

## Eis- und Gletscherstudien.

Von

**Hans Crammer** in Salzburg.

Mit Taf. VI—VIII und 30 Textfiguren.

Vor ungefähr 10 Jahren habe ich mit Gletschervermessungen und dem Studium des Eishöhlenphänomenes begonnen. Durch die häufige Berührung mit dem Eise wuchs mein Interesse für dasselbe. Ich studirte seine Structur, beobachtete sein Wachsthum und sein Schmelzen. Schliesslich wendete ich mich der schwebenden Frage der Eisbewegung in Gletschern zu.

Das Eis, welches ich in Betracht zog, entstand entweder unmittelbar aus Wasser, wie das Seeeis. Solches Eis nennen wir Wassereis. Oder es war Eis aus Schnee, wie das Firneis und das aus diesem durch Bewegung hervorgegangene Gletschereis.

### I. Das Wassereis.

Vorzugsweise sind drei Gattungen Wassereis zu unterscheiden: Das Seeeis, das Rieseis und der Eisgasch.

Es entsteht das Seeeis auf der Oberfläche stehender Gewässer, das Rieseis, wenn in dünner Schichte rieselndes Wasser gefriert, und der Eisgasch bei grosser Kälte auf der Oberfläche stärker fliessender Gewässer. Der Eisgasch findet in der vorliegenden Abhandlung keine Berücksichtigung.

#### Die Krystallstructur des Wassereises.

Frisch gebildetes Wassereis erscheint glasig. Zerschlägt man es, so bricht es muschelig. Erst wenn das Eis thaut,

sieht man, dass es eine ausgezeichnete Stengelstructur (Taf. VI Fig. 1) besitzt, die um so vollkommener hervortritt, je langsamer das Eis schmilzt<sup>1</sup>. Da in den Eishöhlen die Temperatur während der ganzen warmen Jahreszeit ausserordentlich langsam und wenig über 0° steigt, das Eis also aussergewöhnlich langsam schmilzt, konnte ich gerade in diesen Höhlen eine grosse Zahl guter Structurbeobachtungen machen.

Sobald in den Eishöhlen die Lufttemperatur 0° übersteigt, erscheint auf der bis dahin glatten Oberfläche der Eis-Stalaktiten, -Stalagmiten und -Krusten eine netzartige Zeichnung, welche durch feine, ungemein seichte Rinnchen gebildet wird. Die Maschen dieses Netzes sind unregelmässige Polygone mit geraden, oder schwach gekrümmten Seiten und deutlichen, fast durchwegs ausspringenden Ecken. Bei längerer Einwirkung der mässigen Wärme vertiefen sich die Rinnchen etwas, wodurch sie besser sichtbar werden (Taf VIII Fig. 12). Führt man in diesem Stadium einen gedämpften Schlag gegen das Eis, so setzt die Bruchfläche an einer Kette aneinandergereihter Seiten verschiedener Polygone an. Sie zieht sich von da, ebene oder schwach gekrümmte Flächen bildend, die sich nach Kanten verschneiden, eine kurze Strecke normal zur Eisoberfläche ins Innere, wo sie plötzlich muscheliger wird.

Lässt man das Eis unbeschädigt in der Höhle, so vergrössert sich der Querschnitt der Rinnchen durch Ausschmelzung, und zwar vertiefen sich die Rinnchen um vieles rascher, als sie sich seitlich erweitern. Die Vertiefung erfolgt entweder in gerader Richtung oder in schwacher Krümmung. In jedem Falle aber beginnt sie senkrecht zur Eisoberfläche. — Aus den ursprünglich ungemein seichten Rinnchen werden schmale, gegen das Eisinnere auskeilende, spaltähnliche Fugen (Taf. VII Fig. 8). Zerschlägt man jetzt das Eis, so verläuft der Bruch zunächst genau in der Fortsetzung der Fugen und erst weiter im Eisinnern wird er wieder muscheliger.

Mit der Zeit schreitet die Ausschmelzung der Fugen so weit vor, dass das Eis, wenn es nicht zu dick ist, vollständig

<sup>1</sup> Die Lichtbilder Taf. VI—VIII Fig. 1—15 wurden in folgender Weise gewonnen: Vom Eise machte ich einen Negativabdruck in Glaserkitt, davon einen Positivabguss in Gyps, und diesen photographirte ich.

in Stengel zerfällt. Damit übereinstimmende Beobachtungen machte ich auch am Eise im Freien, doch verhältnissmässig seltener, weil da das Eis kürzeren Bestand hat, und weil es bei höheren Lufttemperaturen, die im Freien der Kälte oft rasch folgen, nur oberflächlich schmilzt, ohne dass die Stengel-structur sichtbar wird.

Wenn Wassereis wächst, so rückt seine Oberfläche gewissermaassen nach aussen vor. Wir nennen die aufeinanderfolgenden Oberflächen des wachsenden Eises Gefrieroberflächen. Vergegenwärtigen wir uns ihre Lage im schmelzenden Eise, das die Stengelstructur bereits erkennen lässt, dann bemerken wir, dass die Stengel des See- und Rieseleises auf den aufeinanderfolgenden Gefrieroberflächen senkrecht stehen.

Schmilzt das Eis, so zieht sich seine Oberfläche wieder zurück. Die Schmelzungsoberflächen fallen keineswegs immer mit den einstigen Gefrieroberflächen zusammen, da nur wenige Eisgattungen, wie z. B. das Seeeis, ebenso gleichmässig an allen Punkten wachsen als sie abschmelzen. Das zeigt sich recht auffällig bei den Stalagmiten. Diese wachsen am Scheitel viel rascher als an den Seiten oder gar am Fusse, wo das Wachsthum häufig frühzeitig ganz aufhört. Im Gegensatz hierzu erfolgt die Abschmelzung überall ziemlich gleichmässig. Daher werden in diesem Falle die Gefrieroberflächen von den Schmelzungsoberflächen unter um so grösseren Winkeln geschnitten, je mehr Eis bereits abgeschmolzen ist. Das erklärt die Thatsache, dass in manchen Rieseleisgebilden und zwar besonders in den Eisstalagmiten die Stengel nur zu Beginn der Schmelzung auf der Eisoberfläche normal stehen.

Aus der besonderen Lage der Stengel zu den Gefrieroberflächen können wir auf die gleichzeitige Entstehung der Stengel mit dem Eise schliessen. Die Richtigkeit dieses Schlusses wird durch Folgendes bestätigt:

1. Bringt man ganz frisch entstandenes Eis in einen Raum, dessen Temperatur nur wenig über  $0^{\circ}$  ist, so erscheint alsbald auf der Oberfläche die uns schon bekannte netzartige Zeichnung, deren Maschen die Grundflächen der Stengel sind;
2. lehrt uns die Untersuchung mit dem Polarisationsmikroskop, dass jeder Stengel des schmelzenden Eises ein

einheitlicher, optisch einaxiger Krystall ist, und dass auch das frische, eben unter unseren Augen entstandene Eis aus eben solchen Krystallen aufgebaut ist. Im frischen Eise werden wir die Stengelstruktur nur deswegen nicht ohne weiteres gewahr, da sich in diesem die Krystalle dicht berühren. Erst wenn die Schmelzung längs den Berührungsflächen der Krystalle der allgemeinen Abschmelzung an der Oberfläche in das Eisinnere vorausgeeilt und in die ausgeschmolzenen Fugen Luft gedrungen ist, sehen wir die Krystalle im Einzelnen ohne Anwendung irgend eines Hilfsmittels<sup>1</sup>.

Die Krystalle des wachsenden Eises liegen nur in der jeweiligen Gefrieroberfläche frei. Sie hemmen sich daher gegenseitig nach allen Richtungen im Wachsthum, mit alleiniger Ausnahme in der Richtung senkrecht zur Gefrieroberfläche. Das ist die Ursache der Stengelform der Krystalle und der Normalstellung der Stengel zu den Gefrieroberflächen.

Die verschiedene Anordnung der Gefrieroberflächen in verschiedenen Eisbildungen bedingt abweichende Stengelformen. Kennen wir die Umrissse der Eiskrystalle in der anfänglich sich bildenden dünnen Eislage und den Verlauf der aufeinanderfolgenden Gefrieroberflächen, so sind wir im Stande, in jedem einzelnen Falle die Stengelform durch eine einfache geometrische Construction zu ermitteln. Wir brauchen bloss die Umrissse der Krystalle in der dünnen Eislage auf die nächste und von da aus auf die zweitnächste Gefrieroberfläche u. s. w. normal zu projeciren. Solche Constructionen werden uns im Folgenden manche eigenthümliche Krystallform verständlich machen. In allen bezüglichen Figuren, welche Normalschnitte zu den Gefrieroberflächen des Eises darstellen, wie z. B. Textfig. 1 p. 62, bedeutet die voll und kräftig gezogene Linie die anfängliche Eisanlage; die gestrichelten Linien versinnlichen einige der aufeinanderfolgenden Gefrieroberflächen und die darauf senkrecht stehenden, fein und vollgezogenen Linien stellen die Seitenflächen der Krystallstengel vor.

---

<sup>1</sup> In diesem Sinne habe ich mich bereits im Jahre 1897 geäußert. *PTERM. Mitth.* 1897. Literaturbericht No. 222.

### 1. Die Krystallformen des Seeees.

In Fig. 1 Taf. VI haben wir einen Verticalbruch durch eine 16 cm dicke thauende Seeeescholle vor uns. Die Krystalle sind verticale prismatische Stengel mit polygonalen Grundflächen. Die meisten Stengel reichen von oben bis unten. Wo einzelne von ihnen mitten im Eise plötzlich endigen, ist nicht ihr natürliches Ende, sondern da gingen sie beim Zerschlagen des Eises entzwei.

Die Stengel entstehen in folgender Weise: Auf der Oberfläche stehender Gewässer setzt die Eisbildung an vielen von einander entfernten Punkten fast gleichzeitig ein. Sie mag an diesen Stellen durch feste Körperchen, etwa durch Staubtheilchen, die auf dem Wasser schwimmen, begünstigt werden. Um jeden derartigen Punkt gruppieren sich die Molecüle des erstarrenden Wassers zu Krystallen, die von einander unabhängig, also selbständige Individuen sind. Infolge der Zunahme ihrer Zahl und Grösse, oder weil sie durch Wind zusammengetrieben werden<sup>1</sup>, kommen sie zu theilweiser Berührung. Sie wachsen dann weiter, indem die noch eisfreien Winkel zwischen ihnen ausfrieren, wobei je zwei Krystalle, die einen solchen Winkel einschliessen, innerhalb desselben zum geradlinigen Zusammenschluss kommen. Da in dieser Weise jeder Krystall mit allen ihn rings umgebenden Krystallen zu vollständiger Berührung kommt, wird jeder Krystall zu einer kleinen polygonalen Tafel abgegrenzt. Diese Täfelchen haften fest aneinander und bilden eine dünne, geschlossene Eisdecke<sup>2</sup>. Sobald diese vorhanden ist, geht die Eisbildung ausschliesslich an der Unterseite der Decke vor sich. Die Krystalle können folglich nur nach abwärts wachsen, und darum müssen sie verticale Stengel werden.

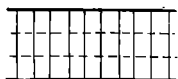
Allfällige Unebenheiten an der Unterseite der Decke bleiben nicht fortbestehen, denn unter den dünneren Stellen der Decke wird das Wasser rascher abgekühlt und zu Eis als unter den gegen Abkühlung besser schützenden dickeren Orten. Die Gefrieroberflächen sind daher im Weiteren horizontale, also

---

<sup>1</sup> Das habe ich einmal auf einem Teiche beobachtet.

<sup>2</sup> Die langen horizontalen Eisnadeln, welche in der Nähe der Ufer die Bildung der Eisdecke einleiten, sind Ausnahmen.

zu einander parallele Ebenen. Die auf Grund dessen in Textfig. 1 durchgeführte Construction ergibt dieselben Krystallformen, wie sie im Verticalbruch Fig. 1 Taf. VI zu sehen sind.



Textfig. 1.

Freilich sind, strenge genommen, die Krystalle in Wirklichkeit keine geometrischen Prismen, wie in Textfig. 1, denn ihr Querschnitt nimmt bald etwas zu, bald ab. Auch sind ihre Seitenflächen nicht eben, sondern meist leicht gekrümmt. Das kommt so: Schon die Krystalle, die die anfänglich dünne Eisdecke zusammensetzen, sind nicht genau gleich gross. Daher haben die aus ihnen hervorgehenden Stengel ungleiche Dicke. Beim Wachsen üben die grösseren Krystalle die grössere krystalline Kraft aus. Berühren sich also zwei ungleich grosse Krystalle, dann werden jene Wassermolecüle, welche am Austrich der gemeinsamen Grenzfläche beider Krystalle liegen, ausschliesslich in den Verband des grösseren Krystalles gezogen. Das wachsende untere Ende des dickeren Stengels wird daher noch dicker und das des dünneren noch dünner.

Im Eise hat jeder Stengel mehrere andere zu unmittelbaren Nachbarn, die ihn seitlich rings umschliessen. Sind einige der umschliessenden Stengel dicker, andere dünner wie der umschlossene, so werden die ersteren dahin wirken, dass der Querschnitt des umschlossenen Stengels beim Weiterwachsen kleiner wird, während die anderen eine Vergrösserung des Querschnittes dieses Stengels begünstigen. Je nachdem die Verkleinerung oder die Vergrösserung überwiegt, wird der Querschnitt des umschlossenen Stengels nach unten zu kleiner oder grösser. Im ersten Falle kommt es manchmal sogar zu einer spitzen Endigung des Stengels innerhalb der Eisscholle. Es ist somit möglich, dass ein Stengel A, der anfänglich dicker als sein Nachbar B ist, nach unten der dünnere wird. Während sich also oben der Querschnitt von A gegen B hin verbreitert, zieht er sich unten in entgegengesetzter Richtung zurück, was eine sanfte Krümmung der gemeinsamen Seitenfläche beider Stengel zur Folge hat.

Doch all das ändert den allgemeinen Charakter der Structur so wenig, dass ich kein Bedenken hege, auch jetzt noch zu sagen: Die Krystalle des Seeises sind verticale, gerade Prismen.

## 2. Die Krystallformen des Rieseleises.

Zum Rieseleis gehören äusserlich sehr verschieden geformte Bildungen, die das gemein haben, dass sie wachsen, indem sie bei einer Lufttemperatur unter  $0^{\circ}$  vom Wasser in sehr dünner Schichte überrieselt werden.

Beim Seeeis dringt die Kälte durch das Eis zum Wasser. Die stärkste Abkühlung des Wassers findet daher dort in jener Molecülschichte statt, welche dem schon bestehenden Eise unmittelbar anliegt. Wir finden es sonach geradezu selbstverständlich, dass sich die Molecüle des zuwachsenden Eises den schon bestehenden Krystallen angliedern, und dass keine neuen Krystallindividuen entstehen.

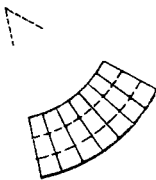
Beim Rieseleis hingegen dringt die Kälte durch das rieselnde Wasser zum Eise. Hier erfolgt demnach die stärkste Abkühlung in jener Schichte von Wassermolecülen, die dem Eise am fernsten liegt. Man sollte darum erwarten, in dieser Schichte entstünden neue Krystalle, welche wachsend auf dem rieselnden Wasser weiter treiben, bis sie auf dem eisigen Untergrund des Wassers stranden, um dann selber überrieselt und von anderen, ebenso entstandenen Krystallen überlagert zu werden. — Wäre dies der thatsächliche Vorgang, dann müsste das Rieseleis feinkörnig krystallinisch sein. Es besteht aber aus stengeligen Krystallen, deren geometrische Längsaxen wie beim Seeeis auf den Gefrieroberflächen senkrecht stehen. Diese Thatsache schliesst eine Neubildung von Krystallen, wie wir sie uns eben dachten, aus, und beweist, dass auch beim Rieseleise wie beim Seeeis der Übergang in den festen Aggregatzustand ausschliesslich an der Berührungsfläche des Wassers mit dem Eise stattfindet. Wahrscheinlich lässt die fortwährende Mischung der Molecüle im rieselnden Wasser keine Wärmeunterschiede aufkommen, weshalb die Eisbildung dort vor sich geht, wo sie durch die Anwesenheit des schon bestehenden Eises begünstigt wird. Vielleicht ist auch eine krystalline Fernwirkung mit im Spiele, die von den Eiskrystallen des Untergrundes ausgeht und bis hinauf an die Oberfläche des äusserst seichten Wassers reicht.

Dem Rieseleis sind zuzurechnen: das Krusteneis, das Stalagmiten- und das Stalaktiteneis.

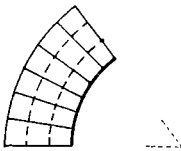
## a) Das Krusteneis.

Überrieselt das Wasser einen festen Gegenstand, z. B. Fels in grösserer Breite, so entsteht Krusteneis. Zuerst setzen sich an verschiedenen Punkten des Felsens selbständige Krystalle an, die durch ihr Wachsthum zu gegenseitiger Berührung kommen, sich genau wie in der dünnen Seeisdecke zu polygonalen Tafeln abgrenzen und in ihrer Gesammtheit eine dünne, den Fels überziehende Kruste bilden. Wird diese stets an ihrer ganzen Oberfläche gleichmässig benetzt, dann verdickt sie sich überall gleich rasch und die Gefrieroberflächen sind zu den Hauptformen der Felsfläche parallel.

Bei ebenem Untergrund sind folglich die Gefrieroberflächen untereinander parallele Ebenen und die Krystalle wie beim Teicheise gerade Prismen. Wenn aber die Oberfläche des Untergrundes gekrümmt ist, wir wollen der Einfachheit halber eine Kugelfläche annehmen, so sind die Gefrieroberflächen concentrisch dazu gelagert, und die Construction belehrt uns, dass die Krystalle radial gestellte Pyramidenstumpfe sind, welche aufrecht oder verkehrt stehen, je nachdem die

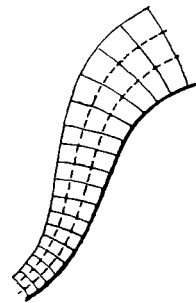


Textfig. 2.



Textfig. 3.

Fläche des Untergrundes concav (Textfig. 2) oder convex (Textfig. 3). Eine Mittelform zwischen Pyramidenstumpf und Prisma besitzen die Krystalle, welche über Cylinder oder Kegelflächen entstehen. Führt man in diesem Falle zwei Normal-schnitte zur Krustenoberfläche: den einen längs einer Seitenkante dieser Flächen, den anderen senkrecht darauf, so erscheinen die Krystalle im ersten Schnitte als Prismen, im zweiten als Pyramiden-



Textfig. 4.

stumpfe. Das bringt mit sich, dass die Durchmesser der Stengelgrundflächen auf der Oberseite der convexen Kruste in der Richtung der Krümmung länger, bei concaver Kruste aber in dieser Richtung kürzer sind als senkrecht darauf.

Ist die Berieselung des Eises spärlich, werden die Stellen der Eisoberfläche, welche der Wasserquelle ferner liegen,



schwächer und seltener wie die nahen benetzt, dann nimmt das Dickenwachsthum der Kruste in der Richtung des rieselnden Wassers ab und die Gefrieroberflächen convergiren dahin. Unter dieser Voraussetzung wurde in Textfig. 4 der Normalchnitt durch eine theilweise ebene, theilweise convex und concav gekrümmte Kruste gezeichnet. Nach der Construction unterscheiden sich die Krystallformen gegen früher nur durch ihre Krümmung in der Richtung der Convergenz der Gefrieroberflächen. Die Krümmung ist um so stärker, je grösser die Convergenz ist.

