Analytische Behandlung des Gefüges 36

1. Ziel und Zweck 36
2. Das Prinzip der Gefügeanalyse 37
3. Meßresultate und die Beziehungen der Gefügewerte untereinander . . 38
4. Kritische Betrachtungen 51
5. Die Beziehungen zwischen Gefügewerten und Metamorphose, sowie Gefügewerten und mechanischen Eigenschaften 57
6. Kornwachstum und Aggregation 62
7. Schlußfolgerungen 62

V. Zusammenfassung 63

Literaturverzeichnis 64

Vorwort

Die in diesem Beitrag niedergelegten Untersuchungen bilden einen Ausschnitt aus den kristallographischen Arbeiten des Winters 1948/49 am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Weißfluhjoch/Davos), Arbeiten, die sich vor allem mit der stofflichen Charakterisierung des Materials Schnee befaßten. Es sind die ersten und noch sehr vorläufigen Ergebnisse einer eingehenderen Strukturanalyse.

Die Arbeiten wurden in jeder nur möglichen Weise gefördert durch die Eidg. Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei in Bern. Dann fühle ich mich vor allem auch zu Dank verpflichtet meinem sehr verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. P. Niggli, sowie dem Präsidenten der Schweizerischen Geotechnischen Kommission, Herrn Prof. Dr. F. de Quervain, für ihre liebenswürdige und tatkräftige Unterstützung.

Manche der Anschauungen erhielten ihr heutiges Gesicht in den zahlreichen Diskussionen mit den Mitarbeitern des Institutes auf Weißfluhjoch, vor allem den Herren Dr. Th. Zingg, Ing. A. Roch und Ing. H. In der Gand, die mir teilweise auch eigene Beobachtung zur Benützung überließen. Ihnen möchte ich ganz besonders danken. Herrn Dr. M. de Quervain danke ich vielmals für seine Durchsicht des Manuskriptes.

Wenn ich diese Arbeiten, im Bewußtsein ihrer Mängel und der Vorläufigkeit ihrer Ergebnisse dennoch aus der Hand gebe, dann geschieht es nur in der Hoffnung, daß sie wenigstens in einem kleinen Teilbezirk des Problems Schnee als Anregung dienen mögen.

Zürich, im Januar 1951.

I. Zur Einführung.

1. Problemstellung.

Jede Frage, die sich irgendwie mit dem Material Schnee befaßt, deckt früher oder später notwendigerweise Beziehungen zur Metamorphose des Schnees auf. Wohl keinem anderen Problemkreis kommt zentralere und grundsätzlichere Bedeutung zu, da die stofflichen Besonderheiten nur aus dem Wesen der Gefügeänderungen heraus verstanden und erfaßt werden können. In den Gefügeänderungen aber manifestiert sich die Gesamtheit jener Prozesse, welche die Metamorphose des Schnees bewirken. Darum wird eine Gefügeanalyse für dieses Material zwangsläufig zu einer Analyse der Metamorphose.

So wie sich Richtung und Intensität der Metamorphose in der Aenderung des physikalischen Zustandes und damit der struktur- und texturabhängigen Materialkonstanten verfolgen lassen, können sie auch — unmittelbarer und der Naturbeobachtung leichter zugänglich — an den Veränderungen des Gerüstes selbst abgelesen werden. Ansätze zu dieser Betrachtungsweise — die mehr dem mineralogisch-petrographischen Denken entspricht als dem physikalischen — sind bereits vorhanden. Es soll als Aufgabe dieser Studie gelten, sie in bestimmter Richtung etwas zu erweitern.

Daß die Diskussion um Gefüge und Metamorphose des Schnees erst am Anfang steht und sich noch mit grundsätzlichen Schwierigkeiten auseinandersetzen muß, wird wohl kaum zu bezweifeln sein, nicht weniger auch, daß aus diesem Grunde jeder Arbeit über dieses Thema rein vorläufige Bedeutung beizumessen ist. Wenn man zudem bedenkt, daß sich die Untersuchungen auf einen einzigen Winter erstrecken, dann wird man begreifen, wieso eher Fragen angeschnitten als gelöst wurden. Damit sollen die auftretenden Mängel weniger entschuldigt als vielmehr erklärt werden. Auf eine Veröffentlichung glaubte der Verfasser trotzdem nicht verzichten zu sollen, weil es ihm einerseits in der nächsten Zeit nicht möglich ist, weiteres Material zu sammeln, und weil er anderseits hofft, daß den Ausführungen wenigstens in methodischer Hinsicht einige Bedeutung zukommt. Immerhin bittet er, bei der Beurteilung die besonderen Schwierigkeiten zu berücksichtigen.

Die Untersuchungen beschäftigen sich vor allem mit Problemen der Struktur; Texturfragen wurden nur dort aufgeworfen, wo sie sich für die Interpretationen als unerläßlich erwiesen; denn gerade für Lockerstrukturen erhalten Studien zur Gefügeregelung erst dann ihren vollen Sinn, wenn die Eigenschaften des Einzelkornes (nach Größe, Form und Bindungsweise) bekannt sind. Nicht nur die Gefügeregelung, sondern auch die Charakterisierung des Porenhohlraumes (mittlere Porenradien und Kanallängen, Oberflächenentwicklung usw.) mußte vernachlässigt werden, um wenigstens die Strukturanalyse etwas vertiefen zu können. Dies durfte um so mehr geschehen, als für beide Teilgebiete der Textur die Methoden aus der Petrographie bzw. der Kolloidchemie ohne weiteres übernommen werden können.[1])

Es gilt nun zunächst, die Anwendung des Begriffs Metamorphose auf den Schnee nochmals näher zu umschreiben, um begrifflichen Unklarheiten vorzubeugen. Dann wird sich, nach einem kurzen historischen Ueberblick, die Möglichkeit geben, das weitere Vorgehen zu erläutern.

---

[1]) Ueber die entsprechenden Probleme bei Eis siehe z. B. die Arbeiten von H. W. Ahlmann und E. G. Droeßler (1949), H. Bader (1951), G. P. Rigsby (1951), G. Seligman (1949 und 1950) u. a.

2. Der Begriff „Metamorphose".

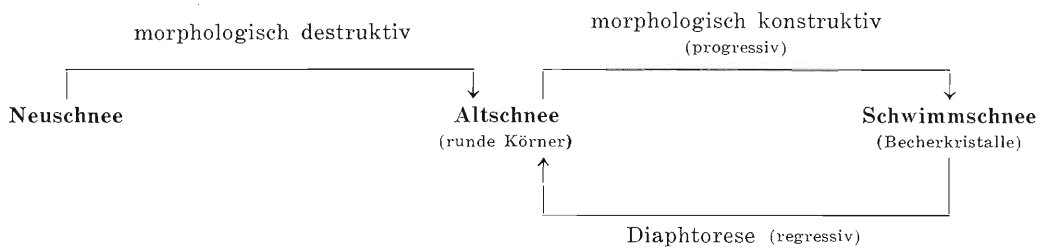
Es besteht kein Zweifel, daß der Begriff «Metamorphose», der von *Niggli* in die Schneeforschung eingeführt wurde (1939), dem petrographischen Gebrauch entstammt und daß deshalb auch für die Uebertragung dieser Begriffsinhalt maßgebend sein muß. Modifizierungen ergeben sich aus den Unterschieden im Gegenstand, die vor allem in den chemischen Verhältnissen begründet sind. Während in der Petrologie sehr häufig die Bildung neuer Mineralarten zum Begriff Metamorphose gehört (abgesehen z. B. von Marmorisierung und Quarzitbildung), geht diese Möglichkeit dem Schnee ab, so daß hier als Vorgang nur Umkristallisation, die Kristalloblastese, in Frage kommt. Die Metamorphose umschließt damit alle jene Prozesse innerhalb der ruhenden Schneedecke, die mit einer Substanzumlagerung, mit einer Stoffverschiebung von Korn zu Korn und von Schicht zu Schicht verknüpft sind.

Man erhält so jenen umfassenden Inhalt, der wünschenswert ist, da ja Metamorphose an sich nicht mehr und nicht weniger bedeutet als kontinuierliche Aenderung im Gesamtcharakter des betrachteten Raumteiles in beliebiger Weise, Richtung und Geschwindigkeit. Beschränkung auf einen einzelnen, scharf definierbaren Prozeß ist auch deshalb unzweckmäßig, weil solche Prozesse nur in der Abstraktion aus dem komplexen Ablauf herausgelöst werden können. Sie *müssen* einzeln herausgeschält werden zum Studium der Entwicklungstendenzen und der treibenden Kräfte; doch darf nie vergessen werden, daß sie ihre reale Bedeutung erst durch das Zusammenspiel erhalten und deshalb kaum als Definitionsbasis taugen.

So aufgefaßt gehören nicht nur die Umkristallisationen über die Dampfphase, sondern auch die Materialverschiebungen durch Schmelzwasser zur Metamorphose (siehe *Bader* 1939), da beim Wiedergefrieren eines Wasserfilmes neue und äquivalente Gefügebilder entstehen. Als Sonderfall kann naturgemäß von einer Metamorphose im trockenen Zustand gesprochen werden, wie sie für den Hochwinter der kälteren Gegenden typisch ist (Sublimationsmetamorphose nach Bader), sowie von einer Metamorphose unter Beteiligung von Schmelzwasser (Schmelzmetamorphose nach Bader), wie sie jeden Schneedeckenabbau oder auch den Vorgang der Verfirnung kennzeichnet.

Die reine Sublimationsmetamorphose läßt sich je nach Anfangs- und Endglied in drei Teiläste gliedern, wobei jeder Ast unter ganz bestimmten Bedingungen durchlaufen wird. Die wichtigsten Arten des Trockenschnees — Neuschnee, Altschnee (mit runden Körnern) und Schwimmschnee (mit Becherkristallen) — werden folgendermaßen miteinander verknüpft: Die morphologisch *destruktive* Metamorphose führt vom Neuschnee zum Altschnee, die morphologisch *konstruktive* Metamorphose (progressiver Ast) vom Altschnee zum Schwimmschnee und die *Diaphtorese* (regressiver Ast) vom Schwimmschnee zum Altschnee. Die Bedeutung der einzelnen Aeste wird später noch genauer zu kennzeichnen sein (siehe Seite 15 ff.).

Reine Sublimationsmetamorphose (schematisch):



Die morphologisch destruktive Metamorphose, die verknüpft ist mit der Setzung der Schneedecke, beruht vor allem auf Substanzverschiebungen am selben Korn (z. B. Schneestern → isometrisches Korn). Dabei wird die Zahl der ursprünglich vorhandenen Körner kaum wesentlich verändert; während der morphologisch konstruktiven Metamorphose und der Diaphtorese hingegen finden beträchtliche Substanzverschiebungen von Korn zu Korn statt, welche für den morphologisch konstruktiven Ast zu einem Idiomorphiegewinn, für die Diaphtorese aber zu einem Idiomorphieverlust führen. Während der Umkristallisation Altschnee → Schwimmschnee, die in den betreffenden Schichten kaum mehr mit einer Setzung verbunden ist, wird die Zahl der vorhandenen Körner stark erniedrigt.

Die Umkristallisation bewirkt für eine einzelne Schicht Substanzverlust oder -gewinn. Deshalb sollte konsequenterweise — wenn man die ganze Schneedecke als Einheit betrachtet — auch Verdunstung an der Schneeoberfläche und Schmelzwasserabfluß zur Metamorphose gezählt werden. Man hätte dann, nach diesem neuen Einteilungsprinzip, neben einer Metamorphose im geschlossenen System eine solche mit Stoffzufuhr (Kondensation, ohne Neuschneezuwachs) und Stoffwegfuhr (Verdunstung und Schmelzwasserabfluß) zu unterscheiden.

3. Wahl des Weges.

Da für diese Arbeit die Metamorphose des Schnees im Vordergrund steht, ist es wohl sinnvoll, zunächst einen Ueberblick über das zu geben, was zu diesem Gegenstand bereits veröffentlicht wurde. Wir halten uns dabei nur an systematische Untersuchungen und nicht an Einzelbeobachtungen, wie sie z. B. von Polarexpeditionen zahlreich vorliegen (vgl. auch das ausführliche Literaturverzeichnis bei *Bucher* 1948). Eigentliche Studien über das Wesen der Schneemetamorphose findet man vor allem bei drei Autoren (neben zahlreichen anderen Arbeiten, in welchen diese Fragen nur gestreift werden): *W. Paulcke* (1938), *G. Seligman* (1936) und *H. Bader* (1939).

W. Paulcke gibt in seinem Buch «Praktische Schnee- und Lawinenkunde» (1938) bereits einen guten Ueberblick über die wichtigsten Formen der Reifkristalle (Oberflächen-, Tiefen- und Höhlenreif) und weist auf den Verlauf der Verfirnung hin (Metamorphose unter Schmelzwasserbeteiligung). *G. Seligman* («Snow structure and ski fields», 1936) teilt ebenfalls sehr wertvolle Beobachtungen über die Reifformen mit und vertritt bereits eine weitgehend richtige Theorie des Umkristallisationsvorganges, d. h. die Genesis des Tiefenreifs (Seite 69). Auf die Probleme der Verfirnung, die er ebenfalls recht ausführlich behandelt, sei hier nicht weiter eingetreten, da sie in einer großen Zahl glaziologischer Arbeiten bereits dargestellt worden sind.

Im Gegensatz zu den beiden genannten Autoren hat *H. Bader* (1939) das Hauptgewicht auf die Veränderungen des Neuschneekristalles nach der Ablagerung gelegt, d. h. vor allem auf die Entwicklung vom Schneestern zum runden Korn. Durch Naturbeobachtungen und die entsprechenden Experimente wurde damit dieser Ast der Metamorphose (morphologisch destruktive Metamorphose) recht gut bekannt. Es schien deshalb angezeigt, auf die gewissermaßen gegensätzliche Tendenz näher einzutreten, d. h. die Fragen um die Schwimmschneebildung erneut aufzuwerfen (morphologisch konstruktive Metamorphose), da von diesen Vorgängen nicht viel mehr als Ursache und Endprodukt bekannt waren. Genauerer Ablauf und Zwischenstadien ließen sich am ehesten aus Beobachtungen an natürlichen Schneeprofilen gewinnen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen — vom Standpunkt des Einkristalles aus — sind im 2. Kapitel niedergelegt.

Dabei ergab sich, daß die parallel verlaufenden Gefügeänderungen bereits makro-

skopisch wahrnehmbar sind und daß deshalb schon die phänomenologische Betrachtungsweise wertvolle Aufschlüsse zu liefern vermag. Im 3. Kapitel sind Grundlagen und erste Anwendungen hierzu wiedergegeben.

Der letzte Teil endlich enthält im Anschluß daran den Versuch einer analytischen Behandlung des Gefüges, der allerdings auf Grund etwas verschiedener Ueberlegungen unternommen wurde. Nachdem durch die Arbeiten von *R. Häfeli* (1939) und *E. Bucher* (1948) die wichtigsten Grundzüge der Schneemechanik festgelegt waren, entstand ein ausgesprochenes Bedürfnis nach einer Korrelation mit den kristallographischen Methoden. Extrem formuliert heißt das: Man sollte in der Lage sein, aus der genauen kristallographischen Charakterisierung einer Schneeart ihr mechanisches Verhalten zu extrapolieren. Es liegt auf der Hand, daß die üblichen Messungen, die einer ersten Kennzeichnung dienen, für diese Zwecke zu grob sind, da sie über ganze Eigenschaftsgruppen integrieren (z. B. γs, d usw.). Vor allem aber wurde dabei das Gefüge noch nicht quantitativ gefaßt. Um diese Lücke zu schließen, mußte erst eine Methode ausgearbeitet werden, die dann an einigen Anwendungsbeispielen zugleich geprüft werden konnte. In Verbindung damit war es möglich, der Metamorphose auch von dieser Seite her näherzutreten, da sich ja beim Schnee eine umfassende Gefügeanalyse mit einer Analyse der Metamorphose deckt.

Für den Endeffekt ist es gleichgültig, ob man vom Begriff der Metamorphose oder des Gefüges ausgeht, d. h. mehr vom dynamischen oder mehr vom statischen Standpunkt, da beide so eng miteinander verknüpft sind wie Ursache und Wirkung. Die Gefügeanalyse gibt die Möglichkeit, einen Momentanzustand beliebig genau festzuhalten und ist damit unerläßlich bei der Untersuchung komplexer Entwicklungstendenzen, wie sie das Wesen der Metamorphose ausmachen.

II. Untersuchungen am Einzelkorn

(insbesondere hochmetamorpher Schneearten).

1. Methodisches.

Ausgehend von der Ueberlegung, daß die Gestalt eines Kristalles gesetzmäßig verknüpft ist mit seiner Vorgeschichte und dem momentanen Zustand (vgl. z. B. *Tertsch* 1926), schien es angezeigt, die Morphologie des Einkristalles mit den zur Verfügung stehenden Mitteln möglichst genau zu erfassen und damit die Veränderungen in ihrer gesetzmäßigen Beziehung zur Schneedeckenentwicklung festzuhalten. Es galt zunächst, ähnlich wie es von Nakaya und seinen Mitarbeitern (1943) für den fallenden Schnee in mustergültiger Weise vorgenommen wurde, eine detaillierte Klassifikation der Kornformen aufzustellen, wobei allerdings, da die Entstehung der Tiefenreifbecher im Vordergrund stand, die Abbaustadien der Neuschneekristalle, die *Bader* eingehend studierte, unberücksichtigt blieben. Diese Gliederung konnte sich nur auf Binokularbeobachtungen und nicht auf Trachtmessungen am Goniometer stützen, da einerseits solche Messungen beim Umfang der hier notwendigen Statistiken (um lokale Unterschiede auszumerzen usw.) viel zu zeitraubend wären und weil anderseits die Ausbildung der Flächen sehr oft viel zu wünschen übrigläßt. Zudem muß rasch gearbeitet werden, da bei so schmelzpunktnahen Temperaturen sehr bald Veränderungen am Material eintreten.

Die hier vorgelegte Klassifikation der Kornformen wurde während eines schneearmen Winters mit sehr starker Umkristallisation (1948/49) aufgestellt und bei den

Profilgrabungen laufend geprüft und verbessert, wobei die Gliederung soweit verfeinert wurde, als es die Beobachtungen erlaubten. Zu diesem Zwecke eignet sich das Binokular weit besser als das Mikroskop, weil nur durch Drehen der Kristalle, wenn die einzelnen Flächen nach und nach aufleuchten, der richtige räumliche Eindruck erhalten wird. Die Untergruppen sind nicht quantitativ, sondern gestalthaft gleichwertig. Die Formen, die bereits von *Paulcke* und *Seligman* beschrieben wurden (loc. cit. z. B. basale Becher und Vollprismen), lassen sich ohne weiteres einbeziehen und geben eine wertvolle Ergänzung (vgl. die betr. Photos).

2. Klassifikation der Kornformen.

Die Kristallklasse des Eises bzw. der verschiedenen Eismodifikationen ist noch nicht sicher bekannt. In der Literatur besteht vor allem eine Alternative zwischen hemimorphen und holoedrischen Formen. Der Beitrag, den die Morphologie zu dieser Frage liefern kann, wurde bereits von *Steinmetz* diskutiert (1941). Er schreibt:

«Die morphologischen Hemimorphieerscheinungen des Eises ... sind nun aber alle aus den besonderen Bildungsumständen, der Sublimation, abzuleiten, nicht aber auf eine echte Hemimorphie zurückzuführen.» Und: «Für die Hemimorphie des Eises liegt auch nicht ein aus der Morphologie abzuleitender stichhaltiger Nachweis vor, ...» Allerdings läßt er die Frage, ob trigonale oder hexagonale Holoedrie (bzw. ob zwei Modifikationen) offen.

Die Diagnose der einzelnen Formen, hier immer unter Annahme unpolarer *c*-Achse, wird oft stark erschwert durch Verzerrungen, Verwachsungen und die sehr lückenhafte Ausbildung. Die flächenreichsten Kombinationen findet man charakteristischerweise nicht bei den hochmetamorphen Hohlformen (Bodenschichten), sondern bei den isometrischen Vollformen der mittleren Horizonte.

Sicher beobachtet wurden die Formen:

Basispinakoid $\{0001\}$, hexagonales Prisma $\{10\bar{1}0\}$ und verschiedene hexagonale Dipyramiden $\{h0\bar{h}l\}$, wobei durch Projektion $\{10\bar{1}1\}$ mit 62° 05′ und $\{10\bar{1}2\}$ mit 43° 20′ nachgewiesen wurden.

Vermutet wurden an einzelnen Körnern die Formen:

Rhomboeder $\{h0\bar{h}l\}$, dihexagonales Prisma $\{hk\bar{i}0\}$ und dihexagonale Dipyramide $\{hk\bar{i}l\}$. Für eine nichtholoedrische Klasse könnten das dihexagonale Prisma und die dihexagonale Dipyramide (ohne Kenntnis der Winkel) als Kombination von hexagonalem Prisma bzw. hexagonaler Dipyramide I. und II. Stellung aufgefaßt werden. Rhomboeder fand *Nakaya* auch bei künstlich gezüchteten Kristallen.

Viel wichtiger als die Tracht, die im großen ganzen recht konstant bleibt, ist für die Gliederung jedoch der Habitus, der große und gesetzmäßige Vielfalt zeigt. Die Basis besitzt, im Gegensatz zu Neuschnee und Oberflächenreif, flächenmäßig nicht mehr so große Bedeutung, da isometrische bis kurzprismatische und dicktafelige Formen vorwiegen. Dünntafelig-blättrige und langprismatisch-nadelige Typen fehlen fast ganz.

Für das Einteilungsprinzip sind zwei Kriterien von besonderer Bedeutung. Das eine führt zur Unterscheidung Hohlform — Vollform, das andere zur Trennung in vollständige (bzw. ebenflächige) und Teilformen. Zu den Hohlformen zählen wir Körner mit becher- bis schüsselförmiger Gestalt, gleichviel ob der konkave Teil des Kornes treppenförmig (d. h. durch Ebenen gestuft) oder unregelmäßig gekrümmt ist. Die Bezeichnung «hohl» bezieht sich also nicht auf einen allseits von Materie umschlossenen Hohlraum; vollständig nennen wir die Hohlform, wenn sie ihren Bauplan ganz verwirklichen konnte (allseitig, im Gegensatz zu den Teilformen). Geben bei einem

Korn die Begrenzungselemente (Ebenen und gekrümmte Flächen) nirgends zu gestaltbestimmenden konkaven Bildungen Anlaß, dann wollen wir es eine Vollform nennen, wobei wir drei Arten unterscheiden: a) Körner, die nur von Ebenen begrenzt werden (ebenflächige Vollformen), b) Körner, die von ebenen und gekrümmten Flächen zugleich begrenzt werden (Teilformen), c) allseits runde Körner.

A. DIE HOHLFORMEN.

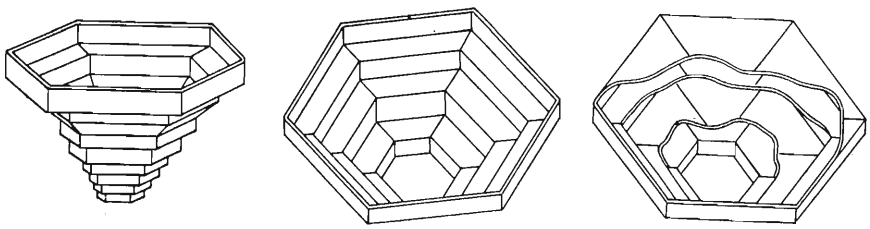
(Fig. 1—7, Photos Tafeln II und III.)

1. Allseitig ausgebildete Formen.

Hierher gehören alle jene Becherkristalle, deren Becherrand (meist jener Ort, wo die Prismenflächen die größte Zentraldistanz haben) den treppenförmigen Hohlraum allseitig umschließt. Als vollständig ausgebildet müssen auch die Becher bezeichnet werden, bei welchen die Prismenflächen im Schnitt senkrecht *c* nicht ein geschlossenes Sechseck bilden, sondern wo eine der Prismenflächen sich gewissermaßen einrollt, so daß einzelne Flächenlagen des Prismas am selben Kristall mehrmals auftreten, nur mit verschiedener Zentraldistanz (Fig. 12a). Wir setzen deshalb als Bedingung, daß minimal fünf Prismenflächen vorhanden sein müssen, damit eine Hohlform als allseitig ausgebildet bezeichnet werden kann.

Betrachtet man den Becherrand (im Schnitt senkrecht zur Hohlraumachse), so drängt sich eine weitere Teilung auf: Bei sechsseitigem Rand (Hohlraumachse ≡ Hexagyre) nennen wir den Becher basal, bei vierseitigem Rand (Hohlraumachse: eine der drei flächennormalen Digyren) prismatisch. Becher, die sowohl in Richtung der Hexagyre wie auch in einer der drei flächennormalen Digyren einen treppenförmigen Hohlraum aufweisen, nennen wir kombiniert. Grenzformen sind die Hohlprismen.

a) Basale Becher (Fig. 1 und 2, Photos Tafel II).



a b c

Fig. 1: Basale Becher.
a) Stufung gebildet durch Basis, Prisma und Pyramide.
b) Stufung gebildet durch Basis und Prisma.
c) Becher mit Zwischenbasisflächen.

Der Hohlraum, der die Eigensymmetrie C6v besitzt, wird von den Prismenflächen umschlossen; «basal» deshalb, weil eine Fläche des Basispinakoides nur als Stufenelement auftritt und nicht als singuläre durchgehende Ebene.

Es gehört zur Eigenart dieser Schneekristalle, daß sie ausgesprochen hemimorph ausgebildet sind (anisotrope Wachstumsbedingungen in bezug auf Gefügefreiheit und Stoffzufuhr). Stets werden sie nach oben weiter, sind gegen unten unregelmäßig zugespitzt oder durch einfaches Prisma + Basis abgeschlossen. Die Stufung kann hoch und der Becher damit eng, oder aber schmal und zahlreich und der Becher oben breit

ausladend sein. Aenderungen in der Stufung von unten nach oben (häufiger und größer werdend) führen zu Trompetenformen.

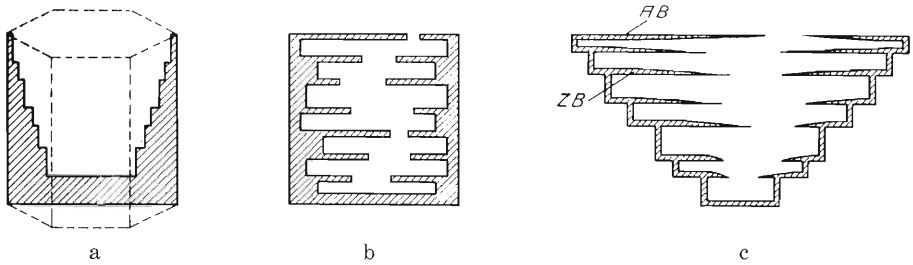


Fig. 2: Querschnitte durch basale Becher.
a) Ohne äußere Stufung.
b) Ohne äußere Stufung mit Zwischenbasisflächen (ZB).
c) Mit äußerer Stufung und Zwischenbasisflächen.

AB: Abschlußbasisfläche,
ZB: Zwischenbasisflächen.

Die Stufung wird weitaus am häufigsten durch rhythmischen Wechsel von Prisma und Basis verursacht. Pyramidenflächen konnten hin und wieder ebenfalls beobachtet werden, sind aber viel weniger wichtig: Flächen der unteren Hemisphäre $(10\bar{1}\bar{1})$ als Zwischenstufen, die der oberen $(10\bar{1}1)$ vorzugsweise als oberste Stufe. Vollständige Dipyramiden ergeben Tonnenformen.

Häufig entsprechen sich innere und äußere Stufung; oft jedoch sind die Becher innen reich gegliedert, während sie außen, im Extremfall, von durchgehenden Prismenflächen in einfacher Ausbildung, d. h. ohne die intermittierenden Basisflächen, begrenzt werden. Die starke Aufteilung des Innenraumes hängt dabei meist nicht mit einer bloßen Abnahme der Wandstärke gegen die Becheröffnung hin zusammen, was der Fall sein müßte, wenn nur die inneren Prismenflächen durch Stufen unterbrochen würden (Fig. 2a), sondern mit einer andern typischen Erscheinung (Fig. 2b), die besonders auch bei außen sehr reich gestuften Individuen angetroffen wird (Fig. 2c): Bei größeren Kristallen und solchen, die schon langsam in gefüllte Becher (s. S. 10) übergehen, ragen von jedem Absatz aus dünne Basisflächen ins Innere des Bechers, entweder von einzelnen Prismenflächen aus in gleicher Richtung oder von zwei Seiten zugleich ausgehend (Zwischenbasisflächen, vgl. Photos Tafel II). Die Abschlußbasis (vom Becherrand aus) wächst in derselben Art, schließt aber bei diesen Hohlformen nie ganz ab (Fig. 2c).

b) Prismatische Becher (Fig. 3 und 4, Tafel III).

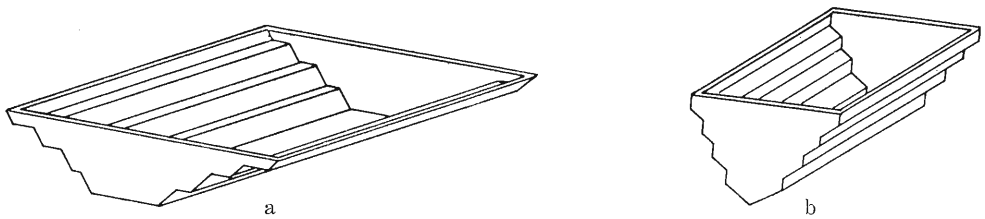


Fig. 3: Einfache prismatische Becher.
a) Stufung durch zwei Flächen des Prismas I. Stellung.
b) Stufung durch zwei Flächen des Prismas II. Stellung.

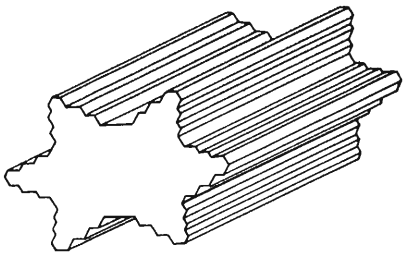


Fig. 4: Vollständiger prismatischer Becher (alle Flächen des Prismas als Stufenelemente ausgebildet). Ohne seitlichen Abschluß (einfaches Basispinakoid) gezeichnet.

Der Hohlraum besitzt bei diesen Bechern mit rechteckigem Becherrand die Eigensymmetrie C2v und wird von zwei Prismen- und zwei Basisflächen umschlossen. Die Stufung wird durch Alternieren verschiedener Prismenflächen verursacht, z. B. $(10\bar{1}0)$ mit $(01\bar{1}0)$ (deshalb «prismatischer» Becher). Dabei entstehen zwei verschiedene Typen, je nachdem, ob die Ebene des Becherrandes zu einer Prismenfläche parallel verläuft (Fig. 3a) oder aber darauf senkrecht steht (Fig. 3b), d. h. Becher mit oder ohne Boden. Man könnte, wenn man die Ebene des Becherrandes als Bezugsebene wählt, den Unterschied auch so formulieren, daß die eine Form (3a) nach dem Prisma I. Stellung und die andere (3b) nach jenem II. Stellung gestuft erscheint.

Bei vollständig durchgebildeten Körnern zeigen alle Flächenlagen des Prismas treppenförmigen Bau (Fig. 4). Damit wird die Hexagyre wiederum echte Symmetrieachse auch des gestuften Individuums. Kristalle der Schneedecke, im Gegensatz zum Reif, haben fast immer nur eine einzige Prismenfläche durch Treppen ersetzt; dies bedingt, daß das Korn äußerlich die wirtelige Symmetrie verliert, indem nicht mehr alle Flächen gleichwertig sind. Es entstehen so sargähnliche Formen. Flächen der Dipyramide finden sich ebenfalls, und zwar neben dem Basispinakoid als seitlicher (d. h. der Hexagyre zugeneigter) Abschluß. Den Zwischenbasisflächen der basalen Becher entsprechen hier Flächen der dritten Prismenseite, in unserem Falle also $(1\bar{1}00)$, die als dünne Platten in den Hohlraum hineinragen. Im allgemeinen ist diese Becherart etwas reicher und schmaler gestuft. Die häufigsten Größenverhältnisse sind $c : a = 2 : 1$ bis $3 : 1$. Die Unterscheidung, ob nur eine oder mehrere Prismenflächen gestuft sind, ist für Fragen der Schneemetamorphose weniger von Bedeutung, kann jedoch bei Oberflächen- und Höhlenreif wichtig werden.

c) Kombinierte Becher (Tafel II).

