

Edwin Bucher

BEITRAG ZU DEN THEORETISCHEN GRUNDLAGEN DES LAWINENVERBAUS

Beiträge zur Geologie der Schweiz — Geotechnische Serie — Hydrologie
Lieferung 6

Herausgegeben von der Geotechnischen Kommission der Schweiz. Naturforschenden
Gesellschaft gemeinsam mit der Schweiz. Schnee- und Lawinenforschungskommission

BEITRAG ZU DEN THEORETISCHEN GRUNDLAGEN DES LAWINENVERBAUS

VON

EDWIN BUCHER

LEITER DES EIDG. INSTITUTES
FÜR SCHNEE- UND LAWINENFORSCHUNG
DAVOS-WEISSFLUHJOCH

KOMMISSIONSVERLAG KÜMMERLY & FREY, BERN
1948 - DRUCK VON BUCHDRUCKEREI DAVOS AG.

Vorwort der Geotechnischen Kommission

An der Sitzung vom 20. Dezember 1947 nahm die Geotechnische Kommission die Promotionsarbeit von Herrn Bauinspektor Dr. Ing. E. Bucher: „Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbaus“ zur Aufnahme in ihrer Serie „Hydrologie“ entgegen. Mit dieser Arbeit werden die in Nr. 2 und 3 dieser Serie begonnenen Studien über das Verhalten der alpinen Winterschneedecke fortgesetzt. Sie wurde ausgeführt am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weißfluhjoch-Davos, dessen Leiter der Autor ist.

Die Herausgabe geschieht gemeinsam mit der Schweiz. Schnee- und Lawinenforschungskommission. Einen Teil der Druckkosten übernahm in verdankenswerter Weise die Eidg. Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei. Auch dem Autor sei für seinen Beitrag bestens gedankt.

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

Zürich, Oktober 1948

Für die Geotechnische Kommission
der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft

Der Präsident: *Prof. Dr. P. Niggli*

Der Aktuar: *Dr. F. de Quervain*

Einleitung

*En combien de matières la pratique
n'a-t-elle pas précédé la théorie ?*

P. Mougín [111]

Mit vorliegender Arbeit habe ich den Versuch unternommen, das bisher vorwiegend dem Praktiker überlassene Problem des Lawinenverbaues von theoretischen Gesichtspunkten aus zu beleuchten. Das erste Kapitel befaßt sich mit der technischen Stoffanalyse des Schnees und bildet die Grundlage für die im zweiten Kapitel durchgeführten Berechnungen über die Statik und Dynamik der Schneedecke. Im dritten und letzten Kapitel werden dann die sich mit Rücksicht auf den Lawinenverbau ergebenden, logischen Schlußfolgerungen gezogen.

Die Gesamtarbeit bildet eine Fortsetzung der auf Initiative von Herrn Prof. Dr. Meyer-Peter, Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E.T.H. und Prof. Dr. P. Niggli, Direktor des Mineralogisch-Petrographischen Institutes der E.T.H. eingeleiteten Schneeuntersuchungen. Durchführung und Verarbeitung der ersten Messungen verdanken wir Herrn Prof. Dr. R. Haefeli und Dr. H. Bader, welche damit die Entwicklung einer wissenschaftlichen Schneemechanik begründet haben. Auf Grund dieser Arbeiten konnte im Jahre 1942 auf Weißfluhjoch oberhalb Davos das Eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung gegründet werden, aus dem auch die vorliegende Publikation hervorgeht.

Wenn ich heute nach Abschluß dieses kleinen Werkes an die mehr als zehnjährige Lehrzeit auf dem Gebiet der Schnee- und Lawinenkunde zurückdenke, in welcher es mir vergönnt war, aus zahllosen Laboratoriums- und Felduntersuchungen gleichsam Stein um Stein zum Fundament einer Theorie des Lawinenverbaues zusammen zu tragen, so geschieht dies in tiefer Dankbarkeit allen jenen gegenüber, die mir dabei behilflich waren.

Gerne erinnere ich mich an den ersten Winter 1936/37, in welchem mich Prof. Dr. R. Haefeli, Dr. Henri Bader und der Geologe J. Neher in die Schneeprobleme einführten — an die Zeit der Lawinenkurse, in denen ich als Referent und Klassenlehrer Gelegenheit hatte, viele praktische Erfahrungen zu sammeln — schließlich aber auch an den Bau des neuen Institutes im Jahre 1942, womit der große Schritt vom primitiven Provisorium zur modern eingerichteten Arbeitsstätte vollzogen wurde. Neben den ersterwähnten Herren danke ich ferner Ing. A. Roch, Dr. R. U. Winterhalter, Dr. M. de Quervain, Forsting. Schwab, Forsting. Arrigoni, Forsting. in der Gand und M. Schild für ihre Mitarbeit, sowie Herrn Prof. Dr. Lardy und Dr. Preißmann für ihre wertvollen Ratschläge.

Die unzähligen Profilaufnahmen, Apparateablesungen, zeichnerischen und schriftlichen Arbeiten besorgten in verdankenswerter Weise die Herren Aeberli, Figilister, Lucek, Brändlin, Putre, Mauchle und Fr. Stähelin, alle Mitarbeiter des Institutes.

Dankbar verbunden bleibe ich aber vor allem meinem ersten Lehrmeister, Prof. Dr. E. Meyer-Peter, welcher mir als Student und Assistent das für die technische Forschung notwendige Rüstzeug vermittelte und auch diese Arbeit tatkräftig unterstützte. Für die wegweisenden Ratschläge, die ich von Prof. Dr. P. Niggli und Prof. Dr. E. Brandenberger nicht nur bei der allgemeinen Gestaltung der Schneeuntersuchungen, sondern auch speziell zur Klärung der Stoffcharakterisierung bei der vorliegenden Problemstellung entgegen nehmen durfte, möchte ich ebenfalls herzlich danken. Alt Oberforstinspektor M. Petitmermet und seinem Nachfolger Dr. E. Heß verdanke ich es schließlich, daß diese Arbeit überhaupt in Angriff genommen werden konnte.

Davos-Weißfluhjoch, den 7. Oktober 1948.

Edwin Bucher

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5
----------------------	---

1. Kapitel: Technische Stoffanalyse des Schnees

I. Unterscheidung verschiedener Schneearten

1. Kornform	9
2. Raumgewicht	10
3. Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt	10
4. Praktische Klassierung und Signierung	11

II. Die Beziehungen des Schnees zu den elastischen und plastischen Stoffen

1. Systematik elastischer und plastischer Formänderungen	12
2. Begriff der Relaxation	16
3. Abschätzung der Relaxationszeit des Schnees	17

III. Plastizitätseigenschaften des Schnees

1. Ursachen des plastischen Verhaltens	19
2. Das Schwinden und dessen Einfluß auf die Plastizitätskoeffizienten	21
3. Die Zähigkeit des Schnees	26

IV. Festigkeitseigenschaften des Schnees

1. Bruchhypothese	34
2. Zugfestigkeit	35

2. Kapitel: Statik und Dynamik der Schneedecke

I. Schneedeckenentwicklung

1. Die beiden Grundgesetze der stofflichen Veränderung	41
2. Schematischer Verlauf der Schneedeckenentwicklung	42
3. Spezielle Einflüsse	44
4. Beispiele natürlicher Schneedeckenentwicklung	44

II. Allgemeine Zusammenhänge zwischen Spannungsverteilung und Kriechvorgang

1. Berechnungsgrundlagen	58
2. Horizontale Schneedecke	58

3. Schneedecke auf schiefer Ebene	60
4. Geschwindigkeitsverteilung im Staubereich einer Stützwand	63
5. Strömungsbilder bei verschiedenen Randbedingungen	67

III. Gleiten auf der Unterlage

1. Kriechvorgang der natürlichen Schneedecke auf schiefer Ebene	68
2. Auftreten großer Geschwindigkeiten	70
3. Kriechschäden	71

IV. Lawinenbildung

1. Allgemeines	73
2. Theoretische Möglichkeiten der primären Bruchbildung	74
3. Einfluß der Temperatur	82

3. Kapitel: Der Lawinenverbau

I. Allgemeine Maßnahmen

1. Vorarbeiten	84
2. Rückhalt von Verwehungen	85
3. Festigung des Fundamentes	87
4. Schutz vor dynamischen Einwirkungen	87

II. Die beiden Hauptforderungen des Verbaus

1. Zugspannungen	88
2. Schubspannungen der neutralen Zone	88

III. Wirkungsweise verschiedener Konstruktionstypen

1. Werke, welche die Schneedecke nur teilweise aufspalten	89
2. Werke, welche die Schneedecke vollständig aufspalten	91
3. Größe und Anordnung von Rechenkonstruktionen	95

IV. Abschätzung des auf Rechenkonstruktionen wirkenden Schneedruckes

1. Generelle Kraftaufnahme	96
2. Normalkräfte	97
3. Querkkräfte	100
4. Verhältnis von Setzungsquerkraft zu Kriechdruck	103

Zusammenfassung	105
----------------------------------	-----

Resumé	106
-------------------------	-----

Summary	107
--------------------------	-----

Literaturverzeichnis	109
---------------------------------------	-----

1. KAPITEL

Technische Stoffanalyse des Schnees

I. Unterscheidung verschiedener Schneearten

1. Kornform

Die von HELLMANN [89], NORDENSKIOELD [137] sowie BENTLEY und HUMPHREYS [8] gegebenen Klassifikationen von Schneekristallen haben in jüngster Zeit durch die von NAKAYA [118—129] und seinen Mitarbeitern in halber Höhe des Mt. Tokati (2063 m ü. M.) in Japan durchgeführten Beobachtungen eine wertvolle Ergänzung erfahren¹. Aus der Kaiserlich-Japanischen Universität in Sapporo, welcher Professor NAKAYA angehört, sind in den Jahren 1933—1940 vierzehn verschiedene Veröffentlichungen über natürliche und künstliche Schneekristalle hervorgegangen. Die Arbeiten zur Systematik der Kristallformen stehen dabei an erster Stelle. Wie daraus hervorgeht und schon von BADER [3] bestätigt wurde, zeichnen sich alle Neuschneearten durch eine im Vergleich zum Volumen große Oberfläche aus. Die fein verzweigten und verästelten Formen frisch gefallener Kristalle deuten auf eine rasche Wachstumsgeschwindigkeit hin, welche NAKAYA zu 0,5 bis 4,6 mm pro Stunde bestimmt hat. Doch in der Schneedecke herrscht ein anderes Lokalklima als in der Atmosphäre; die Materialzufuhr hat aufgehört und an deren Stelle tritt ein langsamer Materialumsatz, den man gemeinhin als Metamorphose bezeichnet.

Da die Schneetemperatur stets in der Nähe des Schmelzpunktes liegt und der Gitterzustand an der Grenze zweier nicht gleich orientierter Kristalle wesentlich von demjenigen in ihrem Innern abweicht, können einzelne Moleküle der Tendenz, das normale Kraftfeld wieder herzustellen, Folge leisten und sich dem einen der beiden Kristallgitter anschließen. Es vollzieht sich ein sogenannter Platzwechsel. Dabei sind gemäß TAMMANN [209], BURGERS [27], VOGEL [218] und anderen nicht nur die gegenseitigen Orientierungen der Netzebenen, sondern auch die Krümmungen der aneinander grenzenden Kristallflächen von Bedeutung. Starke Krümmungen werden abgetragen und zwar so, daß sich konkave Oberflächenteile auf Kosten von konvexen Partien ausbilden. Es liegt gemäß SUTOKI [206] ein den Kapillaritätserscheinungen ähnliches Verhalten vor: ein Molekül an den konkaven Grenzflächen wird stärker gebunden als ein solches in der Nähe der konvexen Wölbung.

Anlässlich seiner Studien über die Veränderung der Schneedecke in Funktion der Zeit ist es BADER [3] gelungen, die Metamorphose des Eiskristalles photographisch festzuhalten: das Kristallaggregat verliert nach kurzer Zeit das durch die fein ziselierten Formen gekennzeichnete Aussehen des Neuschnees, wird zunächst feinkörnig und erfährt mit fortschreitender Zeit eine zunehmende Vergrößerung. Die großen Kristalle wachsen auf Kosten ihrer kleineren Nachbarn, und als Endprodukt entsteht eine den örtlichen Wachstumsbedingungen angepaßte Kristallart, für welche PAULCKE [146] den Begriff „Tiefenreif“ eingeführt hat.

¹ Während der Drucklegung ist ferner ein sehr wertvoller Beitrag von E. WALL: Ueber die Entstehung der Schneekristalle, erschienen [230].

Tatsächlich handelt es sich dabei um eine der Bildung von Oberflächenreif analoge Erscheinung. Während diese vornehmlich zweidimensionalen Kristallformen durch Niederschlag von Wasserdampf an der kalten Schneeoberfläche entstehen und ihr Aufbaumaterial aus der Atmosphäre beziehen, muß der Tiefenreif als Eigenprodukt der Schneedecke gewertet werden.

Wie aus diesen wenigen Angaben hervorgeht, lassen sich innerhalb der natürlichen Schneedecke eine sehr große Zahl verschiedener Kristallformen unterscheiden. Für unsere mechanische Betrachtung genügt jedoch eine grobe Charakterisierung der verschiedenen Kristalltypen, handelt es sich doch hier vornehmlich darum, ihre äußere Form zu charakterisieren. Alle fein verästelten Gebilde wurden zu dem einen Begriff *filzige Kristalle* zusammengefaßt. Es soll darin die große Oberfläche im Verhältnis zur effektiven Masse zum Ausdruck kommen. Eine mittlere Stellung der Entwicklung durchläuft der Kristall in jenem Zeitpunkt, bei welchem die Verästelung schon weitgehend verdampft oder abgeschnürt ist. Der Kristall ist *feinkörnig* und beginnt das in allen drei Raumrichtungen erfolgende Wachstum, um schließlich *grobkörnig* zu werden.

Zusammenfassend unterscheiden wir somit filzige, feinkörnige und grobkörnige Schneearten.

2. Raumgewicht

Die unmittelbar nach der Ablagerung festzustellende Verschiedenheit des Raumgewichtes von Neuschnee ist in erster Linie durch den Windeinfluß bedingt. Bei ruhiger Luft entsteht ein äußerst lockeres Gefüge, in welchem sich die einzelnen Kristalle lediglich in den äußersten Ecken berühren. Bei der kleinsten Luftströmung hingegen werden die relativ leichten Eisteilchen schon in ihrem Schwebezustand erfaßt und in rollend-hüpfender Bewegung über die Schneeoberfläche hingetrieben, mechanisch zerkleinert und in die anwachsende Schneedecke eingefügt. So ist es zu verstehen, daß der Neuschnee je nach den Ablagerungsbedingungen ganz verschiedene Raumgewichte aufweisen kann.

Wie wir schon bei der Betrachtung des Einzelkornes gesehen haben, setzt ferner sofort nach der Ablagerung eine je nach Temperaturverhältnissen mehr oder weniger intensive Kristallumwandlung ein. Die Plastizität des Schnees, wovon wir noch mehrmals eingehend zu sprechen haben, erlaubt eine wesentliche Kompression des Lockeraggregates unter dem Einfluß von Eigengewichtskräften. Je mehr die überlagernde Schneesicht anwächst, umso größer wird die zu tragende Last und die damit verbundene Zusammendrückung. Die absolute Porosität des Schnees, worunter man das Verhältnis des effektiven Porenraumes zum Totalvolumen versteht, zeigt einen mit der Zeit abklingenden Verlauf. Da die Intensität dieses Vorganges von einer Reihe äußerer Faktoren, wie Schneehöhe, Temperatur und Feuchtigkeitsverhältnissen abhängt, müssen zwangsläufig innerhalb der Schneedecke Schichten ganz verschiedener Raumgewichte entstehen.

3. Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt

Temperaturunterschiede von wenigen Graden werden im allgemeinen für die Charakterisierung einer Substanz nicht als wesentlich erachtet. Unser Material nimmt jedoch insofern eine Sonderstellung ein, als sich die normalen Temperaturen während des Winters stets relativ nahe am Schmelzpunkt des Eises bewegen, und damit schon kleine Temperaturwechsel wesentliche Konsistenzänderungen bedingen. Bei tiefen Temperaturen haben äußere Kräfte nur geringe Deformationen zur Folge; nähern wir uns dagegen dem Nullpunkt, so macht sich eine wesentliche Zunahme der plastischen Eigenschaften bemerkbar.

Ist die Nullgradgrenze erreicht, so treten Schmelzprozesse ein. Es besteht sogar eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß die flüssige Phase schon vor diesem Temperaturpunkt in Erscheinung tritt. Nach den Untersuchungen von PLYLER [155] deutet die Absorption von Infrarot-Strahlen zwischen zwei sich satt berührenden Eiskristallen auf die Anwesenheit von Wasser hin. (Siehe analoge Beobachtungen an Metallen bei CHALMERS [34]). Beim Schmelzvorgang beginnt die Auflösung offen-

bar vornehmlich an diesen Stellen und das Aggregat fällt in den Korngrenzen auseinander. Ob diese Erscheinung auf zwischen den Kristallen vorhandene Unreinigkeiten, oder aber auf den speziellen Zustand der Korngrenzenmasse zurückzuführen ist, hat noch keine eindeutige Abklärung gefunden². Der Zerfall des Schneeaggregates in seine Einzelkörner läßt sich jedoch auch in der Natur häufig beobachten: z. B. bei der Auflösung von Harschschichten, beim Schmelzen der Schneeoberfläche im Frühjahr, oder bei der Durchnässung von verdichteten Schneeaggregaten auf Straßen und dergleichen. Ein Teil der Porenluft wird dann durch die kapillar zurückgehaltene, flüssige Phase ersetzt, so daß der Stoff eine grundlegende Aenderung erfährt.

4. Praktische Klassierung und Signierung

Zwischen dem flaumartigen Neuschnee mit dem charakteristischen Gepräge des Lockeraggregates und dem festen, zu Eis erstarrten Korngemisch, liegen theoretisch unendlich viele Schneearten. In einer praktischen Klassierung können deshalb nur gewisse Hauptmerkmale berücksichtigt werden, während die genauere Charakterisierung des Stoffes den Laboratoriumsuntersuchungen vorbehalten bleiben muß. Bei der Wahl dieser Bestimmungsgrößen sind wir bewußt von dem allgemein gültigen, und vor allem bei plastischen Materialien stark ins Gewicht fallenden Grundsatz der Trennung aller Teileinflüsse abgewichen, und zwar lediglich deshalb, weil der Praktiker gar keine Möglichkeit besitzt, die physikalischen Eigenschaften des Schnees quantitativ zu erfassen.

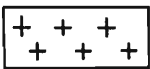
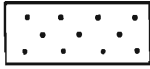
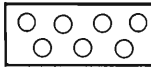
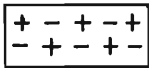
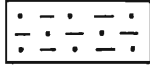
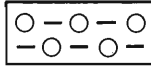
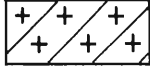
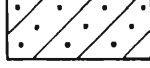
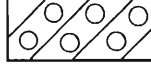
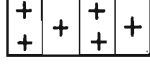
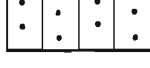
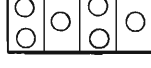
Verbandsfestigkeit	Neuschnee	Altschnee	
	filzig	feinkörnig Korngröße bis 2 mm	grobkörnig Korngröße über 2 mm
weich			
mittelhart			
hart			
naß			
Oberflächenreif		Wildschnee (sehr leichter, flaumiger Pulverschnee) . .	
Schmelzharsch		Becherförmige Kristalle . .	
Windharsch		Eislamelle	

Fig. 1: Schnee-Signaturen

² Während der Drucklegung erfahren wir von E. WALL [230] eine gewisse Bestätigung. Er schreibt: „Die Alterung der Schneekristalle wird untersucht, wobei sich zeigt, daß die gealterten Schneekristalle bei nicht zu tiefer Temperatur von einer dünnsten flüssigen Haut umgeben sind, in der sich Fremdstoffe in wässriger Lösung befinden.“

Es sollen Begriffe geschaffen werden, welche für alle Berufsschichten verständlich und geeignet sind, die Gegensätze zwischen wissenschaftlicher und praktischer Betrachtungsweise zu überbrücken.

Für die subjektive Klassierung verschiedener Schneearten hat sich eine Trennung in Kornform und Verbandsfestigkeit sehr gut bewährt. Bei der natürlichen Schneedeckenentwicklung lassen sich die vorherrschenden Korn typen in drei Gruppen zusammenfassen: in filzige Kristalle, welche noch keine oder nur eine geringe Umformung erfahren haben, in feinkörnige Aggregate, deren mittlerer Korndurchmesser unter zwei Millimeter liegt, und grobe Körner, deren Abmessungen diesen Wert überschreiten.

Mehr Uebung verlangt die subjektive Beurteilung der Verbandsfestigkeit, einer Bestimmungsgröße, in welcher nicht nur die gegenseitige Lagerung der Einzelbausteine, sondern auch die Temperatur des Materials zum Ausdruck kommt. Wir unterscheiden weiche, mittel-harte und harte Schichten. Der Tastsinn jedes Beobachters erlaubt im allgemeinen eine gute Unterscheidung dieser Werte und kann lediglich in den Abgrenzungen zu Ungenauigkeiten führen, denen jedoch keine prinzipielle Bedeutung zukommt, da ja stetige Uebergänge vorhanden sind. Mit dem Auftreten der flüssigen Phase geht die Verbandsfestigkeit weitgehend verloren, so daß es in erster Annäherung genügt, wenn man in diesem Fall die Feuchtigkeit des Aggregates erwähnt.

Mit Hilfe dieser drei Bestimmungsgrößen — Kornform, Verbandsfestigkeit und Feuchtigkeitsgehalt — ist eine für praktische Zwecke hinreichende Unterscheidung der verschiedenen Schneearten möglich (Fig. 1), [19].

Abschließend wollen wir nochmals darauf hinweisen, daß es sich bei der hier vorgeschlagenen Gruppierung lediglich um eine grobe Unterteilung der verschiedenen Schneearten für rein praktische Zwecke handelt. Aus diesem Grunde sind Verfeinerungen auf der Basis subjektiver Betrachtungen nicht anzustreben. Für die objektive Beurteilung der Schneebeschaffenheit sind besondere, in diesem Zusammenhang nicht zu besprechende Methoden entwickelt worden.

II. Die Beziehungen des Schnees zu den elastischen und plastischen Stoffen

1. Systematik elastischer und plastischer Formänderungen

In der technischen Stoffkunde hat es sich als zweckmäßig erwiesen, als Kriterium für das mechanische Verhalten eines Stoffes die Beziehungen zu verwenden, welche zwischen Zeit, Kraft und Deformation bestehen. Diese können am einfachsten definiert werden, wenn man ein würfelförmiges, durch Schubspannungen beanspruchtes Werkstück mit der Kantenlänge 1 betrachtet. Bezeichnet man die Schubspannung mit τ , die sich einstellende Winkeländerung mit γ und die dafür notwendige Zeit mit t , so lassen sich zwei für die Konsistenz des Materials charakteristische Funktionen bestimmen.

In graphischer Darstellung erhalten wir das Zeit-Schiebungsdiagramm $\gamma = f_1(t)$ einerseits, welches die Abhängigkeit der Deformationsgröße in Funktion der Zeit t , bei konstant gehaltener Schubspannung wiedergibt, und das Spannungs-Schiebungsdiagramm $\gamma = f_2(\tau)$ andererseits, worin die Beziehung zwischen der angelegten Spannung und der daraus resultierenden Deformation (elastische Körper), bzw. Deformationsgeschwindigkeit (plastische Körper) zum Ausdruck kommt.

Durch Zusammenstellung dieser beiden Diagramme erhält man ein anschauliches Bild über das mechanische Verhalten der verschiedenen Stoffe. Wir geben diese Systematik, welche vom British Rheologist's Club [15] ausgearbeitet wurde, in Fig. 2 wieder und wollen versuchen, das Material Schnee in diese Reihe einzugliedern.

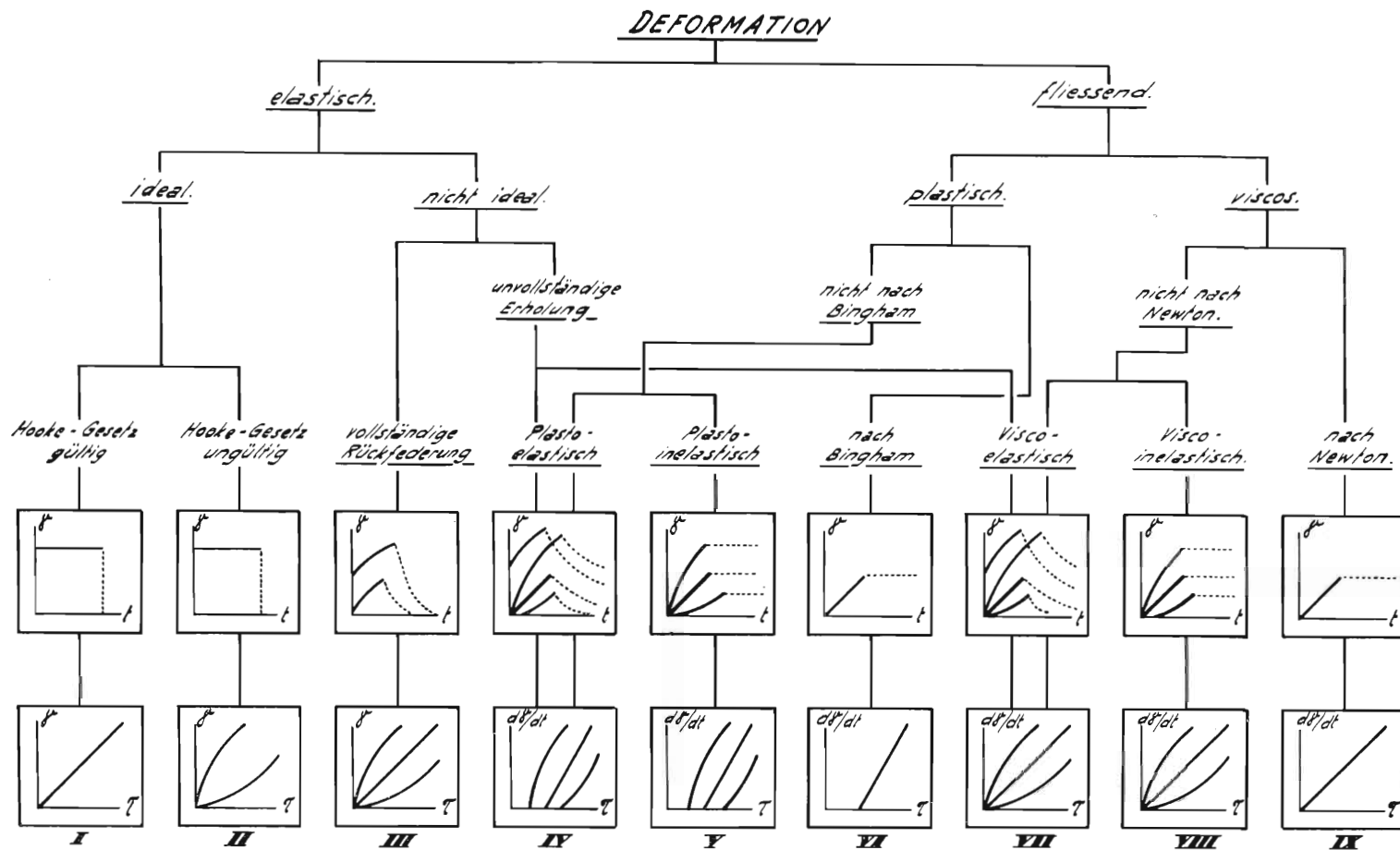


Fig. 2: Systematik der elastischen und plastischen Deformationen

Zu diesem Zweck betrachten wir zunächst die Extremfälle: Beim vollkommen elastischen Verhalten wächst die Deformationsgröße proportional zur einwirkenden Kraft und geht nach der Entlastung wieder auf Null zurück. Diese Stoffe gehorchen dem HOOKE'schen Gesetz

$$\gamma = \frac{1}{G} \cdot \tau \quad (1)$$

Beim vollständig viskosen Verhalten dagegen nimmt die Deformationsgröße bei konstant gehaltener Schubspannung proportional der Zeit zu und die Deformationsgeschwindigkeit wächst proportional mit der Schubspannung. Nach erfolgter Entlastung findet kein Rückgang der Deformation statt. Diese Stoffe gehorchen dem Gesetz von NEWTON

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \quad \begin{array}{l} (v = \text{Geschwindigkeit}) \\ (z = \text{Strecke}) \end{array} \quad (2 \text{ a})$$

welches gemäß Fig. 3 auch

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\eta} \cdot \tau \quad (2 \text{ b})$$

geschrieben werden kann.

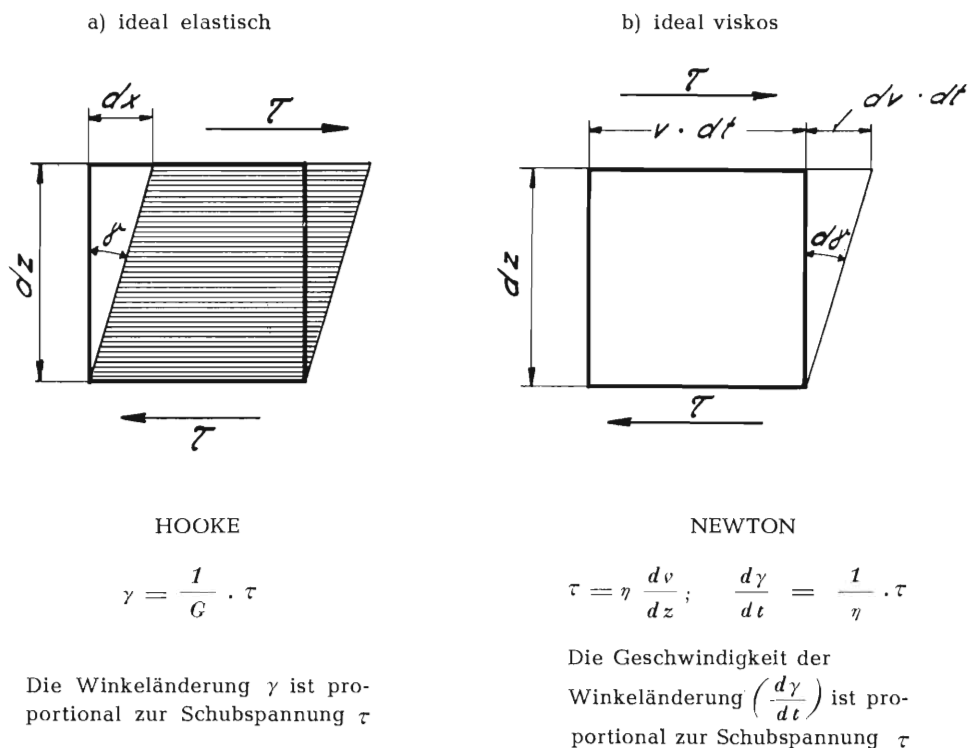


Fig. 3: Deformationen der ideal elastischen und ideal viskosen Stoffe

Zwischen den in Fig. 3 a und b dargestellten Extremfällen liegen eine Reihe technisch interessanter Stoffe, welche weder ein vollständig elastisches, noch ein ideal viskoses Verhalten aufweisen. Den ersten Anstoß zu deren wissenschaftlichen Untersuchung gab neben metallkundlichen Problemen vor allem die Frage nach den mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen aller Art. Es hat sich dabei gezeigt, daß sich bei diesen Materialien die plastischen und elastischen Eigenschaften vielfach überlagern. Doch bei der in neuerer Zeit stark entwickelten Kunststoffindustrie spielen gerade die Verformungserscheinungen eine entscheidende Rolle. Der Zustand der Materialien — gemeinhin als Konsistenz bezeichnet, worunter man die Eigenschaft eines Stoffes versteht, einer dauernden Formänderung Widerstand zu leisten — verlangt hier eine Unzahl von Prüfmethoden. In den meisten Fällen sind es rein empirische Verfahren, welche sich für bestimmte technologische Prüfungen als zweckmäßig erwiesen haben, für eine wissenschaftliche Definition jedoch ungeeignet sind. Erst die neuere Forschung ist etwas weiter in die Beziehungen zwischen Struktur und Konsistenz der Materie vorgedrungen. Dabei hat sich gezeigt, daß fast jede natürliche Deformation komplexe Effekte erkennen läßt und die Art des Verhaltens einer Substanz sowohl von der Temperatur, als auch von der Beanspruchungszeit abhängt. Man ist gewohnt von einem kalten Fluß, bzw. von einer Fließgrenze zu sprechen, welche den elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes gegenüber seinem plastischen Bereich abgrenzt. Die Uebergangszone kann oft durch das Gesetz von BINGHAM [9]

$$\frac{d\gamma}{dt} = f_3 \cdot (\tau - f_s) \quad (3)$$

charakterisiert werden, worin f_s die Bedeutung einer Fließgrenze bzw. Grenzspannung zukommt. Die Unterscheidung dieser Materialien von den zähen Flüssigkeiten besteht lediglich darin, daß beim plastischen Vorgang eine merkliche bleibende Deformation erst eintritt, wenn die angelegte Spannung einen untern Grenzwert f_s überschritten hat, während die zähen Flüssigkeiten, gemäß dem Gesetz von NEWTON, schon auf kleinste Kräfte plastisch reagieren.

Jeder feste Stoff verhält sich demnach in einem eng umgrenzten Bereich elastisch, kann aber durch Aenderung der äußeren Bedingungen plastische Eigenschaften annehmen. Es sind nicht nur die Stoffzusammensetzungen und Aufbaueigenschaften, sondern auch die Zustandsbedingungen — vor allem Art und Größe der Beanspruchung und die Temperatur — welche die Konsistenz des Materials bestimmen.

Sehr deutlich offenbart sich diese Erscheinung bei der mechanischen Untersuchung von Schneeproben: Je nach Temperatur und Belastungsvorgang verhalten sich diese wie feste Körper, plastische Stoffe oder zähe Flüssigkeiten. Wird eine Schneeprobe bei tiefen Temperaturen relativ geringen Spannungen ausgesetzt, so zeigt sich keine wesentliche Deformation, während dieselbe Beanspruchung bei hoher Temperatur eine relativ große, bleibende Formänderung erzeugt. Nähern wir uns dem Schmelzpunkt, so verschwinden die Merkmale der elastischen Stoffe vollständig und der Schnee verhält sich ähnlich einer zähen Flüssigkeit. Wo aber liegen die Grenzen und wie läßt sich die Aenderung des mechanischen Verhaltens erklären?

Diese Fragestellung ist nicht neu und wurde von MAXWELL schon im Jahre 1867 behandelt. Gemäß dieser Lehre besteht jede Deformation aus einem elastischen und einem plastischen Anteil, deren Werte sich gegenseitig überlagern und somit bei flüchtiger Betrachtung nur in ihrer Summe zum Ausdruck kommen.

Die MAXWELL'sche Formulierung:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\tau}{dt} \cdot \frac{l}{G} + \frac{\tau}{\eta} \quad (4)$$

kann demnach in rein mechanischer Betrachtung nach Vorschlag von HOUWINK [99] durch einen Doppelmechanismus gemäß Fig. 4 veranschaulicht werden. Das Modell besteht aus einer Feder und

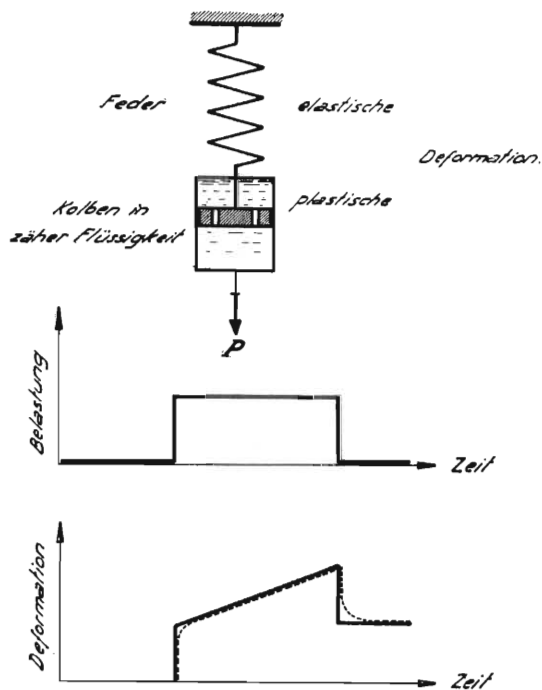


Fig. 4: Überlagerung elastischer und plastischer Längenänderungen (Modellvorstellungen)

einem in zäher Flüssigkeit beweglichen Kolben. Wird dieser gekoppelte Zugmechanismus durch kurzfristig wirkende, oder rasch ansteigende Kräfte beansprucht, so reagiert nur die Feder, während sich bei langandauernder Belastung auch der Kolben in Bewegung setzt und dadurch den elastischen Vorgang durch bleibende Längenänderungen überlagert. Die Deformationsgeschwindigkeit wird durch Belastungsvorgang, Federelastizität und Zähigkeit der Flüssigkeit bestimmt.

Für unsere späteren Betrachtungen sei deshalb zusammenfassend hervorgehoben, daß das mechanische Verhalten jedes Stoffes nicht nur von seinem chemischen und strukturellen Aufbau, eventuell seiner Vorgeschichte, sondern auch von Temperatur und Belastungsvorgang abhängig ist.

2. Begriff der Relaxation

Um die für das mechanische Verhalten eines Stoffes maßgebenden Faktoren, wie Spannungszustand, struktureller Aufbau und Temperatur, analysieren zu können, wollen wir diese getrennt betrachten und zuerst die Einwirkung äußerer Kräfte auf die Deformation diskutieren.

Integriert man die Differentialgleichung von MAXWELL, so ergibt sich die Beziehung

$$\gamma = \frac{\tau}{G} + \frac{1}{\eta} \cdot \int_0^t \tau \cdot dt \quad (5)$$

Die eintretende Formänderung hängt nicht nur von der momentanen Lastgröße, sondern auch von ihrem Zeitintegral ab. Eine bestimmte Deformation kann somit auf verschiedene Arten erzielt werden: durch kurzfristig wirkende große Spannungen, oder länger andauernde, kleinere Kräfte.

Die Bedingung einer konstanten Schiebungsgröße

$$\gamma = \text{konstant}; \quad \frac{d\gamma}{dt} = 0$$

hat MAXWELL zu einer neuen Formulierung verwendet. Er integriert die Differentialgleichung

$$\frac{d\tau}{dt} \cdot \frac{1}{G} + \frac{\tau}{\eta} = 0$$

und erhält

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{G}{\eta} \cdot t} \quad (6)$$

worin τ_0 die zur Zeit $t = 0$ anzulegende Schubspannung bedeutet. Führt man den etwas unglücklich gewählten, aber allgemein verwendeten Begriff der Relaxationszeit

$$T = \eta : G \quad (7) \quad \text{ein, so folgt:} \quad \tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (8) \quad \text{vergl. Fig. 5}$$

Diese Gleichung gibt Auskunft über die Schubspannung τ , welche während der Zeit t wirken muß, damit eine bestimmte Deformationsgröße resultiert. In unendlich kurzer Zeit (für $t \rightarrow 0$) wird dazu die Schubspannung τ_0 benötigt, die Verformung ist dann rein elastisch. Mit zunehmender Belastung τ nimmt die erforderliche Kraft exponentiell ab und klingt schließlich für unendliche Zeit zum Wert Null aus, was einem zähflüssigen Vorgang entspricht. T bedeutet diejenige Zeit, die es bei einem elasto-plastischen Vorgang braucht, um die für eine bestimmte Winkeländerung γ notwendige Schubspannung τ_0 auf ihren e -ten Teil absinken zu lassen und gibt damit ein Maß, um das Verhältnis zwischen dem elastischen und plastischen Anteil einer durch gegebenen Spannungszustand hervorgerufenen Deformation abzuschätzen. Je nach dessen Größe fällt die Belastung τ mehr oder weniger ins Gewicht. Große Relaxationszeiten sind Kennzeichen vornehmlich elastischen, kleine dagegen mehr plastischen Verhaltens. Damit ist eine Größe gefunden, welche mithilft, die Konsistenz eines gegebenen Stoffes zu definieren.

3. Abschätzung der Relaxationszeit des Schnees

Die Relaxationszeit T ist durch den Quotienten $\eta : G$ bestimmt. Für den Schubmodul G hat DE QUERVAIN [164] einige Messungen durchgeführt und für körnigen Schnee bei Temperaturen von -10°C eine Größenordnung (Dimensionen im technischen Maßsystem) von

$$G = 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \quad (9)$$

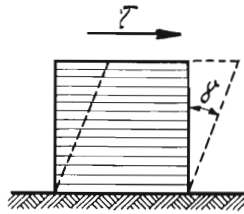
gefunden. Gegenüber dem Feststoff Eis ($G \cong 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), weist also das aus Eispartikeln bestehende Lockeraggregat einen wesentlich kleineren Schubmodul auf, eine Tatsache, welche SONDER [189] bereits an andern kristallinen Aggregaten festgestellt hat.

Ferner hat KUHN [103] gezeigt, daß die Elastizitätskoeffizienten bei den meisten Substanzen im Bereich geringer Temperaturdifferenzen nur sehr wenig variieren und für unsere Problemstellungen angenähert als konstante Werte betrachtet werden dürfen. Wir glauben also keinen großen Fehler zu begehen, wenn wir zur Abschätzung der Relaxationszeit mittelschwerer Schneearten einen konstanten Schubmodul von $G = 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ in Rechnung setzen.

Im Gegensatz dazu haben sich nun aber die Zähigkeitskoeffizienten als sehr stark temperaturabhängige Größen erkennen lassen. Rechnet man mit einem später noch zu belegenden Schwankungsbereich von η zwischen 10^6 und $10^{11} \text{ kg} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-2}$, so ergibt dies Relaxationszeiten, welche im betrachteten Temperaturbereich von 0°C bis -40°C zwischen 10 und 10^6 Sekunden variieren (Fig. 5).

Vergleichshalber sei erwähnt, daß WEINBERG [219] die Relaxationszeit von Gletschereis bei 0°C zu 480 Sekunden, bei -5°C zu 720 Sekunden bestimmt hat, Schnee also bei -40°C wesentlich größere Relaxationszeiten annehmen kann, als Eis im Bereich von -5°C . Was das andere Extrem anbetrifft, muß betont werden, daß sich unsere Zähigkeitsmessungen vorläufig ausschließlich auf Trockenschnee beziehen und mit der Durchnässung ein weiterer Abfall von η zu erwarten ist. Damit ergeben sich dann auch Relaxationszeiten, die Bruchteile von Sekunden betragen und sich derjenigen von blasfähigem Glas (10^{-4} sec) annähern [86].

Was rein gefühlsmäßig genügend bekannt ist, findet hier seine theoretische Bestätigung: das Material Schnee kann eine Reihe sehr verschiedener Konsistenzstadien durchlaufen. Die kleinsten Relaxationszeiten sinken bis zu denjenigen des blasfähigen Glases hinab, während das andere Extrem Relaxationszeiten von Feststoffen entspricht. Dazwischen liegt ein sehr weiter Spielraum und



τ_0 = notwendige Schubspannung bei rein elastischem Vorgang

τ = Schubspannung bei elasto-plastischem Vorgang

t = Zeit

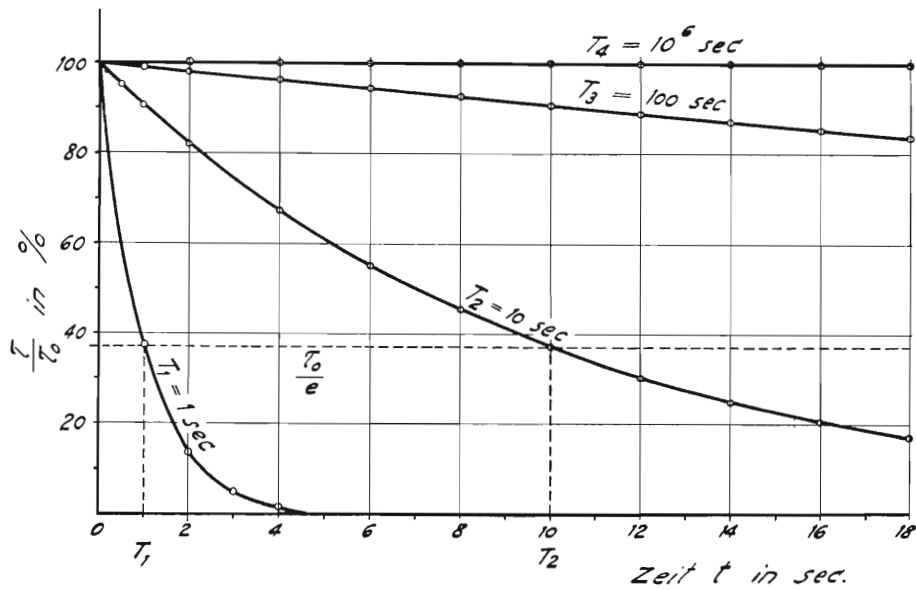
$T = \eta : G$ (Relaxationszeit)

η = Zähigkeitskoeffizient

G = Schubmodul

γ = Winkeländerung

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (8)$$



T bedeutet diejenige Zeit, die es bei einem elasto-plastischen Vorgang braucht, um die für eine bestimmte Winkeländerung γ notwendige Schubspannung τ_0 auf ihren e -ten Teil absinken zu lassen.

Fig. 5: Relaxationskurven für verschiedene Relaxationszeiten

es kommt ganz auf Belastungsweise und Temperatur an, wenn man entscheiden soll, ob im gegebenen Fall die elastischen oder plastischen Effekte vorherrschen. Allgemein läßt sich folgendes vermuten: Bei relativ hohen Temperaturen und vornehmlich statischen Belastungen (Eigengewichtsspannungen) darf Schnee ähnlich den zähen, kompressiblen Flüssigkeiten behandelt werden, hingegen sind bei dynamischen, also schlagartigen Krafteinwirkungen, wie sie beispielsweise bei der mechanischen Schneeräumung, der künstlichen Loslösung von Lawinen, oder bei Lawinenstürzen auftreten, auch die elastischen Effekte mitzubetrachten.

III. Plastizitätseigenschaften des Schnees

1. Ursachen des plastischen Verhaltens

Gemäß unserer generellen Untersuchung über elastische und plastische Formänderungen an Schnee entspricht jeder Krafteinwirkung eine bleibende Deformation. Anhand zahlreicher Laboratoriumsversuche konnte DE QUERVAIN [164] ferner nachweisen, daß der Kriechvorgang schon unter dem Einfluß kleinster Spannungen eintritt. Das Fehlen einer in der Größenordnung praktischer Werte liegenden Fließgrenze, sowie die bereits von HAEFELI [70] nachgewiesene, angenäherte Proportionalität zwischen Spannung und Deformationsgeschwindigkeit, verleihen dem Schnee gewisse Analogien mit einer zähen Flüssigkeit. Während man jedoch unter dem Begriff „zähe Flüssigkeit“ eine amorphe, porenfreie, viskose Masse versteht, stellt Schnee einen stark porösen, kristallinen Stoff dar. Trotz des verschiedenartigen Aufbaues weisen die beiden Substanzen hinsichtlich der Phänomenologie ihres mechanischen Verhaltens eine gewisse Ähnlichkeit auf. Um diese Analogie verstehen zu können, müssen wir auf die Schneeplastizität näher eingehen.