Die eben besprochenen Krystallformen des Krusteneises habe ich oft gesehen. Leider besitze ich keine Abdrücke von ihnen, um sie im Bilde vorweisen zu können.

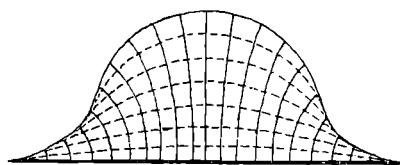
#### b) Das Stalagmiteneis.

Wenn Wasser bei einer Lufttemperatur unter  $0^{\circ}$  in kleinen Partien, etwa tropfenweise, auf ein und denselben Punkt des Bodens fällt, entsteht Stalagmiteneis. Zuerst rieselt das Wasser von der Aufschlagstelle über den Boden, den wir eben und horizontal voraussetzen wollen, nach allen Richtungen und es erstarrt zu einer dünnen, kreisrunden Kruste, die, wie das Krusteneis, aus polygonalen kleinen Krystalltafeln zusammengesetzt ist. Die Grösse des Halbmessers der Kruste hängt von der Raschheit des Tropfenfalles und der herrschenden Temperatur ab. Je grösser das Tropfenintervall und je niedriger die Temperatur ist, um so kleiner ist die vom Wasser überrieselte Fläche. Für unsere nächsten Betrachtungen nehmen wir das Tropfenintervall und die Temperatur der Luft unveränderlich an.

Indem nun die kreisrunde Kruste überrieselt wird, verdickt sie sich, und zwar in ihrer Mitte, wo das Wasser aufschlägt, mehr, als gegen den Rand. Durch die entstehende Wölbung wird ihre Oberfläche trotz des sich gleichbleibenden horizontalen Umrisses grösser. Da aber die vorhandene Wassermenge bei der gegebenen Temperatur nur eine Fläche vom Inhalt der ursprünglich ebenen Kruste benetzen kann, bleibt im weiteren Verlaufe von der Kruste ein randlicher, ringförmiger Streifen trocken. Die Verdickung des Eises hört da ganz auf. Mit der zunehmenden Wölbung der Eis-

oberfläche wird der „todte Rand“ breiter. Der in die Höhe wachsende Stalagmit verzüngt sich folglich an der Basis. Doch weil jedem Tropfenintervall bei einer bestimmten Temperatur eine maximale Wölbung der Eisoberfläche entspricht, hört mit dem Erreichen derselben die Verzüngung des Stalagmiten auf; er wächst von dieser Zeit an cylindrisch in die Höhe und sein kuppelförmiger Scheitel besitzt jeder Zeit die erwähnte maximale Wölbung.

Im verticalen Axenschnitte durch einen Stalagmiten (Textfig. 5) sind die aus dieser Anordnung der Gefrieroberflächen folgenden Krystallgestalten gezeichnet. Wegen der convexen und nach aussen



Textfig. 5.

convergirenden Gefrieroberflächen werden die Krystalle nach oben dicker und sind sie nach aussen gebogen.

Die Richtigkeit dieser Constructionsergebnisse durch einige Eisabdrücke zu belegen, bin ich im Stande. In der Mitte der Fig. 4 Taf. VI sehen wir zwei Krystalle, die aus einem Stalagmiten herausgelöst wurden. Fig. 2 Taf. VI ist der Verticalbruch längs der Axe eines niedrigen Stalagmiten. Die Gestalt und Anordnung der Stengel stimmt in beiden Fällen mit der Textfig. 5 überein. Von der Schichtfläche, die im unteren Drittel der Fig. 2 Taf. VI vorhanden ist, wird später die Rede sein. Die Fig. 3 Taf. VI ist die Draufsicht auf einen Stalagmiten, aus dessen Scheitel ein Stück herausgeschlagen wurde. Die Bruchfläche folgt hier zunächst den Krystallgrenzen und unten einer Schichtfläche. In den Fig. 2 und 3 (Taf. VI) stehen die Stengel wegen der geringen Abschmelzung des Eises noch auf der Eisoberfläche normal.

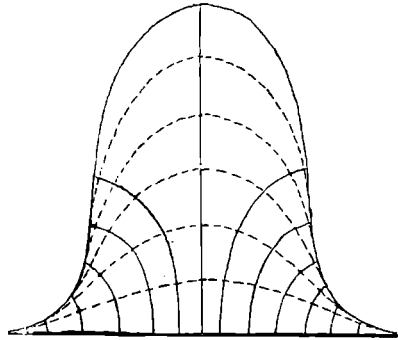
Die garbenförmige Gruppierung der Krystalle, wie sie in Textfig. 5 durch die Construction erhalten wurde, habe ich oftmals in jenen Trichtern gesehen, welche das Tropfwasser während der warmen Jahreszeit in den Stalagmiten der Eishöhlen aushöhlt.

Die Krystallquerschnitte sind meist bis an das obere in der Eisoberfläche liegende Ende der Krystalle unregelmässige Polygone. Man sehe den Abdruck der thauenden Stalagmiten-

oberfläche (Taf. VI Fig. 5). In höheren Stalagmiten endigen die Krystalle in der Nähe des Scheitels mit grösseren Polygonen als am Fusse. Ich habe am Scheitel eines Stalagmiten einmal einen Polygondurchmesser von 8 cm Länge gemessen. Eine genügende Erklärung hierfür giebt die Textfig. 5.

Manchmal aber gehen jene Krystallstengel, welche dem mittleren Theil der Stalagmitenbasis aufsitzen und den oberen Theil des Stalagmiten ausmachen, nach oben hin in Platten über, die zur Stalagmitenmasse radial gestellt sind. Solche Krystalle enden in Form von Streifen, die auf der Seitenfläche des Stalagmiten vertical (Taf. VI Fig. 6) und auf der gewölbten Kuppe vom Scheitel aus radial verlaufen (Taf. VII Fig. 7). In der letzten Figur streicht manche Platte mit einem schneidigen Kamme aus, der durch die Ausschmelzung der Fugen zu beiden Seiten der schmalen Platte entstanden ist.

Die Scheitel der Stalagmiten mit plattenförmigen Krystallen sind steil gewölbt. Weil daraus auf steil gewölbte Gefrieroberflächen zu schliessen ist, habe ich unter der Annahme solcher in Textfig. 6 die Krystallformen construirt und wirklich Krystalle von der oben beschriebenen Gestalt erhalten. Das kommt, weil in diesem Falle die Durchmesser der Krystalle in den zur Stalagmitenaxe radial gestellten Richtungen nach oben hin sehr rasch an Grösse



Textfig. 6.

zunehmen. Die steilere Wölbung der Gefrieroberflächen ist durch eine Änderung des Tropfenintervalles oder der Temperatur zu erklären. Die Temperatur und die Tropfwassermenge beeinflussen überhaupt die äussere Gestalt der Stalagmiten. Wir wissen, die Stalagmiten wachsen cylindrisch in die Höhe, wenn die Tropfwassermenge und die Temperatur unverändert bleiben. Je weniger Tropfwasser fällt und je kälter die Luft ist, um so schlanker werden die Cylinder, weil dann das gesammte Wasser in nächster Nähe der Aufschlagstelle gefriert. E. BERR und H. HASSINGER bringen in der Zeitschrift des Deutschen

und Österreichischen Alpenvereins<sup>1</sup> die Abbildung äusserst schlanker Stalagmiten, die 1,5 m hoch und nur einige Centimeter dick waren. Die vielen kleinen wulstförmigen Verdickungen, die diese Stalagmiten tragen, entsprechen kurzen Perioden rascheren Tropfenfalles oder erhöhter Lufttemperatur.

Fällt auf einen dünnen Stalagmiten durch längere Zeit das Tropfwasser um Vieles reichlicher als vorher, so wird sein oberer Theil wesentlich dicker. Es entsteht ein keulenförmiger Stalagmit, wie solche auf p. 189 der Mittheilungen des Deutsch. u. Österr. Alpenver., Jahrg. 1897, abgebildet sind<sup>2</sup>.

Manchmal trifft man auf eng umschriebenem Raum viele kleine Stalagmiten nahe beisammen stehen. Mit der Zeit werden sie dicker und schliesslich verwachsen sie zu einem einzigen gewaltigen Stalagmiten, dessen Zusammensetzung aus vielen kleineren erst wieder beim Schmelzen durch die sichtbar werdende Anordnung der Krystalle offenbar wird.

Die Stalagmiten wachsen der Richtung der fallenden Wassertropfen entgegen. Im Allgemeinen sind sie daher vertical. Wenn jedoch die Tropfen durch einen anhaltenden Luftzug von der verticalen Fallrichtung abgelenkt werden, dann wachsen die Stalagmiten schief nach aufwärts. Schief gewachsene Stalagmiten sind in Eishöhlen nahe beim Eingange nicht selten zu finden, weil da während der Kälteperioden ein kräftiger Luftstrom über den Boden in die Höhle streicht.

#### c) Das Stalaktiteneis.

Tropft bei niederer Temperatur von einem Punkt eines festen Gegenstandes Wasser ab, so bildet sich an der Abrissstelle ein Eisstalaktit. Der Vorgang ist hierbei der: Auf der Oberfläche jedes hängenden Tropfens bilden sich selbständige Krystalle, die durch Adhäsion gegen den Rand der Tropfenbasis gezogen werden, wo sie aneinander und an den festen Gegenstand frieren. Es entsteht auf diese Weise ein niedriger Eisring, der die Tropfenbasis umschliesst. Das zu Eis gewordene oder abgetropfte Wasser wird durch nachrieselndes ersetzt. Die Krystalle wachsen weiter, wodurch

<sup>1</sup> Bd. XXXIII, Jahrg. 1902. Das Geldloch im Ötscher. p. 131.

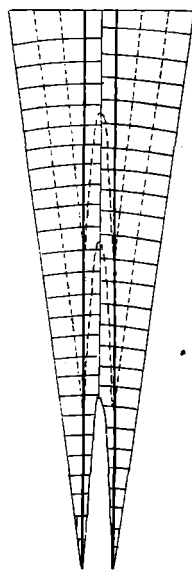
<sup>2</sup> Die da von J. ZELLNER angegebene Entstehungsweise der Keulenform ist nicht richtig. Man sehe hierüber: H. CRAMMER, Einiges über Eisbildungen. Mitth. d. Deutsch. u. Österr. Alpenver. Jahrg. 1897. p. 261.

der Eisring erhöht wird. Es gliedern sich ihm aber auch neue Krystalle an, die wieder auf der Oberfläche der hängenden Wassertropfen entstehen und zum Tropfenrande gezogen werden. So wird aus dem Eisring ein vertical herabhängendes cylindrisches Röhrchen, dessen Wandung aus einer grossen Menge kleiner Eiskrystalle zusammengesetzt ist. Im Hohlraum des Röhrchens hält sich das Wasser durch Capillarität.

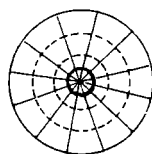
Während das Wasser an der Aussenseite des Röhrchens zu dessen unterem Ende herabrieselt, frieren Wassermolecüle an die Krystalle des Röhrchens. Die Röhrchenwand verdickt sich nach aussen. Je länger dieser Vorgang anhält, um so dicker wird die Wand. Im oberen, weil älteren Röhrentheil ist daher jederzeit die Wandstärke am grössten; das Röhrchen erhält daher die Zapfenform.

Die Kälte, welche durch die Röhrchenwand dringt, bringt auch das Wasser innerhalb des Röhrchens zum Gefrieren. Die daraus folgende Verdickung der Wandung nach innen ist, wie die nach aussen, im oberen, älteren Theil beträchtlicher. Die Seele des Röhrchens verengt sich folglich nach oben, um schliesslich ganz auszufrieren. Bei grosser Kälte gefriert das Wasser im Röhrchen schnell. Der jeweils bestehende hohle Raum ist dann recht kurz. Bei mässiger Kälte hingegen habe ich Röhrchen gemessen, deren Höhlung 6 cm lang und unten 4 mm weit war.

Der Zeichnung des Axenschnittes (Textfig. 7) und des Querschnittes (Textfig. 8) durch einen Eiszapfen wurde die Annahme zu Grunde gelegt, dass das Wasser auf allen Seiten des Zapfens gleichmässig herabläuft. Die Gefrieroberflächen sind in diesem Falle gerade Kreiskegelflächen, die nach unten gegeneinander convergiren und deren gemeinsame Axe die Zapfenaxe ist. Die Convergenz der Kegelflächen ist jedoch so gering, dass die hierdurch bewirkte Krümmung der



Textfig. 7.

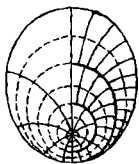


Textfig. 8.

Krystalle im Axenschnitt durch den Zapfen kaum bemerkbar ist und die Krystalle als gerade Prismen erscheinen. Im Zapfenquerschnitt (Textfig. 8) verbreitern sich die radial gestellten Krystalle stark gegen die Zapfenoberfläche, an der sie daher mit Grundflächen endigen, deren horizontale Ausdehnung die verticale oft weit übertrifft. Das sehen wir an dem Zapfen Fig. 8 Taf. VII und etwas weniger deutlich auch in Fig. 12 Taf. VIII. Auf der Oberfläche des dicken Stalaktiten (Fig. 13 Taf. VIII) sind aber die Querschnittsdimensionen der Krystallstengel nach keiner Richtung hin bevorzugt. Es ist dies um so auffallender, als nach der Construction gerade bei dicken Stalaktiten erwartet werden sollte, die Krystallstengel hätten auf der Zapfenoberfläche ganz besonders grosse horizontale Durchmesser. Aufklärung über diesen Punkt werden wir bald erhalten.

Als Belege für die richtige Durchführung der Construction in den Textfig. 7 und 8 dienen die Naturabdrücke Taf. VII Fig. 8, 9 und 10, welche von ein und demselben Eiszapfen herrühren.

Selten wachsen die Eiszapfen vollkommen concentrisch; meist rieselt an jener Seite, wo das Wasser zur Zapfenbasis gelangt, mehr Wasser am Zapfen herab, als an der entgegengesetzten. Auf letzterer Seite hört die Berieselung und das Wachsthum häufig bald ganz auf. Der Zapfen wächst dann excentrisch. Die Anordnung der Gefrieroberflächen und die Form der Krystalle im Querschnitte eines excentrisch gewachsenen Zapfens zeigt die linke Hälfte der Textfig. 9. Die Krystalle sind in horizontaler Richtung gekrümmt



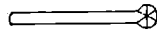
Textfig. 9.

und verbreitern sich auf der Seite des stärkeren Zapfenwachstums ausserordentlich, so dass sie gegen die Zapfenoberfläche in horizontale Platten übergehen. Fig. 14 Taf. VIII ist der Abdruck vom Querbruch eines excentrisch gewachsenen Stalaktiten, und zwar desselben, von dem Fig. 13 Taf. VIII der Oberflächenabdruck ist. In diesem Querbruch kann man, wenn auch nicht sonderlich deutlich, dennoch in überzeugender Weise die gekrümmten Krystalle erkennen, die aber diesmal aus einem erst später zu besprechenden Grunde sich gegen die Zapfenoberfläche nicht plattenförmig verbreitern, was uns schon früher bei der Betrachtung der Fig. 13 Taf. VIII auffiel.

Gewissermaassen das Extrem eines excentrisch gewachsenen Eiszapfens entsteht, wenn ein dünner Stalaktit vom tropfenweise zufließenden Wasser derart einseitig berieselt wird, dass jeder Tropfen genau der Spur seines Vorläufers folgt. Es wächst dann nur jene einfache Reihe untereinanderliegender Krystalle des Zapfens weiter, deren Stirnflächen von dem ersten herablaufenden Wassertropfen benetzt werden, und der Zapfen erhält die Form einer breiten Klinge. In Eishöhlen und im Freien habe ich wiederholt solche Gebilde gesehen, die bei einer Länge bis zu 50 cm 10 cm breit, aber nur etliche Millimeter dick waren. Bloss auf jener Seite, wo sich die erste Anlage des Zapfens befand, waren diese Stalaktiten etwas dicker. Der dünne Zuwachs bestand aus einer einfachen Schaar horizontaler, vertical untereinander liegender Krystallstengel, von denen die meisten die Breite der klingenförmigen Bildungen durchmaassen. Man sehe die Textfig. 10 und 11<sup>1</sup>.



Textfig. 10.



Textfig. 11.

Wird ein solcher Stalaktit bald nach seiner Entstehung infolge reichlicher werdenden Wasserzuflusses auch an den Breitseiten überrieselt, so wachsen die langgestreckten horizontalen Krystalle in den Richtungen senkrecht auf die Breitseiten des Stalaktiten und werden scheibenförmig, während das Eisgebilde die gewöhnliche Zapfenform annimmt. Aus scheibenförmigen Krystallen zusammengesetzte Eiszapfen habe ich mehrmals im Tablerloch, einer Eishöhle bei Wiener-Neustadt, angetroffen.

Vorhangähnliche Stalaktiten entstehen in folgender Art. Läuft ein Wassertropfen an der Unterseite eines überhängenden Felsens dahin, so gefriert seine Spur zu einer niedrigen, aus vielen Krystallen bestehenden Leiste. Indem die späteren Tropfen stets der Leistenunterkante folgen, wird die Leiste höher, sie wird bandförmig und gleicht bei noch grösserer Höhe besonders dann einem kurzen Vorhange, wenn der Weg des ersten Tropfens und somit auch der der folgenden ge-

<sup>1</sup> Die Photographie eines solchen Zapfens bringt K. FUTTERER in: Beobachtungen am Eise des Feldberges im Schwarzwalde im Winter 1901. Verhandl. d. naturw. Ver. in Karlsruhe. 14. 1900—1901. Taf. IV.

wunden war. Denn in diesem Falle kommt sogar ein Faltenwurf zu Stande<sup>1</sup>. Im Tablerloch sah ich einmal einen gefalteten Eisvorhang, der 2 dm tief von der Decke herabhing. In den Eisleisten und Vorhängen verlaufen die Gefrieroberflächen zur Ansatzfläche an der Decke parallel. Die darauf normalstehenden Krystallstengel nähern sich daher der Verticalen um so mehr, je weniger die Decke geneigt ist. Im Freien habe ich an der Unterseite überhängender Felsen oft bis zu 2,5 cm hohe Eisleisten gesehen, die alle die eben erwähnte Anordnung der Krystalle besaßen.

Zum Schlusse sei der Verwachsung von Eiszapfen gedacht. Wenn gewöhnliche Eiszapfen nahe beisammen stehen, können sie miteinander verwachsen. Die Fig. 11 Taf. VII ist der Querbruch durch einen Zwillingstalaktiten. In gleicher Weise vereinigt sich oft eine grosse Zahl kleiner Stalaktiten zu einem einzigen grossen, der nach seiner äusseren Form als einheitliches Gebilde erscheint. Im Querbruch des thauenden Eises wird man jedoch, wie beim Zwilling, die einzelnen kleineren Zapfen wieder herausfinden.

Wir wenden uns nun zur

### Schichtung des Wassereises.

Von echter Schichtung des Eises spreche ich nur dann, wenn infolge des periodischen Wachstums im Eise durchlaufende Flächen entstehen, welche von den Krystallen nicht durchdrungen werden. An den echten Schichtflächen endigen also die Krystalle der einen Schicht und die der nächsten beginnen.

