

Entwicklung und Probleme der Schnee- und Gletscherkunde in der Schweiz

Von R. HAEFELI, Zürich¹

I. Rückblick

Anlässlich der Eröffnung des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung am 15. April 1943 hat Prof. Dr. P. NIGGLI in einem Vortrag über die «Schnee-, Lawinen- und Gletscherkunde in der Schweiz» die innere Linie, welche alles Fachwissen über die verschiedenen Aggregatzustände des Wassers verbindet und zur Synthese erhebt, wie folgt gezeichnet²:

«In vielen mystischen Kosmogonien wird die Trennung eines Urstoffes oder Urzustandes in Erde, Meer und Himmel als ein elementarer Akt, als eine der ersten göttlichen Taten geschildert. In der Dreiteilung in einen festen, flüssigen und gasförmigen Aggregatzustand lebt in der wissenschaftlichen Terminologie diese Gliederung fort. Und von Anbeginn an ließ das Wasser, das im ewigen Wechsel vom Himmel kommt, zum Himmel steigt, in die Erde sickert, zum Meere fließt und das durch Erstarren zum Prototyp „Kristall“ wird, über alles Trennende hinweg Zusammenhänge ahnen. Es ist derjenige Stoff, der uns am eindringlichsten und unmittelbarsten die Relativität der Begriffe fest, flüssig, gasförmig, und der Eigenschaften starr, fließend, plastisch zu erkennen gestattet, der als lebenswichtige Materie und als ein arbeiteloser, energieerzeugender Faktor mit dem Menschenleben verbunden ist.»

Während die Erforschung der flüssigen und gasförmigen Phase schon seit Jahrhunderten die hervorragendsten Mathematiker und Physiker beschäftigte, blieben Eis und Schnee noch längere Zeit der Analyse entrückt. Der Schweiz, deren Firne weit in die Niederungen hinausleuchten, war es vorbehalten, zur Heimat der Schnee-, Lawinen- und Gletscherkunde zu werden. Als ihre Begründer dürfen JOHANN JACOB SCHEUCHZER (1672-1733) und MORITZ ANTON CAPPELER (1685 bis 1769) gelten. In seiner «Beschreibung der Naturgeschichte des Schweizerlandes» behandelte SCHEUCHZER die Lawinen in sieben Abschnitten und setzte sich im Kapitel von den Gletschern, Schnee- und Eisbergen des dritten Bandes mit dem Problem des Wachstums und Zerspaltens der Gletscher auseinander. Im Luzerner Arzt CAPPELER bewundern wir den Schöpfer einer

ersten Kristallographie, wie auch einer kühnen Theorie der Gletscherbewegung, die das Grundsätzliche bereits richtig erfaßte.

Ohne auf Einzelheiten einzutreten, sei unter Hinweis auf die obenerwähnte Arbeit von P. NIGGLI daran erinnert, daß die klassische Zeit der Gletscherkunde in der Schweiz ins 19. Jahrhundert fällt und im Zeichen der 1815 gegründeten Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft steht. In dieser Periode eroberten die in der Frühzeit vorbereiteten Ideen, die sich in der 1816 bis 1821 entstandenen Arbeit «Mémoire sur les variations de la température dans les Alpes de la Suisse» des Walliser Kantonsingenieurs J. VENETZ zur vollen Klarheit über die einstmalige Ausdehnung der Firn- und Gletscherwelt durchrangen, das Denken der naturwissenschaftlich orientierten Welt. Im übrigen ist es bezeichnend für die Entwicklung der Problemstellung, daß zunächst das Festgestein Eis in der Form des Gletschereises im Mittelpunkt der Betrachtung stand. HUGI gebührt das Verdienst, die körnige polykristalline Struktur des Gletschereises entdeckt und damit die Verbindung zu Firn und Schnee hergestellt zu haben. Es war ferner ein glücklicher Umstand, daß das Studium der Wandlung vom Schnee in Firn zum Gletschereis das Interesse einiger hervorragender Physiker wie TYNDALL, THOMSON, EMDEN und HELMHOLTZ erweckte, wenn auch der von ihnen entdeckten Regelation anfänglich ein allzu großes Gewicht beigemessen wurde. Die fundamentalen Arbeiten über das Gletscherkorn und die Temperaturverhältnisse im Gletscher sind den Arbeiten von HAGENBACH-BISCHOFF und FOREL zu verdanken. Nachdem die Gletscherbewegung bereits 1773 durch einen Hirtenknaben von Grindelwald gemessen wurde, haben AGASSIZ und seine Mitarbeiter (1841-1846) die ersten exakten Beobachtungen ausgeführt. Dank der Gründung der Gletscherkommission (1893) der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft wurden diese Arbeiten fortgesetzt und in dem von P. L. MERCANTON redigierten bahnbrechenden Werk «Vermessungen am Rhonegletscher» veröffentlicht (1916).

Die Neuzeit der Schnee- und Gletscherkunde, die eine wesentliche Verbreiterung des Untersuchungsgebietes mit sich brachte, wurde um die Jahrhundertwende durch die Gründung einer internationalen Gletscherkommission eingeleitet, der sich unter Mitwirkung

¹ Abteilung für Erdbauforschung der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH.