Betrachtet man den grundsätzlichen Verlauf der Zusammendrückung des Schnees in Funktion der Zeit unter einer konstanten Last gemäß Fig. 6, so läßt sich ein anfänglich rasches, mit der Ver-

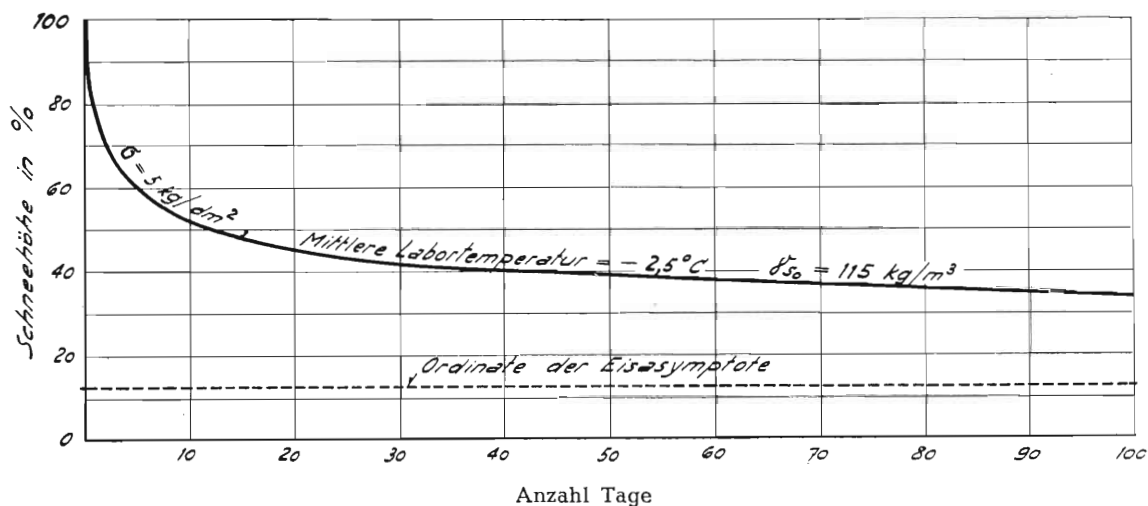


Fig. 6: Zusammendrückung des Schnees in Funktion der Zeit bei konstanter Auflast und Temperatur

suchsdauer langsam abklingendes Fließen bei gleichzeitiger Raumgewichtserhöhung feststellen. Die Probenhöhe erfährt eine fortschreitende Abnahme und strebt schließlich einem, durch die minimale Porosität gegebenen Endwert zu. Wir haben hier den einfachsten Fall einer plastischen Schneedeformation vor uns und müssen versuchen, diesen Vorgang zu analysieren.

An sich können sowohl bei der hier betrachteten Zusammendrückung, als auch ganz allgemein bei jeder anderen plastischen Schneedeformation, drei verschiedene Prozesse beteiligt sein, nämlich erstens eine Verschiebung der Einzelkristalle gegeneinander, zweitens Oberflächenverformungen der verschiedenen Kristalle und drittens innere Verformungen derselben. Im letztern Fall ist zu beachten, daß Eiskristalle die Fähigkeit besitzen, sich auf dem Wege eines Abgleitens des Kristalls mit der Ebene (0001) als Translationsfläche in wesentlichem Ausmaß plastisch zu verformen, in Analogie zu den Metallen, deren weitreichende plastische Verformbarkeit ja gleichfalls auf derartigen Gleitvorgängen beruht.

Im Gegensatz zu metallischen Aggregaten weist Schnee aber eine sehr lockere Struktur auf. Aus der hohen Porosität resultiert zwangsläufig auch eine große Gefügef়reiheit der Einzelkörner. Betrachtet man diese als starre Gebilde im Verband eines losen Haufwerkes, so ist ohne weiteres verständlich, daß sie sich unter dem Einfluß äußerer Kräfte gegeneinander verschieben können. Bei diesem Prozeß gleitet oder rollt jedes Korn über seine Nachbarn hinweg und leistet so seinen Anteil an die Gesamtverschiebung.

Nun haben ferner neuere Untersuchungen über den Mechanismus der Reibung gezeigt, daß sich die reibenden Teile selbst bei ebenen Flächen nur in einzelnen Punkten berühren. Wie BOWDEN [12] erwähnt, kann die effektive Berührungsfläche bei ebenen Stahlflächen weniger als $1/10\,000$ der äußeren geometrischen Dimensionen betragen. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache ist nun ohne weiteres verständlich, daß an den Berührungspunkten der Schneekristalle gewaltige Drücke entstehen müssen, welche ein „Verschmieren“ der Oberfläche zur Folge haben, indem einzelne Teile schmelzen oder verdampfen und dann im Druckschatten wieder auskristallisieren. Nach BOWDEN wird dieser Vorgang durch die bei der Bewegung entstehende Reibungswärme stark begünstigt und muß deshalb bei Stoffen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit — wie dies bei Schnee in hohem Maße zutrifft — sehr stark ins Gewicht fallen. Wenn also schon auf Grund des RIECKE'schen Prinzipes [184] gewisse Platzwechselvorgänge an der Kristalloberfläche zu erwarten sind, der ganze Stoffumsatz aber durch Wärmebildung infolge Reibung noch wesentlich erhöht wird, so muß die Berührungsfläche zwischen den einzelnen Kristallen als fluide Grenzschicht betrachtet werden, welche dem ganzen Aggregat eine starke Beweglichkeit verleiht. Das bei der großen Gefügef়reiheit zu erwartende Rollen und Gleiten der Kristalle wird durch oberflächliche Kristallverformungen in weitem Maße begünstigt.

Was nun die i n n e r e Kornverformung, bzw. das Gleiten im Kristall anbetrifft, sind wir geneigt, im porösen Schnee diesen Vorgang gegenüber dem Korngrenzenkriechen in den Hintergrund zu stellen und zwar aus dem einfachen Grund, weil sich damit weder die Größenordnung der Deformation, noch die im eingangs erwähnten Beispiel besprochene Raumgewichtserhöhung des Gesamttaggregates erklären ließe.

Wenn wir uns immer wieder daran erinnern, daß sich die Schneekristalle bezogen auf die Substanzwerte stets im Bereich hoher Temperaturen, ja sogar sehr nahe am Schmelzpunkt befinden, wenn wir uns ferner die fein ziselierten Formen mit den großen Krümmungen, und die damit zwangsläufig verbundene Kleinheit der Kontaktstellen gegenüber dem Gesamtquerschnitt vor Augen halten, so wird die Möglichkeit der Korngrenzenschiebung ohne weiteres verständlich.

Folgende Arbeitshypothese scheint deshalb geeignet, die Plastizität des Schnees zu verdeutlichen. In bildhafter Vorstellung wollen wir Schnee als Lockeraggregat betrachten, dessen Körner von zähflüssigem Leim umgeben sind (Fig. 7). Je nach Kristallform, Porenvolumen und Temperatur variiert dann auch die Zähigkeit des Stoffes. Lassen wir die Kornabrundung stetig

fortschreiten und das Material immer dichter werden, so erfahren die als Reibung bezeichneten inneren Widerstände, die unsere Substanz bleibenden Deformationen entgegensetzt, eine wesentliche Zunahme. Das Einzelkorn wird dann in seinem Verband immer mehr eingeengt, von allen Seiten gedrückt und schließlich so stark blockiert, daß ein Entweichen aus dem Kräftezwang nicht mehr denkbar ist. Damit ist aber auch die Möglichkeit gegeben, daß beim Verformungsprozeß die intrakristallinen Gleitvorgänge mehr und mehr ins Spiel treten und so die innere Verformbarkeit des einzelnen Kristalls zunehmend an Bedeutung gewinnt. Dann vor allem wird es naheliegen, nach Parallelen zu suchen, welche zwischen dem mechanischen Verhalten des Schnees und demjenigen anderer polykristalliner Körper, insbesondere der Metalle, bestehen. In diesem Sinn wird unsere Hypothese den praktischen Erscheinungen gerecht; inwieweit sie auch mit den Erfahrungen über das Kriechen anderer kristalliner Stoffe übereinstimmt, soll im Zusammenhang mit den Brucherscheinungen gestreift werden.

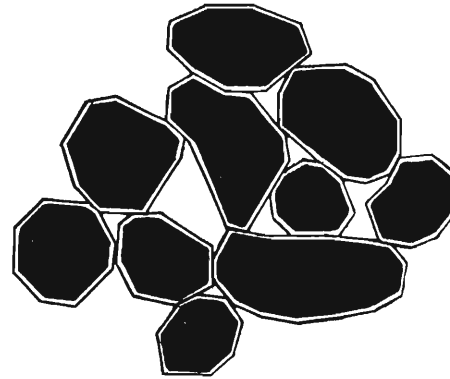
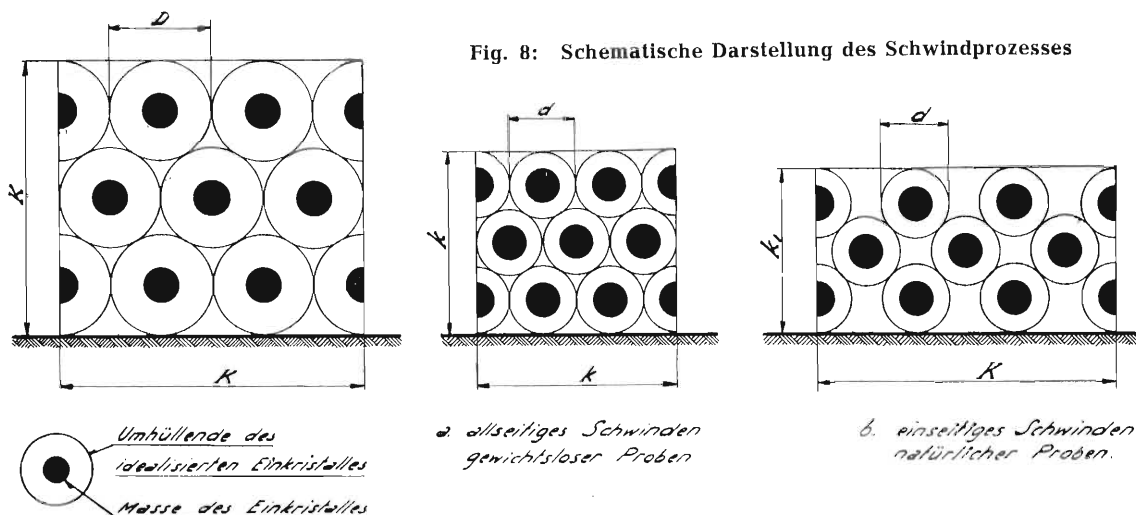


Fig. 7: Bildhafte Vorstellung des Schnees als Lockeraggregat, dessen Körner von zähflüssigem Leim umgeben sind.

2. Das Schwinden und dessen Einfluß auf die Plastizitätskoeffizienten

Auf Grund der Kristallmetamorphose ist anzunehmen, daß sich Neuschneeproben auch unter Ausschluß äußerer Kräfte mit der Zeit verdichten, also einem Schwindprozeß unterliegen, welcher ähnlich dem Schwinden des Betons, oder — mit negativem Vorzeichen — wie das Wachsen von Gußeisen verläuft. Zum besseren Verständnis dieses Schwindvorganges sei die betrachtete Schneeprobe durch ein aus Kugeln zusammengesetztes, mechanisches Modell gemäß Fig. 8 ersetzt. Denken wir uns die gesamte Eismasse eines Kristalles in dessen Mitte gleichsam als Kern konzentriert, und wählen den Radius der umhüllenden Kugelfläche entsprechend seinem Platzanspruch im Aggregat, so können wir pro Volumeneinheit ebensoviel Kugeln zusammenfügen, wie Schneekristalle darin enthalten sind. Dank der Massenkonzentration stimmt auch das Raumgewicht des Kugelmodells mit demjenigen der gewählten Schneeprobe überein.



Das Auftreten einer fluiden Grenzschicht³ läßt sich dadurch nachbilden, daß man die Kugeln vorerst in ein Oelbad taucht und so die innere Reibung des Modells derjenigen des Schnees anpaßt.

Wird ein derartiger Versuchskörper durch äußere Kräfte beansprucht, so werden sich plastische Deformationen einstellen, welche mit denjenigen des Schnees verglichen werden können. Daß es sich dabei lediglich um eine grobmechanische Betrachtung handeln kann, wobei die Vorgänge im Innern der Schneekristalle keineswegs zum Ausdruck kommen, versteht sich von selbst. Doch ist unser Kugelmekanismus befähigt, die Verformungserscheinungen infolge äußerer und innerer Kräfte einigermaßen zu illustrieren.

Wie wir schon mehrmals erörtert haben, nimmt der Platzanspruch jedes einzelnen Neuschneekristalles während seiner durch innerkristalline Kräfte bestimmten Oberflächenveränderung stetig ab. Dieser Erscheinung kann man im Modell dadurch gerecht werden, daß man die Kugelradien in Gedanken ebenfalls abnehmen läßt. Nimmt man an, daß die zusammenschrumpfenden Kugeloberflächen stets aneinander haften, so muß auch das Gesamttaggregat einen Schwindprozeß erleiden.

Aehnlich liegen die Verhältnisse beim natürlichen Schneeaggregat, wobei allerdings zwei verschiedene Phasen in der Aggregatveränderung unterschieden werden müssen. In ihrem ersten Teil verläuft die Metamorphose im Sinne einer Oberflächenverkleinerung, wobei also der Platzanspruch der Kristalle wie in unserem Kugelmodell zusehends kleiner wird. Nachdem aber die Verästelungen eingezogen sind und der Kristall eine minimale Oberfläche erreicht hat, beginnt die zweite Phase der Anpassung, nämlich das Wachstum einzelner Körner auf Kosten ihrer Nachbarn im Sinne einer Sammelkristallisation. Dementsprechend muß der beim Neuschnee festzustellende Schwindprozeß mit zunehmendem Fortschreiten der Metamorphose asymptotisch ausklingen bzw. ganz aufhören.

Versuchen wir diese Schwinderscheinung experimentell nachzuweisen! Da wir uns nicht ohne weiteres dem Schwerfeld entziehen können, wählen wir mehrere gleichbeschaffene Schneeproben und beanspruchen einen Teil davon auf Zug, den andern auf Druck. Trägt man die Deformationsgröße jeder Probe nach einer bestimmten Zeit t_1 in Funktion der Belastung auf, so kann die Längenänderung für den Spannungsnullpunkt interpoliert werden. Wie Fig. 9 a zeigt, würde die unbelastete Schneeprobe in der betrachteten Zeit t_1 eine Verkürzung erfahren. Es ist dies der in der Längsrichtung zum Ausdruck kommende Schwindeinfluß während der Zeit t_1 .

Unser Diagramm der Längenänderung gibt aber auch Aufschluß über die Größenordnung der dabei wirksamen Kräfte. Verfolgt man die Deformationskurve in Fig. 9 a bis zu jenem Punkt, in welchem diese die Abszissenaxe schneidet, also dort wo die Deformation effektiv gleich Null wird, so läßt sich dafür eine gewisse Spannung zuordnen. Es handelt sich um diejenige Zugspannung σ_s^I , welche nötig ist, um den Einfluß des Schwindens zu kompensieren. Wir entnehmen daraus die bedeutungsvolle Tatsache, daß bei der Umkristallisation der Schneekristalle gewisse Energien frei werden. Unsere Kompensationsspannung leistet die gleiche Arbeit, wie die Summe der interkristallinen Kräfte. Wie das erwähnte Diagramm zeigt, scheint ihr Wert mit zunehmender Versuchsdauer etwas abzunehmen, zeigt also — wie die Metamorphose — einen mit der Zeit abklingenden Verlauf.

Betrachtet man nun die infolge der äußeren Kräfte eintretenden plastischen Deformationen in Fig. 9 b, so kann man dem Schwinden auch eine gewisse Zusammendrückungskurve zuweisen. Man erhält so den Verlauf der Probenhöhe bei Wegfall äußerer Kräfte, also eine korrigierte Nullaxe. In bezug auf diese Linie werden die bei gleich großer Zug- resp. Druckspannung resultierenden Deformationen angenähert gleich groß.

Das Schwinden des Schnees wirkt sich im Sinne einer Ueberlagerung des Deformationsvorganges infolge äußerer Kräfte aus. Wegen seiner Einseitigkeit erfährt die Dehnung einen Abzug, die Zu-

³ Vergl. Fußnote auf S. 11

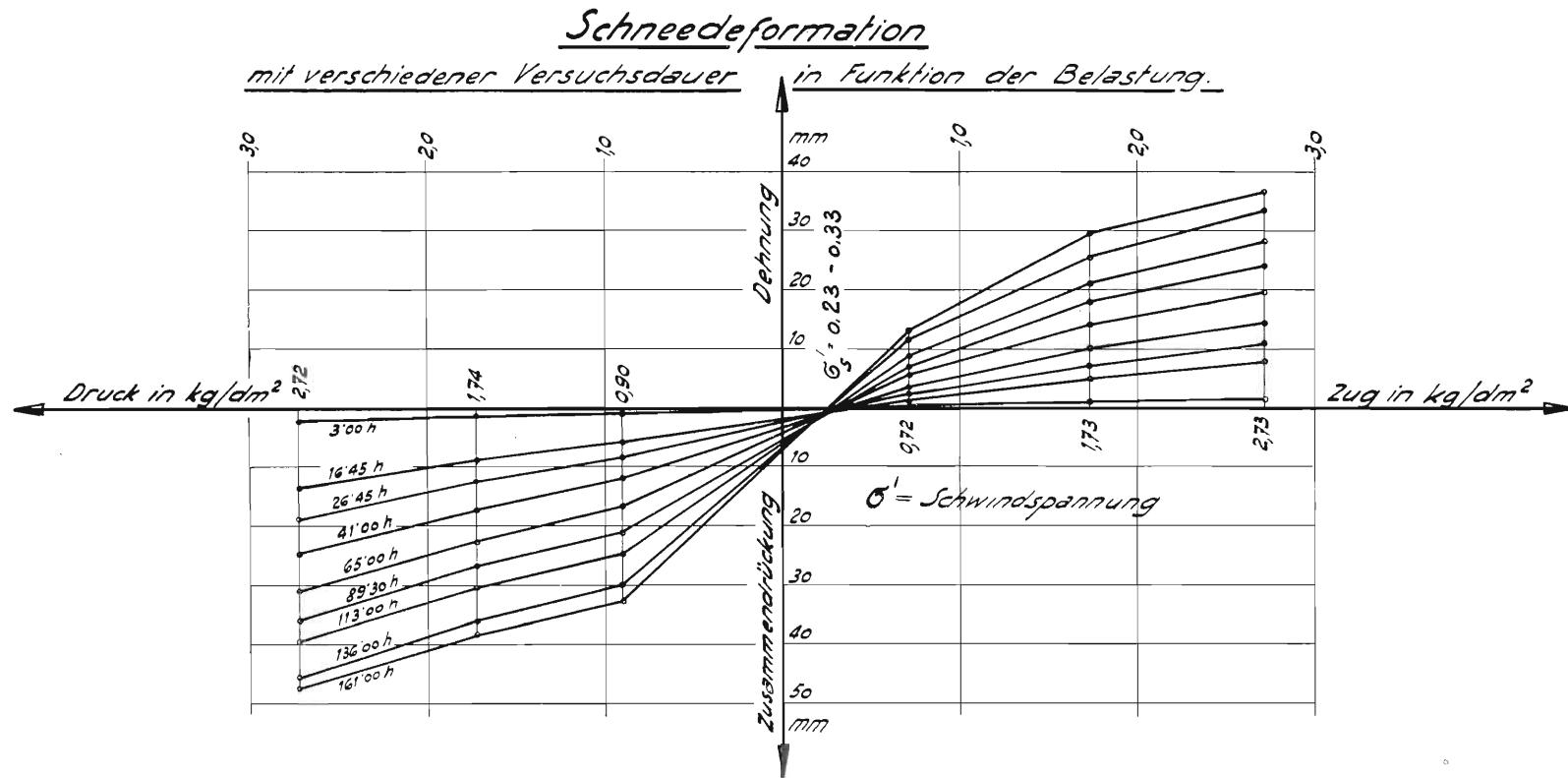


Fig. 9 a: Längenänderungen zylindrischer Proben nach verschiedenen Zeiten in Funktion der Belastung

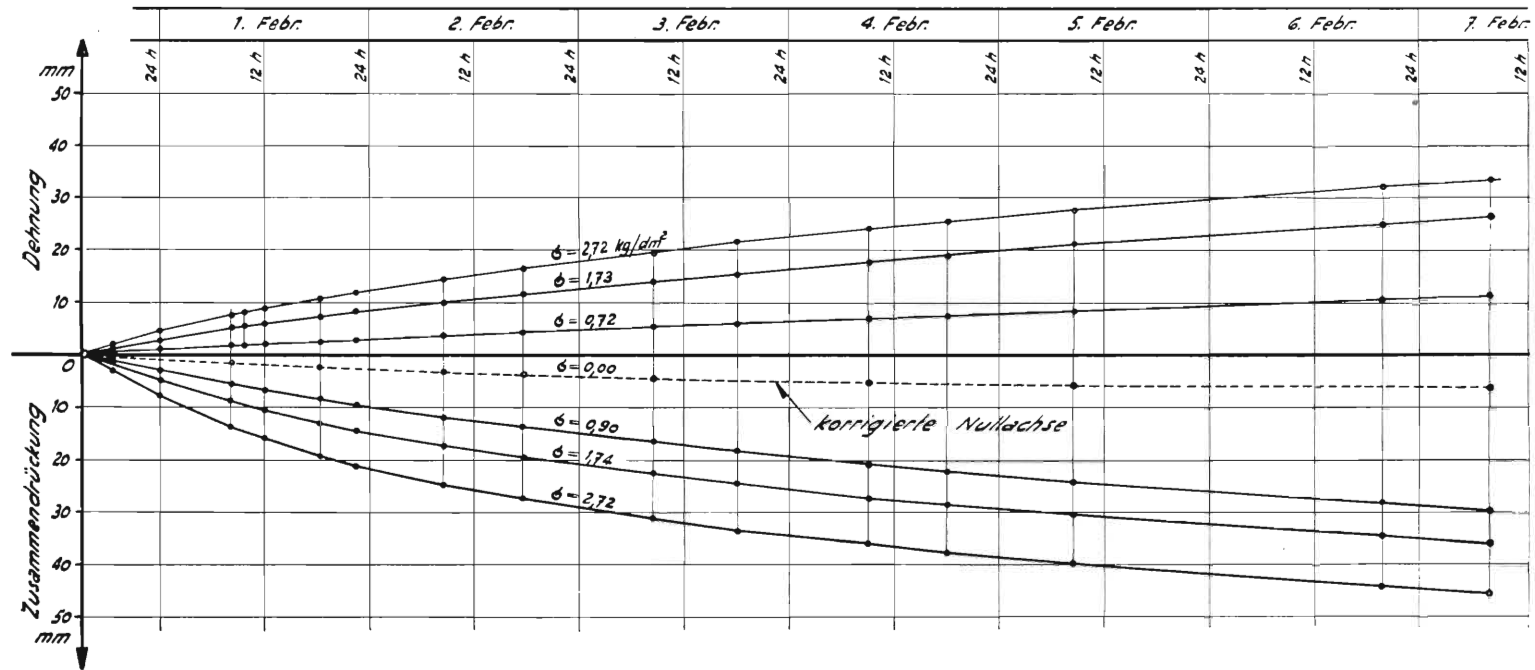


Fig. 9 b: Längenänderungen zylindrischer Proben bei verschiedenen Belastungen in Funktion der Zeit

sammendrückung einen Zuschlag. In den Querdehnungen läßt sich konsequenterweise das Gegenteil feststellen: die Zugprobe erfährt eine zusätzliche Querkontraktion, die Druckprobe eine reduzierte Querdehnung.

Der Gedanke liegt also nahe, die Schwindspannungen als allseitig wirkende, äußere Kräfte zu deuten, welche den übrigen Spannungszustand überlagern. Spaltet man diese ab, so wird die spezifische Zusammendrückungsgeschwindigkeit gleich der spezifischen Dehnungsgeschwindigkeit, und auch für die Querdeformationen läßt sich bei Zug und Druck die gleiche Querszahl einführen.

Zur mathematischen Formulierung dieser Feststellungen wollen wir die von HAEFELI [70] eingeführten Bezeichnungen verwenden:

a_1 = spez. Dehnungsgeschwindigkeit für $\sigma = 1 \text{ kg/dm}^2$ (Zug)

a_2 = spez. Zusammendrückungsgeschwindigkeit für $\sigma = 1 \text{ kg/dm}^2$ (Druck)

$a_3 = \frac{l}{\eta}$ = spez. Schiebungsgeschwindigkeit für $\tau = 1 \text{ kg/dm}^2$ (s. Gl. 2 b, S. 14)

Vernachlässigt man die den Eigengewichtsspannungen untergeordneten Schwindspannungen, so wird

$$a_1 \cong a_2 \quad (10)$$

und es bleibt lediglich deren Größenordnung mit a_3 , der spezifischen Schiebungsgeschwindigkeit, zu vergleichen, um schließlich den Anschluß an den nach NEWTON definierten Zähigkeitskoeffizienten wieder herzustellen.

Zu diesem Zweck verwendet man am einfachsten die aus dem Bereich elastischer Deformationen bekannte Beziehung zwischen Elastizitätsmodul E , Schubmodul G und Querszahl m^*

$$\frac{E}{G} = 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{m^*} \right) \quad (11)$$

welche sich ohne weiteres auch auf bleibende Deformationen übertragen läßt.

Bezeichnet man die Querszahl bei plastischer Längenänderung mit m , so geht Gleichung 11 in folgende Form über:

$$\frac{a_3}{a_1} \cong \frac{a_3}{a_2} \cong 2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) = c$$

$$\text{also} \quad a_1 \cong a_2 \cong \frac{a_3}{c} \quad (12)$$

eine Beziehung, auf die schon HAEFELI [71] hingewiesen hat.

Läßt man in dieser Gleichung die Querszahl m alle möglichen Werte durchlaufen, welche bei maximaler Porosität (Neuschnee) ∞ , bei minimaler Porosität (Eis) 2 beträgt, so variiert Wert c der Gleichung 12 lediglich zwischen 2 (maximale Porosität) und 3 (minimale Porosität), d. h. die spezifische Schiebungsgeschwindigkeit weist dieselbe Größenordnung auf, wie die spezifische Längenänderungsgeschwindigkeit. Mit andern Worten: die Widerstände, welche das Material Schnee einer bleibenden Längenänderung entgegensetzt, sind von gleicher Größenordnung wie die nach NEWTON definierten Schiebungs-widerstände. Wird eine Schneeprobe durch äußere Kräfte beansprucht, so sind die eintretenden Geschwindigkeitsgradienten angenähert proportional der angelegten Spannung und umgekehrt proportional dem Zähigkeitskoeffizienten η , unabhängig davon, ob es sich um Zug-, Druck- oder Scherspannung handelt.

Es gelten somit folgende Näherungsgleichungen:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\eta} \cdot \tau \text{ (Schiebung)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} \cong \frac{1}{c \cdot \eta} \cdot \sigma \text{ (Zug)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} \cong \frac{1}{c \cdot \eta} \cdot \sigma \text{ (Druck)} \quad (15)$$

Der Wert c liegt nach Vorstehendem zwischen 2 und 3.

Diese Beziehungen sollen nachstehend nur benützt werden, um die Größenordnung der Zähigkeitskoeffizienten, bzw. ihre Änderung mit Schneeart und Temperatur auf einfache Art zu bestimmen.

3. Die Zähigkeit des Schnees

Zur Bestimmung des Zähigkeitskoeffizienten in Funktion von Schneeart und Temperatur können prinzipiell die vier in Fig. 10 skizzierten Apparaturen verwendet werden. Es sind dies: a) Scherapparat, wobei Schiebung und Zusammendrückung infolge Eigengewicht gemessen werden, b) Torsionsapparat mit Spiegelablesung, c) Zugapparat und d) Druckapparat.

Unser erstes Ziel muß sein, den weiten Streubereich der Zähigkeitskoeffizienten zu umgrenzen und die verschiedenen Einflüsse von Korndurchmesser, Raumgewicht und Temperatur abzutasten. Zur Durchführung von derartigen Serienversuchen eignen sich am besten einfache Druckapparate gemäß Fig. 10 d, da in diesem Fall der Einbau der Schneeprobe sehr einfach wird.

Bezeichnet man die momentane Geschwindigkeit, welche bei der Zusammendrückung infolge der äußeren Belastung entsteht mit $\frac{dl}{dt}$, die Probenlänge zur Zeit $t = 0$ mit l_0 , zur Zeit t mit l , so folgt bei Vernachlässigung der Querdehnung

$$\frac{dl}{l} = -a_2 \cdot \sigma \cdot dt \quad (16 a)$$

$$a_2 = -\frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{1}{\sigma}$$

(a_2 = spezifische Längenänderungsgeschwindigkeit, also pro Längeneinheit und für Belastung $\sigma = 1$)

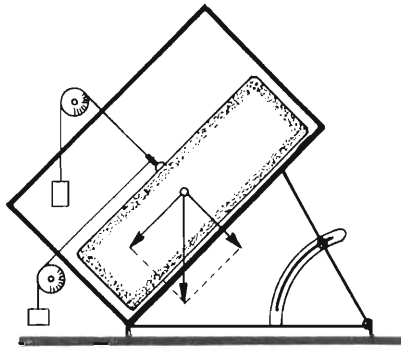
$$\left| a_2 \right| = \frac{m^2}{kg \cdot sec}; \quad \left| \eta \right| = \frac{kg \cdot sec}{m^2}$$

Drückt man a_2 gemäß Gleichung 15 durch c und η aus, so folgt, da $\frac{\partial v}{\partial z}$ durch $\frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l}$ zu ersetzen ist:

$$\frac{dl}{l} = -\frac{1}{c \cdot \eta} \cdot \sigma \cdot dt \quad (16 b)$$

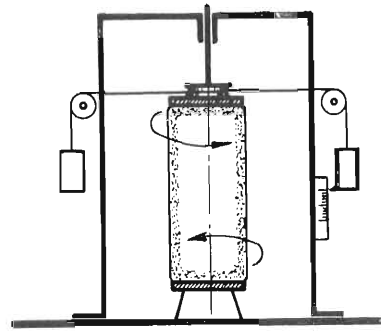
$$\ln l = -\frac{1}{\eta} \cdot \sigma \cdot t + \ln l_0 \quad (17)$$

$$\eta = \frac{\sigma \cdot t}{c \cdot \ln \left(\frac{l_0}{l} \right)} \quad (18)$$



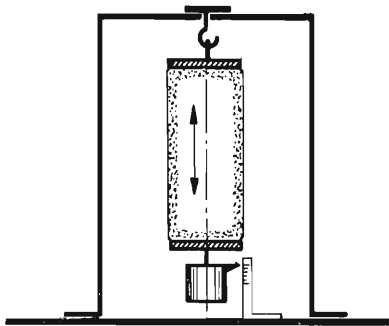
a) Scherapparat

Messung von Zusammendrückung
und Schiebung
Nachteil: große Abmessungen der
Schneeprobe



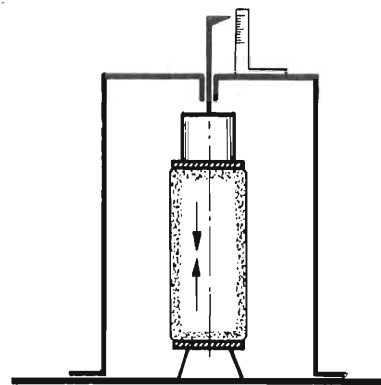
b) Torsionsapparat

Messung der Verdrehung gibt ge-
naue Werte für η
Zeitraubender Einbau



c) Zugapparat

Messung der Verlängerung gibt nur
angenäherte Werte für η
Zeitraubender Einbau



d) Druckapparat

Messung der Zusammendrückung
gibt nur angenäherte Werte für η
Geeignet für Serienversuche
Einfache Versuchsanordnung

Fig. 10: Apparate zur Bestimmung der Zähigkeit des Schnees

Wie nachfolgend gezeigt wird, schwankt η in sehr weiten Grenzen. Zur Abschätzung der Größenordnung hat c somit keinen wesentlichen Einfluß und kann gleich 1 gesetzt werden.

Bei verschiedenen Schneearten und Temperaturen, also für die Gesamtspanne unseres Materials, haben wir den in Fig. 11 angegebenen Schwankungsbereich gefunden. Das Minimum erhält man für Neuschnee in der Nähe von Null Grad mit etwa $10^6 \text{ kg} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-2}$, das Maximum dagegen für grobkörnigen Altschnee im Bereich tiefer Temperaturen (-40°) mit etwa $10^{11} \text{ kg} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-2}$. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß der Minimalwert für trockene Schneearten gilt und mit beginnendem Schmelzprozeß eine weitere Abnahme erfolgen muß, welche nicht näher untersucht wurde.

Unter Berücksichtigung des hier dargelegten, enormen Schwankungsbereiches sieht man sofort, daß man sich bei den ersten Untersuchungen auf die Festlegung der Größenordnung beschränken und gleichzeitig versuchen muß, die durch den Wechsel von Temperatur, Raumgewicht und Kornzusammensetzung gegebenen Veränderungstendenzen zu erfassen.

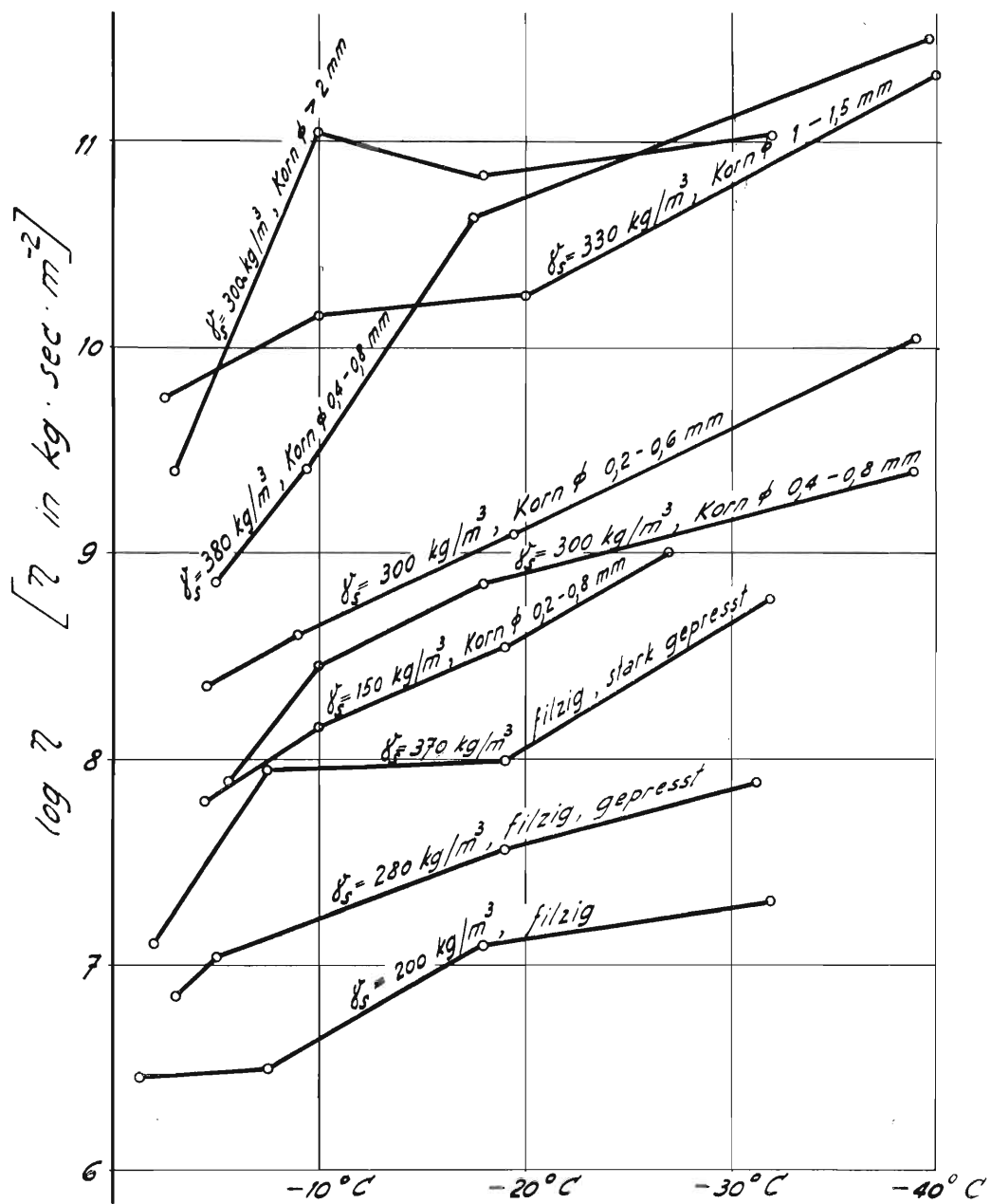
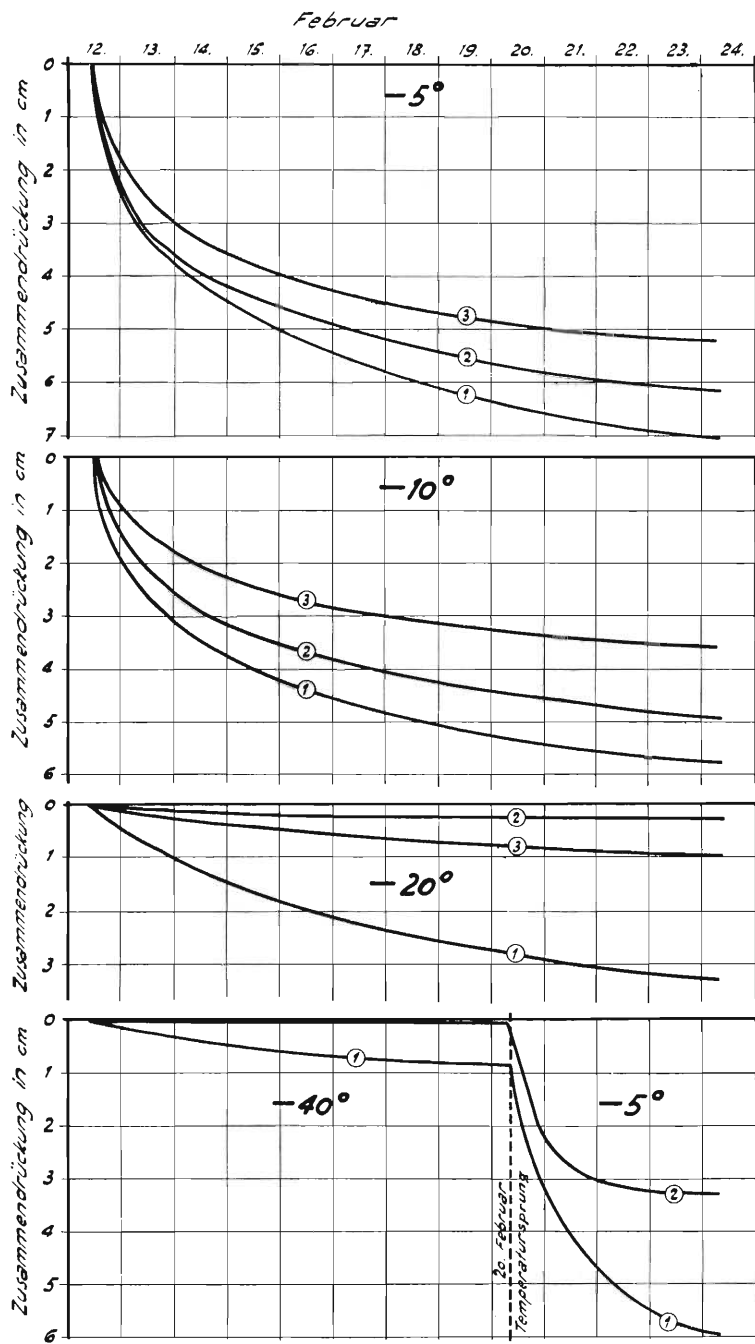


Fig. 11: Zusammenstellung der Zähigkeitsversuche



γ_{so} Anfangsraumgewicht

γ_{se} Endraumgewicht

-5°

Probe	γ_{so} in kg/m^3	γ_{se} in kg/m^3
1	185	322
2	219	323
3	245,6	340

$\sigma = 2 \text{ kg/dm}^2$

-10°

Probe	γ_{so} in kg/m^3	γ_{se} in kg/m^3
1	193	278
2	213	289
3	259	320

$\sigma = 2 \text{ kg/dm}^2$

-20°

Probe	γ_{so} in kg/m^3	γ_{se} in kg/m^3
1	203	246
2	214	218
3	257,4	271

$\sigma = 2 \text{ kg/dm}^2$

-40° / -5°

Probe	γ_{so} in kg/m^3	γ_{se} in kg/m^3
1	203	297
2	224	272

$\sigma = 2 \text{ kg/dm}^2$

Fig. 12: Zusammendrückung in Funktion der Temperatur

Beginnen wir mit der Abhängigkeit der Zähigkeit von der Temperatur des Aggregates, da dieser Einfluß bei jeder mechanischen Untersuchung sehr augenfällig wird. In Fig. 12 wurde beispielsweise die Zusammendrückung gleicher Schneeproben für verschiedene Temperaturen dargestellt. Die Intensität des Vorganges ist in der Nähe der Nullgradgrenze sehr groß; die Kurve erhält einen starken Abfall. Bei tiefen Temperaturen hingegen zeigen die Kurven beinahe gradlinigen Verlauf, mit geringer Neigung gegen die Zeitachse. Am deutlichsten erkennt man die enormen Einflüsse der Temperatur im untersten Diagramm; die Schneeproben wurden bei diesem Versuch von anfänglich -40° auf -5° erwärmt und weisen dementsprechend in der Zusammendrückungskurve eine deutliche Diskontinuität auf.

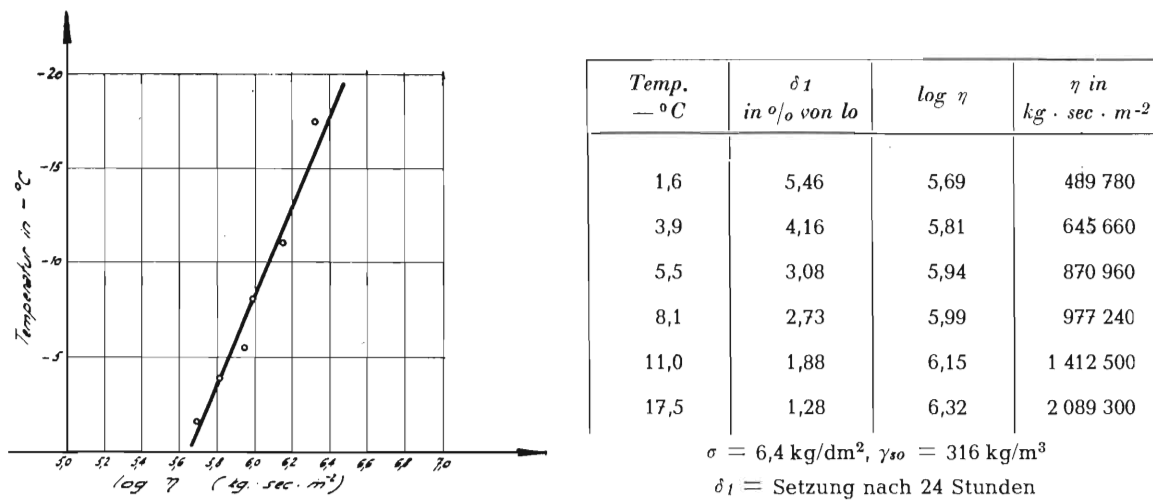


Fig. 13: Zähigkeit in Funktion der Temperatur

So können für dasselbe Material und die gleichen Belastungen ganz verschiedene Setzungswerte erzielt werden, wie schon HAEFELI in seiner Schneemechanik [70] auf Grund eines unserer damaligen Eiskastenversuche erwähnt. Die in Fig. 13 dargestellten Auswertungen ergaben ein Streuen des Meßpunktes für die Zähigkeit um eine Gerade, wenn man sich des logarithmischen Maßstabes bedient. Wir erhalten also Exponentialkurven, d. h. eine starke Abnahme der inneren Reibung mit zunehmender Temperatur, wie dies auch in Fig. 14 zum Ausdruck kommt.

Ferner zeigt sich hierin auch ein gewisser Einfluß des Raumgewichtes: schwere Schneeproben sind auf Temperaturschwankungen bedeutend empfindlicher als leichte. Offenbar spielt dabei die Anzahl der Kontaktstellen im Aggregat eine Rolle.