#### 1. Schichtung des Seeees.

Dem Grunde vieler stehender Gewässer entweichen Gase, die Verwesungsproducte organischer Stoffe sind. Ausserdem scheidet das Wasser Luft aus, die es gelöst enthält. Findet

<sup>1</sup> Der berühmte Vorhang in der Adelsberger Grotte ist auf ganz ähnliche Weise entstanden. Der Unterschied ist nur der, dass das Material dieses Vorhanges nicht Eis, sondern Kalk ist, der bei der Verdunstung aus dem Wasser ausgeschieden wurde. Zwischen den Bildungen aus Kalk und Eis herrscht überhaupt eine grosse Ähnlichkeit, die sich nicht nur durch die übereinstimmende äussere Form, sondern auch durch die Gestalt und Anordnung der Krystalle bekundet.



im Wachsthum der schwimmenden Eisdecke eine Pause statt, so sammelt sich an der ebenen Unterseite des Eises eine grosse Anzahl solcher Gasbläschen. Folgt darauf wieder eine Kälteperiode, dann frieren die angesammelten Blasen in das wachsende Eis ein und markiren darinnen einen Horizont, der, wenn man eine herausgeschlagene Scholle von der Seite betrachtet, den Eindruck einer Schichtfläche hervorrufft. Befinden sich mehrere Luftblasenhorizonte in einer Scholle, so sind sie Beweise für ebensoviele Unterbrechungen im Dickenzuwachs der Eisdecke.

Eine verticale Bruchfläche durch die Eisdecke schneidet nicht selten eine grössere Anzahl solcher Blasen, die im Gypsabdruck als kleine, reihenförmig angeordnete Vertiefungen sichtbar sind; so in Fig. 1 Taf. VI längs der Geraden ab, cd u. s. w. Da sehen wir aber auch, dass die Krystalle an den durch die Luftblasen gekennzeichneten Horizonten nicht absetzen, sondern die Horizonte durchdringen. Letztere sind daher keine echten Schichtflächen. Aus dieser Beobachtung folgt, dass die Krystalle des Seeees nach Ablauf einer Wärmeperiode ebenso weiterwachsen, als hätte überhaupt keine Wachstumsunterbrechung stattgefunden. Dennoch giebt es geschichtetes Seeeis, ohne darunter das Packeis zu verstehen, das aus übereinandergeschobenen und zusammengefrorenen Eisschollen besteht. Sinkt nämlich, nachdem sich auf einer geschlossenen Seeeisdecke Regenwasser gesammelt hat, die Lufttemperatur wieder unter  $0^{\circ}$ , dann bildet sich auf dem Regenwasser eine zweite Eisdecke, deren Krystalle ganz unabhängig von den Krystallen der alten Decke angeordnet sind. Die Krystalle der oberen Eisdecke wachsen in derselben Weise wie früher die der unteren nach abwärts und werden stengelförmig. Wenn alles Wasser zwischen beiden Decken gefroren ist, berühren sich letztere unmittelbar. Sie frieren zusammen, und nun liegt echt geschichtetes Seeeis vor.

Im frischen Eise ist die Schichtung nicht leicht erkennbar, wohl aber in einer thauenden Scholle, weil in dieser, wo die Schichtfläche austreicht, eine fortlaufende Fuge ausschmilzt.

Wechselt Regen- und Frostwetter wiederholt in der geschilderten Art, dann entsteht mehrfach geschichtetes Eis. Im Winter 1901/02 habe ich in Salzburg in 23 cm dicken

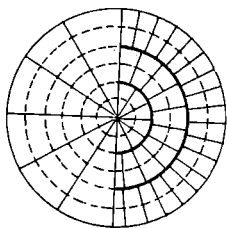
Schollen nicht weniger als 8 Schichten gezählt. Manche von diesen bestanden wieder aus zwei Lagen, die aber keine ganz ebene Trennungsfäche hatten. Die obere Lage war trübe und hatte körnige Structur, während die untere, klare, Stengelstructur besass. Das kam, weil vor Eintritt des Frostes in das Wasser über dem Eise Schnee fiel. In Fig. 15 Taf. VIII sieht man die verticale Bruchfläche durch eine Eisscholle von einem Teiche bei Wiener-Neustadt, die oben aus körnigem, unten aus stengeligem Eise besteht.

## 2. Schichtung des Rieseleises.

In allen drei Gattungen des Rieseleises konnte ich echte Schichtung beobachten. Sie ist beispielsweise im Stalagmiten Fig. 2 Taf. VI vorhanden.

In der Kolowratshöhle bei Salzburg traf ich im October 1896 den Rest eines mächtigen Stalagmiten, der ausserordentlich deutlich und dünnbankig geschichtet war. Jede Schicht bestand aus kurzen Krystallstengeln, deren Längsaxen auf den Schichtflächen senkrecht stunden und an diesen endeten. Längs des Ausstriches der Schichtflächen verliefen ausgeschmolzene Fugen, in denen kleine Klümpchen feinen Schlammes lagen.

Im Februar 1898 fiel mir im Freien bei einer Wanderung im Gebirge ein thauender Stalaktit auf, weil die Grundflächen seiner Krystalle in der Zapfenoberfläche im Verhältniss zum 10 cm betragenden Zapfendurchmesser sehr klein waren. Ich brach den Zapfen ab und sah auf der Bruchfläche zwei concentrisch verlaufende, kegelförmige Schichtflächen austreichen, an denen die radial gestellten Krystalle jeder Schichte und des im Innern steckenden conischen Kernes endigten. Siehe die rechte Hälfte der Textfig. 12.



Textfig. 12.

In der Geldluck'n, einer grossen Höhle im Ötscher in Niederösterreich, fällt an einer Stelle aus Gesteinsklüften der Decke zeitweise viel Wasser. Es wachsen da gewaltige Stalagmiten in die Höhe. Überschüssiges Wasser rieselt vom Fusse der mächtigen Eissäulen höhleneinwärts über die 500 m<sup>2</sup> grosse Bodenfläche einer Halle, wo es einen grossen Eis-

kuchen bildet, dessen ebene Oberfläche in der Richtung des rieselnden Wassers sanft, aber merklich abfällt. Die übliche Benennung „oberer Eisse“ verdient diese Eismasse nicht; denn kein einziger der ziemlich zahlreichen Besucher giebt an, hier jemals stehendes Wasser gesehen zu haben. Auch spricht das Gefälle der Eisoberfläche gegen die Annahme, es läge ein ausgefrorener See vor. Das Eis dieses sogen. „Eissees“ ist also kein Seeeis, sondern Krusteneis. — Im Herbste des Jahres 1897 war im höhleneinwärts gelegenen Rand der Eismasse ein geräumiger, 2 m tiefer Tropfbrunnen eingesenkt, der bis auf den durchlässigen, aus Gesteinstrümmern bestehenden Untergrund des Eises reichte. Darum war er wasserleer. Das ermöglichte eine genaue Betrachtung der Eisstructur an den Brunnenwänden. Ich fand das Eis zur Kuchenoberfläche nahezu parallel geschichtet; nur ganz wenig convergirten die Schichtflächen gegen den Kuchenrand. Die Dicke der einzelnen Schichten betrug bloss in einigen Fällen 1 cm, sonst weniger. Die stengelförmigen Krystalle stunden auf den Schichtflächen normal und reichten von einer Schichtfläche genau bis zur nächsten.

Den vorstehenden Beispielen geschichteten Rieseleises könnte ich noch eine lange Reihe anderer, die ich beobachtet habe, anfügen, doch glaube ich, es ist Genüge geschehen.

Die Ursache der Schichtung des Rieseleises in Wachstumsunterbrechungen zu suchen, liegt nahe. — Das Rieseleis hört in zwei Fällen zu wachsen auf: wenn die Lufttemperatur über  $0^{\circ}$  steigt, oder wenn bei einer Temperatur unter  $0^{\circ}$  der Wasserzfluss versiegt. Im ersten Falle wird ein Theil des Eises abschmelzen. Bei wieder einsetzendem Froste liegt kein Grund vor, weshalb die Krystalle des noch vorhandenen Eisrestes nicht weiterwachsen sollten. Vorübergehende Schmelzperioden bedingen folglich im Rieseleise keine Schichtung.

Was geschieht, wenn bei einer Temperatur unter  $0^{\circ}$  das Wasser ausbleibt, das erfuhr ich im Tablerloch. In dieser Höhle zeichnete sich das frisch gebildete Eis durch grosse Klarheit aus. Kam jedoch bei niedriger Temperatur einige Zeit kein Wasser auf das Eis, dann verlor letzteres seine Durchsichtigkeit; es wurde trübe. Die Trübung schwand, sobald ich mit der warmen Hand über das Eis fuhr; denn

sie war nur oberflächlich und kam in folgender Weise zu Stande: Das Wasser, welches durch Gesteinsklüfte in die Höhle dringt, enthält gelösten Kalk, der im Eise wegen seiner äusserst feinen Vertheilung unsichtbar bleibt. Hält im Freien die Kälte längere Zeit an, so bleibt in der Höhle das Tropfwasser aus. Das Eis darin wächst nicht mehr, ja, es verliert sogar an Volumen, weil der in die Höhle fallende kalte, relativ trockene Luftstrom einen Theil des Eises zum Verdunsten bringt. Der Kalk in der verdunstenden Eisschichte concentrirt sich als Rückstand auf der Eisoberfläche und bildet jenen mehligten Beschlag, der die Eistrübung verursacht. Dass wirklich ein Theil des Eises verdunstete, das bezeugten Stearintropfen, die ich beim vorhergegangenen Höhlenbesuch auf einige Stalagmiten fallen liess und die nunmehr auf Eisstielchen sassen. Z. Th. mochte der Beschlag wohl auch aus Staub bestehen, den der in die Höhle fallende Luftstrom vom Boden aufgewirbelt und auf das Eis geweht hatte. Doch darauf kommt es nicht an. Wichtig ist, dass der Beschlag trotz seiner geringen Dicke eine geschlossene Hülle bildete, welche bei erneutem Tropfenfall das Weiterwachsen der unter ihr befindlichen Krystalle verhinderte. Über dem Beschlage entstanden daher neue, selbständige Krystallindividuen und der Stalagmit wurde geschichtet.

Die Schlammklümpchen, welche in der Kolowratshöhle durch das Schmelzwasser aus den Schichtfugen des früher erwähnten grossen, vielfach geschichteten Stalagmiten herausgespült wurden, beweisen, dass auch da Staublagen die Schichtung bewirkten<sup>1</sup>.

Da jedes Wasser, das eine Weile auf oder unter der Erdoberfläche floss, Mineralstoffe gelöst oder suspendirt enthält, da ferner im Freien häufig weit beträchtlichere Staubmengen als in Höhlen auf das Eis geweht werden, treffen wir geschichtetes Rieseis auch allenthalben im Freien.

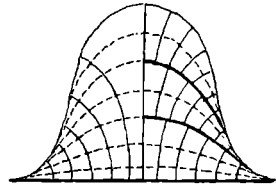
Ich wies bereits darauf hin, dass die Krystalle grösserer

---

<sup>1</sup> Im Tablerloch sah ich im Spätherbste an manchen Orten, wo in den vorangegangenen Sommern regelmässig Stalagmiten standen, eine Lage feinen Schlammes. Das war der durch die Eisverdunstung ausgeschiedene Kalk, der sich beim gänzlichen Schmelzen der Stalagmiten von Jahr zu Jahr am Boden sammelte.

Rieseisbildungen an der Eisoberfläche oft nicht jene grossen Querschnittsdimensionen besitzen, die wir auf Grund unserer mehrfach durchgeführten Constructionen erwarten sollten. Jetzt erkennen wir die Ursache davon in der Schichtung. Grössere Rieseisbildungen sind nämlich in der Regel mehrfach, ja sogar vielfach geschichtet, und da an jeder Schichtfläche die Krystalle mit einem verhältnissmässig kleinen Anfangsquerschnitt beginnen und die einzelnen Schichten häufig keine grosse Mächtigkeit erreichen, erlangen auch die Krystalle nirgends eine besondere Dicke.

Um den Unterschied im krystallinen Bau zwischen geschichtetem und nicht geschichtetem Rieseis anschaulich zu machen, habe ich die Textfig. 9, 12 und 13 so gezeichnet, dass in jeder Figur die Gefrieroberflächen links und rechts vollkommen symmetrisch verlaufen. In jeder linken Hälfte setzte ich ungeschichtetes Eis voraus, während ich in den rechten Hälften je zwei Schichtflächen annahm. Der Unterschied in den Dimensionen der Krystallstengel an der Eisoberfläche zu beiden Seiten jeder Figur ist sehr auffällig.



Textfig. 13.

Im Zapfenquerbruch Fig. 14 Taf. VIII, in welchem die Krystalle an der Zapfenoberfläche verhältnissmässig schmal endigen, liegt ebenfalls geschichtetes Eis vor. Die Schichtflächen sind zwar im Abdrucke nicht erkennbar, da zur Zeit seiner Herstellung die Schmelzung im Innern zu wenig vorgeschritten war; doch sah ich die Schichtflächen bei einem späteren Besuch im Tablerloch an den Trümmern des herabgeschlagenen Zapfens.

Natürlich hat nicht schon die geringfügigste Eisverdunstung oder jeder staubführende Wind die Bildung einer Schichtfläche im Gefolge. Schichtflächen entstehen nur dann, wenn durch Ausscheidung und Ablagerung fremder Stoffe auf dem Eise eine geschlossene Hülle geschaffen wurde. Andererseits unterbleibt die Schichtenbildung trotz dicht abgelagerten Staubes, wenn dieser, bevor die Eisbildung neuerdings einsetzt, von warmem Tropfwasser weggespült wird.

Zum Schlusse dieses Abschnittes erwähne ich eine interessante Wechsellagerung von Seeeis und Rieseis, wie sie

im „unteren Eisse“ der Geldluck'n zu treffen ist. Es läuft in dieser Höhle nicht alles Wasser, das von den schon erwähnten grossen Stalagmiten herabkommt, höhleneinwärts in die Halle, sondern ein Theil davon rieselt in entgegengesetzter Richtung über eine 12 m hohe und 15 m breite Felsstufe, die hierdurch mit Eis überkleidet eine steile Eiswand bildet. Nach unten geht die Eiswand in eine sanft geneigte Eisfläche und diese in den unteren Eisse über, der in einem nach abwärts gerichteten Knie der Höhlensohle gebettet liegt. Hier ist die Benennung „See“ insofern am Platze, als nach reichlicheren Wassereinbrüchen thatsächlich über dem alten Eise stehendes Wasser angetroffen wurde<sup>1</sup>. In solchen Fällen bildet sich auf dem Wasser eine Seeeisdecke, die mit der Zeit auf das alte Eis zu liegen kommt und mit diesem zusammenfriert. Folgt dann eine Periode, in der so wenig Wasser zum unteren Eisse gelangt, dass es beim Überrieseln des Eises gleich gefriert, so entsteht über dem Seeeis eine Rieseleisschichte, auf die später wieder Seeeis zu liegen kommt.

Wenn sich über dem Seeeis Rieseleis bildet, ohne dass zuvor eine Verunreinigung der Oberseite der Seeeisdecke stattfand, so wachsen die Seeeiskrystalle nach oben hin unmittelbar als Rieseleiskrystalle weiter. In diesem Falle werden also die beiden Eisgattungen nicht einmal durch eine Schichtfläche getrennt und gar nicht unterscheidbar sein.

Eine ähnliche Verbindung zweier verschiedener Eisgattungen liegt in Fig. 15 Taf. VIII vor, wo die untersten Körner des aus Schnee gebildeten Eises nach abwärts als Seeeis weitergewachsen sind.

### **Innerer Bau und Orientirung der Krystalle des Wassereises.**

F. A. FOREL entdeckte an den Krystallen des Gletschereises die nach ihm benannten FOREL'schen Streifen. ED. HAGENBACH-BISCHOFF fand dieselbe Streifung auch auf den Krystallen des Seeeises. Sie tritt aber auch auf den Krystallen des Rieseleises auf.

---

<sup>1</sup> Siehe CRAMMER und SIEGER, Untersuchungen in den Ötscher Höhlen. Globus. 75. p. 334 u. 335.

Die FOREL'sche Streifung entsteht, indem auf der Oberfläche eines Eisstückes bei einer Lufttemperatur von ganz wenig über  $0^{\circ}$  in kleinen Abständen von einander zarte, parallele Furchen ausschmelzen, die auf ebener Oberfläche gerade verlaufen. Die Richtung der Streifen wechselt beim Rieseise (und auch beim Gletschereise) von einem Krystall zum anderen, während sie auf den Krystallen des Seeeseis in der Regel horizontal ist. Die zwischen den Furchen stehenden schmalen Erhöhungen sind durch kleine Einsenkungen untertheilt, so dass, wenn letztere nahe beieinander sind, die Streifen wie punktirt, sonst wie gestrichelt aussehen. Dieser Charakter der Streifung ändert sich auf der Eisoberfläche häufig von einem Krystall zum anderen.

Eigenthümlich ist, dass die Streifung, wenn man sie durch vorübergehende Temperaturerhöhung, z. B. durch Anhauchen oder Berühren mit der Hand zum Verschwinden bringt, nach einiger Zeit genau wieder in der früheren Anordnung zum Vorschein kommt. Hieraus ist auf eine Abhängigkeit der Streifung von der inneren Structur der Krystalle zu schliessen. Zu derselben Anschauung kam ich durch folgende Beobachtung: Ich stellte eine 16 cm tiefe, eiserne, mit Wasser gefüllte Pfanne Abends bei einer Lufttemperatur unter  $0^{\circ}$  ins Freie, so dass sie bis über die Hälfte in die vorhandene Schneedecke einsank. Der schlecht wärmeleitende Schnee war Ursache, dass anderen Tages trotz einer Morgentemperatur von  $-14^{\circ}$  bloss die obere Hälfte des Wassers zu Eis geworden war. Aus der niedrigen Lufttemperatur konnte ich aber doch den sicheren Schluss ziehen, die Eisbildung schritt an der Unterseite des Eises, also an jener Fläche, die mit dem Wasser in Berührung stand, noch immer fort; die Unterseite war also keine Schmelzungs-, sondern eine Gefrieroberfläche. Als ich nun, um das Eis herauszubekommen, das Gefäss stürzte, sah ich sofort auf der Unterseite des Eises die FOREL'sche Streifung in ganz vorzüglicher Ausbildung. Ich erkannte ausserdem deutlich, dass die Streifen das Ausgehende dünner, ebener Eisplättchen waren, die in jedem Krystall parallel übereinander lagen. Jeder einzelne Krystall war also ein Plattenpacket. Die Richtigkeit dieser Beobachtung kann ich heute noch durch Gypsabgüsse beweisen, die ich

damals vom Eise machte. Eine verwendbare photographische Wiedergabe davon wollte leider nicht gelingen.

Das Vorstehende lehrt in einer jeden Zweifel ausschliessenden Weise, dass die FOREL'sche Streifung mit der Structur der Eiskrystalle im innigsten Zusammenhang steht. Die Anschauung EMDEN's<sup>1</sup>, die FOREL'schen Streifen seien nur eine besondere Art von Schmelzwassercurven, die mit der Structur der Krystalle nichts zu schaffen hat, ist somit unhaltbar.

Von der Plattenstructur der Eiskrystalle überzeugt man sich in ganz vorzüglicher Weise, wenn man eine 1—3%ige Kochsalzlösung in einem Glase zum Gefrieren bringt. Es wachsen da zuerst von den Gefässwänden in grösseren Abständen zarte, manchmal gefiedert aussehende Eisplättchen nach verschiedenen Richtungen in das Wasser hinein. Ihre Zahl und Grösse nimmt mit der Zeit zu. Dann entstehen unmittelbar neben den schon vorhandenen Plättchen neue, die zu den alten vollkommen parallel sind und Plättchenpackete bilden. Jedes Packet wird durch Angliederung neuer Plättchen dicker und durch die Vergrösserung der einzelnen Plättchen breiter, bis die verschiedenen Packete aneinanderstossen und eine zusammenhängende Eismasse bilden. Nimmt man dann das Eis aus dem Glase, so sieht man überall an seiner Oberfläche grobe FOREL'sche Streifung. Die Streifung wird durch das Ausstreichen der Plättchen gebildet, und da diese in jedem Packete eine andere Stellung haben, ändert sich auch die Richtung der FOREL'schen Streifen. Wenn die Plättchen mit der Eisoberfläche kleine Winkel einschliessen, so liegen die Plättchenränder des betreffenden Packetes treppenförmig übereinander; bei grösseren Winkeln stehen die Ränder leistenförmig nebeneinander. Bricht man das Eis entzwei, so ist auch an den Bruchflächen die Plättchenstructur unschwer zu erkennen.