Beim kombinierten Becher sind, wie schon der Name verrät, alle acht Flächen des einfachen Kristalles (Prisma + Pinakoid) durch Treppenbau ersetzt. Beim vollständig durchgebildeten Kristall, der jedoch in der Schneedecke kaum angetroffen wird, sind alle Drehachsen (1⬢ + 3⬮) wiederum echte Symmetrieachsen des dendritischen Individuums (vgl. Tafel III).

d) Hohlprismen (Fig. 5).

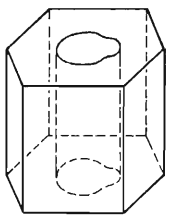


Fig. 5: Hohlprisma.

Hohlprismen stellen ebenfalls eine Seltenheit dar. Am häufigsten sind einfach prismatische Kristalle, die einen sehr feinen, beidseits geschlossenen Kanal enthalten.

2. Teilformen.

Neues bieten diese Kristalle nicht mehr. Wichtig für die Gliederung ist nur, wieweit der Bauplan beim betreffenden Korn verwirklicht wurde.

a) Basale Teilbecher (Fig. 6).

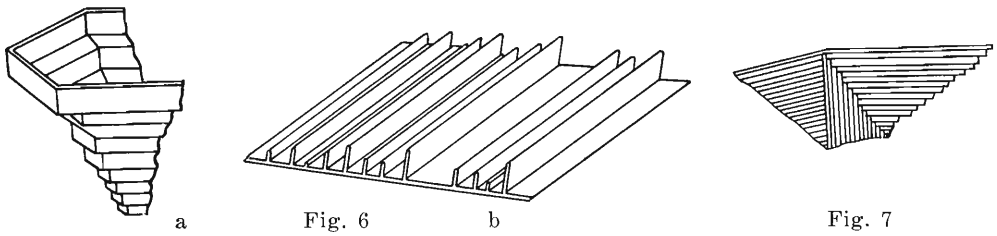


Fig. 6 und 7: Teilformen von Becherkristallen.
Fig. 6a: Teil eines basalen Bechers.
b: Einzelfläche als Teilform eines basalen Bechers mit Zwischenbasisflächen.
Fig. 7: Teilform eines kombinierten Bechers.

Sind zwei bis vier Prismenseiten vorhanden, so entsprechen sie genau den vollständigen Formen. Die beiden freien Seiten — d. h. jene Seiten, an welche die fehlenden Flächen des Prismas hätten angesetzt werden sollen — sind unregelmäßig, meist nach unten etwas zusammenlaufend begrenzt. Doch kann selbst bei Einzelflächen (jetzt eigentlich Tafeln, da die übrigen fünf Flächen fehlen) ihre den Bechern analoge Natur noch erkannt werden, und zwar mit Hilfe der Zwischenbasisflächen (Fig. 6b). Es handelt sich durchweg um Abbauerscheinungen, im Gegensatz zu den genetisch vieldeutigen Teilbechern mit mehreren Prismenflächen (besonders als Aufbauform z. B. beim Oberflächenreif). Diese dünnen Platten werden von zwei großen parallelen Prismenseiten gebildet. Die restliche Umgrenzung (eigentlich Basispinakoid + zwei weitere Prismenflächen) ist fast immer unregelmäßig gestaltet. Die äußere Prismenfläche (entsprechend der Lage im Becher) ist nur wenig oder nicht gestuft; die innere weist zahlreiche parallele, mehr oder weniger breite Basisflächen auf (entsprechend den Zwischenbasisflächen) und erscheint deshalb gerieft.

b) Prismatische Teilbecher.

Nicht immer kann sicher erkannt werden, ob es sich bei Teilbechern um Fragmente prismatischer oder basaler Becher handelt, besonders dann, wenn die Winkelverhältnisse nicht eindeutig sind (Riefung schmal und unscharf). In vielen Fällen ist eine Trennung ohnehin überflüssig. Die Verhältnisse sind im übrigen analog wie bei den basalen Teilbechern.

c) Kombinierte Teilbecher (Fig. 7).

Fragmente kombinierter Teilbecher verlangen, um als solche erkannt zu werden, mindestens zwei Flächen: eine geriefte Basisfläche und eine auf einer der drei Diagonalen senkrecht stehende geriefte Prismenfläche. Diese Form ist von allen Varianten der kombinierten Derivate in der Schneedecke weitaus am häufigsten anzutreffen. Vollständigere Ausbildung gehört schon eher in den Bereich des Reifs.

B. DIE VOLLFORMEN.

Streng genommen sind substanzerfüllte Körner, die nur Ebenen und gerade Kanten als äußere Begrenzungselemente besitzen, in der Schneedecke infolge der labilen Verhältnisse selten. Die Bindung solcher Körner wäre schwach. Wir zählen daher Körner mit nur einigermaßen vollständiger Ausbildung von Prisma oder Pyramide (mindestens fünf bis sechs Ebenen, gekrümmte Flächen auf ein Minimum reduziert) zur ersten Gruppe. Bei der zweiten Gruppe überwiegen dann meist flächenmäßig die Rundungen, während die dritte nur Körner ohne makroskopisch erkennbare Ebenenelemente umfaßt.

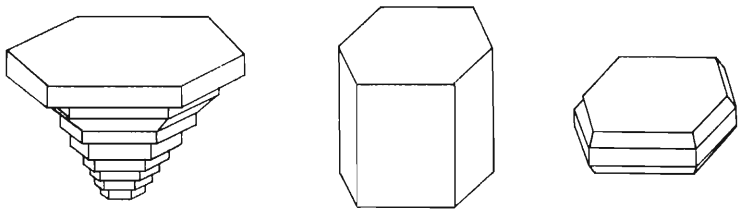


Fig. 8 a Fig. 9 b

Fig. 8: Gefüllter basaler Becher.
Fig. 9a: Einfache prismatische Form («Prismen»), Prisma + Basis.
b: Einfache tafelige Form («Tafeln»), z. B. Basis + Prisma + Dipyramide.

1. Ebenflächige Vollformen.

a) Gefüllte basale Becher (Fig. 8).

Sehr oft findet man in bodennahen Schichten der Schneedecke Körner, die den basalen Bechern genau entsprechen, doch fehlt ihnen der innere Hohlraum, bzw. ist der schüsselförmige Teil mit Eis ausgefüllt. Den Bechercharakter erkennt man nur noch an der äußeren Stufung. Allerdings ist diese nun in den meisten Fällen breit und wenig ausgeprägt, was wohl mit der Entwicklungsgeschichte in Zusammenhang zu bringen ist. Im Grenzfall, d. h. wenn die Treppenform ganz verschwindet, liegt ein einfaches ungegliedertes Prisma vor und das Korn kann höchstens noch auf Grund der Begrenzung auf der Gegenseite der Abschlußbasis als gefüllter Becher angesprochen werden, wenn es sich durch eine Pyramide zu einer Spitze verschmälert (Geschoßform). Häufiger jedoch laufen die Körner in diesem Falle unregelmäßig zu und gehören damit schon eher zu den Teilformen der Prismen (2c).

b) Gefüllte prismatische Becher.

Die Beziehungen zwischen hohlen und gefüllten prismatischen Bechern sind analog jenen der basalen Becher. Allerdings sind die Unterschiede der beiden Bechertypen bei den gefüllten Formen wesentlich geringer, da die innere Stufung wegfällt.

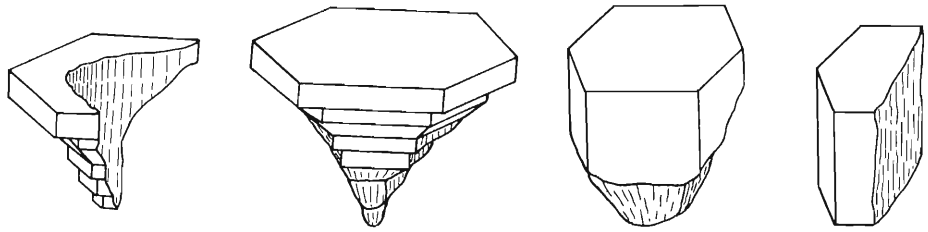
c) Prismen und Tafeln (Fig. 9).

In diese Gruppe gehören alle jene Körner, die von einfachen Pinakoid-, Prismen- und Pyramidenformen begrenzt werden, ohne einspringende Winkel und Stufungen. Die Variationen im Habitus sind recht groß; auch die Tracht kann stark schwanken. Zahlenmäßig sind diese Formen viel häufiger anzutreffen, als man glauben möchte (oft viel zahlreicher als Becher). Sie bilden genetisch ein interessantes Zwischenglied. Zweckmäßig ist eine Gliederung in kurzsäulige («Prismen») und tafelige («Tafeln») Kristalle. Obschon damit nichts über die Art der Flächen ausgesagt ist, findet man doch bei den dicktafeligen Formen die flächenreicheren Kombinationen (mehr Pyra-

midenflächen). Die Ausbildung der Formen ist auch hier selten vollständig, was man bereits daran erkennen kann, daß Schneesorten, die vorwiegend aus diesen Typen bestehen, meist ein noch recht festes Gefüge aufweisen. Wiederum genügen fünf bis sechs Ebenen der Minimalbedingung.

2. Teilformen.

(Neben einzelnen Ebenen vorwiegend durch gekrümmte Flächen begrenzt.)



a Fig. 10 b a Fig. 11 b

Fig. 10: Teilformen gefüllter basaler Becher.
a) Innenwandung durch gekrümmte Fläche begrenzt (verwandt mit Fig. 6a).
b) Konvexer Teil des Bechers teilweise durch gekrümmte Flächen begrenzt (verwandt mit Fig. 8).

Fig. 11: Teilformen einfacher prismatischer Körner.

a) Gefüllte basale Teilbecher (Fig. 10).

Neben den echten basalen Teilbechern findet man sehr ähnlich gebaute Körner, bei welchen jedoch der konkave Teil statt durch gestufte bzw. geriefte Ebenen durch eine gekrümmte Fläche begrenzt wird (Fig. 10a). Genetisch stehen beide Formen in sehr enger Beziehung zueinander. Naturgemäß sind zur Diagnose mindestens zwei äußere Prismenflächen notwendig. Auch Körner mit rein konvexer Krümmung können unter Umständen zu dieser Gruppe gerechnet werden, wenn nämlich die Prismenflächen deutlich gestuft sind (Reste der Bechernatur, Fig. 10b). Ohne Stufung handelt es sich um Typen der Gruppe B2c, d. h. um Teilformen von Prismen.

b) Gefüllte prismatische Teilbecher.

Auch hier ist die Unterscheidung von basalen Typen oft schwer. Entweder sind die Winkelverhältnisse unklar oder die Formen selbst zweideutig. Für die sicher diagnostizierbaren Körner gilt morphologisch Analoges wie für die gefüllten basalen Teilbecher.

c) Körner mit einem bis fünf planen Begrenzungsgebieten (Fig. 11).

Es handelt sich gewissermaßen um Teilformen der Prismen und Tafeln. Zu den Bechertypen ist gestalthaft keinerlei Beziehung mehr vorhanden. Diese Kornart ist eine der häufigsten und für die Genesis der Becher bedeutungsvollsten Gruppen. Die Ausbildung der einzelnen Formen ist so lückenhaft, daß eine Diagnose der Flächenlage kaum mehr möglich ist. Hingegen kann die Zahl der Ebenen pro Korn als Charakteristikum dienen. Sind mehrere Ebenen vorhanden, so besitzen sie meist ähnliche Ausdehnung und bilden Winkel von 0°, 30°, 60° und 90° (dazu die Winkel der Pyramiden). Die Gefügebildung ist durch das Vorherrschen der gekrümmten Partien, die fast ausschließlich die Bindung übernehmen, gut. Vielleicht muß hier noch in Zukunft eine schärfere Trennung vorgenommen werden, da genetisch zwei grundsätzlich verschiedene Glieder zusammengefaßt sind, die jedoch morphologisch nicht leicht zu trennen sind (Zwischenstufen der progressiven und regressiven Entwicklung).

3. Runde Körner.

In der Schneedeckenentwicklung der meisten Winter bilden allseits gerundete Körner die Hauptmasse. Einerseits sind sie jedoch morphologisch viel schwerer gliederbar, während sie anderseits für den Verlauf der späteren Metamorphose und die Entstehung hochmetamorpher Schneearten nicht die Bedeutung ebenflächig begrenzter Schneekornsorten besitzen. Es wäre für genauere Untersuchungen der morphologisch destruktiven Metamorphose (Neuschneekristall → rundes Altschneekorn) in der Schneedecke wertvoll, wenn auch die dendritischen Kristalloide und die Resorptionskristalloide des Altschnees genauer charakterisiert würden, doch fehlt hierzu vorläufig das Material.

Die bisher dargelegten Korntypen gehören alle dem Trockenschnee an, d. h. einem Schnee, der noch keinen Schmelzvorgängen unterworfen war. Gefrorener Naßschnee liefert ein morphologisch nicht weniger interessantes Material. Ein Vorschlag zur Gliederung der Naßschneekörner findet sich auf Seite 26. Es sei hier nur auf den Unterschied zwischen runden Trockenschnee- und runden Naßschneekörnern (bzw. im gefrorenen Zustand) hingewiesen.

Runde Trockenschneekörner sind recht selten schön kugelig, sondern viel häufiger leicht bis deutlich ellipsoidartig gestreckt, mit amöbenartigen Fortsätzen, die von Bindungen herrühren. Die Oberfläche eines Korns ist meist bis hart an die Bindungsfläche mit einem anderen Individuum deutlich konvex gekrümmt. Es entsteht dadurch zwischen zwei Körnern oftmals eine recht scharfe Einschnürung.

Im Gegensatz dazu nähert sich bei gefrorenen runden Naßschneekörnern (bzw. echten Naßschneekörnern, wenn der Wasserfilm morphologisch ebenfalls einbezogen wird) die Rundung viel mehr der Kugelgestalt. Die Oberflächenspannung des Wassers macht sich gestalthaft noch stärker bemerkbar in der Art der Bindung. Die Einschnürung zwischen zwei Körnern wird durch eine konkave Fläche mit relativ großem Krümmungsradius ersetzt, wobei naturgemäß das Kornbindungsmaß (siehe Seite 38) stark erhöht wird. Diese Unterschiede gestatten es, fast in jedem Falle abzuklären, ob runde Körner früher unter Schmelzwassereinfluß gestanden hatten oder nicht (ausgenommen, wenn sie nachträglich der morphologisch konstruktiven Metamorphose ausgesetzt waren).

In Tabelle 1 sind alle erwähnten Korntypen zusammengefaßt mit Signatur und Code. Signatur und Code wurden möglichst logisch aufgebaut, so daß das Zeichen zur Form in enger Beziehung steht. Wie überhaupt die ganze Klassifikation, so sind auch die Versuche in dieser Richtung als Vorschläge aufzufassen.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Kornformtypen.

	Signatur	Code
A. Hohlformen.		
1. Vollständig ausgebildete Formen.		
a) Basale Becher	△	Hbv
b) Prismatische Becher	⏢	Hpv
c) Kombinierte Becher	⏢	Hkv
d) Hohlprismen	□	Hh
2. Teilformen.		
a) Basale Teilbecher	∧	Hbt
b) Prismatische Teilbecher	⌒	Hpt
c) Kombinierte Teilbecher	⌒	Hkt
B. Vollformen.		
1. Ebenflächige Vollformen.		
a) Gefüllte basale Becher	▲	Vbv
b) Gefüllte prismatische Becher	▲	Vpv
c) Prismen	■	Pv
d) Tafeln	▬	Tv

	Signatur	Code
2. *Teilformen.*		
a) Gefüllte basale Teilbecher	▲	Vbt
b) Gefüllte prismatische Teilbecher	▬	Vpt
c) Körner mit 1 bis 5 Ebenen	◗	Pt
3. *Runde Körner*	•	Ro
C. Formen der Naßschneekörner (siehe auch S. 26).		
a) Runde Körner (Sagoformen)	○	Rs
b) Körner mit einzelnen Ebenen	◗	Vs
c) Hohlformen	∧	Hs

Fig. 12 gibt noch einige Spezialfälle von Becherformen und prismatischen Kristallen wieder, wie sie in zahllosen Spielarten immer wieder anzutreffen sind. In den meisten Fällen lassen sie sich ohne weiteres auf die beschriebenen Grundformen zurückführen.

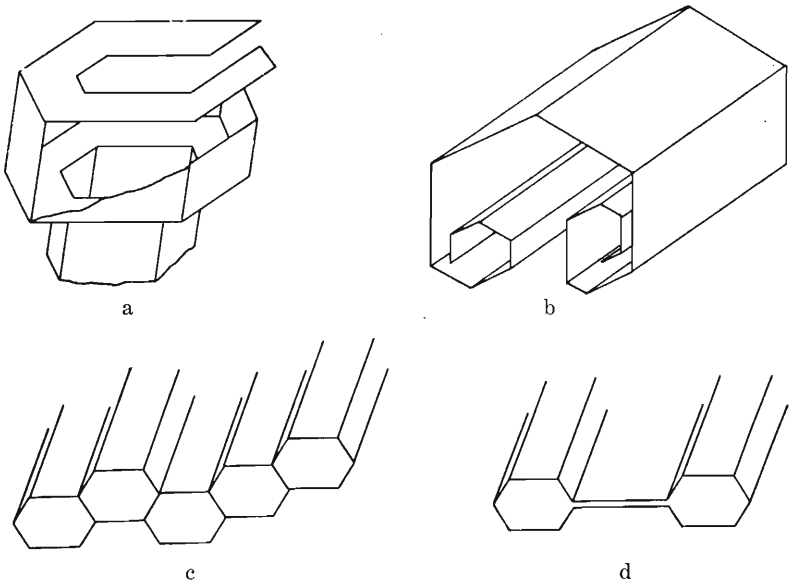


Fig. 12: Beispiele spezieller Formen bei Bechern und prismatischen Kristallen.

3. Kornformänderungen während eines Winters.

Das Beobachtungsmaterial, das diesem Teil der Untersuchungen zugrunde liegt, wurde in der Weise gewonnen, daß alle vierzehn Tage die Schneedecke im horizontalen Standardversuchsfeld Weißfluhjoch angeschnitten wurde. Die bei dieser Gelegenheit mit verschiedenem Abstand vom Boden entnommenen Proben wurden anschließend im Laboratorium untersucht und der Anteil einer jeden Kornform (nach der gegebenen Klassifikation) am Aufbau der betreffenden Schneesorte in x Zehnteln geschätzt. Um jede systematische Verfälschung durch Voreingenommenheit nach Möglichkeit auszuschalten, wurden die einzelnen Proben in beliebiger Reihenfolge untersucht, d. h. ohne Kenntnis der wirklichen Abfolge (z. B. in der Schneedecke von unten nach oben). Gelegentliche Stichproben durch mehrmaliges Schätzen derselben Sorte zu verschiedenen Zeiten ergaben Uebereinstimmung oder Abweichungen von einem Zehntel (vor allem bei einzelnen besonders reich vertretenen Kornarten). Unterschiede von zwei Zehnteln, die sich zudem auf verwandte Korngruppen beschränken, sind schon recht selten. Allerdings verlangt diese Art des Vorgehens sehr sorgfältiges Beobachten und etwas mehr Zeit als die üblichen Methoden (Binokular!); auch ist die notwendige Sicherheit nur mit einiger Uebung erreichbar.

Die Bestimmung der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Form bereitet keine Schwierigkeiten, da die Flächen beim Trockenschnee sehr schön reflektieren und die Kanten scharf und gerade ausgebildet sind. Uebergangstypen, die eine Entscheidung oft sehr erschweren können, wirken sich später, bei der Beurteilung der Entwicklungstendenzen, nicht mehr aus, weil dann verwandte Korngruppen zusammengefaßt werden.

Vom gesamten Beobachtungsmaterial, zu dem ein ausführliches Protokoll gehört, seien nur vier Trocken- und zwei Naßschneeprofile angeführt, um den Gang der Auswertung zu erläutern (Tafel I). Das übrige Material ist in den Kurven der Figur 13 a—i implicite enthalten.

Die Abgrenzung der einzelnen mit o, a, b, c, d bezeichneten Schichten wurde durch Fäden vorgenommen. Bei dickeren Schichten wurden mehrere Proben in verschiedener Höhe (Untergrenze, Mitte, Obergrenze) untersucht, um diese in sich gleichaltrigen Ablagerungen auf ihre Homogenität zu prüfen. Es ließen sich dadurch kleine, aber charakteristische Aenderungen in der Vertikalen feststellen. Im Ausschnitt aus dem kristallographischen Zeitprofil (Tafel I) wurden auch alle jene Messungen angegeben, die für die Beurteilung der Schneedeckenentwicklung wichtig sein können, d. h. Verlauf der Schneehöhe (tägliche Pegelablesungen), Temperatur der einzelnen Schichten (gemessen im geöffneten Profil von 10 zu 10 cm), Rammwiderstand, Härte (geschätzt in sechs Stufen), Feuchtigkeit (in vier Stufen) und Korngröße (maximale Durchmesser der Einkristalle, gemessen im Mikroskop). Die Profildarstellung mußte den besonderen Bedürfnissen stark angepaßt werden, doch wurde dabei immerhin versucht, das übliche und das neue internationale Schema soweit wie möglich zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Schneeprofile im Standardversuchsfeld. Schichtbezeichnung, Höhe der Probenmitte über Boden (hm), Kornformen in $^{x}/_{10}$ und mittlere Korngröße (Einkristall).

Profil vom 18. Januar 1949:

o		hm	3	cm	3 △, 1 ▱, 3 ∧, 2 ▲, 1 ■	d : 2,5—3 mm
a	Untergrenze	hm	13	cm	1 △, 1 ∧, 2 ▲, 3 ■, 2 ▬, 2 ◠	d : 1—2 mm
a	Obergrenze	hm	22	cm	1 ▲, 2 ■, 4 ▬ 1 ◠ 2 •	d : 0,5—1 mm
b	UG	hm	29	cm	1 ■, 3 ◠, 6 •	d : 0,5 mm
b	OG	hm	38	cm	3 ◠, 7 •	d : 0,5 mm
c	UG	hm	53	cm	9 • 1 +	d : 0,25 mm

Profil vom 2. Februar 1949:

o		hm	3	cm	1 △, 1 ▱, 2 ⌒, 2 ▲, 3 ■, 1 ▬	d : 2,5—3 mm
a		hm	19	cm	2 ∧, 3 ▲, 1 ▲, 3 ■, 1 ▬	d : 1,5—2,5 mm
b	UG	hm	28	cm	4 ■, 2 ◠, 4 •	d : 1 mm
b	OG	hm	39	cm	1 ∧, 2 ■, 1 ▬, 2 ◠, 4 •	d : 1,5—$^{3}/_{4}$ mm
c	UG	hm	49	cm	4 ◠, 6 •	d : $^{1}/_{4}$—$^{1}/_{2}$ mm
c	M	hm	64	cm	1 ■, 1 ▬, 2 ◠, 6 •	d : $^{1}/_{4}$—$^{1}/_{2}$ mm
c	OG	hm	77,5	cm	1 ■, 2 ◠, 7 •	d : $^{1}/_{4}$ mm
d	UG	hm	90	cm	2 ◠, 8 •	d : $^{1}/_{8}$—$^{1}/_{4}$ mm

Profil vom 16. Februar 1949:

o		hm	3	cm	3 △, 1 ▱, 2 ∧, 2 ▲, 1 ■, 1 ▬	d : 2,5—3,5 mm
a		hm	21	cm	2 △, 1 ∧, 5 ▲, 2 •	d : 1,5—2,5 mm
b	UG	hm	27	cm	1 △, 1 (∧, ▲), 4 ■, 2 ◠, 2 •	d : 1 mm
b	OG	hm	38	cm	1 ▲, 5 ■, 2 ▬, 1 ◠, 1 •	d : 1 mm
c	UG	hm	44	cm	4 ■, 2 ▬, 1 ◠, 3 •	d : 1 mm
c	M	hm	55	cm	2 ■, 1 ▬, 2 ◠, 5 •	d : 1,5—1 mm
c	OG	hm	71	cm	1 ■, 4 ◠, 5 •	d : 0,5—1 mm
d	UG	hm	77	cm	5 ◠, 5 •,	d : 0,5 mm
d	OG	hm	84	cm	3 ∨[1], 2 ■, 2 ◠, 3 •	d : 0,5 und 1,5 mm

[1]) Die umgekehrten Signaturen beziehen sich auf die entsprechenden Formen beim Oberflächenreif.

Profil vom 1. März 1949:

o		hm	3	cm	2 ∧, 4(∧ ⌒), 3▲, 1•	d : 2—4 mm
a	UG	hm	10	cm	1 △, 2 ∧, 1▲, 5▲, 1•	d : 2—3 mm
a	OG	hm	16	cm	1 △, 4 ∧, 1▲, 2▲, 1■, 1•	d : 2—2,5 mm
b	UG	hm	22	cm	1▲, 1■, 1▬, 4◓, 3•	d : 1—2 mm
b	OG	hm	29	cm	1■, 1▬, 5◓, 3•	d : 1—1,5 mm
c	UG	hm	44,5	cm	6◓, 4•	d : 0,5—1 mm
c	M	hm	60	cm	1■, 5◓, 4•	d : 0,5—1 mm
c	OG	hm	68	cm	4◓, 6•	d : 0,5—1 mm
d	OG	hm	78	cm	3▽, 1∨, 1⌵, 2▼[1], 1■, 2•	d : 0,5 und 2,5 mm

Profil vom 2. Mai 1949:

o, a					bis 10 cm mit Schmelzwasser gesättigt	
b		hm	19	cm	2◗, 8○	d : 1—1,5 mm
c	UG	hm	32	cm	1◗, 9○	d : 1—1,5 mm
c	OG	hm	42,5	cm	3◗, 7○	d : 0,5—1 mm
d		hm	50	cm	3◗, 7○	d : 0,5—1 mm
		hm	61	cm	2◗, 8○	d : 0,5 mm
		hm	77	cm	10○	d : 1,5—2 mm
		hm	81	cm	7○, 3+	d : 0,5—1 mm

Profil vom 16. Mai 1949:

o		hm	3	cm	1 A, 2◗, 7○	d : 1,5—2 mm
a		hm	10	cm	2◗ 8○	d : 1—1,5 mm
b		hm	20	cm	1◗ 9○	d : 1,5—1 mm
c	UG	hm	30	cm	10○	d : 1 mm
c	M	hm	42	cm	1◗ 9○	d : $^3/_4$—1 mm
d		hm	50	cm	1◗ 9○	d : $^3/_4$—$1^1/_4$ mm
		hm	58	cm	2◗ 8○	d : $^3/_4$—$1^1/_4$ mm
		hm	66	cm	1◗ 9○	d : 1—1,5 mm
		hm	71	cm	10○	d : 0,5 mm

4. Die genetische Bedeutung der Kornform.

Es soll nun versucht werden, auf Grund der Beobachtungen der Hauptfrage dieses Abschnittes — der Frage nach den gegenseitigen Beziehungen und Abhängigkeiten der Kornformen — näherzukommen. Im Verlauf der Umkristallisation lösen einzelne Kornformen einander ab; d. h. es muß möglich sein, bei gegebenen Bedingungen und damit gegebener Entwicklungstendenz, eine Normalsukzession aufzustellen.

In Tat und Wahrheit wurde umgekehrt vorgegangen, indem sich die Klassifikation der Kornformen erst aus dieser Problemstellung ergab. Bei der Beurteilung der nachfolgenden Diskussion müssen zwei Umstände besonders beachtet werden: 1. Es steht nur das Material eines einzigen Winters zur Verfügung, und 2. Genaue Zielsetzung und Arbeitsmethode ergaben sich erst im Laufe der Untersuchungen. Die Beschränkung auf einen Winter — gezwungenermaßen — hat zur Folge, daß wir von einer einzelnen, ganz speziellen Entwicklung ausgehend, verallgemeinern müssen. Allerdings fiel der betreffende Winter für diese Probleme sehr günstig aus (starke Umkristallisation). Zudem wurde nachträglich alles zur Verfügung stehende Material früherer Winter zu Vergleichen herangezogen, um eine breitere Basis zu gewinnen. Der zweite Umstand wurde angeführt, um zu erklären, wieso einzelne unerläßliche Messungen, z. B. eine viel ge-

[1]) Die umgekehrten Signaturen beziehen sich auf die entsprechenden Formen beim Oberflächenreif.

nauere Erfassung der physikalisch-meteorologischen Bedingungen innerhalb der Schneedecke (tägliche Messungen!), fehlen.

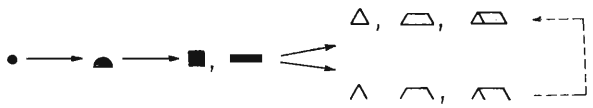
Bei der Betrachtung der Kornformauszählungen drängt sich sofort ein Vergleich auf zwischen den verschiedenen Profilen, besonders zwischen denselben Schichten zu verschiedenen Zeiten. Diese Vergleiche, die hier in Kurvenform wiedergegeben seien, liefern das Material zur Abklärung der phänomenologischen Beziehungen zwischen den einzelnen Korntypen. Erst anschließend sollen dann die Wachstumsbedingungen auch vom physikalischen Standpunkt aus kurz erläutert werden.

Bei dieser Art der Untersuchung (wenige Profile in nur ungefähr entsprechender Lage) zeigt sich nun, daß die einzelne Kornform viel zu starken Schwankungen unterworfen ist, als daß sich eine gesetzmäßige Entwicklung erkennen ließe. Eine solche zeichnet sich erst dann ab, wenn man alle lokalen Differenzen dadurch ausschaltet, daß verwandte Kornformen zusammengefaßt werden.

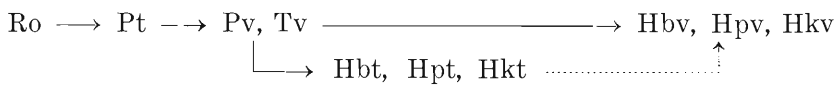
Im vorliegenden Fall unterscheiden wir in jeder Schicht nur noch zwei Gruppen von Kornformen, da sich auf diese Weise die Verhältnisse am besten überblicken lassen. Die Trennung wurde jeweils so durchgeführt, daß jeder Gruppe mengenmäßig etwa dieselbe Bedeutung zukommt. Bei stark fortgeschrittener Umkristallisation werden deshalb die Hohlformen von den ebenflächigen Vollformen abgetrennt, während bei jüngeren Schichten die ebenflächigen Vollformen bereits zur höher metamorphen Gruppe gezählt werden; d. h. die Gliederung mußte dem jeweiligen Grad der Metamorphose angepaßt werden (Kurven der Fig. 13 a—i).

Vergleicht man nun diese Kurven miteinander, dann ergibt sich fast überall ein konformer Ablauf, mit nur sehr geringen Abweichungen. Nimmt man diesen Verlauf als das Konstante an, und es kommt ihm, wie später gezeigt werden soll, eine reale Bedeutung zu (Aenderung der linearen Temperaturgradienten, s. S. 20), dann kann aus der von Schicht zu Schicht ändernden Zusammensetzung der beiden Gruppen die zeitliche Sukzession der Kornformen bei zunehmender Umkristallisation abgeleitet werden. Es ergeben sich daraus folgende Normalentwicklungen, wenn wir eine progressive (Zunahme der Bedeutung der Hohlformen) und eine regressive (inverse) Teilphase unterscheiden.