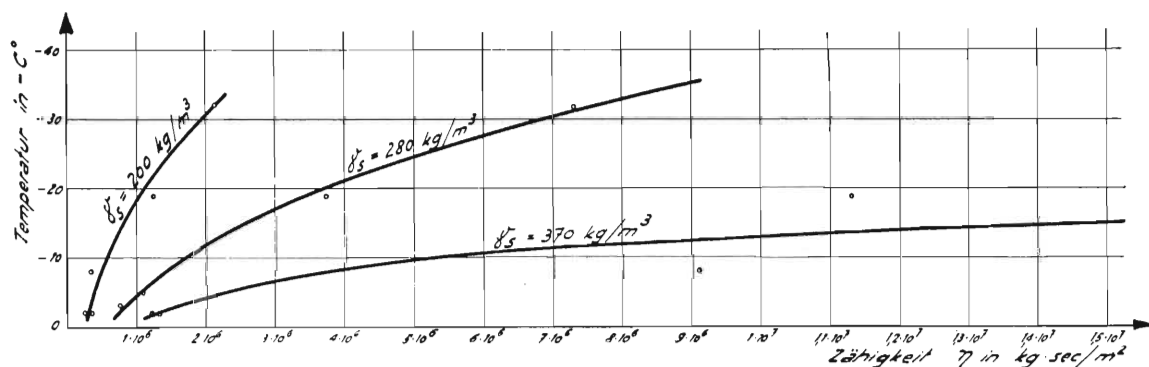


Fig. 14: Zähigkeit von Neuschnee in Funktion der Temperatur und des Raumgewichtes
(Raumgewicht als Parameter)

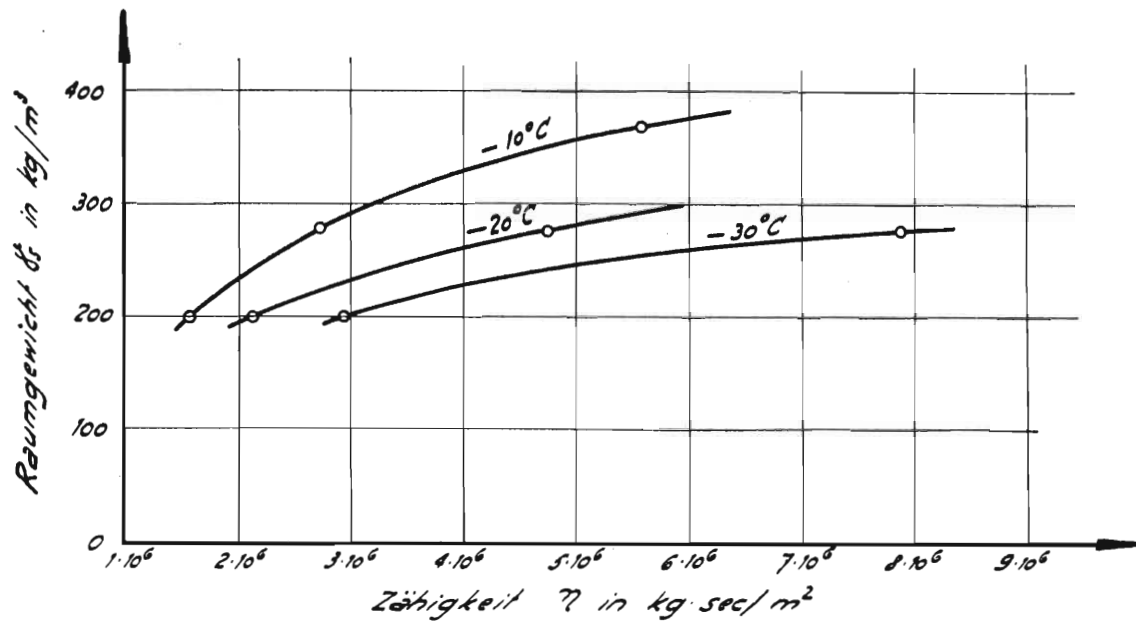


Fig. 15: Zähigkeit von Neuschnee in Funktion des Raumgewichtes bei verschiedenen Temperaturen
(Temperatur als Parameter)

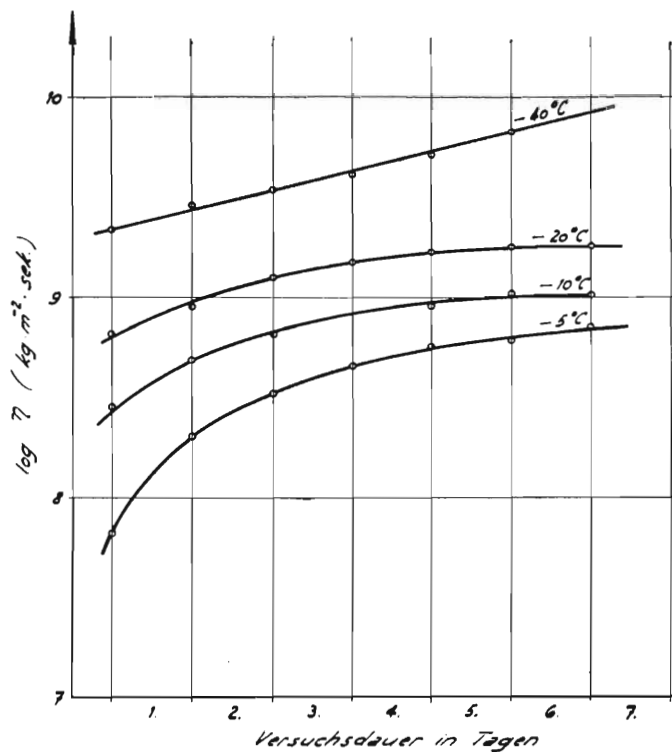
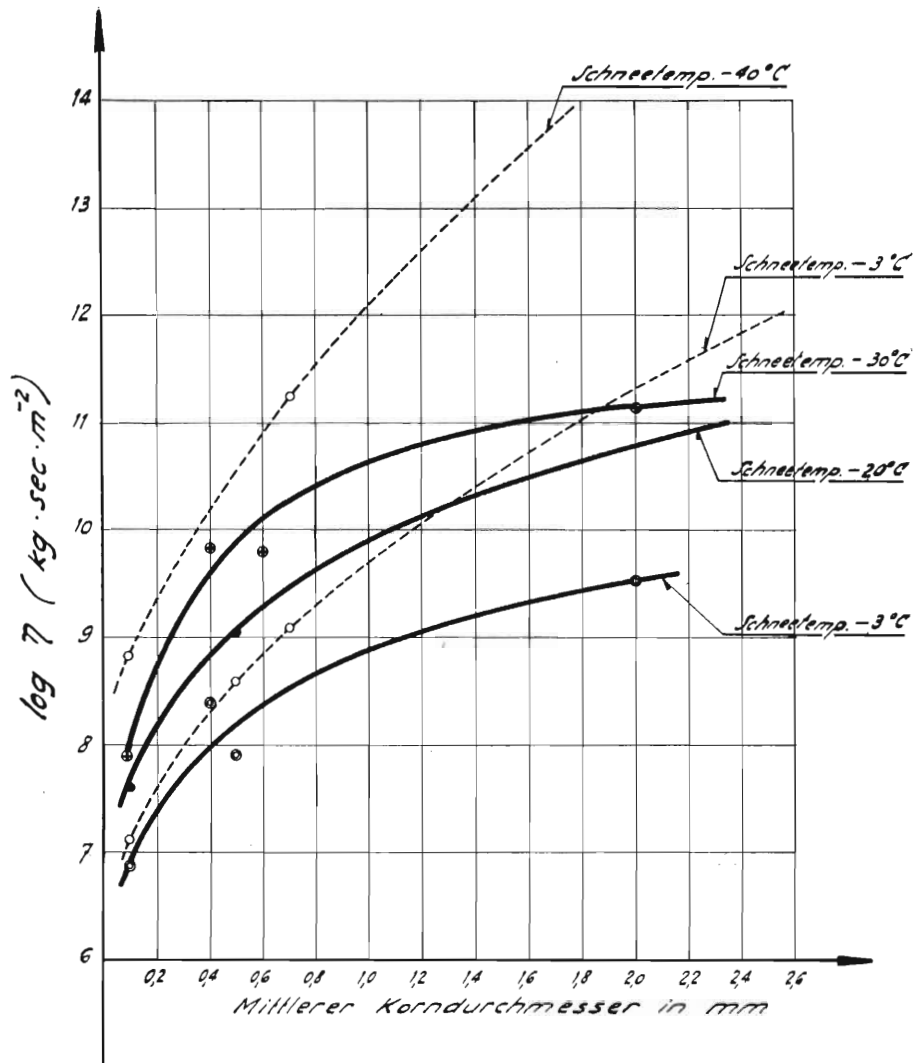


Fig. 16: Zähigkeit in Funktion der Versuchsdauer
(Druckversuche)

$\sigma = 1 \text{ kg/dm}^2$
 $\gamma_{50} = 300 \text{ kg/m}^3$
 mittlerer Korndurchmesser = 0,6 mm

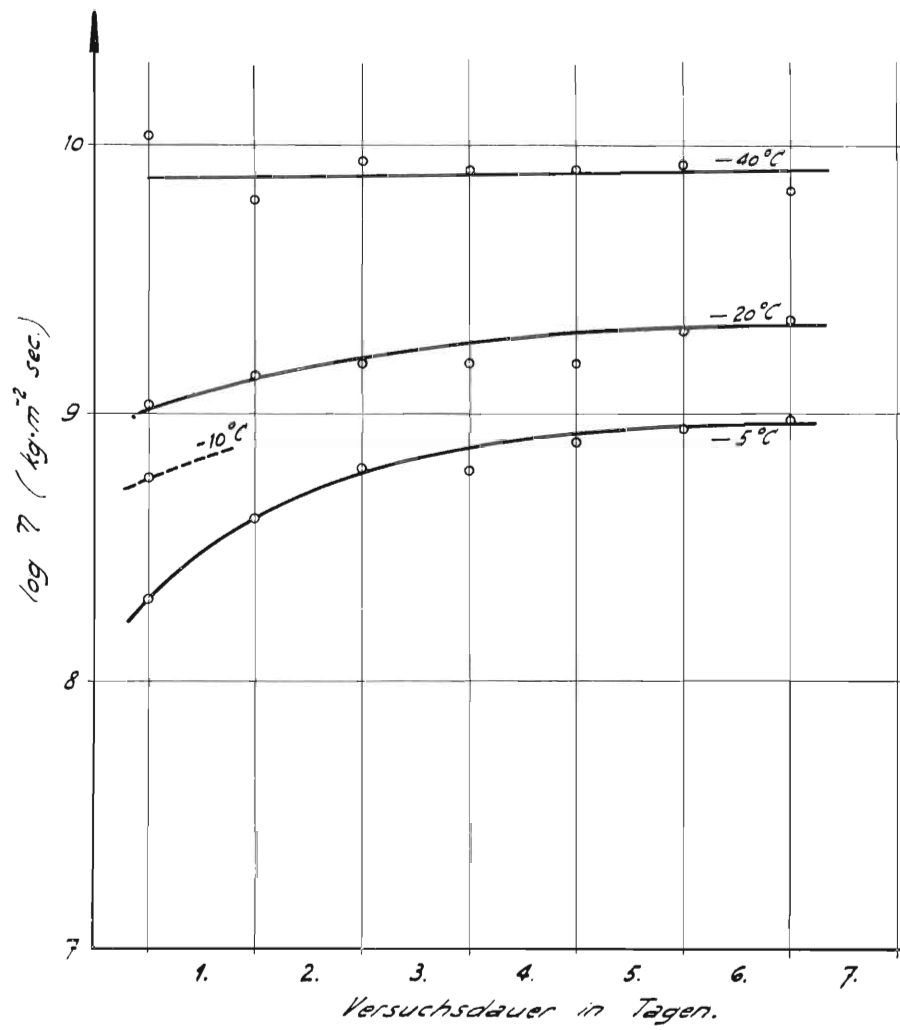
Zeichnen wir Fig. 14 um und wählen die Temperatur als Parameter, so kommt die Zunahme der Zähigkeit des Schnees mit dem Raumgewicht zum Ausdruck (Fig. 15). Es ist dies offenbar dem wachsenden Gefügewiderstand innerhalb der Probe zuzuschreiben, welcher das einzelne Korn in seinem Verband fixiert. Aus diesem Grunde erfährt die Druckprobe auch ein wesentliches Abklingen der Deformationskurve in Funktion der Zeit; die Verdichtung des Materials wirkt sich im Sinne einer Abnahme der Plastizität aus, wie dies auch aus Fig. 16 ersichtlich ist.

In einer Reihe körniger Schneearten mit Durchmessern zwischen 0,2—2,0 mm haben wir ferner versucht, den Einfluß der Korngröße auf die Zähigkeit des Schnees hervorzuheben. Wir entnehmen aus Fig. 17 die Tatsache der größeren Plastizität feinkörniger Aggregate gegenüber den grob-



..... Raumgewicht $\gamma_{so} = 370 \text{ kg/m}^3$
 ———— Raumgewicht $\gamma_{so} = 300 \text{ kg/m}^3$

Fig. 17: Zähigkeit in Funktion der Korngröße



$$\gamma_{\text{so}} = 300 \text{ kg/m}^3$$

$$\sigma = 1 \text{ kg/dm}^2$$

mittlerer Korndurchmesser = 0,6 mm

Fig. 18: Zähigkeit in Funktion der Versuchsdauer
(Zugversuche)

körnigen. Je mehr Einzelteile pro Volumeneinheit vorhanden sind, umso besser läßt sich unser Material deformieren. Es kommt darin der additive Charakter des Deformationsmechanismus zum Ausdruck; jeder Baustein leistet seinen Beitrag an die Gesamtverschiebung. Umgekehrt folgt aus dieser Ueberlegung die praktisch wichtige Tatsache der relativ großen Zähigkeit grobkörniger Schneeproben im Vergleich zum filzigen oder feinkörnigen Aggregat.

Damit ist auch der Schlüssel für eine physikalische Deutung der Zunahme des Zähigkeitskoeffizienten beim Zugversuch in Funktion der Zeit gefunden. Der Schnee erfährt mit der Versuchsdauer eine fortschreitende Metamorphose im Sinne einer Kornvergrößerung; die Zähigkeit nimmt zu. Im Grunde genommen zeigen sich also ähnliche Konsequenzen wie beim Druckversuch, nur sind diese durch andere Umstände bedingt. Auch nicht verdichtete Schneeproben werden mit der Zeit relativ unplastisch: eine bedeutungsschwere Tatsache, auf die wir bei der Besprechung der natürlichen Schneedeckenentwicklung nochmals zurückkommen werden (Fig. 18).

Zusammenfassend zeigen sich also folgende, aus Fig. 19 ersichtliche Tendenzen: Jede Verdichtung, Kornvergrößerung oder Temperaturabnahme hat eine Zunahme der Zähigkeit zur Folge.

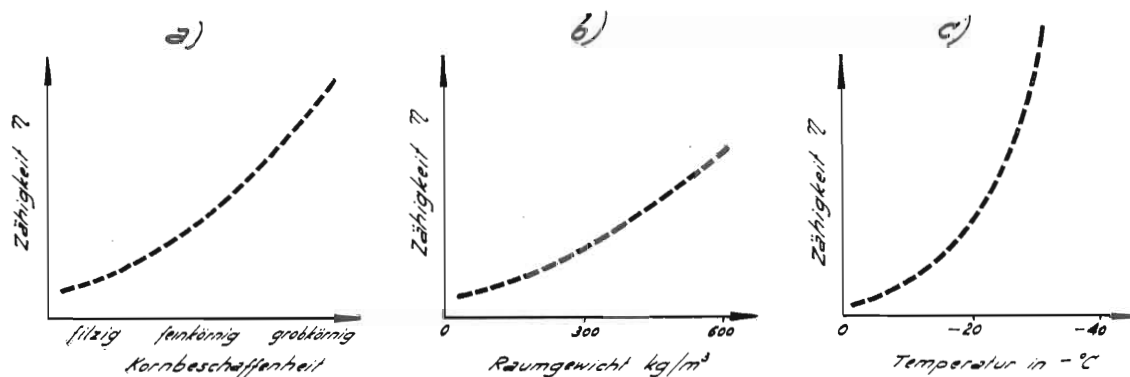


Fig. 19: Schematische Darstellung der Zähigkeit in Funktion von Kornbeschaffenheit, Raumgewicht und Temperatur

Da die Erwärmung des Schnees stets auch eine Beschleunigung der Metamorphose bedingt, muß von Fall zu Fall entschieden werden, welcher der beiden diametral gerichteten Einflüsse überwiegt. Es fragt sich, ob die relativ träge Metamorphose den rasch ändernden Temperaturen genügend schnell folgen kann oder nicht. Als regulierender Faktor tritt die Zeit in Erscheinung: plötzliche Temperaturerhöhungen haben in der Regel eine Abnahme, langsame dagegen eine Zunahme der Zähigkeit zur Folge.

IV. Festigkeitseigenschaften des Schnees

1. Bruchhypothese

Neuere Untersuchungen über das Verhalten verschiedener Materialien im Bruchzustand lassen erkennen, daß zwischen Stoffstruktur, Formänderungsmechanismus und Bruchgefahr sehr enge Beziehungen bestehen [171—173].

Wie die meisten kristallinen Stoffe, so ist auch Schnee aus relativ kleinen, ungleich orientierten Kristallen zusammengesetzt. Obwohl durch die bekannte Auszeichnung verschiedener Richtungen im Einzelkristall eine Anisotropie in bezug auf Elastizitätsmodul, Festigkeit und andere komplex-

mechanische Eigenschaften entsteht, muß dem Aggregat infolge der regellosen Orientierung seiner Elementarteile doch ein isotropes Verhalten zuerkannt werden. Man spricht in diesen Fällen von Quasi- oder Pseudoisotropie.

Geht ein derartiger Versuchskörper entzwei, so muß der Bruch entweder in den Kristallen selbst oder an deren Korngrenzen erfolgen, wobei natürlich auch eine Kombination beider Fälle möglich ist. Unter welcher Bedingung aber tritt der erste, zweite oder gar dritte Fall ein? Mit dieser Fragestellung wollen wir uns zunächst beschäftigen und im Tagebuch der technischen Forschung auf das Jahr 1912 zurückblättern. Denn schon damals haben ROSENHAIN und EWEN [170] auf das unterschiedliche Verhalten von Korn und Korngrenze innerhalb metallischer Werkstoffe hingewiesen und die „amorphous cement theory“ entwickelt. Neuere Untersuchungen, beispielsweise von THUM und RICHARD [215], machen nun allerdings gewisse Vorbehalte nötig: Die Festigkeit metallischer Werkstoffe hängt nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Zeitdauer der Belastung ab.

Wenn wir unsere Betrachtungen zunächst auf Kurzzeitversuche beschränken, so darf als Kriterium für die Unterscheidung zwischen Kristall- und Korngrenzenbrüchen die Geschwindigkeit der Kriechvorgänge vor dem Bruch herangezogen werden. Nun haben wir bereits bei den Plastizitätsuntersuchungen auf die intensiven Platzwechselvorgänge hingewiesen, welche auch bei Metallen nicht in dem Maße zu Verfestigungen führen können wie das Kristallgleiten. In Analogie zu diesen Untersuchungen sind beim Schnee die äußerlich spröde erscheinenden Korngrenzenbrüche zu erwarten. Nach gleichmäßiger Dehnung über den ganzen Zugstab tritt, ohne vorherige lokale Einschnürung, eine Trennung ein. Es ist anzunehmen, daß die Zusammenhangskraft der Korngrenzenmasse infolge der hohen Temperatur und der Kleinheit des tragenden Querschnittes nicht genügt, um so große Kräfte zu übertragen, wie dies zur Auslösung wesentlicher Kristalltranslationen nötig wäre. Die Möglichkeit solcher intrakristalliner Gleitung wird sich erst einstellen, wenn der Schnee den Charakter eines Lockeraggregats einbüßt und in dem dann kompakteren Festkörper jene Kohäsionsverhältnisse sich einstellen, wie sie etwa den Metallen unter höhern Temperaturen eigen sind.

Dank der großen Gefügef়reiheit haben wir es beim Schnee mit einem Aggregat zu tun, welches sich modellmäßig mit einer Anhäufung von gegenseitig verklebten, aber an sich festen Einzelteilen vergleichen läßt. Der Formänderungsmechanismus bleibt beim Ansteigen der Last bis zur Bruchspannung weitgehend derselbe, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß der Zähigkeitskoeffizient während der Versuchszeit infolge von Raumgewichts-, Korngrößen- oder Temperaturänderungen variieren kann.

Unter Ausschluß derartiger Einflüsse bleibt der Gradient der Deformationsgeschwindigkeit stets proportional der spezifischen Belastung. Läßt man die Spannung zunehmen, so nimmt auch der Gradient der Deformationsgeschwindigkeit zu. Die Verschiebungsgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Körnern wird schließlich so groß, daß Abreißen bzw. Bruch eintritt. Unter Berücksichtigung dieses Vorganges kann die Festigkeit des Schnees auch durch den maximal möglichen — offenbar durch Kornzusammensetzung und Temperatur gegebenen — Grenzgeschwindigkeitsgradienten ausgedrückt werden.

2. Zugfestigkeit

Unsere ersten Versuche zur Bestimmung der Zugfestigkeit wurden in den von HAEFELI [3] beschriebenen Apparaten — welche auch zur Messung des plastischen Verhaltens des Schnees zur Anwendung kamen — durchgeführt. Als Belastungsmaterial wurde dabei Schrott verwendet, welches mit Hilfe einer besondern Vorrichtung möglichst gleichmäßig in einen an der Schneeprobe hängenden Belastungskübel gegossen wurde. Da aber das Material Schnee gegen Stöße äußerst empfindlich ist, haben kleine Unregelmäßigkeiten in der Laststeigerung oft vorzeitig zum Bruch geführt. Diese Apparatur wurde deshalb bald durch eine neue ersetzt, welche den Belastungsvor-

gang mit Hilfe einer Federspannung weitgehend störungsfrei durchzuführen gestattet.

Im Laufe der weiteren Entwicklung, vor allem im Zusammenhang mit einer systematischen Untersuchung der verschiedenen Festigkeitswerte, hat sich ferner gezeigt, daß auch bezüglich des Raumgewichtes homogene Schneeproben sehr verschiedene Zusammenhangskräfte aufweisen. Es lag die Vermutung nahe, die Ursache dieser Streuung in der Heterogenität des Materials, ferner aber auch im Temperatureinfluß zu suchen. Um diese Einwirkungen analysieren zu können, wurde die Entwicklung einer neuen, zur Durchführung von Serienversuchen geeigneten Meßmethode angestrebt. Dieser Forderung stand bisher die zeitraubende Vorbereitung der Prüflinge entgegen, indem diese beim normalen Zugversuch beidseitig gefaßt werden müssen, was immer mehrere Stunden der Vorbereitung erfordert.

In dem bis heute in unserem Institut verwendeten, in Fig. 20 dargestellten Rotationszerreißapparat fallen diese Mängel vollständig weg [70]. Jede mit der Normalsonde ausgestochene Schneeprobe kann ohne weitere Vorbereitung in den horizontal liegenden Zylinder des Apparates eingeführt werden. Mit Hilfe einer Klemmvorrichtung wird der meist beanspruchte Mittelquerschnitt des Versuchskörpers etwas reduziert und gleichzeitig gegen evtl. exzentrisch wirkende Kräfte festgehalten. Die im verkleinerten Mittelquerschnitt angreifende, resultierende Zentrifugalkraft kann man aus der am Tachometer abzulesenden Tourenzahl und dem vorher zu bestimmenden Raumgewicht der Schneeprobe einfach berechnen.

Bei einer kritischen Betrachtung dieser Meßmethode fallen sofort einige Fehlerquellen auf. Zunächst muß auf die inhomogene Spannungsverteilung im meist beanspruchten Mittelquerschnitt hingewiesen werden. Die Kerbung führt hier zur Ausbildung eines undurchsichtigen, dreidimensionalen Spannungszustandes, so daß die in Rechnung gesetzte Belastung des Materials nur als Annäherung betrachtet werden kann. Ferner haben die Beschleunigungskräfte senkrecht zur Probenachse eine gewisse Reibung an der Sondenwand zur Folge, zwei Einflüsse, welche jedoch bei geeigneter Versuchsdurchführung gering ins Gewicht fallen. Da es sich bei den hier betrachteten Festigkeitsuntersuchungen nicht um die zahlenmäßige Zuweisung bestimmter Werte an gewisse Schneearten, sondern lediglich um qualitative Versuche zur Bestimmung von Entwicklungstendenzen hinsichtlich der innern Zusammenhangskräfte handeln kann, werden diese Nachteile durch den Vorteil der raschen Arbeitsweise mehr als aufgehoben⁴.

⁴ Ueber einige Verbesserungen des Rotationszerreißapparates orientiert HAEFELI [72].

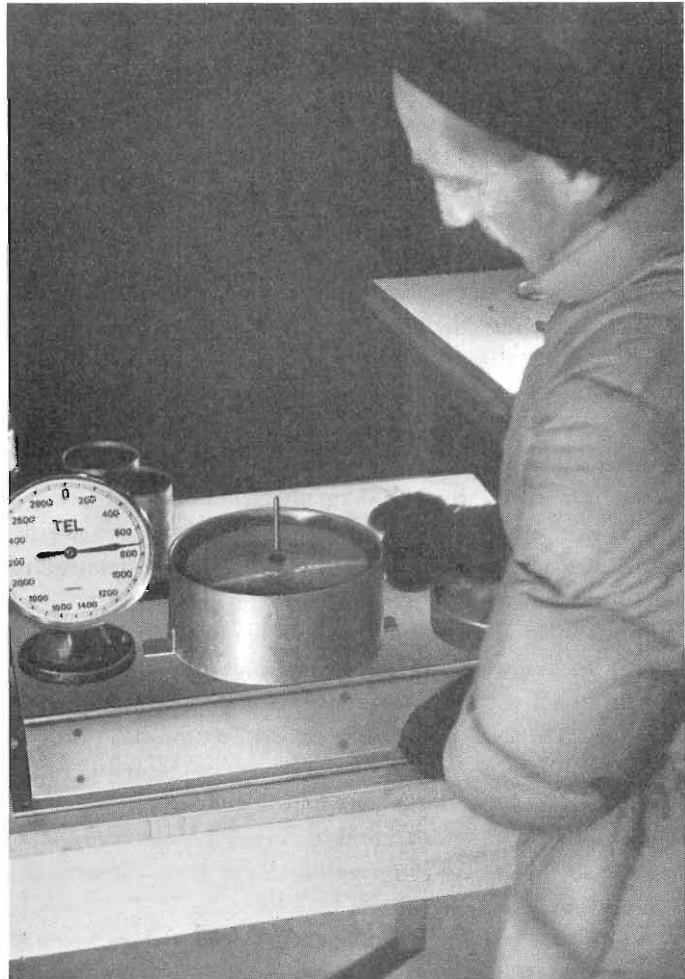


Fig. 20: Rotationszerreißapparat

Photo Fröhlich, Davos

Man darf nämlich selbst bei hinsichtlich Raumgewicht und Plastizität gleichmäßig aufgebauten Schneeproben nicht allzu homogene Festigkeitswerte erwarten, da ja die ersterwähnten Eigenschaften definitionsgemäß Mittelwerte über den ganzen Versuchskörper darstellen, die Zerreißfestigkeit aber lediglich von den Zusammenhangskräften im meistbeanspruchten Querschnitt abhängt.

Ein Streuversuch möge dies beweisen. Nachfolgende Tabelle zeigt die Resultate einer Meßserie von 23 Schneeproben, welche alle derselben Schneesicht entnommen und dann bei gleichen Temperaturen zum Bruch gebracht wurden. Das algebraische Mittel der Zugfestigkeit beträgt 64,0 kg/dm². Der mittlere Fehler der Einzelbeobachtung macht rund $\frac{1}{4}$ des Mittelwertes aus und man erkennt sofort, daß diese relativ großen Abweichungen mit den geringen Variationen des Raumgewichtes nicht in Einklang gebracht werden können, sondern auf Inhomogenitäten des Materials beruhen müssen.

Meßresultate zum Streuversuch über Zugfestigkeit

Probe Nr.	Raumgewicht kg/m ³	Zerreißfestigkeit kg/dm ²	Δ	Δ^2
1	405,5	67,5	+ 3,5	12,2
2	394,6	55,5	— 8,5	72
3	392,8	74,5	+ 10,5	110
4	389,0	64,5	+ 0,5	0,25
5	385,0	71,8	+ 7,8	61
6	372,4	69,5	+ 5,5	30
7	443,0	73,6	+ 9,6	92
8	420,8	100,0	+ 36	1300
9	392,0	32,6	— 31,4	980
10	401,7	86,5	+ 22,5	505
11	403,8	73,0	+ 9	81
12	399,0	51,5	— 12,5	156
13	435,6	64,0	0	0
14	425,5	55,0	— 9	81
15	421,2	41,0	— 23	529
16	434,0	72,0	+ 8	64
17	418,3	69,5	+ 5,5	30,3
18	414,6	77,0	+ 13	169
19	426,8	67,9	+ 3,9	15,2
20	427,6	56,0	— 8	64
21	418,0	69,5	+ 5,5	30,3
22	413,0	54,0	— 10	100
23	419,0	35,0	— 29	841
Mittel	404,5	64,0	Summe S = 5323,25	

Mittlerer Fehler der Einzelbeobachtung

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{S}{n-1}} = \sqrt{\frac{5323,25}{22}} = 15,5 \text{ kg/dm}^2$$

Mittlerer Fehler des Mittelwertes

$$E = \pm \sqrt{\frac{s}{n(n-1)}} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}} = \frac{15,5}{\sqrt{23}} = 3,24 \text{ kg/dm}^2$$

Wahrscheinlicher Fehler = Mittlerer Fehler $\times$ 0,674

$$15,5 \times 0,674 = \pm 10,4 \text{ kg/dm}^2$$

In Anlehnung an die Erkenntnis der Erdbauforschung, wobei für Schichtminerale vielfach eine Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Beanspruchungsrichtung festzustellen ist, wäre auch bei unserem Material ein ähnliches Verhalten denkbar, konnte jedoch in keinem Fall experimentell nachgewiesen werden. Die Sedimentation aus der Atmosphäre verläuft offenbar nie so störungsfrei, daß eine gleichmäßige Orientierung der Kristalle erfolgen könnte.

Wesentliche Unterschiede hinsichtlich der Zerreißfestigkeit sind dagegen auf Grund der einleitenden theoretischen Betrachtung des Problems in Funktion von Schneeart und Temperatur zu erwarten.

Wir haben zunächst in einer größeren, über zwei Winter sich erstreckenden Versuchsserie ganz verschiedene Schneearten untersucht. Von jeder wurden jeweils etwa fünfzig Proben entnommen, gewogen und dann auf vier verschiedenen temperierte Laboratorien aufgeteilt. Nach einer Wartezeit von 24 Stunden wurden sie mit Hilfe des Zerreißapparates zum Bruch gebracht. Als direkt meßbare Variable trat dabei die Temperatur in Erscheinung, weshalb wir auch in erster Linie versuchten, diesen Einfluß zur Darstellung zu bringen. Fig. 21 gibt die Abhängigkeit der Zugfestigkeit verschiedener Schneearten in Funktion der Temperatur wieder. Man erkennt die allgemeine Tendenz der Festigkeitszunahme mit abnehmender Temperatur und zwar scheint der Gradient bei hohen Temperaturen größer zu sein als bei tiefen. Noch viel mehr aber kommt darin der Einfluß der Schneebeschaffenheit zum Ausdruck. Bei gewissen Schneearten ist die Festigkeitszunahme mit sinkender Temperatur sehr groß, bei andern dagegen praktisch unbedeutend. Ein Ordnungsversuch nach Raumgewichten scheitert schon aus theoretischen Überlegungen, noch mehr aber bei der Betrachtung der graphischen Darstellung. Es kommen eben auch hier wiederum die beiden verschiedenen Einflüsse von Kornbeschaffenheit und Raumgewicht zur Geltung. Durch das letztere allein ist die Schneeart noch nicht eindeutig bestimmt.

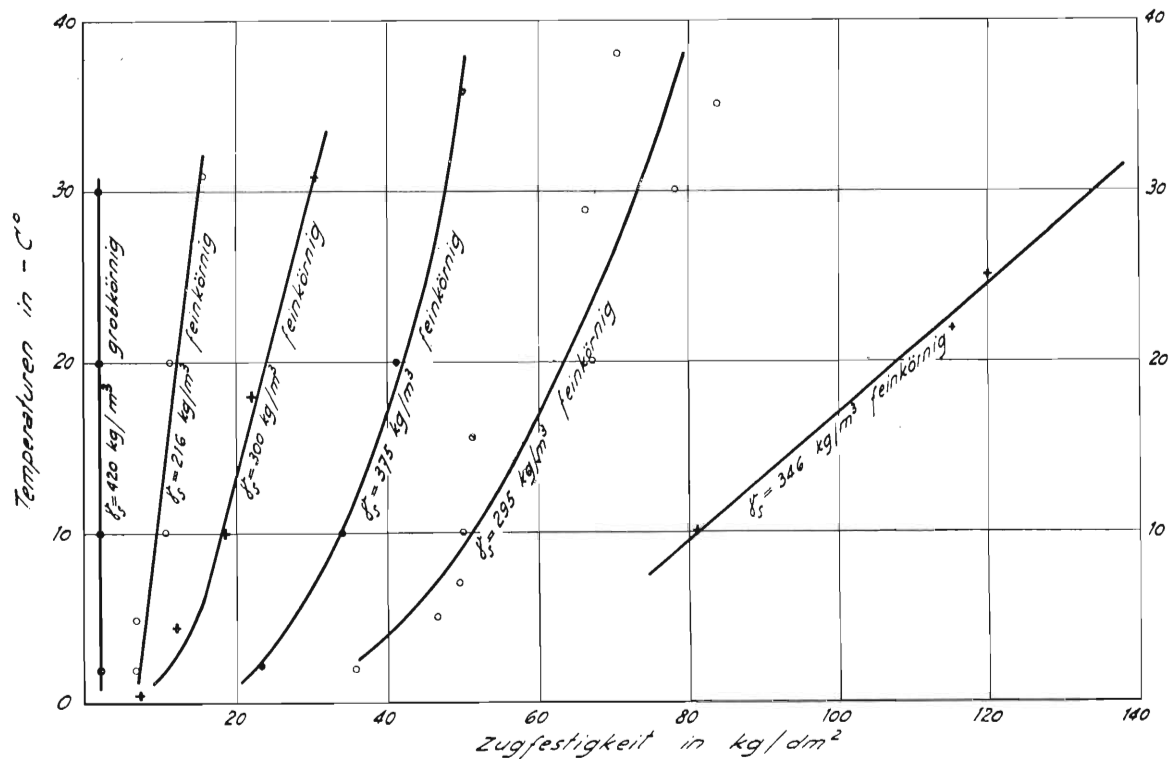
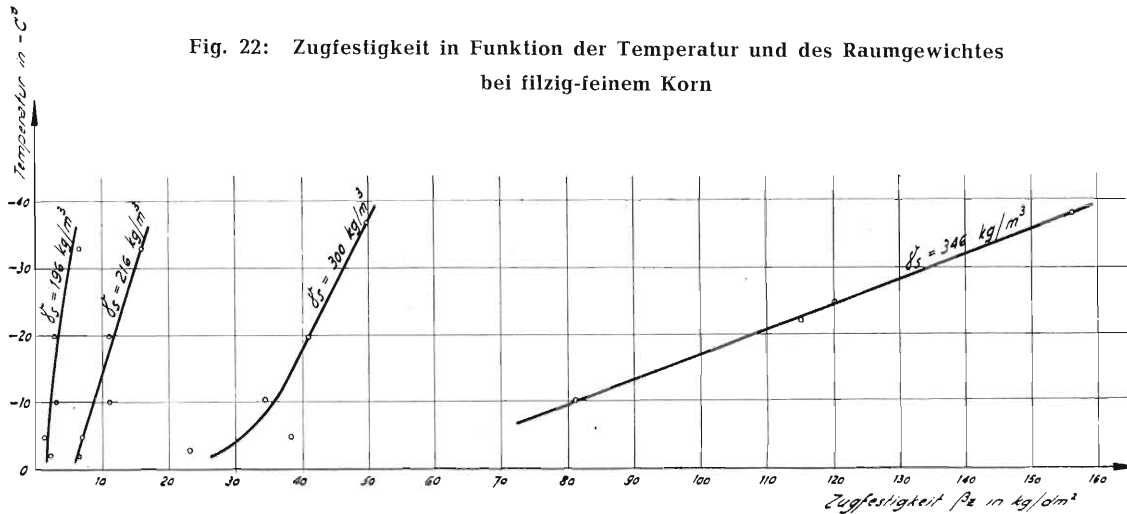


Fig. 21: Zugfestigkeit in Funktion der Temperatur

Fig. 22: Zugfestigkeit in Funktion der Temperatur und des Raumgewichtes
bei filzig-feinem Korn



Eine gewisse Unsicherheit besteht hinsichtlich des Kurvennullpunktes. Wie groß ist die Zugfestigkeit einer Schneeprobe bei 0°C ? Diese Frage kann auf Grund des vorliegenden Versuchsmaterials nicht beantwortet werden. Mit beginnendem Schmelzprozeß treten verschiedene Einflüsse in Erscheinung, welche nur auf Grund einer sorgfältig durchgeführten Spezialuntersuchung abgeklärt werden können. Wenn man sich die dabei auftretende Unstetigkeit hinsichtlich der Materialbeschaffenheit, d. h. den Uebergang vom Zweiphasensystem Eis - Luft zum Dreiphasensystem Eis - Luft - Wasser vor Augen hält, wird auch das veränderte mechanische Verhalten verständlich. Für unsere Festigkeitsbetrachtung im weiteren Sinne ist jedoch mit der allgemeingültigen Feststellung, daß der innere Widerstand gegen eine Querschnittstrennung mit zunehmender Temperatur abnimmt und einem Mindestwert zustrebt, bzw. ganz aufhört, schon sehr viel gewonnen.

Nach dieser generellen Betrachtung des Temperatureinflusses wollen wir uns der Abhängigkeit von der Schneebeschaffenheit zuwenden. In Fig. 22 haben wir das Raumgewicht filzig-feinkörniger Schneearten als Parameter gewählt und wollen damit zeigen, wie die

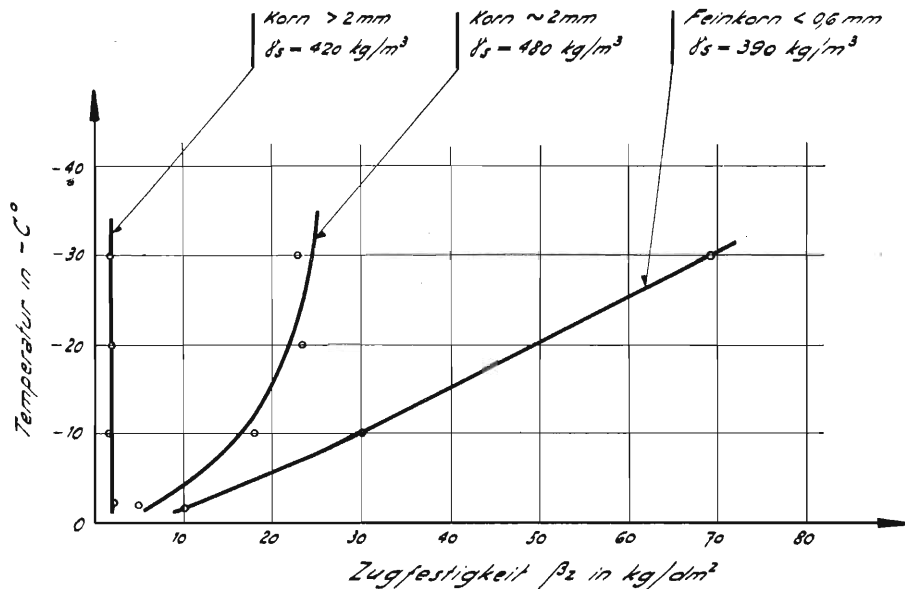


Fig. 23: Zugfestigkeit in Funktion der Temperatur und der Korngröße

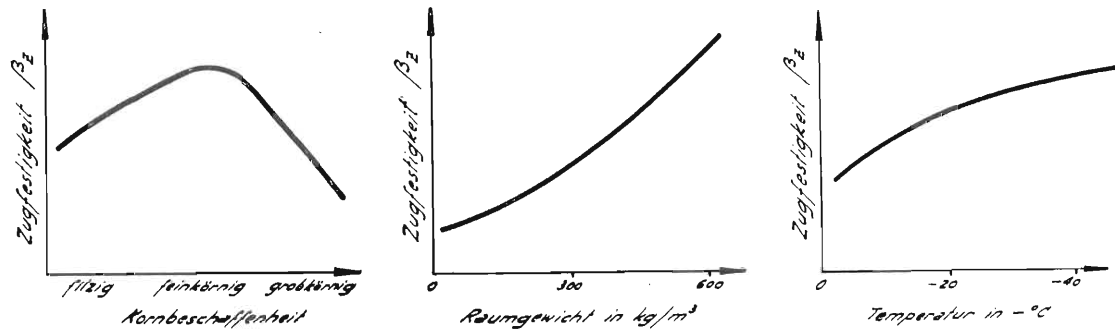


Fig. 24: Schematische Darstellung der Zugfestigkeit in Funktion von Kornbeschaffenheit, Raumgewicht und Temperatur

Zerreißfestigkeit mit Zunahme des Raumgewichtes ebenfalls stark zunimmt. Der innere Widerstand gegen Trennung kann bei feinkörnigen, dichtgepackten Schneearten und tiefen Temperaturen recht ansehnliche Werte annehmen. Das erwähnte Diagramm läßt den Einfluß der Lagerungsdichte deutlich erkennen und zeigt, wie die Neigung der Kurve mit zunehmendem Raumgewicht wesentlich zunimmt: Dichte Schneearten sind auf Temperatureinflüsse bedeutend empfindlicher als poröse.

Schließlich sei auch auf den Einfluß der Korngröße hingewiesen. Je größer das Korn, umso weniger Kontaktstellen sind pro Flächeneinheit des Querschnittes einer Schneeprobe vorhanden und umso geringer ist demnach bei sonst gleichen Verhältnissen die Zugfestigkeit. Fig. 23 stellt die Abhängigkeit der Zugfestigkeit verschiedener Schneearten in Funktion der Temperatur dar, wobei diesmal die Korngröße als Parameter auftritt. Obwohl die Raumgewichte ebenfalls etwas variieren, kommt doch die Abnahme der Festigkeit mit zunehmendem Korndurchmesser zum Ausdruck.

Im Gegensatz zu den Plastizittsverhltnissen erhalten wir also für die Zugfestigkeit oder Zerreißfestigkeit zusammenfassend folgende Tendenzen: Jede Verdichtung des Schnees hat eine Zunahme, jede Kornvergrößerung oder Temperaturerhöhung hingegen eine Abnahme der Festigkeit zur Folge. In Fig. 24 sind diese Abhängigkeiten schematisch dargestellt.

Da sich die verschiedenen Einwirkungen überschneiden können, ist bei langsamen Vorgängen auch der Zeiteinflu zu beachten.

2. KAPITEL

Statik und Dynamik der Schneedecke

I. Schneedeckenentwicklung

1. Die beiden Grundgesetze der stofflichen Veränderung

Dank den Untersuchungen von PAULCKE [146], WELZENBACH [222], HESS [91], SELIGMAN [177] und EUGSTER [46] hat man mit immer größerer Deutlichkeit erkannt, daß jede Schneedecke einen sauberen Schichtaufbau ausweist. Im Schneeprofil treten die den verschiedenen Niederschlägen entsprechenden Schichten, die allerdings im Laufe der Zeit eine gewisse Veränderung erfahren haben, deutlich in Erscheinung. Da mit dieser Differenzierung hinsichtlich Kornbeschaffenheit und Raumgewicht auch die physikalischen Eigenschaften ändern, muß die Gesamtschneedecke als Aufeinanderfolgemehrerer plastischer Massengleicher chemischer Zusammensetzung, aber verschiedener Plastizität und Festigkeit aufgefaßt werden.

Jeder Neuschnee hat die Tendenz, zunächst feinkörnig und — nach weiterem Materialaustausch zwischen den einzelnen Kristallen — grobkörnig zu werden. Es ist dies ein im ersten Kapitel eingehend besprochenes physikalisches Gesetz, welches bei jeder Schneedeckenentwicklung zum Ausdruck kommt. Doch die damit verbundene Stoffveränderung vollzieht sich je nach Gefügef়reiheit der Körner mehr oder weniger rasch. Solange das Raumgewicht des Schnees relativ klein, das Porenvolumen also groß ist, so lange hält auch die intensive Kornumwandlung an. Das Aggregat wird bei fehlender Zusammendrückung grobkörnig, relativ unplastisch und kohäsionsarm. Hierin erblicken wir das eine Grundgesetz der stofflichen Veränderung. Diese als Schichtauflösung bezeichnete Erscheinung läßt sich jeden Winter beobachten und zwar immer bei jenen Schichten, die lange Zeit an der Oberfläche liegen. Die fehlende Ueberlastung hat eine langsame Vergrößerung der Kristalle zur Folge. Wenn nur geringe Druckspannungen wirksam sind, und die Zähigkeit der betreffenden Aggregate sehr groß ist, können auch tiefer liegende Schichten von dieser Auflösung erfaßt werden. Es entstehen so die bekannten Schwimmschneeschichten, also Schneearten mit großem mittlerem Korndurchmesser, großer Zähigkeit und geringer Kohäsion. Schwimmschneebildungen sind immer dann zu erwarten, wenn kleine Schichten zur Ablagerung kommen, und tiefe Temperaturen vorherrschen. Tritt eine neue Ueberlastung erst in einem Zeitpunkt hinzu, wenn das Kristallaggregat schon grobkörnig und damit wenig plastisch geworden ist, so kann im Laufe des Winters auch unter dem Einfluß größerer Ueberdeckung nur eine geringe Kompression eintreten. Die betreffende Schneesicht bleibt bis zu einer durchgehenden Erwärmung relativ unplastisch und kohäsionsarm.

Im Gegensatz zur Schichtauflösung steht die Schichtverdichtung. Gemäß unseren Stoffuntersuchungen läßt sich der Neuschnee — besonders bei hohen Temperaturen — relativ leicht komprimieren. Tritt deshalb kurz nach dessen Ablagerung eine größere Ueber-

lastung durch weitere Schneefälle ein, so erfährt das Raumgewicht der belasteten Schicht eine Zunahme; die Gefügefähigkeit der Kristalle schwindet immer mehr und die Metamorphose gerät nach dem Durchlaufen ihres ersten Teiles — dem Einziehen der Verästelungen — ins Stocken. Das ganze Aggregat wird feinkörnig und kompakt. Feinkörnige Schneearten sind aber immer noch relativ plastisch und man erkennt, daß die einmal eingeschlagene Schichtentwicklung während des ganzen Winters in gleicher Richtung fortschreitet. Neue Ueberlagerungen haben neue Kompressionen zur Folge und so entsteht schließlich ein dichtgelagerter, feinkörniger Schnee großer Festigkeit.

Es sind die unmittelbar nach der Ablagerung einzelner Neuschneeteile eintretenden äußeren Bedingungen, vor allem Temperatur und Gewicht der Ueberlastung, welche die Schichtentwicklung bestimmen.

2. Schematischer Verlauf der Schneedeckenentwicklung

Auf dem Wege zur Erkenntnis der Gesetzmäßigkeiten in der allgemeinen Schneedeckenentwicklung einen Schritt weiter gehend, wollen wir jetzt die Einzelschicht verlassen und den schematischen Aufbau einer Schneedecke betrachten.

Wenn eine erste Schicht des Winters unmittelbar auf den Erdboden zu liegen kommt, so wird sich diese je nach Temperaturbedingungen verschieden verändern. Bei tiefer Außentemperatur und gefrorenem Boden kann bei geringer Ablagerungshöhe kaum von einer Kompression gesprochen werden; das ganze Aggregat wird zusehends grobkörniger. Ist umgekehrt der Erdboden noch warm, so erfährt der unterste Teil der Schicht infolge seiner hohen Plastizität eine wesentliche Verdichtung, wobei evtl. auch Schmelzprozesse und Verharschungen eintreten können. Je nach diesen scheinbar nebensächlichen Umständen entsteht somit ein festes, oder loses Fundament. Es erhellt daraus die große Bedeutung, welche den meteorologischen Bedingungen beim Einschneien der Berge zukommt.

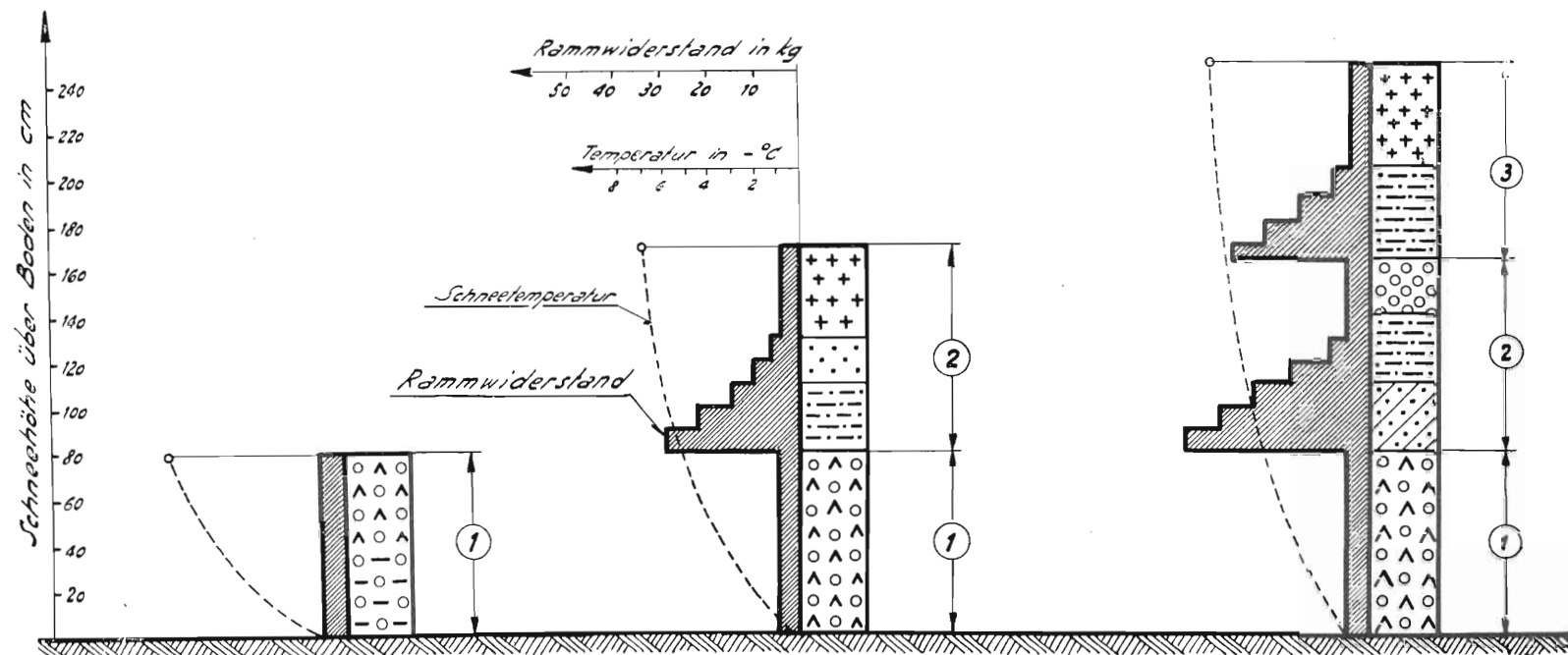
Folgt nun nach einiger Zeit eine zweite Ablagerung gleicher Mächtigkeit, so wird sich später eine Schichtgrenze, bzw. eine sprunghafte Änderung der Schneebeschaffenheit beim Uebergang von der Alt- zur Neuschneesicht feststellen lassen. Der obere Teil der ersten Ablagerung 1 in Fig. 25 ist bereits grobkörnig und wenig plastisch geworden, während der Neuschnee unmittelbar über dieser Trennfuge die größte Verdichtung und Verfestigung erfährt. Die Diskontinuität wird umso schärfer, je mehr Zeit zwischen den einzelnen Schneefällen verstreicht, und je stärker die Neuschneesicht an ihrer Unterseite komprimiert wird. Temperatur und Gewicht der Neuablagerung machen sich somit ebenfalls geltend.

