

Wissenschaftliche Veröffentlichungen
des D. u. Ö. Alpenvereins

9.

Untersuchungen
über die Stratigraphie der Schneeablagerungen
und die Mechanik der Schneebewegungen
nebst Schlußfolgerungen auf die Methoden
der Verbauung

Von

Dr. Ing. WILLI WELZENBACH

München

INNSBRUCK 1930

VERLAG DES DEUTSCHEN UND ÖSTERREICHISCHEN ALPENVEREINS

IN KOMMISSION BEI DER J. LINDAUER'SCHEN UNIV.-BUCHHANDLUNG IN MÜNCHEN

Hergestellt durch F. Bruckmann AG., München

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
I. TEIL: UNTERSUCHUNGEN, EXPERIMENTE UND DEREN ERGEBNISSE	7
Einleitung	8
I. SCHNEE	9
1. Vorbemerkung	9
2. Wasserbewegung im Firn im Zusammenhang mit der Entstehung von Eislagen	11
3. Zusammenfassung der Ergebnisse	13
II. WÄCHTEN	14
1. Vorbemerkung	14
2. Untersuchungsmethodik	14
3. Beobachtungen	15
4. Schlußfolgerungen	16
a) Sogwächten	16
b) Druckwächten	17
5. Beziehung zwischen Wächtenform und Windstärke	18
6. Gratwächten — Plateauwächten	19
7. Gegenböschung	19
8. Setzen und Einrollen der Wächten	21
9. Zeitlicher Bestand von Wächten	23
a) Winterwächten	23
b) Dauerwächten	23
10. Beziehung zwischen Bergform, Windrichtung und Wächtenbildung	26
11. Bruchebene	30
12. Spaltenwächten	30
13. Beziehung zwischen Hangneigung und Wächten- bildung	31
a) Begriff der Grenzneigung	31
b) Intensität der Wächtenbildung und ihre Abhängigkeit von der Neigung des Luvhanges	32
c) Auswertung der Messungsergebnisse	34

	Seite
14. Entwicklung der Firngrate	36
15. Entstehung der Eisgrate	38
III. LAWINEN	38
1. Vorbemerkung	38
2. Schneesichtung und Lawinenbildung	39
3. Schneebeschaffenheit und Lawinenbildung	41
4. Abbruchlinie von Lawinen	42
5. Die Mechanik der Lawinenbewegung	42
a) Reine Bodenbewegung	43
b) Reine Luftbewegung	48
c) Boden-Luftbewegung	48
6. Statische Druckwirkung ruhender Schneemassen	49
a) Maßgebende physikalische Eigenschaften des Schnees	49
α) Das spezifische Gewicht	49
β) Der natürliche Böschungswinkel	50
γ) Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage	50
δ) Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Mauerrückfläche	50
c) Die Kohäsion des Schnees	51
b) Ermittlung des Schneedrucks	51
a) Die Hangneigung ist kleiner als der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage	52
β) Die Hangneigung ist größer als der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage	52
7. Dynamische Druckwirkung von Lawinen	54
a) Die Lawine kommt am Hindernis zum Stillstand	54
β) Die Lawine umfließt das Hindernis	54
8. Künstliche Veranlassung von Lawinen	55
II. TEIL: TECHNISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN UND SCHUTZMASSNAHMEN	57
Einleitung	58
I. SCHUTZ GEGEN SCHNEEVERWEHUNGEN	59
1. Vorbemerkung	59
2. Einfluß der Bodenform auf die Strömungsgeschwindigkeit der Luft	60
a) Messungen an einem hohen Damm	60
b) Messungen an einem niederen Damm	61
c) Messungen an einem Hang mit Anschnitt	62
d) Messungen an einem Einschnitt	63
3. Schneeschutzanlagen (Allgemeines)	63

4. Maßnahmen, durch die der Schnee über den zu schützenden Verkehrsweg hinweggeführt werden soll	64
a) Abflachen der Einschnittböschungen	64
b) Ablenkungsbauten	65
5. Maßnahmen, durch die der Schnee zur Ablagerung gebracht wird, bevor er das zu schützende Objekt erreicht	66
a) Waldschutzstreifen	66
b) Schneezäune	67
a) Dichte Schutzwerke	69
b) Durchlässige Schutzwerke	71
6. Überwölbung von Verkehrswegen	75
7. Ermittlung des Ablagerungsquerschnittes	76
8. Bestimmung der erforderlichen Zaunhöhe	76
a) Der Zaun sitzt an der Einschnittkante	77
b) Der Zaun ist von der Einschnittkante abgerückt	78
9. Anordnung der Schneeschutzsäune	78
10. Gesichtspunkte für die Anlage von Verkehrswegen und die Wahl geeigneter Schneeschutzmittel	80
II. SCHUTZ GEGEN LAWINEN	81
1. Vorbemerkung	81
2. Sicherungsmethoden (allgemein)	81
3. Bekämpfung der Grundursachen	82
4. Maßnahmen im Lawinenabbruchgebiet	83
a) Bepflanzung	83
b) Verbauung	84
5. Lawinenleitwerke	89
6. Unmittelbarer Schutz von Bauwerken	92
7. Telephonischer und telegraphischer Warnungsdienst	98
8. Gesichtspunkte für die Anlage von Verkehrswegen und die Wahl geeigneter Lawinenschutzmittel	99
ANHANG	101
I. SCHLUSSWORT	102
II. LITERATURVERZEICHNIS	103
III. QUELLENVERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	105

I. TEIL:
UNTERSUCHUNGEN, EXPERIMENTE
UND DEREN ERGEBNISSE

E i n l e i t u n g

Mit der Geologie des Schnees hat sich die Wissenschaft bisher noch nicht in dem Maße beschäftigt, wie es die geologische und geologisch-technische Bedeutung des Stoffes verdient¹⁾.

Dem Schnee, seiner Ablagerung, seinen Erscheinungsformen, seinen Umlagerungen, seinen Veränderungen besonders zwischen Firn und Gletschereisbildung und allem, was damit zusammenhängt, kommt mindestens die gleiche Bedeutung zu, wie den Fragen der Sand- und Staubablagerungen bei Dünenbildungen an Küsten und in Wüsten, bei Lößbildungen, Schotterablagerungen usw.; trotzdem finden sich auch in den geologischen Lehrbüchern entweder keine oder höchstens unzulängliche Behandlungen dieser Fragen.

Die bisherigen Arbeiten befaßten sich einerseits mit allgemeinen physikalischen Eigenschaften des Schnees, wie Dichte, Temperatur, Korngröße, Kristallform usw., anderseits mit der rein oberflächlichen Einwirkung von Wind und Sonne, ohne jedoch hierbei die vielen außerdem in Betracht kommenden physikalischen (aerodynamischen) Vorgänge eingehender zu berücksichtigen. Was endlich die innere Struktur, d. h. die Schichtungsfrage, betrifft, so fand sie zwar Beachtung, meist aber lediglich im Zusammenhang mit Fragen der Gletscherphänomene.

Da sich die für die Entstehung eines Gebildes maßgebenden Gesetze niemals aus der äußeren Form, sondern nur aus der inneren Struktur ermitteln lassen, so ergibt sich die Methodik der Untersuchung von selbst, nämlich Beobachtung am Gegenstand, Aufschließen von Profilen und das Experiment²⁾.

¹⁾ Zum Studium der noch ungeklärten Fragen wurden von Professor Dr. W. P a u l c k e und vom Verfasser verschiedene Expeditionen unternommen, so vom 5. bis 21. März 1926 ins Spitzmeilengebiet (Flumser Berge), vom 25. bis 31. August und vom 18. bis 20. September 1926 in die Hohen Tauern, vom 15. bis 29. April 1927 und vom 14. bis 26. April 1928 ins Jungfrau-Gebiet (Berner Oberland). Außerdem wurden noch verschiedene Untersuchungen auf der Hornisgrinde (Schwarzwald) und bei gelegentlichen Bergfahrten gepflogen.

Es sei hier all jenen Stellen aufrichtigster Dank ausgesprochen, die sich um die Förderung der Arbeiten besonders verdient gemacht haben. Es ist dies in erster Linie der D e u t s c h e u n d Ö s t e r r e i c h i s c h e A l p e n v e r e i n, welcher die Geldmittel bereitstellte, ferner die S e k t i o n P i z S o l d e s S c h w e i z e r A l p e n k l u b s, welche uns ihre Spitzmeilenhütte für die Arbeiten zur Verfügung stellte, endlich die D i r e k t i o n d e r J u n g f r a u b a h n, welche uns in den Stationen Eigergletscher und Jungfraujoch wiederholt gastfreie Aufnahme gewährte und uns dadurch Studien in einem besonders günstigen Gebiet ermöglichte.

²⁾ Bisherige Darstellungen von Untersuchungsergebnissen: P a u l c k e, Lawinengefahr, München 1926. Z s i g m o n d y - P a u l c k e, Gefahren der Alpen, München 1926. P a u l c k e - W e l z e n b a c h, „Schnee, Wächten, Lawinen“ in der Zeitschrift für Gletscherkunde, Band XVI, Heft 1/2.



Abb. 1. „Echte“ Firnschichtung am Fermuntgletscher

I. S c h n e e

I. Vorbemerkungen

Der Schnee ist ein Sediment, dessen Material aus der Luft auf den Boden herabsinkt wie das feste Material im Wasser. Unterbrechungen in der Zufuhr und Pausen, die zu Veränderungen (Setzungen, Einschaltungen, Umwandlungen) führen, müssen demnach auch beim Schnee ausgesprochene Schichtenbildung zur Folge haben. Während bis in die jüngste Zeit die eben dargelegte Anschauung über die Entstehung der Firnschichten allgemein geteilt wurde, traten in den letzten Jahren Stimmen auf, welche die Firnschichtung im herkömmlichen Sinn als Form der Ablagerung in Frage stellen bzw. stark einschränken.