² P. NIGGLI, Die Schnee-, Lawinen- und Gletscherkunde in der Schweiz. Zur Eröffnung des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung (1943).

amerikanischer Forscher eine Schneekommission angliederte. Die Verbindung zur Geologie bzw. zur Erdbaumekanik ist vor allem durch ALBERT HEIM in die Wege geleitet worden, indem er in seinem 1885 erschienenen ersten Handbuch der Gletscherkunde eine Parallele zwischen Gletscher-, Erdschlüpfen- und Lawinenbildung zog. Je länger, je mehr wurde die Problemstellung durch praktische Aufgaben beeinflußt. Im Gebiet der Schweizer Alpen, deren Gletscherschwankungen seit 1890 durch die Schweizerische Gletscherkommission kontrolliert wurden, galt es vor allem, die infolge des ständig zunehmenden alpinen Winterverkehrs erhöhte Gefahr von Lawinenkatastrophen und Unfällen zu bekämpfen. Die Erkenntnis, daß zu diesem Zwecke eine systematische Erforschung der Materie Schnee erforderlich ist, die bereits das grundlegende Werk von J. COAZ «Die Lawinen der Schweizeralpen» (1881) inspiriert hat, führte 1931 zur Gründung der Schweizerischen Kommission für Schnee- und Lawinenforschung. Angeregt durch die neuere Entwicklung der Erdbaumekanik sowie durch die Arbeiten von W. PAULCKE, W. WELZENBACH, E. HESS, EUGSTER, OECHSLIN, CAMPELL, FLAIG und SELIGMAN wurde unter der Ägide dieser Kommission nach mehrjährigen Voruntersuchungen mitten im Lawinengebiet ein primitives Schneelaboratorium errichtet (1935), im Bestreben, in freier Zusammenarbeit verschiedener wissenschaftlicher Institute der ETH, die auf Grund der Theorie in der Natur und im Laboratorium gewonnenen Erkenntnisse zu koordinieren¹.

Als im Herbst 1939 der zweite Weltkrieg ausbrach, waren die inneren Ursachen, die Beurteilung wie auch die Methoden zur Bekämpfung der Lawinengefahr so weit abgeklärt, daß die neugeschaffenen Grundlagen in den Dienst der winterlichen Gebirgsgruppen gestellt werden konnten^{1, 2}. Die dadurch erwiesene praktische Bedeutung der neuen Disziplin fand ihre äußere Anerkennung nicht zuletzt in der finanziellen, von Behörden, Industrie und Privaten gewährten Unterstützung, die es ermöglichte, das ursprüngliche, aufs primitivste eingerichtete Schneelaboratorium durch ein gut ausgerüstetes, mit einer modernen Kühlanlage versehenes Forschungsinstitut zu ersetzen, das unter dem Patronat der obenerwähnten Kommission erbaut und der Eidgenössischen Inspektion für Forstwesen unterstellt ist (1943). Damit wurde der schweizerischen Schnee- und Lawinenkunde eine ideale Arbeitsstätte geschenkt, welche das hochalpine, heute in vermehrtem Maße als Basis für firn- und gletscherkundliche Arbeiten benutzte Forschungsinstitut Jungfraujoch aufs beste ergänzt.

¹ BADER, HAEFELI, BUCHER, NEHER, ECKEL und THAMS, Der Schnee und seine Metamorphose, mit einer Einleitung von Prof. NICGLI. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie, Hydrologie, Lieferung 3 (Bern 1939).

² Geotechnische Kommission der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, Lawinen, die Gefahr für den Skifahrer (1940).

II. Neuere Probleme

Wenn nachstehend aus dem weitschichtigen Fragenkomplex, der das Werden und Vergehen von Schnee und Firn umspannt, einige mechanische Zusammenhänge herausgegriffen und streiflichtartig beleuchtet werden, so entsteht ein fragmentarisches Bild, das als Ergänzung der von P. NICGLI angeregten thermodynamisch-kristallographischen Untersuchungen, deren neuere Ergebnisse von M. DE QUERVAIN in einem in dieser Zeitschrift erschienenen Aufsatz dargestellt wurde, gedacht ist¹. Im wesentlichen beschränken wir uns dabei auf die Untersuchung der Verformungen und Spannungerscheinungen eines plastischen, kohärenten und schichtförmigen Lockeraggregates, dessen Einzelkörper eine stetig fortschreitende Formänderung erleiden, wie dies in idealer Weise bei der Metamorphose der Schneedecke der Fall ist. Unnötig zu erwähnen, daß die nachstehend betrachteten Kriechvorgänge infolge ihrer geringen Geschwindigkeit nach den Regeln der Statik behandelt werden dürfen.

Die obenerwähnten Ausführungen von M. DE QUERVAIN bestätigen, daß die Schneedecke, obwohl aus kristallinen Elementen aufgebaut, eine Plastizität besitzt, die eher an eine zähe Flüssigkeit erinnert, als an einen kristallinen Festkörper. Die Fließgrenze dürfte bei den in der Natur vorkommenden Temperaturen bei so kleinen Spannungen liegen, daß praktisch die geringsten Kräfte stetig fortschreitende Deformationen erzeugen. Dem laminaren Fließen einer Flüssigkeit, ge-

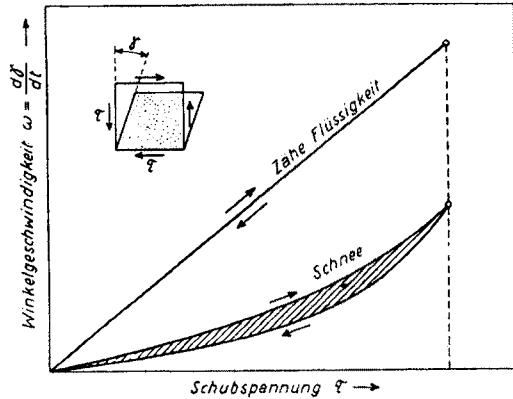


Fig. 1. Vergleich zwischen Schnee u. zäher Flüssigkeit (schematisch).