Die zweite Schicht erleidet ihrerseits im Prinzip dasselbe Schicksal wie die erste: eine Verfestigung in der untern und zunehmende Auflösung in der oberen Hälfte. Wesentlich ist ferner die Feststellung, daß Schicht 2 ihr in der Zwischenzeit relativ unplastisch gewordenen Fundament (Schicht 1) nur in untergeordnetem Maße komprimiert.

Der Aufbau des Gesamtprofils läßt sich so beliebig fortsetzen; immer ist mit einer zunehmenden Differenzierung der einzelnen Schichten zu rechnen, so daß man im Prinzip das in Fig. 25 dargestellte Profil erhält.

Es ergeben sich daraus folgende allgemeingültige Hinweise:

1. Jeder Unterbruch in der Niederschlagsfolge gibt zu Diskontinuitäten hinsichtlich Plastizität und Festigkeit Anlaß.
2. Die Festigkeit des Schnees ist an der Unterfläche jeder Schicht am größten, an ihrer Oberfläche am kleinsten.
3. Die Diskontinuität zwischen zwei Schichten nimmt mit zunehmenden Zeitintervallen zwischen den Ablagerungen zu; sie tritt nach großen Neuschneefällen und hohen Temperaturen stärker in Erscheinung, als nach geringen, bei tiefen Temperaturen erfolgten Ablagerungen.



Erste Schneeschicht

(großer Temperaturgradient, kleine Ueberlastung: intensive Auflösung).

Zweiter Schneefall

(Verdichtung im untern Teil von Schicht 2).

Dritter Schneefall

(Schicht 2 im oberen Teil aufgelöst: gibt Anlaß zur Lawinenbildung; unterer Teil zunehmende Verfestigung).

Fig. 25: Schematische Darstellung der Schneedeckenentwicklung

In praktischer Hinsicht erkennt man folgendes: Die schwächste Stelle einer Schicht ist stets in ihrem obern Teil zu suchen. Tatsächlich brechen Lockerschneelawinen an der Oberfläche des Gesamtprofils, Schneebrettlawinen an der Oberfläche einer beliebigen Schicht innerhalb der Schneedecke an.

3. Spezielle Einflüsse

a) *Windpackung*. Erfolgt ein Schneefall bei starkem Wind, oder führen nachträglich eintretende Luftströmungen zu Verwehungen, so werden die Kristalle mechanisch verkleinert und in den Verband eingerüttelt [178]. Es entsteht so eine gewisse Anfangspackung und damit ein relativ hohes Anfangsraumgewicht. Die Gefügefrieheit ist somit schon zu Beginn der Metamorphose stark vermindert, so daß sich derartige Aggregate vornehmlich im Sinne einer Verfestigung verändern.

b) *Verfirnung der Schneeoberfläche*. Vorübergehende Erwärmung der obersten Schneeschichten (infolge Einbruch warmer Luftmassen, oder aber infolge starker Einstrahlung) kann Schmelzen und nachträgliche Regelation zur Folge haben. Da diese Erscheinung im Hochgebirge schließlich zur Firnbildung führt, spricht man auch von einer Verfirnung der Schneeoberfläche. Die Metamorphose verläuft hier unter dem Einfluß der hohen Temperaturen sehr rasch; es entstehen grobe, rundliche Eiskörner, welche entweder lose aneinanderliegen, oder aber zu einer Eiskruste verharscht sind. Werden derartige Oberflächenbildungen eingeschneit, so verdampfen die Kittstellen zwischen den Kristallen und es bleibt ein grobkörniges, zähes Aggregat mit sehr geringer Festigkeit zurück. Die Auflösung von Harschschichten hat deshalb stets eine starke Herabsetzung der Gesamtstabilität der Schneedecke zur Folge.

c) *Reifbildungen*. Eingeschneiter Oberflächenreif kann die Stabilität jeder Schneedecke wesentlich herabsetzen. Die ursprünglich senkrecht zur Unterlage anwachsenden, blättchenförmigen Reifkristalle werden bei Neuschneeüberdeckung infolge der auf sie wirkenden Scherkräfte am Hang schief gestellt. Obwohl die Stärke der Reifschicht normalerweise nur einige Millimeter beträgt, wird doch der tragende Teil der Schneedecke längs einer Parallelebene zur Unterlage unterbrochen.

4. Beispiele natürlicher Schneedeckenentwicklung

Auf Grund der in den beiden vorhergehenden Abschnitten dargelegten Gesetzmäßigkeiten kann jede Schneedeckenentwicklung systematisch untersucht werden. Dabei wollen wir unser Augenmerk vor allem auf jene Schichten konzentrieren, die sich im Laufe der Zeit im Sinne einer Kohäsionsabnahme verändern und dadurch zu labilen Situationen führen. Als Diskussionsbasis benutzen wir die im Standardversuchsfeld unterhalb Weißfluhjoch aufgenommenen Schneeprofile. Da die Untersuchungsmethoden in den letzten zehn Jahren gewisse Modifikationen erfahren haben, ist es leider nicht möglich, alle Zeitprofile [3] in gleicher Weise darzustellen. Trotzdem lassen sich die charakteristischen Merkmale jedes Winters an Hand der Figuren 26—35 relativ leicht herauschälen.

Winter 1936/37 (Fig. 26)

Das Einschneien ist Ende September und besonders durch größere Niederschläge im Oktober erfolgt. Der November hat dann vorwiegend schönes Wetter gebracht und wir sehen im Zeitprofil, daß die oberste Zone dieses Fundamentes zu Beginn der neuen Niederschläge sehr kleine Rammwiderstände aufweist. An Nordhängen hat die Auflösung das ganze Fundament, an Südhängen nur dessen Oberteil erfaßt. Trotz der anfangs Januar eintretenden, mächtigen Schneefälle und der

dadurch hervorgerufenen Ueberlastung, bleibt Schicht 4 dank ihrer großen Zähigkeit während des ganzen Hochwinters kohäsionsarm. Erst Ende März tritt unter dem Einfluß starker Erwärmung eine gewisse Verfestigung ein.

Dasselbe Schicksal erleidet der obere Teil von Schicht 6: der schöne Januar hat eine starke Oberflächenmetamorphose zur Folge, sodaß sich auch diese Schicht erst mit beginnender Erwärmung im Frühjahr verfestigt. Diese beiden Schneeschichten geringer Kohäsion haben der Schneedeckenentwicklung 1936/37 ihr spezielles Gepräge verliehen und Anlaß zu einer Reihe von Lawinnenniedergängen gegeben [70].

Winter 1937/38 (Fig. 27)

Ganz anders liegen die Verhältnisse im Winter 1937/38. Mitte Oktober beginnt das Einschneien. Doch im Gegensatz zum Vorwinter kommen nur geringe Schneemengen zur Ablagerung. Schicht 2 wird zu Beginn des Monats Dezember gebildet. Wiederum ist deren Ausmaß relativ gering und überdies herrschen jetzt tiefe Temperaturen, welche dem Gesamtfundament eine große Zähigkeit verleihen. Wohl kommen geringe, weitere Schneefälle dazu, eine größere Belastung läßt aber bis anfangs Januar auf sich warten. Die Schichten 1 und 2 haben also mehr als einen Monat Zeit, um körnig zu werden, bevor sie größere Drücke zu übernehmen haben. Die mit der Kornvergrößerung verbundene Zähigkeitszunahme behindert aber auch eine spätere Kompression und tatsächlich bleibt das Fundament bis Ende des Winters sehr kohäsionsarm. Es zeigt sich hier zum ersten Mal die in späteren Untersuchungen noch oft festzustellende Tatsache der starken Auflösungserscheinungen bei Wegfall größerer Belastungen im Frühwinter. Ein zögerndes, langsames Anwachsen der Schneedecke hat stets die Bildung eines lockeren Fundamentes zur Folge.

Winter 1938/39 (Fig. 28)

Auffallend sind die geringen Schneemengen, die es hier zu besprechen gibt. Wohl vollzieht sich das Einschneien im selben Monat (Oktober), doch klettert die Pegelkurve noch langsamer in die Höhe als im Vorjahr. Zu Beginn des Winters ist es lediglich Schicht 5 (Neujahrsschneefall), welche zu wesentlichen Kompressionen Anlaß geben könnte, aber gerade um diese Zeit herrschen tiefe Temperaturen. Das ganze Fundament, zu welchem in diesem Jahr alle bis anfangs März gefallenen Schneemengen zu zählen sind, bleibt bis Ende des Winters ohne wesentliche Festigkeit. Der Märzschneefall (Schicht 7) ist dann aber wirklich sehr ausgiebig. An vielen Hängen kommt es zur Lawinenbildung. In diesem Zusammenhang sei an den tragischen Unfall im Wildhorngebiet, welchem drei Soldaten zum Opfer fielen, erinnert. Zahlreiche andere Lawinen sind aus jener Zeit bekannt, deren Ursache vor allem den geringen Schneefällen in der ersten Hälfte des Winters, und der damit verbundenen Möglichkeit einer intensiven Auflösung des ganzen Fundamentes zuzuschreiben sind. Die schon 1937/38 festgestellte Erscheinung der Schwimmschneebildung tritt hier noch in extremerem Maße auf.

Winter 1939/40 (Fig. 29)

In den beiden Vorwintern — sowohl 1937/38 als auch 1938/39 — haben sich in Bodennähe mächtige Schwimmschneesichten gebildet. Anders liegen nun die Verhältnisse im Winter 1939/40. Zu Beginn der Aufnahmen (1. Dezember) ist bereits ein ca. 130 cm mächtiges, stark verfestigtes Fundament vorhanden, welches an den Winter 1936/37 erinnert. Der vom 5.—7. dauernde Dezemberschneefall (Schicht 2) kann sich also auf eine tragfähige Unterlage abstützen. Nun setzt aber ein ordentlich kalter, und vor allem niederschlagsarmer Januar ein, so daß sich die Metamorphose in den Schichten 2 a und 2 b gut entwickelt. Zwischen dem festen Fundament (Schicht 1) und späteren, ebenfalls kohärent werdenden Neuablagerungen (Schicht 3 und folgende) liegen mehr

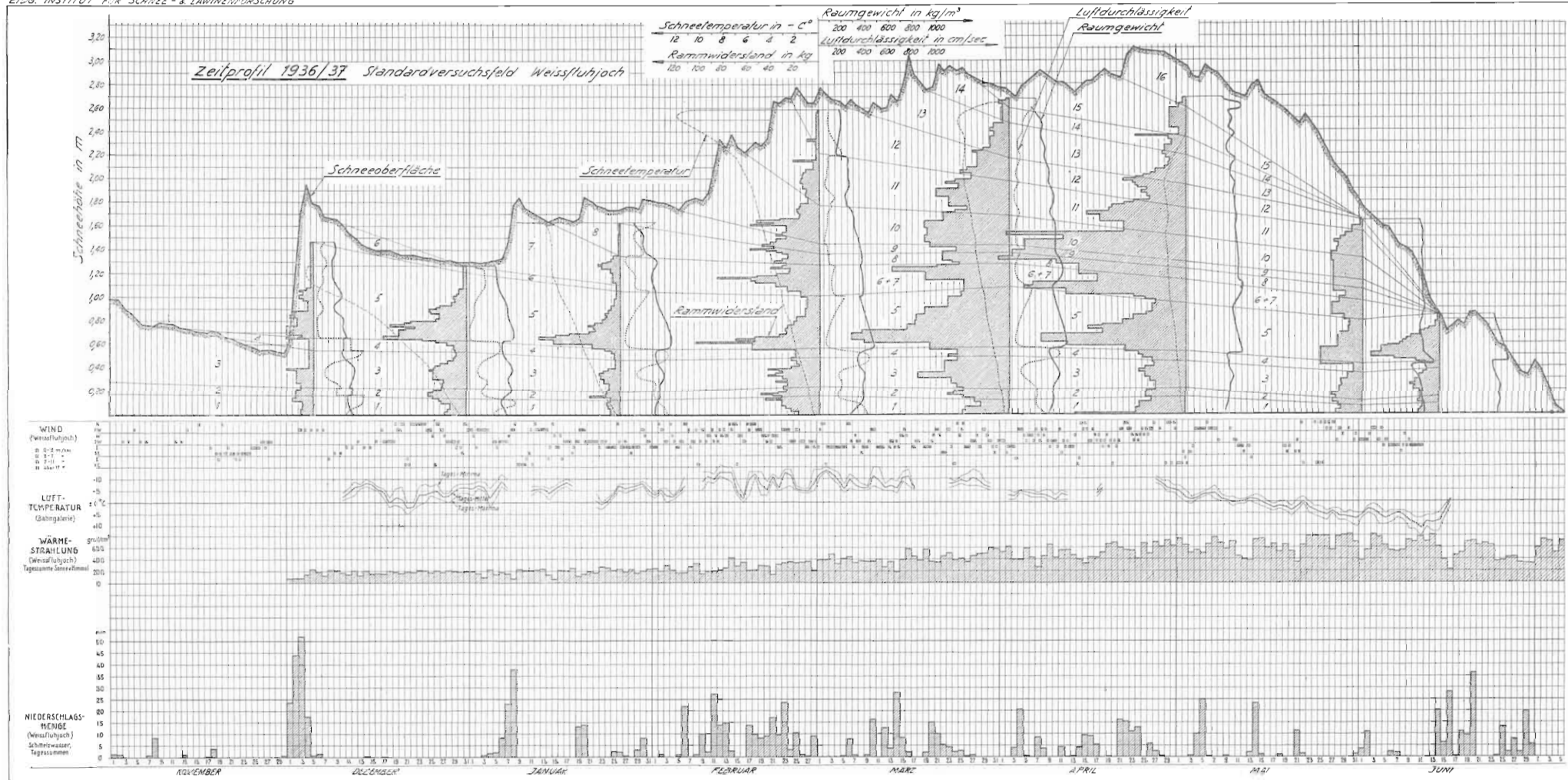


Fig. 26: Zeitprofil 1936/37

Aus E. Bucher: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinerverbunds

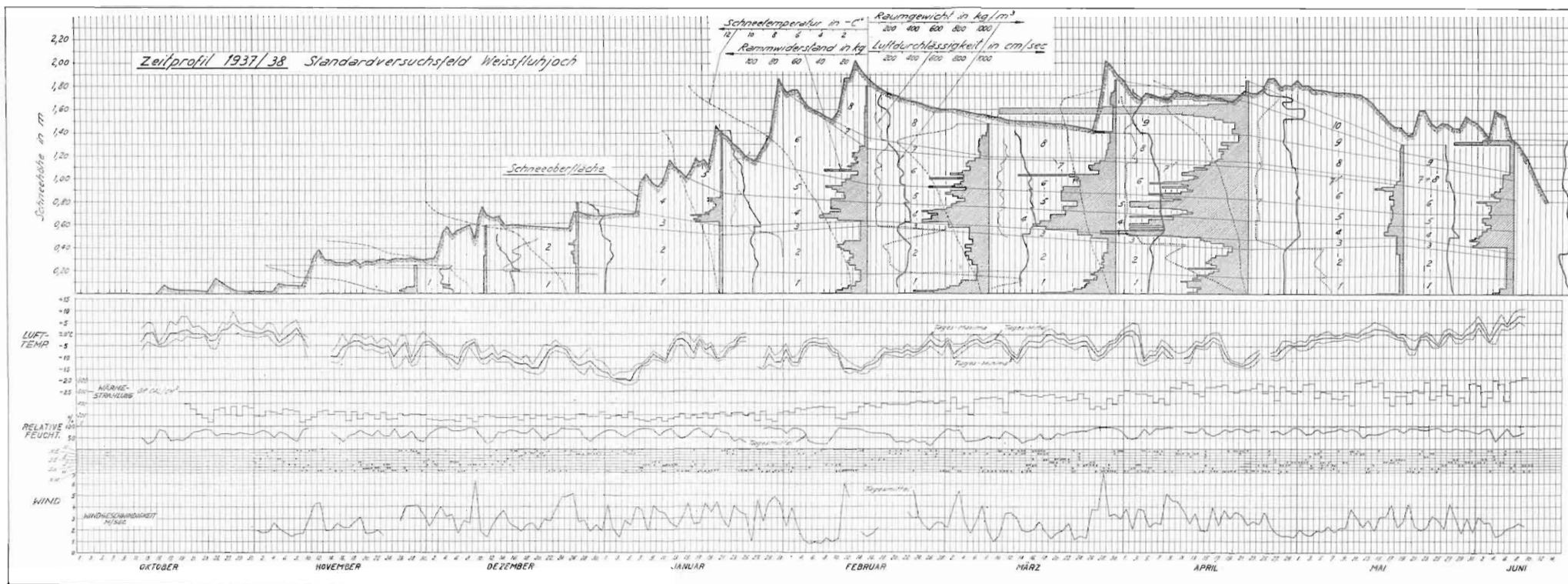


Fig. 27: Zeitprofil 1937/38

Aus E. Bucher: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinverbau

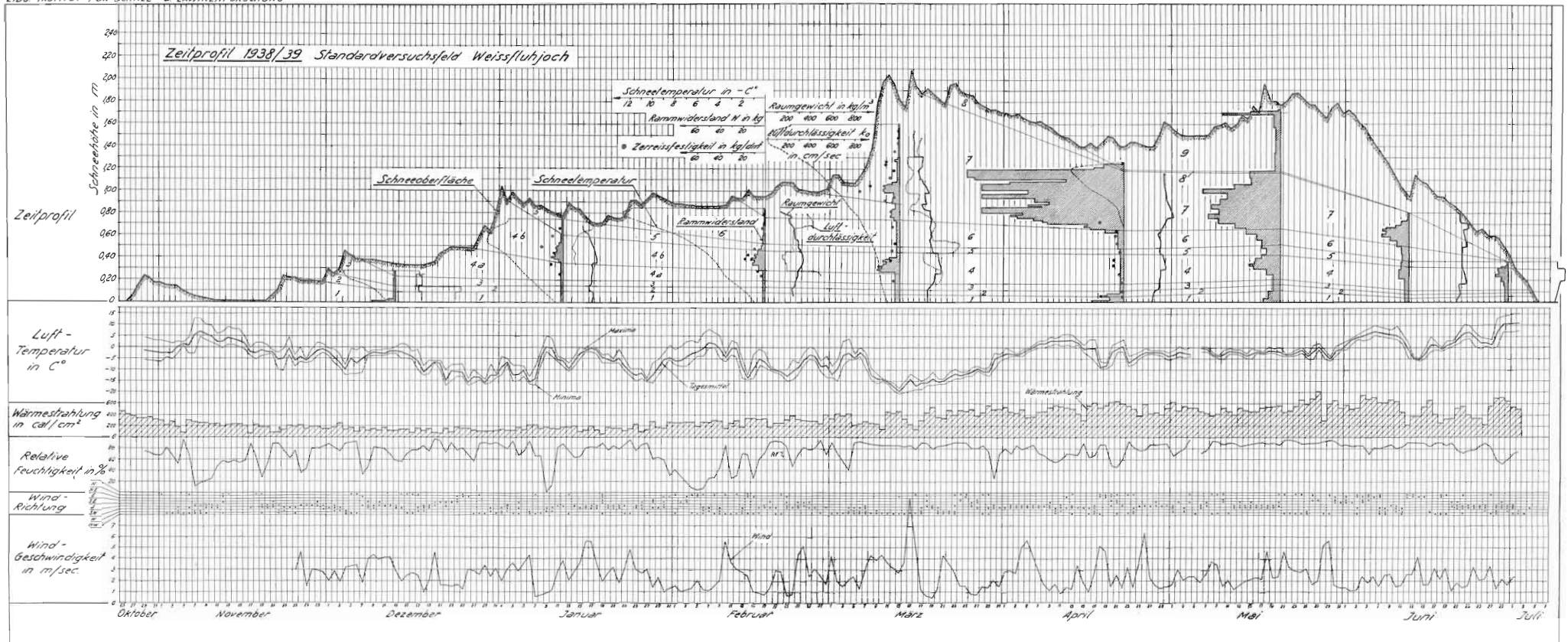


Fig. 28: Zeitprofil 1938/39

Aus E. Bucher: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbau

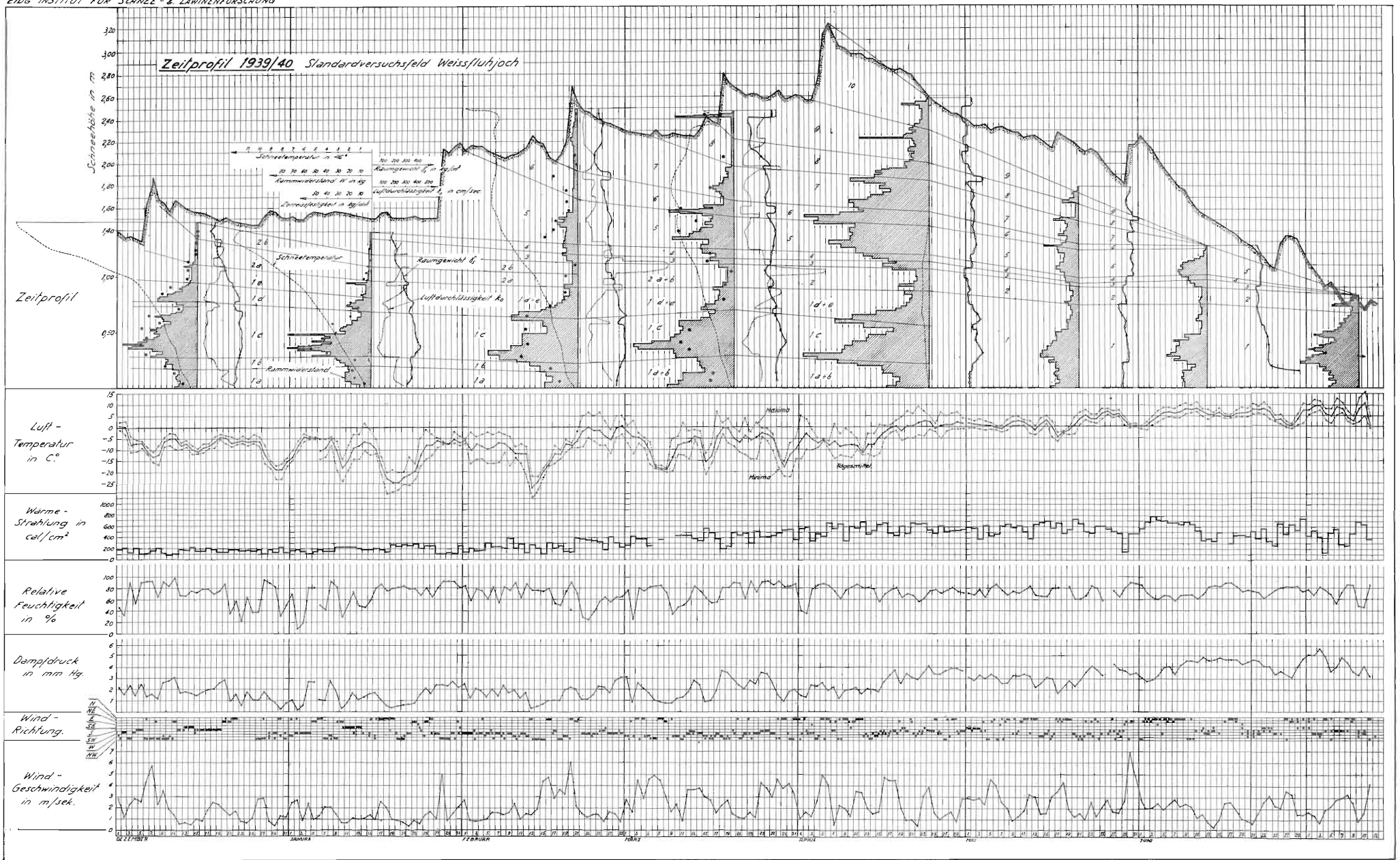


Fig. 29: Zeitprofil 1939/40

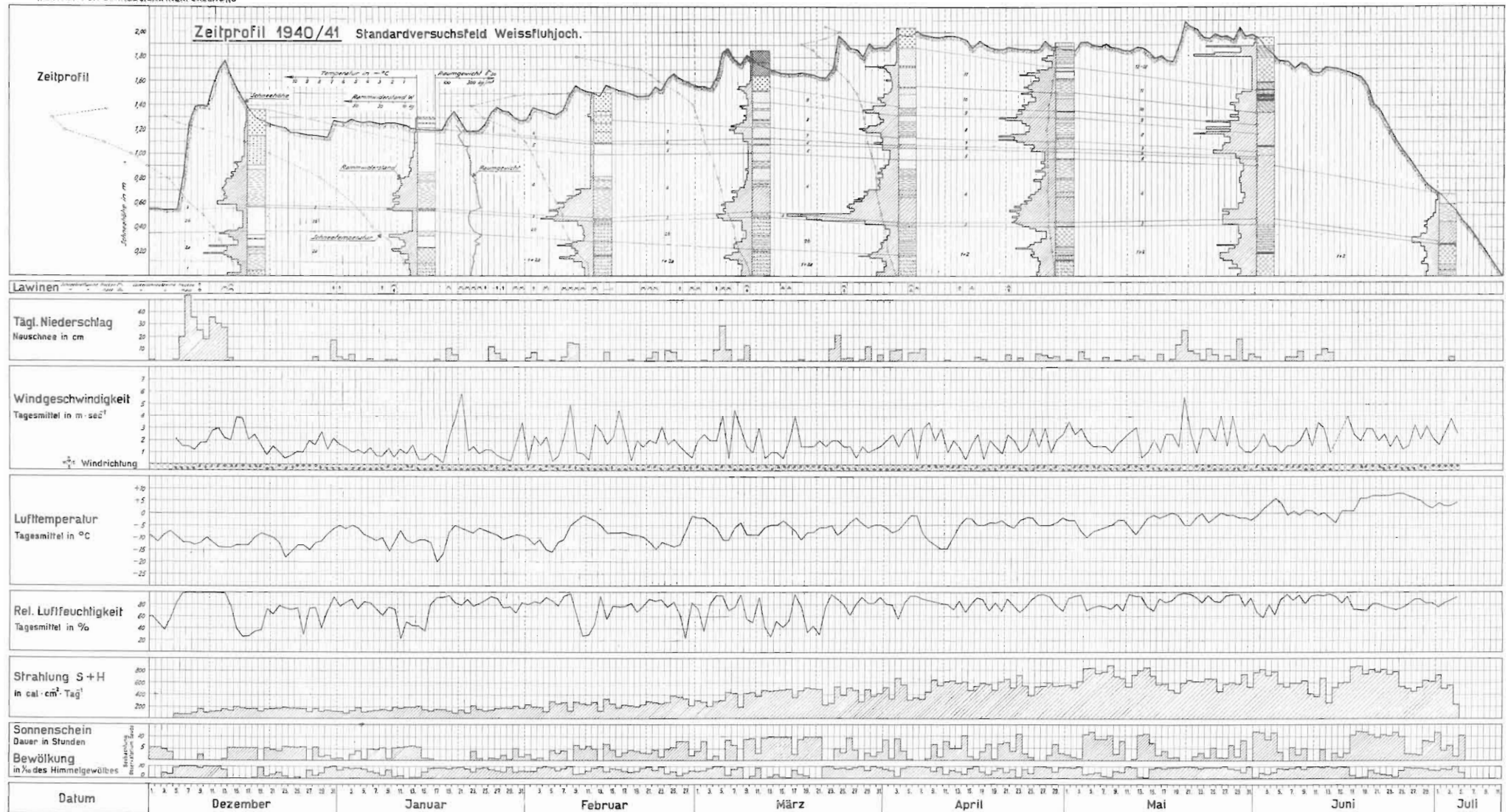


Fig. 30: Zeitprofil 1940/41

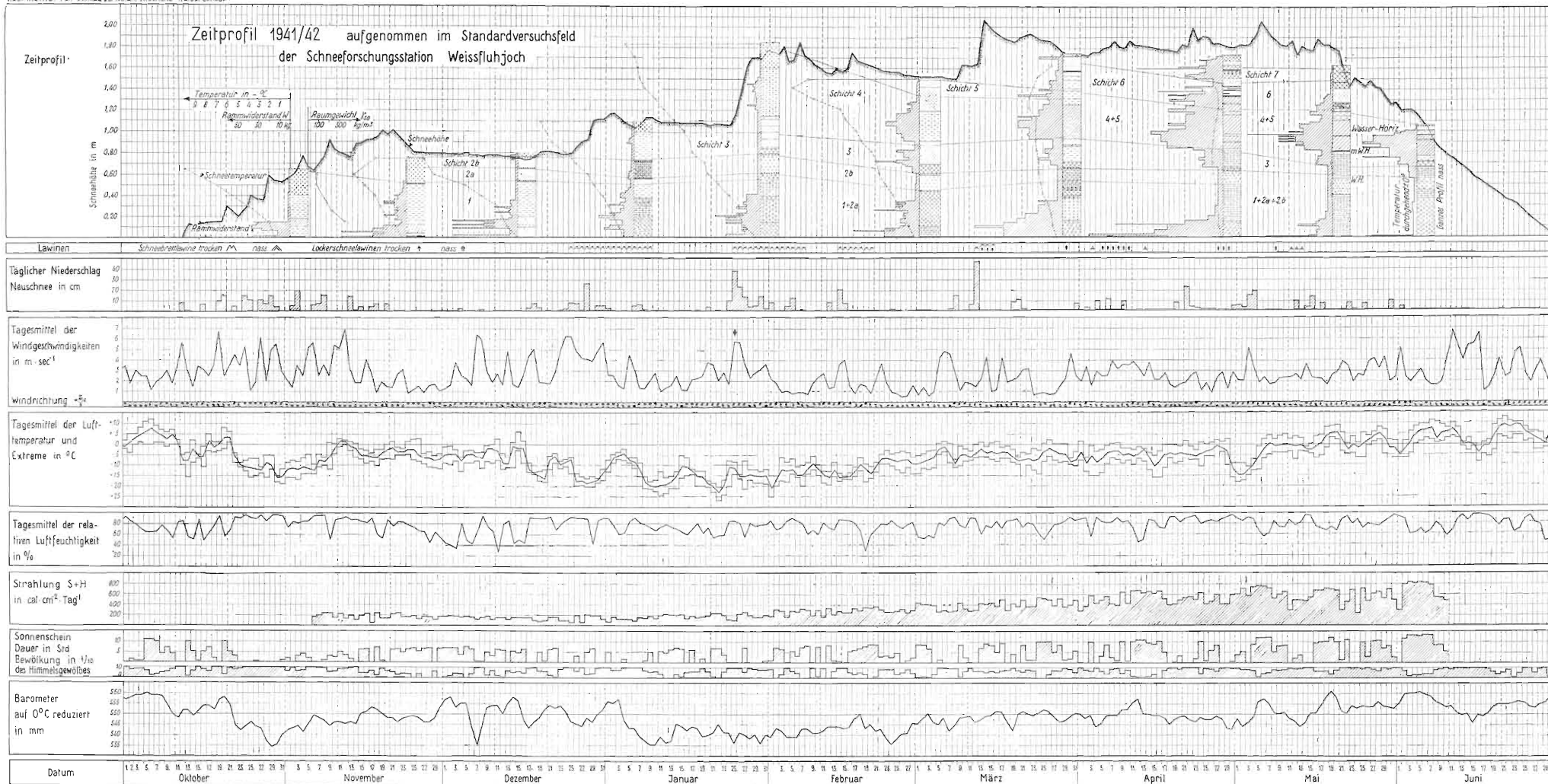


Fig. 31: Zeitprofil 1941/42

Aus E. Bucher: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbaus.

Aus E. Bucher: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbau

Fig. 33: Zeitprofil 1943/44

Aus E. Bucher: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbau

Fig. 34: Zeitprofil 1944/45

Aus E. Bucher: Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbau

Fig. 35: Zeitprofil 1945/46

Aus E. Bucher: "Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbauung"

als 20 cm lockeren, grobkörnigen Schnees. Sogar in den Frühjahrsprofilen ist diese Aufspaltung der Gesamtschneedecke in zwei Hälften, und die Einlagerung einer starken Lockerschicht im Mittelbereich, noch deutlich zu erkennen. Wir sehen daraus, daß sich die Schwimmschneebildung nicht auf das Fundament beschränken muß, sondern auch höher gelegene Schichten erfassen kann.

Winter 1940/41 (Fig. 30)

Zu Beginn des Monats Dezember liegen im Versuchsfeld ca. 80 cm meist körnigen, im oberen Teil sehr lockeren Schnees. Bei starker Kälte setzt dann am 5. Dezember der erste große Schneefall (Schicht 4) ein, dessen Ablagerung im unteren Teil stark verfestigt wird. Dagegen bleibt ihre Unterlage infolge der tiefen Temperatur trotz der großen Ueberlastung kohäsionsarm, ja verwandelte sich sogar zu Schwimmschnee, dessen lockere Struktur bis Ende Mai erhalten bleibt. Eine zweite, weniger ausgeprägte Diskontinuität wird durch die oberste Zone von Schicht 4 sowie die ganze Schicht 5 gebildet (Dezemberschneefälle).

Winter 1941/42 (Fig. 31)

Das Einschneien erfolgt zu Beginn der zweiten Dekade des Monats Oktober. Viele kleinere Schneefälle folgen sich beinahe ununterbrochen bis Ende der zweiten Dekade des Monats November. Dieser Schichtkomplex (Nr. 1, 2 a, 2 b) bleibt dann bis Ende Dezember ohne Ueberdeckung und erfährt deshalb im oberen Teil gar keine Verfestigung. Zudem bildet sich an deren Oberfläche ein schöner Reif aus. Schicht 2 b behält ihre lockere Struktur bis zum letzten Profil (Juni) bei und bildet zusammen mit der Reiflage die schwächste Stelle im Schneeegerüst. Vergleiche auch die unter [20] erwähnte Publikation über Schnee und Lawinen im Winter 1941/42.

Winter 1942/43 (Fig. 32)

Die lockeren Schneearten großer Zähigkeit und kleiner Festigkeit werden in diesem Winter durch die bis zum 22. November zur Ablagerung kommenden Schichten 1—4 gebildet. Das Fehlen weiterer Niederschläge bis anfangs Januar einerseits, sowie das Absinken der Temperatur mit deren Eintritt andererseits, verhindern eine Verdichtung: die Schichten 3 und 4 werden immer gröber und unplastischer. Erst kurz vor dem Abschmelzen läßt sich eine geringe Setzung, bzw. Verfestigung beobachten.

Winter 1943/44 (Fig. 33)

Auch im Winter 1943/44 sind bis anfangs Januar keine größeren Schneefälle zu verzeichnen. Die Novemberschicht bleibt deshalb den ganzen Dezember ohne Ueberdeckung. Die Folge davon ist eine intensive Schwimmschneebildung. Erst gegen Ende des Monats März tritt eine längere Wärmeperiode ein; die Plastizität wird dadurch etwas erhöht und es läßt sich eine geringe Verfestigung erkennen.

Winter 1944/45 (Fig. 34)

Im Zeitprofil 1944/45 können wir nirgends extrem lockere Schichten erkennen. Nach dem Einschneien Ende September folgen sich mehrere kleine Schneefälle, wobei die Maximaltemperaturen beinahe ständig in der Nähe der Nullgradgrenze liegen. Beim großen Neuschneefall anfangs November sinken die Außentemperaturen wohl ziemlich stark, doch die im Fundament aufgespeicherte Wärme genügt, um diesen Schichten eine wesentliche Plastizität zu erhalten. Im

Gegensatz zu andern Jahren entstehen so stark verfestigte Basis-Schichten (IX und X). Auch an der Oberfläche der gewaltigen November-Niederschläge kann sich keine ausgesprochene Diskontinuität ausbilden, denn die Temperatur steigt kurz nach dem Schneefall wieder an. Häufige kleine Ablagerungen kennzeichnen den Verlauf der Schneehöhenkurve während einer Periode tiefer Temperaturen im Monat Januar. Alle Ansätze zu Schichtauflösungen werden jedoch anfangs Februar jäh abgebrochen: Die Temperatur-Maxima erreichen innerhalb dieses Monats öfters die Nullgradgrenze und neue Schneefälle Mitte Februar (Schicht IIb), sowie anfangs März (Schicht IIIa), sorgen für die Verfestigung ihrer Unterlage. So kommt es, daß nirgends von einer eigentlichen Schwimmschneebildung gesprochen werden kann: der sehr schneereiche Winter 1944/45 hat sich ein äußerst stabiles Gerüst geschaffen.

Winter 1945/46 (Fig. 35)

Im Winter 1945/46 lassen sich wiederum deutlich mehrere Schwimmschneestockwerke unterscheiden. Die Septemberschicht wird schon in den ersten Tagen des Monats grobkörnig und kohäsionslos, erhält aber infolge der hohen Einstrahlung eine stabile Abdeckung durch eine Harschschicht, die man selbst im Ende Februar aufgenommenen Profil noch deutlich erkennt. Ähnlich geht es mit den Oktoberschneefällen; die Auflösung erfaßt nur eine mittlere Zone, während ihr unterster Teil durch Zusammendrückung, ihr oberer Teil durch Harschbildung verfestigt wird. Die Novemberablagerung erfolgt dann bei tiefen Temperaturen und hat bis anfangs Dezember, unter Wegfall neuer Kompressionen, Zeit, grobkörnig zu werden. Eine Verharschung tritt nicht ein und so bleibt die ganze Schicht bis Ende März kohäsionslos. Abgesehen von den Harscheinlagen, liegt also ein sehr wenig tragfähiges Fundament vor. Interessant ist ferner die offenbar in den sehr kalten, klaren Nächten in der Mitte des Monats Januar eingetretene Reifbildung an der Oberfläche von Schicht Ia. Die Reifkristalle lassen sich auch im Profil von Ende Februar noch deutlich feststellen [166].

Vor Abschluß dieses Werkes konnten auch noch die Zeitprofile der Winter 1946/47 und 1947/48 ausgewertet werden. Der Winter 1946/47 [231] war ausgesprochen kurz und relativ schneearm. Doch gerade dieser Umstand vermittelte einige neue Einblicke in das Leben der Schneedecke, indem damit das e i n e Extrem möglicher Schichtentwicklung, das Lockerbleiben des Gesamtgerüsts veranschaulicht wurde. Der folgende Winter 1947/48 zeigte dann das andere Extrem [232].

II. Allgemeine Zusammenhänge zwischen Spannungsverteilung und Kriechvorgang

1. Berechnungsgrundlagen

Wie die vorstehenden Untersuchungen zeigen, muß die weiße Erdenhülle als schichtige Ueberlagerung mehrerer plastischer Massen, veränderlicher Zähigkeit und Festigkeit aufgefaßt werden.

Das Eigengewicht der Massenteilchen erzeugt in jedem Körperelement Zug-, Druck- und Scherspannungen, welche im plastischen Material Schnee bleibende Deformationen hervorrufen. Spannungsverteilung und Kriechvorgang innerhalb jeder Schneedecke stehen deshalb in enger Wechselwirkung zueinander, und zwar so, daß jede Spannung eine bestimmte, stetig fortschreitende Verformung zur Folge hat, oder umgekehrt, jeder Kriechvorgang die Folge eines bestimmten Spannungszustandes ist. Diese konforme Beziehung bildet den Schlüssel zur Lösung aller statisch unbestimmten Probleme der Schneemechanik. Wenn die Verteilung der Eigengewichtskräfte, die Zähigkeitsverhältnisse und die durch das Terrain diktierten Auflagerungsbedingungen bekannt sind, so muß sich daraus auch der Spannungszustand innerhalb der Schichtfolge einigermaßen bestimmen lassen.

Doch haben wir bei den Untersuchungen über die Zähigkeitsverhältnisse verschiedener Schneearten erkennen müssen, daß η nicht konstant bleibt, sondern — wie das Material selbst — eine in Funktion der Zeit fortschreitende Veränderung erfährt. Da überdies auch das Gewicht des Gesamt-
aggregates infolge verschiedener Einwirkungen (wie Abtrag und Aufschüttung unter Windeinfluß, neuen Schneefällen im Laufe des Winters) variiert, können die Spannungsverhältnisse innerhalb der Schneedecke nicht konstant bleiben; es ist neben dem Faktor Ort, auch der Faktor Zeit (Zeitablauf, Vorgeschichte) am Gesamtgeschehen beteiligt.

Für die Durchführung spannungstheoretischer Untersuchungen sind wir deshalb gezwungen, Parameter einzuführen und je nach Problemstellung eine der beiden Variablen festzuhalten. Betrachtet man den Kriechvorgang lediglich während eines kurzen Zeitabschnittes, so können die Materialänderungen vernachlässigt und konstante Zähigkeitskoeffizienten eingeführt werden. Dieses Vorgehen eignet sich für die Spannungsuntersuchung in Funktion des Ortes. Sollen umgekehrt die Einwirkungen der Metamorphose, der Temperaturschwankungen, oder gar der wechselnden Schneehöhe in Funktion der Zeit zum Ausdruck kommen, so müssen die Lagekoordinaten festgehalten und die Zähigkeitskoeffizienten bzw. Belastungen variiert werden.

2. Horizontale Schneedecke

Betrachten wir vorerst den einfachsten Fall, die homogene, unendlich ausgedehnte Schneedecke gleichmäßiger Mächtigkeit auf horizontaler Unterlage! Das als Konstante angenommene Eigengewicht des Materials wird gemäß Fig. 36 durch Druckspannungen auf den Boden übertragen, so daß ein Setzungsprozeß eintreten muß, bei dem alle Horizontalschnitte eben und horizontal bleiben. Bezeichnet man die Mächtigkeit der Schneedecke mit d , ihr Raumgewicht mit γ_s und den Abstand einer Parallelebene von der Unterlage mit z , so wird die vertikal gerichtete Druckspannung

$$\sigma_z = \gamma_s \cdot (d - z) \quad (19)$$

Die Annäherungsgeschwindigkeit zweier Horizontalschnitte im Abstand dz beträgt

$$d v_z = - \gamma_s \cdot a_2^I \cdot (d - z) \cdot dz \quad (20)$$

wenn man mit a_2^I die spez. Zusammendrückungsgeschwindigkeit bei verhinderter Seitenausdehnung bezeichnet.

Die Geschwindigkeit eines Punktes in der Höhe z wird dann

$$v_z = -\gamma_s \cdot a_2' \cdot \left(d \cdot z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (21)$$

An der Snowoberfläche wird die Setzungsgeschwindigkeit maximal:

$$v_{max} = -\gamma_s \cdot a_2' \cdot \frac{d^2}{2} \quad (22)$$

Man erhält eine Parabel gemäß Fig. 36, deren Scheitelpunkt an der Oberfläche liegt.

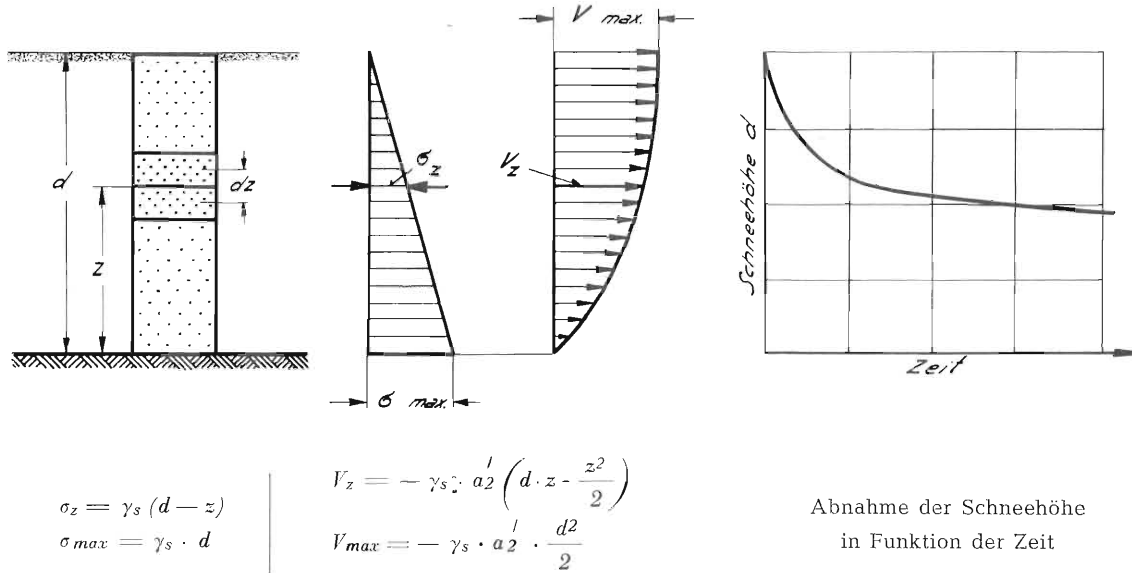


Fig. 36: Schematischer Verlauf der Setzung bei horizontaler, homogener Snowdecke

Wie HAEFELI [73] gezeigt hat, lassen sich nun die beiden Koeffizienten

a_2 = spezifische Zusammendrückungsgeschwindigkeit für $\sigma_z = 1 \text{ kg/dm}^2$ Druckspannung bei freier Seitenausdehnung, und

a_2' = spezifische Zusammendrückungsgeschwindigkeit für $\sigma_z = 1 \text{ kg/dm}^2$ Druckspannung bei vollständig verbotener Seitenausdehnung

auf Grund der dabei maßgebenden Spannungszustände (σ_z = Hauptspannung) miteinander in Beziehung setzen, so daß man

$$a_2' = a_2 \cdot \left[1 - \frac{2}{m \cdot (m - 1)} \right] \quad (23)$$

erhält. Ersetzen wir darin a_2 gemäß Gleichung 12 (Seite 25), wobei $a_3 = \frac{1}{\eta}$:

$$a_2 = \frac{m}{2(1+m)} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{1}{c \cdot \eta} \quad (12')$$

so folgt:

$$a_2' = \frac{m}{2 \cdot \eta \cdot (1+m)} \cdot \left[1 - \frac{2}{m \cdot (m - 1)} \right] \quad (24)$$

durch Ausmultiplikation und Kürzung läßt sich dieser Ausdruck vereinfachen zu

$$a_2' = \frac{m - 2}{2 \cdot (m - 1)} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{1}{c' \cdot \eta} \quad (25)$$

Wie wir bereits im 1. Kapitel dargelegt haben, kann m zwischen ∞ (maximale Porosität) und 2 (minimale Porosität) variieren. Der Faktor $1/c'$ in Gleichung 25 liegt demnach zwischen $1/2$ und 0, im Gegensatz zum Fall der freien Seitenausdehnung, für welchen Fall sich der entsprechende Faktor $1/c$ zwischen $1/2$ und $1/3$ bewegt, also 0 nicht erreicht.