H. P h i l i p p¹⁾ übernimmt Ansichten von H a m b e r g über die Struktur des Gletschereises auch für die des Firns und glaubt, es gäbe keine Firnschichtung im herkömmlichen Sinn, da die Trennungsflächen des in Schichten sedimentierten Schnees durch Umkristallisation verloren gingen und ausgedehnte Staublagen nicht vorhanden seien. Was hingegen bisher als „Schichtung“ betrachtet wurde, sei nichts anderes als Abscherungsflächen, verursacht durch die Bewegungsvorgänge im Firn. Diese Anschauung erscheint in keiner Weise vertretbar. Für jeden mit alpinen Gletschern einigermaßen vertrauten Beobachter ist die Schnee- und Firnschichtung kein „wissenschaftliches Problem“, sondern eine überall sichtbare und deshalb selbstverständliche Tatsache, und zwar als Ergeb-

¹⁾ „Über den Mechanismus der Gletscherbewegung“, Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Beilage-Band 17.

nis normaler Ablagerung mit oder ohne Einschaltung von Staulagen je nach der Art der Materialzufuhr (s. Abb. 1).

Daß außer primärer Schichtung im Gletscher auch noch Parallelstrukturen „tektonischen“ Ursprungs vorkommen, ist eine allbekannte Tatsache; allerdings fehlt bis jetzt noch eine exakte Durcharbeitung dieser Erscheinungen der Tektonik im Gletscherkörper.

Selbstverständlich können auch die Schichtflächen im Schnee und Firn, wie diejenigen anderer Sedimente als präformierte Gleitflächen für Rutschungen (Bergschliffe, Lawinenabbrüche), wie für tektonische Verschiebungsvorgänge wirken. Im Gegensatz zu allen massig auftretenden Gesteinen reagieren alle geschichteten besonders leicht und stark auf tektonische Einwirkungen.

Es kann also schon unter Umständen im Firngebiet aus einer primären Schichtfläche sekundär eine Gleitfläche werden.

Jedenfalls ist aber noch nirgends erwiesen, daß in den Firngebieten die dort überall sichtbare ausgesprochene Parallelstruktur aus homogenen massigen, nicht von vornherein parallel lagenartig struierten Massen durch Abscherung als Pseudoschichtung hervorgegangen ist.

Hier liegt echte Schichtung vor, die unbedingt bei dem Wechsel von Schneefällen, Verfirnung Staubaufblasen usw. entstehen muß.

Über die Schichtung und besonders auch über die Einschaltung fraglos durchgehender Schmutzflächen in einem Gipfelfirn schreibt von Klebelsberg in seiner Arbeit über „Glazialgeologische Erfahrungen aus Gletscherstollen“¹⁾:

„Die Bankung fiel entgegengesetzt zum oberflächlichen Hange leicht bergwärts ein. Die Bankungsflächen waren Schmutzflächen und traten auffällig hervor als schwarze bis 3 und 4 cm breite Streifen; diese Streifen waren nicht völlig scharf begrenzt, sondern klangen nach oben und unten in leichte Schwärzungen aus. Annähernd parallel zur Bankung verlief innerhalb jeder Bank die feinere Schichtung.

Die Schichtfugen verschwanden fast ganz, waren völlig verwachsen, gleichsam obliteriert; das Eis erschien in der Schichtfläche und teilweise auch in der Draufsicht völlig kompakt. Nur bei günstiger Beleuchtung und besonders in der Durchsicht erkannte man die Schichtung fein, etwas unscharf, leicht verwischt. . .

Daß dies tatsächlich eine Erscheinung der primären, sedimentären Schichtung ist (nicht eine Druckerscheinung), konnte nach der örtlichen und oberflächlichen Lage nicht zweifelhaft sein. Die feine Streifung gibt bisweilen das Bild der Bänderung und könnte in anderen Gletscherlagen um so leichter Bänderung vortäuschen, als ohne besondere Druckwirkungen noch Diskordanzen hinzukommen können. . .“

Um eindeutige Ergebnisse zu erzielen, erfolgten unsere Profilgrabungen an solchen Stellen, wo keine Bewegung des Schnees oder Firns stattgefunden haben konnte (Abb. 2).

Die hierbei erzielten Ergebnisse lassen sich im folgenden zusammenfassen:

1. Jeder durch normale Sedimentation entstandene Schneekörper läßt deutliche Schichtung erkennen.

¹⁾ Zeitschr. für Gletscherkunde, Bd. XI, 1920, Heft 4/5, S. 156. Es handelt sich dabei um einen Kriegsstollen durch die Firnkuppe des Ortler-Vorgipfels (3872 m), welche nach v. Klebelsbergs Ansicht aller Wahrscheinlichkeit nach als geringmächtiger, wenig bewegter Gipfel- oder Plateaufirn (dem obersten Ortlerplateau angehörig) einer gut haftbaren Felsfläche aufliegt.

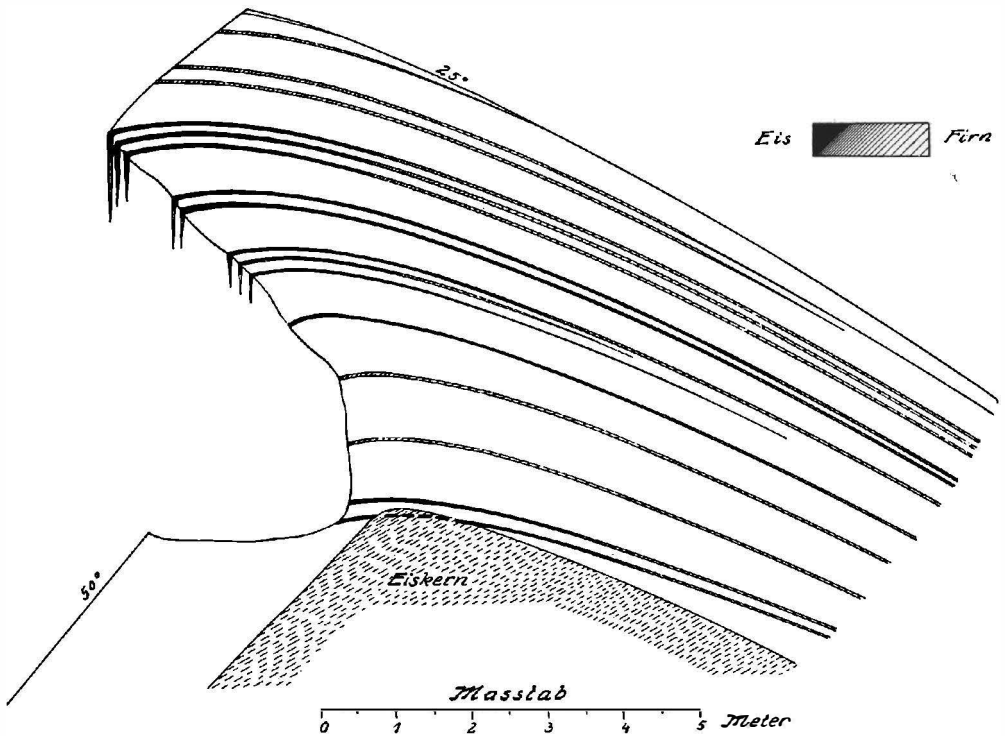


Abb. 2. Profil einer Dauerwächte am Kaundlgrat (Wiesbachhorn)

Die Gesamtwächte baut sich aus einer Reihe von einzelnen Druckwächten auf, die durch mehr oder minder starke ausgeprägte Eislagen voneinander getrennt sind. Die nach und nach verdichteten Eislagen stellen undurchlässige Schichten dar, über denen sich eindringendes Sickerwasser staut. An jenen Stellen, wo das Schmelzwasser ins Freie tritt, zeigt sich daher reichliche Eiszapfenbildung

2. Die Schichtung ist besonders ausgeprägt, wenn aus verschiedenen Ursachen Schneelagen abweichender Konsistenz übereinander geschichtet worden sind (z. B. normal sedimentierter Schnee und umgelagerter windgepreßter Schnee, s. Abb. 4).
3. Die Schichten sind vielfach durch eine schmale Lage dichten Firnschnees, oft sogar durch Eislagen getrennt (s. Abb. 2). (Über die Entstehung dieser Eislagen siehe unten!)
4. Diese Firn- bzw. Eislagen zeigen nicht selten mehr oder minder starke flächig durchgehende Verschmutzung. Hin und wieder stellen sie ausgesprochene Schmutzschichten dar.
5. Die verschiedenartigen Schichten und Eislagen behalten auch bei Druckzunahme in der Tiefe gewisse Struktur- und Dichteunterschiede bei.