kennzeichnet durch die Proportionalität zwischen Geschwindigkeitsgradient und Scherbeanspruchung (NEWTONSCHES Gesetz), entspricht der innerhalb eines gewissen Spannungsbereiches annähernd proportional der Scherspannung zunehmende Geschwindigkeitsgradient des Schnees (Fig. 1). Die Analogie zwischen Schnee und Flüssigkeit ist natürlich beschränkt. Abweichungen im Verhalten des ersten sind begründet, einmal in seiner Volumenkompressibilität wie auch in

¹ M. DE QUERVAIN, Schnee als kristallines Aggregat, Exper. 1, 207 (1945).

dessen Metamorphose, die alle sich über längere Zeit erstreckenden Vorgänge beherrscht und deren Irreversibilität zur Folge hat. Man erhält demgemäß eine Hysteresisschleife im Geschwindigkeits-Spannungs-Diagramm, hervorgerufen durch die Verdichtung der Schneeprobe und die dadurch bedingte Erhöhung der Zähigkeit während des Versuches.

In der natürlichen Schneedecke manifestiert sich die hohe Plastizität des Stoffes in den mit der Temperatur zunehmenden Setzungs- und *Kriecherscheinungen*. Beim Setzen der horizontalen Schneedecke, einem reinen Verdichtungsvorgang, läßt sich theoretisch die Volumenänderung in zwei Anteile zerlegen: in das eigentliche Schwinden, das sich auch im spannungsfreien Körper bei gewichtsloser Substanz vollziehen würde, und in denjenigen Teil der Verdichtung, der durch die mechanische Beanspruchung infolge Eigen Gewicht bedingt ist¹. Während der Setzungsvorgang sich definitionsgemäß stets nur auf vertikal gerichtete Verschiebungen bezieht, wird von einem Kriechen der plastischen Schicht hier nur dann gesprochen, wenn horizontale Bewegungskomponenten hinzutreten. Dabei kann es sich entweder um eine stetige innere Verformung oder um deren Kombination mit einer diskontinuierlichen Formänderung als Gleitvorgang handeln.

Da der Krievorgang sowohl für das Verständnis der Lawinenbildung, der Kriechdrücke, der Gletscherbewegung wie auch für viele Stabilitätsfragen von Lockergesteinen von maßgebender Bedeutung ist, wird er nachstehend etwas näher untersucht. Hierbei interessiert uns vor allem der theoretische Zusammenhang zwischen Verformung und Spannung, d. h. die Tatsache, daß dem Krievorgang eine eindeutig und stetig verlaufende Veränderung des Spannungsbildes parallel geht. Dieser Prozeß, der durch die Formänderung der einzelnen Teilchen des Lockeraggregates bzw. durch dessen Metamorphose gesteuert wird, möge als *Spannungs metamorphose* bezeichnet werden.

Als einfachstes Beispiel eines solchen Vorganges betrachte man zunächst die stetig verlaufenden Spannungsänderungen, die sich beim Setzen der *horizontalen* Schneedecke unter dem Einfluß ihres Eigen Gewichtes vollziehen. Aus Gründen der Symmetrie ist in irgendeinem Punkte der waagrechten Schneeschicht die erste, d. h. größere Hauptspannung, vertikal, die zweite horizontal gerichtet. Indem sich nun der betrachtete Punkt beim Setzungsvorgang senkrecht nach unten verschiebt, bleibt die erste Hauptspannung (Überlagerungsdruck) unverändert, während die zweite (Seitendruck) allmählich größer wird. Mit der fortschreitenden Verdichtung des Materials nähert sich der horizontale Seitendruck dem vertikalen Überlagerungsdruck. Das Verhältnis der beiden Drücke, die soge-

nannte Ruhedruckziffer, nimmt somit stetig zu, um schließlich mit der gedachten Verwandlung des Schnees in porenfreies Eis den Wert 1 — als Kennzeichen eines hydrostatischen Druckzustandes — zu erreichen.

Besonders instruktiv, wenn auch wesentlich komplizierter, gestaltet sich die plastische Verformung der *geneigten* Schneedecke. Die in der Natur durchgeföhrten Messungen ließen zunächst erkennen, daß sich irgendein Punkt an der Oberfläche oder im Innern der

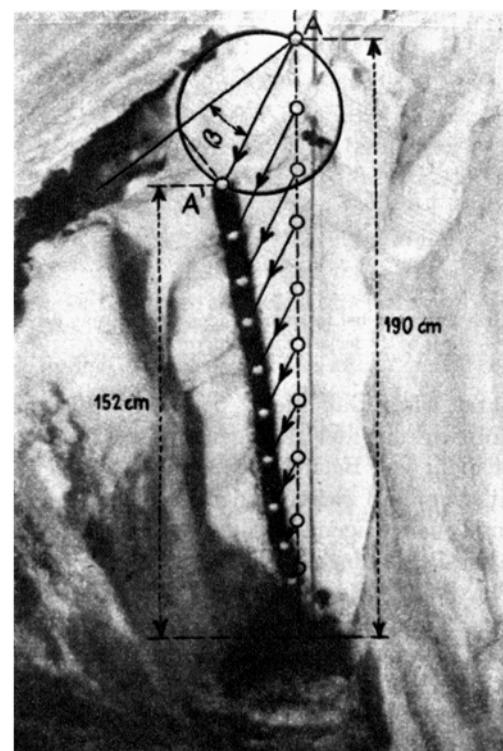


Fig. 2. Kriechprofil der Schneedecke (2660 m ü. M.). Dauer der Kriechbewegung von A nach A' = 66 Tage¹.

