

ÜBER DIE PARALLELSTRUKTUR DES GLETSCHEREISES

Von Prof. Dr Axel HAMBERG (Uppsala)

Die Frage der Entstehung der Parallelstruktur des Gletschereises ist eine bald hundertjährige Streitfrage, die ihre Lösung noch nicht gefunden hat. Die für die Kongressvorträge knapp bemessene Zeit gestattet nun aber nicht, eine Uebersicht der älteren hierher gehörigen Anschauungen zu liefern, sondern muss ich mich darauf beschränken, diejenigen kurz zu erwähnen, die für die vorliegende Diskussion der Frage von Belang sind ¹.

Die Mehrzahl der jetzt lebenden Gletscherforscher scheinen sich der Ansicht von *Agassiz* angeschlossen zu haben, nach welcher die Parallelstruktur des Gletschereises nur die erhaltene Schichtung des Schnees wäre. Die steile oder beinahe vertikale Stellung der Strukturflächen einer alpinen Gletscherzunge wird nach dieser Anschauung meist durch Annahme einer mit dem Talboden konformen, synklinalen Biegung der Schichten erklärt.

Gegen diese Auffassung hat Prof. *H. Crammer* in letzter Zeit ² unter anderem den wichtigen Einwand erhoben, dass, wenn die Schichten in dieser der Form des Zungenbettes entsprechenden Weise gebogen werden, es unerklärlich ist, warum die mittleren Synklinale so stark abschmolzen, dass nur ein geringer Teil übrig geblieben, während von den seitlichen Schichten viel mehr

¹ Eine ausführliche Darstellung des hier behandelten Themas wird in dem Werke *Naturwissenschaftliche Untersuchungen des Sarekgebirges in Schwedisch-Lappland*, geleitet von Dr A. Hamberg, Bd. I, Abt. 3, erscheinen.

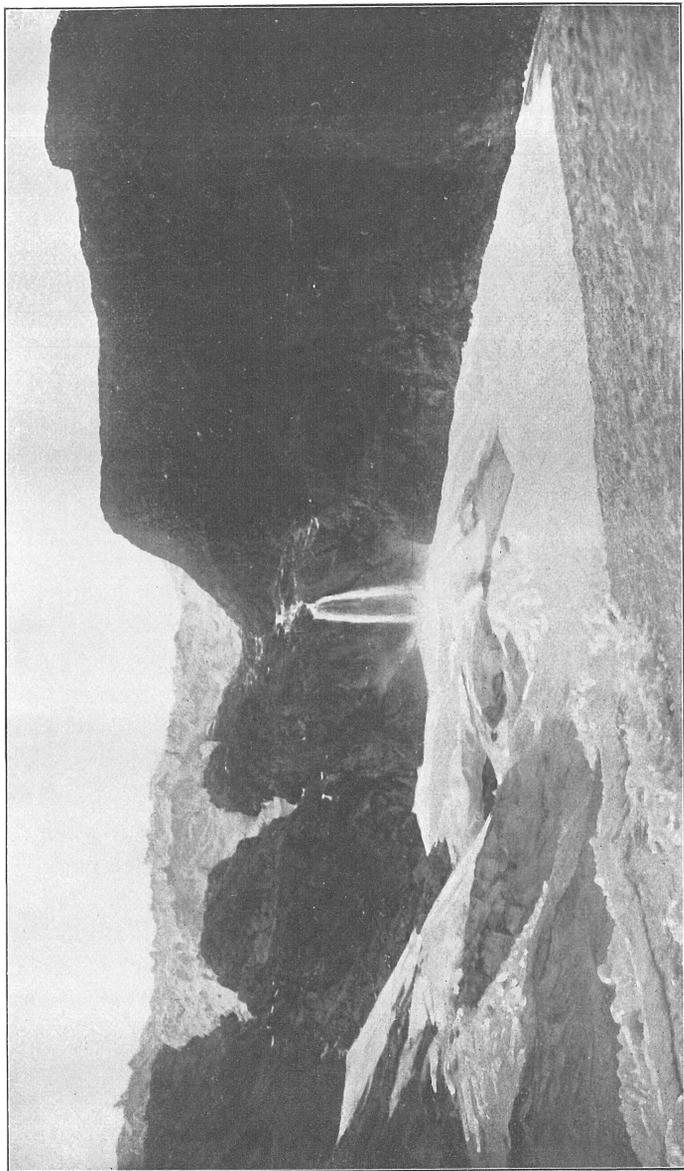
² Zur Entstehung der Blätterstruktur der Gletscher aus der Firnschichtung. — *Zeitschr. f. Gletscherkunde*, Bd. II, 1908, S. 198.