Es erhellt daraus die bekannte Tatsache, daß die Kompressibilität bei verhinderter Seitenausdehnung unabhängig von einer gegebenen Zähigkeit zu Null werden kann, nämlich dann, wenn die dichteste Lagerung ($m = 2$) erreicht ist.

Der Wert von a_2' nimmt also während des Versuches ab. Will man die Kurve der Zusammendrückung in Funktion der Zeit aufzeichnen, so muß dieser Umstand berücksichtigt werden. Ansätze zur mathematischen Lösung des Problems haben bereits HAEFELI [70] und DE QUERVAIN [165] aufgezeigt.

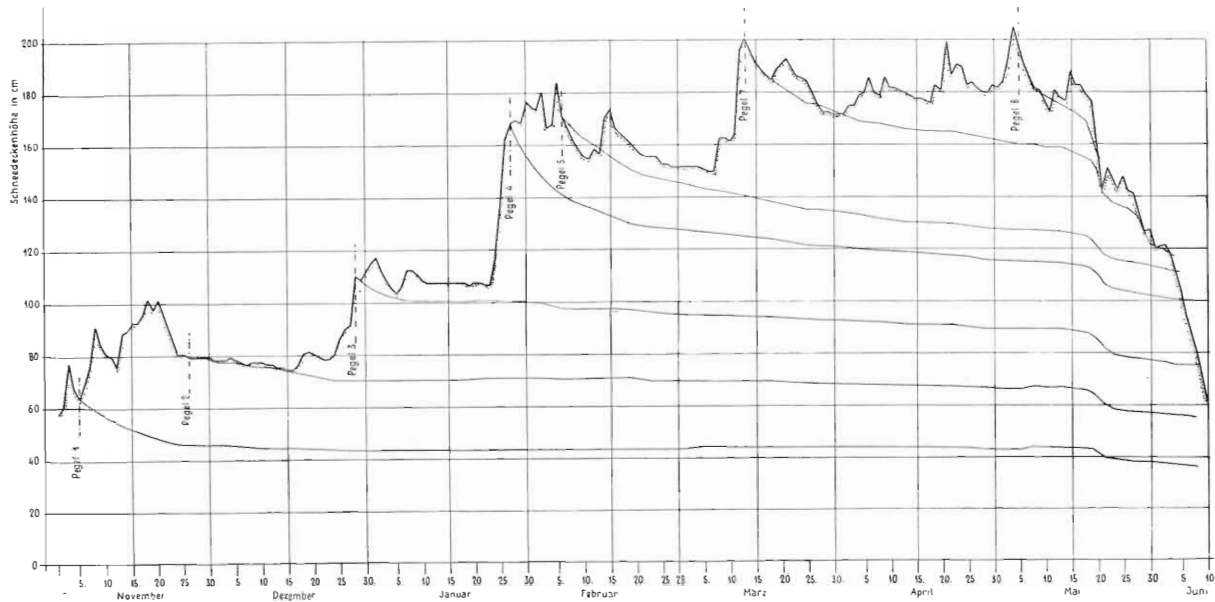


Fig. 37: Schichtpegelmessung im Standard-Versuchsfeld (Winter 1941/42)

Noch komplizierter werden die Verhältnisse, wenn man nicht nur die Zähigkeitswerte der einzelnen Schichten, sondern auch die Belastungen den natürlichen Verhältnissen anpassen will. Der Verlauf dieser Setzungskurven wird dann am besten auf experimentellem Wege [3] bestimmt. Fig. 37 gibt das Resultat einer derartigen Messung wieder und zeigt deutlich, wie die einzelnen Schichtmächtigkeiten anfänglich sehr schnell, mit zunehmender Zeit und Zähigkeit aber immer langsamer komprimiert werden.

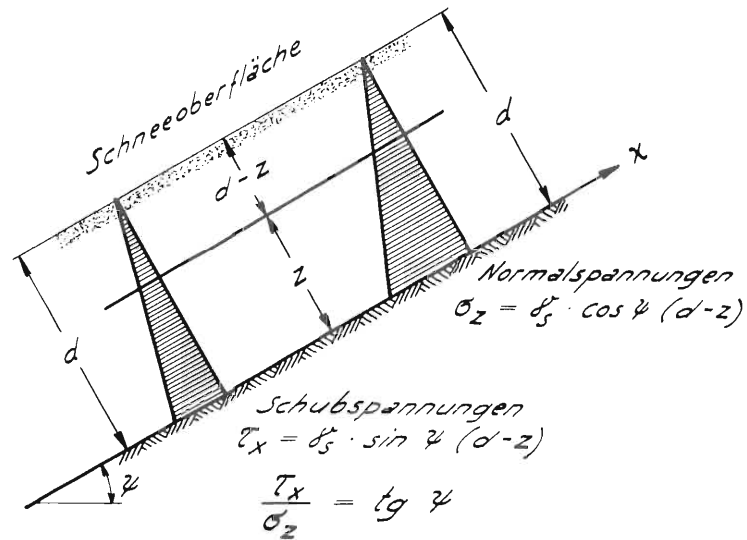
3. Schneedecke auf schiefer Ebene

Bei der unendlich langen, auf schiefer Ebene gelagerten Schneedecke mit konstantem Raumgewicht, gleichmäßiger Stärke und Plastizität, wird die Zusammendrückung von einem neuen Element, der Schiebung parallel zur Hangneigung, überlagert. Der totale Kriechweg setzt sich gemäß Fig. 38 aus einer Zusammendrückung senkrecht und einer Schiebung parallel zur Unterlage zusammen.

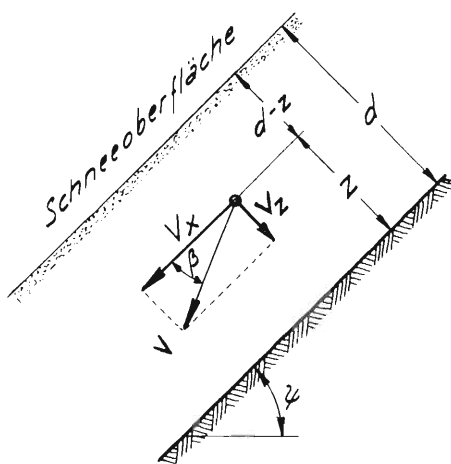
Die Schiebungsgeschwindigkeiten lassen sich hierbei relativ einfach berechnen. Gemäß Fig. 38 betragen die dazu Anlaß gebenden Schubspannungen

$$\tau_x = \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot (d - z) \quad (26)$$

a. Spannungskomponenten.



b. Kriechkomponenten.



Allgemein:

Zusammendrückungsgeschw.
 $V_z \sim \delta_s^* \cdot \cos \psi \cdot a_2' \left(d \cdot z - \frac{z^2}{2} \right)$

Schiebungsgeschwindigkeit
 $V_x = \delta_s^* \cdot \sin \psi \cdot a_3 \left(d \cdot z - \frac{z^2}{2} \right)$

Für $\psi = 45^\circ$:

$\frac{V_z}{V_x} \sim \frac{a_2'}{a_3} \sim \operatorname{tg} \beta_{45}$

$\operatorname{tg} \beta_{45} \sim \frac{m-2}{2(m-1)}$

Max. Porosität: $m = \infty$, $\operatorname{tg} \beta_{45} \sim 0,5$, $\beta_{45} \sim 27^\circ$

Porosität 0: $m = 0$, $\operatorname{tg} \beta_{45} = 0$, $\beta_{45} = 0^\circ$

Fig. 38: Spannungs- und Kriechkomponenten in der neutralen Zone

wenn die schiefe Ebene mit der Horizontalen den Winkel ψ einschließt. Die Verschiebungsgeschwindigkeit zweier, zur Unterlage paralleler Ebenen im Abstand dz beträgt

$$dv_x = \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot a_3 \cdot (d - z) \cdot dz \quad (27)$$

Die Schiebungsgeschwindigkeit eines Massenpunktes in der Höhe z wird zu

$$v_x = \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot a_3 \cdot \left(d \cdot z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (28)$$

Ihr Maximum tritt an der Oberfläche auf und beträgt dort

$$v_{max} = \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot a_3 \cdot \frac{d^2}{2} \quad (29)$$

Wir erhalten also für die Schiebungsgeschwindigkeit eine ähnliche Verteilungskurve wie für die Zusammendrückungsgeschwindigkeit im horizontalen Feld.

Die Berechnung der Zusammendrückungsgeschwindigkeit senkrecht zur Unterlage erfährt jedoch bei Annahme schiefer Auflagerung eine gewisse Komplikation und zwar deshalb, weil in den parallel zur Unterlage verlaufenden, druckbeanspruchten Flächen nun auch Schubspannungen wirksam sind. HAEFELI hat sich in seinen Arbeiten Schneemechanik [70] und Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke [71] schon eingehend mit diesem Problem befaßt und gezeigt, daß sich bei gegebenen Kriechrichtungen die Hauptspannungen berechnen lassen.

Zu einer Näherungslösung kommt man sofort, wenn man den Einfluß der Schubspannungen auf die Volumenänderungen vernachlässigt und die Komponenten parallel zur Hangebene gemäß Fig. 38 b berechnet.

Man erhält dann (Fig. 38 b):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_z}{v_x} \cong \frac{a_2'}{a_3} \cdot \cotg \psi, \quad \text{vergl. [71]}$$

und für $\psi = 45^\circ$, sowie unter Berücksichtigung von Gleichung 25

$$\operatorname{tg} \beta_{45} \cong \frac{m - 2}{2 \cdot (m - 1)} = \frac{1}{c'} \quad (30)^5$$

β stellt den Kriechwinkel bei beliebiger Hangneigung dar. Bei einer Hangneigung von $\psi = 45^\circ$ variiert der Winkel β_{45} , welcher die Kriechrichtung mit der Schneeoberfläche einschließt, zwischen etwa 27° (maximale Porosität) und 0° (minimale Porosität).

Für die spätere Betrachtung wesentlich ist die Tatsache, daß sich die parallel und senkrecht zur Unterlage wirksamen Spannungen ohne Berücksichtigung der Deformationserscheinungen berechnen lassen. Das Spannungsverhältnis $\tau_x : \sigma_z$ hängt in der von Längsspannungen freien, der sogenannten neutralen Zone lediglich vom Winkel ψ der Hangneigung ab und beträgt stets

$$\frac{\tau_x}{\sigma_z} = \operatorname{tg} \psi \quad (31)$$

da $\tau_x = \gamma_s \cdot \sin \psi (d - z)$ nach Gl. 26, und ferner $\sigma_x = \gamma_s \cdot \cos \psi (d - z)$

In der neutralen Zone lassen sich sowohl die Schnittkräfte σ_z und τ_x , als auch die Auflagerreaktionen auf Grund der einfachen Gleichgewichtsbedingungen berechnen.

⁵ Siehe auch Beitrag zum Schneebericht 1944/45 (Gl. 4) von HAEFELI.

4. Geschwindigkeitsverteilung im Staubereich einer Stützwand

Nach dieser Betrachtung der Kriechverteilung in der neutralen Zone wollen wir jetzt zum Problem des Spannungs- und Kriechvorganges im Bereich einer Stützwand übergehen. Die aus unendlicher Entfernung anströmende zähe Masse wird durch die senkrecht zur Falllinie errichtete Stützwand aufgehalten, so daß ein gewisser Staubereich entsteht, in welchem sich das Abbremsen der parallel zur Unterlage gerichteten Schiebungsgeschwindigkeiten vollzieht. Setzt man die Wand vorläufig als glatt voraus, so wird die Zusammendrückung senkrecht zur Unterlage nicht behindert, und wir können uns auf die parallel zur Unterlage gerichteten Kräfte konzentrieren.

Auf ein Massenteilchen von der Länge dx , der Höhe dz und der Tiefe $dy = 1$, wie es in Fig. 39 groß herausgezeichnet ist, wirken in Richtung der x -Achse folgende Kräfte:

auf die Fläche 1 die Druckkraft	$+ \sigma_x \cdot dz$
auf die Fläche 2 die Druckkraft	$- \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \cdot dx \right) dz$
auf die Fläche 3 die Schubspannung	$+ \tau_x \cdot dx$
auf die Fläche 4 die Schubspannung	$- \left(\tau_x + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \cdot dz \right) dx$
ferner die Eigengewichtskomponente des Massenteilchens	$- \gamma_s \cdot dx \cdot dz \cdot \sin \psi$

Diese Kräfte müssen nach dem Gesetz von NEWTON dem Produkt aus Masse und Beschleunigung gleichgesetzt werden. Bezeichnet man die parallel zur Unterlage gerichtete Geschwindigkeit wiederum mit v_x , die Erdbeschleunigung mit g und die Zeit mit t , so erhält man für das Gleichgewicht unseres Massenteilchens folgenden Differentialansatz:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} - \gamma_s \cdot \sin \psi = \frac{\gamma_s}{g} \cdot \frac{dv_x}{dt} \quad (32)$$

Hierin stellen σ_x , τ_x und v_x Funktionen von x und z dar.

In einer ersten Vereinfachung ist es zweckmäßig, die sehr kleinen Beschleunigungskräfte zu vernachlässigen und das ganze Problem im stationären Zustand zu betrachten. Dann geht Gleichung 32 in die einfachere Form

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} - \gamma_s \cdot \sin \psi = 0 \quad (33)$$

über.

Nun können die Spannungsgradienten durch die Deformationsbeschleunigungen ersetzt werden, denn es gelten die bekannten Gleichungen:

$$\tau_x = \frac{1}{a_3} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial z}; \quad \frac{\partial \tau_x}{\partial z} = \frac{1}{a_3} \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \quad (34)$$

$$\text{und} \quad \sigma_x = \frac{1}{a_2''} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{1}{a_2''} \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \quad (35)$$

wenn man die spezifische Zusammendrückungsgeschwindigkeit für $\sigma_x = 1 \text{ kg/dm}^2$ Druck in dem betrachteten Spannungszustand mit a_2'' bezeichnet (einseitig verhinderte Querdehnung, Fig. 41).

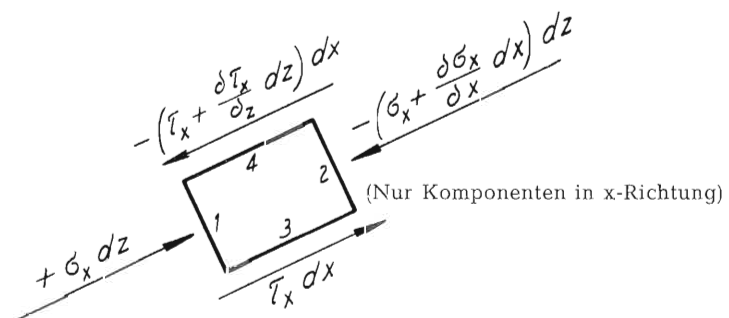
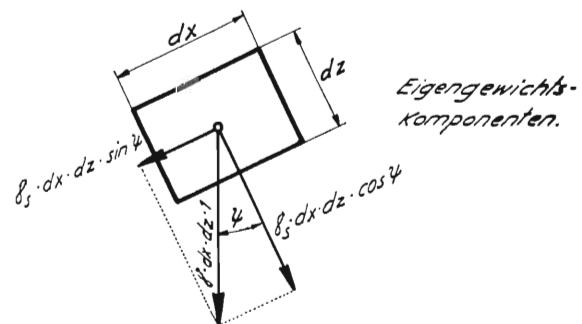
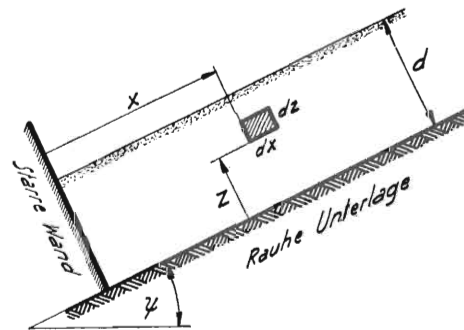


Fig. 39: Spannungszustand eines Massenteilchens bei Druck- und Scherbeanspruchung

Benützen wir die Zusammenhänge 34 und 35 in Gleichung 33, verwenden darin ferner eine Verhältniszahl K gemäß der Gleichung

$$K^2 = \frac{a_3}{a_2} \quad (36)$$

und schreiben statt a_3 wiederum $\frac{1}{\eta}$, so folgt:

$$K^2 \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} - \frac{\gamma_s \cdot \sin \psi}{\eta} = 0 \quad (37)$$

eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung mit Störungsglied, welche folgenden Randbedingungen zu genügen hat:

- a) für $z = 0$ ist $v_x = 0$ (Haften am Boden)
- b) für $x = 0$ ist $v_x = 0$ (Vollständiges Abbremsen an der Wand)
- c) für $z = d$ ist $\frac{\partial v_x}{\partial z} = 0$ (keine Schubspannungen an der Schneeoberfläche)
- d) für $x = \infty$ ist $v_x = -\gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left(d \cdot z - \frac{z^2}{2} \right)$
(Schiebungsgeschwindigkeit in der neutralen Zone)

Bei der Lösung dieser Gleichung stößt man auf wesentliche Schwierigkeiten, so daß es mir zunächst notwendig schien, auch das Störungsglied zu vernachlässigen und so auf die LAPLACE'sche Gleichung zurückzugehen. Schließlich ist Herrn Dr. Preißmann, Mathematiker an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH durch eine geringfügige Aenderung in den Randbedingungen doch eine Lösung gelungen. Herrn Dr. Preißmann bin ich für diese Arbeit zu ganz speziellem Dank verpflichtet.

Er ersetzt die Parabelfunktion der Randbedingung d) durch eine Sinusfunktion

$$d') \text{ für } x = \infty \quad v_x = -\gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{d^2}{2 \cdot \eta} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right)$$

verwendet ferner das Spiegelungsprinzip von SCHWARZ und erhält als Schlußlösung für die parallel zur Unterlage gerichtete Geschwindigkeitskomponente v_x in Funktion von x und z

$$v_x = -\gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{d^2}{2 \eta} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot K \cdot d}} \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (38)$$

Der Staubereich der Stützwand reicht theoretisch bis ins Unendliche. Für eine konstante Höhe z läßt sich die Geschwindigkeitsverteilung längs der x -Achse durch eine Exponentialfunktion darstellen (Längsprofil der Geschwindigkeitsverteilung). Für einen konstanten Abstand x von der Wand ergibt sich als Geschwindigkeitsverteilung in Funktion von z eine Sinusfunktion (Querprofil der Geschwindigkeitsverteilung). Je kleiner die Schneehöhe d und die Verhältniszahl K , umso rascher gleichen sich die Geschwindigkeiten denjenigen im neutralen Feld an (Fig. 40).

Die Verhältniszahl K spielt in dieser Gleichung eine wesentliche Rolle, so daß wir versuchen müssen, ihren Größenbereich bei natürlicher Schneebedeckung abzugrenzen. Wie Fig. 41 zeigt,

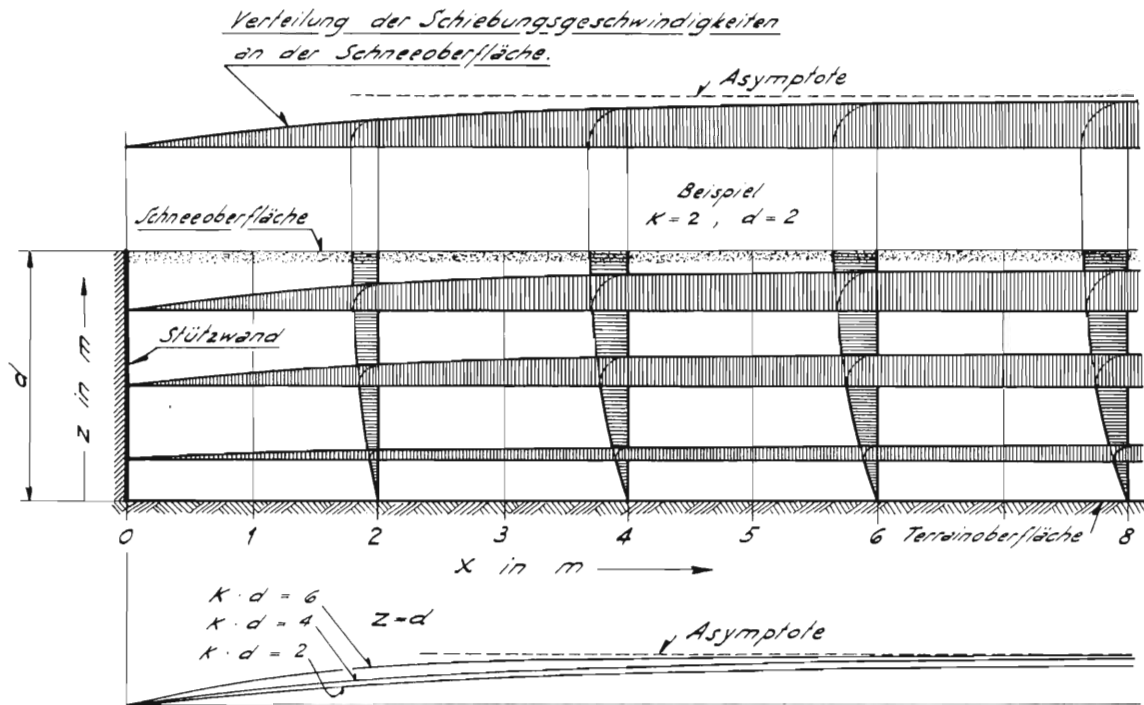


Fig. 40: Längs- und Querprofile der Geschwindigkeitsverteilung v_x im Staubereich einer Stützwand

Spannungszustand	σ_x	σ_y	Spez. Zusammendrückungs- geschwindigkeit.	Spez. Zusammendrückungsgeschwindigkeit Spez. Schiebungsgeschwindigkeit
I. Freie Querdehnung 	0	0	$a_2 = \frac{1}{\eta} \frac{m}{2(1+m)}$	$\frac{a_2}{a_3} = \frac{m}{2(1+m)}$ Variiert zwischen $\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}$
II. Beidseitig verhinderte Querdehnung. 	$\sigma_z \cdot \frac{1}{m-1}$	$\sigma_z \cdot \frac{1}{m-1}$	$a_2' = \frac{1}{\eta} \frac{m-2}{2(m-1)}$	$\frac{a_2'}{a_3} = \frac{m-2}{2(m-1)}$ Variiert zwischen $\frac{1}{2} \div 0$
III. Einseitig verhinderte Querdehnung. 	$\sigma_z \cdot \frac{1}{m}$	0	$a_2'' = \frac{1}{\eta} \frac{m-1}{2m}$	$\frac{a_2''}{a_3} = \frac{m-1}{2m}$ Variiert zwischen $\frac{1}{2} \div \frac{1}{4}$

Fig. 41: Spezifische Zusammendrückungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Belastungszuständen

handelt es sich bei der Zusammendrückung gemäß Fig. 39 um eine Zwischenstellung der beiden bisher betrachteten Spannungszustände, indem in Richtung der z -Achse eine Querdeformation möglich, in Richtung der y -Achse aber vollständig unterbunden ist.

Analog a_2' (S. 59) errechnet man a_2''

$$\sigma_z \cdot a_2'' = \sigma_z \cdot a_2 - \sigma_x \cdot \frac{a_2}{m} \quad (39) \quad (\text{Fig. 41, III.})$$

Damit die Querdehnung in x -Richtung unterbunden wird, (ebener Spannungszustand) muß die Gleichung

$$\sigma_x = - \frac{\sigma_z}{m} = 0 \quad (40)$$

erfüllt sein. Berechnet man hieraus σ_x und setzt den Wert in Gleichung (39) ein, so folgt

$$a_2'' = a_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right)$$

oder — wenn man a_2 durch m und η ausdrückt —

$$a_2'' = \frac{m}{2\eta(1+m)} \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right)$$

$$a_2'' = \frac{m-1}{2 \cdot m} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{1}{c'' \cdot \eta} \quad (41)$$

Der Faktor $1/c''$ variiert zwischen $1/2$ (maximale Porosität, $m = \infty$) und $1/4$ (minimale Porosität, $m = 2$). (Fig. 41, III. einseitig verhinderte Querdehnung).

In Gleichung 36 eingesetzt folgt:

$$\left. \begin{aligned} K^2 &= 2 \div 4 \\ K &= 1,4 \div 2,0 \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Die Längsprofile der Geschwindigkeitsverteilung, welche nachfolgend auch als *Staukurven* bezeichnet werden, steigen für Neuschnee rascher an, als bei Altschnee, doch bewegt sich der Unterschied in relativ engen Grenzen. An der Oberfläche einer Altschneedecke von der Mächtigkeit d verläuft die Staukurve ähnlich derjenigen an der Oberfläche einer Neuschneedecke von der Mächtigkeit von $1,4 d$.

Hinsichtlich des Staubereiches wirkt sich somit die Alterung des Schnees ähnlich aus wie eine Erhöhung der Schneemächtigkeit. In beiden Fällen erfährt die Staukurve eine gewisse Verflachung.

5. Strömungsbilder bei verschiedenen Randbedingungen

a) **Druckzonen.** Um die Spannungs- und Deformationserscheinungen bei komplizierten Randbedingungen überblicken zu können, bedient man sich zweckmäßig des Isotachenbildes, wie es in Fig. 42 für den vorhin betrachteten Fall einer ebenen, senkrecht zum Terrain errichteten Stützwand eingezeichnet ist. Die beiden durch Terrainoberfläche und Wanddruckfläche gebildeten Ränder enthalten zugleich die Null-Isotachen, denen sich die übrigen in einem gewissen Abstand anschmiegen.

Bei solcher Betrachtung kann das Problem der Stützwand ohne weiteres auch auf den Fall von beliebig geneigten Terrassen übertragen werden. Wie sich aus dem Abstand der Isotachen schließen läßt, werden die Druckspannungen mit zunehmender Abflachung der Terrasse immer kleiner, während die Scherkräfte anwachsen. Im Extremfall kann man sich die Terrasse in gleicher Neigung

denken wie das Terrain selbst; die Kurvenscharen werden vollständig gestreckt und verlaufen — gemäß dem Spannungszustand der neutralen Zone — parallel zur Unterlage.

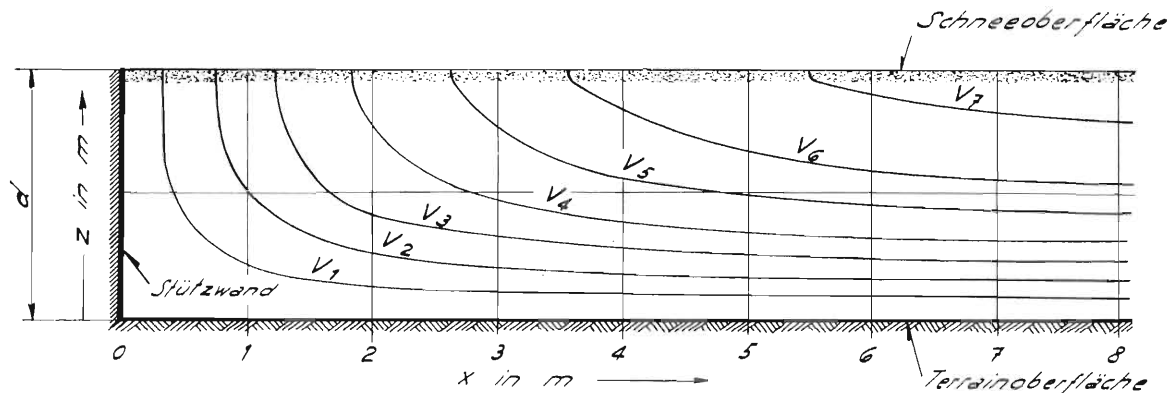


Fig. 42: Isotachenbild im Staubereich einer Stützwand

b) **Zugzonen.** Um von den Druckzonen auf die Zugzonen überzugehen, brauchen wir lediglich die Vorzeichen der Spannungen zu ändern. Betrachtet man beispielsweise die gleichmäßige Schneeeablagerung auf einer scharfen Kante, wie dies in Fig. 43 dargestellt ist, so erkennt man leicht, daß in der Mittelsenkrechten keine zur Unterlage parallelen Kriechgeschwindigkeiten auftreten können. Es darf dort somit ohne Aenderung der Randbedingungen eine vertikale Wand aufgestellt werden, welche die Schneedecke aufschneidet und ihrerseits die Zugkräfte aufnimmt. Es entstehen somit zu beiden Seiten der Kante Zugzonen, ähnlich den beim Stützwandproblem behandelten Druckzonen.

Auch im Bereich von Einkerbungen, wie sie beispielsweise bei Wegbauten oder zu niedrig konstruierten Lawenverbauungen auftreten, entstehen Zugspannungen. Fig. 44 zeigt die dabei zu erwartenden Kurven konstanter Geschwindigkeit. Der Terrainfortsatz wirkt als Störquelle in dem sonst neutralen Feld und hat eine Geschwindigkeitsverzögerung zur Folge. Oberseits der Störquelle entsteht eine Druckzone, unterseits eine Zugzone.

c) **Scherzonen.** Setzt man anstelle eines durchgehenden Werkes ein Einzelelement voraus, welches von der Schneedecke umströmt werden muß, so entstehen nicht nur Druck- und Zugzonen, sondern auch seitliche Scherzonen [71]. Die Linien konstanter Geschwindigkeit weichen der Störquelle aus und werden erst in unendlicher Entfernung parallel. Durch den Einbau von Einzelelementen werden somit künstlich Zug-, Druck- und Scherzonen erzeugt.

Scherzonen entstehen ebenfalls durch seitliche Begrenzung der Schneedecke infolge von Felsrippen und dergleichen, welche sich in der Fallinie den Berg hinunter ziehen. Die Schiebungsgeschwindigkeit ist dann in einer zur Unterlage parallelen Ebene nicht überall gleich groß, sondern nimmt gegen die Ränder hin zu null ab.

II. Gleiten auf der Unterlage

1. Kriechvorgang der natürlichen Schneedecke auf schiefer Ebene

Zur generellen Abklärung der Zusammenhänge zwischen Spannungs- und Deformationserscheinungen der Schneedecke wurden im Abschnitt I dieses Kapitels vorwiegend homogene Stoffzusammensetzungen betrachtet. Diese Voraussetzung ist jedoch in der Natur praktisch nie erfüllt. Das Schneeprofil zeigt schichtigen Aufbau, und über die stoffliche Verschiedenheit der einzelnen Ablagerungen hinaus macht sich der Einfluß wechselnder Temperaturen geltend, so daß

jeder Schicht besondere, im Laufe der Zeit ändernde Zähigkeitswerte zugewiesen werden müssen. Von dieser Inhomogenität wird naturgemäß auch die Kriechverteilung beeinflusst. Von bloßem Auge erkennbare Fließbewegungen, das Aufstauchen und Faltenlegen der Schneedecke und dergleichen, werden damit zu Spezialfällen normaler Deformationsprozesse.

Die Schiebungsgeschwindigkeit jedes Massenteilchens stellt die Summe von Geschwindigkeitsanteilen dar, welche sich gemäß NEWTON aus Zähigkeit und Schubspannung berechnen lassen. Einfacher verwendet man den reziproken Wert des Zähigkeitskoeffizienten, also den Wert a_3 , den man auch oft als Plastizitätsmaß bezeichnet. Ist das Raumgewicht $\gamma_s = f_1(z)$ gegeben, so läßt sich gemäß Fig. 46 die Schubspannung $\tau_x = f_2(z)$ bestimmen, welche dann mit dem entsprechenden Plastizitätsmaß a_3 multipliziert den Geschwindigkeitsanteil ergibt. Als letzte Operation haben wir alle Geschwindigkeitsanteile vom Bodenfixpunkt ($z = 0$), bis zu der gewünschten Höhe zu summieren, um so die resultierende Schiebungsgeschwindigkeit v_x des betrachteten Punktes zu erhalten.

Je nach den natürlichen Gegebenheiten resultieren dabei ganz verschiedene Verteilungen der Schiebungsgeschwindigkeiten längs der z -Achse. Als einzige gemeinsame Merkmale aller Kriechprofile erkennt man das Fortschreiten der Schiebungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand über dem Boden einerseits, und die parallel zur z -Achse gerichtete Kurventangente an der Schneeoberfläche ($z = d$) andererseits.

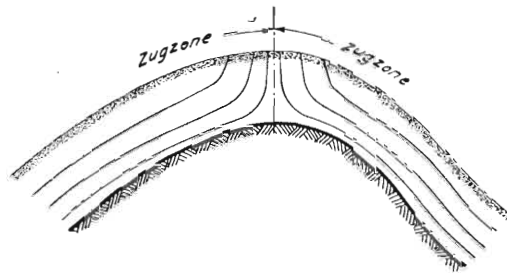


Fig. 43: Isotachenbild im Staubereich einer Krite

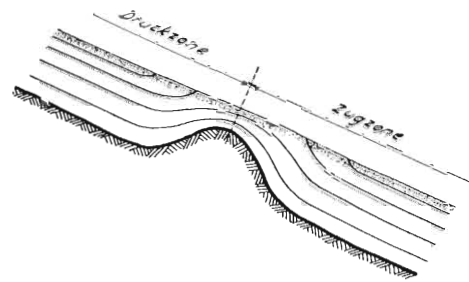


Fig. 44: Isotachenbild im Bereich von Einkerbungen

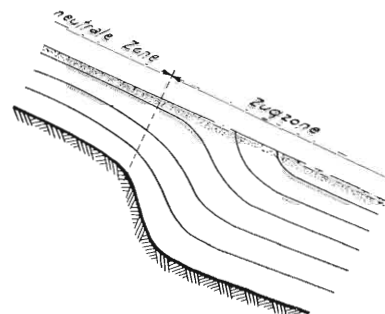


Fig. 45: Isotachenbild bei Bodenvertiefungen

2. Auftreten großer Geschwindigkeiten

In der Natur treten relativ oft Fälle ein, bei denen das Kriechen der Schneedecke von bloßem Auge wahrnehmbare Geschwindigkeiten erreicht. Wie sind derartige Fließerscheinungen zu erklären? Welche äußeren oder inneren Einflüsse sind dabei maßgebend?

Auf alle diese Fragen gibt das bereits erwähnte, generelle Kriechprofil gemäß Fig. 46 Aufschluß. Wie daraus ersichtlich ist, werden die pro Zeiteinheit zurückgelegten Kriechwege durch die Schubspannung τ_x einerseits, und durch das Plastizitätsmaß a_3 andererseits, bestimmt. Während sich nun die τ_x -Werte in verhältnismäßig engen Grenzen bewegen, haben sich die Zähigkeiten

des Schnees als sehr stark veränderliche Größen erkennen lassen. Kristallform, Porosität und Temperatur des Lockeraggregates fallen hinsichtlich der Stoffplastizität wesentlich ins Gewicht.

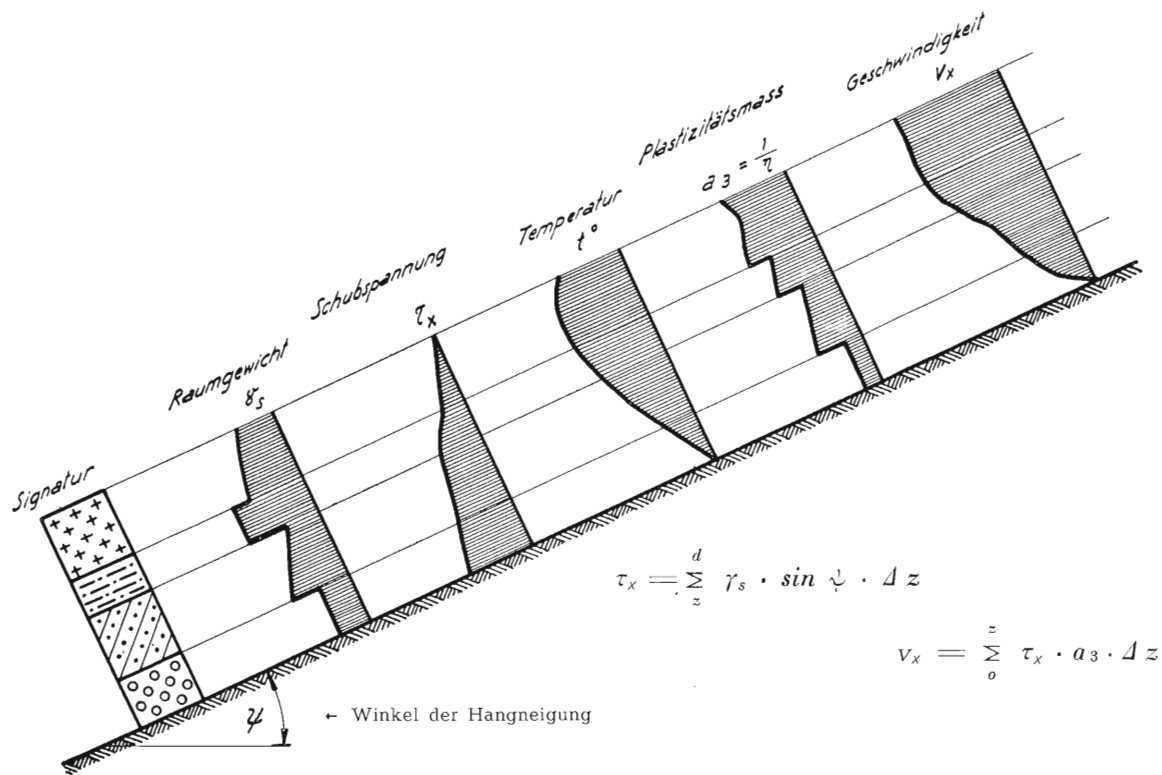


Fig. 46: Schema für die graphisch-rechnerische Bestimmung der Geschwindigkeit v_x im neutralen Feld

Um extrem große Geschwindigkeiten zu erhalten, müssen wir unser Augenmerk auf jene Stellen richten, wo hohe Temperaturen auftreten. Dies ist in beiden Grenzschichten der Schneedecke der Fall. Hohe Außentemperaturen oder intensive Einstrahlungen haben eine Erwärmung der Schneeoberfläche zur Folge, welche sogar zu Schmelzprozessen führen kann. An der unteren Begrenzungsfläche ist es in erster Linie die im Herbst noch hohe Bodentemperatur, evtl. aber auch der durch die Gesamtschneedecke durchgehende, und vom dunkeln Terrain aufgenommene Strahlungsanteil, welcher zu einer kräftigen Erwärmung des Stoffes führen kann.

Wenn man ferner die Schubspannung als Triebkraft der Schiebungsgeschwindigkeit berücksichtigt, so wird sofort klar, daß den Zähigkeitswerten der unteren Grenzschicht hinsichtlich der Bewegungsgröße des Gesamtprofils entscheidende Bedeutung zukommt. Einige Millimeter Höhe des fluiden Stoffes genügen, um das Auftreten großer Geschwindigkeiten zu ermöglichen und bei flüchtiger Betrachtung den Eindruck zu erwecken, die Gesamtschneedecke gleite direkt auf ihrer Unterlage. Effektiv läuft jedoch das Geschwindigkeitsprofil in den meisten Fällen am Boden zu Null aus, wobei allerdings der Ausgleich in einer relativ dünnen Schmierschicht erfolgen kann. Das Fließen wird damit zum sichtbaren Beweis des sich in jeder Schneedecke, im Allgemeinfalle aber mit viel kleineren Geschwindigkeiten abspielenden, natürlichen Deformationsvorganges.

Ausnahmen der Regel treten dann ein, wenn durch Wasserinfiltration auch die obersten Bodenschichten zähflüssig werden. Der Fußpunkt des Geschwindigkeitsprofils verschiebt sich damit in das Erdreich, was zu einer „Verrüfung“ ganzer Hangpartien führen kann.

3. Kriechschäden

Dem Bergbauer ist das Kriechen der Schneedecke in erster Linie aus den davon herrührenden Schäden bekannt. Die Berner sprechen vom „Sueggen“, die Urner vom „Schläsmen“ und die Glarner vom „Märtschen“ des Schnees [93]. Aufgestauchter Humus, nicht selten auch entwurzelte Vegetationsteile, ja vollständig gelöste Grasnarben gemäß Fig. 47, zeugen von einer Gleitbewegung des Schnees auf der Terrainoberfläche und lassen gleichzeitig auch die Größe der dabei auftretenden Kräfte erkennen. HESS [93] schreibt dazu: „Die Kräfte, die durch die langsame Bewegung der Schneedecke wirksam werden, sind jedenfalls bedeutender als gewöhnlich angenommen wird. Die Sueggischneewirkung macht sich hauptsächlich auf Weiden, und an steilen Wildheuplanken verheerend geltend, indem oft nicht nur die Grasnarbe abgerissen, sondern auch der Boden 0,5 bis 1 m tief aufgewühlt wird. Wie die Ausdrücke Sueggen, Schläsmen und Märtschen sprachlich sehr zutreffend darlegen, handelt es sich dabei um einen langsamen, klebrig bis halbflüssig verlaufenden Vorgang“.

Bei natürlicher Geländegestaltung entstehen dann vielfach Zugrisse im oberen Teil des Hanges. Die Zugverankerung fällt damit aus und es erfolgt eine Zunahme der Druckspannungen im Bereich der Abstützung im unteren Teil des Hanges. Dieser Prozeß führt sehr oft zu einer Faltenbildung der Schneedecke, wobei das plastische Material versucht, dem Zwang auszuweichen [70]. Es liegt



Fig. 47: In die Schneedecke eingerollte Grasnarbe

Photo J. Neher, Zürich



Fig. 48: Faltenlegung der Schneedecke

Photo S L F



Fig. 49: Durch den Kriechvorgang entwurzelte Tanne

Photo S L F

somit ein dem Ausknicken elastischer Druckstäbe ähnliches Verhalten vor, doch führen beim zähflüssigen Stoff schon kleinste Kräfte zum Verzweigen des Gleichgewichtes; die Spannungsgröße bestimmt lediglich die Geschwindigkeit, mit der das Ausknicken erfolgt [185]. Die Gesamtschneedecke legt sich dann gemäß den Figuren 48 und 49 in Falten. Mit der Kompression der Schneedecke erhöht sich jedoch auch die Zähigkeit des Stoffes und die Gesamtbewegung klingt langsam ab.

IV. Lawinenbildung

1. Allgemeines

Als sichtbaren Ausdruck des natürlichen Deformationsprozesses haben wir das Fließen der Schneedecke behandelt; als sichtbarer Ausdruck der Brucherscheinungen wird uns nun die Lawinenbildung beschäftigen.

Wenn die Spannung irgendwo innerhalb der Schneedecke ihren Festigkeitswert erreicht, dann kommt es an dieser lokalen Stelle zur Trennung; die Nachbarzonen erfahren eine plötzliche Mehrbelastung und werden deshalb ebenfalls von der Bruchbildung erfaßt, so daß sich kleinere oder größere Teile der Schneedecke von ihrem Verband lösen und der Hangneigung entsprechend, in beschleunigter Bewegung dem Talgrund zustreben. Es sei deshalb mit aller Deutlichkeit festgehalten, daß jeder Lawinnenniedergang mit einer Bruchbildung der Schneedecke beginnt.

Dieser Vorgang leitet vom Bereich der Statik, dem die Gleichgewichtsbetrachtung der langsam kriechenden Schneedecke angehört, in das Gebiet der Dynamik über. Bezeichnet man ganz allgemein die Spannung mit σ und ihren Grenzwert mit β , die Koordinaten eines Elementes der Schneedecke mit x, y und z und die Zeit mit t , so müssen die beiden Funktionen

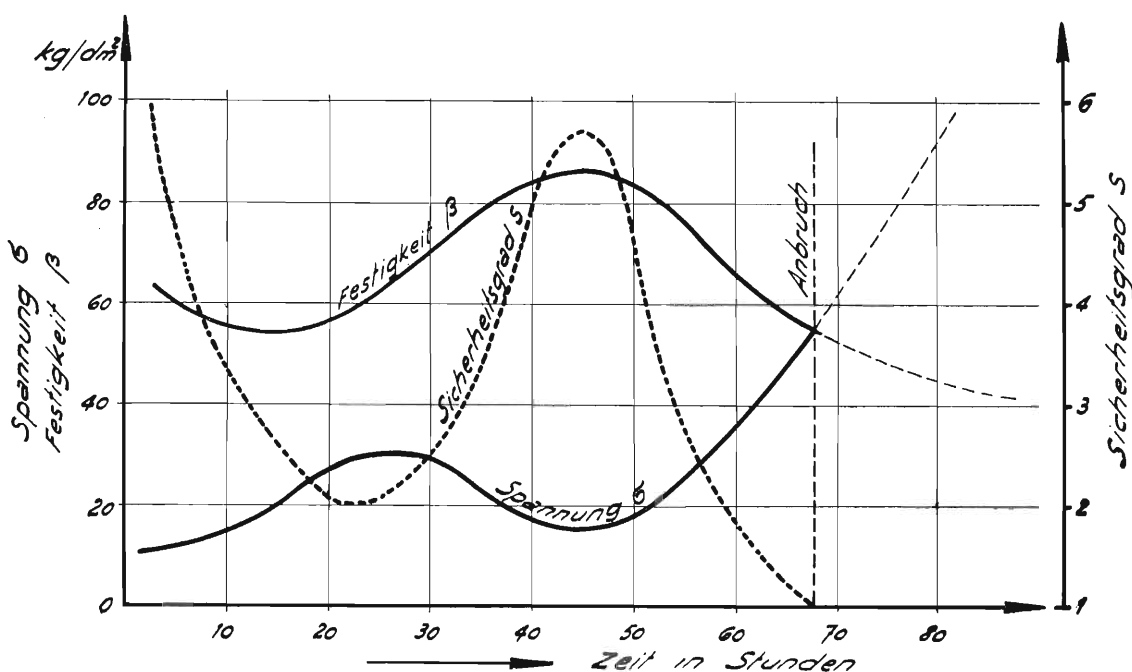


Fig. 50: Stabilitätsdiagramm

$$\sigma = f_1(x, y, z, t) \quad (43)$$

und

$$\beta = f_2(x, y, z, t) \quad (44)$$

einander gegenübergestellt werden. Die Schneedecke verhält sich solange stabil als

$$\sigma < \beta \quad (45)$$

Sind die besonders gefährdeten Zonen der keineswegs gleichmäßig beanspruchten Schneedecke bekannt, läßt sich ein Stabilitätsdiagramm gemäß Fig. 50 aufzeichnen. Die beiden Kurven für σ und β stellen hierin den Spannungs- bzw. Festigkeitsverlauf des betrachteten Elementes in Funktion der Zeit dar. Durch Definition und Aufzeichnung eines Sicherheitsgrades s , welcher das Verhältnis von Festigkeit zu Spannung ausdrückt, gewinnt man eine anschauliche Darstellung über die Stabilitätsänderungen der betrachteten Zone in Funktion der Zeit.

2. Theoretische Möglichkeiten der primären Bruchbildung

Die beim Schnee bestehende, enge Wechselwirkung zwischen Spannungszustand und Materialfestigkeit macht eine gleichzeitige Betrachtung beider Elemente notwendig. Hierin ist wohl eines der wesentlichsten gemeinsamen Merkmale der Erd- und Schneemechanik, gleichzeitig aber auch ihr Hauptunterschied gegenüber den Stabilitätsuntersuchungen bei unveränderlichen Werkstoffen zu erblicken.