Schneeschicht nicht senkrecht nach unten, sondern schräg hangabwärts bewegt. Trägt man längs den Punkten einer Vertikalen die angenähert parallelen Kriechgeschwindigkeiten als Vektoren auf, so erhält man das sogenannte Kriechprofil, das in idealisierter Form durch ein auf der Spitze stehendes Dreieck dargestellt werden kann (Fig. 2). Als *Kriechwinkel* β wird der Winkel zwischen Hang- und Kriechrichtung bezeichnet.

Die langfristige Beobachtung ergibt weiter, daß sich ein Punkt beim fortschreitenden Krievorgang, streng genommen, nicht auf einer Geraden, sondern auf einer leicht konkaven, hyperbelähnlichen Kurve bewegt, die wir als *Kriechkurve* bezeichnen (Fig. 3). Im Scheitel dieser Kurve, der dem Endzustand der Verdichtung,

¹ R. HAEFELI, Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbau mekanik. Sonderdruck aus Literaturangabe 1, Spalte 1, Seite 2. — Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke. Mitteilung Nr. 2 der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH. (1942).

¹ R. HAEFELI, Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbau mekanik. Sonderdruck aus Literaturangabe 1, Spalte 1, Seite 2. — Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke. Mitteilung Nr. 2 der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH. (1942).

d. h. der Verwandlung der Schneedecke in porenfreies Eis entspricht, ist die Kriechbewegung parallel zum Hang gerichtet. Dies geht schon aus der einfachen Überlegung hervor, nach der sich eine unendlich ausgedehnte porenfreie Schicht nicht weiter zusammendrücken läßt, sofern die feste Phase als inkompressibel

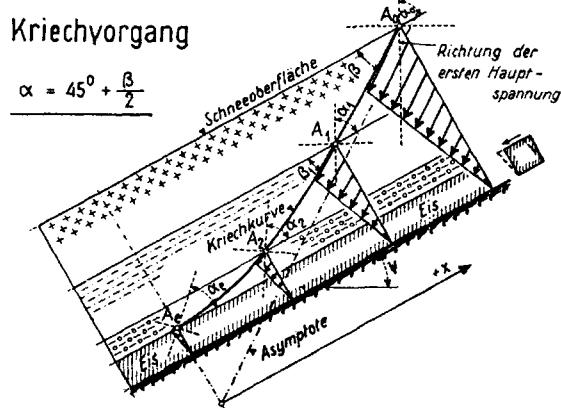


Fig. 3. Kriechvorgang bei fortwährender Verdichtung der Schneedecke (Kriechkurve)¹.

betrachtet wird. Daß dieser porenfreie Zustand nur unter Mitwirkung der flüssigen Phase erreicht wird, ist hier nicht von Belang. Bemerkenswert dagegen ist die Tatsache, daß zwischen der Kriechrichtung einerseits und den Eigengewichtsspannungen andererseits eindeutige Beziehungen bestehen, die es erlauben, für jede Phase des Kriechprozesses die Größe und Richtung der Hauptspannungen anzugeben^{1,2}.

Unter den Hauptspannungsrichtungen eines ebenen Spannungszustandes versteht man bekanntlich jene zwei ausgezeichneten, senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen, in welchen nur Normalspannungen, aber keine Schubspannungen wirksam sind. Die Analyse des Kriechprozesses ergab nun, daß die erste Hauptspannung mit der Schichtneigung stets den Winkel $\alpha = 45^\circ + \frac{\beta}{2}$ einschließen muß (Fig. 3). Da anderseits der Kriechwinkel β mit der fortschreitenden Verdichtung der Schneedecke kleiner wird, nimmt auf Grund obiger Beziehung auch der Winkel α entsprechend ab. Der Kriechvorgang ist somit nicht nur mit einer kontinuierlichen Änderung der Spannungsgrößen, sondern gleichzeitig mit einer Drehung der Hauptspannungsrichtungen verbunden, die nach Fig. 3 im Uhrzeigersinne erfolgt.

Während die erste Hauptspannung stets positive Werte aufweist (Druck), ist bei leichteren Schneearten und genügender Hangneigung die zweite Hauptspannung negativ (Zug). Mit der fortschreitenden Verdichtung der plastischen Schicht und der damit verbundenen Drehung der Hauptspannungsrichtungen nimmt die erste Hauptspannung zu, die zweite ab. Im Moment, wo die erste Hauptspannung bei ihrer Drehung die Verti-

kale passiert, wird die zweite Hauptspannung 0, d. h. sie wechselt vom negativen in den positiven Bereich, im Sinne einer Stabilisierung der Gleichgewichtsverhältnisse der Schneedecke (Fig. 4). Bei diesem Übergang ($\sigma_{II} = 0$) entsteht der denkbar elementarste Spannungszustand, dessen Betrachtung für das Verständnis des Kriechprozesses wesentlich ist. Er läßt sich durch eine einzige Größe, nämlich die erste Hauptspannung σ_I kennzeichnen, die in diesem Spezialfall vertikal gerichtet und mit dem Überlagerungsdruck σ_0 identisch ist. In Fig. 4 wäre z. B. die in der Fläche $c-d$ wirksame erste Hauptspannung σ_I gleichwertig mit dem Gewicht der Materialsäule $A B C d$, deren Basis gleich der Flächeneinheit ist. Da gleichzeitig der horizontale Seitendruck $\sigma_{II} = 0$ wird, ließe sich jetzt die ganze Schneeschicht in einzelne vertikale Prismen aufteilen, ohne daß dadurch am Spannungs- bzw. Verformungszustand etwas geändert würde. In Fig. 4 ist ein solches Schneeprisma $A B C D$ einzeln herausgezeichnet und außerdem die Verschiebung und Verformung eines quadratischen Flächenelementes $a b c d$ dargestellt. Bei dieser in der Zeichnungsebene erfolgenden Verschiebung geht obiges Quadrat in das Rechteck $a' b' c' d'$ über, wobei sich entsprechende Seiten um ihre auf der Basislinie $D-E$ gelegenen Schnittpunkte drehen.