erhalten ist. Auf seine Beobachtungen auf dem der Venedigergruppe angehörenden Obersulzbachgletscher gründet Crammer nun eine andere Theorie, die insofern mit derjenigen von Agassiz übereinstimmt, als beide die fragliche Parallelstruktur als eine ursprünglich im Akkumulationsgebiete gebildete sedimentäre Parallelstruktur betrachten. In der Auffassung der tektonischen Orientierung der Strukturflächen liegt der Unterschied der beiden Theorien, indem Crammer meint, dass nicht eine einzige grosse, dem Tale ungefähr konforme Mulde entsteht, sondern eine grössere Anzahl kleiner Falten. Diese seien auf der Gletscheroberfläche an der Akkumulationsgrenze schwach, aber sowohl nach dem Gletscherboden, als nach dem Gletscherende zu immer spitzer und steiler ausgebildet worden. In genügendem Abstand unterhalb der Firngrenze bestehen — nach Crammer — die Falten aus lauter vertikal gestellten Schenkeln mit sehr scharfen Umbiegungen, die immer verwischer werden. In der Nähe des Ufers stehen die Falten-schenkel jedoch nicht vertikal, sondern verlaufen dem Boden ungefähr parallel.

Die Theorie von Crammer erinnert sehr an die früher von Prof. *H.-F. Reid* ausgesprochene Ansicht, insofern als die Crammer'schen Falten offenbar dasselbe sind, wie die sogen. « Reid'schen Kämme ».

Unter den jetzt lebenden Gletscherforschern sind nur wenige gegen die ziemlich allgemein angenommene Auffassung der Parallelstruktur des Gletschereises als eine durch Sedimentation entstandene Schichtung aufgetreten. Unter diesen ist vor allem Prof. *F.-A. Forel* zu nennen, der noch in den letzten Jahren sich gegen die herrschende Anschauung ausgesprochen hat. Einer andern Theorie hat sich Prof. Forel aber — soviel ich weiss — nicht bestimmt angeschlossen. Es ist auch nicht klar, welche Theorie anzunehmen wäre, wenn diejenige von der sedimentären Entstehungsweise der Gletscherstruktur sich als falsch erweisen sollte.

Während meiner vieljährigen Untersuchungen im Sarekgebirge in Schwedisch-Lappland, die in erster Linie den dortigen Gletschern gewidmet waren, habe ich zahlreiche Beobachtungen über die Gletscherstruktur angestellt. Diese wurden



Die konglomeratische Struktur und die stromartige Ausbreitung der Eislawinen, die vom oberen Teil des Suphellebries auf den unteren herunterstürzen

VERF. PHOT. 2-10-1905

aber auch ergänzt durch Beobachtungen auf Gletschern in Norwegen und auf Spitzbergen.

Eine nicht unwichtige Rolle im Streite über die Entstehung der Parallelstruktur des Gletschereises haben die sogen. regenerierten Gletscher gespielt. Bekanntlich kommt in denselben eine ähnliche Struktur vor wie in gewöhnlichen Gletschern. Schon *Forbes*, *Tyndall* u. a. ältere Gletscherforscher sahen in den regenerierten Gletschern einen wichtigen Beweis gegen die Annahme einer sedimentären Entstehung der Parallelstruktur. Einige moderne Gletscherforscher, wie *Reid* und *Rekstad*, erklären aber die in regenerierten Gletschern auftretende Struktur dadurch, dass sie ein vollständiges Pulverisieren der herabstürzenden Eismassen und eine gleichmässige Ausbreitung des Eispulvers über die untere Abteilung in regelmässigen Schichten annehmen. Eine eingehende Untersuchung über die Bildungsweise dieser Gletscher und ihre Struktur hat jedoch noch nicht stattgefunden.

Da es mir unwahrscheinlich vorkam, dass das vom oberen Teil auf den unteren Teil herabstürzende Material so regelmässig verteilt werden sollte, wie es Reid und Rekstad annehmen, und da ferner, falls das Material der Eislawinen unregelmässig verteilt wird, trotzdem aber eine regelmässige Parallelstruktur entsteht, hierin ein Beweis grösster Tragweite liegen musste, so habe ich die Verhältnisse auf einem der besten regenerierten Gletscher in Europa, nämlich auf dem Suphellebræ in Norwegen, näher in Augenschein genommen.