Aus mehreren Packeten schnitt ich Tafeln parallel zu den Plättchenebenen. Das gelingt leicht, weil das salzige Eis überhaupt mürbe ist, und weil die Plättchen dieses Eises untereinander besonders schwach zusammenhängen. Die Untersuchung im Polarisationsmikroskop ergab in allen Fällen die

---

<sup>1</sup> R. EMDEN, Über das Gletscherkorn. H. GEORG, Basel. 1890. p. 24.



Normalstellung der optischen Axe zu den Plattenebenen. Es ist somit jedes Plättchenpacket als ein einheitlicher Krystall anzusehen.

Eine damit übereinstimmende Beobachtung machte ich schon vor 5 Jahren am Seeise. Ich kam damals zu einem eben zufrierenden Teich. Vom schneidigen Rande der am Ufer gebildeten Eisdecke brach ich ein tafelförmiges Stückchen ab, das an der Bruchseite, wo es am dicksten war, wenig über 1 mm Dicke besass. Ich legte die Tafel unter das Polarisationsmikroskop und sah bei gekreuzten Nicols, mochte ich was immer für eine Stelle des flachliegenden Eisstückes in das Gesichtsfeld bringen, stets das schwarze Kreuz. Als ich das untersuchte Eisstück wieder in die Hand nahm, bemerkte ich, dass die Tafel aus mehreren noch dünneren Platten bestand, die sich zwischen den Fingern leicht aneinander verschieben und so ganz von einander trennen liessen. Jede einzelne Platte verhielt sich optisch wie die ganze Tafel.

Die Beziehung zwischen der FOREL'schen Streifung und der Structur der Krystalle erkannte, wenn auch noch nicht in voller Bestimmtheit, ED. HAGENBACH-BISCHOFF bereits vor 21 Jahren<sup>1</sup>. Er schrieb damals: „Die FOREL'schen Streifen“ (HAGENBACH hat hier die Krystalle des Gletschereises im Auge) „scheinen, wie FOREL und ich in übereinstimmender Weise gefunden haben, in bestimmtem Zusammenhang mit der Krystall-structur zu sein und stets in der Richtung zu verlaufen, in welcher eine zur Krystallaxe senkrechte Ebene die Oberfläche schneidet . . . Auch an gewöhnlichem Wintereis, das von stehendem Wasser für Eiskeller gewonnen wurde und einige Zeit im Freien liegen blieb, habe ich solche Streifung bemerken können; da in solchem Falle die Krystallaxen senkrecht zur Oberfläche des gefrorenen Wassers gerichtet sind, so verlaufen die Streifen mit der letzteren parallel.“

Nach O. MÜGGE<sup>2</sup> schloss MC CONNEL aus seinen Versuchen, dass jeder einzelne Eiskrystall sich gegenüber einseitigem

<sup>1</sup> ED. HAGENBACH-BISCHOFF, Das Gletscherkorn. Abdr. aus d. Verh. d. Naturf. Ges. in Basel. 1. Heft. 7. 1882. p. 5 u. 6.

<sup>2</sup> O. MÜGGE, Über die Structur des grönländischen Inlandeises und ihre Bedeutung für die Theorie der Gletscherbewegung. Dies. Jahrb. 1899. II. 124 u. 125.

Druck so verhält, als bestände er aus zahlreichen nach seiner Basisfläche (0001) sehr dünnen Schichten, welche sich aufeinander verschieben lassen, etwa so, wie die einzelnen Blätter eines Haufens von Papieretiketten, zwischen welche man etwas nicht trocknenden Klebstoff gebracht hat.

MÜGGE selbst zeigte<sup>1</sup>, dass man einzelne solcher Blättchen oder vielmehr dünne Lagen solcher ganz aus dem Eiskrystall herauschieben kann, wobei die herausgeschobenen Stücke die Translationsstreifung öfters in grosser Schönheit zeigen<sup>2</sup>.

Aus dem Zusammenhalt aller vorstehenden Beobachtungen ergibt sich Folgendes: Wenn Wasser zu Eis wird, so entstehen zuerst an verschiedenen Stellen dünne Eisplättchen, welche Krystalle sind, deren Hauptaxe auf der Ebene des Plättchens senkrecht steht. Diese Krystalle wachsen in zweifacher Art: erstens, indem jedes Plättchen an Umfang, nicht an Dicke zunimmt, und zweitens, indem die Wassermoleküle, welche der Fläche eines Plättchens anliegen, im Momente des Erstarrens so gerichtet werden, dass sie sich an Ort und Stelle zu einem neuen Plättchen vereinigen, welches sich dem schon bestehenden vollständig parallel anschmiegt und mit ihm übereinstimmende Orientirung besitzt. Das zweite Plättchen veranlasst die Bildung eines dritten u. s. w. Die Gesammtheit aller dieser zu einem Päckchen vereinigten Plättchen bildet einen einheitlichen Krystall, dessen Orientirung lediglich von der Lage des ersten Plättchens abhängt<sup>3</sup>. Die Plättchenstructur ist also schon dem wachsenden Krystall eigen; sie ist in der Art seines Wachsthums begründet. Manchmal sind die Plättchen im frischen Zustande sehr leicht aneinander verschiebbar. Später wird ihr Zusammenhang so fest, dass eine Verschiebung nur unter Anwendung besonderer Mittel möglich ist. Die von O. MÜGGE nachgewiesene Translations-

<sup>1</sup> O. MÜGGE, Über die Plasticität der Eiskrystalle. Nachrichten d. k. Ges. d. Wissensch. zu Göttingen. 1895. 2. Heft. p. 218.

<sup>2</sup> O. MÜGGE, Weitere Versuche über die Translationsfähigkeit des Eises u. s. w. Dies. Jahrb. 1900. II. 85.

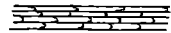
<sup>3</sup> Besässen die Nebenaxen der einzelnen Plättchen eines Packetes verschiedene Orientirung, dann wäre das Packet kein einheitlicher Krystall. Ich konnte aber, wie ich alsbald erörtern werde, feststellen, dass die Nebenaxen der zu einem Päckchen vereinigten Plättchen übereinstimmend orientirt sind.

fähigkeit beruht auf der Verschiebbarkeit der Plättchen. Translationsstreifung und FOREL'sche Streifung sind insoferne dasselbe, als in beiden Fällen die Streifung durch das Ausstreichen der Plättchen auf der Krystalloberfläche entsteht. Da die Plättchenebenen in jedem Krystall auf dessen Hauptaxe senkrecht stehen, verläuft die FOREL'sche Streifung auf benachbarten, aber verschieden orientirten Krystallen nach verschiedenen Richtungen.

Die Plättchen besitzen selbst wieder einen zusammengesetzten Bau. Das sieht man, wo sie als FOREL'sche Streifen austreichen. An der Unterseite des Eises, das ich in der eisernen Pfanne gewann, konnte ich drei Typen FOREL'scher Streifen unterscheiden, die ich der Kürze wegen als punktirten, gestrichelten und gekerbten Typus bezeichne. Bei dem punktirten Typus (Textfig. 14) besteht jeder Streifen aus einer einfachen Reihe kleiner rundlicher Erhöhungen, die durch seichte, zum Streifen quer verlaufende Vertiefungen getrennt sind. Beim gestrichelten Typus (Textfig. 15) wird jeder Streifen aus einer Reihe flachliegender Stielchen gebildet, die einander übergreifen und unter kleinem Winkel unter die Eisoberfläche einfallen. Beim dritten Typus (Textfig. 16) sind die treppenförmig angeordneten Plättchenränder bloss gekerbt. Alle drei Typen machen es sehr wahrscheinlich, dass jedes Plättchen aus Schaaren parallel gelagerter zarter Stielchen besteht, von welchen man beim ersten und dritten Typus nur die Enden, beim zweiten aber längere Stücke sieht. Es hängt das ab von der Lage der Plättchen und Stielchen gegen die Eisoberfläche.



Textfig. 14.



Textfig. 15.

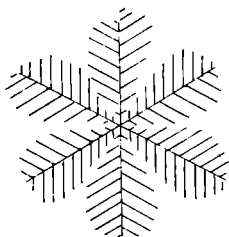


Textfig. 16.

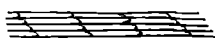
Die Zusammensetzung der Plättchen aus Stielchen folgere ich auch, weil ich öfter in einzelnen Eisplättchen salzhaltigen und salzfreien Wassers eine undeutliche gefiederte Structur wahrnahm. Die Stielchen hatten da eine Stellung wie die Fähnchen zu beiden Seiten des Schaftes einer Vogelfeder. Es wird Sache weiterer Untersuchungen sein, zu ermitteln, ob in den nach allen Seiten gleichmässig entwickelten Plättchen die Stielchen jene Anordnung haben, welche in

Textfig. 17 skizzirt ist, ob also die gesehenen federförmigen Gebilde etwa einem Sechstel einer solch sternförmigen Bildung entsprechen<sup>1</sup>.

Beim Eise in der Pfanne gehörten die FOREL'schen Streifen ein und desselben Packetes nur einem Typus an. In allen Plättchen ein und desselben Packetes hatten also die Stielchen übereinstimmende Anordnung. Daraus schliesse ich auf die übereinstimmende Orientirung der Nebenaxen aller Platten eines Packetes, und folgere, dass jedes Plattenpaket ein einheitlicher Krystall ist.



Textfig. 17.



Textfig. 18.

An dem gestrichelten Typus habe ich beobachtet, dass manchmal die Stielchenenden benachbarter Streifen in einer Geraden liegen (Textfig. 18); dann entsteht eine zweite Art von Streifung, welche die erste schneidet.

Nachdem wir wissen, jeder Eiskrystall ist so orientirt, wie das erste Plättchen, aus dem er hervorging, verstehen wir, warum die Haupttaxen der Seeisokrystalle vertical sind. Die Gleichgewichtslage der auf der Wasseroberfläche schwimmenden Plättchen ist nämlich die horizontale<sup>2</sup>. In dieser Lage frieren die nebeneinander schwimmenden Plättchen zu einer festgeschlossenen Decke zusammen. Die dann vertical nach abwärts wachsenden Krystalle sind daher wie die Plättchen vertical orientirt.

Nach AXEL HAMBERG<sup>3</sup> besteht auch das Meereis aus senk-

<sup>1</sup> H. LOHMANN (Über Höhleneis, Mitth. d. Deutsch. u. Österr. Alpenver. 1898. p. 149—150) machte in der Kolowratshöhle von Zeit zu Zeit von denselben Stellen des schmelzenden Eises Abdrücke. Durch Vergleich der Abdrücke fand er: „Jedes Korn“ (= Eiskrystall) „besteht aus schichtenweise nebeneinander liegenden Eisplättchen, prismatischen Nadeln oder kleinen Eiskörnern.“ Diese Beobachtung stimmt hinsichtlich der Zusammensetzung der Krystalle mit meiner eigenen überein, nur habe ich niemals gesehen, dass Eiskrystalle aus Körnern bestanden.

<sup>2</sup> Das sagt bereits O. MÜGGE, Über die Structur des grönländischen Inlandeises u. s. w. Dies. Jahrb. 1899. II. 127.

<sup>3</sup> A. HAMBERG, Studien über Meereis und Gletschereis. Bihang till k. svenska Vet. Akad. Handlingar. 21. Afd. II. No. 2. p. 3.

recht zur Wasseroberfläche orientirten, nach der Hauptaxe prismatisch ausgezogenen Krystallindividuen. Das ist genau wie beim Süßwasser-Sееeis zu erklären.

Im Gegensatz zu HAMBERG hebt aber ERICH V. DRYGALSKI<sup>1</sup> als fundamentalen Unterschied zwischen dem Charakter des Eises der Binnenseen und der Fjorde hervor, dass in letzterem die Plättchen durch die ganze Dicke der Eisdecke mit der Flächenrichtung senkrecht zum Wasserspiegel gestellt sind, während sie bei den ersteren fast ausnahmslose parallel zu diesem liegen. Es besteht kein Grund, die Richtigkeit der Beobachtung eines der beiden Forscher trotz des Widerspruches anzuzweifeln. Offenbar giebt es Meereis, wie es HAMBERG beschreibt, und solches, das v. DRYGALSKI schildert.

Die Sache verhält sich wahrscheinlich so: Auf dem ruhigen Meere entsteht wie auf den Süßwasserseen eine Eisdecke mit vertical orientirten Krystallen. In der Meereisdecke haften jedoch die Krystalle wegen der durch den reichen Salzgehalt bedingten Verzögerung des Gefrierprocesses anfänglich nur lose aneinander. Erst bei andauernd niedriger Temperatur frieren sie fest zusammen und bilden das von HAMBERG beschriebene Eis. — Ist aber der Zusammenhang zwischen den Krystallen noch nicht gefestigt und tritt Wellengang ein, so zerfällt die Eisdecke in die einzelnen Krystalle, die, wenn sie bereits höher als breit sind, um 90° kippen. Beruhigt sich das Meer wieder, so frieren die nun horizontal orientirten Krystalle fest zusammen und bilden das von v. DRYGALSKI beschriebene Eis.

O. MÜGGE (Über die Structur u. s. w. p. 128) gab, ohne HAMBERG'S Beobachtung zu erwähnen, für die von v. DRYGALSKI gesehene Structur eine ähnliche Erklärung. MÜGGE'S und meine Anschauung gehen eigentlich bloss hinsichtlich der Bildungsweise der Plättchenpakete auseinander. MÜGGE sagt, die Pakete entstehen nur im Meere, weil die auf dem Meerwasser lose schwimmenden Krystallplättchen sich infolge der Bewegung des Wassers aufeinanderschieben und später mit ihren Basisflächen zusammenfrieren. Dass eine solche Packetbildung beim Meereis eintritt, beim Teicheis nicht, dürfte lediglich in

<sup>1</sup> E. v. DRYGALSKI, Grönlandexpedition. Berlin 1897. 1. 423.

der stärkeren Störung der Meeresoberfläche durch Wellenschlag und in dem gleichzeitig durch den Salzgehalt und warme Strömungen stark verzögertem Gefrieren seinen Grund haben. — Ich aber fand, dass die Krystalle aller Wassereisgattungen Plattenpackete sind, deren Entstehung durchaus kein bewegtes Wasser erfordert.

Das Seeeis, dessen Krystalle von Anfang an miteinander fest verbunden sind, zerfällt bei Wellengang nicht in die Einzelkrystalle, sondern in Schollen, deren horizontale Dimensionen die Schollendicke weit übertreffen. Die Krystalle des See-eises verlieren daher durch die vorübergehende Zertrümmerung der Eisdecke ihre ursprüngliche verticale Orientirung nicht.

Wenn Süß- oder Salzwasser in einem Gefässe gefriert, so beginnt die Eisbildung nicht nur auf der Oberfläche des Wassers, sondern auch an den Gefässwandungen. Hier wird die Stellung der ersten Eisplättchen nicht nur durch die Schwerkraft, sondern auch von den Anziehungskräften bestimmt, welche von den Gefässwänden ausgehen. Auch die Beschaffenheit der Wandoberfläche, ihre Glätte oder Rauheit hat auf die Stellung der Eisplättchen Einfluss. Manchmal fand ich die Krystalle, welche auf der wandfreien Oberseite endeten, zu dieser Fläche normal orientirt, während die Hauptaxen jener Krystalle, die an die Wandflächen stiessen, normal zu letzterer standen. In anderen Fällen konnte ich hingegen nicht einmal eine bevorzugte Orientirungsrichtung herausfinden.

Dem Stalagmiten- und Krusteneis dienen meist rauhe, unebene Flächen als Unterlage. Die ersten Krystallplättchen, welche sich daran setzen, und die aus ihnen hervorgehenden stengelförmigen Eiskrystalle sind daher nach allen möglichen Richtungen orientirt.

Beim Stalaktiteneis entstehen die ersten Eisplättchen auf der Oberfläche der hängenden Wassertropfen. Sie werden gegen die Tropfenbasis gezogen. Indem sie an den Rand des Eiströhrchens stossen, nehmen sie die verschiedensten Richtungen an. Es sind darum die Krystalle des Zapfeneises, wie die des Riese-eises überhaupt, regellos orientirt.

Nur in dem einen Falle dürfte Riese-eis entstehen, dessen Krystalle nach einer bestimmten Richtung orientirt sind,

nämlich, wenn, wie beim „unteren See“ in der Geldluck'n, Seeeis durch Überrieselung nach oben hin als Krusteneis weiterwächst, denn die Orientirung der Seeekrystalle wird da wahrscheinlich auf die Krystalle des Krusteneises übertragen.

Andererseits meine ich mit der Behauptung nicht fehl zu gehen, die Krystalle des Seeees sind regellos orientirt, wenn im Momente der Eisbildung auf dem Wasser eine Schneeschicht schwimmt, weil dann die untersten Schneeeiskrystalle, deren Orientierung regellos ist, als Seeekrystalle weiterwachsen.

Mich von der Richtigkeit der beiden ausgesprochenen Meinungen zu überzeugen, fehlte bisher leider die Gelegenheit.

## II. Eis aus Schnee.

In seiner preisgekrönten Arbeit: „Über das Gletscherkorn“<sup>1</sup>, schildert ROBERT EMDEN, wie aus einer Schneelage, die das Dach eines zeitweilig geheizten Raumes bedeckte, durch einen molecularen Umlagerungsprocess Eis hervorging, dessen Krystalle sich in nichts von den Körnern des echten Gletschereises unterschieden. Um diesen Vorgang aus eigener Anschauung kennen zu lernen, stellte ich einen ähnlichen Versuch an. Ich gab frisch gefallenen Schnee in eine Pfanne, presste ihn etwas und übergoss ihn mit Brunnenwasser, dass er völlig durchtränkt war. Das Gefäss blieb 29 Tage im Freien an einem gegen die Sonne geschützten Ort stehen. Nur wenn die Temperatur im Freien den ganzen Tag nicht über 0° stieg, brachte ich das Gefäss auf kurze Zeit in einen Hausgang, dessen Lufttemperatur wenig über 0° betrug, damit durch die beginnende Schmelzung des Eises dessen Structur an der Oberfläche sichtbar werde. Ich fertigte dann häufig Abdrücke an, die ich noch besitze. Sie zeigen Folgendes: Nach den ersten 24 Stunden bestand das Eis aus kleinen Körnern von der Grösse feinen Grieses. Nach 48 Stunden waren Körner mit 2 mm Durchmesser nicht selten. Nach 15 Tagen hatten einzelne Körner einen Durchmesser von 5 mm und nach 29 Tagen einen solchen von 7 mm. Anhaltendes

<sup>1</sup> Basel 1890.

Thauwetter machte es mir unmöglich, die Krystalle weiter zu züchten.

Nach den wiederholt vorgenommenen optischen Untersuchungen waren die Körner jederzeit regellos orientirte Krystalle<sup>1</sup>.