2. Wasserbewegung im Firn in Zusammenhang mit der Entstehung von Eislagen

Die schon durch die abschnittsweise Sedimentation bedingte Schichtung im Firn wird also nach obigen Ergebnissen noch verstärkt: einerseits durch die in jeder Zwischenperiode erfolgende Bildung von Krusten und Staublagen, ander-

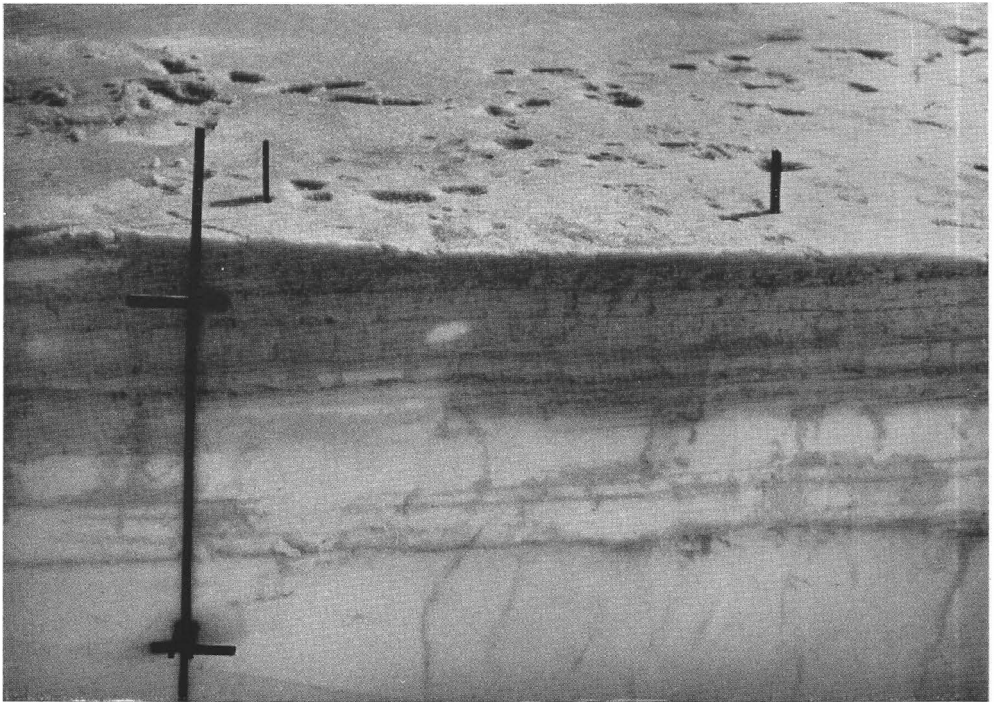


Abb. 3. Schneefärbungsversuch, zur Veranschaulichung der Wasserbewegung im Firn. Das an der Oberfläche durch äußere Einflüsse entstehende Schmelzwasser wurde durch Aufbringen von Anilinfarbstoff in Pulverform gefärbt. Es zeigt sich im Schnitt, daß das Schmelzwasser durch Lockerzonen in den Firnschnee eindringt und hierauf den Trennungsf lächen der einzelnen Schichten folgt. Darüber oder darunter liegende feinkörnige Schneeschichten werden von dieser wasserführenden Lage aus in starkem Maße infiltriert

seits durch die z. T. nachträgliche intrasedimentäre Entstehung von Firn- und Eislagen.

Die Beobachtungen, die insbesondere an warmen Tagen an den Profilaufschlüssen gemacht wurden, ließen die Tatsache erkennen, daß mit der Entstehung dieser Eislagen die Wasserbewegung im Schnee und Firn im engsten Zusammenhang steht. Um diese Wasserbewegung deutlich erkennbar zu machen, wurde das an der Schneeoberfläche infolge Sonnenstrahlung und anderer Einwirkungen entstehende Sickerwasser durch Aufbringen von pulverigem Anilinfarbstoff gefärbt und das Vordringen der Färbungszonen im Firn beobachtet. Es wurde mit diesen Färbungsversuchen erstmals der Weg angegeben und eine Methode gezeigt, die es ermöglicht, die bis jetzt im Firn nie verfolgte Wasserbewegung festzustellen. Hierbei ergab sich folgendes: Das an der Oberfläche gebildete Schmelzwasser dringt durch Lockerzonen in den Firn ein oder sickert allgemein — wie durch Sand — in die Tiefe, bis es auf die in Sedimentationspausen durch Schmelz- oder Windwirkung (Harst) umgebildete Oberfläche einer tiefer liegenden Schicht trifft. Je nach der Dichte dieser Schicht sickert das Wasser auf ihr oder in ihren Hohlräumen in der Gefällsrichtung weiter, wobei die darüber oder darunter liegenden feinkörnigen Schneelagen durch begerige kapillare Aufsaugung in starkem Maße infiltriert werden (Abb. 3). Auf diese Weise entstehen im dichten feinkörnigen Schnee wassergesättigte Lagen, die beim Ausfrieren fast reines blaues Eis ergeben. Es scheint also, als ob schon

im Firngebiet durch Wasseraufsaugung eine Art von — die Schichtung verstärkenden und ihr parallel verlaufenden — Blaublättern vorgebildet würde. Ob und wie dieselben mit den in tieferen Gletscherregionen (Gletscherstrom) erscheinenden Blaublättern zusammenhängen, ist noch festzustellen.

Über die Geschwindigkeit der Wasserbewegung innerhalb der Schneeschichten konnten bis jetzt anlässlich von Färbungsversuchen verschiedene Beobachtungen gemacht werden. Sie ist anscheinend abhängig von der Neigung der Schichten, der Porengröße der leitenden Firnschicht und dem kapillaren Aufsaugungsvermögen (Dichte) sowie der Mächtigkeit der feinkörnigen Schicht. Bisher wurden folgende Werte festgestellt.

Mittlere Neigung der wasserführenden Schicht	Korngröße der wasserführenden Schicht	Beobachtungszeit in Stunden	Fortschritt der Wasserbewegung in Meter	Meteorologische Angaben	Geschwindigkeit in Metern pro Stunde
7°	2 mm	3	2,5	Intensive Sonnenstrahlung	0,83
10°	1—2 mm	3	1,6	— —	0,50
15°	—	5	3,5	— —	0,70
20°	—	3/4	1,0	Leichter Nebel, Strahlungswärme	1,33
25°	2 mm	3	8,0	Intensive Sonnenstrahlung	2,66
30°	1 mm	13	18,0	Temp. zwischen —4° u. +3°, Nebel	1,00

Wenn auch diese Tabelle sich mangels eines genügenden Beobachtungsmaterials nicht zur Auswertung eignet, so zeigt sie doch die ungefähren Zusammenhänge und gibt ein angenähertes Bild von den Geschwindigkeiten, die bei der Wasserbewegung im Firn im allgemeinen auftreten. Zur exakten Erfassung der oben angedeuteten Beziehungen wäre ein reiches Beobachtungsmaterial vonnöten, das nur in mehrjähriger Arbeit zu beschaffen wäre.

3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie jedes andere Sediment weist also auch der Schnee ausgeprägte Schichtenbildung auf. Diese Firnschichtung auf Bewegungserscheinungen zurückführen zu wollen, widerspricht allen tatsächlichen Beobachtungen.

Rein örtlich (z. B. an den Steilrändern von Gletscherbecken) kann naturgemäß auch eine nicht durch Sedimentation, sondern durch Lawinen hervorgerufene Übergusschichtung stattfinden (vgl. Riffböschungen). Das von diesen Erscheinungen eingenommene Areal ist aber verschwindend klein gegenüber dem der regelmäßigen Schichtung in den Firnbecken und auf den Firnhochflächen.

Bei längeren Pausen in der Ablagerung wird häufig fremdartiges Material in Gestalt von Staub und Schmutzlagen über weite Flächen hin gebreitet und durch Auflagerung von Neuschneesichten zwischengeschichtet. Örtliche Staubzufuhr erfolgt von ausgeaperten Luvhängen (Windausaperung); sie wird be-

sonders bemerkbar sein, wenn diese Hänge aus leicht verwitterbarem Material bestehen. Staub kann aber auch in großen Mengen weit hergetrieben sein und weite Areale der Firnbecken sowie Hochflächen und Gipfelgebiete bedecken¹⁾.

Auch für die normale Schne-Ernährung der Firnbecken spielt der Wind als Zubringer eine überaus wichtige Rolle. Luvhänge werden freigeblasen; Gipfelgebiete durch Wind ausgeapert und in den Leegebieten sowie in den Kesseln und Mulden erfolgt stärkste Anhäufung (vgl. Karfrage, sowie das durch diese Zufuhrart bedingte, örtliche Vorstoßen von Gletschern, deren Firnregionen Lee-Sammelgebiete sind, usw.).

Modifiziert wird die Schichtbildung durch die als Folge der Wasserinfiltration mit nachfolgendem Ausfrieren innerhalb der Schichtkomplexe entstehenden Eisblätter (s. oben).

Die Wasserbewegung im Firn stellt ein Analogon zur Grundwasserbewegung dar. Das Schmelzwasser sickert im allgemeinen nicht sofort auf den Grund, sondern wird in erster Linie den Schichten folgend bergab geleitet (also: Wasser-„Stockwerke“ auch im Schnee!).

Neben der normalen Sedimentation finden beim Schnee außerdem Umlagerungen und anderweitige Beeinflussungen durch Wind statt, die gewisse Analogien zu den Erscheinungen bei der Sandbewegung in Wüsten und Steppen ergeben.

Von welcher Bedeutung die Schichtungsfrage für die Wächten und Lawinenbildung ist, soll in folgendem gezeigt werden.

II. Wä c h t e n

1. Vorbemerkung

Die bisher über das Wächtenproblem vorhandene Literatur behandelt die Frage nur außerordentlich dürftig. In früheren Jahren war man allgemein der Meinung, daß für die Wächtenbildung der Wind die einzig maßgebende Rolle spielt. Marcell Kurz war der erste, der die Bergform in die Betrachtung hereinzog²⁾ und ihr einen wesentlichen Einfluß auf die Orientierung der Wächten zuerkannte. Was jedoch bisher noch keine Beachtung fand, das sind die der Wächtenbildung zugrunde liegenden aerodynamischen Gesetze. Um diese zu ermitteln, mußte die innere Struktur der Wächten studiert werden.

Es wurden zu diesem Zweck in den Jahren 1926 und 1927 Grabungen zur Feststellung von exakten Profilen verschiedener Wächtenarten vorgenommen und zwar in folgenden Gebieten: Hornisgrinde (Schwarzwald), Spitzmeilengebiet (Flumser Berge), Wiesbachhorn (Tauern), Jungfraugebiet (Berner Oberland).

2. Untersuchungsmethodik

Aus den einleitenden Worten ergibt sich die Methodik der Untersuchung von selbst. Es handelte sich darum, Profile durch Wächten zu graben,

¹⁾ Ein typisches Beispiel derartiger Staubablagerungen konnte in den letzten April- und ersten Maitagen des Jahres 1926 in weiten Gebieten der Hohen Tauern und der Hochalmgruppe beobachtet werden. Nach tagelangem intensivem Föhn waren ausgedehnte Gletschergebiete von einem feinen rötlichen Staub bedeckt, der das Schilaufen fast zur Unmöglichkeit machte.