Man beachte ferner, daß die rechten Winkel des betrachteten Flächenelementes bei einer kleinen Verschiebung und Verformung erhalten bleiben, während gleichzeitig die horizontalen Seiten $a-b$ und $c-d$ eine Verlängerung, die vertikalen $a-d$ und $b-c$ dagegen eine

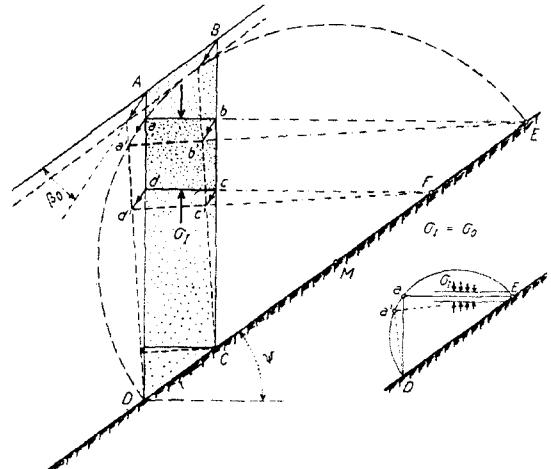


Fig. 4. Spezielle Phase des Kriechvorganges ($\sigma_{II} = 0$, $\beta = \beta_0$). Darstellung der Verformung einer prismatischen Säule.

Verkürzung erleiden. Es findet somit eine vertikale Zusammendrückung des Elementes bei gleichzeitiger Querdehnung statt. Außerdem läßt die hier betrachtete Phase des Kriechvorganges ganz allgemein erkennen, daß bei plastischen Verformungen die Kriechrichtung nicht mit der Richtung des größten Druckes übereinstimmen braucht. Die Querdehnung, welche längs der horizontalen Strecke $a-E$ unter dem Einfluß der vertikalen Hauptspannung σ_I eintritt, entspricht der waagrechten Komponente der Kriechbewegung (vgl. Fig. 4 rechts unten).

Wie oben gezeigt wurde, führt die Spannungsmetamorphose im Fall der planparallelen Schicht durch den Abbau der Zugspannungen eine allgemeine Stabilisierung herbei. Handelt es sich dagegen um eine Schicht,

¹ R. HAEFELI, Erdbaumechanische Probleme im Lichte der Schneeforschung. Mitteilung Nr. 7 der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH. (1944).

² R. HAEFELI, Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. Sonderdruck aus Literaturangabe 1, Spalte 1, Seite 2. – Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke. Mitteilung Nr. 2 der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH. (1942).

deren Neigung oder Mächtigkeit variiert — was in der natürlichen Schneedecke normalerweise zutrifft — so treten Spannungsänderungen auf, die eine gegenteilige Wirkung haben, indem sie das Gleichgewicht gefährden. Die längs einer Falllinie beobachteten Kriechprofile, die bei der planparallelen Schicht stillschweigend als kongruent vorausgesetzt wurden, sind dann von Punkt zu Punkt verschieden. Dabei müssen allgemein *Längsspannungen* auftreten, speziell Druckspannungen, wenn sich die Kriechbewegung in der Fallrichtung verzögert, Zugspannungen, wenn sie sich beschleunigt. Diese allmählich anwachsenden Zugkräfte sind es, die bei der kohärenten Schneedecke zur Bildung von Schneebrettawinen, beim Gletscher zur Entstehung von Zugspalten führen.

Um auf einige allgemeine Zusammenhänge zwischen der Kriech- und Gleitbewegung der Schneedecke und der komplexeren *Gletscherbewegung* hinzuweisen, sind in Fig. 5 drei typische Geschwindigkeitsprofile schematisch dargestellt, die von der Schneedecke (a) zum Firngelände der Gletscher (c) überleiten. Findet nicht nur eine innere Verformung der Schneedecke, sondern gleichzeitig ein Gleiten derselben auf ihrer Unterlage statt, so entsteht das in Fig. 5a skizzierte Profil. Der darin gezeichnete lineare Geschwindigkeitsgradient des annähernd dreieckigen oder viereckigen Profils (a) kann sich unter Annahme des NEWTONSchen Reibungsgesetzes für zähe Flüssigkeiten jedoch nur dann ausbilden, wenn die Zähigkeit mit der Tiefe unter der Oberfläche linear zunimmt, was bei der Schneedecke oft näherungsweise der Fall ist. Für eine konstante

stehen^{1,2}. Der Zusammenhang mit der Theorie von FINSTERWALDER ergibt sich aus der Bedingung, daß der mittlere Kriechwinkel β_m einer Jahresperiode identisch wird mit dem Winkel ϕ , den die eintauchende Stromlinie mit der Firnoberfläche bildet. Die Tangente dieses Winkels ist gleich dem Verhältnis zwischen dem Firnuwachs A und der Jahresgeschwindigkeit V_x .

Als Fließvorgang einer kristallographisch inhomogenen, anisotropen, zähflüssigen Masse, deren Zähigkeit mit der Temperatur und der Spannung variiert, ist die Gletscherbewegung selbst für einfachste Randbedingungen analytisch kaum erfaßbar. Schon die rein qualitative Abklärung des Problems, bei der die oft beobachtete Entstehung von Scherflächen im Innern des Gletschers wie auch der nichtstationäre Charakter der ganzen Erscheinung zu berücksichtigen sind, setzt als experimentelle Vorarbeit die Erforschung der kristallographischen und mechanischen Eigenschaften von Eis verschiedener Korngrößen in Funktion der Temperatur und des Druckes im Kältelaboratorium voraus. Dabei könnte grundsätzlich der von den Erdbaulaboratorien entwickelte Triaxialapparat Verwendung finden, der u. a. die Messung der Zähigkeit bei beliebig regulierbarem allseitigem Druck gestattet. Noch klarere Spannungsverhältnisse ließen sich bei Torsionsbeanspruchung eines Hohlzylinders erzielen, der einem gegebenen hydrostatischen Innen- und Außendruck ausgesetzt wird.