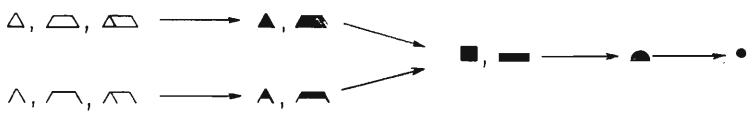
Progression (morphologisch konstruktiver Teil):



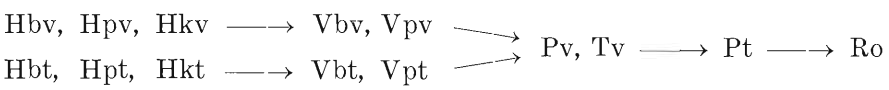
oder mit dem Code:

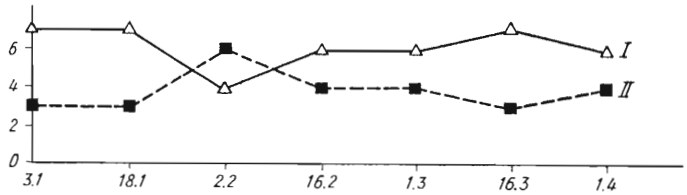


Regression (diaphtoritischer Teil):

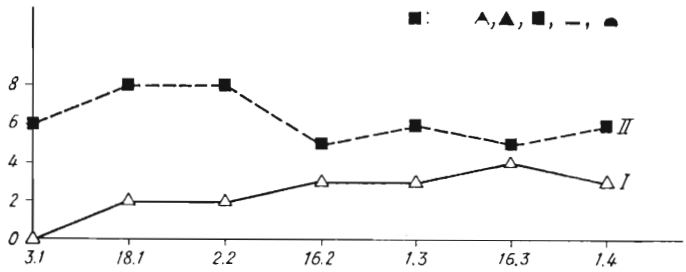


oder mit dem Code:

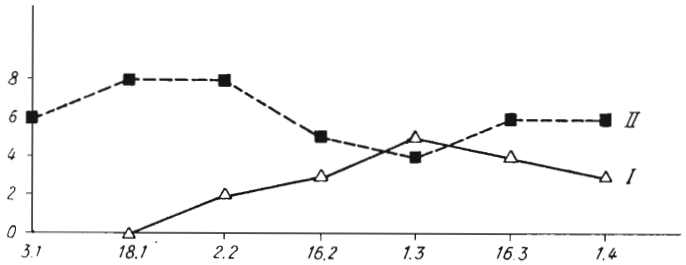




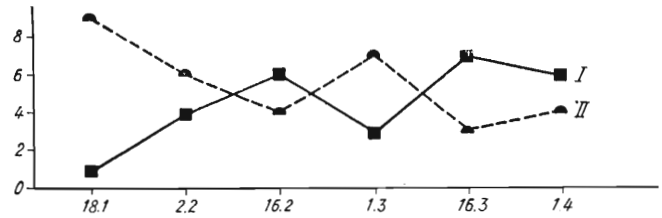
a) Bodenschicht o



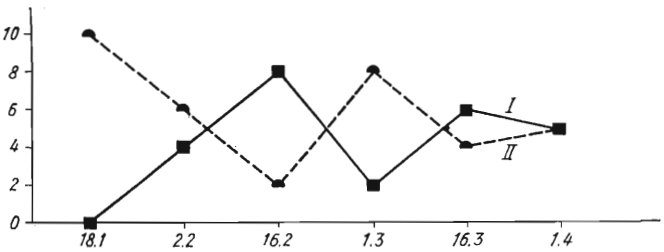
b) Schicht a Untergrenze



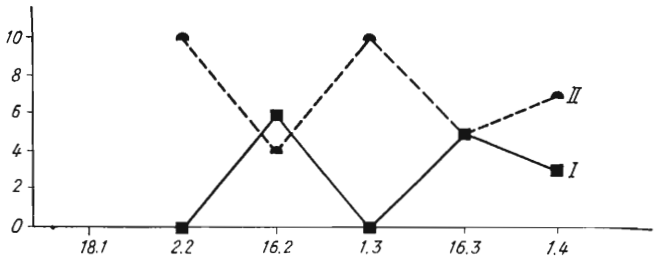
c) Schicht a Obergrenze



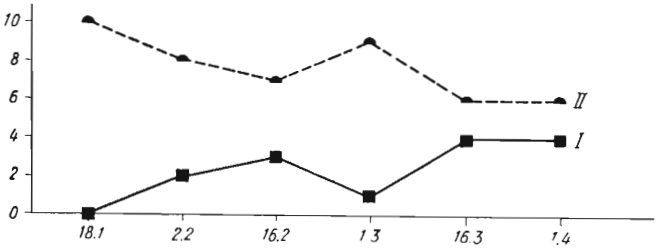
d) Schicht b Untergrenze



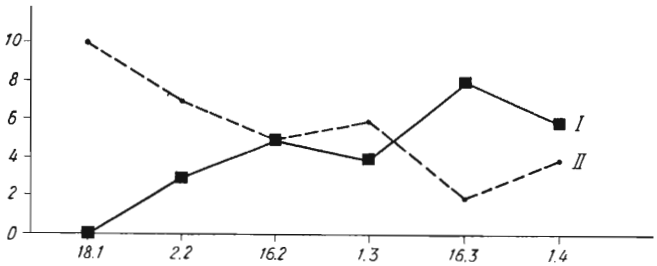
e) Schicht b Obergrenze



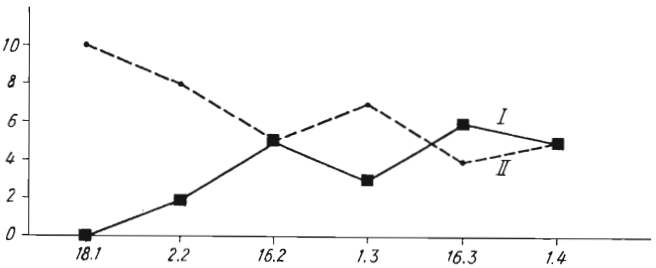
f) Schicht c Untergrenze



g) Schicht c Mitte



h) Schicht c Obergrenze



i) Schicht d Untergrenze

Fig. 13a—i: Aenderung der Kornformen in den verschiedenen Schichten während des Hochwinters (nur Trokkenschneeprofile, vgl. Tafel I). Als Abszissen die Profildaten, als Ordinaten die Anteile der beiden Kornformgruppen (I und II) in Zehnteln.

Dabei bleibt das Verhältnis zwischen vollständigen und unvollständigen Hohlformen noch ungeklärt.

Wir nennen künftig den progressiven Teil der Umkristallisation, der vom runden Korn zum Schwimmschneebecher führt, den morphologisch konstruktiven Ast der Metamorphose, und zwar weil dabei die Einzelkörper in zunehmendem Maße ihre Idiomorphie wieder erlangen (mit Ausnahme des letzten Teiles der Becherbildung). Die entgegengesetzte Tendenz ist einerseits dann verwirklicht, wenn idiomorphe Neuschneekristalle (z. B. Schneesterne) zu runden Körnern abgebaut werden — durch den morphologisch destruktiven Ast der Metamorphose — anderseits auch in der Regression, wenn ursprünglich hohle Becher wiederum gefüllt werden, bzw. Prismen abgerundet, d. h. wenn sie diaphtoritischen Vorgängen anheimfallen. Der Zusatz morphologisch ist deshalb notwendig, weil z. B. von der Verbandsfestigkeit aus betrachtet die Bezeichungen konstruktiv und destruktiv vertauscht werden müßten. Der Idiomorphieverlust der Neuschneekristalle während der morphologisch destruktiven Metamorphose gilt deshalb nicht als Diaphtorese, weil wir ja den Neuschnee grundsätzlich als unmetamorphes Ausgangsprodukt betrachten.

Verfolgen wir vom Grad der Idiomorphie aus die Veränderung z. B. eines Schneesternes während einer einfach verlaufenden Metamorphose (ohne Wiederholung einzelner Zyklen), dann ergibt sich ein wellenförmiger Ablauf.

In Wirklichkeit können sich progressive und regressive Entwicklung (morphologisch konstruktiv bzw. diaphtoritisch) mehrfach wiederholen, je nach den physikalisch-meteorologischen Bedingungen.

Betrachten wir nun als Ausgangspunkt eine Schneeart, die noch keine Anzeichen von Umkristallisation aufweist, bei welcher jedoch die morphologisch destruktiven Prozesse bereits abgeschlossen sind, d. h. einen gewöhnlichen rundkörnigen Altschnee. Wenn ein solcher Schnee — aus später darzulegenden Gründen — durch Substanzverschiebungen einer Umkristallisation unterworfen wird, ändern sich die Kornformen im Sinne des oben mitgeteilten Schemas. In bestimmten, genau fixierten Lagen beginnen sich an einzelnen Körnern durch Stoffanlagerung Ebenen auszubilden. Es sind zunächst durchweg nur vereinzelte Flächen der betreffenden kristallographischen Form (Prisma, Basispinakoid usw.), die zu einer gewissen Größe anwachsen, ehe die übrigen Flächenlagen ebenfalls verwirklicht werden. Dabei treten meist jene Ebenen zuerst auf, welchen die günstigste Stellung in bezug auf Gefügefreiheit und Orientierung zum Materialstrom zukommt. Die Körner werden durch den Substanzgewinn etwas größer und gehören nun zur Gruppe B2c (Pt: Prismenteilformen). Die Ebenen besitzen meist eine nahezu fehlerfreie, stark reflektierende Oberfläche und eine beliebige Umgrenzung, da ja die übrigen Oberflächenelemente der Körner noch gekrümmt sind.

Bei weiter fortschreitendem Aufbau vervollständigen sich die kristallographischen Formen nach und nach, und es resultieren Prismen (Gruppe B1c, Pv: vollständige Prismen) oder Tafeln (Gruppe B1d, Tv). Im Endstadium können Körner entstehen, welche fast vollständig von Ebenen begrenzt werden, aber noch keinerlei Anzeichen von Treppenbau erkennen lassen. Ein Minimalmaß an gekrümmten Flächen, die erst eigentlich die beliebigen (nicht orientierten) Kornverwachsungen und damit die Verbandsfestigkeit gewährleisten, bleibt jedoch immer erhalten (weshalb für vollständige Prismenformen definitionsgemäß keine Vollständigkeit im strengen Sinne verlangt werden darf, siehe Seite 10).

Eine Schneeart, die nur durch Prismen und Tafeln aufgebaut wird, ist übrigens kaum denkbar; denn meist besitzen selbst eng benachbarte Körner nicht denselben Grad der Umwandlung, da auch hier wiederum ganz bestimmte Stellen bevorzugt werden. Zu-

dem setzt gerade in diesem Stadium häufig bereits intermittierendes Wachstum zweier Flächenlagen, entweder Basis—Prisma oder Prisma—Prisma (d. h. je eine Flächenlage der betreffenden Form), also Stufenbau ein, und zwar in der überwiegenden Mehrzahl von einer einzigen Flächenlage — wiederum auf Grund bevorzugter Stellen — ausgehend. Nur deshalb besitzen die so gewachsenen treppenförmigen Kristalle einfache Schüssel-, Becher- oder Trichterformen. Es sind die bekannten Schwimmschneebecher der Gruppen A1a und A1b (Hbv: vollständiger basaler Becher, und Hpv: vollständiger prismatischer Becher) mit all ihrer Variabilität im Aufbau, bedingt durch verschiedene Korngröße, verschieden hohe und breite Stufung, verschiedene Vollständigkeit in der Ausbildung (Teilformen) usw., die als Endformen der Entwicklung zu gelten haben. An sich enthält diese Gruppe Glieder sehr verschieden intensiver Umkristallisation; doch wurde auf eine weitere Unterteilung vorläufig verzichtet.

Hingegen ist die Stellung der Teilformen (Gruppen A2a, A2b, Hbt, Hpt: basale bzw. prismatische Teilbecher) noch recht unklar. Einzelne Glieder gehören sicherlich organisch in den geschilderten Ablauf, z. B. als Zwischenformen zwischen vollständigen Prismen (Pv) und allseitig ausgebildeten Bechern (Hbv, Hpv) eventuell bei speziellen Bedingungen (z. B. stoßweiser Materialstrom usw.). Möglicherweise ist auch bereits die Orientierung des Kornes maßgebend (Oberflächenreif!). Gerade diese Fragen müssen noch durch viel eingehendere Beobachtungen und durch systematische Züchtungsversuche abgeklärt werden.

Soviel zum Verlauf der morphologisch konstruktiven Metamorphose, wie er sich — rein vom Standpunkt der Kornform aus betrachtet — ergibt, wenn man dieselbe Schneeschicht in den Profilen verschiedener Daten vergleicht. Die sukzessive Entwicklung prägt sich in den Zusammenstellungen der Kornformen sehr schön aus (s. S. 14).

Fragen wir nun nach der Ursache einer solchen Umkristallisation, dann liegt die Antwort auf der Hand. Schuld daran sind die Temperaturunterschiede innerhalb der Schneedecke, besonders in vertikaler Richtung: die vertikalen Temperaturgradienten. Eine gute Beschreibung des Vorganges findet sich bereits bei *Seligman* (1936, S. 69/70). Der experimentelle Nachweis wurde durch *M. de Quervain* (interner Bericht) geführt. Kurz zusammengefaßt ergibt sich folgendes Bild: Die Temperatur der Bodenoberfläche am Grunde der Schneedecke ist während des ganzen Winters nahe bei 0° C, höchstens bis —1° C, während die Oberflächentemperatur der Schneedecke von der jeweiligen Lufttemperatur (und nur wenig von der Beschaffenheit der Oberfläche) abhängt. Dadurch ergibt sich innerhalb der Schneedecke eine instabile Schichtung mit kälterer Luft in höheren und wärmerer in tieferen Horizonten, die zu dauernden Konvektionsbewegungen führt. Diese Konvektionsströmungen der bei der betreffenden Temperatur an Wasserdampf gesättigten Luft bewirken die Substanzverschiebung von wärmeren tieferen in kältere höhere Schichten und damit direkt die Umkristallisation (Sublimation in den wärmeren und Kondensation in den kälteren Horizonten).

Für die Vergleiche wurden im hier diskutierten Winter 1948/49 die Kurven der Temperaturgradienten wie folgt konstruiert (Fig. 14): Es stehen als tägliche Messungen (zwischen 8 und 10 Uhr morgens) die Temperaturen der Schneeoberfläche und des Bodens, sowie 10 cm unterhalb der Schneeoberfläche und die Werte in der Höhe eines Schichtpegels, der sich mit der betreffenden Schicht kontinuierlich senkte (anfänglich 100 cm, zuletzt 50 cm über Boden). Ebenfalls wurde täglich die Schneehöhe abgelesen. Als größtes Hindernis ergab sich nachträglich, daß innerhalb der Schneedecke nur zwei Temperaturen bekannt sind, wovon die eine (10 cm unterhalb Oberfläche) zudem noch deutlich den Schwankungen der Außentemperatur unterworfen war. Die Temperaturgradienten mußten deshalb gezwungenermaßen über den ganzen Bereich linear berechnet

werden, was sicher in Wirklichkeit nicht zutrifft. Dennoch zeigen sich die Zusammenhänge wenigstens qualitativ — im Richtungssinn der Tendenzen — sehr schön. Es wurden zwei Kurven berechnet, einerseits Schichtpegel → Boden linear und anderseits

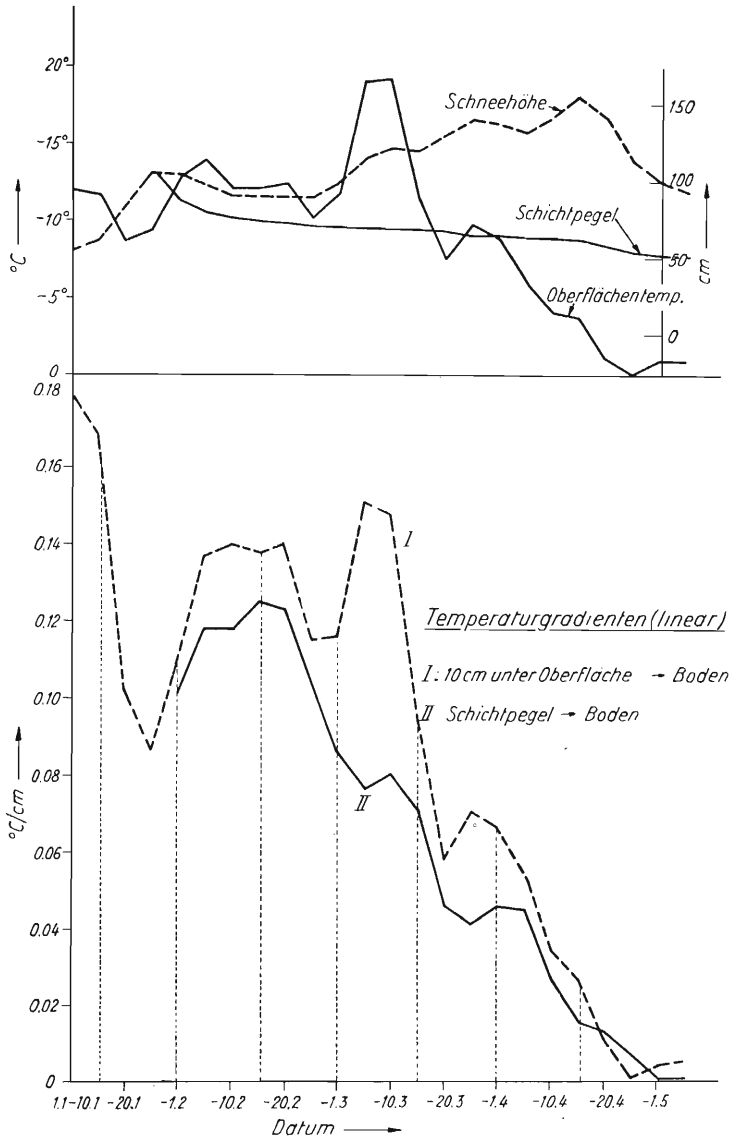


Fig. 14: Zeitlicher Verlauf einiger Größen im Standardversuchsfeld Weißfluhjoch Winter 1948/49 (übergreifende Dekadenmittel).

a) Schneehöhe (+ Höhe des Schichtpegels, mit welchem die Temperaturmessung verbunden war) und Oberflächentemperatur.

b) Temperaturgradienten, linear berechnet.

10 cm unterhalb Oberfläche → Boden linear, und zwar mit den übergreifenden Dekadenmitteln. Die einfachen Pentadenmittel variieren zu stark, während die einfachen Dekadenmittel wiederum zu indifferent sind.

Obschon bei den Profilgrabungen die Temperaturen von 10 zu 10 cm gemessen wurden (vgl. Tafel I), können diese Daten in unserem Falle nicht verwendet werden, da es sich um beeinflußte (geöffnetes Profil!) Momentanwerte handelt, während für den Verlauf der Metamorphose gerade der physikalisch-meteorologische Zustand in der Zwischenzeit maßgebend war. Tägliche Messungen und Mittelungen sind deshalb unerläßlich.

Um festzustellen, ob zwischen der Größe der Temperaturgradienten und dem Grad der Umkristallisation, wie er aus der Kornformzusammensetzung der betreffenden Schicht abgeleitet wurde, eine tatsächliche Beziehung besteht, müssen die entsprechenden Kurven

verglichen werden. Bei den Kornformkurven (Fig. 13) erkennt man nach einer gewissen Zeit des reinen Aufbaus — meist nach kaum mehr als vierzehn Tagen — in allen Schichten dieselben Tendenzen (mit Ausnahme der Werte vom 1. März in der Obergrenze der Schicht a). Kurve I fällt bei den schon im Gleichgewicht befindlichen Schichten vom 18. Januar zum 2. Februar, steigt zum 16. Februar überall deutlich an, bleibt bis zum 1. März im Fundament horizontal, während sie in den höheren Schichten stark fällt. Der 16. März bringt wiederum einen allgemeinen Anstieg, während der 1. April — das letzte Trockenschneeprofil — wieder tiefere Werte aufweist. Kurve II zeigt einen inversen Verlauf.

Für die Gradientkurve gilt: Kurve I zeigt eine starke Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur und damit auch der Lufttemperatur. Die Abhängigkeit ist deshalb so eng, weil in diesem Winter einzelne große Schneefälle — die ebenfalls zu starken Gradientänderungen führen können — fehlten. Kurve II zeigt zunächst analoge Verhältnisse, solange der Schichtpegel sich noch nicht relativ nahe an der Oberfläche befindet. Nach und nach werden die Maxima und Minima der Warm- und Kaltlufteinbrüche abgeschwächt und verschoben, bis sie schließlich — auf einer Höhe von 50—70 cm Ende März bis Anfang April — mit einer Pentade Verspätung eintreffen. Sonst ist auch hier konformer Verlauf festzustellen, wenn man von den Absolutbeträgen, welchen keinerlei Bedeutung zukommt (Linearität!) absieht.

Eine kurze Diskussion der einzelnen Profildaten läßt nun die Zusammenhänge zwischen Kornformen und Temperaturgradienten erkennen:

Im Profil vom 2. Februar macht sich in der Bodenschicht o das Gradientminimum von Ende Januar durch eine Abnahme des Anteils der Hohlformen bemerkbar. Die höheren Schichten befinden sich noch nicht im Gleichgewicht und lassen deshalb trotz der Gradientverminderung noch einen Aufbau im Sinne eines Idiomorphiegewinnes erkennen, während der untere Teil der Schicht a für die Werte des Gradientminimums das Gleichgewicht eben erreicht zu haben scheint.

Das Profil vom 16. Februar bedingt in der Kornform überall ein Ansteigen der Kurve I, und zwar am stärksten in mittlerer Höhe (in der Nähe der Grenze b—c). Ursache ist das Gradientmaximum des Februars, das bereits am 5. Februar einsetzt.

Am 1. März zeigt sich, daß im Fundament (mit der bereits erwähnten Ausnahme a OG) die Vermehrung der Hohlformen gestoppt ist, während weiter oben wieder etwa der Stand vom 2. Februar hergestellt wird. Die deutliche Erwärmung von Ende Februar scheint sich also sehr rasch ausgewirkt zu haben.

Der 16. März läßt in der ganzen Schneedecke wiederum einen verstärkten Aufbau erkennen (Ansteigen der Kurve I), der vom Kälteeinbruch von Anfang März herrühren muß.

Erwärmung und die Schneefälle von Ende März führen auf den 1. April hin zu einem allgemeinen Absinken der Gradientkurve I. Das Profil vom 16. April läßt schon sehr deutlich den Einfluß von Schmelzwasser erkennen. Von nun an nimmt die Schneedeckenentwicklung einen ganz anderen Verlauf.

Damit dürften die Möglichkeit und die Berechtigung einer Korrelation zwischen Temperaturverhältnissen und Kornformen nachgewiesen sein.

Das Temperaturgefälle ist direkt maßgebend für die Intensität der Konvektion und damit die Geschwindigkeit des Materialnachschubes von wärmeren in kältere Schichten. Im Grunde genommen sollte man ihm quantitativ für eine bestimmte Schicht (Einfluß der Temperaturdifferenz zur wärmsten Schicht im Absolutbetrag) eine mittlere Uebersättigung zuordnen können. Praktisch ist dies nicht möglich, da einer Uebersättigung bei diesen Keimverhältnissen (im Gegensatz zur freien Atmosphäre) keine reale Bedeutung zukommt. Auf dem Umweg über diese Zusammenhänge bedingt der Temperatur-

gradient die Wachstumsgeschwindigkeit und damit direkt den Habitus. In dieser Beziehung scheinen die Verhältnisse sehr ähnlich zu sein wie beim Wachstum der Neuschneekristalle in der Atmosphäre. Eine Komplizierung rührt davon her, daß gerade über die Geschwindigkeit des Stofftransportes auch die Zeit, die zur Einstellung eines bestimmten Gleichgewichtes notwendig ist, mitbestimmt. Beide Einflüsse gehen jedoch annähernd parallel.

Es seien nun noch einige weitere Ergebnisse, die sich aus den Beobachtungen ableiten lassen, kurz erwähnt.

Die qualitativ geschilderte progressive Entwicklung verläuft gleichmäßig bei konstantem (über einem bestimmten Minimalwert stehendem) oder bei langsam und linear zunehmendem Gradienten. Die Minimalzeit zur Erreichung der Endform liegt in der Natur etwa bei 10—14 Tagen. Sie trifft jeweils nur für die zuerst abgelagerten Schichten zu und ist an ganz bestimmte Voraussetzungen geknüpft. Gleichmäßig progressiv verlaufender Aufbau findet sich ebenfalls vorwiegend in diesen Horizonten, da ein solcher bei der wesentlich langsameren Entwicklung, wie sie höhere, jüngere Schichten charakterisiert, durch die Schwankungen der bedingenden Faktoren meist stark gestört wird. Dadurch wird der zeitliche Ablauf oft bedeutend verschoben, indem einzelne Stufen sehr rasch durchlaufen werden, während andere sehr viel mehr Zeit brauchen.

Es liegt nahe, daß bei sprunghafter Erhöhung des Temperaturgefälles ein Becher nicht aus einem vollständig ausgebildeten Prisma entsteht, sondern daß schon gleich mit der Ausbildung erster kristallographischer Begrenzung die Tendenz zum Treppenbau auftritt. Doch sind solche Möglichkeiten wohl nur im Frühwinter gegeben, und sie ändern grundsätzlich an der Genesis der Becher nichts, da sie bloß einer Stauchung des Normalablaufes entsprechen.

Die Frage, was mit einem hochmetamorphen Schnee, der sich bei großem Gradienten im Gleichgewicht befindet, in der Natur geschieht, wenn er durch Erwärmung oder Zunahme der Schneehöhe in ein geringeres Temperaturgefälle gelangt, läßt sich folgendermaßen beantworten:

Als Gegenstück zur progressiven beginnt sich nun die im morphologischen Sinne regressive Tendenz auszuwirken, die als Diaphtorese bezeichnet werden darf. Obschon die Anfangs- und Endformen (im umgekehrten Sinne) identisch sind, finden sich genetisch eindeutige Zwischenglieder, vor allem die Formen der Gruppen B1a und B1b (gefüllte Becher).

Die Substanzanlagerung erfolgt nun bei den reich gegliederten und dünnwandigen Bechern nicht mehr im Sinne der Stufenvermehrung, sondern außen werden einzelne Absätze ausgeglichen, die Wandungen verdickt; Zwischenflächen im Innern wachsen stärker und werden dicker. Es findet eine Füllung der Hohlräume von innen her statt, ohne daß die maximalen Durchmesser der Körner vergrößert werden. Die Vorgeschichte ist nicht nur bei den allseitig gefüllten Bechern mit Sicherheit rekonstruierbar, sondern auch bei Teilformen. Bei weiterer Regression, nach beendeter Ausfüllung, wird die Stufung außen nach und nach ganz eliminiert, und es resultiert als Endform ein Prisma, das vom Ausgangskorn höchstens durch die beträchtliche Massenzunahme unterscheidbar ist.

Das nächste Glied bilden Körner mit einzelnen wenigen Ebenen, die durch Abbau der allseitigen Vollformen entstehen, nun meist verbunden mit Stoffverlust. Schreitet die Abrundung noch weiter, so gelangt man wieder zum Augangspunkt, zu vollständig runden Körnern.

Die retrograde Metamorphose besitzt geschwindigkeitsmäßig in bezug auf das Temperaturgefälle ein Maximum bei kleinen bis mittleren Gradienten. Bei großen Gradienten (kleine Verminderung) stellt sich das Gleichgewicht rasch ein, aber der Zustand ent-

spricht nur schwacher Diaphtorese, während bei zu geringen Gradienten die Stoffumlagerung so langsam erfolgt, daß für die Erreichung des Gleichgewichtes sehr viel Zeit erforderlich ist.

Es ist nun keineswegs so, daß ein und dieselbe Schicht während eines Winters den ganzen Kreislauf der progressiven morphologisch konstruktiven Metamorphose mit anschließender Diaphtorese durchläuft; dazu reicht, besonders gegen den Spätwinter hin, die Zeit zur völligen Auswirkung der regressiven Vorgänge nicht aus, da meist sehr bald Schmelzwassereinflüsse die Verhältnisse grundlegend ändern. Dennoch wäre dies ohne weiteres denkbar, obschon in unserem Fall der Gang aus den gleichzeitigen Veränderungen der verschiedenartigsten Schichten rekonstruiert wurde.

Am weitesten fortgeschritten in Richtung der Becher sind meist die bodennächsten Schichten, da sie einerseits das größte Alter besitzen und anderseits häufig zu Beginn großen Temperaturgradienten ausgesetzt sind, wenn das Einschneien nur zögernd erfolgt. Wird ein solcher Schnee tief eingedeckt und hohen Temperaturen ausgesetzt, so erfolgt rasch Füllung der Becher und Ausgleich der Stufung; aber niemals werden die Körner in einem Winter wieder vollständig abgerundet. Der Charakter des Schnees bleibt im Grunde genommen erhalten, und nur eine genauere Analyse der Kornform zeigt die Veränderungen. Teilweise wird dies auch dadurch bedingt, daß die Metamorphose des Gefüges irreversibel ist (siehe Seite 31), während sich die Gestalt des Einkristalls an sich vollständig rückbilden könnte.

Umgekehrt werden jüngere Schichten, die während des Hoch- und Spätwinters gebildet wurden, viel weniger stark umkristallisiert. War z. B. zu einem bestimmten Zeitpunkt das Prisma stabile Endform einer Schicht, so werden diese Körner bei regressiver Tendenz wieder abgerundet usw. Die vielen Möglichkeiten des Verlaufs der Metamorphose, der ja gerade die Schneedeckenentwicklung eines bestimmten Winters charakterisiert, lassen sich ohne weiteres aus dem Normalverlauf ableiten.

Aus den Kurven der Kornform (Fig. 13) ergibt sich im weitern, daß die Formen der mittleren Stadien (Pv, Tv) auf Aenderungen des Temperaturgefälles scheinbar empfindlicher reagieren als jene hochmetamorpher Sorten (Hohlformen), indem Auf- und Abbauvorgänge quantitativ viel deutlicher zum Ausdruck kommen. Einmal rührt dies daher, daß solche Formen zu höheren Schichten gehören, die vom Witterungsablauf stärker und rascher beeinflußt werden. Dann aber vollzieht sich der Abbau vom Prisma zum runden Korn viel schneller als jener vom reich gestuften Becher zum gefüllten Becher oder gar zum Prisma (Ausmaß der notwendigen Substanzverschiebungen). Die einzelnen Gruppen der hier benützten Klassifikation sind weder morphologisch noch im genetischen Sinne ganz gleichwertig.

Daß die Gesetzmäßigkeiten der Metamorphose in den Profilen nur dann zum Ausdruck kommen, wenn entsprechende Kornformen zusammengefaßt werden, erklärt sich durch die erst sehr lückenhafte Kenntnis der Entstehungsbedingungen jeder Form (z. B. Teilformen). Eigentlich müßten aus den Veränderungen jedes einzelnen Korntypes dieselben Zusammenhänge hervorgehen. In den weniger metamorphen Schichten ist dies tatsächlich der Fall, während die Verhältnisse in bodennäheren Horizonten viel komplexer sind. Wachstumsmäßig umfaßt der Begriff der Hohlformen einen viel größeren Bereich als jener der Vollformen. Vielleicht spielt auch eine gewisse Vieldeutigkeit mit.

Vergleicht man diese rein deduktiv gewonnenen Ergebnisse mit den heute bekannten Gesetzmäßigkeiten des Kristallwachstums — insbesondere der dendritischen Formen —, dann ergeben sich keinerlei Widersprüche. Die hier für den Schnee nachgewiesene Verknüpfung von Korngestalt und Wachstumsgeschwindigkeit ist bei anderen Materialien schon längst bekannt. Auch über die Gründe dendritischen Wachstums ist man sich im allgemeinen einig. So schreibt z. B. *P. Niggli* (1941, Seite 438) zusammenfassend:

«Es ist schon lange bekannt, daß dendritisches Wachstum besonders bei schneller Kristallisation (starke Uebersättigung der Lösungen und Dämpfe) aus Medien stattfindet, die eine relativ große Abhängigkeit der Sättigungskonzentration von der Temperatur und lokalisierte Keimbildung aufweisen. Bei Kristallisation aus der Schmelze ist zugleich für Dendritenbildung eine genügend schnelle Fortführung der bei der Erstarrung frei werdenden Schmelzwärme Voraussetzung.

Maßgebend ist in erster Linie die sogenannte Spitzenwirkung bei der Diffusion. Einmal gebildete Ecken eines Konvexkörpers werden vom Medium allseitig umspült, sie sind daher bei rascher Diffusionsströmung und hohem Uebersättigungsgrad empfänglicher für Stoffansatz, d. h. günstiger gelegen als Flächen.»