Die erste Anlage eines jeden Krystalles war offenbar durch ein Schneesternchen oder eine Schneenadel gegeben. Weil das im Gefäss befindliche Eis während der ganzen Beobachtungszeit keine Massenvermehrung, sondern im Gegentheil durch Verdunstung sogar eine kleine Verminderung erfuhr, ist das Wachsthum der Krystalle nur dadurch erklärbar, dass sich eine Anzahl der Krystalle auf Kosten der anderen vergrösserte, wobei letztere zum Theil oder ganz aufgezehrt wurden. Da ferner in einigem Abstände unter der Eisoberfläche die Krystalle unausgesetzt in unmittelbarer Berührung verblieben, also an ihren Grenzen keine Schmelzung vor sich ging, die Krystalle aber trotzdem auch hier mit der Zeit grösser wurden, ist zu folgern, es fand an diesen Stellen eine Umlagerung der Molecüle von einem Krystall in den anderen ohne das Zwischenstadium der Verflüssigung statt. Dass diese directe Umlagerung, welche E. HAGENBACH mit dem Namen „Überkrystallisiren“ bezeichnet<sup>2</sup>, in der Nähe der Schmelztemperatur schneller als bei grösserer Kälte erfolgt, hat bereits EMDEN (p. 27) festgestellt.

Wenn man „Eis aus Schnee“ längere Zeit gelinder Wärme aussetzt, dann entstehen wie beim Wassereis spaltähnliche Fugen, die von der Oberfläche ausgehen und den gemeinsamen Korngrenzen folgen. Die Entstehung dieser Fugen, der sogen. Capillarspalten, und der Vorgang des Überkrystallisirens sind so merkwürdige Erscheinungen, dass wir uns mit ihnen eingehender befassen wollen. Dabei werden wir nicht nur das Eis aus Schnee, sondern auch das Wassereis im Auge behalten; denn beide Eisgattungen verhalten sich in dieser Hinsicht ganz gleich.

<sup>1</sup> EMDEN benennt auch stengelförmige Krystalle als Körner. Ich spreche aber von Körnern nur dann, wenn es sich um Krystalle handelt, deren Ausdehnung nach allen Seiten hin ziemlich gleich ist.

<sup>2</sup> E. HAGENBACH-BISCHOFF, Das Gletscherkorn. Abdruck a. d. Verh. d. Naturf.-Ges. in Basel. 7. 1. Heft. p. 9.



Jeder Eiskrystall ist eine Gruppe gesetzmässig angeordneter Molecüle, die sich bei einer Temperatur unter  $0^{\circ}$  durch das gegenseitige Spiel der ihnen innewohnenden Kräfte in dieser Ordnung erhalten. Jedes einzelne Molecül wird daher mit um so grösserer Kraft im Krystallverbande festgehalten: 1. je mehr es von anderen Molecülen desselben Krystalles umschlossen wird und 2. je mehr Molecüle dem Krystalle überhaupt angehören, d. h. je grösser der Krystall ist. Aus dem ersten Grunde werden die an der Oberfläche des Krystalls liegenden Molecüle der Losreissung aus dem Krystallverbande einen geringeren Widerstand entgegensetzen als die unter der Oberfläche im Krystallinnern befindlichen Molecüle. Gelänge es, allen Molecülen eines Krystalles in gleichen Zeiten genau gleiche Wärmemengen zuzuführen, so würde also die Schmelzung dennoch nur an der Krystalloberfläche vor sich gehen. Aus dem zweiten Grunde bedarf unter sonst gleichen Umständen ein kleinerer Krystall zur Schmelzung an seiner Oberfläche einer geringeren Wärmemenge als ein grösserer.

Ziehen wir nun ein Eisstück in Betracht, das aus einer Anzahl von Krystallen besteht, die sich vollkommen dicht berühren. Da spielen die krystallinen Kräfte eines jeden Krystalls hinüber in den Nachbarn. Jeder Krystall sucht seinem Nachbarn Molecüle zu entreissen, um sie dem eigenen Verband einzuverleiben. Hierdurch erfährt das Krystallgefüge an den gemeinsamen Krystallgrenzen eine Lockerung, und zwar am kleineren Krystall die bedeutendere. Sind die Grössenunterschiede der Krystalle namhaft und ist das Eis nicht gar zu kalt, dann werden Molecüle des kleineren Krystalls wirklich in den grösseren herübergezogen, es krystallisiren Molecüle über.

Befindet sich unser Eisstück in Luft von über  $0^{\circ}$ , so tritt ein Wärmestrom aus der Luft in das Eis ein. An der Eintrittsstelle, d. i. an den freiliegenden Krystalloberflächen, findet Schmelzung statt. In die Krystalle dringend schwächt sich der Wärmestrom ab. Deshalb und weil der krystalline Zusammenhang der Molecüle im Krystallinnern ein festerer ist, schmilzt da kein Eis. Wo aber der Wärmestrom im Eisinnern von einem Krystall in einen anderen übertritt, wo

er also eine gemeinsame Grenzfläche zweier Krystalle überschreitet, oder wo er längs einer solchen Grenze fortschreitet, passirt er lauter Stellen, an welchen, wie wir gehört haben, der moleculare Zusammenhang von vornherein bereits gelockert ist. Deshalb ist hier der Wärmestrom bis zu einer gewissen Entfernung von der Eisoberfläche trotz seiner Abschwächung immer noch kräftig genug, um Capillarspalten auszuschmelzen<sup>1</sup>. In noch grösserer Entfernung von der Eisoberfläche ist aber der Wärmestrom schon so schwach, dass er die an den Korngrenzen bereits vorhandene Lockerung im molecularen Zusammenhange bloss erhöht. Das hat zur Folge, dass das Überkrystallisiren erleichtert wird und dass eine durch Schlag erzeugte Bruchfläche den Krystallgrenzen folgt. Im Eiskern aber, bis wohin der Wärmestrom noch gar nicht drang, verläuft der Bruch muschelrig und ganz unbekümmert um die Grenzen der Krystalle.

Durch das Überkrystallisiren wachsen die grösseren Krystalle auf Kosten der kleineren. Hingegen werden mit dem Auftreten der Capillarspalten alle betroffenen Krystalle kleiner, da sie schmelzen. Weil jedoch die grösseren Krystalle langsamer als die kleineren schmelzen, liefern letztere einen unverhältnissmässig grossen Theil des Schmelzwassers, und besonders kleine Krystalle werden hierbei ganz zu Wasser. Kann das Schmelzwasser nicht abfliessen und sinkt später die Temperatur wieder unter 0°, so wachsen alle verbliebenen Krystalle, indem sich ihnen die Molecüle des Schmelzwassers wieder angliedern. Doch auch hier macht sich die Übermacht der grösseren Krystalle geltend, indem letztere unverhältnissmässig mehr Molecüle an sich ziehen wie die kleineren. Das

---

<sup>1</sup> AXEL HAMBERG (Studien über Meereis und Gletschereis p. 9) sagt, dass während des Wachstums der Krystalle zwischen dieselben fremde, im Wasser lösliche Stoffe concentrirt werden, welche den Schmelzpunkt des Eises an den Grenzflächen der Krystalle — wie sie im Eise vorkommen — etwas erniedrigen. Es liegt mir selbstverständlich ferne, das Vorhandensein solcher Stoffe und ihren Einfluss auf die Schmelzbarkeit des Eises zu bestreiten. Doch weise ich mit Nachdruck darauf hin, dass zur Bildung von Capillarspalten das Vorhandensein von Fremdstoffen gar nicht nöthig ist; denn Capillarspalten bilden sich auch im Eise aus destillirtem Wasser.

Ausschmelzen und Wiederausfrieren der Capillarspalten befördert also ebenso wie das Überkrystallisiren das Wachsen der grösseren Krystalle auf Kosten der kleineren. Als wir den Schnee in der Pfanne mit Wasser übergossen hatten, wurden die Schneesternchen und Nadeln so lange durch Schmelzung verkleinert, bis die Wassertemperatur auf  $0^{\circ}$  gesunken war. Von diesem Momente an krystallisirte aber das Wasser an die noch verbliebenen Sternchenreste und vergrösserte sie zu dicht aneinanderliegenden Körnchen, zwischen denen der eben geschilderte Kampf ums Dasein begann, aus dem jene als Sieger hervorgingen, die von vornherein die stärkeren, weil grösseren waren. Eine Richtungsänderung der Krystalle fand dabei nicht statt. Es behielt daher jedes Korn die Orientirung, welche durch die ganz zufällige Lage des Schneesternchens, aus dem es entstand, gegeben war.

Ebenso wie das Eis an den gemeinsamen Grenzen zweier Krystalle leichter schmilzt als an den freiliegenden Oberflächen der Krystalle, schmilzt es auch in jedem einzelnen Krystalle an den gemeinsamen Grenzen zweier Plättchen und zweier Stielchen leichter, wie an den freiliegenden Oberflächen der Plättchen und Stielchen. Daher entstehen an der Oberfläche der Krystalle, wo die Grenzflächen der Plättchen austreichen, zarte Längsfurchen, zwischen denen die FOREL'schen Streifen verlaufen, und jeder FOREL'sche Streifen wird wieder von kurzen Querfurchen untertheilt, die dem Ausstrich der gemeinsamen Grenzen jener Stielchen folgen, welche dasjenige Plättchen zusammensetzen, dem der betreffende Streifen zugehört.

Aus dem Umstande, dass die FOREL'schen Streifen nur bei sehr langsamer Schmelzung zum Vorschein kommen, schliesse ich auf einen nur sehr geringen Unterschied in der Schmelzbarkeit des Eises an den freiliegenden und den gemeinsamen Grenzen der Stielchen und Plättchen.

Bei besonders rascher Schmelzung entstehen aber auch keine Capillarspalten. Das kommt wahrscheinlich davon, dass in diesem Falle das Eis an der Oberfläche mindestens ebenso rasch abschmilzt, als der Wärmestrom im Eise vordringt.

### Firn- und Gletschereis und seine Bewegung.

In den Firnfeldern geht die Umwandlung des Schnees in Firneis in ganz ähnlicher Weise vor sich, wie wir sie in der eisernen Pfanne beobachteten. Nur rührt das Wasser, welches im Firnfeld zwischen die Schneekristalle eindringt, vom oberflächlich abschmelzenden Schnee oder vom Regen her. Die Krystalle des Firneises sind daher ebenfalls regellos orientirt. Je rascher und je länger eine Schneelage an ihrer Oberseite schmilzt, je reichlicher auf sie Regen fällt, um so vollständiger wird sie durchtränkt, um so mehr Luft wird aus ihr ausgetrieben und um so compacter und luftblasenärmer ist das entstehende Eis. Kommt aber eine Schneelage an ihrer Oberseite wiederholt nur schwach zum Schmelzen, so dringt das Schmelzwasser jedesmal nur wenig tief ein. Es bildet sich dann bloss eine oberflächliche Eiskruste, die schliesslich das Eindringen von Schmelzwasser in den noch trocken gebliebenen Schnee und das Entweichen von Luft aus demselben gänzlich verhindert. Da über einer solchen Lage wieder eine aus dichtem, luftarmem Eise entstehen kann, folgt, dass im Firnfeld die Dichte des Eises in der Verticalen von oben nach unten sehr wechselt. In der That wechsellagert vielfach weissliches, luftblasenreiches mit mehr blauem, luftblasenarmem Eise.

In den luftarmen Schichten berühren sich die Krystalle nach grösseren Flächen. Darum geht in ihnen das Überkrystallisiren am lebhaftesten vor sich und es bilden sich in ihnen die grössten Krystalle. Man sollte meinen, das Überkrystallisiren finde nicht nur zwischen den Krystallen ein und derselben Schnee- bzw. Eisschichte, sondern ganz allgemein auch an den Schichtflächen statt, so dass Krystalle der einen Schichte in die andere und umgekehrt hinüberwachsen, wodurch sich die Schichten gegenseitig verzahnen und die Schichtflächen verwischt werden. Ich habe mich aber überzeugt, dass dies nur zum geringsten Theil der Fall ist. Die meisten Schichtflächen bleiben selbst in sehr bedeutenden Abständen unter der Firnfeldoberfläche mit aller Schärfe fortbestehen. Das sieht man bei günstigen Temperaturverhältnissen an den Wänden der Firnspalten und noch besser an den grossen Schmelzkehlen, welche Felsköpfe umziehen.

Zwei solche Kehlen liegen im Firngebiete der Übergossenen Alm, einem kleinen Gletscher im Lande Salzburg. Sie schliessen das Eis in einer Mächtigkeit bis zu 40 m auf. An ihnen habe ich mich überzeugt, dass die meisten Schichten, und zwar unten ebenso wie oben, scharf gegeneinander abgegrenzt austreichen. Der Process des Überkrystallisirens geht also an den Schichtflächen in der Regel nicht vor sich. Die Ursache davon ist der Staub, der aus der Luft auf jede Schneelage fällt, solange sie zu oberst liegt, und der zwischen zwei Lagen kommt, wenn es neuerdings schneit. Wie im Rieseleise eine Staublage, wenn sie dicht genug ist, das Weiterwachsen der Krystalle verhindert, ebenso verhindern die Staublagen im Firneise das Überkrystallisiren von einer Schichte zur anderen.

An den Schichtflächen des Firneises stossen also die Krystalle zweier verschiedener Schichten nach einer durchlaufenden, mehr weniger ebenen Fläche aneinander, was, wie wir sehen werden, eine grosse Bedeutung für die Art der Bewegung des Firneises hat. Die untersten Firneisschichten liegen infolge der Art ihrer Entstehung und wovon man sich an Schmelzkehlen überzeugen kann, dem Untergrunde flach auf. Doch werden Unebenheiten des Untergrundes mit der Zunahme der Schichtenzahl nach oben hin ausgeglichen, so dass die oberen Firnschichten mehr eben und zur Firnfläche parallel verlaufen.

In der Gletscherzunge ist das Eis nicht geschichtet. Wir wollen seine Beschaffenheit zunächst ungefähr in der Mitte zwischen der Wurzel und dem Ende einer längeren Zunge kennen lernen, deren Breite im Vergleiche zu jener des Firnfeldes verhältnissmässig klein ist. Da fällt uns bei günstigen Temperatur- und Beleuchtungsverhältnissen schon bei der Annäherung an den Gletscher auf der ganzen Breite des Zungenrückens eine Bänderung auf, welche zu den seitlichen Rändern, also auch zur Zungenaxe parallel verläuft<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Wie sehr die Witterungs- und Beleuchtungsverhältnisse auf den Grad der Sichtbarkeit der Bänderung Einfluss nehmen, bemerkte ich auf dem Vernagtferner an zwei aufeinander folgenden Tagen. Der erste Tag war sonnig. Nachts regnete es. Am zweiten Tag war der Himmel bewölkt und die Bänderung war um sehr Vieles deutlicher als Tags zuvor zu sehen.

Betreten wir das Eis, so nehmen wir zwischen je zwei Bändern schmale Fugen wahr, die sich nach unten verengen und das Eis in Blätter zerlegen, durch deren Ausstreichen an der Zungenoberfläche eben die Bänderung entsteht. Die Dicke der Blätter, oder, was dasselbe ist, die Breite der Bänder schwankt von einigen Millimetern bis zu mehreren Centimetern. Beim Verfolgen eines Bandes gletscher- auf- oder abwärts sehen wir, dass es schmaler wird. Ehe es aber ganz auskeilt, nimmt an seiner Seite bereits ein anderes in derselben Richtung seinen Anfang. Leicht übersieht man den Anschluss der Bänder und dann hält man eine ganze Bänderreihe für ein einziges fortlaufendes Band. Wie ausgeprägt die Bänderung verläuft, beweist folgende Begebenheit, die mir Prof. S. FINSTERWALDER mittheilte. Im Herbst 1900 nahm er auf der Zunge des spaltenarmen Hochjochferners, weitab vom Ufer seine Mahlzeit. Er verfolgte dann von dieser Stelle die Bänderung wohl über 300 m weit. Da bemerkte er den Abgang eines am Rastplatze liegengelassenen Messers. Die Bänderung zurückverfolgend gelangte er haarscharf zur Verluststelle. Wer die Bänderung auf dem Hochjochgletscher je beachtete, wird sich über diesen Ausgang nicht verwundern.

Treten wir an den Rand einer Spalte, so sehen wir, dass sich die Bänderung auf den Spaltenwänden in die Tiefe fortsetzt. Freilich ist sie da nur in den oberen Partien, wohin Sonnenschein und warme Luft gelangen, in gleicher Weise wie am Gletscherrücken ausgebildet. Gegen die Tiefe verliert sie sich und genau als ihre Fortsetzung erscheint auf der unten glatten Spaltenwand eine freilich nicht so scharf gezeichnete farbige Bänderung aus weissen und blauen Streifen.

Das Auftreten der Bänderung an den Spaltenwänden beweist, dass das Gletschereis auch in den Tiefen aus solchen Blättern besteht, wie wir sie auf dem Gletscherrücken kennen lernten. A. HEIM giebt von der Blätterstructur des Gletschereises folgende treffende Schilderung<sup>1</sup>: „In dem Gletschereise wird, ungleich bei verschiedenen Gletschern und ungleich nach der Stelle innerhalb ein und desselben Gletschers, im

<sup>1</sup> A. HEIM, Handbuch der Gletscherkunde. Stuttgart 1885. p. 134.

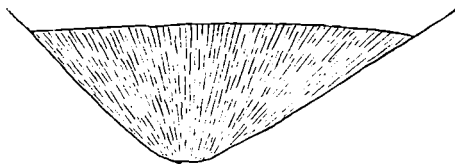
Allgemeinen zunehmend, gegen das Gletscherende hin eine im Ganzen plattig lamellare Structur stets deutlicher. Im blasenreichen, weisslichen Eise treten flach linsenförmige oder plattenförmige Lamellen von fast ganz blasenfreiem Eise auf. Die letzteren sind bald nur ein oder wenige Centimeter, meistens mehrere, selten bis zu 50 cm breit; bald sind sie nur wenige Decimeter lange Linsen, bald erstrecken sie sich viele Meter weit hin. Gegen ihr Ende keilen sie sich allmählich aus oder verlieren sich, sie gehen nicht wie eine Schicht zusammenhängend durch die ganze Masse hindurch. Quer zu der Structur gesehen, ist das Eis weisslich trübe, in der Ebene der Blätter aber betrachtet, erscheinen die letzteren als ausgezeichnet schöne durchsichtige blaue Streifen im weisslichen Eise . . . Bald finden wir bloss einzelne wenig auffallende blaue Blätter im weissen Eise entwickelt, bald aber ist die Structur so stark, dass die blauen Blätter dem Quantum nach über die weisse blasige Grundmasse vorherrschen. Bei grösseren Gletschern ist eine ausgeprägte Structur im unteren Theil die Regel.“

Ergänzend habe ich nur anzufügen, dass auch das weisse Eis aus lauter flach linsenförmigen Blättern besteht, die aber an der glatten Spaltenwand im Einzelnen nicht oder fast nicht auseinanderzuhalten sind, weil sich die benachbarten weissen Blätter in der Färbung zu wenig unterscheiden. Aber im oberen Theil der Spaltenwand und auf dem Gletscherrücken schmelzen überall zwischen den Blättern die schon erwähnten feinen Fugen aus, wodurch auch die weissen Blätter einzeln sichtbar werden.

Weil also im Gletschereise nicht nur blaue Blätter vorkommen, sondern weil die ganze Eismasse aus blauen und weissen Blättern besteht, wollen wir nicht mehr, wie es bisher gebräuchlich war, von der Blaublätterstructur, sondern kurzweg von der Blätterstructur des Gletschereises sprechen.

Über die Stellung der Blätter erhalten wir auf Zungen mit Querspalten guten Bescheid, denn es wird da das Streichen und Fallen der Blätter durch den Verlauf der Bänderung auf der Zungenoberfläche und den Spaltwänden bezeichnet. Überschreiten wir den von uns in Betracht gezogenen Theil der

Zunge von einem Ufer zum anderen<sup>1</sup>, so sehen wir die Blätter überall in der Bewegungsrichtung, d. i. parallel zur Zungenaxe streichen. Ganz an den Ufern fallen die Blätter am flachsten ein. Sie liegen da den Hängen oder Wänden des Gletscherbettes vollkommen flach an. Je mehr wir uns der Gletschermitte nähern, um so steiler richten sich die Blätter auf, um in der Mitte der Zunge vertical zu stehen. Es ist demnach sehr wahrschein-



Textfig. 19.

lich, dass die Blätter im ganzen Querprofil durch den Gletscher die in Textfig. 19 gezeichnete fächerförmige Anordnung besitzen.