Sobald die Zähigkeitsverhältnisse in der Tiefe mächtiger Gletscher besser bekannt sind, dürfte sich auch die Frage der Sinkgeschwindigkeit der im Innern des Gletschers transportierten Geschiebe, der Schlepp- und Erosionskraft des Eises und die damit zusammenhängende Rundhöckerbildung weiter verfolgen lassen³. Vermutlich existiert ein von der Temperatur abhängiger kritischer allseitiger Druck, bei dessen Überschreitung praktisch keine makroskopischen Hohlräume im Gletscher bestehen können. Dies führt zur Hypothese einer Grenzfläche (Klufthorizont) zwischen «offenem» und «geschlossenem» Eis, die besonders für die interglaziale Wasserbewegung von Bedeutung ist, indem im geschlossenen Eis keine offenen Wasserrinnen, sondern nur interkristalline Sickerströmungen denkbar sind. Der im Gebiet des Druckschmelzpunkts des Eises mit dem Druck proportional zunehmende Anteil der flüssigen Phase, die sich in den Korngrenzen ansammelt, bewirkt durch Bildung von druckgespanntem Porenwasser eine wesentliche Verminderung der Zähigkeit des Zweiphasensystems. Diese aus der Mechanik der gesättigten Lockergesteine, insbesondere

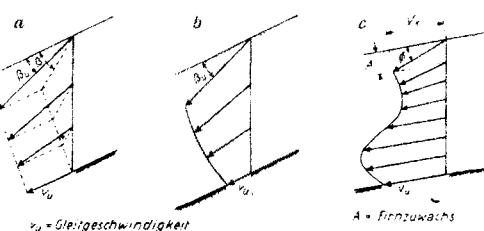


Fig. 5. Vergleich verschiedener Geschwindigkeitsprofile (schematisch).

Zähigkeit müßte die Geschwindigkeitsverteilung die Form b annehmen, die an das bekannte Profil des strömenden Wassers erinnert.

In vermehrtem Maße als bei der Schneedecke schwanken im Gletscherprofil die mechanischen Eigenschaften des kristallinen Aggregates innerhalb sehr weiter Grenzen. Im Firngelände z. B. liegt eine relativ kalte und starre Zone von maximaler Zähigkeit zwischen den fluideren oberflächlichen Schneeschichten und dem hochplastischen Eis der Tiefe eingebettet. Wird nun diese starre Zone durch seitliche Reibungs- oder durch bergwärts gerichtete Verankerungskräfte in ihrer Bewegung gehemmt, so kann das in Fig. 5c schematisch angedeutete Geschwindigkeitsprofil ent-

¹ R. HAEFELI, Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. Sonderdruck aus Literaturangabe 1, Spalte 1, Seite 2.

² R. STREIFF-BECKER, Beitrag zur Gletscherkunde. Forschungen am Clarafirn im Kanton Glarus. Denkschrift der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Bd. LXXV (Zürich 1943). Nachtrag zur Gletschertheorie. Die Alpen, H. 12 (1944).

³ H. CAROL, Beobachtungen zur Entstehung der Rundhöcker. Die Alpen, Nr. 6 (1943).

der Tone, bekannte Tatsache, daß sich das Porenwasser an der Übertragung der inneren Spannungen aktiv beteiligt, dürfte auch bei der Gletscherbewegung eine maßgebende Rolle spielen¹.

III. Ausblick

Je weiter das menschliche Leben in die eisbedeckten Gebiete der Erde vordringt, um so aktueller werden die Probleme der Schnee- und Gletscherkunde. Für unser Gebirgsland besteht ihre dringendste Aufgabe darin, die Entwicklung geeigneter Methoden zur Bekämpfung von Lawinenunfällen und -katastrophen zu fördern. Neben der Abklärung der Grundlagen zur wirksameren Gestaltung der Lawinenschutzbauten, neben dem weiteren Ausbau definitiver und provisorischer Maßnahmen, gewinnt der nach Klimaregionen differenzierte Meldedienst über die Schnee- und Lawinenverhältnisse der Alpen als Unfallprophylaxe wachsende Bedeutung — nicht zuletzt zum Ausgleich für den Verlust an Naturverbundenheit, der den Fortschritt der Zivilisation wie ihr Schatten begleitet².

Die Gletscherforschung verfügt heute über eine Reihe neuer Methoden, die den Fortschritten auf allen einschlägigen Fachgebieten, insbesondere der Meteorologie, Photogrammetrie, Geophysik und der Thermodynamik zu verdanken sind³. Während das Studium der Fließbewegung durch die Lokalisierung metallischer Schwimmer von der Oberfläche ins Innere des Gletschers fortschreitet, kann die Untersuchung der kristallographischen und mechanischen Eigenschaften des Gletscheresa im Kältelaboratorium unter jenen äußeren Bedingungen erfolgen, die in großer Eistiefe vorherrschen. Es wäre daher eine dankbare Aufgabe für die alpine Forschung, diese neuen Möglichkeiten zum Studium eines individuellen Gletschers so zu koordinieren, daß die Einzelerscheinungen in ihrer funktionalen Bedeutung für den als ein organisches Ganzes betrachteten Gletscher erfaßt werden.