Damit sind die beiden Hauptursachen dendritischer Wachstumsformen, auf die immer wieder hingewiesen wird, erwähnt: ungleichmäßiger Wärmeabfluß und rascheres Verarmen an molekulardispersen Phasen in der Umgebung größerer ebener Flächen [vgl. die Hinweise von *Vogel* (1921), *Valeton* (1923/24), *Ehlers* (1935), *Papapetrou* (1935), *Evans* (1949), *Bunn* (1949), *Buckley* (1951)]. Für das Beispiel der Schneedecke darf wohl der Spitzenwirkung bei der Diffusion weit größeres Gewicht eingeräumt werden. Allerdings findet das Wachstum innerhalb der Schneedecke nicht so rasch statt wie bei Neuschnee oder Oberflächenreif und führt deshalb nicht zu den mehrfach gegliederten Formen mancher Schneesterne, sondern zu einfachem Stufenbau, der auf Unterschiede in der Verschiebungsgeschwindigkeit von Basis, v (0001), und Prisma, v $(10\bar{1}0)$, beruht. Je größer die mittlere Uebersättigung $\bar{\mu}$ ist (bzw. je rascher die Substanzzufuhr erfolgt), desto rascher entstehen — durch den verschiedenen Materialverbrauch der einzelnen Flächenlagen — Unterschiede zwischen μ (0001) und μ $(10\bar{1}0)$, d. h. desto zahlreicher und schmaler (in bezug auf die Bechergröße) werden die einzelnen Stufen. Die Becher öffnen sich deshalb trichterförmig, weil ihr Hohlraum rascher verarmt; die Stufen stoßen in den freien Raum, der der Stoffzufuhr näher liegt, vor. Nur bei starken Materialumlagerungen können auch im Trichterinnern Zwischenbasisflächen wachsen.

Dem Wachstumsprozeß überlagert sich eine Umordnung der bereits im Gitter eingebauten Teilchen. *P. Niggli* schreibt [1941, Seite 439, mit Hinweis auf die Untersuchungen von Bader an Neuschneedendriten (1939)]: «Nun ist selbstverständlich, daß infolge der großen Oberfläche ein dendritischer Kristall gegenüber einem gleiches Volumen besitzenden Vollkristall instabil ist. Die Wirkung der lockeren Bindung und Oberflächenspannung kommt hauptsächlich an den Spitzen zur Geltung. Bei relativ leichtflüchtigen Kristallverbindungen beginnt die Destillation von Gebieten kleinen Krümmungsradius zu großen Kristallteilstücken; unter Umständen findet auch lediglich ein Kriechen der Substanz der Oberfläche ... entlang zur Ausfüllung von Lücken statt.»

Ob die Füllung der Becher — bei kleinerem Temperaturgefälle — auf derartigen Umlagerungen beruht oder ob bei langsamerem Wachstum die Konzentrationsunterschiede in der Grenzschicht durch Diffusionsströme ausgeglichen werden, bevor sich neue und kornfremde H_2O-Moleküle anlagern, kann den Beobachtungen naturgemäß nicht entnommen werden. Immerhin ist die stabile Form bei reiner Umgruppierung am selben Korn die Kugel, während beim Kristallwachstum über die Dampfphase — im Sinne einer Substanzvermehrung — zunächst anscheinend immer ebenflächig begrenzte Formen entstehen. So wurde bis zu Temperaturen von —40° hinunter und bei äußerst langsamem Wachstum (bis 10 μ/Tag durch Diffusionsströme) die Bildung ebenflächiger Formen (Prismen Pv und Tafeln Tv) beobachtet. Diese Tendenz wird allerdings durch das Bestreben, die Oberflächenenergie zu vermindern, um so wirksamer gestört, je näher die Temperatur dem Schmelzpunkt liegt.

Obschon sich die Deutungsversuche zur Dendritenbildung ohne weiteres auch auf

den Schnee übertragen lassen, so muß doch betont werden, daß dieser Problemkreis im Grunde genommen noch recht weit entfernt ist von einer befriedigenden Lösung.

Daß sich das Bestreben zur Erreichung einer möglichst gleichmäßig gekrümmten Kornform (Oberflächenenergie) bei den Dendriten der Schneedecke anscheinend weniger stark auswirkt als bei Neuschneekristallen (vgl. *Bader* 1939), ist teilweise dadurch zu deuten, daß gerade Schneesterne viel größere Unterschiede in den Krümmungsradien aufweisen. Anderseits benötigt ein ebenflächig begrenztes Korn der Schneedecke, das für ein bestimmtes Temperaturgefälle die Gleichgewichtsform darstellt, nicht nur für seine Entstehung, sondern auch für seine Existenz einen ständigen Materialstrom bestimmter Intensität und kann seine Gestalt demnach nur in dauerndem Wachstum wahren. Verringert sich die Substanzzufuhr aus irgendeinem Grunde, dann führen diaphtoritische Prozesse zur neuen stabilen Form. Entzieht man aber eine hochmetamorphe Schneeart dem Einfluß der Konvektionsbewegungen, dann muß diese Diaphtorese aus Materialmangel ausbleiben (vergleichbar einem abgeschreckten Gefüge). Bei konstanter und überall gleicher Temperatur werden sich gestaltändernd nur noch jene — stark temperaturabhängigen — Umgruppierungen auswirken können, die eine Verminderung der Oberflächenenergie anstreben.

Zusammenfassend scheint sich also zu ergeben, daß bei diesen schmelzpunktnahen Temperaturen die angestrebte Form einer metamorphen Schneeart (nur Sublimationsmetamorphose) sich unmittelbar mit der Größe und den Aenderungen des Temperaturgefälles innerhalb der Schneedecke in Beziehung bringen läßt. Der Einfluß weiterer Größen kann bei der Erklärung vernachlässigt werden. Anders liegen die Verhältnisse sicher bei extrem tiefen Temperaturen, da dort wohl die Wachstumsform nicht mehr so ohne weiteres der (wenn auch bloß gedachten) Uebersättigung gegenübergestellt werden darf [Einfluß der absoluten Temperatur, vgl. die entsprechenden Ergebnisse von *Nakaya* (1943)]. Die Vermutung, daß die Materialmenge, die in einem Profil durch die Umkristallisation verschoben wird — vor allem gegeben durch die absolute Temperatur —, die Morphologie des Einkristalles ebenfalls beeinflusse, läßt sich aus den Beobachtungen nicht stützen. Sie scheint weniger die Wachstumsgeschwindigkeit als eher die Zeit, die zur Erreichung des entsprechenden Gleichgewichtes benötigt wird, zu bestimmen.

Die Wirksamkeit weiterer Faktoren in bezug auf Verlauf und Charakter der Endform (z. B. Druck, Art des Porenhohlraumes) glauben wir heute noch vernachlässigen zu können. Gerade die Druckerhöhung, wie sie im Gefolge von Neuschneefällen immer auftritt (Ueberlastung nach *Bucher*, 1948) hat kaum eine direkte Auswirkung auf die Gestalt der darunterliegenden Kristalle. Wohl tritt, besonders in den obersten Schichten, eine oft recht starke Packung ein, doch betrifft dies fast ausschließlich wenig metamorphe Horizonte. In tieferen Lagen wird die Setzungsgeschwindigkeit ebenfalls erhöht, jedoch um so schwächer, je stärker die betreffende Schneesorte umgewandelt ist. Dadurch, daß mit einem Schneefall fast immer eine Verminderung des Temperaturgefälles Hand in Hand geht, kann leicht eine Täuschung über Ursache und Wirkung erfolgen. Dennoch ist ein direkter Einfluß eines Druckes durch Ueberlagerung möglich; dann nämlich, wenn die Packung so weit geht, daß die Konvektion merklich erschwert wird. Dies ist sicher der Fall bei zusätzlicher künstlicher Belastung und bei Ablagerung größerer Schneemassen mit sehr starken Winden. In unserem Klima, in welchem der Trockenschnee selten ein Raumgewicht von mehr als 0,5 g/cm^3 erreicht, wird die Konvektion nie stark gestört. Zudem wird durch Verminderung der Konvektion (z. B. Eislamellen) wahrscheinlich nur die Zeit verlängert, die für die Erreichung des Gleichgewichtes notwendig ist, nicht aber die Lage des Gleichgewichtes verschoben. Doch wären diese Ansichten immerhin noch durch das Experiment zu beweisen.

5. Abbau durch Schmelzwasser.

Obwohl eingehendere Untersuchungen über den Abbau der Schneedecke durch Schmelzwasser nicht durchgeführt wurden, seien hier einige Beobachtungen mitgeteilt, die sich bei den Aufnahmen der Naßschneeprofile im Versuchsfeld ergaben.

Auch morphologisch besitzt das Gebiet der Koexistenz mit der flüssigen Phase seinen ganz eigenen Charakter. Die Idealform des Kornes nähert sich nun der Kugel. Die Mannigfaltigkeit wird nur durch die Vorgeschichte verursacht, d. h. durch den Charakter, welcher der betreffenden Schneeschicht im Augenblick des beginnenden Schmelzwassereinflusses zukam. Flüssigkeitsfilme um Körner können naturgemäß nicht in die Morphologie mit einbezogen werden. Dennoch bilden sich beim Naßschnee ganz selbständige Kornformen aus, weil ja meist schon kurze Zeit nach dem Schmelzen die Temperaturen wieder etwas sinken (täglicher Gang) und so das an der Oberfläche haftende Wasser gefriert (und zwar mit derselben kristallographischen Orientierung wie das Hauptkorn).

Da die Oberflächenspannung des Wassers rasch eine weitgehende Nivellierung der Kornformen bewirkt, seien nur noch drei Gruppen unterschieden:

a) allseitig runde Körner;
b) durch konvexe und ebene Flächen begrenzte Körner;
c) neben ebenen und konvexen Flächen deutlicher Anteil konkaver Flächen, inklusive treppenförmige Hohlräume.

Bei dieser Art der Metamorphose — im Gegensatz zur reinen Sublimationsmetamorphose — ist die Genesis jedes Kornes klar, indem Vieldeutigkeiten ganz ausgeschaltet sind. Eine eingehendere Gliederung des Naßschnees hat sich nicht zuletzt aus diesem Grunde als wenig zweckmäßig erwiesen.

Teilweise abgerundete Becher, sei es durch Abschmelzen oder Anlagerung durch Gefrieren, gehören zu c. Werden die Hohlräume ganz gefüllt, so gehen sie über in Formen der Gruppe b und schließlich, nach vollständiger Abrundung, der Gruppe a. Prismatische oder isometrische Körner mit gut ausgebildeten Kristallformen können ihren früheren Habitus oft noch recht lange erraten lassen (b), ehe sie ganz abgerundet werden (a). Auch die runden Körner zeigen den Einfluß des Wassers sehr deutlich, so daß eine Unterscheidung in gefrorenem Zustand von Trockenschneekörnern leicht möglich ist. Dies geschieht weniger durch die Einzelform als durch die Art der Aggregation (siehe Seite 12).

Betrachtet man die Profilaufnahmen, so fällt sofort auf, wie lange nach dem Einsetzen der Abschmelzperiode noch Körner der Gruppe b und sogar c gefunden werden können. Im letzten Profil vom 16. Juni (8 Wochen nach dem ersten Naßschneeprofil), aufgenommen bei teilweise ausgeapertem Versuchsfeld, ließen sich im Fundament von 10 Körnern immer noch 3 als ehemalige Becher identifizieren. Die örtlichen Einflüsse, die von kleinen Unregelmäßigkeiten herrühren (Staulagen, Schmelzwasserseen usw.), sind nun allerdings so groß, daß die Profile kaum mehr parallelisiert werden können. Bedeutsam ist nur die Tatsache, daß hochmetamorpher Schnee noch lange nach dem Einsetzen des Schmelzwassereinflusses seinen Charakter (besonders in struktureller und textureller Beziehung) beibehalten kann, selbst wenn er mit Wasser gesättigt ist.

Ebenfalls überraschend waren die unter dem Mikroskop bestimmten Korngrößen der Einkristalle. Werte von mehreren Millimetern wurden nur bei ehemaligen Bechern gefunden (maximal 4 mm). Die Größe der runden Körner lag immer bei 1—1,5 bis maximal 2 mm. Dies hängt zusammen mit der Art des nun herrschenden Kornwachstums. Eine Massenzunahme des Einkristalls findet nur dann statt, wenn Schmelz- und Gefrier-

vorgänge rhythmisch wechseln (Tag—Nacht), so daß sich immer wieder einzelne Schalen anlagern können. Dieser Zustand dauert jedoch in unserem Klima normalerweise nur kurze Zeit, bis der Materialverlust durch Abschmelzen endgültig überwiegt.

Die Korngrößenverteilung innerhalb desselben Profils hängt, außer vom Aufbau des ursprünglichen Trockenschneeprofils, weitgehend von der Art des Schmelzwasserabflusses ab, besonders bei Lagen unter Hangeinfluß. Wie zahlreiche Beobachtungen zeigten, fließt dabei der Hauptanteil des Wassers in wenigen Horizonten ab, vor allem an der Oberfläche, in den bodennächsten Schichten und über Stauhorizonten (Eislamellen). Diese wassergesättigten Lagen sind untereinander durch zahlreiche vertikale Kanäle (eventuell bis Eislamellen) verbunden, die den Zusammenhang vermitteln.[1]) Die Anlage der Abflußwege läßt sich am besten in gefrorenem Zustand studieren. Die gröbsten Körner wurden immer in der Boden- und Oberflächenschicht gefunden.

III. Phänomenologie des Gefüges.

1. Über die Beziehungen Einzelkorn — Gefüge während der Metamorphose.

Eine umfassende Gefügeanalyse des Schnees, die als Bedingung gelten muß, wenn man etwas tieferen Einblick in das Zusammenspiel der Wandlungen und Verwandlungen innerhalb der Schneedecke erhalten will, hat sich nicht nur mit der Morphologie des Einkristalls, sondern — als Strukturanalyse — auch mit der Korngrößenverteilung und den Verwachsungsverhältnissen, sowie — als Texturanalyse — mit der Gefügeanisotropie und den Eigenschaften des Porenhohlraumes auseinanderzusetzen. Jedes dieser Gebiete besitzt seine eigene Arbeitsmethodik, die meist von Nachbargebieten übernommen und für die speziellen Anforderungen des Materials Schnee modifiziert werden kann. Als Beispiel wird dies anschließend für die Untersuchung der Verwachsungsverhältnisse durchgeführt (Kap. IV). Es geht jedoch selbst bei der bis jetzt angewandten Betrachtungsweise, bei welcher das Hauptgewicht auf direkter Naturbeobachtung lag, nicht an, das einzelne Korn unbekümmert aus dem Aggregat herauszulösen und für sich zu betrachten; denn es gibt eine Phänomenologie des Gefüges, die erkennen läßt, daß dem Verband ebensosehr ein ausgeprägter Eigencharakter zukommt, wie der Gestalt des einzelnen Kornes. Die gegenseitige Abhängigkeit erweist sich als so eng, daß manche Frage des einen Bereichs ihre Antwort erst im andern findet. Nur deshalb wurde in unserem Falle die Morphologie des Einkristalles bevorzugt, weil diese einer quantitativen Erfassung zugänglicher schien. Doch kann aus den angeführten Gründen nicht darauf verzichtet werden, auf die enge Zusammengehörigkeit hinzuweisen. Um dies zu bekräftigen, seien jene Beobachtungen und Ueberlegungen über den phänomenologischen Charakter des Kornverbandes mitgeteilt, die sich gleichzeitig mit den Studien der Kornformen ergaben — einige spärliche Messungen als zusätzliche Stütze.

Genau so, wie es während des Ablaufes der Metamorphose bzw. eines bestimmten Metamorphoseastes eine gesetzmäßige Veränderung der Kornform gibt, gibt es gleichzeitig auch eine gesetzmäßige Veränderung der Verbandsverhältnisse, die sich schon makroskopisch sehr deutlich abzeichnet. Als Beispiel sei anschließend die Auswirkung der morphologisch konstruktiven Metamorphose auf den Habitus des Aggregates skiz-

---

[1]) Vgl. z. B. auch die Beobachtungen von R. P. Sharp (1951).

ziert. Der folgende Abschnitt soll dann grundsätzlich über die Möglichkeiten einer phänomenologischen Erfassung aller Schneegefüge Auskunft geben, verbunden mit dem Versuch einer systematischen Nomenklatur.

2. Struktur und Textur hochmetamorpher Schneearten.

Es sei gleich das Endergebnis der morphologisch konstruktiven Metamorphose vorweggenommen: der Verband eines Schnees, der ausschließlich aus Becherformen besteht. Kennzeichnend ist die in jeder Beziehung ausgesprochene Anisotropie des Verbandes. Während bei einem normalen rundkörnigen Altschnee mit beendeter morphologisch destruktiver Metamorphose die Kontaktflächen der Körner im Raume beliebig angeordnet sind, herrscht nun im Gegensatz dazu meist eine streng gesetzmäßige Verteilung. Im Extremfall stehen in der horizontalen Schneedecke vertikale Säulen ohne jede seitliche Verbindung nebeneinander, die durch eine einfache Kette ebenfalls senkrecht stehender Becher (c-Achse) aufgebaut werden. Eigenartigerweise fallen sehr oft die c-Achsen aufeinanderfolgender Becher nicht genau zusammen, sondern die Becher sind leicht gegeneinander verdreht, so daß die einzelnen Säulen in sich schraubenartig gewunden erscheinen. Die Kontaktflächen stehen alle nahezu horizontal, weshalb die Stabilität des Gerüstes in der Vertikalen viel höher ist als in der Horizontalen. Man erkennt diese Eigenart hochmetamorpher Schneefundamente in der Natur sehr schön: Selbst dezimetermächtige rein becherförmige Bodenschichten vermögen die große Ueberlagerung ganzer Schneedecken ohne weiteres zu tragen, d. h. bei ungestörtem Ablauf der Metamorphose in einer horizontalen Schicht — auch bei stärkster Umkristallisation — besteht nicht der geringste Anlaß zu einem Strukturkollaps. Dies gilt selbst dort, wo jedes Anzeichen einer Bogenstruktur gänzlich fehlt (Erklärung durch freitragende Gewölbe). Zerstört man jedoch die Säulen, z. B. mit der Hand, dann fällt das ganze Gefüge in sich zusammen («Schwimmschnee»), weil die Becher nur auf zwei Seiten eingespannt und keine seitlichen Verknüpfungen (Retikularstruktur) vorhanden sind. Schwimmschneefundamente werden deshalb erst dann gefährdet, wenn entweder tangentiale Komponenten beanspruchender Kräfte (z. B. bei Zugspannungen in Hanglagen) oder plötzliche zusätzliche (künstliche) Belastungen hinzutreten.

Den Weg, auf welchem sich das Gefüge einer hochmetamorphen Schneeschicht nach und nach herausbildet, erkennt man am besten, wenn man statistische Messungen der c-Achsenlage verschiedener Umwandlungsstadien miteinander vergleicht. Leider konnten keine Untersuchungen über die Gefügeregelung mit dem Universaldrehtisch durchgeführt werden, obschon die Frage der Gefügewandlungen während der Metamorphose nur auf diesem Wege lösbar wären. Hingegen wurden, um wenigstens eine erste Aussage zu erhalten, in orientierten Schnitten Azimutmessungen von $n\gamma'$ durchgeführt (Fig. 15 bis 18).

Die Regelungsdiagramme Figuren 15—18 stammen aus Vertikalebenen. Figur 17 entspricht einer Schneesorte mittlerer Umkristallisation (Schicht c am 1. April) und zeigt bereits deutlich die Bevorzugung der vertikalen und horizontalen Lagen der c-Achsen. Die Probe für Figur 15 wurde früher (16. Februar, Schicht b), aber einer tieferen und stärker metamorphen Schicht entnommen. Sie ergab ein wesentlich ausgeprägteres Maximum in der Senkrechten; in der Nähe der s-Fläche sind dafür nur noch kleine Nebenmaxima vorhanden. Aus derselben Schicht wurde am 1. April das Diagramm der Figur 16 gewonnen. Während die Kornformen nahezu unverändert blieben, läßt sich dennoch eine gesteigerte Anisotropie feststellen; besonders deutlich sind jetzt die Nebenmaxima nahe bei s. Figur 18, von einem Schnee, der fast ausschließlich aus Becherformen bestand, gibt dasselbe Bild, nur noch gesteigert.

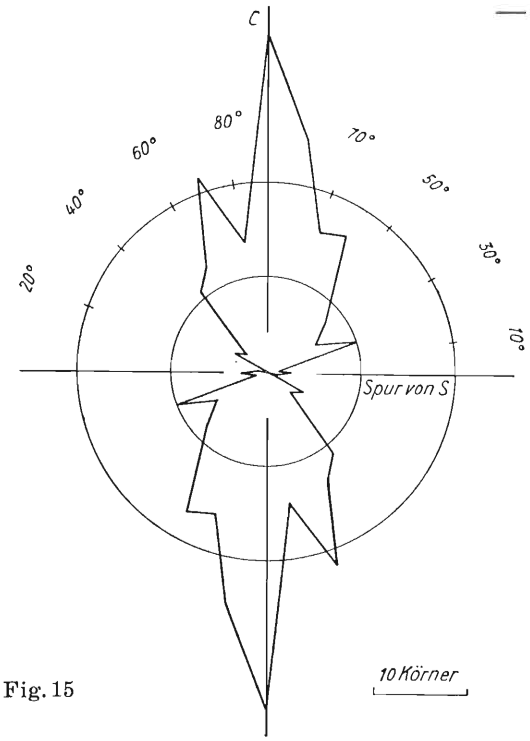


Fig. 15

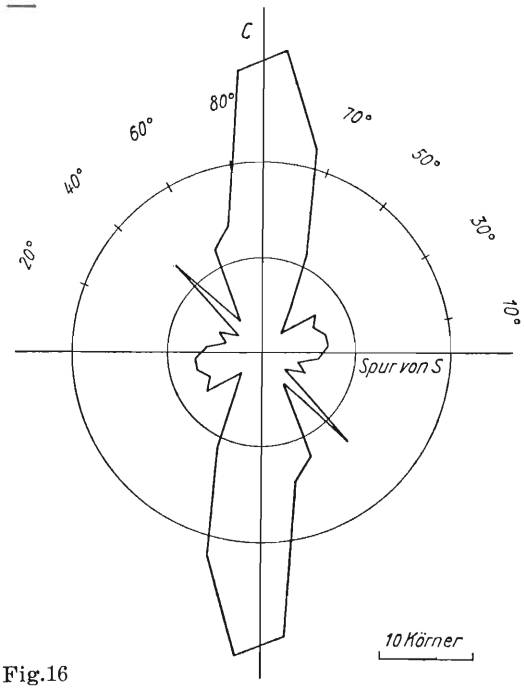


Fig. 16

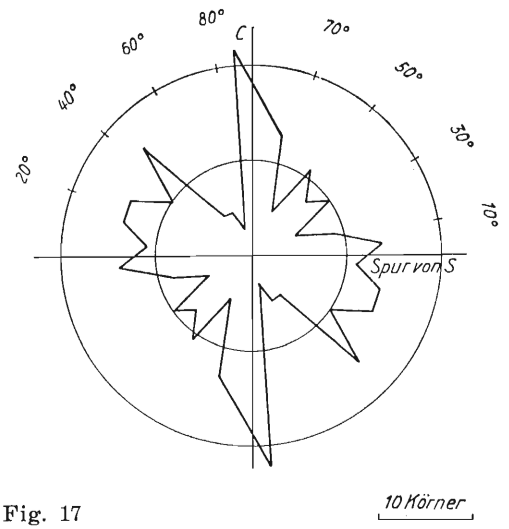


Fig. 17

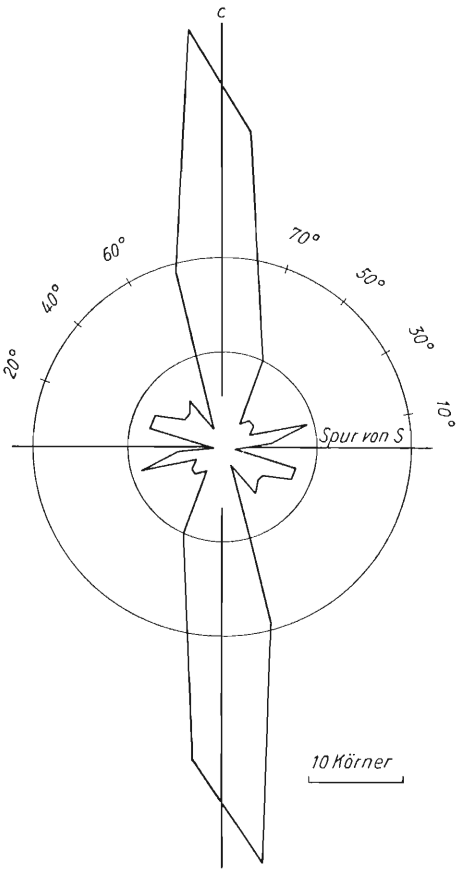


Fig. 15: Schicht b am 16. Februar 1949. Vertikalschnitt. Kornformen: 1 △, 1 ∧, 4 ■, 2 ◠, 2•, d 1 mm. s: Schichtfläche. c: Lot.

Fig. 16: Schicht b am 1. April 1949. Vertikalschnitt. Kornformen: 1 ∧, 5 ■, 1 ◠, 3 •, d 1—1,5 mm. s: Schichtfläche. c: Lot.

Fig. 17: Schicht c am 1. April 1949. Vertikalschnitt. Kornformen: 4 ■, 2 ◠, 4 •, d 0,5—1 mm. s: Schichtfläche. c: Lot.

Fig. 18: Vertikalschnitt durch eine sehr hochmetamorphe Schneeschicht (außerhalb der Profilserie). s: Schichtfläche, c: Lot.

Fig. 15 bis 18: Regelungsdiagramme für $n\gamma'$ in Vertikal- und Horizontalschnitten verschiedener Schneearten. In Vertikalschnitten entspricht das eingemessene $n\gamma'$ bei diesen hochmetamorphen Schneearten nahezu der kristallographischen c-Achse (außerordentliche Welle ε). Die Auszählung wurde in Sektoren von 10° zu 10° vorgenommen, wobei sich notwendigerweise Zentrosymmetrie ergibt.

Die straffe Regelung kann grundsätzlich auf zwei Wegen verwirklicht werden:

a) durch Eindrehen der Körner in die bevorzugte Richtung durch irgendwelche Kräfte;
b) durch Keimselektion, d. h. durch Anisotropie der Wachstumsbedingungen.

In unserem Falle ist die zweite Möglichkeit viel naheliegender, da die Veränderungen mit Materialverschiebungen und nicht mit mechanischen Deformationen verknüpft sind. Diese Vermutung wird verstärkt durch die Beobachtung, daß die Körner mit beliebiger Achsenlage — außerhalb der Maximabereiche — fast ausnahmslos klein und stark abgerundet sind, im Gegensatz zu den großen idiomorphen Bechern. Demnach würden in der horizontalen Schneedecke alle jene Körner, deren c-Achsen nahezu parallel bzw. senkrecht zum Materialstrom (Lot) stehen, weiterwachsen auf Kosten der Körner mit beliebiger Orientierung. Damit stimmt auch die Tatsache überein, daß die Kornzahl pro Volumeneinheit — repräsentiert durch die spezifische Kornzahl in der Gefügeanalyse (siehe Seite 38) — während der morphologisch konstruktiven Metamorphose kontinuierlich abnimmt (normal bis zirka auf den 5., im Extremfall auf den 20. Teil).

Es zeigt sich bei näherer Betrachtung, daß das Hauptmaximum in der Vertikalen bei Schneesorten mit überwiegend Hohlformen ausschließlich durch basale Becher hervorgerufen wird, während bei den prismatischen Bechern die c-Achsen meist annähernd waagrecht stehen. An sich wäre damit eine Erklärungsmöglichkeit gegeben für die Frage, wieso bei einem Becher einmal die Hexagyre, ein andermal eine Digyre zur Symmetrieachse des Hohlraumes wird (je nach der Orientierung in bezug auf den Materialstrom). Erschwerend wirkt sich allerdings die Tatsache aus, daß bei allen untersuchten Schneearten die Zahl der basalen Becher weit größer war als die Zahl der prismatischen, während nach der oben gegebenen Deutung beide etwa gleich häufig sein sollten. Hingegen ist es leicht verständlich, wieso in der Schneedecke auch nur einigermaßen vollständige kombinierte Becher ganz fehlen: Solche Individuen können nur dort entstehen, wo die anisotropen Kristalle in einer in bezug auf die Wachstumsbedingungen isotropen Umgebung entstehen, da die Materialanlagerungen an alle Basis- bzw. Prismenflächen gleichmäßig erfolgen müssen. Sie sind deshalb die typischen Formen des Spaltenreifs.

Etwas eigenartig ist ferner, daß die Schnittgerade der s-Fläche mit der betreffenden Vertikalebene nicht nahezu Symmetrieachse des Maximums der prismatischen Becher ist, wie es das Lot für jenes der basalen Becher tatsächlich darstellt. Es scheint eine Aufspaltung in zwei bis mehrere Nebenmaxima stattzufinden, die zirka 10—30° beidseitig aus der Horizontalebene herausgedreht sind (besonders deutlich in Fig. 18). Vielleicht könnte diese Erscheinung am ehesten mit gesetzmäßigen Verwachsungen in Zusammenhang gebracht werden. Doch werden gerade solche Fragen erst dann befriedigend zu lösen sein, wenn zahlreiche Messungen im Raume vorliegen. Die mitgeteilten Diagramme wurden immer nur einzelnen Schnitten entnommen, die gerade bei den hochmetamorphen Schneesorten aus Gründen der Größe kaum mehr als 100 bis 200 Körner enthalten.

Die Frage, ob in einer hochmetamorphen Schneeschicht die Oeffnungen der Becher (d. h. die gestuften Basis- bzw. Prismenflächen bei den basalen bzw. prismatischen Bechern vorwiegend nach oben oder nach unten gerichtet sind, läßt sich nicht grundsätzlich beantworten, da die Anordnung der polaren Achse des phänomenologisch hemimorphen Kristalles von speziellen Bedingungen abhängig zu sein scheint. Immerhin ist sicher nur die Art des Materialstromes maßgebend. Einige Beobachtungen mögen ein erstes ungefähres Bild der Zusammenhänge vermitteln.

In einem normalen Schneeprofil, das nicht durch Eislamellen usw. gestört wird und das nicht allzuhohen Temperaturgradienten ausgesetzt war, stehen die basalen Becher mit Vorliebe auf der Spitze, Oeffnung gegen oben; die prismatischen öffnen sich ebenfalls gegen oben, d. h. der einspringende Teil des Kornes ist vom Materialstrom weg-

gewendet, und damit ist die Hauptwachstumsrichtung — die Richtung, in welcher die neuen Stufen angesetzt werden — mit der Richtung der Materialzufuhr gleichlaufend.

Treten hingegen innerhalb der Schneedecke Stauhorizonte (z. B. Eislamellen) auf, welche die freie Konvektion unterbrechen, dann wird die Wachstumsrichtung umgekehrt, so daß die Becher nach unten wachsen. Man erkennt dies sehr schön auch, wenn man eine Schneesäule künstlich durch horizontale Lamellen unterteilt. Ebenfalls eine Umkehrung scheint bei sehr raschem Wachstum der Becher (hohe Temperaturgradienten) stattzufinden — in der Natur nachgewiesen durch künstliche Verminderung der Schneehöhe und tiefe Lufttemperaturen — was keineswegs verwundert, wenn man bedenkt, daß z. B. beim Oberflächenreif die Kristalle immer von der Unterlage weg gegen die Richtung der Stoffzufuhr wachsen, auch wenn die räumlichen Verhältnisse das Gegenteil gestatten würden (z. B. Rauhreif unter starkem Windeinfluß an freistehenden Stangen usw.). Züchtungsversuche im Laboratorium zeigten, daß bei WG $<$ 0,02 mm/Std. die Kristalle in der Richtung des Materialstromes wachsen, bei höheren Geschwindigkeiten aber dagegen.