²⁾ „Les corniches de neige et leur formation“, *Echo des Alpes* 1919, S. 65.

um einen Einblick in die innere Gestaltung derselben zu erhalten. Die an der Schnittfläche beobachteten Schichten wurden nach Ordinaten und Abszissen aufgenommen und ihr Verlauf, sowie Einzelheiten ihrer Ausbildung in Handskizzen festgelegt. Die Oberflächengestaltung und -beschaffenheit der verschiedenen Lagen wurde durch Abstechen und Ablösen der darüberliegenden Schichten bestimmt und ihre Dichte durch Schneeprobentnahmen ermittelt.

3. Beobachtungen

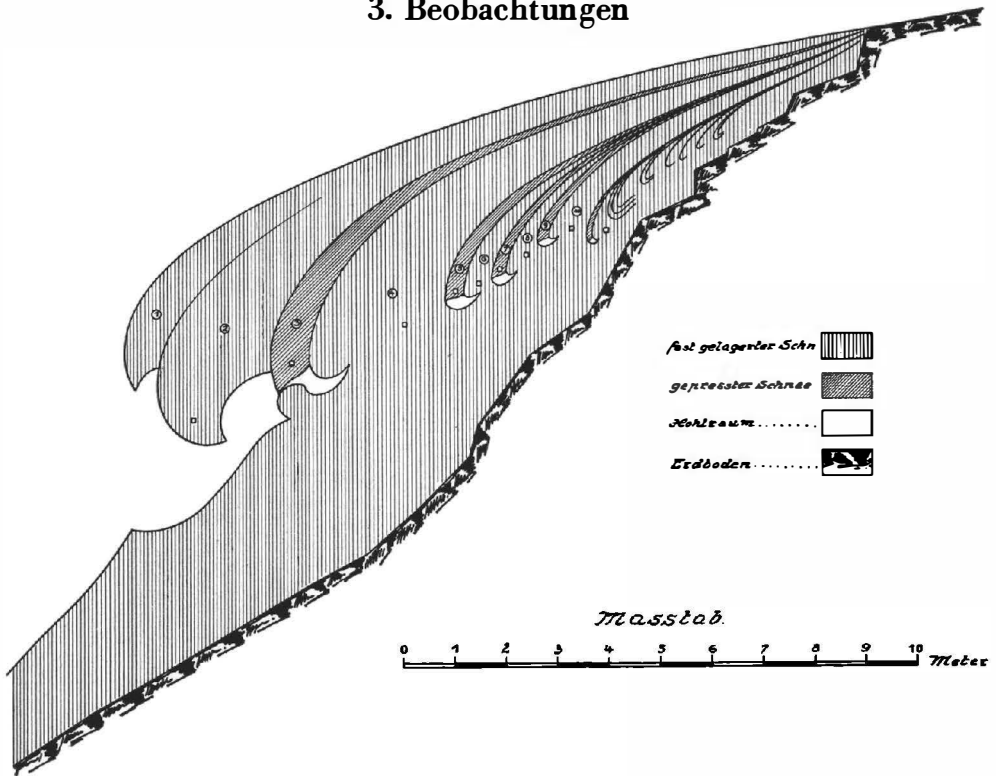


Abb. 4. Profil einer Winterwächte bei der Spitzmeilenhütte

Die Wächte (fallende Plateauwächte) ist aus einer Reihe von einzelnen Sog- und Druckwächten gebildet. Die Wächtenform (starke eingerollte Spitze) ist bestimmt durch das Vorherrschen der Sogwächten. Unter jeder Druckwächte ist nach stattgehabter Senkung ein kleiner dreieckiger Hohlraum erhalten geblieben. (Über dessen Entstehung siehe Abb. 11)

Auf Grund der Profilgrabungen ergaben sich folgende Tatsachen (Abb. 4):

1. Jede Wächte besteht aus einer mehr oder minder großen Zahl übereinander gelagerter Einzelwächten, die im Querschnitt gesehen sich von der Wurzel nach der Stirnseite zu fächerförmig durch den ganzen Wächtenkörper ausbreiten.
2. Unter den Einzelwächten lassen sich zweierlei Arten unterscheiden, die sich unter Umständen in stetem Wechsel überlagern können. Die eine Art von Wächten besteht aus (von stärkeren sekundären Veränderungsvorgängen freiem) mäßig dichtem Schnee von bläulich-weißer Farbe, die andere Art aus sehr dichtem Schnee von stumpfer grauweißer Färbung. Die weniger dichten Schichten sind von größerer Mächtigkeit als die dichten.

3. Sofern die zweierlei Wächtenarten sich in steter Folge ablösen, wechselt auch das spezifische Gewicht in stetem Steigen und Fallen zwischen den verschiedenen Schichten, wobei es gleichzeitig innerhalb gleichartiger Schichten von der Wächtenoberfläche gegen die Unterlage hin zunimmt. Diese Pressung der bodenseitigen Schichten durch die Schneeauflast bedingt eine allmähliche Angleichung der spezifischen Gewichte, so daß die Unterschiede zwischen den einzelnen Lagen in der Tiefe nicht mehr so groß sind wie an der Wächtenoberseite. Die Schneedichtebestimmungen ergaben die folgenden Werte (s. Abb. 4):

Lage Nr.	Spez. Gewichte in den mäßig dichten Schichten	Spez. Gewichte in den dichten Schichten
1 und 2	0,220	
3		0,420
4	0,352	
5		0,466
6	0,400	
7		0,480
8	0,425	
9		0,490
10	0,440	
11		0,500
12	0,450	

Aus der Tabelle ist zu ersehen, in welchem ungleich höherem Maße die lockeren Lagen durch die Schneeauflast eine Dichtung erfahren, als die schon von Anfang an gefestigten Schichten.

4. Auffallende Unterschiede lassen sich in der Ausbildung der Wächtenstirnseiten feststellen. Während die mäßig dichten Wächten durch eine gleichmäßig gerundete, mehr oder minder starke Einrollung ihren Abschluß finden (sofern sie nicht nachträglich durch Abbruch verändert wurden), setzt die zweite Art von Wächten unvermittelt in einer leicht geschwungenen Fläche ab. Eine regelrechte Einrollung findet nicht statt, sondern lediglich eine stärkere Krümmung an der Stirnseite infolge nachträglicher Senkung.

4. Schlußfolgerungen

Diese Beobachtungen berechtigen zu dem Rückschluß, daß am Zustandekommen so verschiedenartig gebauter Einzelgebilde auch verschiedene physikalische Vorgänge Anteil haben müssen und daß diese Vorgänge vielfach in stetem Wechsel einander ablösen. Während die mäßig dichte Wächte ihre Entstehung den Schneeablagerungen in dem zwischen Stromlinien und Sogwalze vorhandenen toten Raum verdankt (Sogwächten), entsteht die dichtgelagerte Wächte durch Schneeablagerung infolge Druckwirkung (Druckwächten). Regeneration spielt in beiden Fällen eine wesentliche Rolle.

Der Vorgang der Wächtenbildung dürfte sich dabei etwa wie folgt abspielen:

a) SOGWÄCHTEN

An einem vom Wind bestrichenen Gratrücken ergeben sich die folgenden aerodynamischen Verhältnisse: Die Luftströmung stößt gegen die nach Luv ge-

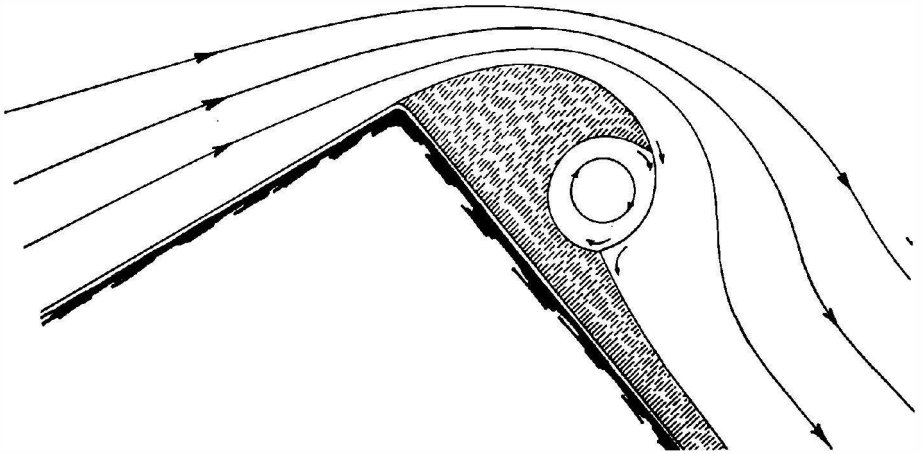


Abb. 5. Entstehung der Sogwächte (Stromlinienbild)

wandte Flanke des Grates, übt auf dieselbe einen Druck aus und wird durch den Gegendruck des Hanges abgelenkt. Sie streicht längs des Hanges unter Mitführung von Schneeteilchen hoch, überströmt den Kamm und fällt jenseits unter Bildung einer Sogwalze¹⁾ wieder ab. Auf der Luvseite findet eine Zusammenschnürung der Stromlinien statt, an der Leeseite eine Ausbreitung. Im ersten Fall wird dadurch eine Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit und somit Erhöhung der Transportfähigkeit bedingt, im zweiten Fall eine Verminderung beider. Lose Teilchen, welche an der Luvseite lagern, werden deshalb durch die Strömung mitgenommen und auf der Leeseite zum Teil im toten Raum zwischen Stromlinien und Sogwalze einerseits und leeseitigem Steilhang andererseits abgelagert. Dieser Raum stellt die Grundform der Sogwächten dar (Abb. 5).