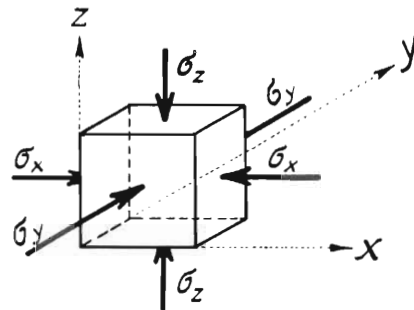
Unter dem Einfluß allseitiger Druckwirkung erfährt jeder Schneekubus eine Verfestigung; bei fehlender Kompression tritt hingegen eine Lockerung des Gefüges und damit eine Abnahme der Verbandsfestigkeit ein. Es erhellt daraus die große Bedeutung, welche den Raumgewichtsveränderungen zukommt und man erkennt sofort, daß es in der Schneemechanik mit Rücksicht auf die Selbstverfestigung des Stoffes stets notwendig ist, den dreidimensionalen Spannungszustand zu betrachten. Dies geschieht am besten durch Aufzeichnen der auf ein würfelförmiges Schneeelement einwirkenden Normalspannungen (Fig. 51). Unter a) haben wir alle drei Normalspannungen positiv angenommen; es ist eine starke Gefügeverfestigung zu erwarten. Bei b), mit zwei positiven und einer negativen Normalspannung, entscheidet deren Größenverhältnis über die Möglichkeit einer Verdichtung; dieselbe Feststellung gilt auch für den Fall c) mit einer positiven und zwei negativen Normalspannungen. Eindeutig ist die unter dem Einfluß allseitiger Zugspannungen erfolgende Schichtauflösung im Falle d). Je nach Spannungszustand wird der betrachtete Schneekubus also eine Verfestigung oder Auflösung erfahren, eine Tatsache, welche bei jeder Stabilitätsuntersuchung der Schneedecke zu berücksichtigen ist.

a) Neutrale Zone

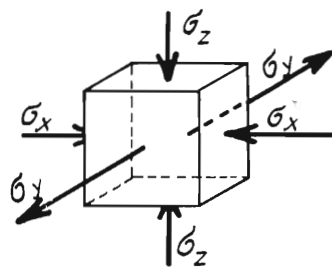
Fall 1: Druckspannungen senkrecht zur Unterlage

In der neutralen Zone einer Schneedecke lassen sich die Zusammenhänge zwischen Spannungszustand und Materialveränderung relativ einfach überblicken. Die Zusammendrückung erfolgt in z -Richtung und die beiden Normalspannungen σ_y und σ_x sorgen lediglich dafür, daß keine Querdehnungen entstehen. Es wird

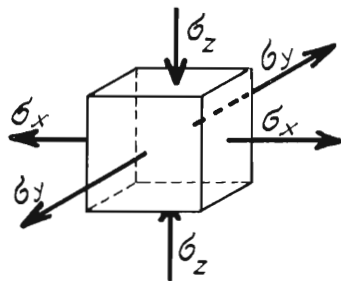
$$\sigma_z = \sum_z^d \gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \Delta z \quad (46)$$



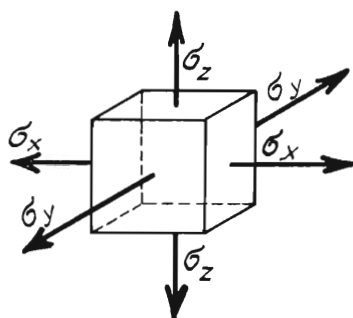
- a)
- σ_z positiv
 - σ_x positiv
 - σ_y positiv



- b)
- σ_z positiv
 - σ_x positiv
 - σ_y negativ



- c)
- σ_z positiv
 - σ_x negativ
 - σ_y negativ



- d)
- σ_z negativ
 - σ_x negativ
 - σ_y negativ

Fig. 51: Dreidimensionaler Spannungszustand eines Körperelementes

Unter den gleichen vereinfachenden Annahmen wie auf Seite 62 gilt ferner annähernd⁶:

$$\sigma_y = \sigma_x \cong \sigma_z \cdot \frac{l}{m-1} \quad (47)$$

Die Größe aller Normalspannungen wird durch die Eigengewichtskomponente der Ueberlagerung bestimmt und wir stoßen wiederum auf die bereits festgestellte Tatsache, daß Schneeschichten, welche längere Zeit an der Oberfläche liegen ($\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x = 0$) keine Kompression erfahren und dementsprechend relativ rasch in Auflösung übergehen. Da sie sich aber in grobkörnigem Zustand auch bei späterer, starker Belastung praktisch nicht mehr komprimieren lassen, bringt jeder Unterbruch der Niederschlagsfolge die Bildung kohäsionsarmer Schichten mit sich. Bei kleinen Schneefällen und vornehmlich tiefen Temperaturen entsteht so ein lockeres Gerüst großer Zähigkeit und kleiner Festigkeit, das allgemein als Schwimmschneefundament bezeichnet wird. Spätere Schneefälle beanspruchen diese Unterlage dann wohl im Sinne einer Kompression; eine wesentliche Raumgewichtserhöhung wird aber in den meisten Fällen nur infolge einer kurzzeitigen, durch Bruch eingeleiteten Verdichtung (auch Kurzsetzung, Struktorkollaps oder Bruchverdichtung genannt) eintreten können. In der Ueberwindung der Druckfestigkeit einzelner oder mehrerer Schichten durch vertikal zur Unterlage gerichtete Eigengewichtskräfte sehen wir somit eine erste Möglichkeit primärer Bruchbildung. Kritische Ueberbeanspruchungen entstehen sehr oft auch durch den Skiläufer, und zwar besonders beim stoßweisen Absetzen der Ski im Aufstieg oder infolge Druckwirkung beim Schwingen in der Abfahrt.

Die Bruchverdichtung der Unterlage ist stets von einem dumpfen Dröhnen, dem bekannten „Wumm“ der Schneedecke begleitet. Infolge der Kurzsetzung gerät die Porenluft in einen Druckzustand und strömt dann mit großer Geschwindigkeit durch die in der Schneedecke entstandenen Risse aus. Sehr oft können bei derartigen Situationen Fernauslösungen beobachtet werden, und dies offenbar deshalb, weil durch Boden- oder Lufterschütterungen auch Schneefundamente in Nachbargebieten zum Einsturz kommen.

Als besonders prädestinierte Exposition für die Schwimmschneebildung sind kalte Nordhänge mit geringer Schneebedeckung zu erwähnen. Ferner spielt auch die Bodenbewachung eine Rolle. In Alpenrosen- oder Erlengeldern und dergleichen wird das Gewicht der Schneeschichten weitgehend von den Pflanzenteilen übernommen, so daß die zu Kompressionen Anlaß gebenden Normalspannungen praktisch verschwinden.

Die hier absichtlich an erster Stelle besprochene Möglichkeit der primären Bruchbildung ist als Hauptursache aller im schweizerischen Alpengebiet niedergehenden Lawinen des Frühwinters, und vor allem auch eine der wesentlichen Ursachen vieler Lawinenunfälle der Skiläufer bekannt.

⁶ Um die Annäherung überblicken und mit den von HAEFELI entwickelten Formeln vergleichen zu können, verwenden wir dessen Gleichung 10 auf Seite 8 von [71], welche in unserer Schreibweise wie folgt lautet

$$\sigma_x = z \cdot \gamma s (\cos \psi - 2 \sin \psi \cdot \operatorname{tg} \beta)$$

β = Winkel, den die resultierende Kriechrichtung eines Massenpunktes mit der Hangneigung ψ einschließt.

β_{45} = Winkel, den die resultierende Kriechvorrichtung eines Massenpunktes mit der Hangneigung $\psi = 45^\circ$ einschließt.

Die Näherungsgleichung 24, Seite 15 von [71] lautet:

$$\operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg} \psi \cong \operatorname{tg} \beta_{45}$$

Durch Einsetzen dieses Wertes in obige Gleichung folgt:

$$\sigma_x = z \cdot \gamma s \cdot \cos \psi (1 - 2 \operatorname{tg} \beta_{45})$$

Drückt man hierin $\operatorname{tg} \beta_{45}$ durch m aus, gemäß unserer Näherungsgleichung 30, so geht durch Kürzung

$$\sigma_x \cong \sigma_z \cdot \frac{1}{m-1},$$

also unsere Gleichung 47 hervor.

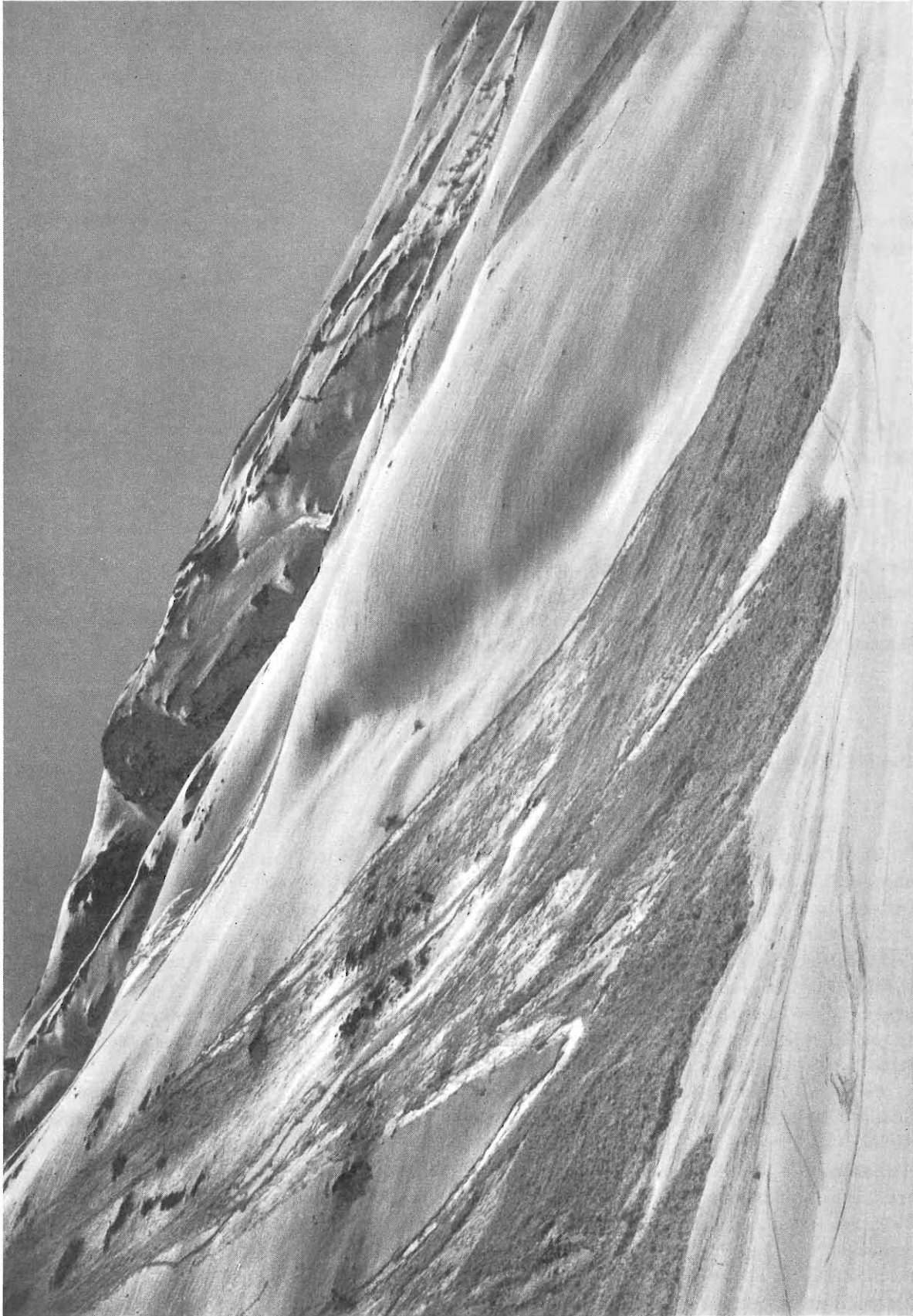


Fig. 52: Nasse Lockerschneelawine

Photo Meerkämper, Davos

Fall 2: Schubspannungen parallel zur Unterlage

Unter Annahme der Gültigkeit des COULOMB'schen Reibungsgesetzes wird die von Schicht zu Schicht variierende Scherfestigkeit β_T eine Funktion der Kohäsion c , der Normalspannung σ_z und dem Reibungswinkel φ_r :

$$\beta_T = c + \sigma_z \cdot \operatorname{tg} \varphi_r \quad (48)$$

Durch Einführung des Winkels der scheinbaren inneren Reibung φ , den die auf ein Flächenelement wirksame resultierende Spannung mit ihrer Normalkomponente einschließt, geht obige Gleichung über in den Ausdruck:

$$\beta_T = \sigma_z \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (49)$$

$$\text{wobei} \quad \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \varphi_r + \frac{c}{\sigma_z} \quad (50)$$

Bei kohäsionsarmen Schichten verschwindet der letzte Summand, und wir erhalten den einfachen Ausdruck:

$$\frac{\beta_T}{\sigma_z} = \operatorname{tg} \varphi \quad (51)$$

Das Verhältnis von Scherfestigkeit zur Normalspannung ist gleich dem Tangens des Reibungswinkels.

Da die größten Scherkräfte in der neutralen Zone auftreten, läßt sich auch das effektiv herrschende Spannungsverhältnis $\tau_x : \sigma_z$ sehr einfach angeben:

$$\frac{\tau_x}{\sigma_z} = \operatorname{tg} \psi \quad (31) \text{ vergl. S. 62}$$

Die Stabilitätsbedingung wird somit:

$$\operatorname{tg} \psi \geq \operatorname{tg} \varphi \quad (52)$$

Unabhängig von der Höhe der betrachteten Schicht über Boden liegen solange stabile Verhältnisse vor, als der Winkel der Hangneigung ψ kleiner bleibt, als der minimale Winkel der inneren Reibung φ_r . Der Gefahrengrad nimmt also mit der Hangneigung zu.

Zur Beurteilung des Sicherheitsgrades einer konkret vorliegenden Schneedecke in bezug auf Fall 2 der möglichen Bruchbildung ist das Profil auf seine Schichten minimaler Reibung zu untersuchen. Dabei hüte man sich vor Mittelwertsbetrachtungen! Die weiße Decke darf nicht als homogenes Ganzes angesehen werden, sondern muß in ihre feinen und feinsten Schichten zerlegt werden. Es genügt eine wenige Millimeter starke Reifschicht, um die Stabilität einer mehrere Meter mächtigen, scheinbar soliden Schneedecke, in Frage zu stellen.

Bei dieser Analyse wollen wir an der Schneeoberfläche beginnen. Der Neuschnee behält hier infolge fehlender Ueberlastung seine lockere Form bei. Warmlufteinbrüche oder Strahlungseinflüsse haben direkten Zutritt und so ist es nur zu verständlich, wenn der Reibungswinkel des Oberflächenschnees zuweilen minimale Werte annimmt. Wird das durch den Tangens der Hangneigung bestimmte Maß unterschritten, so kommt es zur Bildung der bekannten Lockerschneelawinen [19]. Es genügt zu deren Anbrechen eine sehr geringe Masse; schon ein kleines Schneepartikelchen, das den Gleichgewichtszustand überschreitet, ist befähigt, weitere Teile der Schneedecke in Bewegung zu versetzen. Da der erste Impuls stets von einer engumgrenzten Zone aus geht, ist der Anbruch von Lockerschneelawinen punktförmig.

Wenn sich die primäre Gleitfläche in eine tiefer gelegene, hangparallele Schicht verlagert, so kann es nur dann zu einer Loslösung der darüberliegenden Schneequader kommen, wenn auch die Festigkeit der Stirnflächen überwunden wird. Dazu ist eine gewisse Kraftgröße notwendig, die lediglich vom Eigengewicht der teilweise losgelösten Schneemasse herrühren kann. Je stärker ihre Verbandsfestigkeit, umso größer muß auch der zum Bruch Anlaß gebende Schneequader sein.

Wir sind gewohnt, alle Schneerutsche mit breitem Anbruch, ähnlich Fig. 54, als Schneebrettlawinen zu bezeichnen, und sehen nun, daß die in der Natur relativ häufig auftretende Lockerschneelawine als Spezialfall der Schneebrettlawine gedeutet werden muß. Je höher die Gleitfläche über Boden liegt und je geringer die Verbandsfestigkeit des darüberliegenden Materials, umso



Fig. 53: Feuchte Lockerschneelawine mit charakteristischen Gleitbahnen

Photo Meerkämper, Davos



Fig. 54: Schneebrettlawine am Körbshorn

Photo Furter, Davos

mehr gleicht sich die allgemeine Bruchform von Schneebrettlawinen derjenigen von Lockerschneelawinen an.

Gleich der Oberfläche der Schneedecke ist auch ihre unterste Grenzschicht speziellen äußeren Bedingungen unterworfen. Kommt beispielsweise der erste Neuschnee eines Winters auf den noch warmen Erdboden zu liegen, so genügt in vielen Fällen die Druckverdichtung nicht, um die Festigkeitsabnahme infolge von Schmelzprozessen zu übertönen. Sehr oft lassen sich dann Scherbrüche in der untersten Grenzschicht beobachten.

Während des Hochwinters sind es vielfach die durch Kurzsetzung in sich zusammengebrochenen Schwimmschneefundamente, oder die durch Harschauflösung entstandenen, dünnen, grobkörnigen Schichten geringer Kohäsion, welche zu Scherbrüchen Anlaß geben. Auch eingeschneite Reifanlagerungen stellen Gleitflächen geringer Reibung dar, und zwar offenbar deshalb, weil die



Fig. 55: Blockfeld im Ablagerungsgebiet einer Schneebretflawine

Photo Furter Davos

blättchenförmigen Kristalle gleichmäßig orientiert sind, sich beim Kriechprozeß parallel zur Schichtgrenze einordnen und den Scherkräften in diesem Zustand nur sehr geringen Widerstand entgegen setzen können.

Fall 3: Zugspannungen

An dritter Stelle aller Möglichkeiten primärer Bruchbildung sei die Ueberwindung der Zugfestigkeit erwähnt. Infolge der hohen Beanspruchung in den Elementen des Verankerungsquerschnittes, und der im allgemeinen geringen Materialverfestigung in diesem Bereich, sind Rißbildungen der Schneedecke sehr häufig. Ursachen derartiger Anbrüche sind somit Längsspannungen, welche durch Störung des normalen Kriechprozesses entstehen.

Was nun die Festigkeit der Zugzonen anbetrifft, hängt diese in weitem Maß vom dreidimensionalen Spannungszustand ab. Ist die Normalspannung $\sigma_z = -\sigma_y$, so kann sich die Deformation unseres Elementes unter Volumkonstanz vollziehen (Fig. 51b). Noch intensiver wird die Auflösung fortschreiten, wenn die Zugverankerung beispielsweise durch Felsen gebildet wird, welche auch die in z-Richtung verlaufende Kriechbewegung unterbinden. Es werden dann alle drei Normalspannungen negativ, so daß sich das Körperelement unter allseitiger Zugwirkung befindet (Fig. 51d). Das Material ist so jeder Möglichkeit einer Selbstverfestigung beraubt. Unterhalb jeder größeren Einkerbung der Schneedecke entsteht deshalb eine allen Wintertouristen wohl-bekannte Zone lockeren Schwimmschnees, welche sehr wohl zu Anbrüchen führen kann. In diesem Zusammenhang sei speziell auf die zu kleinen Lawinenwerke aufmerksam gemacht. Diese führen oft zu gefährlichen Zugspannungen. Dasselbe gilt für Einzelelemente. Durch die lokale Unterbindung des Verdichtungsvorganges unmittelbar unterhalb und zu beiden Seiten des Fremd-körpers entsteht eine Gefügauflockerung und damit ein sehr labiles Gleichgewicht. Es ist also überall dort mit einer Abnahme der inneren Festigkeit, bzw. Bruchbildung des Schnees zu rech-nen, wo die Zusammendrückung durch irgendwelche Fremdkörper unterbunden wird.

Fall 4: Scherspannungen in den Randzonen

Analog den Zugzonen können seitliche Scherzonen zu primären Brüchen Anlaß geben. Besondere Gefahr besteht in jenen Verankerungsquerschnitten, die unter allseitigem Zug stehen, oder wenn zwei der Normalspannungen negativ werden. Bei Terrainkrümmungen sowohl in x -, als auch in y -Richtung werden σ_x und σ_y negativ. Wird ferner die vertikal zur Unterlage gerichtete Zusammen-drückung unterbunden, so kann auch σ_z negative Werte annehmen und das Schneeteilchen ist all-seitig auf Zug beansprucht; es besteht damit keine Verfestigungsmöglichkeit (Fig. 51d).

Zusammenfassend erhält man die nachfolgend verzeichneten vier Fälle der möglichen Bruch-bildung. Als gemeinsames Merkmal ist der große Einfluß der Materialveränderung hervorzuheben. Es ist überall dort mit einer Bruchbildung der Schneedecke zu rech-nen, wo die Schneeteilchen im Laufe der Zeit keine Kompression, bzw. Verfestigung erfahren.

Theoretische Möglichkeiten der primären Bruchbildung

Zone	Art der Beanspruchung	Fall	Lage der Bruchfläche	Bemerkungen
Neutrale Zone ⁷	Druckspannung	1	parallel zur Unterlage	Häufig bei Schwimm-schneefundament
	Scherspannung	2	parallel zur Unterlage	Häufig bei losen Zwischen-Schichten wie Reif, usw.
Randzonen	Zugspannung	3	senkrecht zur Unterlage	Häufig bei Neuschnee
	Scherspannung	4	senkrecht zur Unterlage	Nicht häufig zu beobachten

⁷ Auch in der neutralen Zone können kleine Zugspannungen wirksam sein [71], doch tritt deren Bedeutung hinter Fall 3 zurück. Ferner treten bei ungleichen Setzungen zuweilen Bieungsbeanspruchungen auf, welche zum Bruch führen können.

Wesentlich komplizierter werden die Verhältnisse, wenn man Materialinhomogenitäten voraussetzt. In diesem Fall werden die plastischen Gebiete von den Kraftlinien umfahren. Die Spannungen konzentrieren sich auf die unplastischen Bereiche und lösen dort den Bruch aus. Indirekt sind aber wiederum die Schwächezonen für die Bruchbildung verantwortlich, indem die festen Zonen umso stärker beansprucht werden, je mehr Schwächezonen vorhanden sind.

3. Einfluß der Temperatur

Im ersten Kapitel haben wir dargelegt, daß die Schneefestigkeit mit zunehmender Temperatur ab-, bei Erhöhung des Raumgewichtes dagegen zunimmt. Da sich diese beiden Einflüsse im natürlichen Allgemeinfall überlagern, muß jede Möglichkeit der theoretischen Bruchbildung im Hinblick auf den Temperatureinfluß für sich untersucht werden.

Fall 1: Druckspannungen senkrecht zur Unterlage

Die Druckspannungen senkrecht zur Unterlage wirken sich im allgemeinen im Sinne einer langsamen Verfestigung der Schneedecke aus. Sind jedoch einzelne Schichten vor der Beanspruchung grobkörnig und damit relativ unplastisch geworden, ist auch bei hohen Temperaturen nur eine unbedeutende Kompression zu erwarten. Die Zähigkeit des Materials bleibt relativ hoch, hingegen nimmt die Festigkeit stark ab, so daß die Temperaturerhöhung den Fall 1 möglicher Bruchbildung im allgemeinen begünstigt.

Fall 2: Schubspannungen parallel zur Unterlage

Solange es sich um sehr plastische Schneearten handelt, ist mit einer langsamen Verfestigung der Diskontinuitätsschicht zu rechnen. Grobkörnige, unplastische Schneearten gehen jedoch ihrer Verbandsfestigkeit mit zunehmender Temperatur immer mehr verlustig. Auch bei der dichtesten Lagerung, welche Fall 1 der Bruchbildung verunmöglicht, ist stets mit Scherbrüchen zu rechnen. Vor allem gegen das Frühjahr hin, wenn Schmelzprozesse eintreten und die Klebekraft zwischen den einzelnen Körnern beinahe vollständig verloren geht — eine Selbstverfestigung des Materials infolge der dichten Lagerung aber nicht mehr eintreten kann — tritt Fall 2 der möglichen Bruchbildung relativ häufig ein. Wir stellen also auch hier eine Zunahme des Gefahrengrades mit erhöhter Temperatur fest.

Fall 3: Zugspannungen

Da beim zugbeanspruchten Schnee eine Stoffverdichtung nicht eintreten kann, mit zunehmender Temperatur die Festigkeit also abfällt, hat die Erwärmung im allgemeinen eine Zunahme des Gefahrengrades zur Folge.

Bei oberflächlicher Abkühlung der Schneedecke kann ebenfalls eine labile Situation eintreten, da sich in diesem Fall die Spannungen in der Oberflächenschicht konzentrieren. Allerdings wächst dort auch die Festigkeit an, so daß es nur in Ausnahmefällen zur Bruchbildung kommen wird.

Fall 4: Scherspannungen in den Randzonen

In diesem Fall werden meistens mehrere Schichten ungleicher Zusammensetzung vom Bruch erfaßt. Es ist also anzunehmen, daß sie sich wenigstens teilweise unter dem Einfluß hoher Temperatur verdichten lassen. Fall 4 nimmt damit gegenüber Temperaturerhöhungen eine neutrale Stellung ein.

Zusammenfassend sei hervorgehoben, daß in der Mehrzahl der Fälle eine Temperaturerhöhung auch eine Zunahme des Gefahrengrades mit sich bringt.

3. KAPITEL

Der Lawinenverbau

I. Allgemeine Maßnahmen

1. Vorarbeiten

Bevor man an die Projektierung von Lawinenschutzbauten herantreten kann, müssen eine Reihe von Unterlagen beschafft werden, welche das betreffende Gebiet in schneetechnischer Hinsicht charakterisieren.

In den meisten Fällen wird in jedem Verbauungsgebiet eine schneebringende Hauptwindrichtung vorherrschen. Deren Bestimmung läßt sich an Hand von Feldbeobachtungen sehr einfach vornehmen. Bedeutend schwieriger ist es, über die lokalen Verschiedenheiten hinsichtlich Stärke und Richtung der Luftströmungen zuverlässigen Aufschluß zu gewinnen. Selbst mit komplizierten Apparaturen kommt man hier nur mühsam vorwärts. Es wird deshalb Aufgabe zukünftiger Forschung sein, neue Wege und Mittel zur Festlegung der Luftströmungen innerhalb von Verbauungsgebieten zu entwickeln.

Ueber Schneebeschaffenheit und Massenverteilung geben direkte Erhebungen im fraglichen Gebiet die beste Auskunft, wobei man allerdings nicht nur auf Beobachtungen eines Winters abstellen darf, sondern möglichst lange Meßreihen anstreben muß. Wie Fig. 56 zeigt, schwanken die Schneehöhen von Winter zu Winter sehr stark. Es ist deshalb den verantwortlichen Stellen dringend zu empfehlen, an allen jenen Orten, wo früher oder später Lawinenprobleme gelöst werden sollen, möglichst frühzeitig mit derartigen Messungen zu beginnen. Wenn es darüber hinaus gelingt, auch den Verlauf der Anbruchlinien festzuhalten, so ist für die Projektbearbeitung schon sehr viel gewonnen.

Sollte aus irgendeinem Grunde eine längere Beobachtungszeit nicht abgewartet werden können, so müssen Schneedeckenentwicklung und Massenverteilung an Hand der lokalen meteorologischen, bzw. geographischen Verhältnisse abgeleitet werden. Dies läßt sich umso besser durchführen, je tiefer die systematische Forschung in die allgemeinen Zusammenhänge zwischen Lokalklima und Schneedecke Einblick gewinnt. Ein reichhaltiges, vor allem während der Kriegszeit gesammeltes und seither fortlaufend ergänztes Beobachtungsmaterial gibt in dieser Hinsicht zu guten Hoffnungen Anlaß.

Ueber die Geländekonfiguration können in unserem Lande im allgemeinen genügend genaue Unterlagen beschafft werden. Stets wird jedoch eine Ergänzung hinsichtlich Bodenbeschaffenheit, Wasserführung und Bewachsung notwendig sein, denn auch diesen Faktoren kommt hinsichtlich der Lawinenbildung eine nicht untergeordnete Bedeutung zu.

Auf Grund der hier erwähnten Unterlagen erfährt das Gesamtproblem in den meisten Fällen eine wesentliche Vereinfachung: oft sind es lediglich Wächtenanbrüche, lokale Schneeanhäufungen oder sonst ungünstig verteilte Schneeablagerungen, die es zu bekämpfen gilt. Aber auch bei komplizierterer Problemstellung lassen sich die erforderlichen Schutzmaßnahmen auf Grund genauer Erhebungen stets einfacher, zweckmäßiger und billiger gestalten.

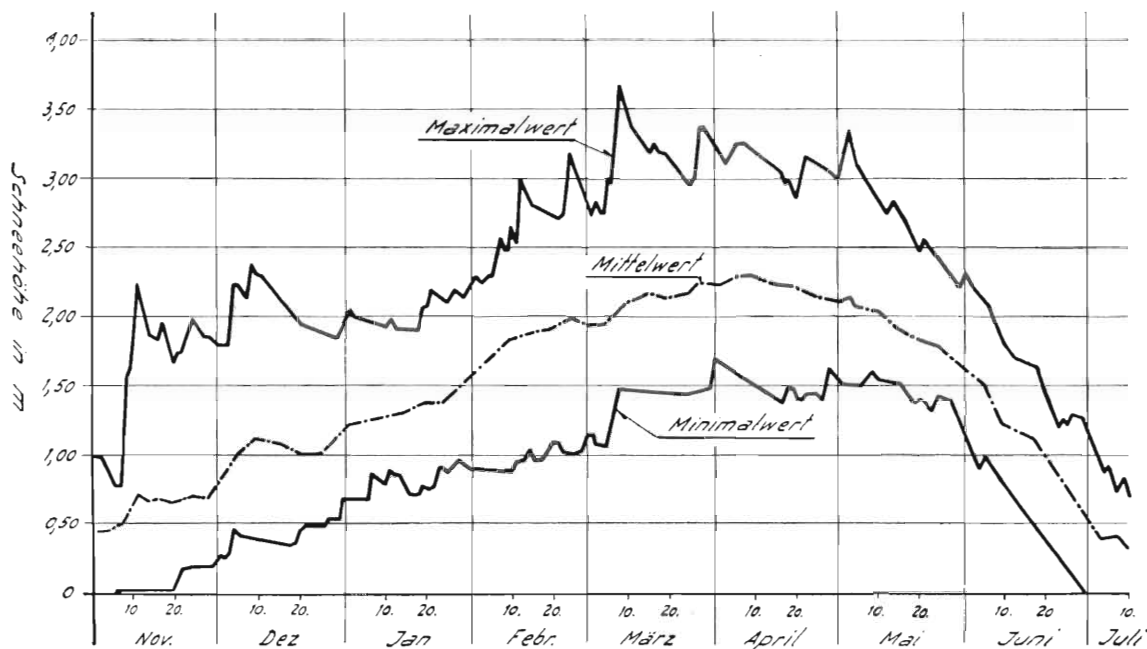


Fig. 56: Maximal-, Minimal- und Mittelwert der Schneehöhe in Funktion der Zeit für die Winter 1936/37 bis 1945/46
(Standard Versuchsfeld Weißfluhjoch)

2. Rückhalt von Verwehungen

Wohl muß in jedem Gebiet die sich aus der Gesamtniederschlagsmenge ergebende Schneemasse in Kauf genommen werden; zusätzliche Ablagerungen infolge Verwehungen aus Nachbarzonen bedürfen dagegen eines Rückhaltes. Diese Maßnahme wird überall dort notwendig sein, wo der Wind über eine relativ flache Krite streicht und sein Transportgut über dem am steilen Leehang liegenden Verbauungsgebiet ausschüttet. Ferner lassen sich auch sekundär in jedem Hang gewisse Zonen feststellen, die überdurchschnittliche Schneemassen aufweisen, was nur die Folge von ungünstigen Windströmungen sein kann. Alle diese zusätzlichen Ablagerungen, bzw. Mehrbelastungen der Schneedecke zu bekämpfen bildet die Hauptaufgabe des Verwehungsverbaues. Die Geländekonfiguration soll dabei so verändert werden, daß die unter Windeinwirkung erfolgende Schneeablagerung den Normalwert nicht übersteigt. Dem Wind kommt somit entscheidende Bedeutung zu, und man erkennt von selbst, daß die Methoden des Verwehungsverbaues nur dort angewendet werden können, wo auch die Lawinenbildung auf ungleiche Schneeablagerung zurückzuführen ist. Besonders geeignet sind stark windexponierte Kuppen, Kreten und dergleichen, während an windgeschützten Orten, wie beispielsweise in Waldlichtungen, der Verwehungsverbau nicht in Frage kommen kann.

Eine theoretische Abklärung des Zusammenhanges zwischen Windströmung und Schneeablagerung wird Gegenstand eingehender Untersuchungen sein, mit denen sich unser Institut noch zu befassen hat. Vorläufig müssen wir den Leser auf die in letzter Zeit erfreulich angewachsene, aber mit Rücksicht auf die Bedeutung des ganzen Fragenkomplexes immer noch bescheidene Literatur verweisen. Neben den allgemeinen Untersuchungen von PAULCKE [146], WELZENBACH [229], SELIGMAN [177], EUGSTER [46], NAEGELI [117], NOKKENTVED [133—136] und FINNEY [52—54], verdienen vor allem die grundlegenden Messungen von CROCE [41] besondere Beachtung. Leider war es dem früheren Leiter der deutschen Schneeforschungsstelle in München, Oberbaurat CROCE, bisher nicht möglich, seine Ergebnisse zu publizieren. Hingegen hat er uns freundlicherweise gestattet, im Rahmen dieser Arbeit die wichtigsten Schlußfolgerungen aus seinen Arbeitsberichten bekanntzugeben.

Untersucht wurden sowohl natürliche, als auch künstliche Verwehungsschutzanlagen in Form von Pflanzungen oder Zäunen, welche senkrecht zur Hauptwindrichtung stehen und so die Schleppkraft des Windes vermindern, bzw. die Schneeteile zum Ausfallen zwingen. Es hat sich dabei gezeigt, daß die Schutzwirkung bei lockeren Zäunen besser ist als bei vollen Konstruktionen. Als besten Füllungsgrad, worunter man das Verhältnis zwischen verbauter Fläche zur Gesamtfläche des Zaunes versteht, hat CROCE $f_g = 0,5$ ermittelt. Die in Fig. 57 angegebene Zungenlänge L_z leeseits des Zaunes läßt sich durch die Zaunhöhe ausdrücken und führt für $f_g = 0,5$ zu folgender Faustformel

$$L_z = 11 + 5h \quad (53)$$

h = Zaunhöhe in m
 L_z = Zungenlänge in m (Gültig für Zaunhöhen von 2—4 m)

Damit ist auch der erforderliche Abstand, welcher zwischen Bauwerk und dem zu schützenden Objekt eingehalten werden muß, gegeben. Für eine Zaunhöhe von $h = 2$ sind es 21 m, für $h = 4$ sind es 31 m. Im Mittel können wir einen Mindestabstand einführen, welcher das zehnfache der Zaunhöhe beträgt.

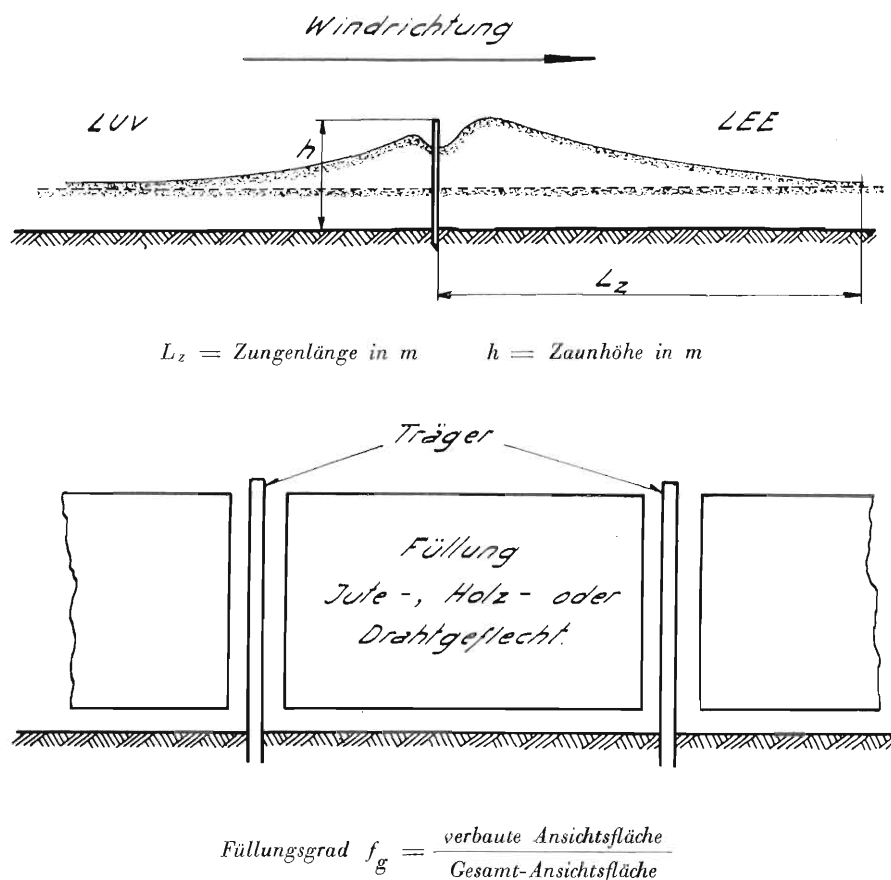


Fig. 57: Schematische Darstellung der Wirkungsweise von Schneezäunen nach Croce

Mit Hilfe dieser Daten ist es möglich, wenigstens in den einfachen Fällen Schneerückhaltwände in das Verbauprojekt aufzunehmen. Bei komplizierter Geländegestaltung scheint uns jedoch die eingehende Behandlung im Windkanal unumgänglich. Vergl. hierzu die Literaturangaben 5—7, 102, 106, 107, 153, 154, 160.

3. Festigung des Fundamentes

a) „Sueggen“. Wie wir bereits im zweiten Kapitel dargelegt haben, ist vielfach ein Verschieben der Gesamtschneedecke auf ihrer festen Unterlage festzustellen. Infolge der Terrainunregelmäßigkeiten hat das „Sueggen“ der Schneedecke in den meisten Fällen auch Zugspannungen zur Folge, welche dann zur Lawinenbildung Anlaß geben können. Der Beschaffenheit der untersten Schneesicht kommt deshalb bei allen Verbauungsfragen große Bedeutung zu. Auf jeden Fall muß vermieden werden, daß Bodenfeuchtigkeit aufsteigt, da sie zur „Verschlämmung“ der Schneedecke führen kann. Nur trockene Böden mit rauher Oberfläche sind imstande, den Schubkräften des Schnees entgegen zu wirken und ein Gleiten (Sueggen) auf der Unterlage zu verunmöglichen. Aus diesem Grunde muß die Beschaffenheit und Wasserführung des Untergrundes genau untersucht und gegebenenfalls vor Inangriffnahme des eigentlichen Verbauungsprojektes korrigiert werden. Kleine Terrainunregelmäßigkeiten, kurz geschnittene Stauden, gemähte Grasnarben, künstliche Einbauten in Form von Trampelpfaden, tief liegenden Pfahlreihen und dergleichen, geben der Schneedecke den dringend benötigten Halt auf ihrer Unterlage.

b) Schwimmschneebildung. Als Hauptursache der Schwimmschneebildung haben wir die fehlende Ueberlastung einerseits und tiefe Temperaturen unmittelbar nach der Ablagerung andererseits erwähnt. Beide Faktoren lassen sich mit tragbaren Kosten nicht beeinflussen. Vielfach sind es aber auch in die Schneedecke hineinragende Vegetationsteile, welche einer wünschbaren Setzung und Verfestigung der Schneedecke entgegen wirken. Tatsächlich deuten eine große Zahl von Feldbeobachtungen darauf hin, daß beispielsweise in Alpenrosenfeldern und Erlenbeständen stets mit intensiver Schwimmschneebildung zu rechnen ist. Ein Teil des Schneeigengewichtes wird durch das Pflanzensystem übernommen, so daß darunter liegende Schneeteile praktisch nicht mehr beansprucht werden. Fehlende Ueberlastung ist aber eine der Hauptursachen der Schichtauflösung. Durch Kurzschneiden derartiger Bodenbewachsungen erreicht man somit eine gewisse Konsolidierung der Schneedecke.

4. Schutz vor dynamischen Einwirkungen

Von Wächten, steilen Felswänden, von Bäumen oder gar Verbauungskonstruktionen sich lösende Schneemassen können durch dynamischen Stoß eine plötzliche Störung des Gleichgewichtes herbeiführen. Derartige Einwirkungen lassen sich im Frühjahr unter dem Einfluß intensiver Strahlung sehr häufig beobachten. Es ist deshalb beim Verbau dafür zu sorgen, daß in Bewegung geratene Schneeteile aufgefangen werden, bevor sie zu größeren Anbrüchen Anlaß geben können.

Hiezu eignen sich am besten durchgehende Konstruktionen in Form von Wänden oder Zäunen, welche direkt unterhalb der möglichen Abbruchstellen angeordnet werden.

In diesem Zusammenhang ist auch an eine Gleichgewichtsstörung durch Skifahrer oder Hochwild zu denken. Aus diesem Grunde ist es in vielen Fällen zweckmäßig, seitliche Umzäunungen anzubringen, und so das ganze Verbauungsgebiet gegen Fremdeinwirkungen zu schützen [82].

II. Die beiden Hauptforderungen des Verbaus

Am Schluß des 2. Kapitels haben wir die vier theoretischen Möglichkeiten der primären Bruchbildung zusammengestellt. Zwei davon sind von großer praktischer Bedeutung und müssen deshalb besonders beachtet werden: die Bruchbildung infolge von Zugspannungen (Fall 3) einerseits und die Ueberwindung der Scherfestigkeit durch schichtparallele Schubspannungen in der neutralen Zone (Fall 2) andererseits.

1. Zugspannungen

Die Stabilität jeder Schneedecke beruht weitgehend auf der mit Zunahme der Schneehöhe ebenfalls zunehmenden Materialfestigkeit infolge Stoffverdichtung. Druckspannungen wirken sich günstig aus. Dagegen erfahren zugbeanspruchte Zonen eine Festigkeitsabnahme und geben früher oder später zu Bruchbildungen Anlaß. Eine der Hauptforderungen des Verbaues besteht deshalb in der Verhütung von Zugspannungen. Der Statiker kennt diese Forderung aus der Theorie der Betonkonstruktionen. Wohl können dem Beton beträchtliche Druckspannungen zugemutet werden, doch führen schon relativ geringe Zugkräfte zu Rißbildungen. Man versucht deshalb durch geeignete Formgebung Zugspannungen zu vermeiden (Bogenbrücken). Wo dies nicht möglich ist, müssen Armierungen angebracht werden (Eisenbetonkonstruktionen). Analog wird sich der Verbauungsfachmann die günstige Auswirkung von Druckspannungen zu Nutzen machen: Die Schneedecke soll nicht aufgehängt, sondern abgestützt werden. An Stelle der bei zugbeanspruchten Schneeteilen befürchteten Kohäsionsabnahme tritt dann das Gegenteil: das Lockeraggregat erfährt eine mit der Zeit zunehmende Verfestigung. Da die plastische Verdichtung bei jeder Temperaturerhöhung eine Beschleunigung erfährt, wird das in diesem Zeitpunkt zu befürchtende Erweichen der Korngrenzen, welches oft zu größeren Naßschneelawinen Anlaß gibt, übertönt und die Gesamtschneedecke stabilisiert.

Nach Ansicht des Verfassers sollte man deshalb darnach trachten, die Schneedecke in einzelne Druckzonen aufzulösen und überall dort aufzuspalten, wo Gefahr der Ausbildung von Zugspannungen besteht. Die Anordnung von Trennfugen bei konvexen Gefällsbrüchen gestattet nicht nur den spannungsfreien Uebergang von der oberen, langsamer kriechenden Schneedecke in den rascher fließenden unteren Teil, sondern läßt auch die gewünschte Ueberführung der Einzelabschnitte in den Druckzustand verhältnismäßig einfach realisieren.

Freilich kann man sich auch ein Verbauungssystem denken, welches gewisse Zugspannungen zuläßt, doch darf ein solches System nur dort zur Anwendung kommen, wo die dazu notwendige Zugfestigkeit des Schnees den ganzen Winter garantiert bleibt.

2. Schubspannungen in der neutralen Zone

Den parallel zur Schichtrichtung wirksamen Schubspannungen der neutralen Zone kommt die Aufgabe zu, die entsprechende Eigengewichtskomponente der darüber liegenden Masse auf die unteren Schneeteile zu übertragen. Dies ist jedoch nur solange möglich, als die Schubspannung kleiner bleibt als die Scherfestigkeit der betreffenden Schicht. Unter Annahme der Gültigkeit des COULOMB'schen Reibungsgesetzes lautet die Stabilitätsbedingung

$$\operatorname{tg} \psi < \operatorname{tg} \varphi \quad (52)$$

Wie wir bereits gesehen haben, tritt der minimale Reibungswinkel $\varphi_{\min}$ normalerweise in der noch unverdichteten Oberflächenschicht auf, ein Umstand, welcher zu den an Steilhängen sehr häufig anbrechenden Lockerschneelawinen führt. Infolge der fehlenden Ueberlastung ist es nicht möglich, die hier liegenden Schneeteile in den gewünschten Druckzustand zu versetzen und damit den Reibungswinkel φ zu erhöhen. Wenn aber die Materialbeschaffenheit als gegeben angenommen werden muß, so bleibt als einzige Möglichkeit der Verhinderung des Anbruches von Lockerschneelawinen die künstliche Reduktion der Schneeoberflächenneigung. Die Geländekonfiguration muß so verändert werden, daß die sich bildende, maximale Schneeoberflächenneigung unter einem bestimmten Grenzwert bleibt.

Als erste Hauptforderung des Lawinenverbaues haben wir die tunlichste Vermeidung der Zugspannungen, was zur Aufspaltung der Schneedecke in einzelne Teilstücke führen kann, erwähnt; als zweite Hauptforderung kommt nun die Reduktion der Oberflächenneigung dazu und es stellt sich die Frage, welche konstruktiven Maßnahmen diesen beiden Hauptforderungen genügen.

III. Wirkungsweise verschiedener Konstruktionstypen

Ohne Anspruch auf eine vollständige Wiedergabe aller in der Praxis bekannten Maßnahmen zur Verhinderung des Anbruches von Lawinen erheben zu wollen, scheint es uns als Ergänzung der Ausführungen von HESS [93] doch zweckmäßig, hier die wichtigsten konstruktiven Eingriffe, wie sie seit mehreren Jahrzehnten praktiziert wurden, kurz zu streifen, und deren Wirkungsweise im Hinblick auf die beiden erwähnten Hauptforderungen zu überprüfen. Wir haben bereits andersorts [25] zu diesem, für den Praktiker sehr wichtigen Problem Stellung genommen, doch können wir uns hier vermehrt auf die theoretischen Grundlagen stützen.