Wir denken dabei in erster Linie an den bedeutendsten Gletscher der Alpen, den großen Aletschgletscher, in dessen Firngebiet das mit der Jungfraubahn erreichbare hochalpine Forschungsinstitut eine ideale Basis darstellt, um von hier ausgehend, die glaziologischen

¹ R. HAEFELI, Zur Mechanik außergewöhnlicher Gletscherschwankungen. Schweizerische Bauzeitung, Bd. 115, Nr. 16 (1940).

² E. BUCHER, Die Entwicklung der Schweizerischen Schnee- und Lawinenforschung. Zur Eröffnung des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung (1943). — E. BUCHER und J. Jost, Die Erfahrungen in der künstlichen Loslösung von Lawinen mit Hilfe des Minenwerfers. Neue Zürcher Zeitung (Aug. 1941) (Sonderabdruck). — R. HAEFELI, Zur Beobachtung der winterlichen Schneeverhältnisse in den Schweizer Alpen. Die Alpen, H. 3 (1945).

³ A. WAGNER, Klimaänderungen und Klimaschwankungen. Die Wissenschaft, Bd. 92 (Braunschweig 1940). — A. KREIS, Die Ergebnisse der seismischen Eistiefenmessungen auf dem Unteraargletscher. Verh. Schweiz. Naturf. Ges. Basel (1941). — W. JOST, Die seismischen Eisdickenmessungen am Rhonegletscher. Denkschrift der SNG. (1939). — O. LÜTSCHG, Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges. Beiträge zur Geologie der Schweiz — Geotechnische Serie — Hydrologie. — H. HESS, Über die Elastizitätskonstanten des Eises. Zeitschrift für Gletscherkunde, Bd. 27 (1941).

Erscheinungen in ihrer natürlichen Entwicklung, d. h. in der Fließrichtung des Gletschers zu verfolgen¹. Die große Eismächtigkeit, die beim Konkordiaplatz nach bisherigen seismischen Messungen nahezu 800 m betragen soll², bürgt für das Vorhandensein hochplastischen Eises und damit von Bedingungen, die sich nicht allein auf den alpinen Gletschertypus beschränken. Die von der Praxis wiederholt gestellten Fragen über die hydrologischen Verhältnisse des Hochgebirges, die Gletscherschwankungen oder das Problem der Wasseraufnahme an der Gletschersohle ließen sich auf diesem Wege weiter abklären³. Darüber hinaus aber ist es der unerschöpfliche Born göttlicher Weisheit, der — in den Phänomenen des Gletschers verborgen — immer wieder innerlich ergreift und bereichert. Nicht umsonst sind die Fortschritte der Gletscherkunde, fern von allem Zweckgebundenen, in erster Linie der Liebe zu den Bergen und einer tiefen Ehrfurcht vor dem Walten der Schöpfung zu verdanken. Möge diese Grundstimung auch die zukünftige Forschung beseelen.

Summary

Referring to a paper by P. NIGGLI the author presents a retrospective review of the development of snow and glacier knowledge in Switzerland from its rudiments in the 16th and 17th century up to the present time. The attempts of the present were benefitted by the establishment of the Federal Institute for Snow and Avalanche Investigations.

Out of up to date problems the author picks the creeping of snow due to a metamorphosis, i. e. a change in structure, and deals with its mechanical characteristics. The law of the connection between the process of creeping of the snow cover and the steady change in the stress diagram leads to the conception of "Stress Metamorphosis," which draws the attention upon the functional relations and puts the momentary state of stress into the wider frame of the whole stress development, better corresponding to the nature of plasticity. The process of creeping is on one hand, i. e. in the case of snow, responsible for the formation of avalanches, on the other hand for producing crevasses in glaciers. The parallel between snow cover and glacier leads to the

¹ G. SELIGMAN, Forschungsergebnisse am großen Aletschgletscher. Die Alpen, H. 12 (1943). — M. F. PERUTZ und G. SELIGMAN, A Crystallographic Investigation of Glacier Structure and the Mechanism of Glacier flow. Proc. Roy. Soc., London, A, Nr. 950, vol. 172, pp. 335—360 (August 1939). — R. U. WINTERHALTER, Probleme der Gletscherforschung. Die Alpen, H. 6 (1944). — R. KOECHLIN, Les glaciers et leur mécanisme (Lausanne 1944). — R. HAEFELI, Beobachtungen im Firngebiet des großen Aletschgletschers. Verh. der Schweiz. Naturf. Ges., Sils (1944).

² H. MOTHES, Neue Ergebnisse der Eisseismik. Zeitschrift für Geophysik, Jg. 5, 3/4 (Braunschweig). — E. V. DRYGALSKI und F. MACHATSCHEK, Gletscherkunde, Enzyklopädie der Erdkunde (Wien 1942).

³ P. L. MERCANTON, Les variations périodiques des glaciers des Alpes suisses. Jährliche Berichte in der Monatsschrift «Die Alpen». — R. HELBLING, Ausbruch eines Gletschersees in den Argentinischen Anden und außergewöhnliche Gletscherschwankungen im allgemeinen. Schweizerische Bauzeitung, Bd. 115, Nr. 11 (1940). — R. HAEFELI, Zur Mechanik außergewöhnlicher Gletscherschwankungen. Schweizerische Bauzeitung, Bd. 115, Nr. 16 (1940). — M. WAEBER, Observations faites au glacier de Tré-la-Tête. Revue de géographie alpine. Tome XXXI (Grenoble 1943). — R. BILLWILLER, Der Firnuzwachs pro 1944/45 in einigen schweizerischen Firngebieten. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft (Zürich 1945).

consideration of glacier movement, which can be regarded — in spite of the crystalline structure — as the movement of a viscous fluid, the viscosity of which varies from place to place and also changes in course of time. The way in which the solid and the liquid states are acting together deserves special attention.