Ich fand dabei folgendes (vergl. Taf. XXII) :

1. Die herabstürzenden Eismassen werden keineswegs so vollständig pulverisiert, wie Reid und Rekstad es annehmen, sondern in grössere und kleinere Stücke zerstoßen, deren Durchmesser zwischen etwa einem Meter und sehr geringen Dimensionen schwankt.

2. Diese Masse von ungleichförmigen und sehr verschieden grossen Stücken breitet sich nicht gleichmässig über die Oberfläche des regenerierten Gletschers aus, sondern fliesst meist in langen, schmalen, ein oder mehrere Meter dicken Strömen, die der grössten Neigung folgen. Dabei kommen die Eisstücke in eine rollende Bewegung und werden stark abgerundet.

Wenn man, wie Agassiz, Reid und Crammer, annimmt, dass die Gletscherbewegung keinen Einfluss auf die Struktur des Eises, sondern nur auf die tektonische Form und Lage der Schichten ausübt, dann müsste man erwarten, in dem Eise des regenerierten Gletschers keine Parallelstruktur, sondern die Spuren der über einander gehäuften unregelmässigen und dicken Ströme einer konglomeratartigen Masse zu finden.

Statt dessen findet man aber tatsächlich, obgleich der regenerierte Teil des Suphellebræs nur etwa 1 km. lang ist, eine gute Parallelstruktur, in der jedoch mitunter flachgedrückte Linsen, sicherlich frühere Eiskugeln, unterschieden werden können. Hieraus folgt, dass sich die Parallelstruktur des Gletschereises *unabhängig* von der Sedimentation entwickelt.

Auf gewöhnlichen Gletschern im Sarekgebiete in Schwedisch-Lapland und auf Spitzbergen habe ich aber auch zahlreiche Beweise für die Unabhängigkeit der Parallelstruktur des Eises von der Schichtung des Schnees finden können.

Einen allmählichen Uebergang zwischen der Schichtung des Schnees und der Blätterung des Gletschereises, wie Reid und Crammer sie beschreiben, findet man im allgemeinen nicht. Vielmehr tritt im allgemeinen unmittelbar an der Schneegrenze die Parallelstruktur des Eises häufig *viel ausgeprägter* und mit einer *ganz anderen Orientierung* auf als die Schichtung des Schnees (Taf. XXIII). Letztere ist horizontal orientiert, erstere bildet meist Mulden mit vertikal stehenden Schenkeln. Die Bildung der Mulden kann nicht auf Faltung beruhen, denn eine solche würde sich auch in der Oberfläche an der Firnlinie geltend machen. Die muldenförmige Anordnung der Strukturflächen des Eises tritt in den Talgletschern stets auf, auch wenn eine Verengung des Tales nicht vorkommt, sondern dieses ungefähr rektangulär geformt ist (Taf. XXIII).

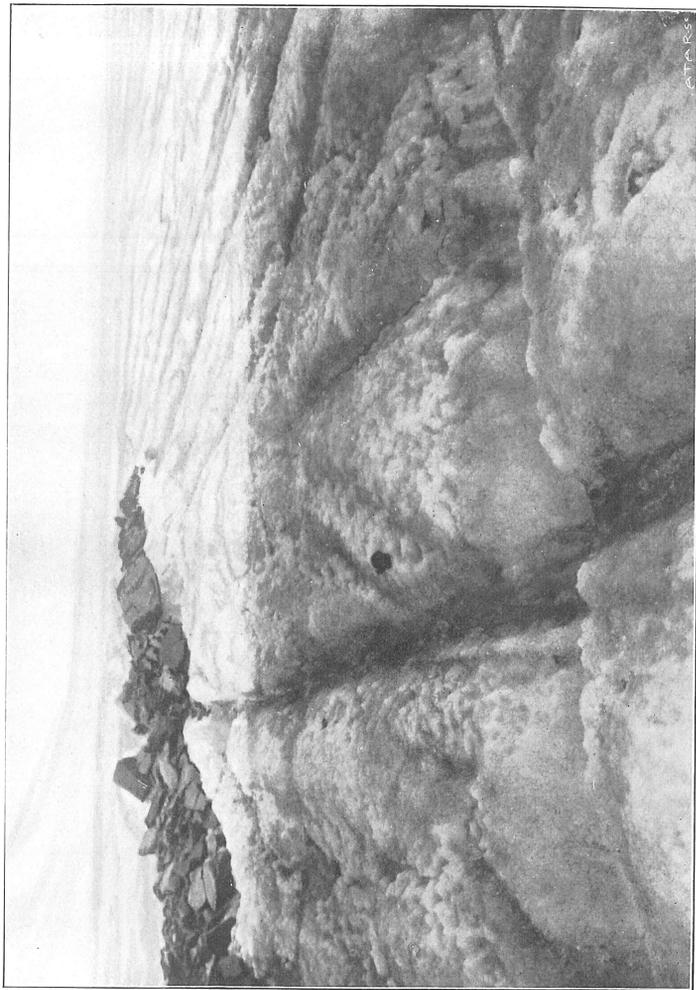
Ferner findet man bei aufmerksamer Begehung einer Gletscheroberfläche nicht selten im Eise einander kreuzende Parallelstrukturen. Ja, man findet nicht nur zwei Systeme sich kreuzender Strukturflächen, sondern mitunter mehrere (Taf. XXIV).