Dabei sollen als erste grobe Unterteilung zwei Hauptgruppen von Werken unterschieden werden, und zwar einerseits solche, welche die Schneedecke nur teilweise, und andere, welche die Schneedecke vollständig aufspalten. In Richtung der Niveaulinie sind dabei immer größere, dem Verbaungsgebiet und der Geländekonfiguration entsprechende Längen vorausgesetzt.

1. Werke, welche die Schneedecke nur teilweise aufspalten

Um die ersten, nach Einführung des schweizerischen Forstgesetzes im Jahre 1876 ausgeführten Verbauungen im Anbruchgebiet von Lawinen verstehen und würdigen zu können, müssen wir vom schichtigen Aufbau der Schneedecke — auf den erst PAULCKE aufmerksam gemacht hat — absehen, und uns die weiße Erdenhülle als homogene, festgefügte Masse vorstellen. Unter dieser Annahme reduziert sich das Problem des Lawinenverbaues einzig und allein auf die Sicherung der Gesamtschneedecke gegen Abgleiten auf der Unterlage. Durch den Einbau verhältnismäßig niedriger Mauern (COAZ), oder Terrassen (FANKHAUSER) wurde die Reibung zwischen Schneedecke und Terrain erhöht und damit zweifellos in vielen Fällen das Anbrechen von Grundlawinen verunmöglicht.

Werkhöhe und Werkabstand zu bestimmen war damals ausschließlich Sache des Praktikers. Erst POLLACK [156] und MOUGIN [111] versuchten durch Einführung physikalischer Größen, zu einer allgemeingültigen Theorie zu kommen.

Sowohl COAZ [36, 37] als auch FANKHAUSER [47—50] haben jedoch mit vielen anderen Naturbeobachtern bald erkannt, daß auch an der Oberfläche Lawinen anbrechen können, und die Schneedecke demnach nicht immer genügend Festigkeit besitzt, um ihr Eigengewicht zu tragen. Damit wurde die Forderung nach größeren, aus der Schneedecke herausragenden Werken immer lauter. Heute wissen wir, daß die Schneedecke nicht nur in ihren beiden Grenzflächen, sondern in irgendeiner beliebigen Schichtgrenze anbrechen kann. Schon aus diesem Grunde müssen die der Abstützung dienenden Werke in Form von Mauern oder Terrassen alle Schichten durchbrechen und der maximalen Schneehöhe angepaßt werden. Darüber hinaus ist aber ein vollständiges Durchschneiden der Gesamtschneedecke auch deshalb erforderlich, weil durch bloßes Einkerb von unten her, wie dies in Fig. 58a schematisch dargestellt ist, in der Regel Zugspannungen provoziert werden, welche zum Anbruch in den oberen Schichten führen können [70, 82].

Solange es sich ausschließlich um eine Erhöhung der Reibungskräfte in der unteren Grenzschicht handelt, ist auch heute noch der Einbau von niedrigen Terrassen oder Pfahlreihen und dergleichen durchaus gerechtfertigt, doch dürfen diese Konstruktionen nur verhältnismäßig wenig in die Schneedecke hineinragen, da sonst eine Störung des als neutrale Zone vorausgesetzten Spannungsbildes befürchtet werden muß.

Anders liegen die Verhältnisse, wenn durch tiefliegende Werke versucht wird, größere Bodenvertiefungen auszugleichen. Jede Zunahme der Schneemächtigkeit in Richtung der Falllinie hat

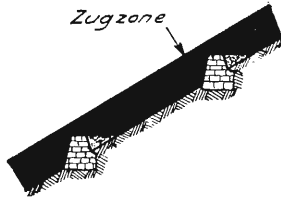
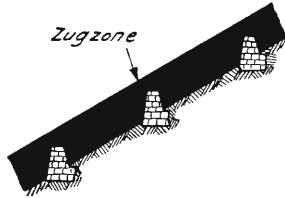
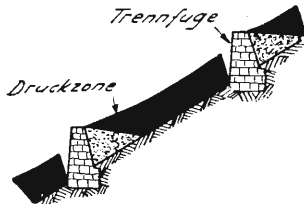
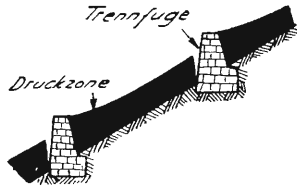
Beurteilung	Terrassen	Stützmauern
falsch: Die Einkerbung der Schneedecke von unten her erzeugt Zugspannungen. Möglichkeit des Anbruchs von Schneebrettlawinen.	a) Werke, welche die Schneedecke nur teilweise aufspalten 	
	b) Werke, welche die Schneedecke vollständig aufspalten 	

Fig. 58: Schematische Darstellung der Wirkungsweise von Werktypen verschiedener Größe

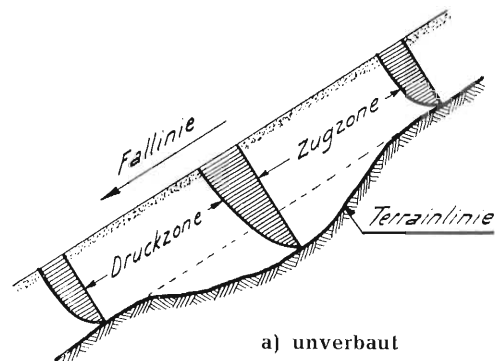
Zugspannungen zur Folge. Treten somit irgendwo „Schneesäcke“ auf, wie dies in Fig. 59 dargestellt ist, so läßt sich das Kriechen in den Vertiefungen durch Einbauten derart reduzieren, daß man versucht ist, von „Totschnee“ zu sprechen. Die darauf kommende Ablagerung fließt dann mit der normalen Geschwindigkeit darüber hinweg, so daß keine Zugspannungen mehr auftreten können, sofern auch kein Gleiten (Sueggen) auf der Unterlage stattfindet.

2. Werke, welche die Schneedecke vollständig aufspalten

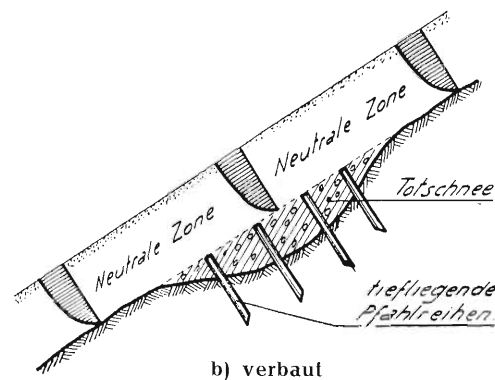
Nachdem sowohl die theoretischen, als auch die praktischen Forderungen im Allgemeinfall des Verbaus auf eine vollständige Aufspaltung der Schneedecke tendieren, man diese Maßnahmen aber schon seit Beginn größerer Anlagen auf zwei scheinbar sehr verschiedenen Wegen zu erreichen versucht, indem COAZ [36, 37] die freistehenden Mauern, sein Nachfolger FANKHAUSER [47—50] aber vornehmlich die sogenannten hinterfüllten Terrassen empfahl, scheint es angezeigt, die verschiedenen Werktypen systematisch auseinanderzuhalten.

Dies geschieht am einfachsten durch Angabe des Winkels, den die wirksame Druckfläche mit der Horizontalen einschließt. Bei der von FANKHAUSER empfohlenen Terrasse stützt sich die oberliegende Schneedecke auf ein horizontales Plateau, während die Druckfläche im Falle der COAZ'schen Mauern durch eine annähernd lotrecht stehende Wand gebildet wird. In neuerer Zeit hat man unter andern auch Werke erstellt, deren wirksame Flächen irgendwo zwischen den beiden Extremfällen liegen, so daß wir im Bestreben der Allgemeinverständigung gezwungen sind, die Begriffe zu präzisieren. Dabei gehen wir von drei Winkelgruppen aus, deren Mittelstellung durch die Horizontale, die Hangsenkrechte und die Lotrechte gegeben sind. Neben diesem einen Kriterium sei für die Nomenklatur auch die Beschaffenheit der Druckfläche mitberücksichtigt, und zwar lediglich darnach, ob es sich um eine kompakte oder aufgelöste Fläche handelt. Wie in Fig. 60 schematisch dargestellt ist, unterscheiden wir bei den kompakten Werken im Sinne zunehmender Neigung: Terrassen, Schrägwände (Platten) und Wände, bzw. Brücken, Rechen und Zäune bei den aufgelösten Konstruktionen.

Nach dieser Klarstellung können wir nun an die Besprechung der Wirkungsweise der verschiedenen Konstruktionstypen herantreten. Betrachten wir zunächst die Terrasse gemäß Fig. 61 a. Durch Reduktion der Hangneigung, bzw. den Uebergang des Hanggefälles in das Horizontalstück der Terrasse, wird auch die Kriechgeschwindigkeit abgebremst und es entsteht die gewünschte Druckzone. Auf der Terrasse selbst wird die Schiebungsgeschwindigkeit parallel zur Unterlage angenähert gleich null. Die entsprechende Komponente des Schnee eigengewichtes muß somit voll-

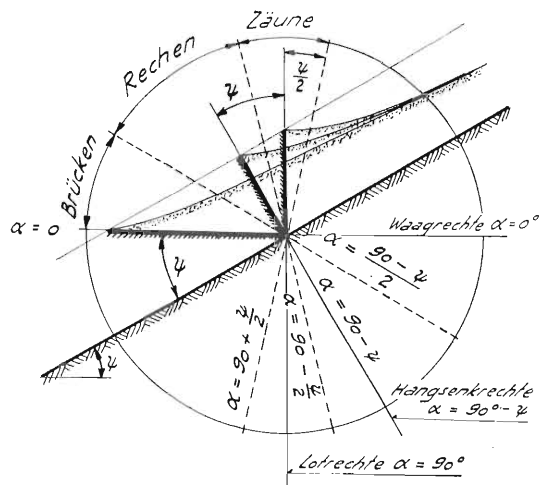


Durch örtliche Terrainvertiefungen entstehen Zugzonen, die zu Anbrüchen führen können. Die Kriechgeschwindigkeiten im mittleren Profil sind größer als diejenigen in den Randprofilen.



Der Verbau von Terrainvertiefungen mit Hilfe tiefliegender Pfahlreihen und dergleichen verhindert die Ausbildung von Zugzonen. Die Kriechgeschwindigkeiten im mittleren Profil sind annähernd gleich denjenigen in den Randprofilen.

Fig. 59: Verbau örtlicher Vertiefungen mit Hilfe tiefliegender Pfahlreihen



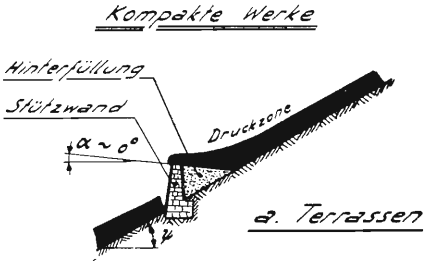
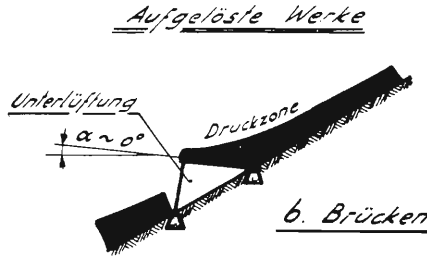
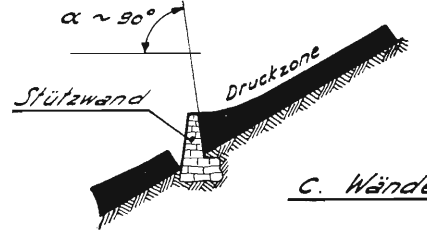
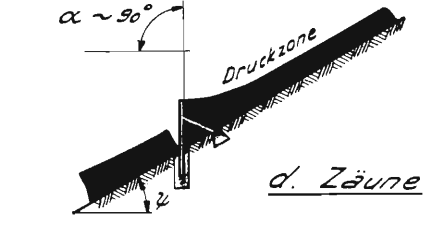
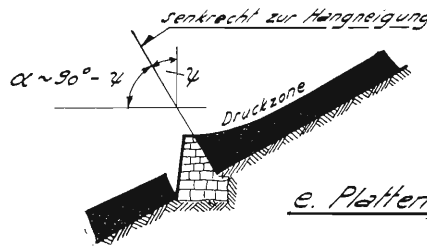
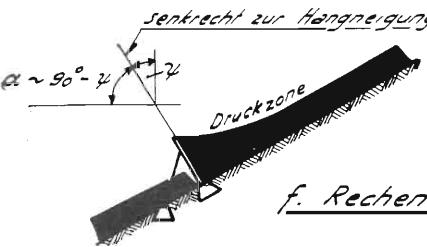
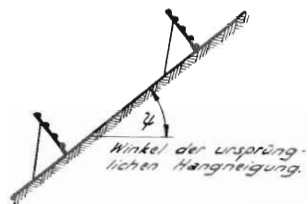
Druckfläche angenähert horizontal: Gefahr der Ausbildung von Ueberhängen. Lockerschneelawinen werden nicht aufgehalten. Relativ einfache Konstruktion. Unterlüftung bei b) bewirkt Erhöhung der Zähigkeit.	<u>Kompakte Werke</u>  <u>a. Terrassen</u>	<u>Aufgelöste Werke</u>  <u>b. Brücken</u>
Druckfläche angenähert lotrecht: Keine Ausbildung von Ueberhängen. Lockerschneelawinen können zurückgehalten werden. Zugverankerung bei d) konstruktiv nicht sehr einfach.	 <u>c. Wände</u>	 <u>d. Zäune</u>
Druckfläche angenähert senkrecht zur Hangneigung: Keine Ausbildung von Ueberhängen. Lockerschneelawinen können zurückgehalten werden. Großer Hinterfüllungsraum. Relativ einfache Konstruktion.	 <u>e. Platten</u>	 <u>f. Rechen</u>

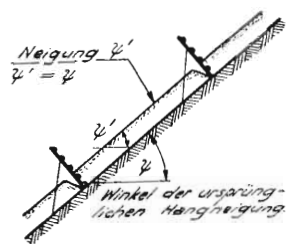
Fig. 61: Variation von Neigung und Beschaffenheit der Druckfläche

A.



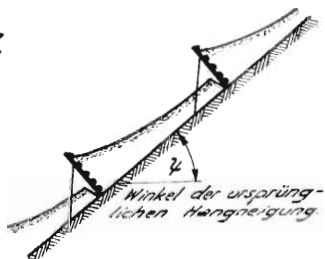
Zustand im Sommer.

B.



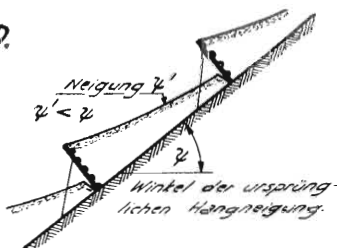
Erster Schneefall ohne Wind ergibt eine zur Unterlage parallele Schicht. Möglichkeit des Abbruches von Lockerschneelawinen.

C.



Hinterfüllung durch Lockerschneelawinen oder Verwehungen.

D.



Die vollständige Sättigung ist erreicht.

Fig. 62: Das Einschneien von Schneerechen

geben wir den aufgelösten Konstruktionen den Vorzug, da sie einerseits weniger rasch gesättigt sind, und anderseits einen freien Abzug des Schmelzwassers ermöglichen, ohne daß besondere Drainagen angeordnet werden müssen. Wir sind deshalb der Ansicht, daß die annähernd senkrecht zum Hang erstellten Rechenkonstruktionen als sehr zweckmäßige Verbauungselemente angesprochen werden dürfen. Sie gestatten die Schneedecke in allen Zugzonen aufzuspalten und in den gewünschten Druckzustand zu bringen. Durch Herausheben der Werkkrone ist der Konstrukteur ferner in der Lage, die für eine Verhinderung von Lockerschneelawinen notwendige Grenzneigung der Schneeoberfläche einzuhalten und so die beiden Hauptforderungen des Lawinenverbau zu erfüllen.

3. Größe und Anordnung von Rechenkonstruktionen

Zur Verhütung von Schneebrettlawinen sind die durchgehenden Werke überall dort anzuordnen, wo die Ausbildung von gefährlichen Zugspannungen befürchtet werden muß. Es sind dies in erster Linie die positiven Gefällsbrüche, d. h. die Uebergangszonen von flachen zu steileren Hangpartien. Da die Schneedecke senkrecht zur Falllinie unterbrochen werden muß, ergibt sich zwangsläufig eine dem Gelände angepaßte Aufstellung der durchgehenden Rechen längs der Niveaulinien des Terrains. Das Gerippe jeder Verbauung im Anbruchgebiet von Lawinen sehen wir deshalb in einer ersten Aufteilung des Gebietes in einzelne Teilstücke gleichmäßiger Neigung. Innerhalb dieser Teilstücke sind dann nach Bedarf weitere Werke anzubringen.

Um über die Konstruktionshöhe und sekundäre Anordnung von durchgehenden Rechenkonstruktionen gewisse Anhaltspunkte zu gewinnen, muß man sich deren Wirkungsweise vor Augen halten.

Der erste Schnee zu Beginn des Winters kommt gemäß Fig. 62 auf das natürliche, unter dem Winkel ψ gegen die Horizontale geneigte Terrain zu liegen und wird dort unter Voraussetzung ruhiger Windverhältnisse eine hangparallele Schicht bilden. Da aber deren Oberfläche in diesem Fall die gleiche Neigung aufweist wie der zu verbauende Hang, ist mit dem Auftreten von Lockerschneelawinen zu rechnen, die dann nach kurzer Fahrt durch die nächste Wand aufgehalten werden und so das Material für die Hinterfüllung bilden. In vielen Fällen wird schon die Schneeablagerung so beeinflusst, daß eine gewisse Hinterfüllung, bzw. Reduktion der Hangneigung entsteht. Die Oberflächenneigung ψ' der Schneedecke wird gemäß Fig. 62 im Laufe des Winters immer kleiner und strebt im Zustand der Sättigung einem Minimum zu. Letztere Feststellung ergibt einen wichtigen Konstruktionshinweis: die im Zustand der Sättigung erreichte Neigung ψ der Schneeoberfläche muß so klein gehalten werden, daß keine Lockerschneelawinen anbrechen können.

Bezeichnet man diesen, von der Schneebeschaffenheit abhängigen Grenzwinkel mit ρ , so folgt gemäß Fig. 63 folgende Beziehung für die Konstruktionshöhe:

$$H = L \cdot \operatorname{tg} (\psi - \rho) + d_o \quad (54)^8$$

H = Schiefe Konstruktionshöhe des Rechens

L = Schiefer Abstand der Rechen

ρ = Grenzwinkel, unter welchem keine Lockerschneelawinen auftreten (Böschungswinkel)

ψ = Neigung des Terrains

d_o = Maximale Schneemächtigkeit bei normaler Ablagerung.

Noch einfacher wird Formel 54, wenn man die freie Konstruktionshöhe, welche bei hangparalleler Schneeschichtung über die Decke hinausragen würde, einführt:

$$h = H - d_o \quad h = L \cdot \operatorname{tg} (\psi - \rho) \quad (55)$$

⁸ Siehe S. 96.

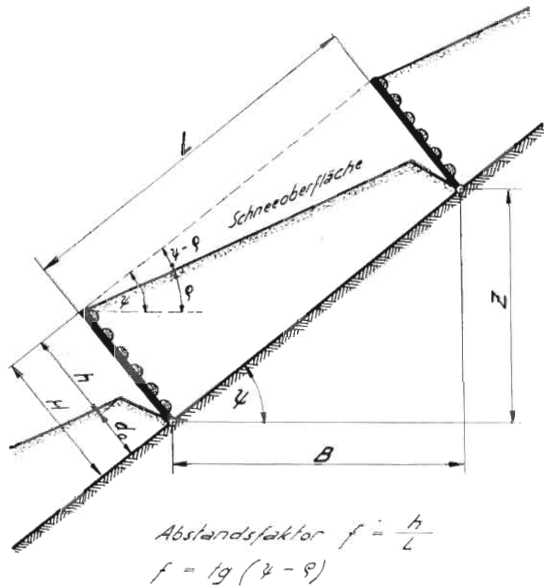


Fig. 63: Schneerechen im Sättigungszustand

Bezeichnen wir ferner den Quotienten aus der kleinen Konstruktionshöhe h und dem schiefen Abstand der Fußpunkte zweier Rechen L als Abstandsfaktor,

$$f = \frac{h}{L} \quad (56)$$

so folgt unter Berücksichtigung von Gleichung 55

$$f = \operatorname{tg}(\psi - \rho) \quad (57)^8$$

Das Verhältnis der freien Konstruktionshöhe zum schiefen Abstand der Werke wird durch die beiden Winkel ψ und ρ bestimmt.

Die Frage des Abstandsfaktors, welcher allerdings sehr ungleich definiert wird, hat von je her alle Fachleute beschäftigt, die sich mit dem Problem der Lawinenverbauung ernstlich auseinandersetzen. Besondere Hinweise

finden wir in den Publikationen von DE VERDAL [217], DEMONTZEY [45], FANKHAUSER [47], JOURDAN-LAFORTE [100] und HESS [93]. Eingehende, leider bisher unveröffentlichte Beobachtungen wurden in neuester Zeit von CAMPELL [30], derzeitiger Kreisoberförster in Pontresina, am Schafberg durchgeführt.

Nach allen diesen Schilderungen wäre der Abstandsfaktor den örtlichen Verhältnissen anzupassen und eine zwischen 60 (CAMPELL) und 75 ‰ (DE VERDAL) liegende Schneeoberflächenneigung anzustreben.

In unserem engeren Beobachtungsgebiet haben wir bisher keine Lockerschneelawinen feststellen können, die bei einer Oberflächenneigung unter dem von DE VERDAL angegebenen Grenzwert von 75 ‰ angebrochen sind, es sei denn, daß fremde Einwirkungen mitbeteiligt waren. Die sehr zuverlässigen Beobachtungen von CAMPELL scheinen deshalb wesentlich unter dieses Maß zu gehen, weil es sich dort gemäß mündlicher Mitteilung nicht nur um Oberflächenrutsche, sondern auch um Schneebrettlawinen handelt, deren Beweggründe sich aber keineswegs auf die Neigungsverhältnisse allein beschränken und deshalb in diesem Zusammenhang nicht ohne weiteres mitverwendet werden dürfen.

Auf Grund der bisherigen Feld- und Laboratoriumsuntersuchungen neigen wir zur Ansicht, daß die Einhaltung eines Grenzwertes von 75 ‰ für die Ausschließung von Lockerschneelawinen genüge und möchten gleichzeitig mit dieser Feststellung auch weitere Kreise anregen, der Neigungsmessung der Schneeoberfläche im Anbruchgebiet von Lockerschneelawinen ihre volle Aufmerksamkeit zu schenken.

IV. Abschätzung des auf Rechenkonstruktionen wirkenden Schneedruckes

1. Generelle Kraftaufnahme

Zur Abschätzung der mechanischen Beanspruchung, welche eine relativ zur Mächtigkeit sehr ausgedehnte, längs einer schiefen Ebene kriechende Schneedecke auf eine senkrecht zur Falllinie errichtete Stützwand ausübt, geht man am besten von den durch die beiden Komponenten v_x und v_z gegebenen Kriechgeschwindigkeit eines Massenpunktes im Staubereich aus. Jede dieser

⁸ Der oben definierte Abstandsfaktor verliert selbstverständlich seine Bedeutung, wenn ρ sehr nahe bei ψ liegt.

beiden Komponenten kann dann ihrerseits wiederum in zwei, von verschiedenen Kraftwirkungen herrührende Anteile zerlegt werden.

Der Hauptteil der Schiebungsgeschwindigkeit v_x folgt aus den parallel zur Unterlage gerichteten Eigengewichtsspannungen und sei mit v_x' bezeichnet. Normalerweise gibt ferner auch die z-Komponente des Schneegewichtes zu Querdeformationen Anlaß. Diese verlaufen ebenfalls parallel zur Unterlage und seien mit v_x'' bezeichnet. Die total auftretende Schiebungsgeschwindigkeit

$$v_x = v_x' + v_x'' \quad (58)$$

wird somit zur Summe zweier, von verschiedenen Eigengewichtskomponenten herrührender Anteile.

Analoge Betrachtungen mit Bezug auf die Zusammendrückungsgeschwindigkeit v_z lassen erkennen, daß auch hier der Hauptteil v_z' von der gleichgerichteten Eigengewichtskomponente des Schnees verursacht wird, ferner aber die schichtparallele Druckspannung zu Querdeformationen v_z'' Anlaß gibt, so daß man als zweite Gleichung

$$v_z = v_z' + v_z'' \quad (59)$$

erhält. Die Zusammendrückungsgeschwindigkeit v_z wird ebenfalls zur Summe zweier Anteile, welche von verschiedenen Eigengewichtskomponenten herrühren.

Der senkrecht zur Falllinie errichteten Stützwand kommt nun die Aufgabe zu, alle diese Geschwindigkeitskomponenten je nach Randbedingung entweder ganz, oder teilweise abzubremesen. Das Bauwerk selbst hat demnach eine Normalkraft S und eine Querkraft Q zu übernehmen.

2. Normalkräfte

Unter der Voraussetzung, daß die betrachtete Schneesicht nach oben weit hinaufreiche (neutrale Zone), muß außer dem Kriechdruck der in der neutralen Zone wirksame statische Druck auf das Verbauungselement berücksichtigt werden. Hierüber siehe [70]. Wird aber nach unserem Vorschlag die Schneedecke durch eine Folge von Werken aufgespalten (Fig. 63), so entstehen spannungsfreie Endflächen, womit der statische Druck wegfällt.

Es ist zurzeit nichts anderes möglich, als zur Berechnung des Kriechdrucks (Normalkräfte) die Bedingung der glatten Wand beizubehalten, während zur Berechnung der Querkräfte eine raue Wand vorausgesetzt wird.

Zur Berechnung des Kriechdruckes S_i auf eine starre Wand knüpfen wir deshalb an die bereits behandelte Geschwindigkeitsverteilung gemäß Gleichung 38 (S. 65) an. Diese lautet

$$v_x = - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{d^2}{2 \cdot \eta} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot K \cdot d}} \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (38)$$

Ferner wissen wir, daß Spannung und Geschwindigkeitsgradient gemäß den Gleichungen 35 und 36 miteinander verknüpft sind. Es gilt demnach

$$\sigma_s = K^2 \cdot \eta \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (60)$$

Wollen wir also den Wanddruck σ_s berechnen, so haben wir das Differential von v_x nach x zu bilden, x gleich null zu setzen und den so gewonnenen Ausdruck in obige Gleichung einzusetzen:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot K \cdot \eta} \cdot \left[e^{-\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot K \cdot d}} \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (61)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} \Big|_{x=0} = - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot K \cdot \eta} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (62)$$

$$\sigma_s = - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{K \cdot \pi \cdot d}{4} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (63)$$

Durch Integration dieser Werte von $z = 0$ bis $z = d$ erhält man den Kriechdruck S_I

$$S_I = - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{K \cdot \pi \cdot d}{4} \cdot \int_0^d \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) dz \quad (64)$$

$$S_I = \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{K \cdot d^2}{2} \cdot \left[\cos \frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right]_0^d \quad (65)$$

$$S_I = - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{K \cdot d^2}{2} \quad (66)$$

S_I Kriechdruck pro Laufmeter Wandfläche⁹

γ_s Raumgewicht des Schnees

d Schneemächtigkeit

ψ Winkel zwischen der Hangneigung mit der Horizontalen

K Faktor, welcher zwischen 1,4 (lockerer Neuschnee), und 2,0 (dichter Altschnee) variiert.

(Siehe Gleichung 36, S. 65, bzw. Gleichung 42, S. 67)

Der Kriechdruck S_I , den eine lange, auf schiefer Ebene aufgelagerte Schneedecke auf eine senkrecht zur Unterlage errichtete Stützwand ausübt, kann maximal gleich werden dem Druck eines Schneeprismas vom Raumgewicht γ_s , der Mächtigkeit und der Länge d , welches reibungsfrei auf einer um den Winkel ψ gegen die Horizontale geneigten Unterlage aufruht.¹⁰

$$S_{I \max} \cong - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot d^2 \quad (71)$$

Die Druckverteilung über die Wand folgt gemäß Gleichung 63, bzw. Fig. 64 einer Sinusfunktion. Die Maximalspannung tritt an der Oberfläche auf und beträgt

$$\sigma_{s \max} = - \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{K \cdot \pi \cdot d}{4} \quad (67)$$

Am Wandfußpunkt wird der spezifische Kriechdruck gleich null.

⁹ Das negative Vorzeichen ergibt sich aus der Wahl der x-Richtung, welche gemäß Fig. 39 (S. 64) der Schiebungsgeschwindigkeit entgegenläuft.

¹⁰ HAEFELI [71] hat, von andern Grundlagen ausgehend, für den Kriechdruck sehr ähnliche Werte und für $\psi = 34^\circ$ vollständige Uebereinstimmung gefunden.

Der Angriffspunkt des resultierenden Kriechdruckes S_1 liegt somit in der oberen Hälfte der Wand. Sein Abstand vom Bodenfußpunkt sei mit s_1 bezeichnet. Es gilt dann die Gleichung

$$s_1 \cdot S_1 = \int_0^d \sigma_s \cdot z \cdot dz \quad (68)$$

$$s_1 = \frac{\pi}{2 \cdot d} \cdot \int_0^d \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \cdot z \cdot dz \quad (69)$$

$$s_1 = \frac{2 \cdot d}{\pi} \quad (70)$$

Der Angriffspunkt des Kriechdruckes liegt etwas unterhalb des oberen Drittels der Wandhöhe.

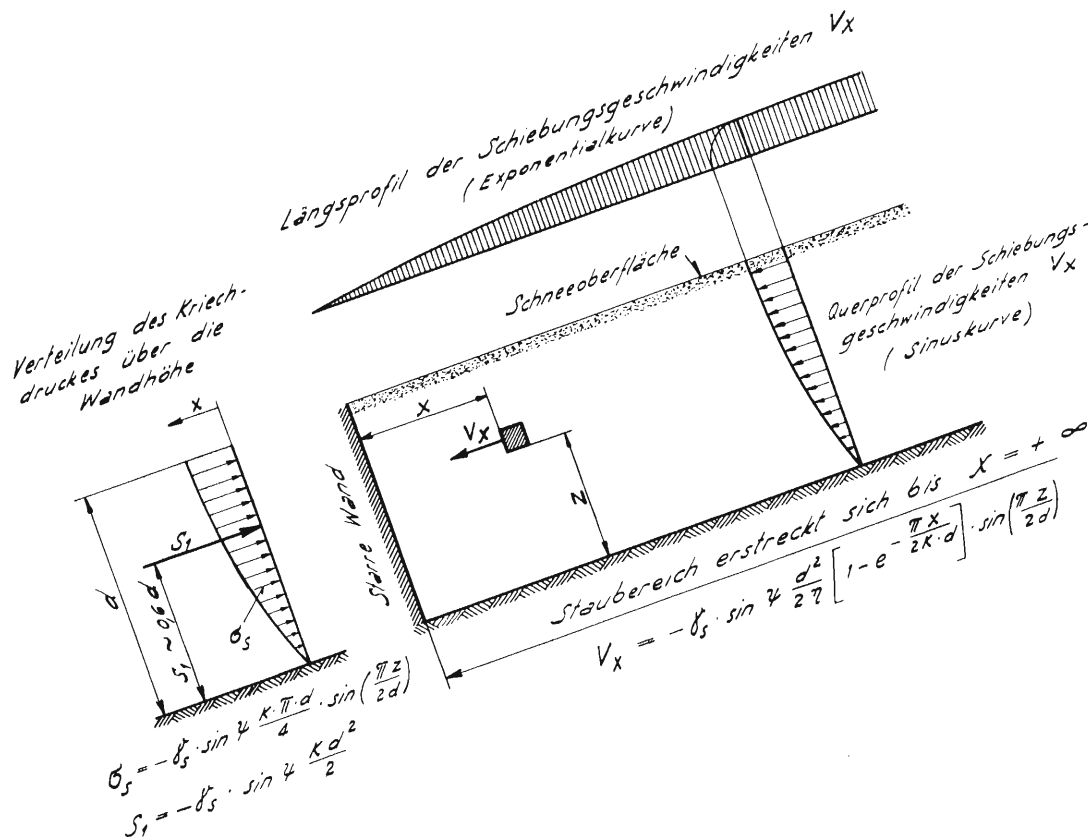


Fig. 64: Schema zur Berechnung des Kriechdruckes S_1

Die vorstehenden Berechnungen beruhen auf verschiedenen Annahmen, welche in der Natur nie streng erfüllt sein werden. In erster Linie ist dabei auf die Heterogenität der Schneedecke zu achten. Da ein eventueller Stau von Schmelzwasser in den untersten Schichten die innere Reibung stark herabsetzt, kann in diesem Falle der Kriechdruck wesentlich über die nach Gleichung (66) errechneten Werte ansteigen. Auch aus diesem Grunde ist eine eventuelle Bodenkorrektur vor Inangriffnahme des eigentlichen Verbaues unerlässlich.

Was die sonstige Heterogenität der Schneedecke anbetrifft, besteht zu keinerlei Befürchtungen Anlaß, da es sich ja stets darum handeln wird, den maximalen Schneedruck abzuschätzen. Dieser tritt aber in einem Zeitpunkt auf, da infolge Temperaturanstieg gegen das Frühjahr hin bereits eine weitgehende Homogenisierung des Gesamtprofiles erreicht ist. Man wird dann in mittleren

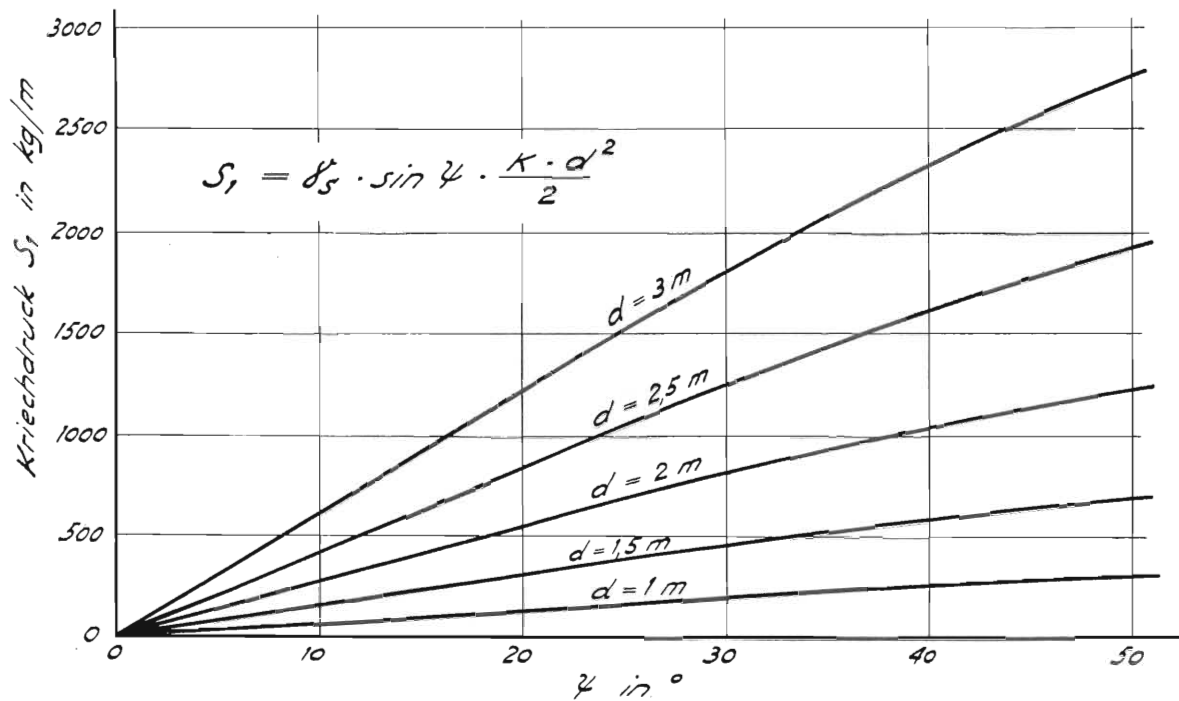


Fig. 65: Kriechdruck S_I in Funktion von Schneemächtigkeit d und Hangneigung ψ
(Für $\gamma_s = 400 \text{ kg/m}^3$, $K = 2$)

Höhenlagen von 2000 m ü. M. mit einem maximalen Raumgewicht von 400 kg/m^3 und einem Verhältniswert K von 2 rechnen können. Es resultieren daraus die aus Fig. 65 ersichtlichen, nach der Faustformel

$$S_I = \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot d^2 \quad (71)$$

gerechneten Kriechdrücke.

3. Querkräfte

Um die Stabilität von Rechenkonstruktionen zu verbessern, versucht man auch die senkrecht zur Unterlage gerichteten Komponenten des Schneeigengewichtes aufzunehmen. Wird die Druckfläche rau ausgebildet und damit der Zusammendrückungsprozeß längs der z -Achse im Grenzquerschnitt unterbunden, so entsteht auch für die in z -Richtung verlaufenden Geschwindigkeiten gegen den Rechen hin eine gewisse Abbremsung. Die Berechnung der Setzungsquerkraft Q_I kann dabei analog derjenigen des Kriechdruckes erfolgen.

Jedes Körperelement im Wirkungsbereich des Bauwerkes überträgt seine in z -Richtung verlaufende Eigengewichtskomponente teilweise durch Scherspannungen auf die Wand und teilweise durch Druckspannungen auf den Boden (Fig. 66). Es liegt somit im Prinzip dasselbe Problem vor, wie wir es im 2. Kapitel bei der Berechnung der Schiebungsgeschwindigkeiten im Staubereich einer Stützwand dargelegt haben, mit dem einzigen Unterschied, daß wir jetzt die z -Komponenten der wirksamen Kräfte betrachten. Die vereinfachte Gleichgewichtsbedingung eines Massenteilchens lautet analog Gleichung 33 (Seite 63)

$$\frac{\partial \tau_z}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - \gamma_s \cdot \cos \psi = 0 \quad (72)$$

Hierin lassen sich die Spannungsgradienten wiederum durch die Deformationsbeschleunigung ersetzen. Dazu ist es notwendig, einen neuen Verhältnswert λ^2 einzuführen, welcher den Unterschied zwischen Schiebungsplastizität und Zusammendrückungsplastizität bei vollständig verhinderter Querdehnung zum Ausdruck bringt.

Bezeichnet man
$$\lambda^2 = \frac{a_2}{a_3}; \quad \left(\lambda^2 = 0,5 \div 0 \right) \quad (73)$$

so erhält man analog den Gleichungen 34 und 35 (Seite 63)

$$(74) \quad \frac{\partial \tau_z}{\partial x} = \eta \cdot \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{\eta}{\lambda^2} \cdot \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \quad (75)$$

Durch Einsetzen dieser Werte in Gleichung (72) und Multiplikation mit $\frac{\lambda^2}{\eta}$ folgt die Differentialgleichung

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} - \frac{\lambda^2 \cdot \gamma_s \cdot \cos \psi}{\eta} = 0 \quad (76)$$

Die Randbedingungen dazu lauten:

- a) für $z = 0$ ist $v_z = 0$ (auf dem Boden aufruhend)
- b) für $x = 0$ ist $v_z = 0$ (Bewegung durch Rechen verhindert)
- c) für $z = d$ ist $\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$ (keine Druckspannungen)
- d) für $x = \infty$ ist $v_z = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\lambda^2}{\eta} \left(d \cdot z - \frac{z^2}{2} \right)$
(Zusammendrückungsgeschwindigkeit im neutralen Feld)

Ersetzt man die Parabelfunktion nach d) wiederum durch eine Sinusfunktion, so folgt:

$$d') \text{ für } x = \infty \quad v_z = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\lambda^2 \cdot d^2}{2 \cdot \eta} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right)$$

Sowohl die Differentialgleichung als auch die Randbedingungen entsprechen dem auf Seite 65 behandelten Problem, so daß wir die dort angegebene Lösung übernehmen können (38). Für die Zusammendrückungsgeschwindigkeit v_z erhält man somit

$$v_z = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\lambda^2 \cdot d^2}{2 \cdot \eta} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot \lambda \cdot d}} \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (77)$$

Um die Schubspannungen τ_z zu berechnen, muß das Differential von v_z nach x gebildet werden

$$\tau_z = \eta \cdot \frac{\partial v_z}{\partial x} \quad (78)$$

$$\tau_z = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\lambda \cdot \pi \cdot d}{4} \cdot e^{-\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot \lambda \cdot d}} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (79)$$

Die Schubspannung τ_q auf die Druckfläche erhält man, indem in obiger Gleichung $x = 0$ gesetzt wird:

$$\tau_q = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\lambda \cdot \pi \cdot d}{4} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot d} \right) \quad (80)$$

Durch Integration dieses Ausdrucks von $z = 0$ bis $z = d$ resultiert damit sofort auch die Setzungsquerkraft

$$Q_I = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\lambda \cdot d^2}{2} \quad (81)$$

Q_I Setzungsquerkraft pro Laufmeter Wandfläche

γ_s Raumgewicht des Schnees

ψ Winkel zwischen der Hangneigung und der Horizontalen

λ Faktor, welcher zwischen $\frac{\sqrt{2}}{2}$ (lockerer Neuschnee) und 0 (dichter Altschnee) variiert.
(Vgl. Gleichung 73, Seite 101.)

Damit wird

$$Q_{I \max} = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot d^2 \quad (82)$$

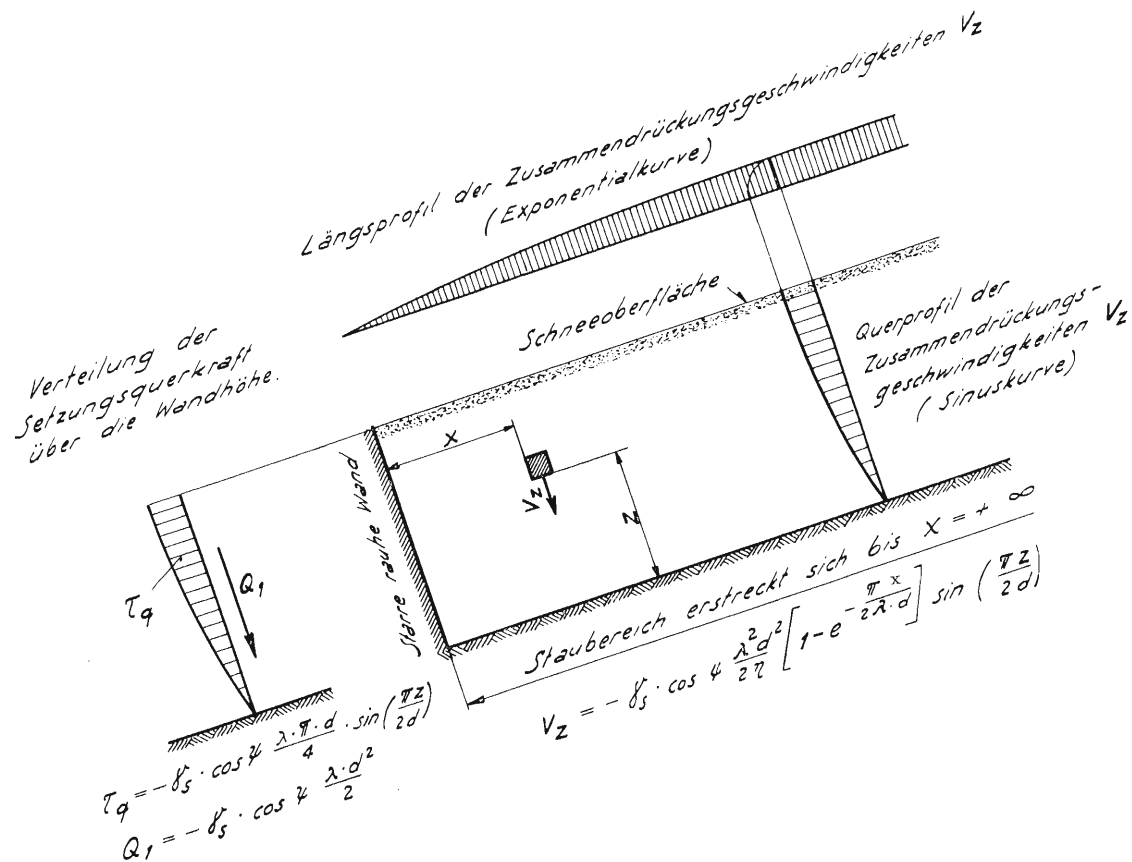


Fig. 66: Schema zur Berechnung der Setzungsquerkraft Q_I

Die Setzungsquerkraft, die eine lange Schneedecke auf eine senkrecht zur Unterlage errichtete, rauhe Stützwand ausübt, kann maximal gleich werden der Querkraft eines Schneep Prismas vom Raumgewicht γ_s , der Mächtigkeit d und der Länge $\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot d$, welches unter dem Winkel ψ gegen die Horizontale geneigt, konsolenartig am Druckrost befestigt ist. Die Setzungsquerkraft Q_1 kann aber theoretisch auch zu null werden, nämlich dann, wenn wir es mit dichtgelagertem, unkomprimierbarem Material zu tun haben.

Im entgegengesetzten Sinne wie Q_1 wirkt ferner die „statische“ Querkraft Q_2 , herrührend von v_z , welche die Querdehnung infolge Kriechdruck längs der Druckfläche unterbindet. Obwohl es sich dabei zweifellos um relativ kleine Kräfte handelt, seien sie der Vollständigkeit wegen dennoch erwähnt. Auch hier wird der Einfluß von v_z vernachlässigt.

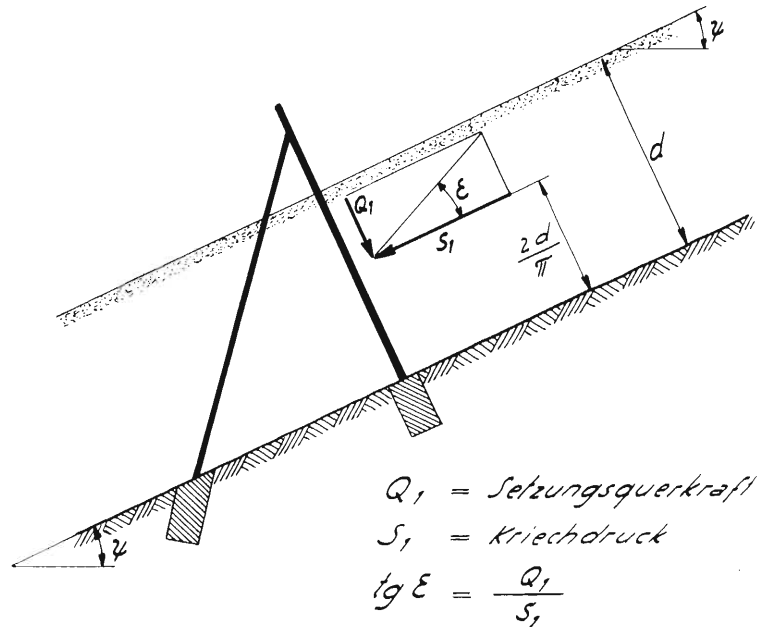


Fig. 67: Verhältnis von Setzungsquerkraft zu Kriechdruck

4. Verhältnis von Setzungsquerkraft zu Kriechdruck

Definiert man gemäß Fig. 67

$$\frac{Q_1}{S_1} = \text{tg } \varepsilon \quad (83)$$

und setzt hierin die Werte gemäß Gleichung 66 und 81 ein, ergibt sich

$$\text{tg } \varepsilon = \frac{\lambda}{K} \cdot \text{ctg } \psi \quad (84)$$

Damit ist die von HAEFELI [227] verwendete Gleichung $\text{tg } \varepsilon \cdot \text{tg } \psi = a$ bestätigt und der Faktor a auf die Verhältniszahlen λ und K zurückgeführt.