b) DRUCKWÄCHTEN

Ist durch fortschreitende Vergrößerung der Sogwächte eine endgültige Angleichung an die Stromlinienform erzielt, so sind die Voraussetzungen für die

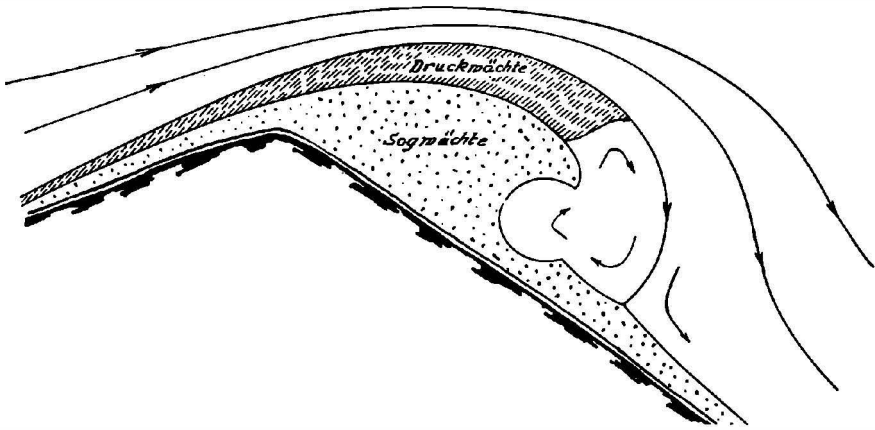


Abb. 6. Überlagerung einer Sogwächte durch eine Druckwächte (Stromlinienbild)

¹⁾ Als „Walze“ wird in der Aero- und Hydrodynamik eine Drehbewegung mit stehender Achse bezeichnet, im Gegensatz zum Wirbel, dessen Achse sich bewegt (Wirbelwindel).

Wirkung der Windreibung auf der Oberfläche gegeben. Die vom Winde mitgeführten Schneeteilchen treiben über die Schneeoberfläche, reiben sich daselbst und werden gegen andere Schneeteilchen der Unterlage angedrückt bzw. angeschlagen¹⁾. Sie verhaken sich mit diesen und bleiben haften.

Die auf diese Weise entstehende Schneelage weist große Dichte und Festigkeit auf. Infolgedessen kann auch ihre Stirnseite von der Sogwalze nicht in merklicher Weise modelliert werden. Sie weist deshalb auch nicht die charakteristische Hohlkehle der Sogwächten auf, sondern schließt mit einer leicht geschwungenen Linie ab (Abb. 6).

Die Ablagerung durch Winddruck schreitet so lange fort, bis mit wachsender Dicke der Schicht die Angriffskraft des Windes größer wird als die Haftfestigkeit des Schnees. Ist dieses Stadium erreicht, so hat die Wächtenbildung ihr vorläufiges Ende gefunden.

5. Beziehung zwischen Wächtenform und Windstärke

Die Stromlinienform und somit die Wächtenform ist einerseits eine Funktion der kinematischen Zähigkeit der Luft (wobei unter kinematischer Zähigkeit der Quotient $\frac{\text{Zähigkeit}}{\text{Dichte}}$ verstanden wird), andererseits eine solche der Windgeschwindigkeit²⁾.

Die „kinematische Zähigkeit“ stellt einen unveränderlichen spezifischen Wert dar. Je größer dieser Wert ist, desto mehr haftet die Flüssigkeit bzw. das Gas am Widerstand bietenden Körper, desto mehr paßt sich die Stromlinie der Form des Körpers an; je geringer der Wert ist, desto schlanker verlaufen die Stromlinien. (Für Luft ist diese kinematische Zähigkeit beispielsweise größer als für Wasser, weshalb die Stromlinien in Luft unter gleichen Bedingungen eine stärkere Ablenkung erfahren als im Wasser).

Die Wächtenform wird durch die „kinematische Zähigkeit“ in stets gleichbleibender Weise beeinflusst.

Es interessiert nun die weitere Frage: Inwieweit ist die Wächtenform abhängig von der im Entstehungsstadium herrschenden Windgeschwindigkeit? Eine solche Abhängigkeit scheint durch die Tatsache gegeben zu sein, daß die Stromlinien schlanker werden bei zunehmender Windgeschwindigkeit. Da nun nie eine stets gleichbleibende Windgeschwindigkeit anzunehmen ist, so müßte vermutet werden, daß bei der Bildung der Wächten stets wechselnde Einflüsse maßgebend seien. Das ist jedoch bei weitem nicht in dem Maße der Fall als es im ersten Augenblick scheinen möchte; denn die geringen und mittleren Windgeschwindigkeiten kommen für die Wächtenbildung überhaupt nicht in Frage; dieselbe setzt erst bei stürmischem Wetter ein. Der Variationsbereich der in Betracht kommenden Windstärken (der „wächtenbildenden“ Windstärken) ist hierdurch schon ziemlich beschränkt. Schwankungen innerhalb dieses Bereiches werden selten solche Ausmaße annehmen, daß dadurch Unstetigkeiten im Verlauf der Wächtenbildung eintreten werden.

¹⁾ Es kann sich hier natürlich nicht um eine aerodynamische Druckwirkung der bewegten Luftmassen auf die Unterlage handeln, welche bei der Strömung über eine konvex gekrümmte Fläche unmöglich wäre, sondern nur um eine dynamische Druckwirkung der bewegten Schneeteilchen gegen die ruhenden.

²⁾ Siehe Lanchester, Aerodynamik, S. 27 und 30. Leipzig und Berlin 1909.

6. Gratwächten — Plateauwächten

Die bisherigen Erörterungen über die Wächtenbildung wurden unter Zugrundelegung von *Gratwächten* gepflogen. Gratwächten sind aus aerodynamischen Gründen entweder aufsteigende oder höchstens waagrecht über die Steilflanke hinaus gebaute Gebilde.

Anders verhält es sich mit jenen Wächten, die am Rande von Hochflächen zur Entstehung kommen (*Plateauwächten*). Hier ist es durch die Form des Geländes bedingt, daß diese Wächten von vornherein eine fallende Tendenz aufweisen. Das Prinzip der Wächtenbildung ist hier naturgemäß dasselbe wie am Grat. Der Wind fegt über die Hochfläche (Luvhang) gegen den Steilabbruch derselben. Hier breitet sich die Luftströmung unter Verringerung der Geschwindigkeit aus. Die Stromlinien sinken ab und bilden zwischen sich und dem Steilhang direkt unter der Kante des Abbruchs eine Sogwalze (Abb. 7). Die Wächtenbildung schreitet analog fort wie bei Gratwächten. (Ein charakteristisches Musterbeispiel einer Plateauwächte ist das in Abb. 4 wiedergegebene Profil.)

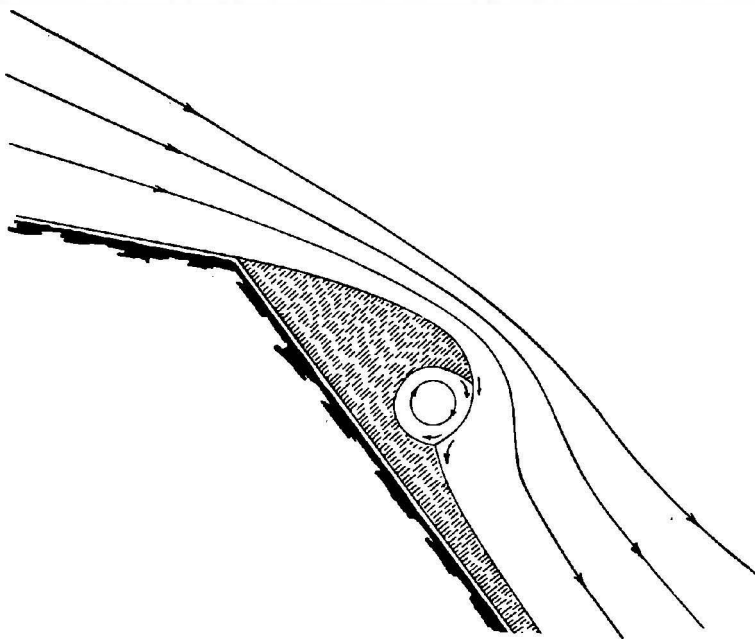


Abb. 7. Entstehung einer fallenden Plateauwächte (Stromlinienbild)

7. Gegenböschung

Die an der Wächte nicht zur Ablagerung gelangten Schneeteilchen werden auf der Gegenböschung sedimentiert. Die Ablagerungen sind naturgemäß am mächtigsten dicht unter der Wächte und keilen nach unten hin aus. (Das Maximum der Schüttung liegt da, wo die vom vordersten Wächtensaum sich ablösende Stromlinie die Gegenböschung trifft, s. Abb. 5.) Um u. a. auch den Schüttungsvorgang der Gegenböschung deutlich ersichtlich zu machen, wurden luvwärts von einer Wächte bei Station Eigergletscher Konfetti dicht über dem Boden in den Wind gestreut und die Bewegung und Ablagerung derselben beobachtet. Außer Anlagerung am Wächtendach ergab sich stärkere Schüttung der Konfetti am obersten Ende der Gegenböschung dicht unter der Wächte (s. Abb. 8).