Es scheint mir zweifellos, dass diese Strukturen, die offenbar nichts mit der Sedimentation zu tun haben, durch den Druck und die Bewegung der Eismassen zu Stande gekommen sind.



Die muldenförmige Anordnung der Strukturflächen des Eises tritt schon an der Schneegrenze auf, ohne dass eine entsprechende Biegung der Schneeschichten vorkommt. Kleiner, seiner ganzen Länge nach gleich breiter Gletscher am Sobbeijätko, Sarekebirge, Schwedisch-Lappland

VERF. PHOT. 19-8-1896



Mehrere Systeme sich kreuzender Parallelstrukturen nebst Diskordanz zwischen ihnen und der hervorquellenden Innenmoräne auf den Mikkglacieren, Schwedisch-Lappland

VERF. PHOT. AUG. 1907

Der Vergleich mit der Verschieferung der Eruptivgesteine liegt nahe, bei näherer Betrachtung findet man aber leicht, dass zwischen der Struktur der kristallinen Schiefer und der Parallelstruktur des Eises ein wesentlicher Unterschied vorliegt.

In den kristallinen Schiefen besteht die Parallelstruktur darin, dass tafelförmige und prismatische Minerale einander etwa parallel orientiert sind. Das Gletschereis enthält aber keine tafelförmigen oder prismatischen Kristalle, sondern nur rundliche Eiskörner und rundliche Luftblasen. Im Eise besteht die Parallelstruktur hauptsächlich aus einander parallelen, mehr oder weniger wieder verkitteten Sprüngen, nach welchen kleine Verschiebungen stattgefunden haben. Diese Sprünge sind deshalb häufig mit sehr feinkörnigem Eise gefüllt, das sicherlich Quetschzonen darstellt, die beim Gleiten zweier Eisflächen gegen einander entstanden sind. Nach Verwitterung solchen feinkörnigen Eises erscheint es wie weisser, feinkörniger Schnee, der in schmalen Streifen das dunklere grobkörnige Eis durchsetzt (Taf. XXV).

Die muldenförmige Anordnung der Parallelstruktur des Gletschereises beruht also keineswegs — meiner Meinung nach — auf einer im Eisstrom stattfindenden Faltung der ursprünglichen Schneeschichten, sondern darauf, dass Gleitflächen sich ausbilden, die diese Muldenform haben. Diese Theorie ist übrigens zum grossen Teil nicht neu, sondern stimmt mit Anschauungen überein, die schon von dem Engländer Forbes Mitte des vorigen Jahrhunderts ausgesprochen sind.

Die Entstehung dieser muldenförmigen Gleitflächen darf man sich in folgender Weise denken :

In einer Eismasse kommt überall wegen der Schwere ein vertikaler Druck vor, der um so grösser ist, je grösser die Tiefe ist. Wenn die Oberfläche des Eises sich neigt, entsteht eine Druckkomponente, welche in der Richtung der Neigung wirkt. Diese strebt darnach, das Eis nach unten ins Tal zu treiben, die Reibung gegen die Unterlage leistet aber einen grossen Widerstand; deshalb wird das Eis nach Flächen zerbrochen, die dem verzögernden Element, also dem Untergrund des Gletschers, einigermassen parallel laufen.