Uebertragen wir nun diese Gefügebetrachtungen auf eine ganze Schneedecke, so ergeben sich noch einige interessante Gesichtspunkte. Eine Schichtgrenze kommt ja immer durch einen Gefügehiatus zustande. Bei Neuschnee oder rundkörnigem Altschnee (nur morphologisch destruktive Metamorphose) besteht er meist in verschiedenen Ablagerungstexturen oder Packungsunterschieden, die sich während des Gerüstaufbaues noch sehr lange bemerkbar machen können, bei hochmetamorphem idiomorpherem Schnee hingegen in Regelungs- und Kornformdifferenzen. Während einer Schneedeckenentwicklung kann man nun sehr oft beobachten, daß Schichtgrenzen langsam verschwinden, andere verstärkt werden. Differenzierung einer homogenen Schicht in zwei scharf getrennte Teilräume kommt jedoch normalerweise nicht vor. Diese Schwankungen in der Deutlichkeit der Schichttrennungen ergeben sich in jedem Fall aus dem gegenseitigen Verhältnis der verschiedenen Metamorphosearten und der jeweiligen Intensität. Daß Schichtgrenzen auch bei hochmetamorphem Schnee sich nach und nach verlieren können, zeigte sich fast in jedem der untersuchten Profile (Tafel I).

In einer ursprünglich homogenen Schicht ist die Untergrenze als bodennäherer Teil meist stärker umgewandelt und besitzt deutlich andere Kornformen als die Obergrenze. Beide Extremwerte gehen innerhalb der Schicht langsam ineinander über. Zudem findet an der Grenze zum nächsttieferen bzw. nächsthöheren Horizont eine Angleichung statt, die besonders dann auffallend ist, wenn sich die Schneesorten den Gleichgewichtszuständen genähert haben. Diese Eigentümlichkeit ist einfach dadurch zu erklären, daß bei mehreren Zentimeter dicken Schichten nicht über den ganzen Bereich in der Vertikalen dieselben physikalischen Bedingungen herrschen, so daß in jeder Höhe wieder eine etwas verschiedene Entwicklung stattfindet. Im Idealfall, bei vollkommen linearem Temperaturgradienten, sollte dies eigentlich nicht auftreten; doch ist ein solcher Zustand in der Natur über längere Zeiträume sicher nie verwirklicht. Auch die Schichtgrenze, als das Abbild der Wechselbeziehungen zwischen zwei sich berührenden Horizonten, macht alle Wandlungen mit, die durch den Verlauf der Metamorphose diktiert werden. Schmelzwassereinfluß ändert schlagartig die Verhältnisse, da nun die Bedeutung der Schwerkraft viel stärker hervortritt.

Noch eine Bemerkung zur Metamorphose der Textur: Während die Struktur, besonders die Kornform, eine eindeutige Diaphtorese zeigen kann, fehlt sie der Textur fast ganz. Nicht nur die morphologisch destruktive, sondern auch die konstruktive Metamorphose ist in dieser Beziehung in gewissem Sinne irreversibel. Bei einer hochmetamorphen Schneeschicht mit ausgesprochener Regelung werden die Kristallachsen durch Stoffumlagerungen kaum mehr verschoben. Zur Bildung neuer Körner mit beliebiger

Lage besteht keine Ursache, da die Keime fehlen. Füllung oder Abrundung der Becher hat deshab keinen Einfluß auf die Regelung. Dies ist der Grund, wieso ein ehemals hochmetamorpher Schnee, der stark regressiven Tendenzen verfallen ist, auch dann noch, wenn er keinerlei idiomorphe Körner mehr enthält, seine Herkunft nicht verbergen kann, sei es im Regelungsdiagramm oder makroskopisch in der Art der Porosität (Reste der Säulenstruktur). Dies gilt nicht nur für Trockenschnee, sondern in besonderem Maße auch noch während des Abbaues durch Schmelzwasser.

Schon die Bemerkungen über die Schichtgrenzen zeigten, daß während der Metamorphose einer ganzen Schneedecke die einzelnen Schichten nicht mehr völlig getrennt voneinander betrachtet werden dürfen. Die gegenseitige Abhängigkeit kommt vor allem bei den Substanzverschiebungen zum Ausdruck, da die Konvektion über die Schichtgrenzen hinweggreift. In einer Normaldecke, wie sie in unserem Klima in bestimmter Höhenlage fast immer gefunden werden kann — ein Fundament mit hochmetamorphem Schnee, in der Mittelschicht feinkörnigere Arten mit geringerem Anteil idiomorpher Körner und an der Oberfläche junge Ablagerungen —, findet man die größten Raumgewichte in mittleren Horizonten. Die Basis hat durch die Umkristallisation schon beträchtlich Substanz an die darüberliegenden Schichten verloren, während sich an der Oberfläche die Setzung weniger stark auswirken kann.

Es ergibt sich also, daß nicht jene Schichten in der Metamorphose am weitesten fortgeschritten sind, die im Gesamten am meisten Stoff an ihre Körner anlagern konnten; sondern zur Erreichung eines Stadiums starker Umkristallisation, in dem ausgesprochene Regelung implicite enthalten ist, gehört ja weitgehende Kornselektion. Erst beträchtliche Substanzverluste können jene Platzverhältnisse schaffen, die Voraussetzung für die Bildung hochmetamorphen Schnees sind.

Alle hier mitgeteilten Untersuchungen und Beobachtungen beziehen sich auf die horizontale ungestörte Schneedecke, welcher die einfachsten und übersichtlichsten Bedingungen zukommen. Welche Komplikationen bei geneigter Unterlage hinzutreten und wie sie sich auswirken, läßt sich nicht ohne weiteres abschätzen. Hier werden nur, wenn einmal die Grundzüge vom ebenen Fall her bekannt sind, genaueste Beobachtungen weiterhelfen. Besonders deutliche Differenzen sind wohl bei Texturbetrachtungen zu erwarten.

Zum Schluß dieser Struktur- und Texturbetrachtungen sei auf einen Umstand hingewiesen, der immer noch zu wenig beachtet wird. Die morphologisch konstruktive Metamorphose entspricht einem ausgeprägten Ordnungsprinzip. Ausgehend von einem ungeregelten Gerüst führt sie zu einem Gefüge höherer Ordnung, wobei jedoch die Isotropie eingebüßt wird. Die Richtungsabhängigkeit darf bei keiner Betrachtung gerüstbedingter Eigenschaften außer acht gelassen werden. Die Gefügeanisotropie ist eines der wesentlichsten Elemente des hochmetamorphen becherförmigen Schnees, im Gegensatz zum rundkörnigen Altschnee.

3. Die wichtigsten Gefügetypen und ihre Beziehungen zur Metamorphose.

Im Gegensatz zum vorangehenden Abschnitt, der sich nur mit dem Gefüge hochmetamorpher Schneearten beschäftigte, soll hier versucht werden, eine Nomenklatur wichtiger Metamorphosestadien — immer von rein phänomenologischer Betrachtungsweise ausgehend — zu geben. Sinn und Berechtigung der bildhaften Charakterisierung muß wohl kaum mehr näher erläutert werden, lassen sich doch damit, wenn streng umschriebene Begriffe verwendet werden, nicht nur augenblickliche Zustände genau kennzeichnen, sondern implicite auch die wichtigsten Anhaltspunkte über die Genesis geben.

Es seien im folgenden kurz jene Begriffe der allgemeinen Gefügekunde (inbesondere der Struktur) zusammengestellt, die sich auf den Schnee ohne weiteres übertragen lassen. Schärfere Abgrenzungen, weitere notwendige Gliederungen, eventuell Umdeutungen oder Neuschaffungen von Begriffen werden sich erst nach und nach im Laufe zahlreicher Naturbeobachtungen ergeben. Doch besteht im allgemeinen schon heute die Möglichkeit, die Großzahl der auftretenden Schneegefüge begrifflich zu erfassen.

Die Definitionen beziehen sich bereits auf den modifizierten Begriffsinhalt und wurden aus der Petrographie abgeleitet, und zwar mit der Bedeutung, die ihnen *P. Niggli* gab (1948).

A. DIE STRUKTUR.

Schnee bildet ein Retikulargefüge, das in der Regel monoschematisch ist, bei Naßschnee mit großem Schmelzwassereinfluß jedoch chorismatisch werden kann.

1. Monoschematische Retikularstrukturen.

Die wichtigsten Strukturen sind:

a) Frisch abgelagerter Neuschnee.

Sind die Kristalloide Schneesterne, so bilden sie ein gleichkörniges, dendritoid-sperriges Intersertalgefüge mit panidiomorphem, lepidoidem Charakter. Bei starkem Windeinfluß können Kristalloklasten vorwiegen. Nematoid wird die Struktur, wenn der Neuschnee hauptsächlich aus Prismen oder Nadeln besteht. Graupeln führen zu hypidiomorphen bis panxenomorphen, granoiden Strukturtypen. Meist sind die Strukturen gleichkörnig; war jedoch der Schneefall inhomogen (z. B. Sterne und Graupeln), so führt dies zu wechselkörnigen oder sogar porphyrischen Strukturen, wobei etwa die großen Graupeln die Porphyrkristalloide darstellen.

b) Schwach metamorpher, filziger Neuschnee.

Da nun amöbenartige Kristalloide das Bild bestimmen, muß die Struktur als dendritoid bezeichnet werden, deshalb hypidiomorph, lepidoid bis eventuell schwach nematoid, meist gleichkörnig. War jedoch der Neuschnee stark porphyrisch, so kann die Struktur serialporphyroid werden.

c) Rundkörniger Altschnee.

Nach beendeter morphologisch destruktiver Metamorphose liegen runde Resorptionskristalloide vor, deshalb panxenomorph und meist homöokristalloid, zunächst schwach nematoid, später rein granoid.

d) Rundkörniger Schnee mit einzelnen Prismen.

Beginnt sich die morphologisch konstruktive Metamorphose auszuwirken, so erhalten wir eigentliche Wachstumsgefüge. Obschon das Wachstum rein chymogen, über die molekulardisperse Phase erfolgte, können wir von einer echten Kristalloblastese sprechen, da mit Ausnahme der Höhlenreifbildungen immer eine gewisse Wachstumsbehinderung besteht.

Die Anfangsstufe muß hypidiomorph, granoblastisch bis schwach nematoblastisch genannt werden, homöoblastisch bis schwach heteroblastisch (durch einzelne Prismen vor allem serialporphyroblastisch).

e) Schnee, welcher nur aus vollständigen Prismen und Tafeln (Pv, Tv) besteht.

Sind alle runden Körner verschwunden, so wird der Schnee im Extremfall panidiomorph und vorwiegend nematoid (durch Tafeln eventuell schwach lepidoid) bis granoid. Normalerweise bleibt jedoch immer noch eine gewisse Wachstumsbehinderung spürbar (hypidiomorph, nemato- bis granoblastisch).

f) Hochmetamorpher Schnee mit beginnender Becherbildung.

Vorwiegend hypidiomorph (eventuell bis panidiomorph) und nematogranoblastisch, da durch Stoffumlagerungen meist einige Prismen abgerundet werden; meist serialporphyroblastisch. Die dendritischen Kristalloblasten führen nun langsam wieder zu einem sperrigen Intersertalgefüge.

g) Hochmetamorpher Schnee, nur aus Bechern bestehend.

Als Endform entsteht ein reines sperrig-dendritoides Intersertalgefüge, das jetzt wieder gleichkörnig, panidiomorph und nematoid ist.

Nur noch als Beispiel sollen zwei Spezialstrukturen erwähnt werden (sie würden sich beliebig vermehren lassen):

h) Nasser, ehemals hochmetamorpher Schnee.

Neben runden Körnern einzelne Becherrudimente noch erkennbar; deshalb ist die Struktur hypidiomorph, nematoid (eventuell schon bis granoid) und meist auch porphyroid, wobei die Becherrudimente die Porphyrkristalloide darstellen.

i) Oberflächenreif in rundkörnigem Altschnee.

Struktur hypidiomorph, porphyrisch mit den Reifkristallen als Porphyroiden. Sind die Reifformen zahlreicher, so ist die Struktur nematoid bis lepidoid, sonst aber granoid. Im ganzen ein porphyrisches, dendritoides Intersertalgefüge.

Kristalloklastische Strukturen finden sich im Schnee wohl nur selten (ausgenommen bei Neu- und Triebschnee), da die Rekristallisation in der Schneedecke rasch einsetzt. Höchstens bei plötzlichen Bruchbildungen wären sie etwa denkbar.

Auch kristalloplastische Strukturen besitzen geringe Bedeutung, was seinen Grund in der Gefügefreiheit hat. Zudem wären solche Strukturen von den kristalloblastischen kaum zu unterscheiden und gehen ohnehin bald in diese über. Wichtiger hingegen sind sie beim Eis.

2. Chorismatische Strukturen.

Chorismatische Strukturen findet man beim Schnee vor allem im Abbaustadium, wenn die Schichten wesentliche Mengen Eis, das durch Schmelzwasser gebildet wurde, enthalten. Einzelne Schmelzharsche oder Eislamellen brauchen noch nicht zu polyschematischen Strukturen zu führen. Erst wenn knauerartige Bildungen, vertikale und hangparallele Eisadern auftreten, zusammen mit schichtparallelen Eislamellen, wird das Gefüge grobgemengt, weil dann die Schichtgrenzen, deren Ursache früher im Strukturhiatus bestand, ihre Bedeutung verlieren. Es handelt sich nun um eigentliche Injektionstexturen.

Neben das Retikulargefüge des rundkörnigen Naßschnees tritt nun das panxenomorphe granoblastische Mosaikgefüge des Eises als selbständiger Strukturbereich. Zunächst bildet der Schnee als noch vorwiegend stereogenes Paläosom das Kyriosom mit granoider, panxenomorpher und homöokristalloider Struktur. Knauerartige, linsenförmige Verfestigungen (Hauptschnittebene meist parallel den Schichtgrenzen) führen zu

einem ophthalmitischen Gefüge. Zusammen mit den Eislamellen, -kanälen und -adern, dem Akyrosom, entsteht ein Stromatit (Lamellen überwiegend) bis Phlebit (Vertikalkanäle, hangparallele, verzweigte Adern, entstanden in Schmelzwasser- oder Regenrillen, vorwiegend). Später wird das Kyriosom oft durch das Eisgefüge dargestellt.

B. DIE TEXTUR.

Es sollen nur einige Gruppen von Texturtypen angeführt werden, die sich vor allem auf die Gefügeanisotropie beziehen.

a) Einrüttelungstexturen.

Neuschnee, der bei starkem Wind abgelagert wurde, besitzt eine mechanisch geregelte Lockertextur.

b) Setzungsgefüge.

Später entsteht durch die Setzung (Metamorphose, Schwerkraft) bei mehr oder weniger ruhendem Medium ein Setzungsgefüge, das von Einfluß ist auf die Ausbildung der Schichtung und damit der s-Flächen.

c) Interne Anlagerungstexturen.

Den Wachstumsgefügen, die bei einsetzender morphologisch konstruktiver Metamorphose ausgebildet werden, entsprechen gerichtete interne Anlagerungstexturen, wobei die Regelungsrichtung durch die Richtung des Materialstromes gegeben ist.

d) Deformationstexturen.

Steht die Schneeschicht unter dem Einfluß äußerer Kräfte (Zug, Druck, Scherung usw.), so entstehen geregelte Deformationstexturen, meist in Zusammenhang mit kristalloblastischen (bis höchstens kristalloplastischen) Strukturen.

e) Abbildungstexturen.

Im Verlauf der Metamorphose (besonders bei Diaphtorese) ist es möglich, daß interne Anlagerungstexturen trotz den Veränderungen der Wachstumsstruktur erhalten bleiben können (z. B. gefüllte Becher und Prismen mit dem Gefüge des hochmetamorphen, nur aus Hohlformen bestehenden Ausgangsschnees). Es handelt sich dann um kristalloblastische Abbildungstexturen.

f) Injektionstexturen.

Die polygenchorismatischen Texturen des Naßschnees mit Eislamellen entsprechen nicht nur formal, sondern auch genetisch den Injektionstexturen.

An sich läßt sich diese phänomenologische Betrachtungsweise des Schnees ebensoweit ausbauen wie die quantitativ analytische Behandlung im mikroskopischen bzw. physikalischen Bereich. Ihre spezielle Berechtigung beweist sie besonders dann, wenn sich die Aufgabe stellt, im Felde in kurzer Zeit den Charakter einer Schneedecke bzw. -schicht zu erfassen und zu kennzeichnen. Anderseits dürfen die Nachteile (z. B. beschränkte Anwendungsmöglichkeiten bei feineren Unterschieden und Veränderungen usw.) nicht übersehen werden.

Tabelle 2 gibt einen Ueberblick über die wichtigsten Strukturtypen und ihre gegenseitigen Beziehungen im Verlauf der Metamorphosen.

Tabelle 2:

Neuschnee → rundkörniger Altschnee → hochmetamorpher, becherförmiger Schnee

morphologisch destruktive Metamorphose

1a panidiomorph, lepideid, gleichkörnig

↓

1b hypidiomorph, lepidoid (bis nematoid), dendritoid, gleichkörnig

↓

1c panxenomorph, granoid, homöokristalloid

↓

1d hypidiomorph, granoblastisch (bis nematoblastisch), homöoblastisch (bis serialporphyroblastisch)

↓

1e panidiomorph, nematoid-granoid, gleichkörnig (bis hypidiomorph, nemato-granoblastisch)

↓

1f hypidiomorph, nemato-granoblastisch, dendritoblastisch, serialporphyro-blastisch

↓

1g panidiomorph, nematoid, dendritoid, gleichkörnig

morphologisch konstruktive

Die Diaphtorese führt strukturell zu analogen Bildern; die Unterschiede bleiben mehr auf Einzelkornform und Textur beschränkt. Die Normalentwicklung ist:

1g → 1e (nur gefüllte Becher) → 1d → 1c

IV. Analytische Behandlung des Gefüges.

1. Ziel und Zweck.

Es bleibt nun noch der Schritt vom Einzelkorn zum Aggregat und von der Phänomenologie zur Analyse. Es gilt, das Gefüge — oder wenigstens einen Ausschnitt daraus — ziffernmäßig so genau und umfassend wie möglich zu bestimmen. Dieses Vorgehen, das eine rein geometrische Charakterisierung des Ausgangsmaterials bezweckt, ist um so unumgänglicher, je genauere Auskunft über den physikalischen Zustand und das Verhalten einer bestimmten Schneeart gewünscht wird. Die in der Schneeforschung bisher übliche Art der Kennzeichnung nach Raumgewicht und Korngröße ($\gamma s, d$) — Rammwiderstand und Härte sind bereits Ergebnisse der Gerüsteigenschaften und lassen deshalb nur indirekte Schlüsse zu — genügt nur den ersten und einfachsten Anforderungen. Bei eingehenderen Untersuchungen, sei es in der Natur, sei es bei beliebig regulierbaren Bedingungen, wird man je länger je weniger darauf verzichten können, das Ausgangsmaterial auch geometrisch — nach seinen Gerüsteigenschaften — zu kennzeichnen.

Eine moderne und sehr umfassende Darstellung der allgemeinen Gefügekunde wurde kürzlich von *Sander* (1950) gegeben. Bei Gefügeuntersuchungen an Gesteinen liegt das Hauptgewicht heute auf der Achsenverteilungsanalyse, d. h. der Analyse der räumlichen Lage der Gefügebausteine, wobei für den Einzelbaustein seine kristallographischen Hauptachsen das Bezugselement abgeben. Daneben aber bestehen für ein Korngefüge eine ganze Reihe weiterer und teilweise sehr wichtiger Kennziffern, welche von der Drehlage, der kristallographischen Orientierung der Einzelkörner, absehen. In der vorliegenden Arbeit wurde nun dieser zweite Teil der Gefügeuntersuchungen (Analyse der Gefüge ohne Berücksichtigung ihrer eventuellen Regelung) berücksichtigt, und zwar aus folgenden Gründen:

Schnee als Zwei- bis Dreiphasensystem stellt immer ein sehr poröses Gefüge dar, bei welchem selten mehr als die Hälfte und sehr oft weniger als ein Zehntel des Volumens durch Eis aufgebaut wird. Je größer aber die Porosität eines Gefüges, das ein aus Einzelkörnern bestehendes Gerüst enthält, ist, desto weniger starr sind diese Einzelkörner eingespannt, d. h. desto spärlicher werden bei mechanischen Deformationen Translationen, interkristalline Gleitungen, zu erwarten sein. Die Hauptveränderungen sind nun an die Korngrenzen, die Diskontinuitätsflächen erster Ordnung, gebunden. Deshalb kommen, besonders auch wenn man das mechanische Verhalten im Auge behält, den Kornbindungsverhältnissen (Verwachsungen usw.) mindestens ebensogroße Bedeutung zu wie der kristallographischen Orientierung der Einzelkörner.

Bei porösen Gefügen muß zudem auch der Raum, welcher von den molekulardispersen Phasen eingenommen wird, in die Bestimmungen mit einbezogen werden. Auch diese Aufgabe, die besonders bei manchen kolloidchemischen Fragen im Vordergrund steht, konnte hier nur angeschnitten werden (vgl. auch z. B. die Zusammenstellung von *Zimens*, 1944).

2. Das Prinzip der Gefügeanalyse.

Sander (1950) gibt über die Kennziffern von Korngefügen (abgesehen von der Drehlage der Körner) etwa folgenden Ueberblick (gekürzt):

I. Offenheitsgrad $o = \dfrac{\text{Anzahl aller Körner}}{\text{Anzahl der einander berührenden Körner}}$.

II. Proximitätsziffer N: Mittlere Zahl der ein Korn berührenden Nachbarkörner.

III. Gliedrigkeit Gl gibt für eine bestimmte Kornart das Verhältnis Querschnittsfläche: Kontur in der betreffenden Längeneinheit.

IV. Körnigkeit x erhält man aus der Zahl der Kornquerschnitte pro Einheitsfläche und dem prozentualen Anteil dieser Querschnittsflächen an der gesamten Schnittfläche.

V. Mittlere Eigenförmigkeit F als ein Maß für die Idiomorphie einer Kornart.

Für die Gefügeanalyse des Schnees wurden (ohne Kenntnis der Sanderschen Werte) etwas abweichende Gefügeziffern definiert, die sich jedoch teilweise ohne weiteres in jene von Sander umrechnen lassen. Die Abweichungen ergeben sich vor allem daraus, daß beim Schnee den Bindungsverhältnissen zwischen den Gefügebausteinen viel größeres Gewicht beizumessen ist als bei Gesteinen.

Es wurden folgende 10 Gefügeziffern verwendet:

1. Porenvolumen Vp (bzw. Eisvolumen Vs), entspricht dem prozentualen Anteil Luft am Gesamtvolumen Schnee (invers zum Raumgewicht γs), berechnet aus der Schnittfläche Hohlraum: Gesamtfläche (in %).

2. Spezifische Kornzahl Z, gibt die Zahl der Querschnitte von Einkristallen pro cm^2 Schnittfläche (in cm^{-2}).
3. Bindungszahl BZ, entspricht der mittleren Zahl der Körner, welche mit einem Korn (Einkristall) verbunden sind (analog der Koordinationszahl KZ im Raum).
4. Kornbindungsmaß KM, stellt als Mittelwert für einen Kornquerschnitt das Verhältnis von an andere Einkristalle gebundener Strecke zum gesamten Umfang dar, als Maß für die mittlere Stärke der Bindung pro Korn (oder anders ausgedrückt: Summe der Bindungsstrecken/Umfangssumme aller Körner).
5. Kornfläche Fk: mittlere Größe der Schnittflächen von Kornquerschnitten in mm^2; entsprechend Korndurchmesser dk: dem Durchmesser des mit Fk flächengleichen Kreises in mm.
6. Kornumfang Uk: mittlerer Umfang eines Kornquerschnitts in mm; entsprechend Ur: Umfang des mit Fk flächengleichen Kreises in mm ($dk \cdot \pi$).
7. Bindungsstrecke absolut Bk, die mittlere Bindungsstrecke pro Kornquerschnitt in mm, d. h. das Absolutmaß der mittleren Stärke der Bindung pro Korn.
8. Spezifische Bindungsstrecke BS, als Summe der Bindungsstrecken (in cm) pro cm^2 der geschnittenen Schneefläche (in cm^{-1}); ergibt sich z. B. als Produkt der spezifischen Kornzahl Z und der absoluten Bindungsstrecke Bk.
9. Kornformkoeffizient ψk: Ur/Uk, als Maß der Abweichung der Querschnittsform vom Kreis.
10. Umfangskoeffizient der Eisfläche μs: Us/Uh, wobei
    Us: Umfang des mit der gesamten geschnittenen Eisfläche ($Fk \cdot Z$) flächengleichen Kreises,
    Uh: Gesamtlänge der Grenze Eis–Luft;
    und entsprechend Umfangskoeffizient des Hohlraumes μp : Up/Uh, wobei
    Up: Umfang des mit der Gesamtfläche der angeschnittenen Poren flächengleichen Kreises.

Das Porenvolumen stellt für den Schnee eine Fundamentalgröße dar, da es direkt oder indirekt fast mit allen Gefügeziffern gekoppelt ist und deshalb allein schon recht viel über die Eigenschaften der betreffenden Schneesorte auszusagen vermag. Die übrigen Werte lassen sich grob in zwei Gruppen gliedern, in solche, die vor allem die Verwachsungsverhältnisse zu erfassen suchen (3, 4, 7, 8) und in solche, die sich mehr mit dem Einzelkorn befassen (5, 6, 9). Die Umfangskoeffizienten (10) entsprechen etwa der Gliedrigkeit Sanders, nur wurden sie als dimensionslose Werte definiert.

Es leuchtet ein, daß es für manche spezielle Problemstellungen wenig Sinn hat, am Untersuchungsmaterial jeweils sämtliche Gefügewerte zu bestimmen; doch werden sich die zulässigen Vereinfachungen oft erst nach einigen Totalanalysen ergeben.

Es sollen nun zunächst einige vollständige Analysen mitgeteilt werden, um die Beziehungen der Gefügewerte zueinander empirisch abzuklären.

3. Meßresultate und Beziehungen der Gefügewerte untereinander.

Die Gefügewerte wurden aus Dünnschnitten gewonnen, hergestellt nach den Methoden von *H. Bader* (1939) und *M. de Quervain* (1948). Ausgemessen wurden pro Schneeart je nach der Korngröße 4—9 Photographien (Vergrößerungen beim Format 6×9 cm zirka 15—35fach), und zwar jede Stellung gleichzeitig mit parallelen und ge-

kreuzten Nicols (zudem eventuell in verschiedenen Stellungen). Bei nicht allzu grobkörnigem Schnee (hochmetamorphe Sorten) genügt eine Schnittfläche von 2—4 cm^2, um einige hundert Kornquerschnitte zu erhalten. Bei der Aufnahme der Mikrophotos mußte darauf geachtet werden, daß der Tiefenschärfebereich möglichst klein blieb, um die Identifizierung der effektiven Schnittflächen nicht unnötig zu erschweren. Dann wurden die angeschnittenen Flächen der Körner auf eine Pause umgezeichnet. Ein Vergleich der Bilder mit parallelen und gekreuzten Nicols gestattete es, die Kontaktstellen zwischen zwei Einkristallen (Bindungsstrecke, Schnittkurve zwischen Bindungsfläche und Schnittebene) einzuzeichnen. Sämtliche Bestimmungen ließen sich dann an diesen Pausen durchführen. Damit kann einerseits die Arbeitszeit bei tiefen Temperaturen stark abgekürzt werden; anderseits werden Größen meßbar, die im Mikroskop nicht zugänglich wären (Längen).

Direkt gemessen wurden folgende Werte:

a) Größe der angeschnittenen Eisfläche (Planimeter);
b) Größe der gesamten Schneefläche (Planimeter);
c) Länge der Grenze Eis–Luft (Kurvimeter);
d) Gesamtlänge aller Bindungsstrecken (Kurvimeter);
e) Zahl der angeschnittenen Einkristalle pro cm^2;
f) Zahl der Bindungsstrecken pro Korn (Kontakte ohne endliche Berührungsstrecke nicht mitgezählt).

Körner, welche durch den Rand des Gesichtsfeldes angeschnitten wurden, erhielten flächen-, umfang- und zahlenmäßig das Gewicht ½.

Aus den Werten a—f wurden die Gefügeziffern 1—10 berechnet. Die Beziehungen sind sehr einfach und ergeben sich ohne weiteres; so gilt z. B.

$$Uk = \frac{c + 2d}{\text{Zahl der Körner}} \text{ usw.}$$

Diese Art der Gefügeanalyse, die sich mit Messungen in Schnitten begnügt, führt immer nur zu Relativwerten und gibt damit keine oder nur mittelbare Auskunft über die Verhältnisse im Raum. Dennoch soll in einem späteren Abschnitt (siehe Seite 53) versucht werden, die Beziehungen einzelner Gefügeziffern zu wichtigen Größen des Raumes etwas näher zu erläutern.

Vollständige Analysen (Bestimmung aller 12 Strukturwerte) wurden bei 35 verschiedenen Schneesorten durchgeführt. Das Vergleichsmaterial ist naturgemäß noch sehr spärlich, läßt aber die allgemeinen Zusammenhänge schon recht deutlich erkennen. Die Meßresultate werden aus Platzgründen nur graphisch wiedergegeben; die betreffenden Größen werden paarweise zusammengefaßt, wobei von allen möglichen Fällen nur jene ausgewählt werden, welche die deutlichsten Gesetzmäßigkeiten aufweisen. Damit ist nicht nur implicite das gesamte Zahlenmaterial wiedergegeben, sondern zugleich auch die einfachste und übersichtlichste Art der Auswertung (vgl. Fig. 19—34). Eine kurze und summarische Besprechung soll den ersten Ueberblick vermitteln.

Die 35 Schneesorten wurden auf Grund der Versuchsanordnung in 6 Gruppen gegliedert, wobei die Trennung gleichzeitig auch die Eigenart des Schnees weitgehend berücksichtigt.

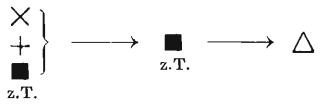
1. × Rundkörniger Trockenschnee.
2. ○ Rundkörniger, gefrorener Naßschnee.
3. ● Firn, kleine Wasserscheide (Schnee des Winters 1947/48, Probeentnahme Dezember 1948).

4. △ Hochmetamorpher, becherförmiger Schnee des Frühwinters (sehr starke Umkristallisation, Dezember 1948).
5. ■ Schneeproben der Profile im Standardversuchsfeld Weißfluhjoch des Winters 1948/49, entnommen aus zwei bodennahen Schichten (b und c) mit starker Umkristallisation (meist ebenflächige Vollformen bis Becher).
6. + Schneeproben der Kriechversuche bei —3° C (rundkörniger eingesiebter Trockenschnee).

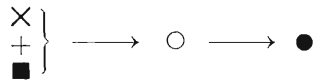
Während die Schneearten 1—4 bei der Ableitung der Methode als Testmaterial benützt wurden, ergaben sich die Werte 5 und 6 aus den ersten Anwendungsversuchen (Metamorphose und mechanische Eigenschaften).

Es ergaben sich für die verschiedenen Metamorphosen folgende Sukzessionen:

morphologisch konstruktive Metamorphose (Diaphtorese invers):



Schmelzwassereinfluß:



Die morphologisch destruktive Metamorphose kommt nur sehr undeutlich zum Ausdruck, da junge Schneesorten im Versuchsmaterial fehlen.

Bei der Auswertung stehen drei Fragenkomplexe im Vordergrund:

a) Welchen Gefügewerten kommt bei vorgegebener Problemstellung die größte Bedeutung zu, d. h. wie verhalten sich die Gefügewerte untereinander?

b) Welche Beziehungen bestehen zwischen den Gefügewerten und dem Gang der Metamorphose?

c) Wie eng sind die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Gefügewerten und mechanischen Größen?

Die Ergebnisse werden implicite auch die Frage nach der Brauchbarkeit einer genauen Schneecharakterisierung auf dem eingeschlagenen Weg beantworten. Es liegt auf der Hand, daß das spärliche Material nicht mehr zu geben vermag als erste Hinweise. Es handelt sich um rein empirisches Vorgehen, dessen mathematische Behandlung in diesem Stadium nur eine Genauigkeit vortäuschen würde, die weder dem Stoff noch der Methode zukommt. Dies gilt in ganz besonderem Maße auch für den Schritt von der Ebene in den Raum.