In Switzerland the knowledge gained by snow researches is being used first of all in assisting the fight against avalanches. Definitive, provisional and pro-

phylactic measures are being extended to prevent avalanche accidents. For glacier knowledge the High Alpine Research Institute on the Jungfraujoch offers the possibility of coordinating the investigation methods; this, in order to study the phenomena of glaciers, starting at the point of firm snow and progressing in the natural developing direction of the process, using as an example the Great Aletsch Glacier which is the most considerable glacier of the Alps.

Das Ganzheitsproblem in der Biochemie

Von S. EDLBACHER, Basel

I.

Das allgemeinste Kriterium eines lebenden Systems ist seine Fähigkeit, sich selbst zu regenerieren. Es besitzt demnach einen Stoffwechsel, so daß beständig Materie durch dieses System durchströmt.

Von dem Moment des Eintrittes bis zum Moment des Austrittes unterliegen die beteiligten Stoffe einem komplexen Chemismus, den man als die «Lebensphase» der Materie bezeichnen kann. Die Selbstregeneration sowie die ständige Energieproduktion bedingen, daß innerhalb dieser Lebensphase die Stoffe Eigenschaften zeigen, die nur in ganz unvollkommener Weise modellmäßig *in vitro* reproduzierbar sind. Isolierte Plasmabausteine, wie zum Beispiel Kohlehydrate, Aminosäuren usw., erweisen sich *in vitro* als durchaus stabile Gebilde, die nur durch ziemlich energische Angriffe zur Reaktion gebracht werden können. *In vivo* hingegen werden sie mit größter Leichtigkeit umgesetzt, und zwar bei ganz niederen Temperaturen.

Aus der Fähigkeit zur Selbstregeneration ergibt sich ein *harmonischer Handlungsvollzug* (DRIESCH), indem alle Stoffwechselvorgänge, die in größter Mannigfaltigkeit gleichzeitig ablaufen, sich in koordinierter Weise abspielen. Es besteht im Leben also ein komplexes System von chemischen Gleichgewichtsreaktionen, die sich zu einer höchst charakteristischen *rhythmischem Reaktionsart* ordnen. Ein lebendes System vollzieht in erster Linie keine thermodynamische, sondern eine chemodynamische Maschinenleistung. Das will sagen, daß die durch Oxydation gewonnene Energie nicht etwa nur in Form von Wärmeenergie auftritt, sondern zum größten Teil in Form von «freier» Energie, die dann in andere Energieformen transformierbar ist und daher auch Arbeit leisten kann. Eine rationell arbeitende thermodynamische Maschine bedarf Wärme von hoher Temperatur. Dies ist natürlich im Leben ausgeschlossen. Aus dieser einfachen Überlegung ergibt sich auch, daß es theoretisch eigentlich falsch ist, den Nährwert in Kalorien auszudrücken, worauf E. BARON und M. POLANYI¹ schon hingewiesen haben. Die Anwen-

dung der Kalorienrechnung in der Stoffwechsellehre fußt auf dem nur *bedingt* gültigen BERTHELÖTSchen Prinzip, welches aussagt, daß von allen möglichen Reaktionen immer die mit größter Wärmetönung eintreten müsse. Es stimmt für die meisten Stoffwechselvorgänge jedoch praktisch mit genügender Genauigkeit¹.

Es erscheint durchaus nicht überflüssig, auf diese Tatsache hinzuweisen. Einem Vorschlage von H. M. KALCKAR und C. D. CORYEL² folgend, bezeichnen wir daher chemische Reaktionen, die mit einem Wechsel der *freien* Energie verknüpft sind, als *exergonisch* oder *endergonisch*, während Reaktionen mit positiver oder negativer Wärmetönung als *exotherm* oder *endothetm* bezeichnet werden. Die chemodynamische Maschinenleistung der Lebensphase ist nun durch die exergonischen Reaktionen bedingt. Diese dominieren, so daß dem lebenden System immer freie Energie zur Verfügung gestellt wird. Parallel jedoch verlaufen ständig auch endergonische Reaktionen. Daraus ergibt sich die genannte *rhythmische Reaktionsart*.

Die *Reaktionsbereitschaft* lebender Systeme, die sich dadurch zeigt, daß bei Bedarf sofort große Energiebeträge produziert werden können, macht es nun notwendig, daß *zerfallsbereite* Moleküle mit hohem Potential in minimalen Zeitabschnitten weitgehend abbauten müssen. Daraus ergibt sich weiter, daß solche Stoffe mit hohem Potential auch immer wieder neu aufgebaut werden müssen, was wieder nur unter Verbrauch von Energie möglich ist. *Energieliefernde Reaktionen der Lebensphase müssen daher immer im Prinzip so verlaufen, daß sie umkehrbar sind*, das heißt sie müssen im Sinne des Abbaues exergonisch und im Sinne der Resynthese endergonisch verlaufen. Zerfallsbereite molekulare *Ungleichgewichte* brechen also ständig zusammen und bilden Gleichgewichte, wie außerhalb der Lebensphase. Nun aber kommt eine den Lebenvorgang kennzeichnende Reaktionsart dazu: die Gleichgewichte werden systematisch immer wieder zu

¹ Vgl. C. O. OPPENHEIMER, «Chemische Grundlagen der Lebensvorgänge» (Berlin 1933).

² H. M. KALCKAR, Biological Rev. of the Cambridge Philos. Soc., 17, 28 (1942).