Abb. 8. Konfettiversuch zur Sichtbarmachung des Schüttungsvorganges der Gegenböschung
 Oberhalb einer Wächte wurden Konfetti auf den Schnee gestreut und dem Winde überlassen. Neben Ablagerungen an der Wächtenoberfläche ergab sich stärkste Schüttung unter dem Wächtenüberhang. Es ist dies nach dem Stromlinienbild Abb. 5 jene Stelle, wo die unterste, sich vom Wächtedach ablösende Stromlinie die Gegenböschung trifft. Konfetti bzw. Schneeteilchen, die in höhere Schichten der bewegten Luftmassen emporgewirbelt wurden, wurden entsprechend weiter hangabwärts geführt. Die stärkste Schüttung wird aber immer unter der Wächte erfolgen, so daß die Schneelagen nach unten hin auskeilen

Die fortschreitende Schüttung der Gegenböschung bedingt eine fortschreitende Erhöhung der Hangneigung, die schließlich in der Haftfestigkeit der einzelnen Schneeschichten aufeinander ihre Grenze findet (s. auch S. 31 u. 32). Die Gegenböschungen dicht unter der Wächte sind infolge ihrer starken Neigung Zonen erhöhter Gefahr des Losbrechens von Schneeschichten. Dadurch ist beim Abbrechen von Wächten oder Wächteilen vielfach die Entwicklung ausgedehnter Lawinen bedingt. (Anlässlich der Lawinenstudien am First in den Flumser Bergen wurde durch eine künstlich zum Abbruch gebrachte Wächte von 100 cbm eine Lawine von 25 000 cbm losgelöst.)

Die Gegenböschung stellt die Basis dar, auf welcher sich die wachsende Wächte abstützt. Hat nun die Gegenböschung ihre Grenzneigung erreicht, so hat damit auch das Wachstum der Wächte ihr Ende gefunden, denn die sich vor-

bauenden Wächteile werden, da sie keine Unterstützung finden, alsbald abbrechen. Ist die Gegenböschung von vornherein steiler als der Grenzneigungswinkel, so ist damit der Wächtenbildung eine natürliche Grenze gesetzt.

Bei großen Windstärken werden Schneeteilchen des Luvhanges oft in beträchtliche Höhen emporgewirbelt. Sie sinken deshalb auch beim Überfliegen der Gratlinie nicht sofort hinter der Wächte auf die Gegenböschung nieder, sondern werden weit in die Leeseite hinausgeführt (an klaren, stürmischen Tagen sind diese vom Winde mitgeführten Schneeteilchen als „Schneefahnen“ an den Graten sichtbar). Durch derartige Schneumlagerungen können ganze Bergflanken oder Gletscherbecken mit beträchtlichen Tribschneemengen bedeckt werden. (Ein Beweis dafür ist z. B. das Vorrücken einzelner durch Windumlagerung ernährter Gletscher in Gebieten, in denen alle übrigen Gletscher zurückweichen.)

8. Setzen und Einrollen der Wächten

An jeder Wächte zeigt sich schon vom ersten Entstehungsstadium an eine ständig fortschreitende Senkung (und zugleich Verdichtung). Insbesondere die überragende Spitze (vor allem jene der Sogwächte) wird sich unter dem eigenen Gewicht stark abwärts und einwärts drehen, sie rollt sich ein. Dabei höht sie sich bei Schneetreiben gleichzeitig um das Maß auf, um das sie sich von der Stromlinienform ablöst. Da außerdem die schwache Strömung der Sogwalze nicht in der Lage ist, die herabsinkende Spitze der Wächte zu verändern und die „Grundform“ aufrecht zu erhalten, entsteht die den älteren Sogwächten eigene gleichmäßig gerundete Stirnseite (s. Abb. 9).

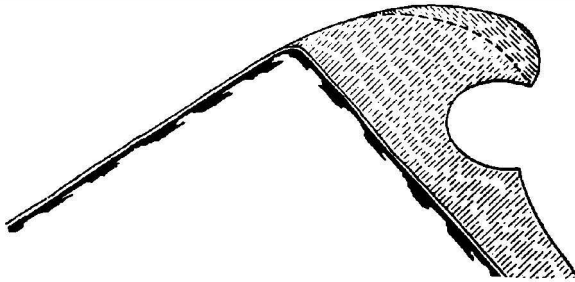


Abb. 9. Senkung der Wächten Spitze und gleichzeitige Aufhöhung durch neue Schneablagerungen

Dieses Einrollen wird unter Umständen durch Wasserinfiltration und die damit zusammenhängende Erhöhung des spezifischen Gewichtes und der Plastizität stark gefördert (Abb. 10). Die durch die Sogwalze freigehaltene Hohlkehle der Sogwächte wird durch die Einrollung beträchtlich verkleinert oder ganz ausgefüllt, wobei sich Wächtenvorderkante und Gegenböschung vollkommen ineinanderpressen.

Druckwächten allein würden sich infolge ihrer dichteren Konsistenz überhaupt nicht einrollen, sondern lediglich setzen. Kommen sie jedoch im Verbande mit Sogwächten vor, so müssen sie naturgemäß deren Bewegungen bis zu einem gewissen Grade mitmachen. Sie rollen sich jedoch weniger stark ein als die Sogwächten, da ihre Vorderkanten wesentlich höher liegen als jene der Sogwächten. Unter ihrer Stirnseite bleibt deshalb auch meist nach stattgehabter Senkung ein

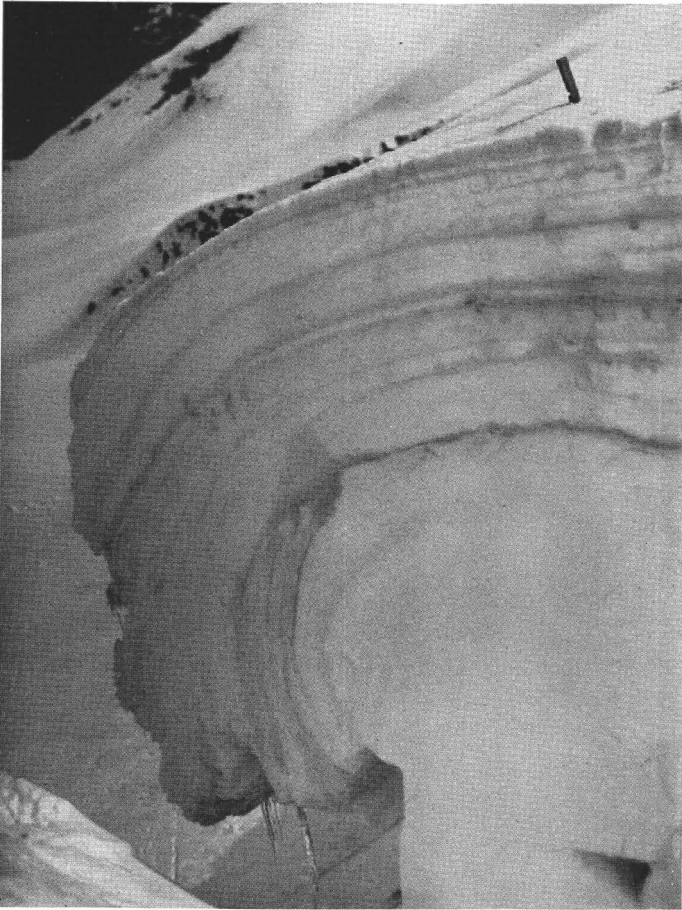


Abb. 10. Eingerollte Wächtenstirn (im Schnitt)

Die überragende Stirn hat sich unter dem eigenen Gewicht stark nach abwärts und einwärts gedreht. Gefördert wurde diese Einrollung durch Wasserinfiltration (Erhöhung des spezifischen Gewichtes und der Plastizität des Materials). Die Infiltration durch Schmelzwasser wurde durch Anilinfärbung deutlich sichtbar gemacht (auf der Abbildung klar zu erkennen). Eiszapfenbildung an jenen Stellen, wo wasserführende Lagen ins Freie treten

kleiner dreieckiger oder halbmondförmiger Hohlraum erhalten, der unter den Wächtenlagen 3, 5, 7, 9 der Abb. 4 deutlich zu erkennen ist. Abb. 11 zeigt den Vorgang der Einrollung.

Je größer die Zahl der übereinandergelagerten Einzelwächten ist, desto stärker werden die Stirnseiten der tiefer liegenden Wächtenlagen in die Gegenböschung gepreßt. Die Hohlräume können bei genügend großer Auflast unter Umständen gänzlich verschwinden.

Setzen und Einrollen der Wächte sind die Voraussetzungen für weiteres Wachstum, da sich erst dann wieder neue Ablagerungen auf den alten bilden können. Die neue Wächtenlage wird eine Druckwächte sein, wenn bei ihrer Bildung die Oberfläche des alten Wächtenkomplexes die Stromlinienform noch nicht unterschritten hat. Im anderen Falle entsteht eine Sogwächte.

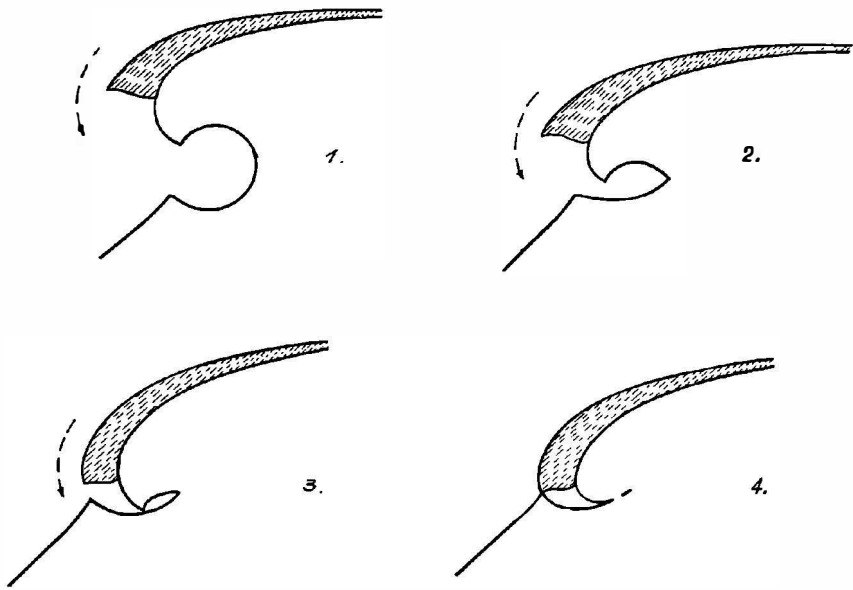


Abb. 11. Vorgang der Einrollung

Die Spitze der Sogwächte preßt sich in die Gegenböschung, so daß die Hohlkehle verschwindet. Die über der Sogwächte lagernde Druckwächte macht die Bewegungen der ersteren mit. Sie senkt sich jedoch nicht so tief wie die Spitze der Sogwächte, da ihre Vorderkante von Natur aus höher liegt. Unter ihrer Stirnseite bleibt deshalb meist ein kleiner dreieckiger Hohlraum frei