Figur 19: Vp/KM. Vp repräsentiert das Raumgewicht (invers). Die Stärke der Kornbindung steht in überraschend engem Zusammenhang mit Vp. Die Richtung der konstruktiven Metamorphose (× → △) ergibt sich recht klar, während die vorhandenen Punkte (es fehlen sehr junge Schneesorten) die destruktive Metamorphose nur undeutlich zum Ausdruck bringen. Das Schmelzwasser verursacht ebenfalls kaum stärkere Streuung. Der Ast der konstruktiven Metamorphose ist steiler als jener der Schmelzvorgänge, d. h. durch die Umkristallisation wird die Kornbindung bei gleicher Veränderung von γs stärker vermindert, als sie das Schmelzwasser zu erhöhen vermag. Ver-

längert man die Linie × → o → ● bis zu Vp = 0, dann erhält man ein KM von 0,56; selbst bei der Verfirnung, die einen Vorgang abwechselnden Gefrierens und Schmelzens darstellt, wird kaum je eine stärkere Bindung des Einzelkornes als 0,6 erreicht. Da dieser Prozeß nie zu einem porenfreien Eis führen kann (ausgenommen bei dünnen Eislamellen innerhalb des Schnees), besitzt dieser Grenzwert nur theoretische Bedeutung. In Wahrheit wird die Erhöhung des Bindungsmaßes schon früher gestoppt. Für dichteste kubische und hexagonale Kugelpackung erhält man ein Vp von 25 % und dadurch ein KM von 0,42.

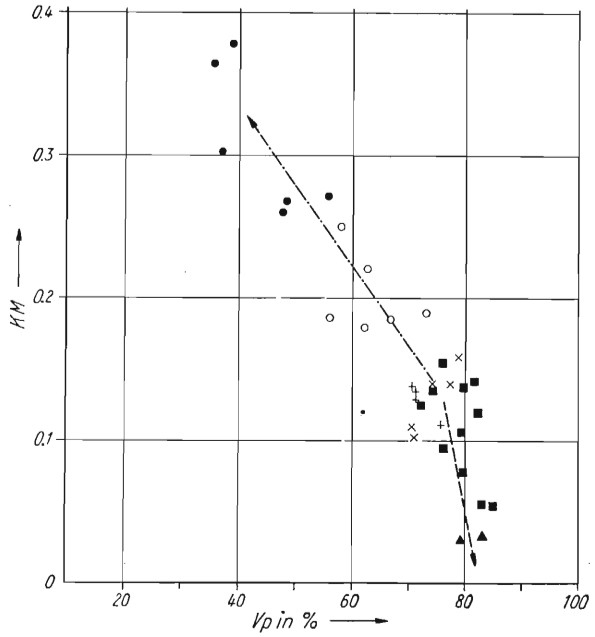


Fig. 19: Diagramm: Porenvolumen Vp/Kornbinbindungsmaß KM.
— — — → morphologisch konstruktive Metamorphose,
—·—·—·→ Schmelzwassereinfluß.

Figur 20 (Vp/BZ) zeigt ein völlig analoges Bild. Für den größten Teil der Fragestellungen kann also entweder Kornbindungszahl (BZ) oder Kornbindungsmaß (KM) verwendet werden. Diese weitgehende Uebereinstimmung der beiden Werte (Koordina-

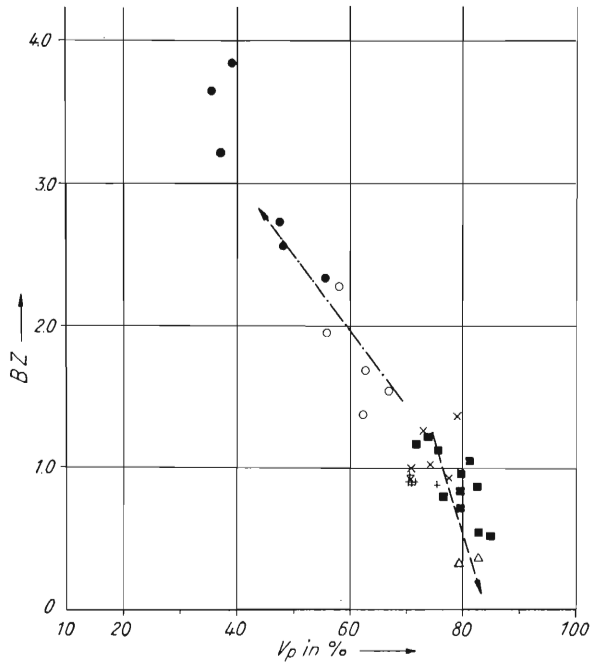


Fig. 20: Diagramm Porenvolumen Vp/Bindungszahl BZ.
— — → morphologisch konstruktive Metamorphose,
—·—·→ Schmelzwassereinfluß.

tionszahl und Stärke der Kornbindung flächenmäßig ausgedrückt) ist auf die gesetzmäßigen Beziehungen der einzelnen Schneearten untereinander zurückzuführen (Metamorphose).

Für Vp = 25 % beträgt die BZ etwa 5,3, was nahezu einem Schnitt durch die Kugelmittelpunkte einer dichtesten Kugelpackung (BZ = 6) entspricht. Bei endlicher Kontaktfläche ist stärkere Packung möglich.

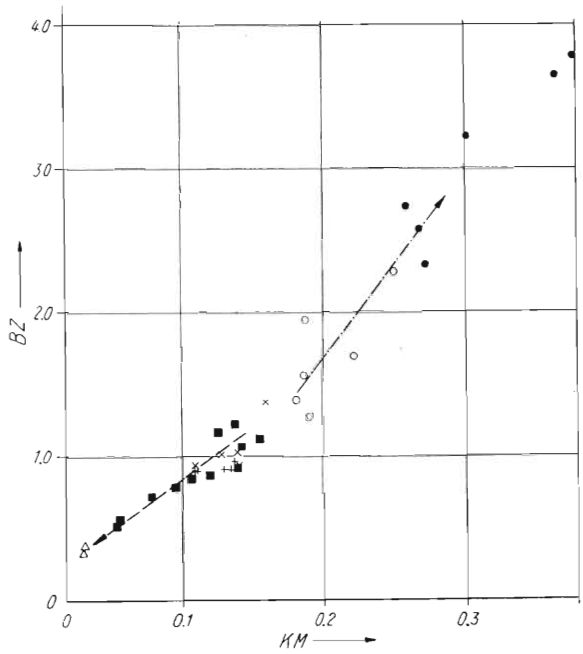


Fig. 21: Diagramm Kornbindungsmaß KM/Kornbindungszahl BZ.
— — — → morphologisch konstruktive Metamorphose,
— —·—· → Schmelzwassereinfluß.

Figur 21 soll die Beziehung *BZ/KM* noch etwas näher erläutern. Auch hier ordnen sich die Punkte in einem schmalen Streifen an. Das KM ist in sehr grober Annäherung 10mal kleiner als die BZ, d. h. die Beziehung kann durch eine lineare Funktion dar-

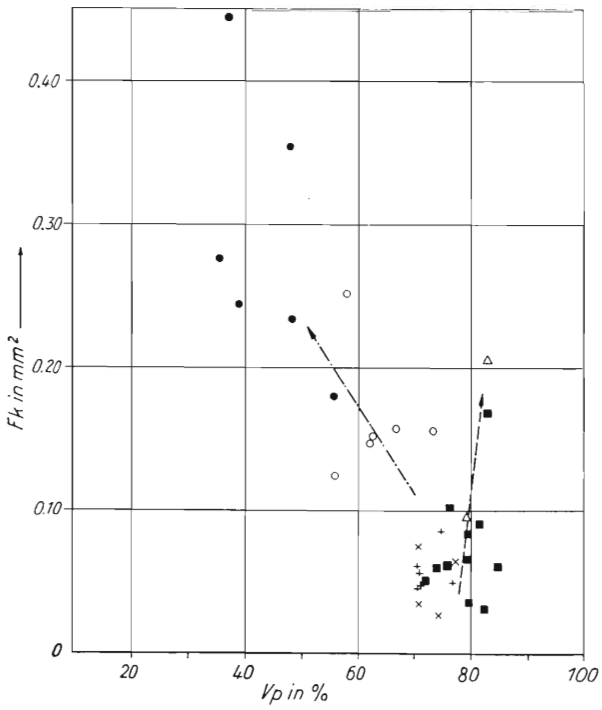


Fig. 22: Diagramm Porenvolumen Vp/Kornfläche Fk.

gestellt werden. In der Reihe × → ● nimmt die BZ etwas rascher zu als das KM; für × → △ gilt das Gegenteil. Beide Aeste zeigen die Proportionalität zwischen BZ und KM.

Figur 22. Ganz anders sieht hingegen das Diagramm *Vp/Fk* aus. Die Funktion ist nicht mehr nahezu linear, sondern besitzt zwei deutlich getrennte, divergierende, aber gleichsinnige Aeste. Während bei Schmelzwassereinfluß die mittleren Querschnittsflächen (Korndurchmesser) bei steigendem Raumgewicht größer werden, nimmt bei morphologisch konstruktiver Metamorphose das Porenvolumen während des Kornwachstums langsam zu (Eliminierung der Körner mit ungünstiger Orientierung). Aus den Relativwerten der Ebene zu schließen ist allerdings diese Zunahme bei gleich starkem Kornwachstum weniger groß, als wenn die flüssige Phase mitbeteiligt ist (steilere Kurve bei der Metamorphose über die Gasphase). Die morphologisch destruktive Metamorphose, die sich in Streifen parallel der Abszisse (Veränderung des Raumgewichtes ohne Wachstum der Einkristalle) äußern sollte, macht sich auch hier kaum bemerkbar. Allerdings fehlen in den Messungen die entsprechenden jungen Schneearten fast ganz.

Figur 23 (KM/Fk) führt wiederum auf sehr ähnliche Zusammenhänge wie Figur 22. Doch lassen sich die Einzelheiten mit KM noch etwas klarer erkennen als mit dem Porenvolumen. Daß bei den Werten des Firns beträchtliche Streuungen auftreten, ist bei der Inhomogenität des Ausgangsmaterials nicht weiter verwunderlich. Hingegen scheint die Funktion der fortschreitenden morphologisch konstruktiven Metamorphose hier nicht mehr einer Geraden zu entsprechen, sondern einem Parabelast mit vertikaler Achse und der y-Achse (KM = 0) als Tangente. Die eingetragenen Pfeile sollen nur die Richtung der Tendenzen wiedergeben und nicht die Art der Funktionen. Es fällt auch in diesem Diagramm auf, daß dem rundkörnigen Trockenschnee (ohne künstliche Deformationen) ein relativ kleiner Streubereich entspricht.

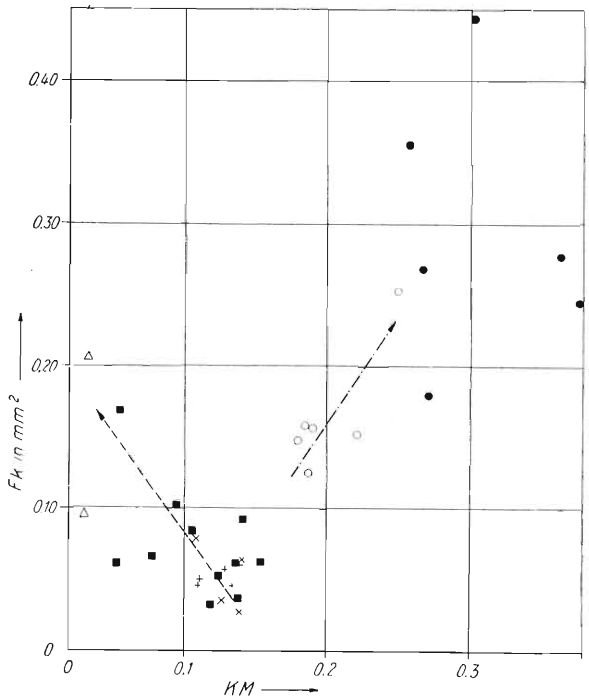
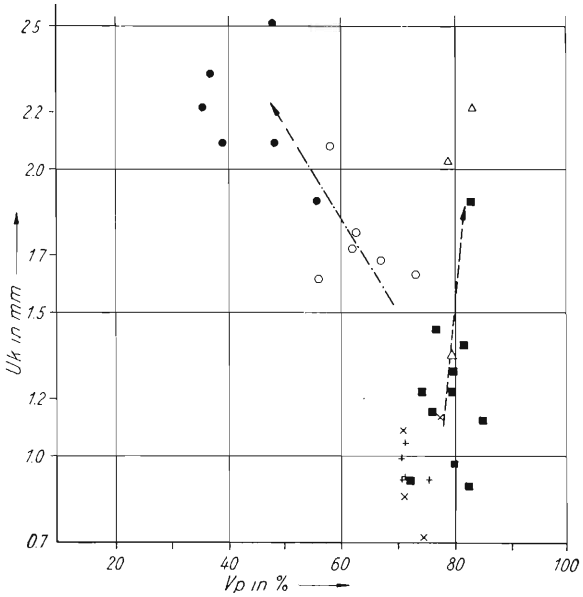


Fig. 23: Diagramm Kornbindungsmaß/Kornfläche Fk.
— — — —→ morphologisch konstruktive Metamorphose,
—·—·—·→ Schmelzwassereinfluß.

Die *Diagramme 24 (Vp/Uk)* und *25 (KM/Uk)* werden nur beigegeben, um zu zeigen, wie weitgehend einzelne Gefügewerte (hier Fk und Uk) einander entsprechen können. Die Figuren 24 und 22, bzw. 25 und 23, stimmen bis in kleinste Einzelheiten — abgesehen

Fig. 24: Diagramm Porenvolumen Vp/Kornumfang Uk.



von einer maßstäblichen Verzerrung — überein. Es sei wiederholt, daß damit nur die Uebereinstimmung für Vergleiche innerhalb der Gefügewerte nachgewiesen ist und daß sie nicht mehr zu gelten braucht, wenn andere Größen beigezogen werden.

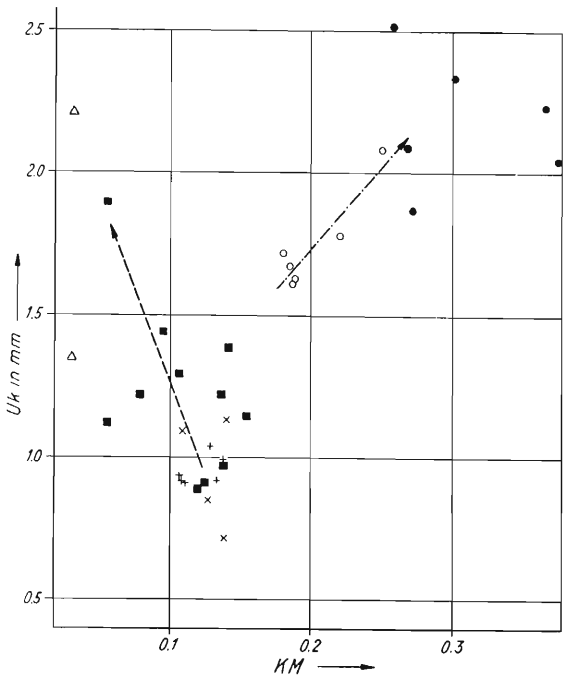


Fig. 25: Diagramm Kornbindungsmaß KM/Kornumfang Uk.
— — — → morphologisch konstruktive Metamorphose,
—· - ·—·→ Schmelzwassereinfluß.

Figur 26 (Fk/Uk) soll die Koppelung von Fk und Uk noch etwas näher erläutern. Zugleich läßt sich sehr deutlich erkennen, daß die Abweichung vom Kreis bei rundkörnigem Schnee am kleinsten ist und um so größer wird, je weiter die Becherbildung fortgeschritten ist; auch für Naßschnee und Firn wird sie deutlich höher, wahrscheinlich infolge der stärkeren Bindung (komplexere Korngestalt).

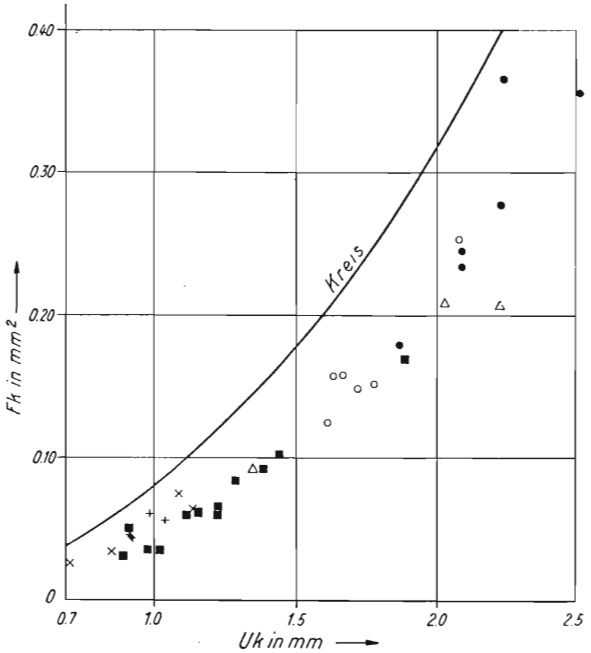


Fig. 26: Diagramm Kornfläche Fk/Kornumfang Uk.

Figur 27. Das Diagramm *Vp/KZ* läßt keine Zusammenhänge erkennen, da Z z. B. für rundkörnigen Trockenschnee von 200 bis 1000 variiert. Daß dennoch einzelne Schneesorten enger gruppiert sind, liegt an Vp, das allein schon recht viel über die Eigenart eines Schnees auszusagen vermag. Die Wechselwirkungen werden erst dann klar, wenn man weitere wichtige Größen mit einbezieht, hier z. B. Fk. Je größer die spezifische Kornzahl bei gleichem Vp ist, desto kleiner wird Fk, und zwar in direkt umgekehrtem Verhältnis. Deshalb können in das Diagramm Kurvenscharen für Fk eingetragen werden. Die Gesetzmäßigkeiten in bezug auf die Metamorphose, die sich aus diesen drei Parametern ableiten lassen, lauten: Bei Kornwachstum durch Sublimation (morphologisch konstruktive Metamorphose) wird die spezifische Kornzahl (Z) stark vermindert bei nur leicht steigendem Vp. Bei Naßschnee und besonders bei Firn bedingt das Schmelzwasser eine starke Massen-

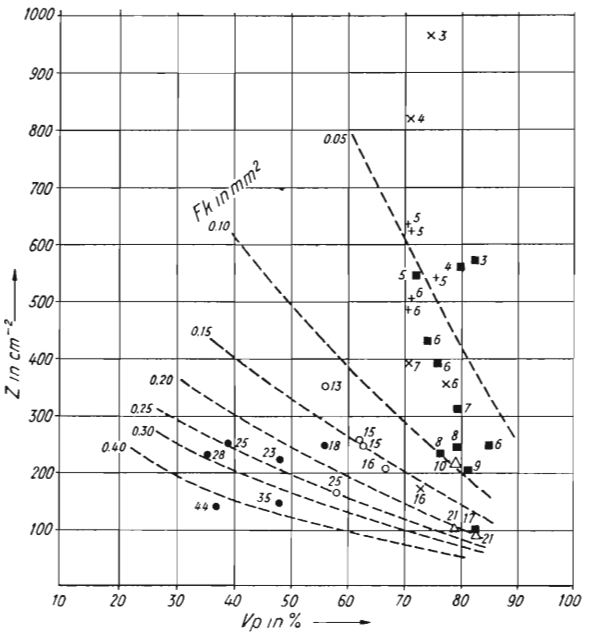


Fig. 27: Diagramm Porenvolumen Vp/spezifische Kornzahl Z, Kurvenschar für Kornfläche Fk. Als Zahlen bei den einzelnen Punkten die 100fache mittlere Kornquerschnittsfläche in mm² (Fk).

zunahme des Einkristalles, ohne daß die Kornzahl pro Volumeneinheit dabei merklich verändert würde. Diese Ergebnisse müssen, wenn man den Gang der Metamorphose einigermaßen kennt, direkt erwartet werden.

Figur 28 (KM/Z): analog Figur 27. Wiederum bleibt Z bei zunehmendem KM konstant, nach einer — vielleicht nicht einmal reellen — Erniedrigung bei beginnendem Schmelzwassereinfluß, im Gegensatz zur Sublimationsmetamorphose, bei welcher während der Verminderung von KM die Kornzahl dauernd abnimmt. Die starke Streuung von Z zwischen KM 0,1 und 0,2 rührt nicht etwa von einer tatsächlichen und kontinuierlichen Veränderung her (Metamorphose), sondern ist allein auf Unterschiede im Ausgangsmaterial (besonders bei rundkörnigem Trockenschnee) zurückzuführen, was sich schon aus der Konstanz des KM ergibt.

Ein weiterer, wahrscheinlich maßgebender Strukturwert ist die spezifische Bindungsstrecke BS, die in den nächsten Diagrammen enthalten ist. Zum Einfluß von KM tritt zusätzlich — in BS enthalten — jener von Z hinzu.

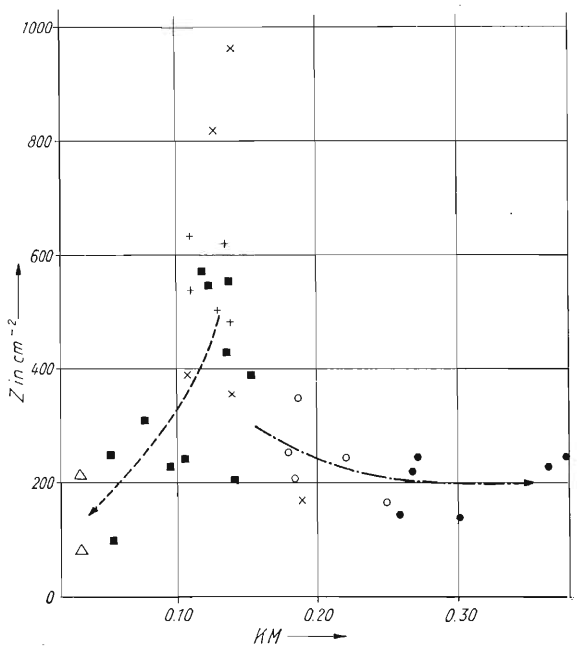


Fig. 28: Diagramm Kornbindungsmaß KM/spezifische Kornzahl Z.
— — — — → morphologisch konstruktive Metamorphose,
—·—·—·—·→ Schmelzwassereinfluß.

Figur 29 (Vp/BS). In diesem Diagramm läßt sich auch die morphologisch destruktive Metamorphose, die zu größerem BS und kleinerem Vp führt, ablesen. Genau entgegengesetzt, etwa mit derselben Neigung, verläuft der konstruktive Ast. Etwas flacher liegt die Verbindung der Schneearten mit zunehmendem Schmelzwassereinfluß, wobei im Firn zudem große Streuungen vorhanden sind.

Figur 30 (KM/BS). Die Richtungen der Becherbildung und des Schmelzwassereinflusses bilden nahezu eine lineare Funktion (allerdings mit entgegengesetztem Richtungssinn): BS = 40 KM. Die Streuungen werden wahrscheinlich durch Z — verschiedenes Ausgangsmaterial — verursacht. Der destruktive Ast ist erst schwach erkennbar und entspricht einer steil nach rechts oben verlaufenden Kurve. Daß bei gleicher Zunahme des KM die spezifische Bindungsstrecke dabei viel stärker erhöht werden muß als bei reinem Schmelzwassereinfluß, ist evident; denn bei der destruktiven Metamorphose greift während der Aggregation die Setzung in den Prozeß ein, so daß die spezifische Kornzahl

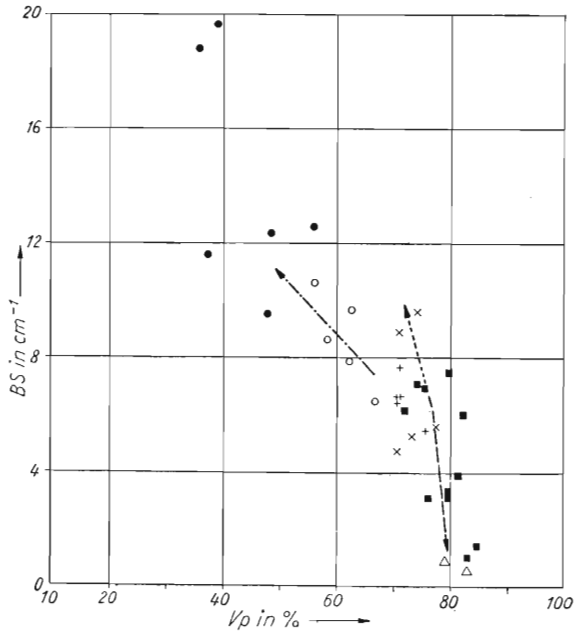


Fig. 29: Diagramm Porenvolumen Vp/spezifische Bindungsstrecke BS.
----------→ morphologisch destruktive Metamorphose,
— — — — → morphologisch konstruktive Metamorphose,
—·—·—·—·→ Schmelzwassereinfluß.

beträchtlich ansteigt. Hier liegt auch der wesentlichste Unterschied: Während das KM den mittleren Bindungszustand des einzelnen Kornes repräsentiert, ist in BS gewissermaßen das Bindungsmaß eines ganzen Schneekörpers enthalten.

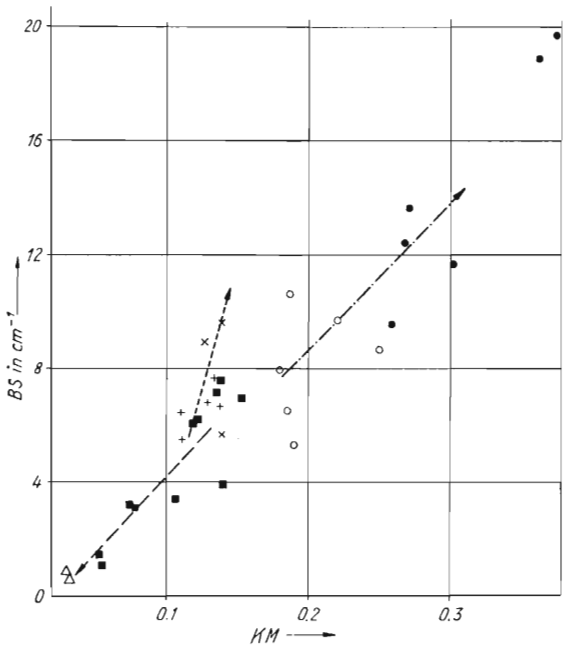
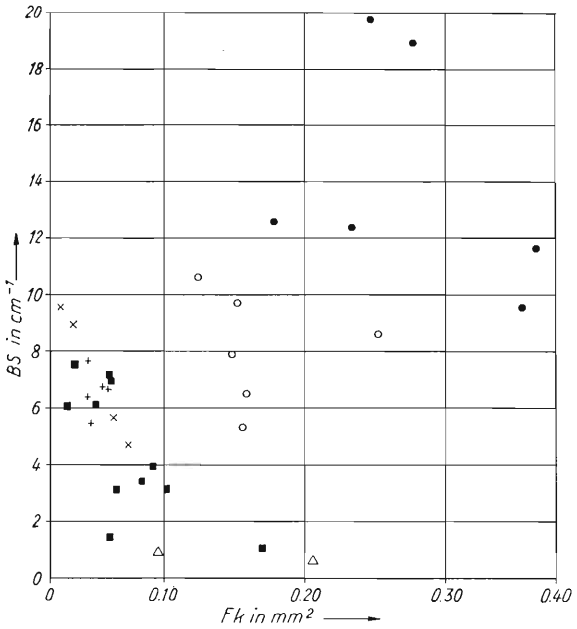


Fig. 30: Diagramm Kornbindungsmaß KM/spezifische Bindungsstrecke BS.

Figur 31 (BS/Fk) läßt infolge der starken Streuung — besonders bei Schneesorten mit Schmelzwassereinfluß — weniger Gesetzmäßigkeiten erkennen. Dennoch sind die einzelnen Gruppen flächenmäßig gut trennbar. Im allgemeinen ist bei Sublimationsmetamorphose BS bei kleinerem Fk größer und bei Schmelzwassereinfluß kleiner.

Fig. 31: Diagramm Spezifische Bindungsstrecke BS/Kornfläche Fk.



Figur 32 (Z/BS). In diesem Diagramm sind die Verhältnisse wieder viel klarer, trotz den beträchtlichen Schwankungen für rundkörnigen Trockenschnee. Becherbildung und Schmelzwassereinfluß lassen sich sehr schön trennen. Während durch die morphologisch konstruktive Metamorphose Z und BS gleichmäßig vermindert werden, findet durch die Verfirnung kennzeichnenderweise nur eine Erhöhung von BS, nicht aber von Z statt.

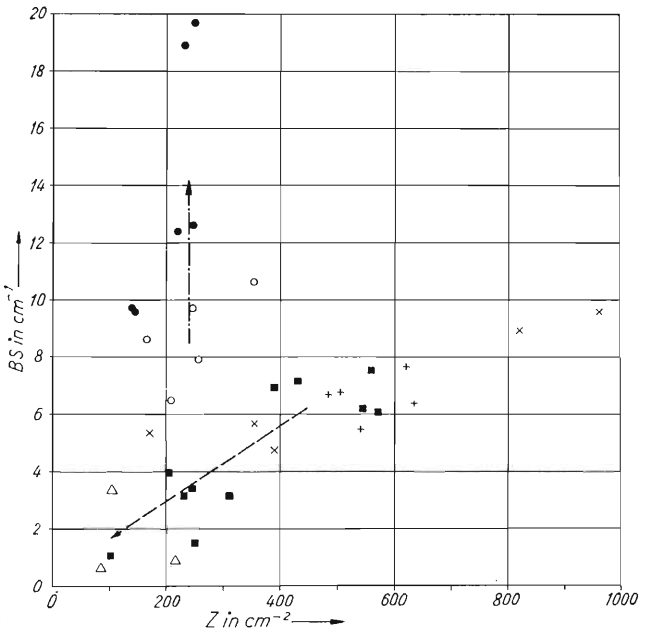


Fig. 32: Diagramm Spezifische Kornzahl Z/spezifische Bindungsstrecke BS. — — — — → morphologisch konstruktive Metamorphose, —·—·—·—·→ Schmelzwassereinfluß.

Figur 33 (Vp/ψk). ψk sollte als Gestaltfaktor dienen. Es zeigte sich jedoch, daß das Dünnschliffbild nur sehr beschränkte Auskunft zu geben vermag über die Kornformen. Die Form einer beliebigen Schnittfläche läßt kaum einen Schluß zu auf die Morphologie des Einkristalls (außer bei Extremformen, Sternen und Bechern). Deshalb variieren die

Werte von ψk stark. Außer für hochmetamorphe Schneesorten (ψk bis 0,68) können sie kaum zur Charakterisierung benützt werden. Werte über 0,90 sind selten und wohl nur bei gefrorenem Naßschnee anzutreffen.

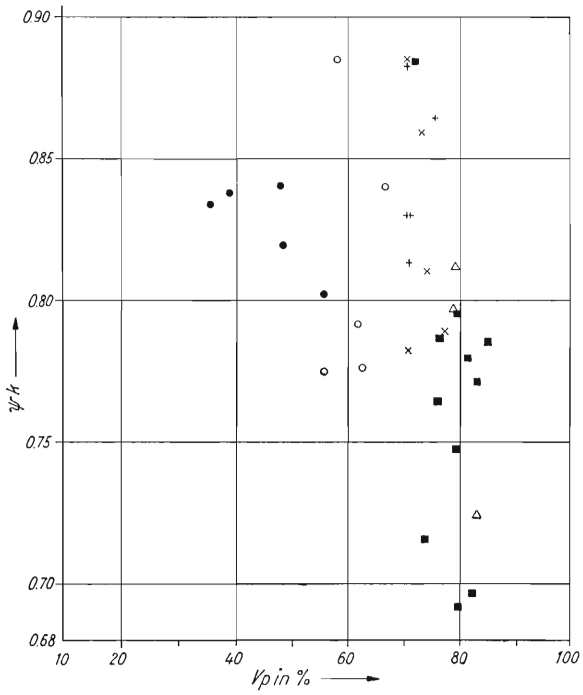


Fig. 33: Diagramm Porenvolumen Vp/Kornformkoëffizient ψk.