Von besonderem Interesse sind die Verhältnisse bei einer Hangneigung von $\psi = 45^\circ$. Für diesen speziellen Fall sei ε mit ε_{45} bezeichnet und Gleichung 84 wird zu

$$\text{tg } \varepsilon_{45} = \frac{\lambda}{K} = a \quad (85)$$

Tabelle zur Schneedruckberechnung

<i>Elemente des Schneedruckes</i>	<i>Allgemein</i>	<i>Maximale Porosität</i> $m = \infty$	<i>Minimale Porosität</i> $m = 2$
<i>Kriechdruck</i>	$S_I = -\gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{K \cdot d^2}{2}$	$S_I \min = \gamma_s \cdot \sin \psi \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot d^2}{2}$	$S_I \max = -\gamma_s \sin \psi \cdot d^2$
<i>Setzungs-Querkraft</i>	$Q_I = -\gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\lambda \cdot d^2}{2}$	$Q_I \max = \gamma_s \cdot \cos \psi \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot d^2}{4}$	$Q_I \min = 0$
$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{Q_I}{S_I}$	$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\lambda}{K} \cdot \operatorname{ctg} \psi$	$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{ctg} \psi$	$\operatorname{tg} \varepsilon = 0$
$\operatorname{tg} \varepsilon_{45} = \frac{Q_I}{S_I}$ (für $\psi = 45^\circ$)	$\operatorname{tg} \varepsilon_{45} = \sqrt{\frac{m-2}{4m}}$	$\operatorname{tg} \varepsilon_{45} = \frac{1}{2}$	$\operatorname{tg} \varepsilon_{45} = 0$

Erinnert man sich ferner der Definition gemäß den Gleichungen 36 (Seite 65) und 73 (Seite 101), sowie Fig. 41 (Seite 66), so folgt:

$$\lambda^2 = \frac{a_2^I}{a_3} \quad \lambda^2 = \frac{m-2}{2(m-1)}$$

und

$$K^2 = \frac{a_3}{a_2^{II}} \quad K^2 = \frac{2 \cdot m}{m-1}$$

Es läßt sich der Winkel ε_{45} , den die Resultierende des Schneedruckes mit der Hangparallelen von 45° einschließt, also auch durch m ausdrücken. Man erhält durch Einsetzen obiger Werte in Gleichung 85

$$\operatorname{tg} \varepsilon_{45} = \sqrt{\frac{m-2}{4 \cdot m}} \quad (86)$$

Für lockeren Neuschnee ($m = \infty$) folgt $\operatorname{tg} \varepsilon_{45} = 0,5$, während beim porenfreien Altschnee $\operatorname{tg} \varepsilon_{45}$ zu Null wird. (Vgl. auch obenstehende Tabelle.)

Zusammenfassung

Die Veränderlichkeit der Schneekristalle im Bereich schmelzpunktnaher Temperaturen einerseits, und deren Gefügefähigkeit innerhalb des Verbandes andererseits, geben dem Schnee das Gepräge eines Lockeraggregates, welches sich hinsichtlich seiner Deformationsmöglichkeiten mit einer plastisch kompressiblen, zähen Flüssigkeit vergleichen läßt. Es sind demnach als Folge jeder Kraftwirkung elasto-plastische Verformungen zu erwarten. Zur Abschätzung der Größenordnung beider Anteile dient die Relaxationszeit, also der Quotient aus Schubmodul und Zähigkeitskoeffizient.

Eingehende Versuche über die Zähigkeit η von Trockenschnee verschiedener Zusammensetzung und Temperatur ergeben für η einen Spielraum von 10^5 bis 10^{11} kg · sec · m⁻². Mit zunehmendem Korndurchmesser, zunehmendem Raumgewicht und abnehmender Temperatur nimmt die Zähigkeit des Schnees zu. Damit ist eine physikalische GröÙe gefunden, mit deren Hilfe sich die Deformationserscheinungen in Funktion von Stoffaufbau, Temperatur und Belastungsvorgang berechnen lassen.

An einer Reihe von ZerreiÙversuchen wird ferner die Materialfestigkeit diskutiert: je feiner das Korn, je größer das Raumgewicht und je tiefer die Temperatur des Schnees, umso größer sind auch seine Zusammenhangskräfte.

Die natürliche Schneedecke mit ihren Schichten verschiedener Kornzusammensetzung und Temperatur muß damit als Aufeinanderfolge mehrerer plastischer Massen verschiedener Zähigkeit und Festigkeit aufgefaßt werden. Als Beispiel sind die Schneedeckenentwicklungen zehn aufeinanderfolgender Winter graphisch verarbeitet und kurz beschrieben.

Zur Berechnung der Spannungs- und Deformationsvorgänge ist man genötigt, homogene Verhältnisse einzuführen. Auf Grund eines bekannten in der Annäherung als konstant vorausgesetzten Raumgewichtes und gegebener Zähigkeitskoeffizienten lassen sich diese Erscheinungen rechnerisch verfolgen. Bei einer auf schiefer Ebene aufliegenden Schneedecke gleichmäßiger Höhe sind alle Geschwindigkeitsprofile einander gleich. Treten jedoch Terrain- oder Schneehöhenunregelmäßigkeiten auf, so wird auch der Bewegungsvorgang beeinflusst. Der von Hindernissen ausgehende Störbereich zieht sich — einer Exponentialkurve folgend — theoretisch bis in das Unendliche, klingt aber praktisch schon im Abstand eines Mehrfachen der Schneemächtigkeit aus.

Zur Diskussion der Lawinenbildung wird nun wieder eine schichtig aufgebaute Schneedecke angenommen. Unter dieser Voraussetzung lassen sich vier verschiedene Möglichkeiten der primären Bruchbildung unterscheiden. Mit Rücksicht auf den Lawinenverbau sind deren zwei von besonderer praktischer Bedeutung: Der Anbruch von Lockerschneelawinen an der Oberfläche der Schneedecke einerseits und die infolge einer Ueberwindung der Zugspannungen in den Verankerungsquerschnitten entstehenden Schneebrettlawinen andererseits.

Auf Grund dieser Gegebenheiten sollte im Lawinenverbau immer darnach getrachtet werden, daß 1. keine Zugspannungen auftreten können und 2. die Neigung der Schneeoberfläche unter einem gewissen Grenzwert bleibt. Baulich kann dieses Ziel am besten mit Hilfe von Rechenkonstruktionen, welche die Schneedecke in einer Niveaulinie überall dort aufspalten, wo ein Hang zu stärkerer Neigung übergeht, erreicht werden. Hebt man ferner die Werkkrone genügend aus dem Berg heraus, so läßt sich dadurch auch die zweite Bedingung, die Einhaltung einer gewissen Grenzneigung, auf relativ einfache Weise erfüllen.

Schließlih sind im letzten Kapitel noch die auf Rechenkonstruktionen wirksamen Schneedrücke berechnet. Diese lassen sich nach Einführung verschiedener Vereinfachungen aus den Deformationskurven im Staubereich einer Stützwand ableiten, da ja die dortigen Geschwindigkeitsgradienten den spezifischen Spannungen proportional sind. Der Kriechdruck verteilt sich ähnlich einer Sinuskurve über die Wandfläche: am Boden ist der Druck gleich null, an der Schneeoberfläche maximal. Damit kommt die Resultierende gegen den oberen Drittel des Bauwerkes zu liegen. Für die Stabilitätsbedingung muß ferner auch die Querkraft berücksichtigt werden. Auf Grund dieser Angaben lassen sich die statischen Berechnungen von Verbauungselementen relativ einfach durchführen.

Résumé

Les cristaux de glace constituant la neige ont la possibilité de changer de forme au voisinage de la température de fusion et possèdent de plus une certaine liberté de mouvement. Ces propriétés donnent à la neige le caractère d'un agrégat visqueux et compressible. Chaque force agissant sur ce corps produit donc une déformation élasto-plastique. Le temps de relaxation donné par le quotient du module d'élasticité au cisaillement G sur le coefficient de viscosité η permet d'évaluer l'ordre de grandeur de chacune de ces déformations.

Les expériences faites pour déterminer la viscosité de la neige sèche de constitution et de températures différentes donnent une valeur de η variant de 10^6 à 10^{11} $\text{kg} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-2}$. L'augmentation de la grosseur des grains et du poids spécifique, de même que l'abaissement de la température provoquent une viscosité plus grande. Un coefficient physique est ainsi établi, qui permet de calculer les déformations en fonction de la constitution de la neige (grosseur des grains et poids spécifique) et de l'effort appliqué à cette matière.

Une série d'expériences de rupture démontre l'énorme variation de la résistance que peut avoir ce corps; cette résistance est d'autant plus grande que les grains sont plus fins, que le poids spécifique est plus élevé et la température plus basse.

La couverture naturelle de neige formée de couches de caractères variables (grosseur des grains, poids spécifique et température) doit donc être considérée comme une superposition de masses plastiques dont la viscosité et la résistance à la rupture sont différentes les unes des autres. Le développement de la couverture de neige de dix hivers consécutifs représenté graphiquement, et brièvement décrit, en donne un exemple frappant.

Pour pouvoir calculer les tensions et les déformations successives, il est nécessaire d'introduire des conditions homogènes. Les efforts subits et les déformations pourront alors être déterminées si le poids spécifique et le coefficient de viscosité sont admis comme valeurs constantes. Le processus de mouvement est influencé par les irrégularités du terrain et par les changements d'épaisseur de la couche de neige. L'effet de freinage d'un obstacle est exprimé par une courbe exponentielle et se répercute théoriquement à l'infini, mais devient pratiquement négligeable à une distance correspondant à environ cinq fois l'épaisseur de la couche de neige.

Une superposition de différentes couches formant le manteau de neige est envisagée pour la discussion du problème de la formation des avalanches. Parmi les quatre genres principaux de rupture qui peuvent se produire, deux sont importants pour les constructions de protection contre avalanches. Ce sont premièrement le déclenchement d'une coulée de neige sans cohésion à la surface de la couverture de neige, et deuxièmement la cassure à la zone d'encrage d'une plaque de neige, cassure se produisant dès que l'effort de traction est supérieur à la résistance à la rupture de cette neige.

Tenant compte de ces deux possibilités, une construction de protection ne devrait donc pas permettre que des tensions de traction se produisent; et l'inclinaison de la surface devra rester constamment inférieure à une valeur limite. Pratiquement, la première condition peut être remplie par des barrages coupant horizontalement la pente partout où l'inclinaison devient plus forte vers l'aval. Si les constructions sont suffisamment hautes, la pente entre deux barrières est maintenue en dessous d'une inclinaison limite, ce qui satisfait à la seconde condition.

Dans le dernier chapitre de cet ouvrage, on a introduit plusieurs simplifications pour pouvoir évaluer les pressions de la neige sur des barrages. Elles dérivent des courbes de déformation de la zone de retenue d'une paroi d'appui, car les gradients de la vitesse y sont proportionnels aux tensions spécifiques. La pression de rampe se répartit sur la paroi suivant une sinusoïde. Au sol, la pression est nulle; à la surface elle est maximale. La résultante se situe donc vers le tiers supérieur de la construction. Pour établir les conditions de stabilité, les forces transversales doivent être prises en considération. D'après ces données, le calcul statique des éléments de construction contre avalanches est résolu relativement simplement.

Summary

The variability of snow crystals at temperatures near melting point, and their relative freedom of motion in the structure, impart to snow the character of a loose aggregate, comparable in its deformational properties to a plastic compressible, viscous liquid. The application of any force will therefore effect elastic and plastic deformation. An estimate of the magnitude of the two types of deformation is given by the time of relaxation, which is the proportion of shearing modulus to coefficient of viscosity.

Extensive experimental work on the viscosity η of dry snows of different structures and temperatures indicates a variation of the value of η between 10^6 and 10^{11} kg · sec · m⁻². The viscosity of snow increases with increasing grain size, increasing bulk density, and decreasing temperature. Thus in viscosity we have found a physical property enabling us to define deformation in terms of snow structure, temperature and stress.

The strength of snow masses is discussed on the basis of a series of ultimate tensile strength tests. Greater strength results from finer grain, higher density, and lower temperature.

The natural snow cover, consisting of different layers of different structures and temperatures, must be conceived as a superposition of several plastic masses of different viscosity and strength. As an example, the development of the snow cover of ten consecutive winters is presented in graphs with brief descriptions.

Homogeneous conditions must be stipulated for the computation of stress and deformational processes. These phenomena can only be calculated if density and viscosity are given by constant factors. When a snow cover of constant depth lies on an inclined plane, all velocity profiles are similar. Irregularities of terrain and snow depth, however, influence mobility. The zone of disturbance created by an obstacle is theoretically of infinite extent, corresponding to an exponential curve; but in practice the disturbance is limited to a distance of only a few times the snow depth.

For the discussion of avalanche formation, the snow cover is again considered as stratified. This premise admits four different possibilities of primary rupture, two of which are of special significance from the point of view of avalanche defense structures. They are: the formation of loose snow avalanches at the snow surface and slab avalanching, the latter often representing tensile rupture in the region of anchorage of the snow cover. In view of these facts, the trend in avalanche defense construction is to hinder the development of tensile stresses and to keep the inclination of the snow surface below a certain value. In practice the first aim is best realized by means of skeleton structures, which interrupt the continuity of the snow cover along contour lines wherever the slope steepens. Building to a sufficient height above the ground enables us to meet the second requirement of keeping the slope of the snow surface at a minimum.

The last chapter offers computations of the pressure exerted on skeleton structures by the snow cover. After some simplifications these pressures can easily be calculated with data from the deformation curve in the zone of disturbance created by a retention wall, the velocity gradients being proportional to the specific stress. The distribution of creep pressure on the retaining wall has sine character. The pressure is zero at ground level and a maximum at the snow surface. The resultant pressure acts on the upper third portion of the structure. Conditions of stability also call for consideration of the forces transversal to the retaining wall. The statics of retaining elements can be determined with relative ease on this basis.

Literaturverzeichnis

- [1] **Albisetti C.:** Die Lawinen im Tessin. Z. f. Prakt. Forstwirt. (1924).
- [2] **Bächtold A.:** Staublawinen. Die Alpen, 13 (1937) 5.
- [3] **Bader H., Haefeli R., Bucher E., Neher J., Eckel O., Thams Chr.:** Der Schnee und seine Metamorphose. Beitr. zur Geol. d. Schweiz. Geotechn. Ser. Hydr., Lief. 3, Bern (1939).
- [4] **Bader W. und Natlaj A.:** Die Vorgänge nach der Ueberschreitung der Fließgrenze in verdrehten Eisenstäben. Z. VDI., 71 (1927) 317.
- [5] **Bagnold R. A.:** Beobachtungen im Sandsturm der Wüste. Proc. Roy. Soc., 167 (1938) 282.
- [6] **Bagnold R. A.:** Versuche im Windkanal. Proc. Roy. Soc., (A) 157 (1936) 594.
- [7] **Becker A.:** Der natürliche Schneeschutz an Verkehrswegen. Die Bautechnik, Berlin, 22 (1944) 161.
- [8] **Bentley W. A. und Humphreys W. J.:** Snow Crystals. New York and London (1931).
- [9] **Bingham E. C.:** Fluidity and Plasticity. McGraw-Hill, New York (1922).
- [10] **Bowden P.:** The physics of rubbing surfaces. J. and Proc. of the Roy. Soc. of New South Wales, 78 (1946) 187.
- [11] **Bowden P.:** Ueber den Mechanismus der Reibung. Tech. Rundschau, 39 (1947) Nr. 30/31.
- [12] **Bowden P.:** The polishing of solids and the mechanism of sliding on ice and snow. Proc. of the Soc. of Chem. Ind. of Victoria (1940).
- [13] **Bowden P. and Tabor D.:** 2. Friction and Lubrication. Annual Reports of the Chem. Soc. 42 (1945).
- [14] **Breitenöder M.:** Ebene Grundwasserströmungen mit freier Oberfläche. Springer - Verlag, Berlin (1942).
- [15] **British Rheologist's Club:** Systematik der elastischen und plastischen Deformationen. Nature, 149 (1942) 702.
- [16] **Brown - Boveri & Co., AG.:** Beeinflußbarkeit und Bewertung des Kriechens und der Erholung bei hoher Temperatur. Mitt. Dezember (1938).
- [17] **Bucher E.:** Die Anfänge der Schnee- und Lawinenforschung in der Schweiz. Leben und Umwelt, 1 (1944) 44.
- [18] **Bucher E.:** Aufgabe und Organisation des Lawinendienstes. Die Alpen, 22 (1946) 7.
- [19] **Bucher E., Haefeli R., Heß E., Jost Chr., Winterhalter R. U.:** Lawinen, die Gefahr für den Skifahrer. Geotechn. Komm. d. SNG. (1940).
- [20] **Bucher E.:** Die Lawinen des Winters 1941/42. Die Alpen, 18 (1942) 413.
- [21] **Bucher E. und Jost Chr.:** Die Erfahrungen in der künstlichen Loslösung von Lawinen mit Hilfe des Minenwerfers. NZZ., 31. Juli, 1. Aug. (1941).
- [22] **Bucher E.:** Technische Ueberlegungen zum Problem der Lawinenbildung. Berge der Welt, 1 (1946) 131.
- [23] **Bucher E.:** Réflexions techniques au sujet du problème de la formation des avalanches. Mitt. Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 4 (1947).
- [24] **Bucher E.:** Considerazioni tecniche sulla formazione delle valanghe. Mitt. Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 5 (1948).
- [25] **Bucher E.:** Diskussionsbeitrag zum Lawinenverbau. Mitt. Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 2 (1947).
- [26] **Bucher E. und Schild M.:** Schnee- und Lawinen im Winter 1945/46. Mitt. Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 3 (1947).
- [27] **Burgers W. G.:** Rekristallisation, verformter Zustand und Erholung. Hdb. der Metallphysik, Leipzig (1941) 504.
- [28] **Burri X.:** Ueber Lawinenverbauungen an der Gotthardbahn. Schweiz. Z. für Forstwesen, 60 (1909) 1, 42, 73.
- [29] **Büttler M.:** Luftdruck bei Staublawinen. Die Alpen, 13 (1937) 10.
- [30] **Campell E.:** Einbauprozente als Basis für Lawinenverbauungen. Unveröffentlichte Studien.
- [31] **Campell R.:** Ueber die Lawinenbildung. Deutsche med. Wochenschrift, Leipzig (1936).
- [32] **Campell R.:** La lutte contre les dangers des avalanches. Die Alpen, 18 (1942) 116, 130.
- [33] **Campell R.:** Bergfahrer und Lawine. Die Alpen, 10 (1934) 42.
- [34] **Chalmers Ph.:** Crystal boundaries in tin. Proc. Roy. Soc. A (1940) 175.
- [35] **Coaz J.:** Der Lawinenschaden im schweiz. Hochgebirge im Winter und Frühjahr 1887/88. Bern (1889).
- [36] **Coaz J.:** Statistik und Verbau der Lawinen in den Schweizeralpen. Bern (1910).
- [37] **Coaz J.:** Die Lawinen der Schweizeralpen. Bern (1881); 2. Ausgabe, Bern (1888).
- [38] **Correns C. W.:** Ueber die Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. Ber. Preuß. Akad. der Wiss., Phys. Klasse, Berlin (1926) 81.
- [39] **Croce K.:** Meßversuche an Schneezäunen in den Wintern 1940/41 und 1941/42. Arbeitsbericht C 1 der Schneeforschungsstelle des Generalinspektors für das deutsche Straßenswesen, München, September 1942 (unveröffentlichte Studien).
- [40] **Croce K.:** Schneezäune aus Strohseilen. Arbeitsrapport C 2 der Schneeforschungsstelle des Generalinspektors für das deutsche Straßenswesen, München, August 1942 (unveröffentlichte Studien).
- [41] **Croce K.:** Bestimmung der Schneefeuchtigkeit. Arbeitsbericht A 1, München, August 1943 (unveröffentlichte Studien).

- [42] **Dachler R.:** Grundwasserströmung. Julius Springer, Wien (1936).
- [43] **Dehlinger U.:** Gibt es eine wahre Kriechgrenze? Z. f. Metallkunde (1939).
- [44] **Dehlinger U.:** Das plastische Verhalten wechselbeanspruchter Zinn-Einkristalle bei reiner Schubverformung. Z. f. Metallkunde (1940).
- [45] **Demontzey P.:** L'extinction des torrents en France. Imprimerie nationale, Paris (1894).
- [46] **Eugster E.:** Schneestudien im Oberwallis und ihre Anwendung auf den Lawinenverbau. Beitr. zur Geol. der Schweiz., Geotechn. Ser. Hydr. Lief. 2, Bern (1938).
- [47] **Fankhauser F.:** Zur Bestimmung des Abstandes von Einbauten beim Lawinenverbau. Schweiz. Z. für Forstwesen, 63 (1912) 11.
- [48] **Fankhauser F.:** Ueber Lawinen und Lawinenverbau. Die Alpen, 5 (1929) 2.
- [49] **Fankhauser F.:** Ueber Lawinen und Lawinenverbau. Schweiz. Z. für Forstwesen (1928), Beiheft Nr. 2.
- [50] **Fankhauser F.:** Der Lawinenverbau mittels Terrassen. Schweiz. Z. für Forstwesen, 71 (1920) 218.
- [51] **Finlayson J.:** Test on the shearing strength of ice. Canadian Engineer, 53 (1927) 101.
- [52] **Finney E. A.:** Snow control on the highways. Michigan Engin. exp. station bull. Nr. 57, East Lansing, Michigan (1934) May.
- [53] **Finney E. A.:** Snow control by tree planting. Michigan Engin. exp. station bull. Nr. 75, East Lansing, Michigan (1937) July.
- [54] **Finney E. A.:** Snow drift control by highway design. Michigan Engin. exp. station bull. Nr. 86, East Lansing, Michigan (1939) September.
- [55] **Finsterwalder S.:** Ueber die innere Reibung des Eises und die Bestimmung der Gletschertiefe. Z. für Gletscherkunde, 15 (1926/27) 56.
- [56] **Flaig W.:** Das Schneebrett, die gefährlichste Skiläuferlawine. Der Winter, 31 (1937) 49.
- [57] **Flaig W.:** Lawinen! Abenteuer und Erfahrung. Erlebnis und Lehre. F. A. Brockhaus, Leipzig (1935).
- [58] **Förster F.:** Lawinenverbauungen in d. Schweiz. Wien (1877).
- [59] **Fulterer G.:** Die Konstruktion von Lawinenschutzbauten an Straßen. Allg. Forst- und Holzwirtschaftliche Ztg., 59 (1948).
- [60] **Gaberel R.:** Davoser Bauten, Schweiz. Bauztg., 100 (1932).
- [61] **Gaberell P.:** De l'emploi du lance-mines dans le déclenchement artificiel des avalanches. Revue Milit. Suisse, 86 (1941) 60.
- [62] **Gasterstädt J.:** Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorganges. VDI-Verlag, Berlin (1924).
- [63] **Goranson W.:** Physics of stressed solids. J. of Chem. Physics, 8 (1940) 323.
- [64] **Goranson W.:** Flow in stressed solids. Bull. Geol. Soc. of America, 51 (1940).
- [65] **Goranson W.:** Flow in stressed solids and interpretation. Bull. of the Geol. Soc. of America, 15 (1904) 1001.
- [66] **Griggs D.:** Experimental flow of rocks under conditions favoring recrystallisation. Bull. Geol. Soc. of America, 51 (1940) 1001.
- [67] **Griggs D.:** Creep of Rocks. J. of Geology (1939).
- [68] **Griggs D.:** Deformation of rocks under high confining pressures. J. of Geology, 44 (1936).
- [69] **Guislain A.:** La lutte contre les avalanches en Suisse. Revue des Eaux et Forêts, (1947) 494.
- [70] **Haefeli R.:** Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. Sonderdruck aus [3].
- [71] **Haefeli R.:** Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke. AG. Gebr. Leemann & Co. Zürich und Leipzig (1942).
- [72] **Haefeli R.:** Erdbaumechanische Probleme im Lichte der Schneeforschung. AG. Gebr. Leemann & Co. Zürich und Leipzig (1944).
- [73] **Haefeli R.:** Beitrag zum Schneebericht 1945/46. Interner Bericht Nr. 111 J der Erdbauabdt. der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH.
- [74] **Haefeli R.:** Zur Beobachtung der winterlichen Schneeverhältnisse in den Schweizer Alpen. Die Alpen, 21 (1945) 58 (kl. Mitt.).
- [75] **Haefeli R.:** Entwicklung und Probleme der Schnee- und Gletscherkunde in der Schweiz. Experientia, 2 (1946).
- [76] **Haefeli R.:** Die Arbeiten der Station Weißfluhjoch der schweiz. Schnee- und Lawinenforschungskommission 1934—40. Intersylva, Organe du Centre internat. de sylviculture, 1 (1941).
- [77] **Haefeli R.:** Beobachtungen im Firngebiet des großen Aletschgletscher. SNG. Sils (1944) 99.
- [78] **Haefeli R.:** Bericht über die wissenschaftliche Tätigkeit der Station Davos-Weißfluhjoch in den Jahren 1934—1937. Schweiz. Bauztg., 110 (1937).
- [79] **Haefeli R.:** Zur Erd- und Kriechdrucktheorie. Mit einer Anwendung auf den Castieler Viadukt der Linie Chur—Arosa der Rhätischen Bahn AG. Gebr. Leemann & Co. Zürich und Leipzig (1945).
- [80] **Haefeli R.:** Autographie über Lawinenverbau. Nr. 2, Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH., Zürich (1941).
- [81] **Haefeli R.:** Mechanische Eigenschaften von Lockergesteinen. Schweiz. Bauztg., 111 (1938).
- [82] **Haefeli R.:** Diskussionsbeitrag zum Lawinenverbau. Schweiz. Z. für Forstwesen, 98 (1947) 17.
- [83] **Haefeli R. und Schaerer Ch.:** Der Triaxialapparat. Schweiz. Bauztg., 128 (1946) 51, 65 u. 81.
- [84] **Haefeli R. und v. Moos A.:** Drei Lockergesteine und ihre technischen Probleme. Schweiz. Bauzeitung 112, (1938).

- [85] **v. Hanfstengel K. und Hanemann H.:** Der Kriechvorgang im belasteten Blei. Z. für Metallkunde 30, (1938) 42.
- [86] **Hatscheck E.:** Viskosität der Flüssigkeiten. Theodor Steinkopff, Dresden u. Leipzig (1929).
- [87] **Hawkes L.:** Some notes of the structure and flow of ice. Geol. Magaz. 67 (1930) 111.
- [88] **Heim A.:** Die Lawinen. Schweiz. Schularchiv, 5 (1884).
- [89] **Hellmann G.:** Schneekristalle. Berlin (1893).
- [90] **Henne A.:** Die Lawinenverbauungen Schiahorn-Dorfberg in Davos. Veröffentlichung Nr. 1 über Lawinenverbauungen, Eidg. Dep. des Innern, Insp. für Forstwesen, Bern (1925).
- [91] **Heß E.:** Schneeprofile. Jb. des Schweiz. Ski-verb., (1933) 41.
- [92] **Heß E.:** Schnee Brettlawinen. Die Alpen, 10 (1934) 81.
- [93] **Heß E.:** Erfahrungen über Lawinenverbauungen. Veröffentlichung Nr. 4 über Lawinenverbauungen, Eidg. Dep. des Innern, Insp. für Forstwesen, Bern (1936).
- [94] **Heß H.:** Ueber die Plastizität des Eises. Ann. d. Phys., 36 (1911) 449.
- [95] **Holl A.:** Polare Eiswärmewirtschaft. Die Alpen, 15 (1939) 15.
- [96] **Höppler F.:** Die Plastizität des Eises. Kolloid Z. 97 (1941) 154.
- [97] **Höppler F.:** Drucklysoption. Kolloid Z. 97 (1941) 61.
- [98] **Höppler F.:** Beschreibung, Anwendung und Handhabung des Höppler-Konsistometers, zugleich eine Einführung in die Systematik und Nomenklatur der Viskosimetrie, Plastometrie, Elastometrie. Kolloid Z. 97 (1941) 61.
- [99] **Houwink R.:** Elastizität, Plastizität und Struktur der Materie. Leipzig und Dresden (1938).
- [100] **Jourdan-Laforte:** La densité des ouvrages de correction d'avalanches. Revue des Eaux et Forêts, 61 (1933) 493.
- [101] **Koechlin R.:** Mécanisme de l'eau et principes généraux pour l'établissement d'usines hydro-électriques. Paris et Liège (1924).
- [102] **Kohler H.:** Die Verhütung der Schneeeverwehungen. Die Straße, 4 (1937) 526.
- [103] **Kuhn W.:** Beziehungen zur Viskosität und elastischen Eigenschaften amorpher Stoffe. Leipzig (1939).
- [104] **Kuhn W.:** Elastizität und Viskosität hochpolymerer Verbindungen. Angewandte Chemie 52 (1939) 289.
- [105] **Lagally M.:** Die Zähigkeit des Gletschereises und die Tiefe der Gletscher. Z. für Gletscherkunde, 18 (1930) 1.
- [106] **Langer R.:** Bremswirkung von Windschutzgittern. Ergebnisse der aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, 4 (1932) 138.
- [107] **Langer R.:** Untersuchungen von Windschutzgittern. Ergebnisse der aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, 3 (1935) 157.
- [108] **Lombard A.:** Deux particularités de la neige: son mouvement et sa cohésion. Die Alpen, 17 (1941) 15.
- [109] **Matsuyama M.:** On some physical properties of ice. J. of Geol., 28 (1920) 607.
- [110] **Moore H. F., Betty B. B. und Dollins C. W.:** The creep and fracture of lead. Univ. of Illinois Engin. exp. station, 272 (1935).
- [111] **Mougin M. P.:** Les avalanches en Savoie. Etudes glaciologiques, 4 (1922) 175.
- [112] **Mougin M. P.:** La restauration des Alpes. Impr. nationale, Paris (1931).
- [113] **Mußmann H.:** Die elastische Nachwirkung und ihr Zusammenhang mit der optischen Nachwirkung. Ann. der Phys., 31 (1938).
- [114] **Nadai A.:** Der bildsame Zustand der Werkstoffe. Julius Springer, Berlin (1927).
- [115] **Nadai A.:** Plasticity. Neuyork (1931).
- [116] **Nadai A.:** On the creep of solids et elevated temperature. J. of applied Physics, 8 (1937).
- [117] **Nägeli W.:** Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen. Mitt. Schweiz. Anstalt für das forstl. Versuchswesen, 23 (1943) 223 und 24 (1946) 659.
- [118] **Nakaya U. and Iizima T.:** Physical investigations on snow. Part I, snow crystals observed in 1933 at Sapporo and some relations with meteorological conditions. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1934) 149.
- [119] **Nakaya U. and Hasikura K.:** Physical investigations on snow. Part II, classification and explanation of snow crystals observed in the winter of 1933/34 at Mt. Tokati and at Sapporo. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1934) 163.
- [120] **Nakaya U. and Terada T.:** On the electrical nature of snow particles. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1934) 181.
- [121] **Nakaya U. and Terada T.:** Simultaneous observations of the mass, falling velocity and form of individual snow crystals. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1935) 191.
- [122] **Nakaya U.:** On the correspondence of snow and rime crystals. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1, (1935) 201.
- [123] **Nakaya U. and Satô I.:** On the artificial production of frost crystals with reference to the mechanism of formation of snow crystals. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1935) 206.
- [124] **Nakaya U., Sekido Y. and Tada M.:** Notes on irregular snow crystals and snow pellets. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1936) 215.
- [125] **Nakaya U. and Sekido Y.:** General classification of snow crystals and their frequency of occurrence. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1936) 243.

- [126] **Nakaya U., Tada M., Sekido Y. and Takano T.:** The physics of skiing, the preliminary and general survey. Investigations on snow. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 1 (1937) 265.
- [127] **Nakaya U., Satô I. and Sekido Y.:** Preliminary experiments on the artificial production of snow crystals. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ., Ser. 2, Sapporo, Japan, 2 (1938) 1.
- [128] **Nakaya U., Toda Y. and Maruyama S.:** Further experiment on the artificial production of snow crystals. J. of Fac. of Sc., The Hokkaido Imp. Univ. Ser. 2, Sapporo, Japan, 2 (1938) 13.
- [129] **Nakaya U., Hanazima M. and Dezuno K.:** Experimental researches on window hoar crystals, a general survey. J. of Fac. of Sc. The Hokkaido Imp. Univ., Ser. 2, Sapporo, Japan 3 (1939) 1.
- [130] **Niggli P.:** Die Schnee-, Lawinen- und Gletscherkunde in der Schweiz. NZZ., 15. April 1943. Mitt. des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 1 (1946).
- [131] **Niggli P.:** Schnee und Firn. Festschrift zur 107. Stiftungsfeier der Universität Zürich. Zürich (1940).
- [132] **Niggli P.:** Zusammensetzung und Klassifikation der Lockergesteine. Schweizer Archiv (1938).
- [133] **Nokkentved Chr.:** Laevirkningsundersogelser og Typebestemmelser af Laehegn. Hedeselskabets Tidsskrift (1938) 80.
- [134] **Nokkentved Chr.:** Fortsatte Laevirkningsundersogelser. Hedeselskabets Tidsskrift (1940) 362.
- [135] **Nokkentved Chr.:** Undersogelse af Snehegn. Stads- og Havneingenioren (1939).
- [136] **Nokkentved Chr.:** Drivedannelse ved sneskaerne. Stads- og Havneingenioren (1940).
- [137] **Nordenskiöld O.:** Snow crystals. Nature, 48 (1893) 592.
- [138] **Northwood T. D.:** Sonic determination of the elastic properties of ice. Canadian J. of research A, 25 (1947) 88.
- [139] **Oechsli M.:** Ein Versuch zur Bestimmung der Schneekohäsion. SNG. (1936) 262.
- [140] **Oechsli M.:** Schneetemperaturen, Schneekriechen und Kohäsion. Schweiz. Z. für Forstwesen, (1937) 1.
- [141] **Oechsli M.:** Lawinengeschwindigkeiten und Lawinenluftdruck. Schweiz. Z. für Forstwesen, (1938) 153.
- [142] **Oechsli M.:** Kriechschnee und Schneekohäsion. Transactions of the meeting of the international. Comm. of snow and glaciers. Internat. association of Hydr. Bull. 23 (1936) 721.
- [143] **Oechsli M.:** Die Lawinen im Winter 1944/45 im Gebiet des Urnerlandes. Gotthard Klubnachr. d. Sekt. Gotthard SAC., 3 (1945).
- [144] **Oechsli M.:** Einige Erfahrungen und Gedanken betreffend Lawinenverbau. Schweiz. Z. f. Forstwesen, 97 (1946) 521.
- [145] **Orowan E.:** Zur Kristallplastizität. Z. f. Phys., 89 (1934).
- [146] **Paulcke W.:** Lawinengefahr, ihre Entstehung und Vermeidung. München (1926).
- [147] **Paulcke W.:** Schnee- und Lawinenforschungen. Forschung und Fortschritt, Berlin (1934).
- [148] **Paulcke W.:** Schneewächten und Lawinen. Ergebnisse meiner Schneeforschungen. Z. d. Deutsch. und Oestr. Alpenvereins, (1934) 247.
- [149] **Paulcke W.:** Der Schnee und seine Diagenese. Z. f. Gletscherkunde, 21 (1934).
- [150] **Paulcke W.:** Gefahrenbuch des Bergsteigers u. Skiläufers. Union Deutsche Verlagsgesell. Berlin (1942).
- [151] **Paulcke W. und Welzenbach W.:** Schnee, Wächten, Lawinen. Z. f. Gletscherkunde, 16 (1928) 42.
- [152] **Perutz M. F. und Seligman G.:** A crystallographic investigation of glacier structure and the mechanism of glacier flow. Pro. Royal Soc. of London, Ser. A, 172 (1939) 335.
- [153] **Peter A.:** Traité général de la route moderne. Vogt-Schild S. A., Soleure (1937).
- [154] **Petersen F.:** Schutzanlagen gegen Schneeverwehungen an Straßen. Bautechnik (1942).
- [155] **Plyler E. K.:** The growth of ice crystals. J. of Geol. 34 (1926) 58.
- [156] **Pollack V.:** Zur Frage der Erd- und Steinbankette bei den Lawinenverbauungen im Einbruchsgebiet. Schweiz. Z. für Forstwesen, (1907) 140.
- [157] **Pollack V.:** Schutzbauten in den Hochpyrenäen. Z. d. Oestr. Ing. und Arch. Vereins (1892).
- [158] **Pollack V.:** Lawinenverbauungen an der Arlbergbahn. Z. d. Oestr. Ing. und Arch. Vereins (1891).
- [159] **Pollack V.:** Ueber Erfahrungen im Lawinenverbau in Oesterreich. Franz Deutike, Leipzig und Wien (1906).
- [160] **Prandtl L.:** Strömungslehre. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig (1944).
- [161] **Prohaska F. und Thams Chr.:** Neue Untersuchungen über die Strahlungseigenschaften der Schneedecke. Helvetica Physica Acta, 13 (1940) 21.
- [162] **Pult J.:** Die Bezeichnungen für Gletscher und Lawine in den Alpen. Samedan - St. Moritz (1947).
- [163] **de Quervain M.:** Schnee als kristallines Aggregat. Experientia, 1 (1945) 36.
- [164] **de Quervain M.:** Kristallplastische Vorgänge im Schneeaggregat. Jahresberichte 1943/44 und 1944/45 des Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung (unveröffentlicht).
- [165] **de Quervain M.:** Die Setzung der Schneedecke. Jahresbericht 1944/45 des Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung (unveröffentlicht).

- [166] **de Quervain M.:** Eine Lawine ist niedergangen. Prisma, Monatsschrift f. Natur, Wissenschaft und Technik (1946) 38.
- [167] **de Quervain M.:** Korngrößenanalyse von Altschnee durch Sedimentation. Schweiz. Bauzeitg. 66 (1948) 117.
- [168] **Ritter M.:** Die klassische Erddrucktheorie. Erdbaukurs ETH. (1938).
- [169] **Roch A.:** Précisions sur quelques termes de langue française concernant la neige et les avalanches. Les Alpes, 20 (1944) 21.
- [170] **Rosenhain G. und Ewen:** Intercrystalline cohesions in metals. J. of Inst. of Metals (1912) 149 und (1913) 119.
- [171] **Roš M. und Eichinger A.:** Versuche zur Klärung der Bruchgefahr. Internat. Kongreß f. techn. Mechanik, Zürich (1926) 315.
- [172] **Roš M. und Eichinger A.:** Versuche zur Klärung der Frage der Bruchgefahr, III Metalle. Zürich (1929).
- [173] **Roš M. und Eichinger A.:** Festigkeitseigenschaften der Stähle bei hohen Temperaturen. Zürich (1934).
- [174] **Sachs G.:** Grundbegriffe der mechanischen Technologie der Metalle. Leipzig (1925).
- [175] **Sachs G.:** Spanlose Formung der Metalle. Eigenspannungen in Metallen. Leipzig (1937).
- [176] **Scott-Blair W.:** Einführung in die technische Fließkunde. Dresden und Leipzig, Steinkopff (1940).
- [177] **Seligman G.:** Snow structure and ski fields. Mcmillan Co. Ltd., St. Marins Street London (1936).
- [178] **Seligman G.:** Die Verdichtung des Schnees durch Wind. Z. f. Gletscherkunde, 62 (1938).
- [179] **Seligman G.:** Forschungsergebnisse am großen Aletschgletscher. Die Alpen, 19 (1943) 357.
- [180] **Seligman G.:** The structure of a temperate glacier. Geograph. J. 47 (1941) 295.
- [181] **Seligman G.:** A cristallographic investigation of glacier structure and the mechanism of glacier flow. Proc. of the Soc. of London Ser. A, 172 (1939) 335.
- [182] **Seligman G.:** An examination of snows deposits, a monograph on Dr. Welzenbach's and other glaciological researches with particular reference to snow cornice formation. British Ski Year Book, 6 (1932) 541.
- [183] **Seligman G.:** The nature of snow. Royal Inst. of Great Britain (1937).
- [184] **Seng H.:** Für das Rieckesche Prinzip. N. Jb. f. Min. usw. 73, Abt. A, (1937) 239.
- [185] **Siegfried W.:** Spannungszustand und Bruch bei Kriechbeanspruchung. Schweizer Archiv, 9 (1943) 1.
- [186] **Siegfried W.:** Zusammenhang zwischen Gefügebau und Festigkeitseigenschaften von gepreßten Phenoplasten. Schweizer Archiv, 8 (1942) 255.
- [187] **Siegfried W.:** Sprödigkeit und Zähigkeit von Metallen bei hohen Temperaturen. Schweizer Archiv, 11 (1945) 1, 43.
- [188] **Sommerfeld A.:** Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung. Z. f. Mathematik und Physik, 50 (1904).
- [189] **Sonder R. A.:** Ueber die Spannungsverteilung in beanspruchten Kristallverbänden und deren Bedeutung für Gefügeregelung und Gesteinsmetomorphose. Schweiz. Min. Petr. Mitt., 13 (1933).
- [190] **Sprecher F. W.:** Ueber die künstliche Veranlassung des Abganges von Lawinen. Schweiz. Z. f. Forstwesen, 61 (1910) 186, 236, 270.
- [191] **Sprecher F. W.:** Lawinen an der Jungfrau. Jb. SAC., i. o., 39 (1903) 364.
- [192] **Sprecher F. W.:** Grundlawinenstudien. Jb. SAC, 35 (1899) 268 und 37 (1901) 219.
- [193] **Schaefer C.:** Einführung in die theoretische Physik, 1. Band, Leipzig (1914).
- [194] **Schneider A.:** Unterwasser-Eiskristallbildung im Untern Grindelwaldgletscher. Die Alpen, 15 (1939) 375.
- [195] **Schubert E.:** Schutz der Eisenbahnen gegen Schneeverwehungen und Lawinen. Leipzig (1903).
- [196] **Schubert E.:** Schneewehen und Schneeschutzanlagen. Wiesbaden (1888).
- [197] **Stäger H. und Zschokke H.:** Das Verhalten von Metallen bei höheren Temperaturen. Schweiz. techn. Z. 1 (1932) 333.
- [198] **Stevens E. H.:** The vertical retardation of the ice of glaciers. The Alpine J., 55 (1946).
- [199] **Strele G.:** Lawinen und Lawinenverbauung. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 38 (1943) 240.
- [200] **Strele G.:** Ueber Lawinen und Lawinenabwehr. Allg. Forst- und Holzwirtschaftliche Ztg., 58 (1947) und 59 (1948).
- [201] **Streiff R.:** Schnee und Lawinen. Die Alpen, 12 (1936) 46.
- [202] **Streiff R.:** Zwanzig Jahre Firnbeobachtung. Z. f. Gletscherkunde, 24 (1936).
- [203] **Streiff R.:** Zur Dynamik der Gletscherkunde. Z. f. Gletscherkunde, 26 (1938).
- [204] **Streiff R.:** Nachtrag zur Gletschertheorie. Die Alpen, 20 (1944) 353.
- [205] **Stüve G.:** Entstehung des Schnees. Beitrag zur Physik der freien Atmosphäre. Leipzig (1929) 170.
- [206] **Sutoki T.:** On the Mechanism of Crystal Growth by Annealing. The Sc. Rep. of the Tôhoku Imp. Univ., 17 (1928) 857.
- [207] **Tammann G.:** Zur Kenntnis der molekularen Zusammensetzung des Wassers. Z. f. anorg. Chemie, (1926) 1.
- [208] **Tammann G.:** Die Bildung des Gletscherkorns. Naturwissenschaften, 17 (1929) 851.
- [209] **Tammann G.:** Aggregatzustände. Voß, Leipzig (1922).
- [210] **Tammann G.:** The sates of hygregation. Proc. Roy. Soc. London, (1925) 159, 189, 323.

- [211] **Tapsell H. J.:** Das Verhalten von Stählen bei hohen Temperaturen. Schweizer Archiv, 13 (1947) 120.
- [212] **Tapsell H. J.:** Creep of metals. Oxford University, London (1931).
- [213] **Terzaghi K. und Fröhlich O. K.:** Theorie der Setzung von Tonschichten. Wien (1936).
- [214] **Thum A.:** Wesen, Ziel und Probleme des Leichtbaues. Schweizer Archiv, 9 (1943) 133.
- [215] **Thum A. und Richard K.:** Verformung und Festigkeit metallischer Werkstoffe bei Dauerbeanspruchung. Z. VDI, 87 (1943) 513.
- [216] **Tschirwinsky P. N.:** Schnee und Schneeschutz. Nordkaukasus-Verlag, Rostow a. Don (1931) (in russischer Sprache).
- [217] **de Verdai:** Mémoire sur les avalanches et moyens de les prévenir. Lourdes (1839).
- [218] **Vogel R.:** Ueber den wechselseitigen Auf- und Abbau sich berührender metallischer Kristallite im Konglomerat. Z. anorg. allg. Chemie 126 (1923) 1.
- [219] **Weinberg B.:** Mechanical properties of ice. Bull. 23, assoc. internat. d'Hydr. Scient., Riga (1938).
- [220] **Weinberg B.:** Ueber den Koeffizienten der inneren Reibung des Gletschereises und seine Bedeutung für die Theorien der Gletscherbewegung. Z. f. Gletscherkunde, 1 (1906) 221.
- [221] **Weinberg B.:** Ueber die innere Reibung des Eises. Ann. der Phys. 18 (1905) 81 und 22 (1907) 321.
- [222] **Welzenbach W.:** Untersuchungen über die Stratigraphie der Schneeablagerung und die Mechanik der Schneebewegungen nebst Schlußfolgerungen auf die Methoden der Verbauung. Wissenschaftl. Veröffentl. Nr. 9, des Deutsch.-Oestr. Alpenvereins, Innsbruck (1930).
- [223] **Winter P.:** Grundlagen der Wildbachverbauung und Richtlinien für die Verbauungsmaßnahmen. Wien und Leipzig (1934). Leipzig (1934).
- [224] **Zdarsky M.:** Elemente der Lawinenkunde. Wien (1916).
- [225] **Zimmermann E.:** Von Lawinen. Schweiz. Bauztg., 107 (1936) 284.

Während der Drucklegung sind ferner erschienen:

- [226] **de Quervain M.:** Das Korngefüge von Schnee. Schweiz. Min. und Petr. Mitt., 28 (1948) 518.
- [227] **Haefeli R.:** Schnee, Lawinen, Firn und Gletscher. Ingenieur-Geologie von L. Bendel, 2 (1948) 663.
- [228] **Messner O. H. C.:** Ueber die Dauerstandsfestigkeit von Zinklegierungen. Schweizer Archiv, 14 (1948) 86, 118, 147 und 182.
- [229] **Sulzlée C.:** Les méthodes scientifiques d'investigation des couches de neige en haute montagne et leurs applications. Revue des Eaux et Forêts, 87 (1948) 223.
- [230] **Wall E.:** Ueber die Entstehung der Schneekristalle. Wiss. Arbeiten des deutschen meteorologischen Dienstes im franz. Besetzungsgebiet, 1 (1947) 151.
- [231] **Schnee und Lawinen im Winter 1946/47.** Winterbericht Nr. 11 des Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung (in Vorbereitung).
- [232] **Schnee und Lawinen im Winter 1947/48.** Winterbericht Nr. 12 des Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung (in Vorbereitung).
- [233] **Klein J.:** The snows characteristics of aircraft skis. National research council of Canada (1947).
- [234] **Klein J.:** Snow-cover measurements National research council of Canada (1946 u. 1947).
- [235] **Klein J.:** Canadian survey of physical characteristics of snow-covers. National research council of Canada (1948).
- [236] **Legget F.:** Canadian interest in snow and ice research. National research council of Canada (1948).