Am Ende eines Gletschers, der sich schon ein grösseres Stück zurückgezogen hat, ist ein Zungenprofil durch Ausschmelzung bis zur Thalsohle herab freigelegt, das früher ein Stück oberhalb des Zungenendes lag. Hier muss sich daher zeigen, ob die Anordnung der Blätter auch im unteren Theil der Textfig. 19 richtig gezeichnet ist. Im Jahre 1901 bot diesbezüglich das Ende des in einem engen Thal eingezwängten Marzell-Schalfferners ein besonders lehrreiches Beispiel, denn der entströmende Bach schuf ein ungewöhnlich grosses Gletscherthor, über dem das Eis eine überhängende Wand bildete, an der ich, wie zu beiden Seiten des Thores, die Anordnung der Blätter in vorzüglicher Weise sehen konnte. Dieser Anblick, sowie eine mir später zu Gesicht gekommene, von WÜRTHLE in Salzburg aufgenommene Photographie: „No. 898, Gletscherthor im Suldenthale“, überzeugten mich von der vollständig richtigen Zeichnung der Textfig. 19.

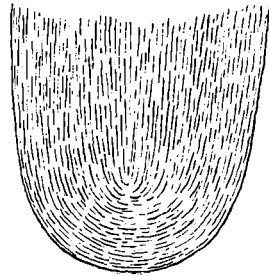
Im gewölbten Ende eines stationären oder eines von diesem Zustand nicht weit entfernten Gletschers sind die Blätter ganz anders gruppirt. Die Bänderung verläuft da auf der Oberfläche nicht parallel zur Zungenaxe, sondern in schönen Bögen, die zum gerundeten Rande des Zungenendes parallel sind, von einer Seite der Zunge zur anderen. Je

<sup>1</sup> Ich habe überquert den Marzell-, Gurgler-, Vernagt-, Guslar-, Hintereis-, Niederjochferner u. a.

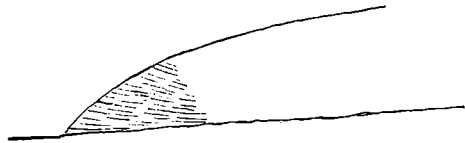


weiter ein Bogen vom Rande absteht, um so schärfer ist er gekrümmt. Die innersten Bögen gehen sogar in spitze Winkel über. Im Grundrisse hat die Bänderung den in Textfig. 20 dargestellten Verlauf. Sie geht gletscheraufwärts in jene Bänderung über, welche wir schon früher beim Überschreiten des Gletschers zwischen Wurzel und Ende kennen lernten.

Stationäre Gletscherenden sind gewöhnlich von Radialspalten durchsetzt, an deren Wänden man das Einfallen der Blätter sieht. So gewann ich im Jahre 1899 am Rhône-Gletscher und 1901 an der linken Hälfte des Vernagtfernerendes ein bestimmtes Urtheil über die Lagerung der Blätter, besonders als ich am Vernagtferner neben einer Radialspalte bis zum Gletscherrücken hinaufstieg<sup>1</sup>. An beiden Gletschern fand ich Folgendes: Am Rande des Gletscherendes liegen die untersten Blätter überall dem Untergrund ganz flach auf. Je höher ein Blatt vom Boden absteht, um so steiler fällt es gletscherwärts ein. Im Innern des Zungenendes nähern sich also die Blätter dem Untergrunde. Dabei wird, indem sie sich krümmen, ihr Einfallen sanfter, so dass sie sich schliesslich dem Untergrunde, wenn sie ihn überhaupt erreichen, ganz anschmiegen. Die Textfig. 21 zeigt das Einfallen der Blätter, wie ich es an den Wänden der Radialspalten gesehen habe. Da ferner der Verlauf der Bänderung auf der Oberfläche des Zungenendes auch eine Krümmung der Blätter im horizontalen Sinne anzeigt, ergibt sich, dass die Blätter im Zungenende zu doppelt



Textfig. 20.



Textfig. 21.

<sup>1</sup> Die beiden Hälften des Vernagtfernerendes zeigten im Jahre 1901 verschiedenes Verhalten. Die Hauptströmung des Eises drängte nämlich nach rechts. Darum war die rechte Hälfte des Endes noch immer in ziemlich lebhaftem Vorstoss begriffen, während die linke sichtlich zurückblieb und sich dem stationären Zustande näherte.

gekrümmten, ineinanderliegenden Flächen angeordnet sind, die die Gestalt der Vordertheile von Esslöffeln haben. Je höher ein Löffel liegt, um so schmaler und spitzer ist er, und um so steiler sind seine Seitenwandungen gestellt. Die Wände des innersten Löffels stehen vertical und lassen zwischen sich keinen Raum frei. Gletscheraufwärts geht auf diese Weise die löffelförmige Anordnung der Blätter in die fächerförmige über.

Um Missverständnissen vorzubeugen, betone ich ganz ausdrücklich, dass kein Löffel und keine Fächerwand aus einem einzigen Blatte, sondern aus einer sehr grossen Zahl kleiner flachlinsenförmiger Blätter besteht, die sich mit ihren auskeilenden Rändern übergreifen.

Besehen wir die Blätter im Einzelnen genauer, so bemerken wir bei günstiger Witterung, dass jedes Blatt durch das Ausschmelzen von Capillarspalten in unregelmässig geformte Körner zerlegt wird. Jedes Korn erweist sich durch die optische Untersuchung als einheitlicher Krystall. Diese Krystalle sind ganz regellos orientirt. Das habe ich auf mehreren Gletschern entweder optisch festgestellt, oder ich schloss es aus der Lage der TYNDALL'schen Schmelzfiguren, deren Ebenen bekanntlich zur Hauptaxe normal stehen.

Von grosser Bedeutung ist, dass kein Korn eines Blattes in das benachbarte Blatt hinübergreift, dass also die Blattflächen keine vorspringenden Unebenheiten besitzen. Das sieht man überall an dem ungestört geradlinigen Verlauf der Fugen zwischen den Bändern und an den ebenflächig begrenzten dünnen Tafeln, die man mitunter aus dem geblättern Eise heraus schlagen kann<sup>1</sup>.

Im Schnitte senkrecht zu den Blättern erinnern die in jedem Blatte unregelmässig, und die zwischen je zwei Blättern geradlinig und parallel verlaufenden Capillarspalten an ein Bruchsteinmauerwerk mit durchlaufenden Lagerfugen. Diesen treffenden Vergleich zog Prof. E. HAGENBACH-BISCHOFF im Jahre 1899 gelegentlich der Begehung des Unteraargletschers durch die erste internationale Gletscherconferenz.

Auffällig ist die von einem Blatt zum anderen oft sehr stark wechselnde Korngrösse und der starke Unterschied im

<sup>1</sup> Am Niederjochferner, wo die Oberfläche von tiefen Geleisen durchfurcht war, bekam ich Tafeln von 4 dm<sup>2</sup> Fläche.

Luftgehalt der Blätter. Diese Unterschiede sind die Ursache der ungleich raschen Schmelzung nebeneinander befindlicher Blätter, durch welche auf der Gletscheroberfläche rinnenförmige Vertiefungen und dazwischen verbleibende Leisten entstehen, die an Wagengeleise auf einer vom Regen durchweichten Strasse erinnern. Erstrecken sich die Bänder genau in der Richtung des Wasserablaufes, so sind die Geleise tief. Auf dem Niederjochferner habe ich solche von 42 cm Tiefe gemessen. Wo aber das Schmelzwasser, wie am Ende stationärer Gletscher, senkrecht zur Bänderung abfließt, entstehen überhaupt keine Geleise.

Ziehen wir einen Vergleich zwischen dem geblätternen Gletschereise und dem geschichteten Firneise, so ergibt sich: Die Korngrösse der Krystalle und der Luftgehalt ändern sich von Blatt zu Blatt wie von Schicht zu Schicht; die Krystalle sind in den Blättern wie in den Schichten regellos orientirt und die Blattflächen bilden im Eise wie die Schichtflächen durchlaufende Flächen ohne nennenswerthe Unebenheiten. Der Gedanke, die Blätter sind zertheilte Schichten, drängt sich auf.

Die Blätter bestehen zwar durchschnittlich aus grösseren Krystallen wie die Schichten, aber das vermag unsere eben ausgesprochene Vermuthung nicht abzuschwächen, denn wir wissen, das aus dem Firneise hervorgegangene Zungeneis ist das ältere, und darum können in ihm die Krystalle im Laufe der Zeit durch Überkrystallisation gewachsen sein. Doch der vollständige Beweis für den Übergang der Schichtung in die Blätterung ist erst dann erbracht, wenn es gelingt, diesen Übergang wirklich zu beobachten. Ist dies überhaupt möglich, so kann es nur im Gebiete der Zungenwurzel sein, weil oberhalb desselben das Eis, soweit es sichtbar, geschichtet, unterhalb aber geblättert ist.

Im Bestreben, den Übergang zu finden, unternahm ich manche vergebliche Wanderung. Neuschnee gestattete keinen Einblick.

Endlich traf ich's im Jahre 1901 am Marzellferner günstig. In einer Meereshöhe von ungefähr 2900 m verläuft quer über die Zungenwurzel eine Thalstufe, welche eine sehr starke Zerklüftung und Auflösung des Eises in aufrechtstehende

mächtige Platten und Prismen bewirkt, die in treppenförmiger Anordnung langsam herabsinken. Durch einen allgemeinen Überblick aus grösserer Entfernung, als auch durch Besichtigung in nächster Nähe, beim Verweilen zwischen den absinkenden Blöcken, versicherte ich mich auf das Bestimmteste, dass das Eis in diesem Abschwunge noch die echte Firnschichtung besass, welche trotz der vielen durch Verwerfungen und Pressungen verursachten Störungen zumeist horizontal verlief. Nur an manchen Stellen machte sich eine schwache Neigung oder Verbiegung der Schichten bemerkbar.

Unterhalb des Abschwunges schlossen sich die Klüfte rasch. In einiger Entfernung davon, in etwa 2800 m Meereshöhe, war aber eine neue, sehr grosse Querspalte aufgerissen. An ihren Wänden verliefen zahlreiche, annähernd verticale Streifen aus zusammengepresstem Schnee, der offenbar, als diese Eismasse in Blöcke und Platten zertheilt, über die Thalstufe herabkam, in die Klüfte fiel und unterhalb der Stufe durch den Zusammenschluss der Blöcke in dünne Lamellen zusammengedrückt wurde. Die Schneestreifen bezeichneten also in der nunmehr wieder geschlossenen Masse die Grenzen der Blöcke. Auch jetzt noch war in den Blöcken die Firnschichtung vorhanden. Aber sie war in jedem Block stärker verbogen und durchwegs steiler aufgerichtet als oben im Abschwunge. Ihr Streichen fiel mit der Bewegungsrichtung des Eises zusammen. Noch ein Stück weiter thalab war die Schichtung an den Wänden einer anderen Querspalte fast vertical aufgerichtet, aber nur mehr ganz wenig verbogen. Manche Schichten keilten da im Eise wie die Blätter aus. An der nächsten und allen folgenden Querspalten traf ich nur typische Blätterstructur. Ich gewann die volle Überzeugung, ich habe auf dem Wege vom Abschwung bis hierher den Übergang der Schichtung in die Blätterung gesehen.

Diese Umwandlung, welche durch die Zertheilung des Eises in einzelne Blöcke erleichtert wurde, hat ihren Grund in jenem Druck, dem das Eis z. Th. schon im Abschwunge, viel mehr noch aber unterhalb desselben durch die Verengung des Bettes ausgesetzt ist. Dieser Druck, der von beiden Ufern gegen die Mitte des Gletschers ausgeübt wird, bewirkt, dass sich die Schichten in jedem Block unter vorübergehender

schwacher Faltung senkrecht zur Druckrichtung und parallel zur Bewegungsrichtung aufstellen.

Vom Marzellferner ging ich anderen Tags zum grossartigen Eisbruch des Vernagtferners westlich des Schwarzkögele<sup>1</sup>. Auch hier sinkt das Eis treppenförmig über eine Felsstufe, die aber viel höher wie jene des Marzellferners ist. Im Vernagtferner bildet das über die Stufe herabgelangte Eis keine selbständige Zunge, sondern einen Zufluss zum viel bedeutenderen Hauptgletscher, dessen Bewegungsrichtung jene im Abschwunge fast unter einem rechten Winkel trifft. Das hat zur Folge, dass das mit dem Hauptstrom vereinigte Eis des Zuflusses mit ganz ungeheurer Kraft gegen den Fuss der Felsstufe gepresst wird. Die Schichtung, welche im Abschwunge bis zur Einmündung in den Hauptstrom vorhanden ist, verschwindet darum fast unmittelbar an der Mündungsstelle vollständig und ihre Stelle wird von der entwickeltsten Blätterstructur mit ganz steil aufgerichteten Blättern vertreten. Auch hier sind die Blätter senkrecht zur Druckrichtung und in die Bewegungsrichtung des Eises gestellt.

Im Jahre 1902 wiederholte ich die vorstehende Beobachtung. Damals sah ich aber ausserdem, wie im rechten Theile des Hauptstromes in einer Höhe von etwa 2900—2800 m, wo die Oberfläche des Gletschers wild bewegt aussah, mit der Entfernung vom Firnfeld in die durcheinandergeworfene Schichtung Ordnung kam, indem in ähnlicher Weise wie am Marzellferner allmählich aus ihr die geordnete Blätterung hervorging. Im linken Theil des Hauptstromes war die Blätterung schon in 2900 m Höhe vollends ausgebildet, weil dort die Pressung enorm war. Auf einen hohen Druck liess sich da aus der Aufwölbung des Gletscherrückens schliessen.

Ist einmal die Blätterung vorhanden, dann kommt sie selbst durch das Aufreissen zahlreicher Querspalten nicht in Unordnung. Der Verlauf der Bänderung bleibt zu beiden Seiten der Spalten auf der Gletscheroberfläche übereinstimmend. Das habe ich unter anderen auch am Vernagtferner wahrgenommen, der im Jahre 1900 ausserordentlich zerklüftet war.

<sup>1</sup> Man sehe die mustergiltige Karte in S. FINSTERWALDER's Werk: Der Vernagtferner. Wissenschaftl. Ergänzungsheft zur Zeitschr. d. Deutsch. u. Österr. Alpenver. 1897.

Hingegen habe ich im Jahre 1899 am Gepatsch- und am Rhône-Gletscher gefunden, dass, wo der unregelmässige Verlauf der Spalten auf Unregelmässigkeiten in der Gestaltung des Untergrundes hinweist, die die Regelmässigkeit in der Eisbewegung stören, auch der regelmässige Verlauf der Bänderung gestört wird. Unterhalb solcher Stellen, wo das Spaltengewirre wieder geschlossen war, sah ich, dass auf den sich berührenden Schollen die Bänderung nach abweichenden Richtungen strich, dass also eine gegenseitige Verdrehung der Schollen stattgefunden hat. In manchen Schollen waren die Blätter zu **S**-förmigen Falten zusammengeschoben, deren Schenkel in der neuen Bewegungsrichtung strichen. Noch eine Strecke weiter unterhalb waren diese Falten vollständig ausgewalzt und alle Blätter standen in der nun wieder normalen Bewegungsrichtung des Eisstromes. Es lag also hier ein Fall von Störung und Wiederherstellung normaler Blätterung vor.

Eine wichtige Beobachtung wurde im Jahre 1899 von den Mitgliedern der 1. internationalen Gletscherconferenz am Rhône-Gletscher gemacht. E. RICHTER berichtet hierüber<sup>1</sup>: „Im mittleren Theil des Rhône-Gletschers, besonders im Bereich des Abfalles unterhalb des rothen Profiles, zeigen sich in der Eismasse abwechselnde Lagen von klarem und getrübtm Eis. Diese Lagen, die wie Schichten aussehen, sind gefaltet, in der linken Hälfte des Gletschers verhältnissmässig stark, in der rechten viel schwächer. Die Antiklinalen und Synklinalen streichen in der Richtung des Gletschers. Diese Lagen wurden im Querschnitt in den hier allerdings nicht sehr tiefen Spalten am rothen Profil verfolgt. Dass die Lagen eine grosse Ausdehnung im Sinne ihres Streichens besitzen, geht aus den Formen hervor, die sie an der Oberfläche des Gletschers bedingen. Es zeigen sich hier gewöhnlich kleine Käme, die je nach dem Ausstreichen einer klaren (an der Oberfläche weiss erscheinenden) Schicht entsprechen und deren Abfall im Sinne des Fallens der Schicht weniger steil, über den Schichtkopf hinweg steiler ist. Die verunreinigten (getrübtm) Schichten bilden dagegen meist Vertiefungen. Diese Käme und Vertiefungen ordnen sich cañonartig um die

<sup>1</sup> E. RICHTER, Die Gletscherconferenz im August 1899. PETERMANN'S Mitth. 1900. Heft IV.

Antiklinalen und Synklinalen herum. Sie bilden solcherweise eine Art Ogiven an der Oberfläche; wo die Falten stärker ausgeprägt sind, sind die Ogiven spitz nach oben und unten ausgezogen, dort, wo die Bogen mehr flach liegen, mehr rundlich begrenzt. Die Ogiven, die sich um die Synklinalen schlingen, sind nach oben offen, schiessen also unter die hängenden Lagen ein, eine Folge der Thatsache, dass die Synklinalen und Antiklinalen durch die Ablation an der Gletscheroberfläche austreichen. Es wird für die Erscheinung der Name „Reid'sche Kämme“ vorgeschlagen<sup>1</sup>.“

RICHTER spricht von Lagen, „die wie Schichten aussehen“. Nach dem Eindruck, den ich gewann, gehe ich einen Schritt weiter und bezeichne die Lagen direct als schwach gefaltete Firnschichten. Aus dem Streichen der Falten in der Richtung des Gletschers ist auch hier auf einen Druck von den Ufern gegen die Gletschermitte zu schliessen, der sich wegen der Verengung des Bettes thatsächlich äussern muss, und zwar in der linken Hälfte des Gletschers mehr wie in der rechten, weil links die vom Gallenstock herabkommenden Zuflüsse den Druck steigern.

Meine am Marzell- und Vernagtferner gemachte Beobachtung, dass die Blätterung aus der Firnschichtung hervorgeht, steht mit einer Beobachtung, welche die Mitglieder der Gletscherconferenz am Rhône-Gletscher machten, in vollem Widerspruch. E. RICHTER schreibt in seinem Berichte über die letztere: „Bemerkenswerth ist, dass diese schichtenartigen Lagen“ (das sind jene, die von mir als gefaltete Firnschichten angesprochen werden) „mit der Blaublätterbänderung nichts zu thun haben. In mehreren Spalten am rothen Profil wurde beobachtet, dass die blauen Blätter die Lagen vertical durchsetzen.“ Es wurde also eine Beobachtung gemacht, die an jene von TYNDALL am Aletsch- und Furgge-Gletscher erinnert<sup>2</sup>. Ich besinne mich genau, dass am Rhône-Gletscher an der in

<sup>1</sup> H. F. REID machte auf die Erscheinung aufmerksam.

<sup>2</sup> JOHN TYNDALL, Die Gletscher der Alpen. Braunschweig 1898. p. 477—481. Mit RICHTER's eben ausgesprochener Äusserung habe ich mich zwar seiner Zeit durch die Unterschrift des aufgenommenen Protokolls selber einverstanden erklärt, doch habe ich auf Grund weiterer Beobachtungen meine damalige Anschauung aufgeben müssen.