Figur 34 (Vp/μs, μp). Sehr klar lassen sich die Beziehungen im Diagramm Porenvolumen/Umfangskoeffizienten erkennen. Für die drei wichtigsten Aeste der Metamorphose gilt:

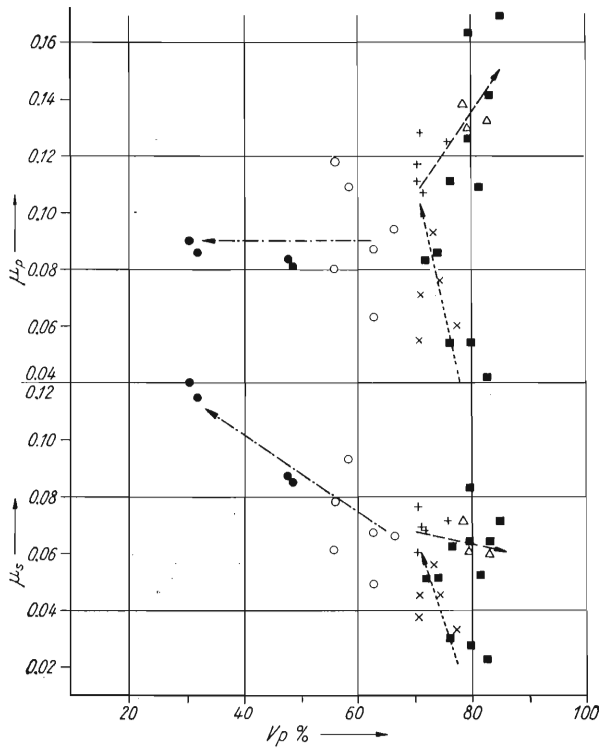


Fig. 34: Diagramm Porenvolumen Vp/Umfangskoeffizient der Eisfläche μs und Porenvolumen Vp/Umfangskoeffizient der Porenfläche μp.

a) Umfangskoeffizient der Eisfläche μs:

Morphologisch destruktiv: starke Vereinfachung der Umgrenzung.
Schmelzwassereinfluß: deutliche, wenn auch etwas schwächere Vereinfachung.
Morphologisch konstruktiv: leichte bis deutliche Vergrößerung der Abweichung vom Kreisumfang.

b) Umfangskoeffizient der Porenfläche μp:

Morphologisch destruktiv: starke Vereinfachung der Porenkonturen.
Schmelzwassereinfluß: Verhältnisse bleiben ziemlich konstant (eher schwache Vergrößerung der Abweichung vom Kreisumfang).
Morphologisch konstruktiv: starke Vereinfachung der Umgrenzung.

μp steigt während der morphologisch konstruktiven Metamorphose naturgemäß nur deshalb, weil sich selbst eine beträchtliche Komplizierung der Grenzlinie Eis–Luft gegenüber der immer größer werdenden Porenfläche kaum mehr auswirkt. Umgekehrt macht sich beim Schmelzwasereinfluß schon die bloße Verminderung des Porenvolumens, ohne daß die Konturen der Körner stärker gebuchtet zu verlaufen brauchen, in einer Erniedrigung von μp bemerkbar.

Die «Gliedrigkeitskoeffizienten» μs und μp geben also bereits einen recht guten Einblick in die Art der Verteilung Eis–Luft einer bestimmten Schneesorte.

In Tabelle 3 sind die Variationsbereiche der verschiedenen Gefügewerte für die Gruppen 1—4 (×, ○, ●, △) zusammengefaßt.

Tabelle 3:

	Vp %	KM	BZ	Fk mm²
1.	70—80	0,10—0,16	0,8—1,4	0,02—0,08
2.	55—70 (75)	0,16—0,26	1,4—2,3	0,12—0,18 (025)
3.	< 55	> 0,26	> 2,3	> 0,20
4.	75—85	< 0,08	< 0,7	> 0,08
	Uk mm	**Z cm⁻²**	**BS cm⁻¹**	**ψk**
1.	0,7—1,2	> 300	4—10	> 0,77
2.	1,6—2,1	150—350	6—11	> 0,77
3.	> 1,8	< 250	> 10	> 0,80
4.	> 1,3	< 250	< 4	< 0,81

Schon diese sehr kursorische Besprechung läßt erkennen, daß zwischen den Gefügewerten und dem Verlauf der Metamorphose mit ihren verschiedenen Aesten ein enger Zusammenhang bestehen muß, d. h. daß diese Methode sehr wohl zu einer genaueren Charakterisierung einer bestimmten Schneeart verwendet werden kann. Bei der Auswahl der Diagramme wurden jene Werte bevorzugt, die diese Abhängigkeit am klarsten erkennen ließen — also Vp, BZ bzw. KM, Fk, BS —, da auch für diesen Abschnitt der Frage nach der Metamorphose besondere Bedeutung beigemessen wurde. Jede andere Ausgangslage verlangt, daß zunächst durch einige Gesamtanalysen die Auswahl unter den Gefügewerten abgeklärt wird. Meist sind dann auf Grund dieser Stichproben auch in meßtechnischer Hinsicht starke Vereinfachungen zulässig. Ein Beispiel für dieses Vorgehen sei in einem späteren Abschnitt mitgeteilt (siehe Seite 61).

Ein zahlenmäßiges Abgrenzen von Streufeldern für einzelne Schneearten ist ohne weiteres möglich. Doch soll damit noch zugewartet werden, bis ein viel umfassenderes Beobachtungsmaterial vorliegt.

Ueber die Brauchbarkeit der einzelnen Gefügeziffern kann zusammenfassend vorläufig etwa folgendes gesagt werden:

1. Das Porenvolumen Vp wird bei der Schneecharakterisierung mit Recht als eine der wichtigsten Gefügegrößen betrachtet.

2. Bindungszahl BZ und Kornbindungsmaß KM sind vor allem wichtig für die Charakterisierung des Zustandes einer bestimmten Schneeart (Maß der Aggregation usw.) und lassen sich gegenseitig ersetzen. Bei Untersuchungen, für welche die Stärke der Bindung eines ganzen Gerüstes maßgebend ist, wird hingegen die spezifische Bindungsstrecke BS wichtiger sein, da sie das Bindungsmaß der Volumeneinheit repräsentiert.

3. Kornfläche Fk und Kornumfang Uk sind nur bei relativ einfachen Kornformen verwendbar, nur dann, wenn das Einzelkorn nicht mehr als einen einzigen Querschnitt liefert, d. h. also besonders für rundkörnigen Altschnee, gefrorenen Naßschnee und Firn. Dasselbe gilt für ψk, das etwa der Sphericity, allerdings an einem Querschnitt bestimmt, entspricht.

4. Die spezifische Kornzahl Z ist vor allem für Untersuchungen über Kornwachstum und Aggregation wertvoll, wenn es zu entscheiden gilt, ob eine Massenzunahme der Volumeneinheit durch Setzung (Erhöhung der Zahl der Körner) oder durch Wachstum der Einzelkörner verursacht wurde.

5. Die Umfangskoeffizienten μp und μs sind die einzigen Größen, die einen unmittelbaren Einblick in die Gestalt des Hohlraumes gewähren und werden deshalb vor allem bei Fragen, welche sich mit Substanzverschiebungen befassen, bedeutungsvoll sein, und zwar um so mehr, je stärker die Konvektion erschwert wird (hohes Raumgewicht).

4. Kritische Betrachtungen.

Hier sollen die Ergebnisse der Fehlerrechnungen sowie einige grundsätzliche Bedenken gegen die Methode mitgeteilt werden. Zugleich sind die Beschränkungen und die möglichen Erweiterungen noch etwas näher zu umschreiben.

a) Statistische Fehler.

Die statistischen Fehler der Messungen sind einfach zu berechnen, da für jede Schneeart mehrere gleichwertige Pausen (4—9) vermessen wurden. Berechnet man die Gefügewerte für jede Pause separat und behandelt sie wie selbständige Einzelresultate, dann können daraus Mittelwerte und mittlere Fehler des arithmetischen Mittels berechnet werden. Tabelle 4 enthält die mittleren Fehler der wichtigsten Gefügewerte für drei verschiedene Schneearten.

Tabelle 4: (Mittlere Fehler in %)

	Vp	BZ	Z	Fk	Uk	Ψ k	KM	BS
D 18	0,94	6,5	5,1	5,4	3,6	1,7	5,5	6,1
D 4	6,0	4,0	6,6	4,2	2,7		3,0	
D 14	1,3	9,7	5,7	5,6	2,7	1,9	17,5	15,6

D 18 Rundkörniger Trockenschnee ×
D 4 Firn ●
D 14 Schwimmschnee △

Damit fällt auch die Notwendigkeit einer Abschätzung der zu benützenden Schnittfläche nach *Grengg* (1925) dahin.

Bei nicht allzu stark umkristallisierten, rein becherförmigen Schneearten variieren die Fehler etwa zwischen 0 und 6 %; 8 % darf für gewöhnlichen Schnee wohl als oberer Grenzwert angenommen werden. Bei sehr hochmetamorphem Schnee (D 14) kann der mittlere Fehler bis 20 % ansteigen, was damit zusammenhängt, daß die Gefügeanalyse von Querschnitten bei dieser ausgeprägten Anisotropie und der stark dendritischen Gestalt der Körner ihre Bedeutung verliert. Bei solchen Schneearten ist es nicht nur sehr schwierig, undeformierte Schnitte herzustellen, sondern dieser Weg der Schneecharakterisierung ist zudem kaum mehr gangbar.

Die Zahl der angeschnittenen Körner beträgt bei D 18 530, bei D 4 600 und bei D 14 160. Der Schnee D 14, der an sich der Gefügeanalyse eben noch zugänglich wäre, weist nur deshalb so hohe mittlere Fehler auf (maximal 17,5 %), weil die Statistik mit 160 Körnern ungenügend ist, d. h. die benützte Schnittfläche (2—4 cm^2) genügt bei dieser Korngröße und Anisotropie nicht mehr. Im allgemeinen darf als Bedingung für eine ausreichende Statistik 300—400 Kornquerschnitte gesetzt werden, was normalerweise mit wenigen Quadratzentimetern Schnittfläche bereits erreicht wird. Kornzahlen über 600 würden eine wertlose Erhöhung der Genauigkeit ergeben, da systematische Fehler — selbst bei weitgehender Homogenisierung des Gerüstes — wenige Prozente kaum unterschreiten.

b) Variationen im natürlichen Schnee.

Die Frage nach den Variationen im natürlichen Schnee kann nicht generell beantwortet werden. Die Unterschiede schwanken je nach Schneeart, nach der Homogenität der Sedimentation bzw. der Umwandlungsbedingungen. Um dennoch einen ersten Einblick in die Schwankungsbereiche zu erhalten, wurden in zwei Beispielen aus derselben Schicht (horizontale Schneedecke) an benachbarten Orten Proben ausgestochen und vermessen. Die prozentualen Abweichungen (Differenz beider Messungen im Verhältnis zum größeren der beiden Werte) der wichtigsten Gefügewerte lauten:

Tabelle 5:

	Vp	BZ	Z	Fk	Uk	ψk	KM	BS
D 15/D 16	7,1 %	10,9 %	18,2 %	6,3 %	2,7 %	5,8 %	2,7 %	18,3 %
D 17/D 18	5,9	0,9	14,9	24,6	15,4	3,3	8,6	6,9

Es überrascht keineswegs, daß die Abweichungen im allgemeinen deutlich höher sind (bis 25 %) als die statistischen Fehler. Immerhin wird die Methode auch bei natürlichem Schnee, selbst bei Fehlern von 25 %, ihren Wert nicht verlieren. Einerseits sind die Fehlerbereiche bei der Bestimmung mechanischer Größen kaum wesentlich kleiner, anderseits beträgt die absolute Variationsbreite für die meisten Werte einige Hundert Prozent (häufig 300—400 %). Für die Abklärung feinerer Vorgänge wird ohnehin möglichst weitgehende Homogenität des Untersuchungsmaterials angestrebt werden (eingesiebter Schnee), so daß mit Schwankungen von weniger als 8 % gerechnet werden darf.

c) Systematische Fehler.

Um die Größe eventuell vorhandener systematischer Verfälschungen abzuschätzen, wurde ein rundkörniger Schnee mittlerer Korngröße eingesiebt. Nachdem die Aggregatbildung weitgehend beendet war, wurden an zwei verschiedenen Stellen Proben ausgestochen und gemessen. Die prozentualen Abweichungen lauten:

Tabelle 6:

	Vp	BZ	Z	Fk	Uk	ψ k	KM	BS
D 32/D 33	0,8 %	4,8 %	4,1 %	6,5 %	4,9 %	7,9 %	6,5 %	1,2 %

Da die Abweichungen kaum größer sind als die mittleren statistischen Fehler, scheint für stärkere systematische Verfälschungen wenig Gefahr zu bestehen.

Mit diesen drei Beispielen — die nicht etwa ausgewählt, sondern beliebig herausgegriffen wurden — ist wohl der Nachweis erbracht, daß die hier angewandte Art der Auswertung vollauf genügt. Höhere Genauigkeiten als 10 % wurden weder erwartet noch angestrebt, da sie dem Material und den Forderungen gar nicht entsprächen. Hingegen muß hier noch auf einen andern Umstand hingewiesen werden: auf die Möglichkeit persönlicher Interpretation bei den Messungen.

Die größte Schwierigkeit bei der Herstellung der Pausen besteht darin, die Schnittebene eindeutig festzulegen. Es ist bei zu großer Tiefenschärfe und besonders bei sehr feinkörnigem Schnee oft nicht leicht zu entscheiden, was bei einem Korn Projektion und was Schnittfläche ist. Auch die Bindungsstrecken sind nicht immer einfach und klar lokalisierbar. Vielen dieser Schwierigkeiten wäre mit Anschliffen abzuhelfen, wobei die Einkristalle durch Aetzungen sichtbar gemacht werden müßten. Das Reflexionsvermögen des Eises genügt vollauf — schon nach kurzer Politur —, um mit dem Ultropak brauchbare Bilder zu erhalten. Das größte Hindernis bestand bei Versuchen in dieser Richtung darin, daß das Füllmittel die Oberfläche während des Polierens verschmierte und damit die Aetzung der Eisfläche verunmöglichte. Verbesserungen der Methode in dieser Hinsicht sind ohne weiteres möglich und würden sich durch Gewinn an Zeit und Sicherheit der Interpretation rechtfertigen.

d) Beziehungen zum Raum.

Grundsätzlich wichtig für eine Gefügeanalyse in der Ebene ist die Frage nach den Beziehungen zum Raum. Auf allgemeine Strukturberechnungen unter bestimmten Annahmen, wie sie z. B. *Manegold* (1931, 1939) und andere bei Kugelschüttungen durchführten, wurde vorläufig verzichtet. Hingegen seien die Beziehungen von ebenen zu räumlichen Größen für einige Wertepaare rein qualitativ kurz charakterisiert.

1. Vp—Raumgewicht γs: Aus Vp kann γs leicht berechnet werden, so daß die Planimetrierung einer Dichtebestimmung gleichkommt. Es hat sich gezeigt, daß bei isotropem rundkörnigem Schnee das berechnete γs mit dem gemessenen ungefähr übereinstimmt (einige Prozent). Die planimetrischen Werte liegen fast durchweg etwas tiefer. Dies beweist, daß im Dünnschliff eine Verwechslung von Kornprojektionen mit Schnittflächen kaum zu befürchten ist; die Schneeflächen scheinen im Gegenteil eher zu klein auszufallen. Anisotrope Gefüge können jedoch recht große Differenzen bedingen.

2. Fk, dk—Kornkaliber: Es besteht beim Schnee aus verschiedenen Gründen ein ausgesprochenes Bedürfnis für die Kenntnis der mittleren Größe des Einkristalles (als maximaler Durchmesser oder als Durchmesser der massengleichen Kugel). Jede Bestimmung auf nichtoptischem Wege (z. B. Sedimentationsanalysen usw., ausgenommen Aetzungen) läuft Gefahr, entweder die Aggregation nicht vollständig zu verhindern, oder aber Einkristalle zu zerstören. Anderseits erhält man aus Dünnschliffuntersuchungen nur mittlere Kornquerschnitte, die nicht dem wahren Korndurchmesser, dem Kornkaliber entsprechen. Hingegen kann aus den mittleren Durchmessern der Schnittflächen das Kaliber berechnet werden; der Faktor, mit welchem dk multipliziert werden muß,

beträgt nach den Berechnungen von *Mader* (1925) 1,62, allerdings nur bei sich berührenden Kugeln. Die Abplattung zufolge der endlichen Berührungsflächen bedingt eine kleine Verminderung, die je nach dem Kornbindungsmaß KM variiert. Da die Berücksichtigung des KM bei einer idealisierten Berechnung des neuen Faktors zu einer nicht adäquaten Genauigkeit führen würde, setzen wir als plausibeln Mittelwert 1,5 ein.

Der Bestimmung von Fk erwachsen bei komplizierteren Kornformen ohnehin kaum zu beseitigende Schwierigkeiten. Besonders bei Dendriten liefert ein und derselbe Kristall nicht selten getrennte Schnittflächen, so daß Fk zu klein ausfallen muß. Gleichzeitig verliert dieser Strukturwert seine Berechtigung, weil die daraus abgeleitete Korngröße zu sehr von der Definition (maximaler Durchmesser, mittlerer Durchmesser, Durchmesser der massengleichen Kugel usw.) abhängt, Tatsachen, die sehr schön auch in den Diagrammen zum Ausdruck kommen (Fig. 37, besonders c 1.4.).

3. BZ—räumliche Koordinationszahl (KZ): Die BZ der Ebene steht in enger Beziehung zur räumlichen Koordinationszahl (KZ, Gesamtzahl der am Korn vorhandenen Kontakte). Da jedoch, selbst bei statistisch homogenen Texturen, keine Symmetriebedingungen für die Anordnung der Körner im Raume gegeben sind, läßt sich nur eine angenäherte Berechnung durchführen:

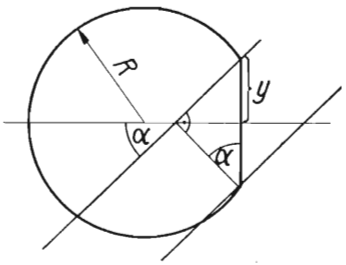


Fig. 35: Berechnung von Koordinationszahl KZ aus Bindungszahl BZ, Korndurchmesser dk und Bindungsstrecke Bk.

W: Wahrscheinlichkeit, daß eine einzelne Kontaktfläche getroffen wird;

w : Wahrscheinlichkeit, daß bei einem Korn eine der vorhandenen Kontaktflächen getroffen wird;

R: Kugelradius (Korn als Kugel gedacht);

y: Radius der Kontaktfläche (kreisförmig gedacht);

KZ: Gesamtzahl der am Korn vorhandenen Kontaktstellen.

$$W\alpha = \frac{y}{R} \cos \alpha$$

$$W = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{y}{R} \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = \frac{2\,y}{R}$$

$$w = \frac{2\,y}{R} \cdot KZ = BZ$$

Nach den Berechnungen von *Mader* (1925) ergibt sich nun als wahrscheinlichster Wert für R und y:

$$R = \frac{dk}{2}\,\frac{\pi^2}{8} \quad \text{und} \quad y = \frac{\pi}{2}\,\frac{Bk}{BZ}$$

Somit erhält man für die räumliche Koordinationszahl:

$$KZ = \frac{\pi^3}{16} \cdot \frac{dk}{Bk} \cdot (BZ)^2$$

Einige Zahlenbeispiele für die verschiedenen Schneesorten sollen die sich so ergebenden räumlichen Koordinationszahlen (bzw. Bindungszahlen) veranschaulichen (Tabelle 7). Die Werte dürfen als sehr plausibel gelten für Trockenschnee (KZ um 4, wie Diamantstruktur) und für Schnee mit leichtem Schmelzwassereinfluß (KZ 6 bis 12). Bei Firn führt dieser simple Weg der Berechnung allerdings zu unbrauchbaren Resultaten.

Ueber die Homogenität, bzw. das Maß der Inhomogenität der Kornbindungszahl kann der Kornbindungskurve einiges entnommen werden. Sie gibt graphisch den prozentualen Anteil der ausgezählten Kontaktstellen (die zur Mittelung für die BZ benützt wurden) an. Naturgemäß können diese Kurven nur für den Vergleich untereinander

Tabelle 7: **Beispiele für die berechnete KZ**

Schneeart	BZ	Bk	dk	KZ
△	0,322	0,041	0,350	1,73
△	0,373	0,071	0,512	1,95
■	0,511	0,059	0,278	2,39
■	0,838	0,137	0,328	3,27
+	0,900	0,123	0,243	3,11
+	0,887	0,101	0,252	3,80
×	1,013	0,109	0,213	3,90
×	0,931	0,120	0,308	4,31
×	1,275	0,310	0,447	4,52
○	1,548	0,309	0,449	6,72
○	1,951	0,301	0,399	9,80
○	2,281	0,521	0,567	11,0
●	2,730	0,651	0,672	14,9
●	3,655	0,813	0,594	18,9
●	3,833	0,790	0 559	20,2

benützt werden; doch heben sich die einzelnen Schneearten recht deutlich voneinander ab. Die Maxima würden selbst bei gesetzmäßiger Kugelanordnung — da es sich um Auszählungen in Schnitten handelt — gegen größere BZ hin flacher und dürfen deshalb nicht mit ihrem Absolutbetrag für Rückschlüsse auf die Streuung der räumlichen Koordinationszahl (KZ) verwendet werden. Maßgebend ist nur der Kurvenverlauf. Die fünf Kurven (Fig. 36) stellen typische Beispiele einzelner Schneesorten dar.

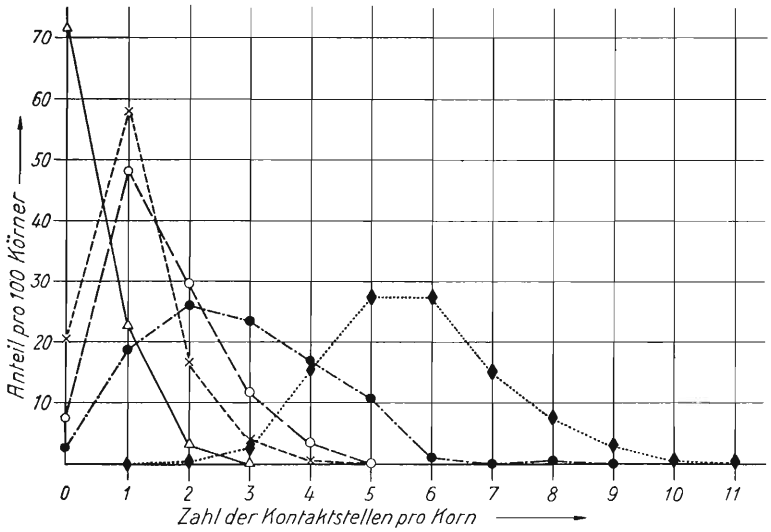


Fig. 36: Kornbindungskurven verschiedener Schneearten (typische Beispiele); als Abszisse die Zahl der an einem Kornquerschnitt vorhandenen Kontakstellen; die Ordinate gibt an, wieviel von 100 Körnern auf die betreffende Zahl von Kontaktstellen entfallen.

△ hochmetamorpher Schwimmschnee KBz 0,322, 205 ausgezählte Kornquerschnitte
× rundkörniger Trockenschnee KBz 1,062, 405 ausgezählte Kornquerschnitte
○ gefrorener Naßschnee KBz 1,548, 361 ausgezählte Kornquerschnitte
● Firn KBz 2,730, 336 ausgezählte Kornquerschnitte
♦ porenfreies Eis KBz 5,744, 575 ausgezählte Kornquerschnitte

4. Kornformkoeffizient ψk—Kornform: Es ist auffallend, wie wenig der Kornformkoeffizient Rückschlüsse auf die Kornform zuläßt. Eine Beziehung zur räumlichen Gestalt läßt sich deshalb kaum anknüpfen. Die Untersuchung der Morphologie des Einkristalles bleibt ganz Binokular und Goniometer vorbehalten.

5. Uk—Oberfläche: Zwischen Uk und der Oberfläche bestehen bei bekannter Form und bestimmten Annahmen gesetzmäßige Beziehungen. Die Kenntnis der freien Oberfläche eines bestimmten Volumens Schnee wäre sehr wertvoll. Umgekehrt gäbe der Koeffizient Oberfläche/Uk einen Anhaltspunkt über die Korngestalt.

Hier können nur direkte Messungen, welche nicht allzugroße Schwierigkeiten bereiten dürften, weiterhelfen.

6. Bk—Kontaktfläche: Insbesondere für die quantitative Erfassung der Zusammenhänge mit der Schneemechanik wäre es sehr wertvoll, die absolute Größe der Kontaktflächen zu kennen. Von den Bindungsstrecken — den Schnittgeraden der Kontaktflächen mit der Schnittebene — ausgehend, kann nur eine rohe und sehr idealisierte Berechnung vorgenommen werden, z. B. so, daß man alle Kontaktflächen als eben und kreisförmig annimmt. Dann läßt sich die Gesamtfläche aller durch die betreffende Schnittebene angeschnittenen Kontaktflächen — unabhängig von der Orientierung — folgendermaßen berechnen:

r: halbe mittlere Länge einer einzelnen Bindungsstrecke.

$$r = \frac{Bk}{BZ}$$

Daraus erhält man den Radius R der kreisförmig gedachten Kontaktfläche, wenn man R als den Mittelwert der Ordinaten M(y) des Halbkreises mit der x-Achse als Durchmesser betrachtet.

$$M(y) = r = \frac{\int_0^{R\pi} y \cdot ds}{\int_0^{R\pi} ds} = \frac{R}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \delta \cdot d\delta = \frac{2R}{\pi}$$

Damit ergibt sich für die mittlere Fläche F einer Kontaktfläche:

$$F = \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{Bk}{BZ}\right]^2 \pi = \frac{\pi^3}{4} (Bk/BZ)^2 \text{ in } mm^2$$

Die Zahl der pro Quadratzentimeter Schnittfläche einer Schneeart angetroffenen Kontaktflächen erhält man aus der Summe der ausgezählten Bindungsstrecken (Σb, benützt bei der Berechnung von BZ) und der totalen ausgemessenen Fläche ($F_{tot.}$, benützt bei der Berechnung von Vp usw).

KF, die Gesamtfläche aller von einer Einheitsschnittfläche angeschnittenen Kontaktflächen, ergibt sich damit zu

$$KF = \frac{\pi^3}{4} (Bk/BZ)^2 \cdot (\sum b / F_{tot.}) \text{ in } mm^2/cm^2 \text{ [1]}$$

Es zeigte sich, daß dieser Wert enge Beziehungen mit Größen der Schneemechanik erkennen läßt (Fig. 40, 42).

---

[1]) Die beiden Ebenenmaße wurden absichtlich nicht in Uebereinstimmung gebracht, um den völlig verschiedenen Charakter (Orientierung usw.) zu wahren.

5. Beziehungen zwischen Gefügewerten und Metamorphose sowie Gefügewerten und mechanischen Eigenschaften.

Da sich die Brauchbarkeit einer derartigen Gefügeanalyse erst aus den Anwendungen ergeben kann, seien einige Versuche in dieser Richtung hier wiedergegeben. Gleichzeitig läßt sich damit die zu erwartende Genauigkeit abschätzen. In einem ersten Beispiel seien die zeitlichen Variationen der Strukturwerte während der morphologisch konstruktiven Metamorphose untersucht, in einem zweiten die Korrelationsmöglichkeit mit mechanischen Größen.

a) Gefügewerte und Metamorphose (Fig. 37).

Die Schneesorten der Gruppe 5 (siehe Seite 40) wurden bei den Profilgrabungen im Standardversuchsfeld (14tägig) immer den gleichen zwei Schichten (b Untergrenze und c Obergrenze) entnommen: Schicht b Werte vom 18. Januar, 2. Februar, 16. Februar — 1. März fehlt leider —, 16. März, 1. April und Schicht c vom 2. Februar, 16. Februar, 1. März, 16. März, 1. April. Es ist derselbe Schnee, welcher für die Untersuchungen der Kornformen (Binokular) benützt wurde.

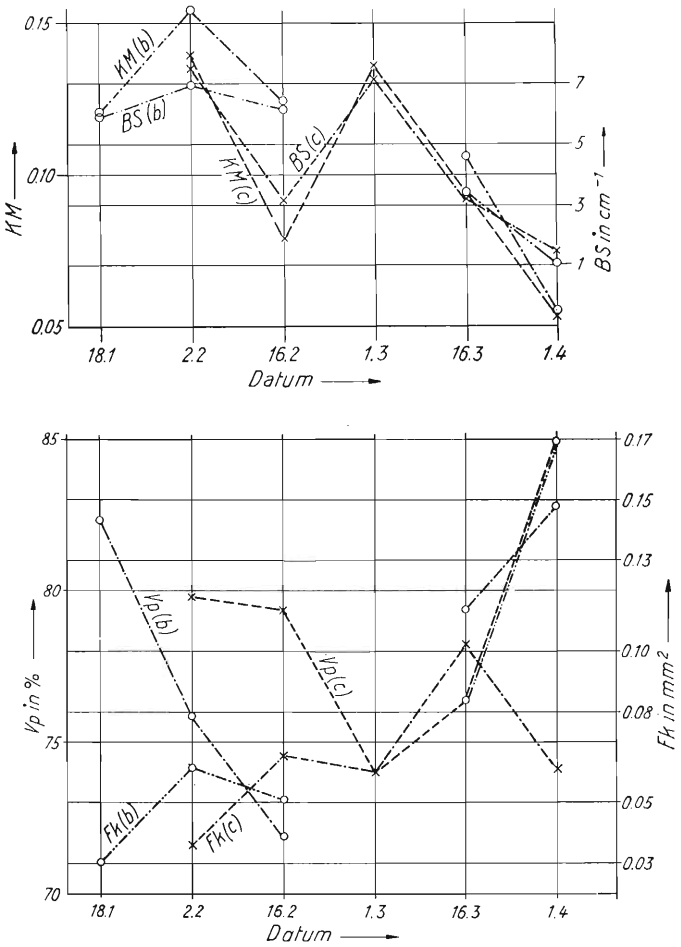


Fig. 37a, b:
Gefügewerte und Metamorphose. Werte aus den Profilen des Standardversuchsfeldes Weißfluhjoch, Winter 1948/49. Zeitliche Aenderung der Werte KM, BS, Vp und Fk in den Schichten b (○) und c (×). Die Werte für b vom 1. März fehlen.

Figur 37 gibt die zeitliche Variation der vier wichtigsten Gefügedaten wieder. Die Aenderungen von KM und BS verlaufen gleichwertig; Vp und Fk zeigen ungefähr eine inverse Entwicklung. Vergleicht man die Kurven mit den Temperaturgradient- und Kornformkurven (Fig. 13 und 14), so stellt man eine fast vollständige Uebereinstimmung

fest. Die Unregelmäßigkeiten in Vp zu Beginn rühren daher, daß sich zunächst der morphologisch konstruktiven Metamorphose noch Setzung überlagert. Daß Fk bei komplizierten Kornformen keine guten Werte mehr gibt, erkennt man in der Schicht c am 1. März. Dieselben Zusammenhänge, die sich bei der morphologisch konstruktiven Metamorphose zwischen Witterungsablauf und Kornformentwicklung (als Index für die Metamorphose) ergeben, lassen sich auch in den Aenderungen der Gefügewerte verfolgen.

Die einzelnen Werte dürfen trotz der ausgesprochenen Anisotropie des Gefüges direkt miteinander verglichen werden, weil die Schnittebenen gleich orientiert wurden (Vertikalebenen). Hingegen läßt ein Vergleich von Vp mit dem gleichzeitig gemessenen Raumgewicht γs eine um so größere Abweichung erkennen, je stärker die Umkristallisation des betreffenden Schnees fortgeschritten war, und zwar in der Weise, daß die Dichtebestimmung in Vertikalebenen immer zu tief ausfällt (d. h. also sicher keine Verwechslung von Kornprojektionen mit Schnittflächen).

b) Gefügewerte und mechanische Eigenschaften.

An einzelnen für die Strukturanalyse benützten Schneesorten wurden gleichzeitig die Zerreißfestigkeit (βz in kg/dm^2, dynamisch gemessen, vgl. z. B. *Bucher* 1949) und die Zähigkeit (μ in Poise, aus Messungen der Kriechwege) bestimmt. Die graphischen Vergleiche sind in den Figuren 38—42 wiedergegeben.