9. Zeitlicher Bestand von Wächten

Nach ihrem zeitlichen Vorkommen lassen sich zwei Wächtenarten unterscheiden, nämlich die zeitweiligen oder Winterwächten und die ständigen oder Dauerwächten.

a) WINTERWÄCHTEN

Sie haben ihre Existenz den Schneefällen des Winters zu verdanken. Ihr Entstehungsbereich ist vor allem die tiefere Region der Alpen (etwa unter 3000 m). In geringem Maße kommen sie auch in den Hochalpen neben den Dauerwächten vor, und zwar an Stellen, an denen nur unter den verstärkten Stürmen und Schneefällen des Winters eine Wächtenbildung möglich ist. Es liegt in der Natur der Winterwächten, daß sie kein sehr gefestigtes Gebilde darstellen. Sie erleiden dauernd Kompressionen und Senkungen, weshalb die ideale Strömungslinie häufig unterschritten wird. Dies bedingt bei Schneefall jeweils die Bildung von Sogwächten, welche sich in steter Folge (oft auch unter Zwischenschaltung von Druckwächten) überlagern. Die Wächtenform der Winterwächten ist also im wesentlichen bestimmt durch die „Sogwächten“ (Abb. 4, 10 und 12).

b) DAUERWÄCHTEN

Die Voraussetzungen für das Vorhandensein ständiger Wächten sind nur in Zonen über 3000 m gegeben. Die ursprünglichen Entstehungsvorgänge dieser Wächten sind dieselben wie bei den variablen Winterwächten. Durch die konstante Einwirkung von Wärme und Kälte, von Wind und Eigengewicht haben sich diese Wächten mit der Zeit derart gefestigt und verfirnt, daß Senkungserscheinungen kaum oder nur in geringem Maße auftreten. Die ideale Strömungs-



Abb. 12. Winterwächten an der Schindlerspitze

linie wird deshalb kaum je unterschritten (außer nach längeren Schönwetterperioden), weshalb die Voraussetzungen für die Bildung von Sogwächten nur selten gegeben sein werden. Aus diesem Grunde können Dauerwächten im wesentlichen nur der Entstehung von Druckwächten ihre Weiterentwicklung verdanken. Sie setzen sich aus einer großen Zahl übereinander gelagerter Druckwächten zusammen und weisen auch alle charakteristischen Merkmale derselben (Schneedichte, Ausbildung der Stirnseiten, keine Einrollung) auf (s. Abb. 13 und 14). Die Stirnkante baut sich je nach den orographischen Verhältnissen der Gratflanken mehr oder minder weit in die Leeseite hinaus und setzt dann unvermittelt in einer nach rückwärts gebogenen, vielfach gerippten Front (gekennzeichnet durch die Trennungsschichten der Einzelwächten) zur Gegenböschung ab. (Beim Studium von Dauerwächten ist zu beachten, daß deren Stirnseiten oft nicht mehr die ursprüngliche Wächtenform charakterisieren; dieselben können infolge Abschmelzen oder Abbrechen mannigfachen Änderungen unterliegen.)



Abb. 13. Dauerwächte am Gipfel des Gr. Wiesbachhorns

Das Bild zeigt die charakteristische Form der Dauerwächte, wie sie in Abb. 14 schematisch dargestellt ist (keine Einrollung; Ausbildung der Stirnseite als zurückspringende, leicht geschwungene Linie)

Wenn die Dauerwächten auch (wie schon ihr Name sagt) eine fortdauernde (oder doch wenigstens auf längere Zeiträume fortdauernde) sich immer wieder ergänzende Folge von Druckwächten darstellen, so müssen sie doch ursprünglich auf einer Reihe von Sogwächten entstanden sein. Diese Sogwächten müßten sich also theoretisch in den Kernen nachweisen lassen. Es ist jedoch zu bedenken, daß bei dem meist außerordentlich langen Bestand der Dauerwächten die alten Sogwächten immer mehr im Eiskern des Grates verschwinden (s. S. 38), womit dann meist jede Möglichkeit der Feststellung verloren ist. Anders verhält es sich bei relativ jungen Dauerwächten, die an Stelle der alten abgebrochenen entstanden sind. Hier bildet sich zunächst ein Sockel von Sogwächten, die dann mit Erreichung der Stromlinienform von Druckwächten abgelöst werden. Ist die Wächte noch von verhältnismäßig jungem Bestand, so lassen sich an Profilaufschlüssen noch die alten Sogwächten nachweisen. (Als Musterbeispiel diene das Wächtenprofil in Abb. 15.)

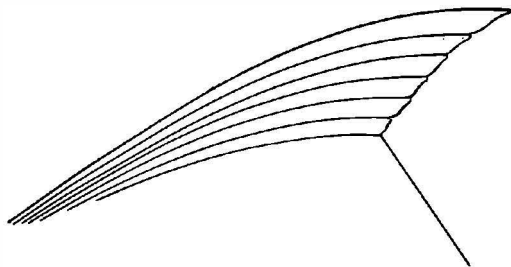


Abb. 14

Schema einer Dauerwächte, bestehend aus einer Folge übereinander gelagerter Druckwächten

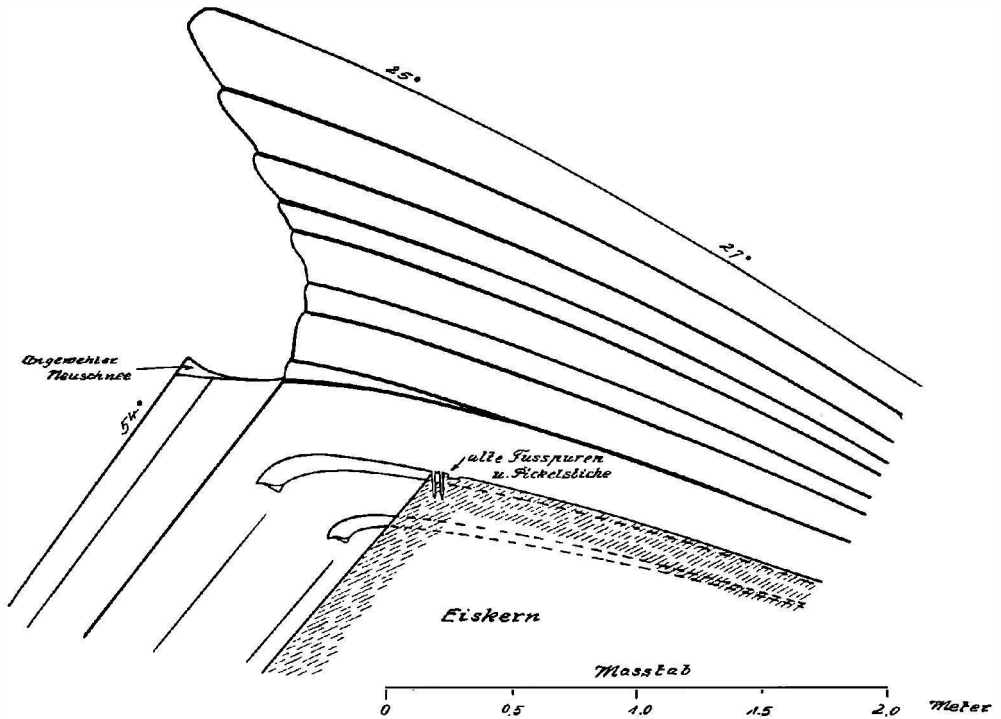


Abb. 15. Dauerwächte am Kaindlgrat (Wiesbachhorn) auf einem Sockel aller Sogwächten

10. Beziehung zwischen Bergform, Windrichtung und Wächtenbildung¹⁾

Richtung und Größe der Wächten sind einerseits eine Funktion der Bergmorphologie, andererseits eine solche der vorherrschenden Windrichtung²⁾ (welch letztere allerdings eine mehr untergeordnete Rolle spielt). Wirken beide Faktoren im positiven Sinne zusammen, so ergibt sich ein Maximum an Wächtenbildung, im anderen Fall ein Minimum. Die Morphologie des Felsgrates spielt insofern eine ausschlaggebende Rolle, als die Wächte die Tendenz zeigt, sich über der Steilflanke zu entwickeln. Um diese Erscheinung zu erklären, sei als Extremfall ein Grat mit einer horizontalen und einer vertikalen Flanke der Betrachtung unterzogen:

Kommt der Wind von der horizontalen Flanke, so strömt er mit ungeminderter Kraft über die Schneide. Durch die ihm innewohnende Energie führt er aus

¹⁾ Bis zum Jahre 1919 wurde allgemein die Irrlehre vertreten, die Wächtenbildung trete nur an der von der regelmäßigen Windrichtung abgewandten Bergflanke auf. Dieser Ansicht trat Marcel Kurz entgegen („Les corniches de neige et leur formation“, Écho des Alpes, 1919, S. 65), indem er an Hand eines reichen Beobachtungsmaterials bewies, daß die Wächten die Tendenz zeigen, sich über der jeweils steileren der beiden Gratflanken zu bilden.

²⁾ Merkwürdig ist es, daß in einem sonst so gute Beobachtungen enthaltenden Buche, wie dem von W. Young: „Schule der Berge“, die unhaltbare Ansicht vertreten wird, die Wächten wüchsen gegen den Wind. Dieser fundamentale Irrtum beruht vielleicht auf einer Verwechslung mit dem gegen den Wind wachsenden „Anraum“ bei Rauhreifbildung.