Rede stehenden Stelle die Blaublätter eine grössere Anzahl Schichten ohne Unterbrechung durchsetzten und dass nicht alle Blaublätter bis hinauf zur Oberfläche reichten. Dieser Befund war für mich ein Räthsel, dessen Lösung ich später auf anderen Gletschern fand.

Auf der Firnfläche der Übergossenen Alm und des grossen Gurgler-Gletschers traf ich nämlich sehr zahlreiche, kreuz und quer verlaufende, sich gegenseitig durchschneidende, über die Firnfläche vorspringende Eisleisten, die bis zu mehreren Centimetern dick waren. Das Eis der Leisten war nicht wie nebenan das Firneis körnig, sondern es bestand aus horizontalen Stengeln, deren Längsaxen auf den Seiten der Leisten senkrecht stunden. In der Mitte jeder Leiste verlief in ihrer Längsrichtung eine Naht, nach welcher die Stengel von beiden Seiten her mit ihren Stirnflächen stumpf aneinander stiessen. Diese Structur beweist mit vollster Sicherheit, dass das Eis der Leisten Wassereis war. Ich räumte die oberflächliche Eisschicht ab, die durch den Thauprocess gelockert war, und deckte überall festes Eis auf, in dem weder Korn- noch Stengelstructur zu erkennen war. Dennoch drängte sich die Unterscheidung zweier Eisgattungen auf; denn unter der Leiste war das Eis klar und schön blau, zu beiden Seiten davon aber durch reichen Luftgehalt weisslich. Im blauen Eise lag wieder das Wassereis, im weisslichen das Firneis vor. Ich weiss keine andere Deutung zu geben, als die: Einst entstanden im Firneise enge verticale Klüfte, die sich mit Schmelzwasser füllten, das in ihnen gefror. Aus der Stellung der Krystallstengel senkrecht auf die Kluftwände und aus der Naht in der Mitte des Wassereises geht hervor, dass die Abkühlung des Wassers von den Kluftwänden her erfolgte. Das leistenförmige Vorspringen des Wassereises über die Firnoberfläche hat seinen Grund in der schwereren Schmelzbarkeit des klaren Wassereises gegenüber dem luftreichen, verunreinigten Firneise.

Würde an einer der Stellen, wo ich die eben beschriebene Beobachtung machte, eine weite Spalte aufreissen, so würden wir an den Spaltenwänden Firneis sehen, dessen Schichten von verticalen blauen Blättern durchsetzt sind, die aber mit den echten Blaublättern, bezw. mit der allgemeinen Blätterung



des Eises gar nichts zu schaffen haben. Wir hätten dieselbe Erscheinung vor uns, wie am Rhône-Gletscher beim rothen Profil. — Es fragt sich nur noch, wie es kam, dass am Rhône-Gletscher nicht alle falschen Blaublätter bis an die Oberfläche reichten. Das ist entweder möglich, weil sich die schmalen Klüfte nicht ganz mit Wasser gefüllt hatten und der obere leer gebliebene Theil zusammengepresst wurde, oder weil sich über dem ausgefüllten Spalt neue Firnschichten gelagert hatten.

Die am Rhône-Gletscher beim rothen Profil beobachtete Blaublätterung ist also auch keine echte Blätterung, und sie widerlegt nicht unsere durch unmittelbare Anschauung gewonnene Überzeugung, dass die echte Blätterung aus der Schichtung hervorgeht.

Von dieser Structuränderung konnten wir uns direct nur an der Oberfläche des Eisstromes überzeugen. Sie geht aber auch in den Tiefen vor sich; denn in den Zungen trifft man nirgends Schichtung, sondern überall Blätterung. Der Umstand, dass die Entstehung der Blätterung an eine Ortsveränderung des Eises gebunden ist, verräth den Zusammenhang zwischen der Umwandlung der Structur des Eises und seiner Bewegung. Wir wollen daher die Art der Eisbewegung kennen lernen.

Als treibende Kraft wird ganz allgemein die Schwerkraft anerkannt. Ferner wissen wir, dass sich das Eis an verschiedenen Punkten seiner Oberfläche und seiner Tiefen mit ungleicher Geschwindigkeit bewegt. Die Eisbewegung kann darum nicht im Rutschen der ganzen Masse auf dem Untergrund, sondern nur in einer gegenseitigen Verschiebung von Eistheilen bestehen. Eine solche Verschiebung kann vor sich gehen entweder von Molecül zu Molecül, oder von Molecülgruppe zu Molecülgruppe.

Würde die Bewegung stattfinden, indem sich jedes Molecül an seinen Nachbarn verschiebt, so würden alle jene Molecülgruppierungen, die sich im ruhenden Eise ausgebildet haben, wie die Krystallstructur und Schichtung, durch die Bewegung vollkommen vernichtet werden. Nun findet sich aber sowohl die Krystallstructur als auch die Schichtung, letztere freilich in Blätterung umgewandelt, überall in unseren Gletschern,

selbst im weitgewanderten Eise der grönländischen Eisströme. Wenigstens der Hauptsache nach ist also im Eise eine Verschiebung von Molecül zu Molecül ausgeschlossen.

Infolge ähnlicher Erwägungen ist wieder der Hauptsache nach auch eine Verschiebung von Krystall zu Krystall undenkbar; denn bestände darin das Wesen der Eisbewegung, dann würde wieder die Schichtung vollständig zerstört werden müssen und es könnten sich auch keine Theile der Schichten als Blätter erhalten. Die Erhaltung der Blätter ist demnach ein Beweis, dass sich diese als Ganzes fortbewegen, indem sie sich aneinander verschieben. Möglich ist das nur, wenn an den Schichtflächen bzw. Blattflächen der Zusammenhang des Eises gelöst oder doch gelockert wird. Und das geschieht.

FOREL und HAGENBACH, BLÜMCKE und HESS, sowie v. DRYGALSKI haben nämlich übereinstimmend beobachtet, dass mächtige Eislager unterhalb eines gewissen Abstandes von der Oberfläche constant die Schmelztemperatur besitzen. Nun ist bekannt, dass bei Erreichung dieser Temperatur der moleculare Zusammenhang an den Krystallgrenzen gelockert wird, und zwar ganz besonders, wo sich zwei Krystalle unmittelbar berühren. Weil längs den Schichtflächen die Krystalle durch eine Staublage getrennt sind, ist hier die Lockerung geringer als an den Krystallgrenzen innerhalb der Schichten. Doch dürfte dieser Unterschied dadurch ausgeglichen werden, dass der Staub Stoffe enthält, die durch ihre Löslichkeit im Wasser den Schmelzpunkt des Eises etwas herabdrücken.

Jede Firneisschichte rückt von Jahr zu Jahr tiefer unter die Oberfläche, wobei ihre Belastung wächst und ihre Schmelztemperatur sinkt. Der Zusammenhang der Krystalle wird daher loser und loser, ja schliesslich geht er durch Schmelzung einer äusserst dünnen Eisschichte gänzlich verloren, und in den untersten Partien des mächtig gewordenen Eislagers liegen dann die Krystalle zwar dicht, aber ganz ohne Zusammenhang neben- und übereinander. Wären keine Schichtflächen vorhanden, so könnten aber trotzdem im Eise noch immer keine Verschiebungen stattfinden; denn infolge des ganz unregelmässigen Verlaufes der Krystallgrenzen würde dann die Bewegungsrichtung, die ein Krystall mit Rücksicht auf den einen seiner Nachbarn einnehmen könnte, durch den

Widerstand des anderen Nachbarn unmöglich sein. Erst die Schichtflächen, welche durchlaufende, zu einander parallele Fluchten bilden, ermöglichen eine Verschiebung in der Weise, dass sich die Schichten als Ganzes infolge der Einwirkung der Schwerkraft in der Richtung des Fallens der Schichten übereinander hinwegschieben. Daraus erkennt man die Bedeutung des Staubes als Erhalter der Schichtflächen für die Art der Eisbewegung.

Ist einmal die Bewegung im Gange, so sind die Staublagen zur Erhaltung der Schichtflächen gar nicht mehr nöthig, da nun die anhaltende gegenseitige Verschiebung der Schichten das Hinüberwachsen eines Krystalls einer Schichte in die andere verhindert. Zweifelsohne verschwindet auch ein Theil des Staubes während der Bewegung von den Schichtflächen, indem er zwischen die an die Schichtflächen grenzenden Krystalle eindringt.

Damit das Gleiten der Schichten beginnen kann, ist die vollständige Lösung des Zusammenhanges längs den Schichtflächen nicht unbedingt nöthig, sondern es genügt dort bereits die Lockerung des Gefüges. Die Verschiebung geht dann vor sich, ohne dass die Schichtflächen wirkliche Trennungsflächen im Eise bilden. Ich glaube diesen Vorgang am besten mit der von O. MÜGGE künstlich hervorgerufenen Translation zu vergleichen, bei welcher sich die Plättchen in einem Eiskrystall aneinander verschieben, ohne den gegenseitigen Zusammenhang zu verlieren.

Die Fähigkeit, mit der sich jede Schichte auf der unter ihr liegenden verschieben kann, wird mit dem Grade der Lockerung des Gefüges an der Schichtfläche grösser, und da dieser Grad vom Drucke, also von der Mächtigkeit des darüber lagernden Eises abhängt, nimmt die Bewegungsfähigkeit des Eises von oben nach unten, von einer Schichte zur anderen zu.

Die Geschwindigkeit, mit welcher sich eine Schichte über anderen fortbewegt, nennen wir relative Geschwindigkeit. Sie ist der Bewegungsfähigkeit jeder Schichte proportional. Und da die obersten Schichten wegen des geringen Verticaldruckes, dem sie ausgesetzt sind, nahezu keine eigene Bewegungsfähigkeit besitzen, ist auch ihre relative Geschwindig-

keit fast gleich Null. Das heisst, die obersten Schichten verschieben sich gegenseitig am wenigsten, sie verhalten sich insgesamt mehr wie eine starre Haut, welche den beweglicheren Körper überspannt.

Ausser der relativen Geschwindigkeit kommt jeder Schichte noch jene Geschwindigkeit zu, die ihr die liegende Schichte überträgt. Bezeichnen wir die relativen Geschwindigkeiten der Schichten von unten nach oben mit  $g_1, g_2, \dots, g_n$ , wobei  $g_1 > g_2 > \dots > g_n$  ist, so sind, wenn wir von der Reibung der Schichten an den Seitenwänden des Firnbeckens u. s. w. absehen, die absoluten Geschwindigkeiten der Schichten, wieder von unten nach oben:  $g_1, (g_1 + g_2), \dots, (g_1 + g_2 + \dots + g_n)$ . Wir sehen: die absolute Geschwindigkeit wächst von einer Schicht zur anderen mit der Entfernung vom Untergrunde; doch schwächt sich die Geschwindigkeitszunahme bis nahezu auf Null ab. Es nimmt daher die absolute Geschwindigkeit nach oben nicht in dem Maasse zu, wie man auf den ersten Blick aus vorstehender Formel zu schliessen geneigt ist, und die obersten Schichten, welche wir als Haut bezeichneten, schwimmen fast ganz passiv auf den unteren.

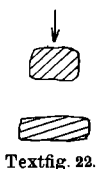
Die relative, somit auch die absolute Geschwindigkeit jeder Schichte wird nebst dem Drucke durch die Neigung der Schichtflächen bestimmt. Je grösser die Neigung, um so grösser ist die Geschwindigkeit.

An manchen Stellen des Firnfeldes bleibt der Schnee in mächtigeren Schichten liegen als an anderen. Ausserdem ist die Neigung des Firnbeckengrundes, also auch der Schichten, nicht überall die gleiche. Beides bringt mit sich, dass die Bewegungsfähigkeit ein und derselben Schichte verschiedenen Orts ungleich gross ist. Ein und dieselbe Firneisschichte wird sich daher nicht überall zur selben Zeit in Bewegung versetzen, und bewegt, nicht überall dieselbe absolute Geschwindigkeit haben. Das führt zu Störungen der regelmässigen Firnschichtung, die besonderer Art sind, je nachdem der schneller bewegte Theil des Eises vor oder hinter dem langsamer bewegten ist.

Im ersten Falle erleidet jede Schichte einen Zug, der in der verhältnissmässig starren Haut das Aufreissen einer Spalte verursacht, die, unbekümmert um die Korngrenzen, senkrecht

zur Zugrichtung verläuft. Die tiefer liegenden Schichten reissen jedoch nicht ab, sondern sie werden gestreckt, indem da die Krystalle wegen ihres losen Zusammenhanges auseinander-rücken. Es würden sich so an den Korngrenzen, welche auf der Zugrichtung annähernd senkrecht stehen, schmale, luft-leere Räume bilden, würde nicht im Moment ihres Entstehens in dieselben von den horizontalen Korngrenzen, welche dem Verticaldruck in unveränderter Stärke ausgesetzt bleiben, das dort vorhandene Druckschmelzwasser gepresst werden<sup>1</sup>. Das eingepresste Wasser steht unter schwächerem Druck. Es gefriert darum sofort und durch Ankrystallisiren vergrössert es die horizontale Dimension der Krystalle, während deren Höhe abnimmt. Nach H. J. VAN'T HOFF<sup>2</sup> hat das Entweichen des Druckschmelzwassers eine leichtere Schmelzbarkeit des Eises zur Folge. Durch Neuschmelzung entsteht darum an den horizontalen Korngrenzen stets wieder Schmelzwasser, solange an den verticalen Korngrenzen die Neigung zur Bildung offener Fugen vorhanden ist.

Die thatsächliche Öffnung solcher Fugen wird ausser durch das Einpressen von Druckschmelzwasser durch die Translationsfähigkeit der Eiskrystalle hintangehalten. Durch Druck sind nämlich, wie O. MÜGGE gezeigt hat<sup>3</sup>, die Plättchen, aus welchen jeder Eiskrystall besteht, aneinander verschiebbar. Der hierzu nöthige Raum wird in den Firnschichten durch die Tendenz der Körner, sich von einander zu entfernen, geschaffen. Indem die Plättchen in jedem Krystalle durch den Verticaldruck zum Übereinandergleiten gebracht werden, führen sie gleichzeitig eine kleine Drehung aus. Sie stellen sich mehr senkrecht zur Druckrichtung, also annähernd parallel zu den Schichtflächen. Die Krystalle verlieren auch auf diese Art an Höhe und gewinnen an Breite. Die Textfig. 22 zeigt ein Korn



Textfig. 22.

<sup>1</sup> Es handelt sich dabei um ausserordentlich geringe Mengen.

<sup>2</sup> v. DRYGALSKI, Grönland-Expedition. 1. Berlin 1897. p. 515. Fussnote.

<sup>3</sup> O. MÜGGE, Über die Plasticität der Eiskrystalle. Nachr. d. k. Ges. d. Wissensch. zu Göttingen. Math.-physik. Cl. 1895. Heft 2. — Weitere Versuche über die Translationsfähigkeit des Eises, nebst Bemerkungen über die Bedeutung der Structur des grönländischen Inlandeises. Dies. Jahrb. 1900. II. 80.

vor und nach erfolgter Translation im Verticalschnitt. Der Pfeil giebt die Druckrichtung an, und die Schraffen zeigen, wie sich die Lage der Plättchen ändert. Die v. DRYGALSKI'sche Beobachtung<sup>1</sup>; derzufolge die Krystalle der unteren Schichten plattenförmige Gestalt haben und zu den Schichtflächen senkrecht orientirt sind, ist vielleicht damit in Einklang zu bringen<sup>2</sup>.

Mit der Höhe der einzelnen Krystalle vermindert sich auch die Dicke der Schichten. Wird letztere stellenweise gleich Null, so werden die Schichten in einzelne sich auskeilende Blätter zertheilt, die wie die Schichten zum Untergrund parallel liegen.

Im zweiten Falle, wenn die langsamer bewegte Eismasse vorne ist, drängt das beweglichere Eis nach und in jeder Schichte entsteht parallel zu den Schichtflächen ein sich steigernder Druck, der mit der Zeit den Verticaldruck an Grösse übertrifft. Die Druckschmelzung wird dann an den Korngrenzen, welche zum Horizontaldruck senkrecht stehen, bedeutender wie an den horizontalen Korngrenzen. Ich halte es daher für möglich, dass in diesem Falle Druckschmelzwasser von den verticalen zu den horizontalen Korngrenzen gepresst wird und dass sich die Plättchen in den Krystallen steiler aufstellen, wodurch sich die Höhe der Krystalle und die Dicke der Schichten vergrössert. Eine derartige Verdickung der Schichten kann jedoch nur erfolgen, wenn der Horizontalschub sehr langsam wächst und den Verticaldruck an Grösse nur um Weniges übertrifft. Sonst werden die unteren gelockerten Schichten zu Falten zusammengeschoben, die senkrecht zur Richtung des Horizontalschubes streichen.

An der Oberfläche des Firnes widersteht die starre Haut der Faltung fast ganz. Sie wird durch die gefalteten Eismassen, welche sich unter ihr sammeln, aufgetrieben, und es entstehen in ihr jene zahlreichen Berstungsklüfte, die sich nach allen Richtungen durchschneiden und von denen ich mit Wassereis ausgefüllte im Firngebiete der Übergossenen Alm und des grossen Gurglerferners gesehen habe.

Das Eis staut sich unter der Haut so lange, bis sein Druck hinreicht, das vorliegende Hinderniss zum Weichen zu bringen.

<sup>1</sup> E. v. DRYGALSKI, Grönland-Expedition. 1. 483 u. 494.

<sup>2</sup> Man sehe hierüber auch O. MÜGGE, Über die Structur u. s. w. p. 129 und 130.

Indem die gestauchte Masse nachrückt, kippen die aufgerichteten Falten wegen der grösseren Geschwindigkeit in den höheren Lagen nach vorne über und legen sich parallel zum Boden. In dieser Lage werden die Schichtsättel und Mulden durch die nun folgende Streckung vollständig ausgewalzt. Das Endergebniss ist also auch in diesem Falle eine Zertheilung der Schichten in zum Boden parallel liegende Blätter<sup>1</sup>. Nur an der Oberfläche, in der Haut, bleibt in beiden Fällen die Schichtung nahezu unversehrt erhalten.

Für die Bewegung des geblätternen Eises gelten dieselben Gesetze wie für das geschichtete. Die Blätter können wieder gefaltet und ausgewalzt, folglich weiters zerkleinert werden.

Indem das Eis thalab rückt, gelangt es dahin, wo sich das Firnbecken trichterförmig verengt und in die Rinne übergeht, in der die Zunge liegt. Im Trichter hat der Untergrund ausser dem Gefälle in der Thalrichtung ein solches gegen die Trichteraxe. Die Blätter, welche immer noch zum Untergrund parallel sind, nehmen daher die diesen Gefällen entsprechenden Bewegungsrichtungen an. Indem sie übereinander hinweggleiten, rücken sie nicht nur thalab, sondern auch von beiden Seiten gegen die Trichteraxe. Die beiden letzteren entgegengesetzt gerichteten Bewegungen und der durch die zunehmende Verengung des Abflussprofils wachsende seitliche Druck verursachen, dass die Blätter abermals zu Falten zusammengeschoben werden, welche wieder senkrecht zur Druckrichtung, also diesmal parallel zur thalwärts gerichteten Hauptbewegung streichen. Entsprechend dem grössten Druck in der Axe des Trichters sind dort die Falten am steilsten, nämlich vertical aufgerichtet. Gegen beide Ufer nimmt der Druck ab. Die Falten liegen daher gegen die Ufer hin flacher, und ganz an den Ufern findet überhaupt keine Faltung statt, sondern da bleiben die Blätter dem Untergrund vollkommen aufliegen.