Diese Gleitflächen sind aber nicht nur von der Form des Untergrundes und der Richtung der Druckkomponente abhängig, sondern auch von der Richtung des geringsten Widerstandes. Wo verhältnismässig ebene Grenzen zwischen den Körnern vorhanden sind, da bildet sich eine Gleitfläche aus, wenn nur diese Grenzfläche einigermaßen mit der Richtung der Druckkomponente zusammenfällt. Deshalb dürften auch die Gleitflächen mit Vorliebe alten Schichtflächen folgen.

Ein schönes Beispiel dafür, dass die Gleitflächen nicht nur von der Richtung des Druckes, sondern auch von derjenigen des geringsten Widerstandes abhängen, sieht man am unteren Ende der Gletscher, wo die Gleitflächen schief nach oben gerichtet sind, weil der Widerstand in dieser Richtung viel geringer ist als in derjenigen des Gefälles.

Nach der hier dargestellten Theorie wird also angenommen, dass das Eis von einem schiebenden Druck zerbrochen wird. Dies setzt voraus, dass das Eis solcher Beanspruchungen durch Schub unterworfen wird, dass die Bruchbelastung durch den Schub überschritten wird. Nun kennt man aber z. B. die Bruchbelastung des Eises für Druck, sie ist etwa 25 kg per cm²; für Schub dürfte dieselbe etwas geringer sein, man darf wohl etwa 20 kg per cm² annehmen.

Noch in einem 100 m dicken Gletscher befinden sich aber nicht einmal die Bodenschichten unter einem so grossen Druck. Es ist deshalb nicht möglich, dass die Gleitflächen die ganze Eismasse durchsetzen, sondern man muss annehmen, dass die Spannungen unregelmässig verteilt sind und sich auf gewisse Punkte konzentrieren, die mit der Zeit abwechseln, oder lieber, dass die Gleitflächen hauptsächlich in der Nähe der Oberfläche des Eises gebildet werden, und dass die entsprechenden Bewegungen in der Tiefe sich hauptsächlich plastisch vollziehen.

Meine Auffassung von der Entstehung der Parallelstruktur ist also kurz die folgende :

Durch den Druck der überliegenden Massen formt sich das Eis in der Tiefe der Eisströme hauptsächlich plastisch um. Die oberflächlichen Partien des Eises sind aber spröder wie die tieferen, deshalb entstehen in ihnen Spannungen, die sich durch Sprünge auslösen. Die Bewegungen nach den Sprüngen sind



Schichten von sehr feinkörnigem, an verwitternder Oberfläche weiss erscheinendem Eis, wahrscheinlich Quetschonen, im grobkörnigen Eise auf dem Miktaglacieren in Schwedisch-Lappland

VERF. PHOT. AUG. 1907

meist klein. Sie bilden sich dem verzögernden Elemente, z. B. der Talwand, etwa parallel aus und erscheinen deshalb als eine plane Parallelstruktur. Da aber die Sprünge auch von der Richtung des geringsten Widerstandes beeinflusst werden, so kommt eine genaue Parallelität der Sprünge nie zu stande.

In einem Talgletscher bilden die Sprünge das Ausgehende einer Mulde oder einer löffelähnlichen Fläche, es ist aber wahrscheinlich, dass die tiefer liegenden Teile der Mulde in vielen Fällen nicht ausgebildet werden. In einem Plateaugletscher, der auf flachem Boden endigt, bilden sich horizontale Sprünge aus. Das Ende eines solchen Gletschers sieht deshalb etwa horizontal geschichtet aus.

Man muss also in den Gletschern zwei Parallelstrukturen annehmen, die ähnlich aussehen, aber verschiedener Genesis sind:

1. Die im Akkumulationsgebiet entstandene sedimentäre Parallelstruktur, deren Schichten im oberen Teile der Gletscherzunge häufig gefaltet werden und die sogen. Reid'schen Kämme bilden können. Diese Struktur wird in der Zunge immer mehr verwischt und undeutlich.

2. Die oben geschilderte sekundäre Parallelstruktur, die durch unter einander ziemlich parallele Schubspalten oder Gleitflächen entsteht. Diese dürften sich schon im Akkumulationsgebiet unterhalb der Oberfläche bilden, werden aber im allgemeinen zuerst in der Gletscherzunge auffallend und sind im unteren Teile derselben im allgemeinen die einzigen hervortretenden Flächen einer Parallelstruktur.