1. βz/KM (Fig. 38). Die Größe von βz, das einen Bruchvorgang repräsentiert, ist vor allem — bei konstanter Temperatur — von der Stärke der Bindung abhängig. Für KM und BS ergeben sich ähnliche Bilder. Die Streuung ist ziemlich groß (Maßstab),

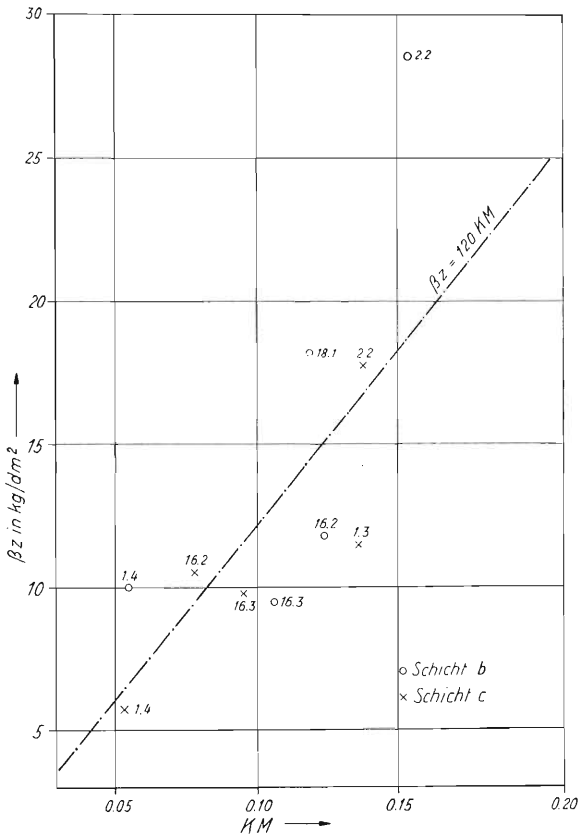


Fig. 38: Diagramm Zerreißfestigkeit βz/Kornbindungsmaß KM. Die Wertepaare für die Schichten b (○) und c (×) zu verschiedenen Zeitpunkten (Daten der Probeentnahme bei den entsprechenden Werten). Als Symmetrieachse etwa $\beta z = 120$ KM.

zum guten Teil wohl durch βz bedingt, das einer Minimalbedingung entspricht, während KM eher einen Mittelwert darstellt. Jedoch eignen sich gerade die verwendeten Schneesorten, die alle schon recht weitgehend umkristallisiert waren, schlecht für derartige Vergleiche, obschon die Ebene des Bruches jeweils mit der Schnittebene übereinstimmt. Es läßt sich dennoch gut eine Symmetrieachse zeichnen, die dem mutmaßlichen Verlauf entspricht. Die Funktion lautet etwa βz (in kg/dm²) = 120 KM.

Allerdings kann die Funktion βz = f(KM) nur im untersten Teil linear verlaufen, wie schon der Wert Schicht b 2.2. vermuten läßt. Die Bestätigung geben die Grenzwerte für Eis: KM = 1,0 und βz zirka 700 kg/dm², d. h. die konkave Kurve verläuft bei höheren Werten immer steiler. Das bedeutet, daß bei gleicher Zunahme des KM die Zerreißfestigkeit für wenig gebundenen Schnee weniger stark erhöht wird als für Schnee mit großem KM. Umgekehrt, von Eis ausgehend, verursacht schon eine geringe Porosität eine relativ starke Abnahme des βz. Daß die Werte nicht proportional ändern, hängt wohl mit dem Bruchmechanismus zusammen. In porösem Schnee findet beim Zerreißen zwischen den Körnern eine Hebelwirkung statt, während für poröses Eis ein Kerbeffekt zu erwarten ist. Beide Vorgänge sind sehr ungleich empfindlich auf Aenderungen des KM.

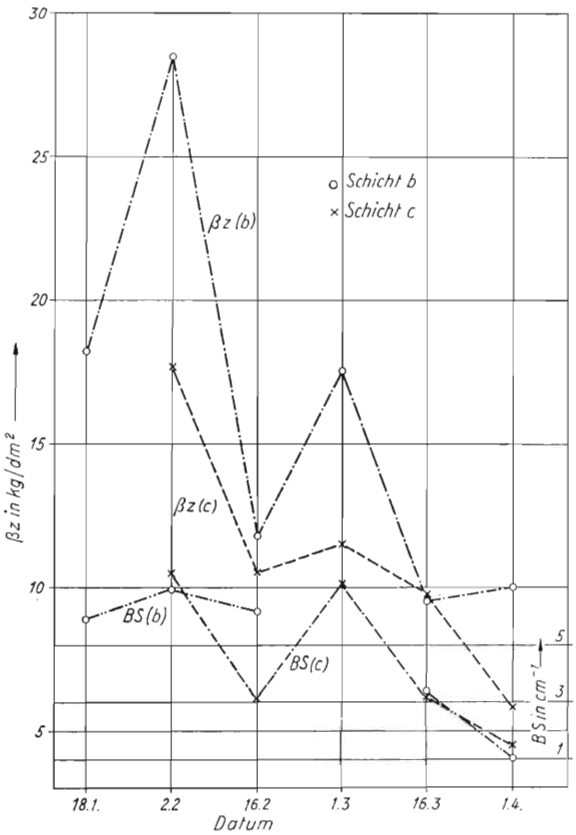


Fig. 39: Zeitliche Aenderungen von βz und BS für Proben der Schichten b (○) und c (×). Die Werte für b vom 1. März fehlen.

2. βz und BS (Fig. 39). Die zeitliche Aenderung von βz (Fig. 39) ergibt ebenfalls einen eindeutigen Zusammenhang mit dem Verlauf der morphologisch konstruktiven Metamorphose. Deshalb stimmt der Kurvenverlauf mit jenem von BS überein. Die Ursache von Verfestigung und Entfestigung — für die βz ja ein Ausdruck ist — dürfte damit einmal mehr belegt sein. In diesem speziellen Fall (starke Umkristallisation) genügt die Aenderung des Temperaturgradienten zur Erklärung. Irgendwelche Ueber-

lagerungsdrucke scheinen nach dem 2. Februar kaum mehr eine Rolle zu spielen, was auch aus der geringen Setzung hervorgeht. Während die Analogie βz—Kornformkurven (Fig. 13), Gradientkurve (Fig. 14) Spezialbedingungen entspricht, dürfen die gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen βz und einzelnen Gefügedaten (insbesondere KM und BS) wohl allgemeinere Gültigkeit beanspruchen.

3. *βz/KF* (Fig. 40). Um die Abhängigkeiten noch etwas enger zu gestalten, wurde die KF (Kontaktfläche in mm^2/cm^2, siehe Seite 56) berechnet. Die Punkte ordnen sich

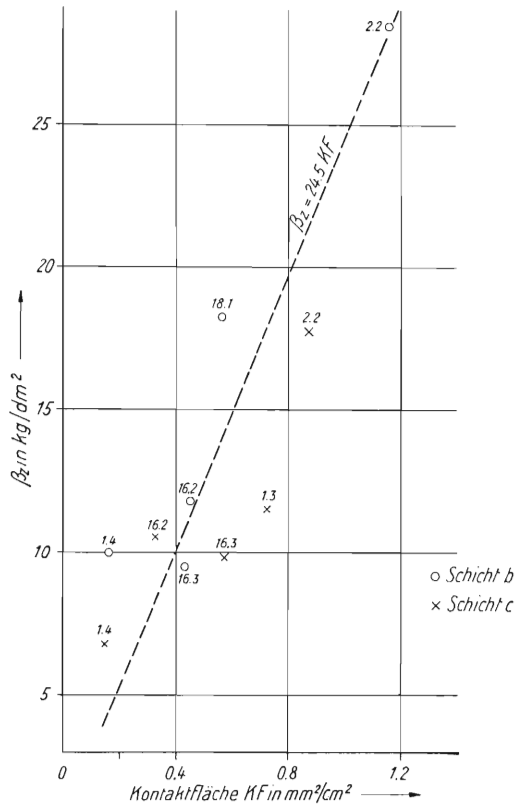


Fig. 40: Diagramm Zerreißfestigkeit βz/Kontaktfläche KF für Proben der Schichten b (×) und c (○) zu verschiedenen Zeitpunkten (Profildaten). Als Symmetrieachse etwa βz = 24,5 KF.

um eine Symmetrieachse, die der Funktion βz (in kg/dm^2) = 24,5 KF entspricht. Die Kurve ist nur im untersten, gezeichneten Bereich linear.

Mit diesem einen Beispiel, das nur genetisch analoge Schneesorten (alles Stadien der morphologisch konstruktiven Metamorphose) umfaßt, ist naturgemäß noch keine in jedem Falle gültige Korrelation nachgewiesen. Möglicherweise ist für die Gesamtheit aller natürlichen Schneesorten mit viel größeren Streuungen zu rechnen.

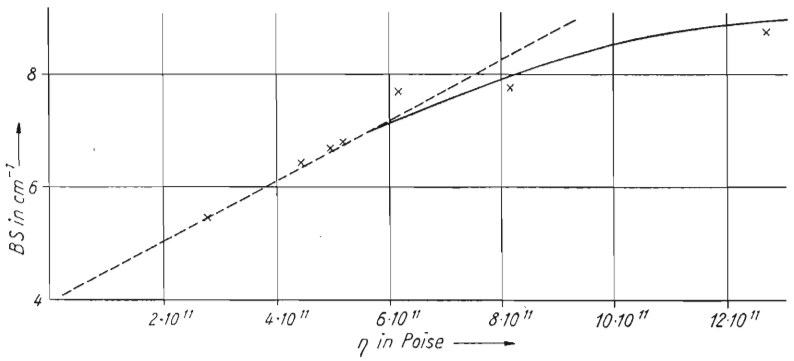


Fig. 41: Diagramm Zähigkeit η / spezifische Bindungsstrecke BS. Aus den Kriechversuchen mit rundkörnigem Trockenschnee (+).

4. BS/η (Fig. 41). Anläßlich von Kriechversuchen mit eingesiebten Schneequadern (—3° C, Neigung 40°) wurden von 7 verschiedenen Schneeproben (5 am 4. April und 2 am 2. Juni) die Strukturwerte bestimmt, um die Beziehungen zur Zähigkeit η festzulegen. Für 3 Proben desselben Blocks (80 × 40 cm, Höhe 60 cm) lauten die Daten:

Tabelle 8:

Lage der Probe	Vp in %	BZ	KM	Fk in mm²	BS in mm²	η in Poise
Unten	71,12	0,911	0,129	0,057	6,77	$5{,}18 \times 10^{11}$
Mitte	70,54	0,957	0,138	0,061	6,68	$4{,}94 \times 10^{11}$
Oben	75,74	0,887	0,111	0,050	5,45	$2{,}78 \times 10^{11}$

Der Schnee scheint in der Mitte am stärksten gepackt worden zu sein, weil für eine Vergrößerung des Raumgewichtes nicht nur die darüberliegende Last, sondern auch die Möglichkeiten zu Kornverschiebungen (Kriechen!) maßgebend sind. Aus den Werten erkennt man sehr schön, daß sich die Zusammenhänge nur dann gesetzmäßig gestalten, wenn von den Gefügewerten BS benützt wird. Deshalb wurde für die übrigen 4 Proben nur noch dieser Wert bestimmt — ein Beispiel dafür, wie sich bei speziellen Fragestellungen sinngemäße Abkürzungen der Auswertung vornehmen lassen.

Die Funktion BS = f(η) verläuft im unteren Teil nahezu linear. Bei stärker gebundenem Schnee (hohem BS) jedoch verursacht eine entsprechende Zunahme von BS eine viel stärkere Erhöhung der Zähigkeit η.

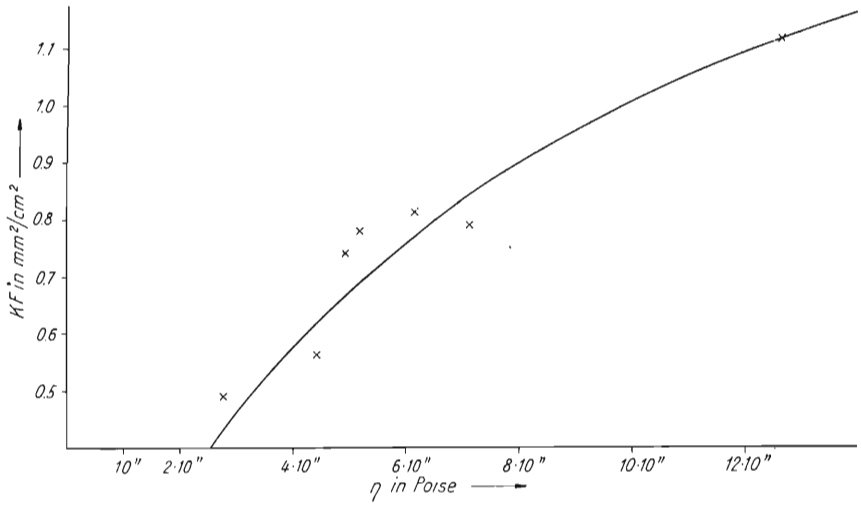


Fig. 42: Diagramm Zähigkeit η/Kontaktfläche KF. Aus den Kriechversuchen mit rundkörnigem Trockenschnee (+).

5. KF/η (Fig. 42) läßt analoge Verhältnisse erkennen, nur daß die Funktion jetzt im untersten Teil quadratische Form (Parabel) besitzt.

Mit den Diagrammen Figur 40 und 42 ist an sich die Möglichkeit gegeben, eine empirische Korrelation von βz und η vorzunehmen. Welche Berechtigung einer solchen Verknüpfung zukommt, insbesondere wenn man Schneesorten der verschiedensten Entstehung miteinander vergleicht, wird erst die Erfahrung lehren.

6. Kornwachstum und Aggregation.

Zum Schluß sei noch kurz auf eine nomenklatorische Frage hingewiesen, auf den Unterschied zwischen Kornwachstum und Aggregation. Spricht man von Kornwachstum, dann setzt dies eine genaue Umschreibung des Begriffes Korn voraus. Schon der Definition der Einkristallgröße als Größe eines primären Gefügekornes erwachsen — besonders bei komplexerer Gestalt — beträchtliche Schwierigkeiten. Um so schwerer abgrenzbar ist ein sekundäres Gefügekorn, das aus mehreren besonders stark miteinander verknüpften Einkristallen besteht (etwas deutlicher vor allem bei rundkörnigem Altschnee). Um diesen Schwierigkeiten auszuweichen, sollte nur dann von Kornwachstum (oder unklarer von «echtem Kornwachstum») gesprochen werden, wenn das primäre Gefügekorn — der Einkristall — an Masse gewinnt. Gestaltänderung des Einkristalls bei konstanter Masse (morphologisch destruktive Metamorphose) bleibt ausgeschlossen. Eine stärkere Verknüpfung primärer Gefügekörner (z. B. Vergrößerung des sekundären Kornes) wird als Aggregation bezeichnet.

Die Größe des primären Gefügekornes kann optisch oder mit Aetzungen ermittelt werden. Jene «Korngröße», welche man durch Schlämmanalysen erhält (vgl. z. B. *de Quervain* 1948), entspricht entweder der Größe eines sekundären Gefügekornes oder einem Wert irgendwo zwischen dieser und der Größe des Einkristalles.

Für die wichtigsten Metamorphoseäste gilt demnach:

Morphologisch destruktive Metamorphose: Die morphologisch destruktive Metamorphose führt nicht zu einem Kornwachstum, sondern nur zu einer Verkleinerung des maximalen Durchmessers. Hingegen wird die Aggregation verstärkt und damit das sekundäre Gefügekorn meist vergrößert.

Morphologisch konstruktive Metamorphose: Die morphologisch konstruktive Metamorphose hat ein echtes Kornwachstum zur Folge; doch wird dabei die Aggregation vermindert.

Schmelzwassereinfluß: Schmelzwassereinfluß bedingt gleichzeitig Vergrößerung des primären und des sekundären Gefügekornes.

Die Voraussetzungen sind also:

Kornwachstum: Umkristallisation unter Einfluß eines Temperaturgradienten oder Schmelzwassereinfluß.

Aggregation: Morphologisch destruktive Metamorphose (verbunden mit Setzung) oder Schmelzwassereinfluß.

Man erkennt diese Zusammenhänge in der Schneedecke sehr schön: Die primären Körner werden erst dann gröber, wenn merkliche Umkristallisation vorhanden ist, oder bei Temperaturen, die um den Nullpunkt pendeln. Wird Schnee bei konstanten tieferen Temperaturen aufbewahrt, dann bleibt die Korngröße während Monaten unverändert.

7. Schlußfolgerungen.

Die ersten Versuche und Anwendungsbeispiele lassen erkennen, daß diese Art der Gefügeanalyse ohne weiteres zu einem wertvollen Hilfsmittel ausgebaut werden kann für alle jene Fragen, welche sich mit gefügeabhängigen Eigenschaften befassen. Sie gestattet, zusammen mit ihrer wichtigsten Ergänzung, der Achsenverteilungsanalyse, die geometrische Beschaffenheit eines Gefüges direkt und mit beliebiger Genauigkeit wiederzugeben. Obschon der Arbeitsaufwand in vielen Fällen groß erscheinen mag, wird er sich doch bei der Klärung grundsätzlicher Fragen ohne weiteres rechtfertigen.

V. Zusammenfassung.

Diese Arbeit, die sich mit dem Gefüge — vor allem mit der Struktur — des Schnees befaßt, gibt in einem ersten Teil einen Ueberblick über die wichtigsten Kornformen des Schnees und ihre gegenseitigen Beziehungen und Abhängigkeiten während der verschiedenen Metamorphosearten. In einem zweiten Teil werden die Untersuchungen über Struktur und Textur hochmetamorpher Schneearten mitgeteilt, sowie eine Zusammenstellung der wichtigsten Gefügetypen, wie sie sich einer phänomenologischen Betrachtung darlegen. Im letzten Teil wird versucht, die Grundlagen einer Strukturanalyse an Dünnschliffen zu geben und ihre Brauchbarkeit zur genaueren Kennzeichnung des Untersuchungsmaterials abzuklären.

Literaturverzeichnis.

Ahlmann, H. W. and Droessler, E. G.: Glacier Ice Crystal Measurements at Kebnekajse, Sweden. The Journal of Glaciology 1/5, 1949.

Bader, H., in *Niggli, P.* usw.

Bader, H.: Introduction to Ice Petrofabrics. The Journal of Geology 59/6, 1951.

Bucher, E.: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbaus. Beitr. z. Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie, Hydrologie, Lf. 6, Bern 1948.

Buckley, H. E.: Crystal Growth. New York 1951.

Bunn, C. W.: Crystal Growth from Solution. In: Crystal Growth, Discussions of the Faraday Society No. 5, London 1949.

Von Engelhardt, W. und Pitter, H.: Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngröße. Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie, Bd. II/6, 1951.

Ehlers, J.: Beitrag zur Kenntnis des Kristallwachstums aus der Dampfphase. Diss. Kiel 1935.

Eugster, E.: Schneestudien im Oberwallis und ihre Anwendung auf den Lawinenverbau. Beitr. z. Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie, Hydrologie, Lf. 2, Bern 1938.

Eugster, H. P.: Morphologie und Metamorphose des Schnees. Schweiz. Min. Petr. Mitt. Bd. 29, 1949.

Evans, U. R. in: Crystal Growth, Discussions of the Faraday Society No. 5, London 1949.

Grengg R.: Ueber ziffernmäßiges Erfassen von Gefügeeigenschaften der Gesteine. Tschermaks Min. Petr. Mitt. Bd. 38, 1925.

Haefeli, R., in: *Niggli P.* usw.

Mader, M., in *Grengg, R.* usw.

Manegold, E. und Solf, K.: Ueber Kapillarsysteme, z. B. XII, Kolloid-Z, Bd. 56, 1931 und XIX/9, Kolloid-Z. Bd. 89, 1939.

Mason, B. I.: The formation of Ice crystals and snowflakes. The Centenary Proceedings of the Royal Meteorological Society 1950.

Nakaya, U. und Mitarbeiter: Physical investigations on snow. Uebertragen in Bd. 2 der Mitteilungen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, 1943/1.

Niggli, P., Bader, H., Haefeli, R., Bucher, E., Neher, J., Eckel, O., Thams, Ch.: Der Schnee und seine Metamorphose. Beitr. z. Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie, Hydrologie, Lf. 3, Bern 1939.

Niggli, P.: Lehrbuch der Mineralogie und Kristallchemie, Teil I, 3. Aufl. Berlin 1941.

Niggli, P.: Gesteine und Minerallagerstätten, Bd. 1, Basel 1948.

Papapetrou, A.: Untersuchungen über dendritisches Wachstum von Kristallen. Z. Krist. A 92, 1935.

Paulcke W.: Der Schnee und seine Diagenese. Z. f. Gletscherkde. 21, 1934.

Paulcke W.: Praktische Schnee- und Lawinenkunde. Berlin 1938.

De Quervain, M.: Schnee als kristallines Aggregat. Experientia 1, 1945.

De Quervain, M.: Korngrößenanalyse von Altschnee durch Sedimentation. Schweiz. Bauzeitg. 66, 1948.

De Quervain, M.: Das Korngefüge von Schnee. Schweiz. Min. Petr. Mitt. Bd. 28, 1948.

De Quervain, M.: Die Festigkeitseigenschaften der Schneedecke und ihre Messung. Geofisica pura e applicata, Vol. 18, 1950.

Rigsby, G. P.: Crystal Fabric Studies on Emmous Glacier Mount Rainier, Washington. The Journal of Geology 59/6, 1951.

Sander, B.: Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. II. Teil: Die Korngefüge. Wien 1950.

Seligman, G.: Snow structure and ski fields. London 1936.

Seligman, G.: The Growth of the Glacier Crystal. The Journal of Glaciology 1/5, 1949 and 1/7, 1950.

Sharp, R. P.: Features of the Firn on upper Seward Glacier, Canada. The Journal of Geology 59/6, 1951.

Spangenberg, K.: Wachstum und Auflösung der Kristalle. Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Bd. X, 2. Aufl. 1934.

Steinmetz, H.: Die Kristallsymmetrie des Eises. Z. angew. Min. Bd. 3, 1941.

Tertsch, H.: Trachten der Kristalle. Berlin 1926.

Valeton J. J. P.: Wachstum und Auflösung der Kristalle, I, II und III. Z. Krist. 59 und 60, 1923/24.

Vogel, R.: Ueber dendritische Kristallisation und ihren Einfluß auf die Festigkeit der Metallegierungen. Z. allg. und anorg. Chemie, Bd. 116, 1921.

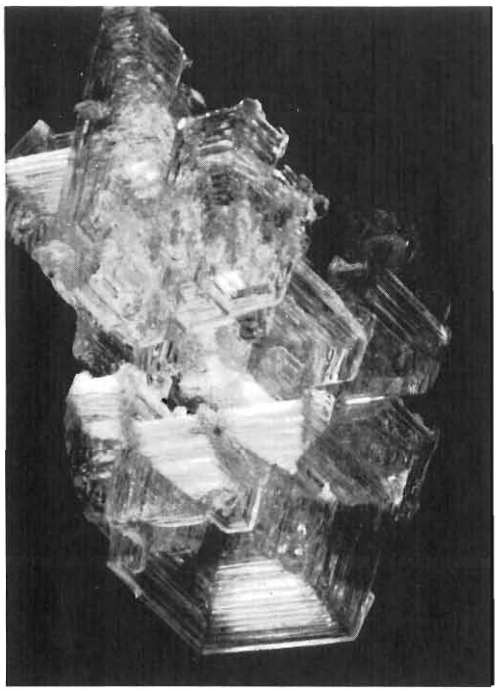
Weickmann, H.: Die Eisphase in der Atmosphäre. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, US-Zone, Nr. 6, 1949.

Work, R. A.: Snow-Layer Density Changes. Transactions Amer. Geophys. Union, Vol. 29/4, 1948.

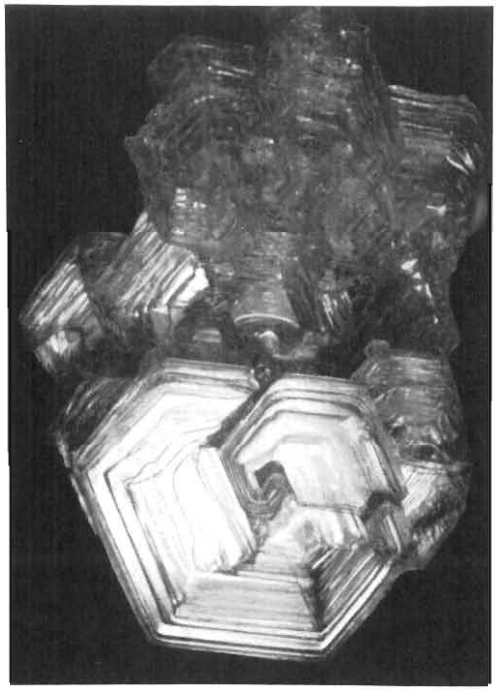
Zimens, K. E.: Poröse Stoffe, Kennzeichnung, Herstellung und Eigenschaften. Chalmers Tekniska Högskolas Handlingar No. 40, Göteborg 1944.

Zingg, Th., In der Gand, H., Schild, M.: Schnee und Lawinen im Winter 1946/47, 1947/48, 1948/49. Winterberichte des Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung, Nrn. 11, 12, 13. Davos 1949/1950.

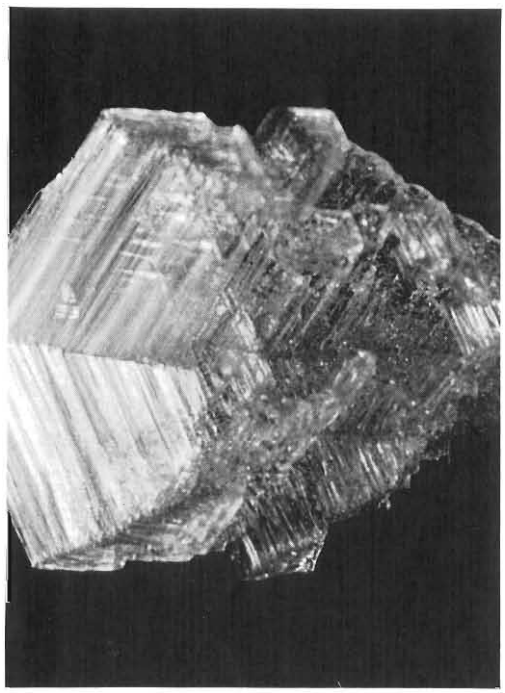
Tafel II: Beispiele basaler Becher (Höhlenreifkristalle)



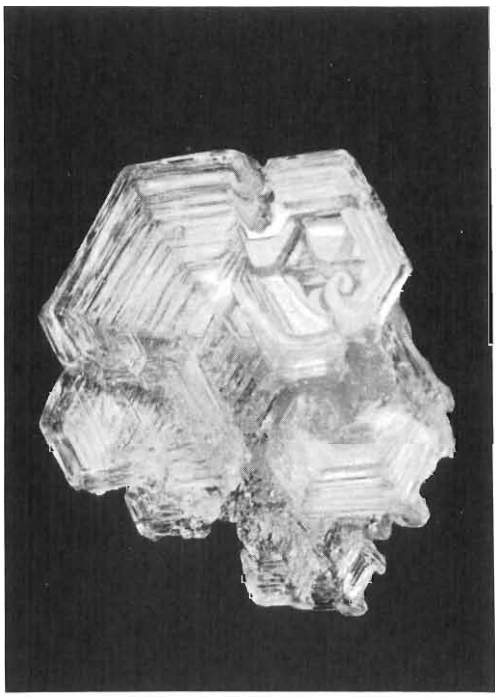
a) Verschiedene, miteinander verwachsene, eingerollte basale Becher.



b) Dieselbe Stufe, aber die Zwischenbasisflächen reflektierend.

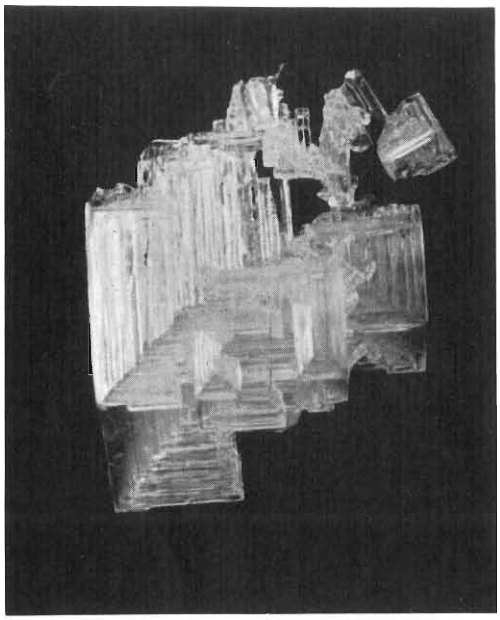


c) Unvollständig ausgebildeter basaler Becher, sehr reich gegliedert durch große Zwischenbasisflächen.

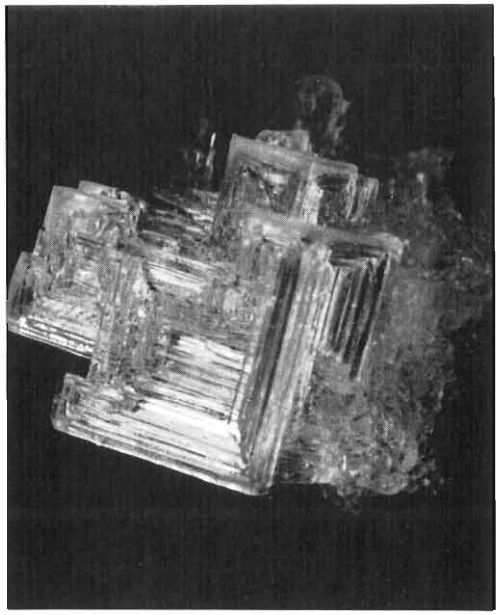


d) Verschiedene basale Becher, leicht eingerollt.

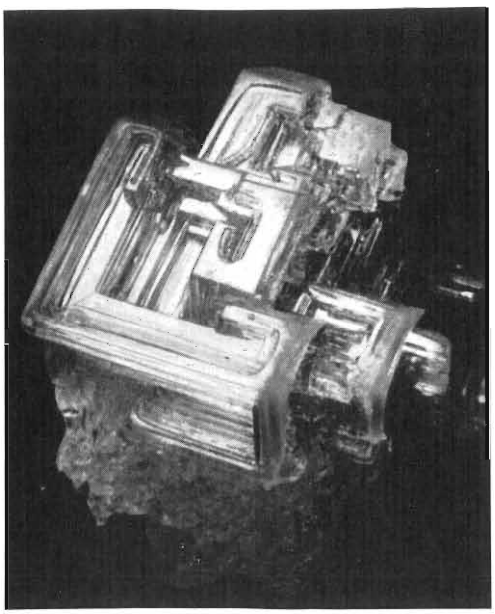
Tafel III: Beispiele prismatischer Becher (Höhlenreifkristalle)



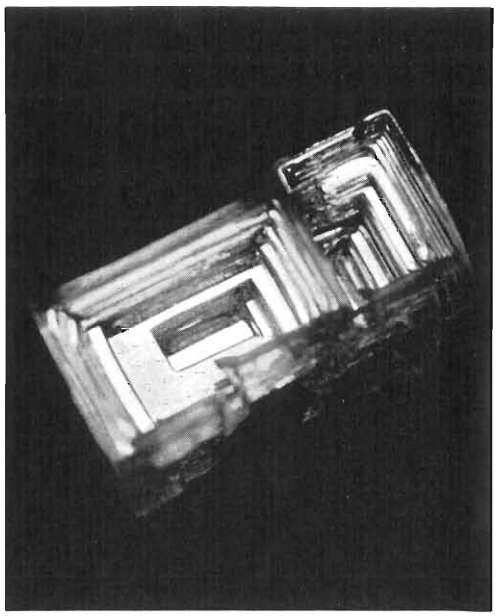
a) Stark und schmal gestufter prismatischer Becher. Sichtbar sind zwei durch Treppen ersetzte Prismenseiten.



b) Ebenso, leicht eingerollt.



c) Derselbe Kristall, aber die Stufen der Prismenflächen reflektierend.



d) Prismatischer Becher, Prismenflächen reflektierend.