---

<sup>1</sup> Nur wenige Tage vor Erhalt der Correcturbögen dieser Arbeit überschritt ich am 8. September 1903 den Grüblferner in der Stubai-Gruppe. Rechts vom Wege, der von der Nürnbergerhütte auf den Wilden Freiger führt, bricht das Eis jäh über einer Felswand ab, welche in der Hauptbewegungsrichtung des Eises verläuft. Die Abbruchfläche des Eises stellt demnach einen Längsschnitt durch das bewegte Eis vor. An ihr waren in der Nähe des Untergrundes die oben beschriebenen liegenden Falten sehr schön zu sehen.

So entsteht eine im Trichterquerschnitte erkennbare fächerförmige Anordnung, die erhalten bleibt, auch nachdem die Falten durch Auswalgung der Sättel und Mulden in kleinere Blätter zertheilt worden sind. Man hat sich diese Faltung ganz im Kleinen vor sich gehend zu denken, indem sozusagen jedes einzelne Blatt für sich zu einer oder auch mehreren Falten zusammengeschoben wird. Es wäre irrig, würde man sich Falten vorstellen, die vom Grunde des Trichters bis an die Eisoberfläche reichen, sondern es liegt oder vielmehr steht eine grosse Anzahl kleiner, flach zusammengepresster Falten übereinander, die aber doch wieder eine einheitliche Anordnung besitzen, so dass die Faltenschenkel im Trichterquerschnitte wie die Theile eines einzigen grossen ausgebreiteten Fächers gerichtet sind.

Von der fächerförmigen Anordnung der Blätter ist auf der Oberfläche des Trichters oft nichts zu sehen, weil da die starre Haut so viel Widerstand leistet, dass in ihr nur eine schwache Faltung, wie sie am Rhône-Gletscher beobachtet wurde, entsteht. Die in Textfig. 19 (p. 96) gezeichnete fächerförmige Blätterstructur kommt darum erst weiter thalab und zwar gewöhnlich ziemlich unvermittelt zum Vorschein, wo die nur schwach gefaltete Haut bereits gänzlich abgeschmolzen ist.

Wenn, wie beim Marzellferner, die Haut im Trichter durch einen grösseren Gefällsbruch in viele Platten und Prismen aufgelöst wird, dann kommt unterhalb des Bruches in der Haut keine solch regelmässige Faltung zu Stande wie am Rhône-Gletscher. Denn wengleich sich die Klüfte gleich wieder unterhalb des Bruches schliessen, so ist die Haut doch von vielen, durch eingewehten und eingeschwemmten Staub unreinigten Kluftflächen durchzogen, längs welchen ebenso wie an den Schichtflächen Verschiebungen stattfinden. In einer solchen Haut ist daher die Beweglichkeit grösser, und es findet in jeder Platte und in jedem Prisma, völlig unabhängig vom Nachbarn, die Aufrichtung der Schichten, bezw. die Umwandlung der Schichtung in Blätterung statt. Nur bei solcher Zertheilung der Haut kann man die Entstehung der Blätterung sozusagen Schritt für Schritt verfolgen.

Aus dem Trichter gelangt das Eis in die eigentliche Thalrinne mit ziemlich constantem Querprofil. Beim Eintritt



in die Rinne streichen alle Blätter parallel zur Bewegungsrichtung. Sie können somit ungehindert über- und nebeneinander gleiten und es liegt also kein Grund vor, weshalb die gewonnene fächerförmige Anordnung gestört werden sollte. Letztere bleibt daher in der ganzen Zunge erhalten.

Nur am Zungenende stationärer Gletscher stellen sich die Blätter anders, indem sie die schon beschriebene löffelförmige Anordnung annehmen. Es ist nämlich das Bett für das durch die Abschmelzung schmal gewordene Ende zu breit geworden. Das Eis hat demnach Raum, sich auch seitlich auszubreiten, und darum fliesst es am Zungenende radial auseinander. Diesen neuen Bewegungsrichtungen steht die fächerförmige Anordnung der Blätter hindernd im Wege. Die Blätter legen sich daher in den Bewegungsrichtungen nach aussen, also gegen den Umfang der Zunge um, wobei die untersten flach auf die Thalsohle zu liegen kommen. Die anderen Blätter kämen parallel darauf zu lagern, würde nicht die Mächtigkeit, somit auch die Bewegungsfähigkeit und Geschwindigkeit des Eises gegen den Zungenrand kleiner werden. Wir haben also hier wieder den Fall, dass die vorderen Eispartien die langsamer bewegten sind. Da die Geschwindigkeitsabnahme eine langsame ist, hat das zur Folge, dass von einer gewissen Stelle an der Horizontalschub um Weniges grösser als der Verticaldruck ist. Es wird somit, von dieser Stelle angefangen, das Druckschmelzwasser, das an den verticalen zum Schub senkrecht stehenden Korngrenzen entsteht, zwischen die horizontalen Korngrenzen gepresst, wo der schwächere Verticaldruck herrscht<sup>1</sup>. Ebenso, wie es schon bei der Firneisschichtung erwähnt wurde, werden nun im Zungenende die Blätter verdickt. Einen je längeren Weg ein Blatt unter dem horizontalen Überdruck zurückgelegt hat, um so grösser ist der Betrag seiner Verdickung. Darum sind im Zungenende die vorderen Blätter und die vorderen Theile der Blätter relativ dicker wie die rückwärtigen, und das bedingt eben das Ansteigen der Blätter gegen das Gletscherende, oder, was dasselbe ist, ihr Einfallen gletscherwärts, wie es in der Textfig. 21 (p. 97) angedeutet ist.

<sup>1</sup> Ich wiederhole, dass es sich jeweils um sehr kleine Wassermengen handelt.

Wenn zwei gletschererfüllte Thäler sich vereinigen, so thun die darin gebetteten Gletscher das Gleiche. Sie bilden dann einen zusammengesetzten Gletscher. Von der ersten



Textfig. 23.



Textfig. 24.



Textfig. 25.



Textfig. 26.

Stelle des Zusammentreffens bis zur vollständigen Vereinigung beider Gletscher üben diese gegeneinander einen Druck aus, durch welchen ihre Blätter nach und nach in der Art aufgerichtet werden, wie es die Textfig. 23—26 der Reihe nach zeigen. Im vereinigten Strome (Textfig. 26) giebt es demnach nicht zwei Systeme von Blätterfächern, sondern, wie in einem einfachen Gletscher, nur ein einziges. Durch die Überquerung zahlreicher zusammengesetzter Gletscher, sowie besonders durch die Besichtigung des

Endes des Marzell-Schalf-Ferners habe ich mich davon auf das Bestimmteste überzeugt. Trotz der Vereinigung zu einem



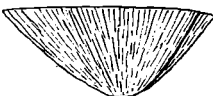
Textfig. 27.



Textfig. 28.



Textfig. 29.



Textfig. 30.

einheitlichen Fächer vermengen sich, was auch aus den Textfig. 23—26 hervorgeht, die Eismassen der Zuflüsse nicht, sondern sie bleiben durch eine scharf und ununterbrochen verlaufende Naht, die mit dem Gesteinsmaterial der Innenmoräne gespickt ist, geschieden. In den eben angeführten Figuren ist die Naht, bezw. die Innenmoräne kräftiger ausgezogen.

Bei gleicher Grösse der Zuflüsse verläuft die Naht in der Mitte des vereinigten Eisstromes und ihre Ebene ist vertical. Ist jedoch der eine Zufluss schwächer, so liegt die Naht der Seite dieses Zuflusses näher und sie neigt sich mehr und mehr dahin (Textfig. 27—30). Das habe ich gesehen, als ich die Innenmoräne zwischen dem Hintereis- und Kesselwandferner verfolgte.

Zum Schlusse sei der Geschwindigkeitsvertheilung auf der Oberfläche des Firnfeldes und der Gletscherzunge gedacht. Da die absolute Geschwindigkeit des Eises vom Boden vertical aufwärts von einer Schichte bezw. einem Blatt zum anderen wächst, und da in mächtigeren Eislagern schon die untersten Schichten einen höheren Grad von Beweglichkeit besitzen wie die in weniger mächtigen Lagern, so wird sich die Eisoberfläche im Firnfeld unter sonst gleichen Umständen über den mächtigsten Stellen am raschesten bewegen. Diese Folgerung ist auf die Zunge nicht ohne Weiteres übertragbar, weil wegen der fächerförmigen Anordnung der Blätter gerade im mächtigsten Eise die Blätter aufrecht stehen, wodurch dort die Zahl der vertical übereinanderbefindlichen Blätter stark vermindert wird. Trotz des letzteren Umstandes haben die direct vorgenommenen Geschwindigkeitsmessungen ohne Ausnahme ergeben, dass die Geschwindigkeit auch auf der Zungenoberfläche am grössten ist, wo der Eisstrom die grösste Tiefe hat. Das kommt wohl daher, weil die Verzögerung, welche eine Folge der geringeren Blätterzahl ist, durch die grössere Bewegungsfähigkeit der untersten Blätter an den tiefsten Stellen und dadurch aufgewogen wird, dass in der Zunge wegen der schrägen Stellung der Blätter die Geschwindigkeit nicht nur vertical nach aufwärts, sondern z. Th. auch nach einwärts gegen die Mitte des Eisstromes übertragen wird. Weil endlich im zusammengesetzten Gletscher die Anordnung der Blätter die gleiche wie im einfachen ist, überrascht es nicht, dass die Oberflächengeschwindigkeit im zusammengesetzten Gletscher genau wie im einfachen von den Ufern gegen die Mitte des Eisstromes ununterbrochen zunimmt, dass also im zusammengesetzten Gletscher keine Geschwindigkeitsabnahme bei Annäherung an die ausapernde Innenmoräne zu beobachten ist.

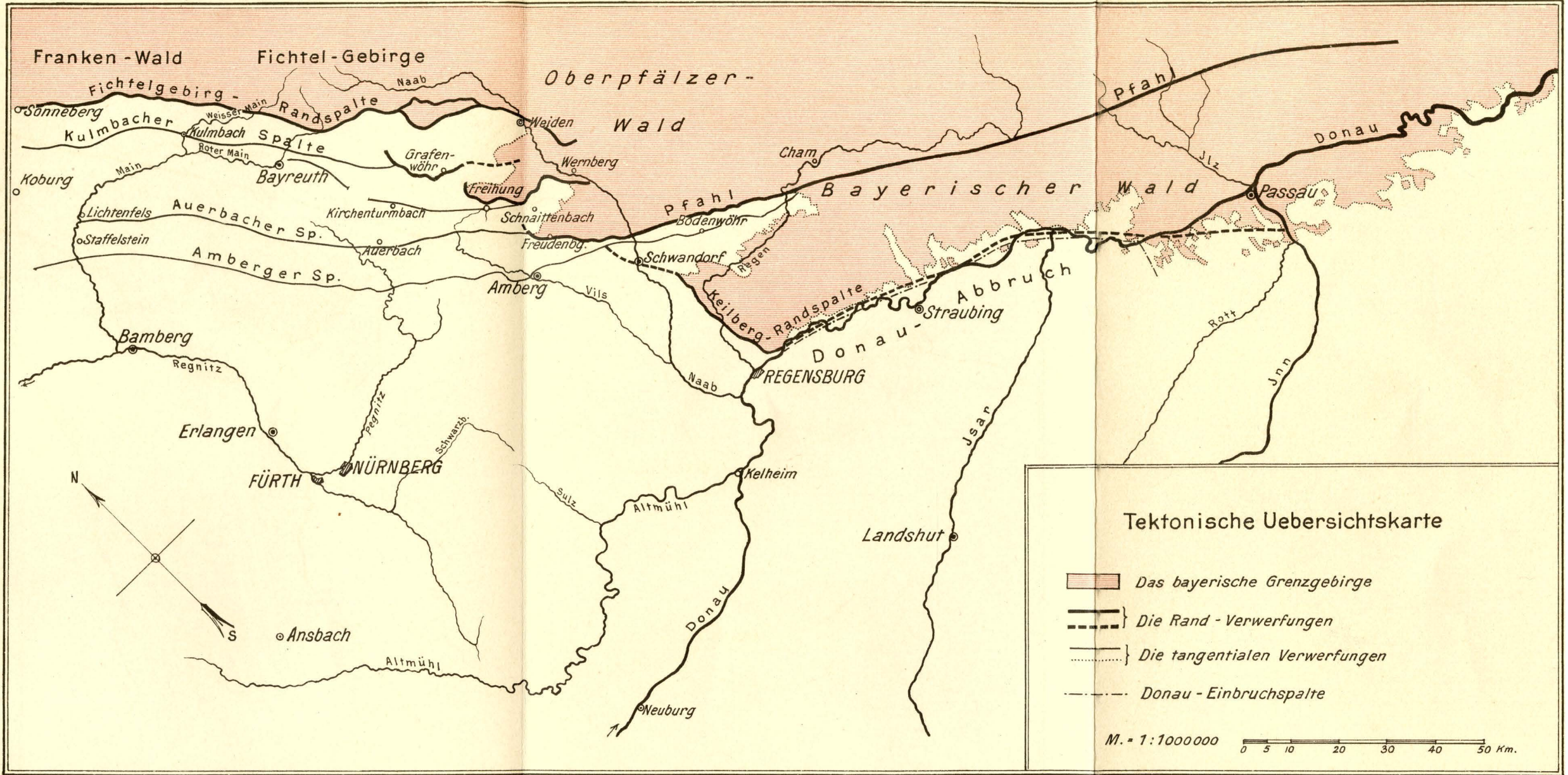
Meine Anschauung über die Gletscherbewegung kurz zusammengefasst lautet: Im Firnfeld wird die Bewegung durch die Lockerung des Gefüges längs den Schichtflächen des Firneises eingeleitet. Der Schwerkraft folgend gleiten die Firnschichten übereinander hinweg zu Thal. Durch Faltung und Auswalzung werden die Schichten in Blätter zertheilt, die sich stets in die Bewegungsrichtung und senkrecht zur Druck-

richtung des Eises stellen. Aus dem geschichteten Eise wird geblättert. Im letzteren besteht die Bewegung in der gegenseitigen Verschiebung der Blätter. Ausser der Verschiebung der Schichten und Blätter spielen hinsichtlich der Eisbewegung die Ortsveränderung des Druckschmelzwassers und die Translation nur untergeordnete Rollen. Die Druckschmelzung hat aber insoferne eine hervorragende Bedeutung, als mit ihr die Beweglichkeit der Schichten und Blätter erhöht wird. Die Kornstructure des Eises, insbesondere die Schichtung, sind für die Art der Eisbewegung bestimmend.

## Erklärung zur Tafel VI.

### Abdrücke vom thauenden Eise.

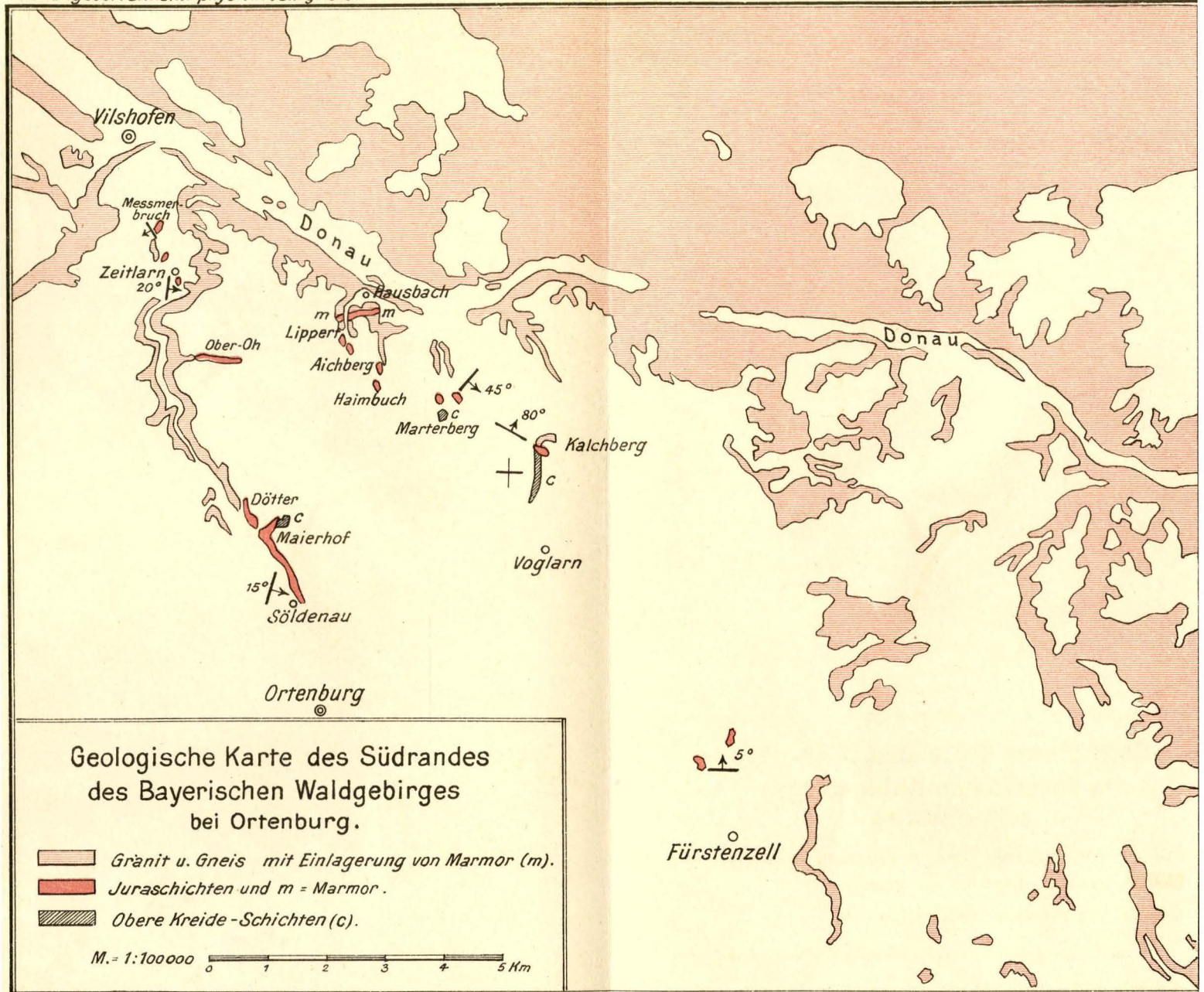
- Fig. 1. Verticalbruch durch eine 16 cm dicke Seeeisscholle. a b, c d sind Horizonte mit eingefrorenen Luftblasen.
- „ 2. Verticalbruch durch einen geschichteten Stalagmiten.
- „ 3. Draufsicht auf den Scheitel eines Stalagmiten, aus dem ein Stück herausgeschlagen wurde.
- „ 4. Sich nach oben verdickende, gekrümmte Krystalle aus einem Stalagmiten.
- „ 5. Draufsicht auf den Scheitel eines Stalagmiten mit stengelförmigen Krystallen.
- „ 6. Seitenfläche eines Stalagmiten mit radial gestellten, plattenförmigen Krystallen. (Man bringe diese Figur durch Drehen um  $180^\circ$  in die richtige Lage.)



Tektonische Uebersichtskarte

- Das bayerische Grenzgebirge
- Die Rand-Verwerfungen
- Die tangentialen Verwerfungen
- Donau-Einbruchspalte

M. = 1:1000000 0 5 10 20 30 40 50 Km.



Geologische Karte des Südrandes  
des Bayerischen Waldgebirges  
bei Ortenburg.

- Granit u. Gneis mit Einlagerung von Marmor (m).*
- Juraschichten und m = Marmor.*
- Obere Kreide-Schichten (c).*

M. = 1:100000 
0
1
2
3
4
5 Km