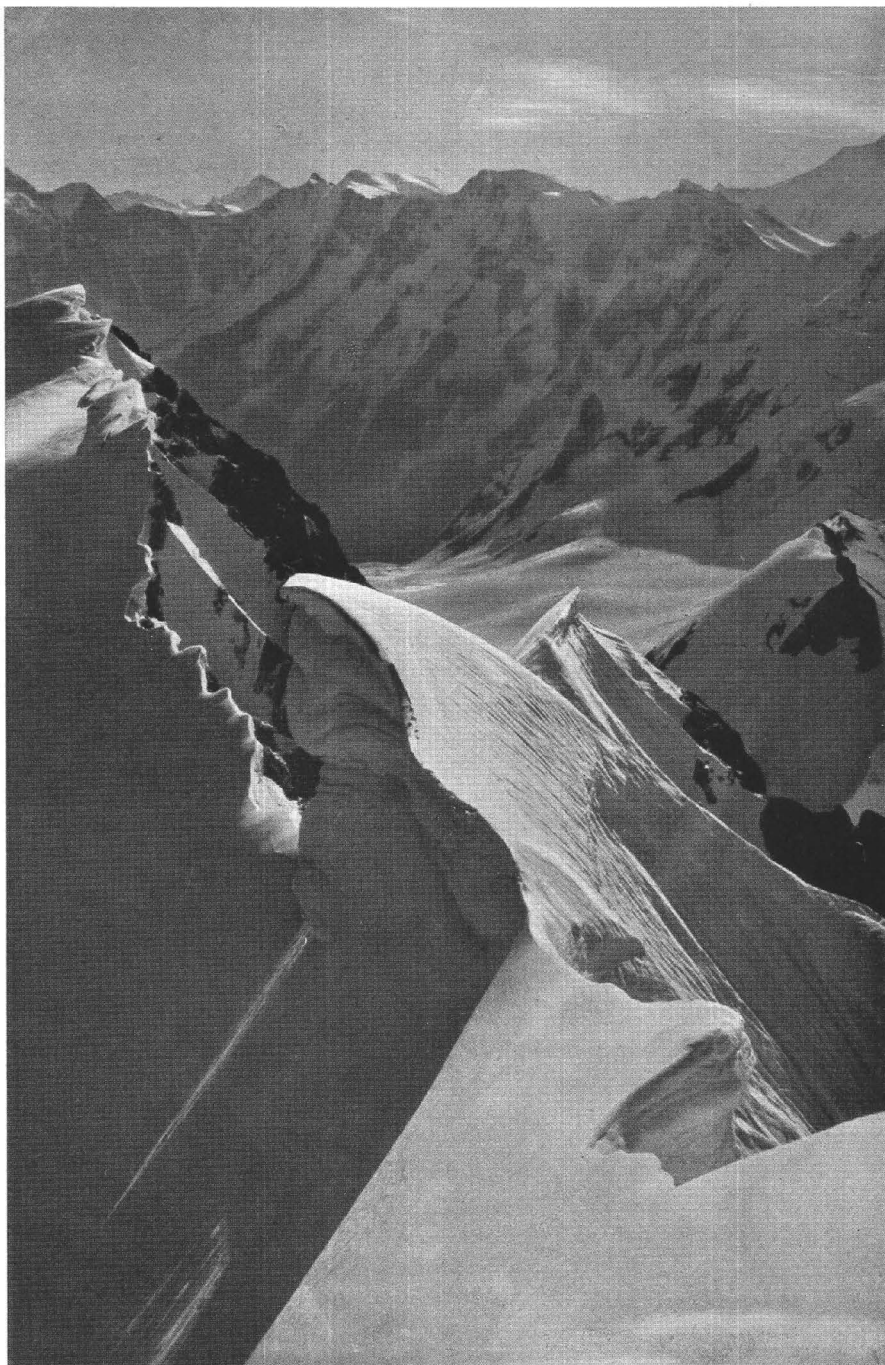


Abb. 16. Verbindungsgrat Weiße Frau—Morgenhorn (Bernser Oberland)
mit wechselseitiger Überwächtung

Die Wächte zeigt die Tendenz, sich über der Steiflanke zu entwickeln; eine Änderung der Wächtenrichtung läßt deshalb auf einen Wechsel der beiderseitigen Hangneigungen schließen. Bei beobachtbarem Wechsel in der Steilheit des Hanges ist andererseits Wechsel in der Wächtenbildung zu erwarten

der Luvseite Schneeteilchen mit sich und lagert sie als Wächte im toten Raum dicht hinter der Kammlinie ab.

Stößt hingegen der Wind gegen den senkrechten Steilabfall, so wird seine Energie auf der Luvseite zum größten Teil in turbulenten Luftbewegungen vernichtet. Die Luftströmung wird gezwungen, an der Wand emporzusteigen, wobei sie jedoch eine nennenswerte Transportfähigkeit nicht mehr besitzt. Vom Winde herangeführte Schneeteilchen können deshalb nicht nach Lee gelangen, sondern lagern sich luvseits am Fuße der Wand ab. Eine Wächtenbildung ist dadurch unmöglich.

Bei Beurteilung der Frage ist weiterhin die Tatsache zu berücksichtigen, daß die Luvhänge die Einzugsgebiete für den Schneetransport von Luv nach Lee darstellen. Da sich nun auf einem senkrechten oder nahezu senkrechten „Hang“ kaum nennenswerte Schneemengen sedimentieren können, so fehlt der von einem solchen „Hang“ kommenden Luftströmung auch das Einzugsgebiet, aus dem ein Schneetransport in Frage käme.

Analog, wenn auch nicht so extrem gelagert, sind die Verhältnisse bei einem Grat mit beiderseits abfallenden, jedoch verschieden steil geneigten Flanken. Kommt der Wind über die flache Flanke, so sind die Verhältnisse für die Wächtenbildung wesentlich günstiger, als wenn er von der Steilseite kommt, denn im letzten Falle geht der größte Teil der Windenergie durch turbulente Strömungen verloren, während der Rest nur durch stark geschwächte Strömung ohne ergiebige Einzugsgebiet den Grat überstreicht (s. Abb. 17 u. 18).

Als wächtenbildende Faktoren überwiegen demnach die über die flachere Gratflanke strömenden Winde; diese begünstigen die Bildung der Wächte über der Steiflanke¹⁾.

Mit dieser Feststellung findet auch die Erscheinung der vielfach beobachteten wechselseitigen Überwächung ihre Erklärung. Sie ist jeweils bedingt durch einen Wechsel in der Neigung der beiderseitigen Gratflanken (s. Abb. 16).

Um obige Theorie experimentell zu beweisen, wurden nach beigefügten Abbildungen 17 u. 18 zahlreiche künstliche Grate aus Lattengestell gefertigt. Sowie diese Grate dem Schneetreiben ausgesetzt wurden, zeigte sich alsbald an den mit ihrer Flachseite gegen den Wind gekehrten Graten der Ansatz von Wächtenbildung und die Schüttung größerer Schneemassen leeseits (Abb. 17). An den mit ihrer Steilseite gegen den Wind gekehrten Graten zeigte sich keine Spur von Wächtenbildung und ebensowenig Ansammlung von Treibschnee auf Lee. Auf der Luvseite hingegen bewiesen reichliche Schneemassen und ein größerer Kolk, daß der Wind sich hier totlief und seine Transportfähigkeit verlor (s. Abb. 18).

Es interessiert nun die Frage, bei welcher Neigung des Luvhanges der Übergang von der Kolkbildung luvseits zur Wächtenbildung leeseits eintritt. Um diese Grenzneigung zu ermitteln, wurde vom Verfasser im Frühjahr 1929 auf einer plateauartigen Terrasse am Hahnenkamm in den Kitzbüheler Bergen senkrecht zur herrschenden Windrichtung ein künstlicher Grat von 1,50 m Höhe aus Schnee aufgebaut, dessen luvseitige Böschung in der Längsrichtung von 30° auf 60° zunahm. Der Wechsel in der Hangneigung verteilte sich in allmählichem Übergang auf eine Länge von 10 m, so daß nicht angenommen werden kann, daß durch dieses Verwinden des Luvhanges eine Störung im Strömungsverlaufe

¹⁾ Diese Erwägungen finden sich in der Natur bestätigt: So ist der Lyskamm nach Süden überwächelt, Königsspitze und Grobvenediger nach Norden, Col de la Brenva und Wiesbachhorn nach Osten, Hochjochgrat nach Westen.

etwa durch Entstehung einer abgelenkten Luftbewegung längs des Luvhanges eingetreten ist. Der Leehang erhielt eine gleichmäßige Neigung von 45° . Nach einer Nacht mit Guxwetter (13. auf 14. März 1929) zeigte sich folgendes Bild:

Die Wächtenbildung und die leeseitigen Schneeablagerungen waren am stärksten bei der Neigung des Luvhanges von 30° . Mit zunehmender Hangneigung nahmen beide ab. Bei einer maximalen Neigung von 42° verschwand die Wächtenbildung.

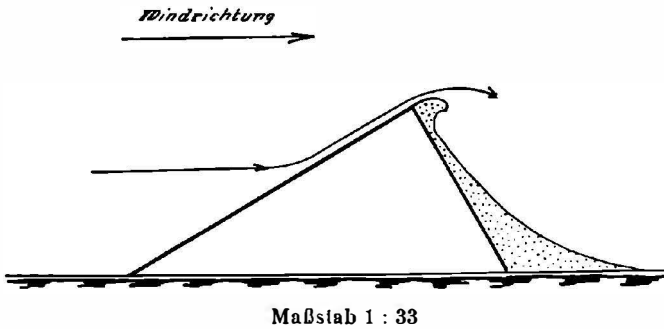


Abb. 17. Experimente mit künstlichen Graten zum Studium der Gesetze der Wächtenbildung:
Luvhang flach, Leehang steil

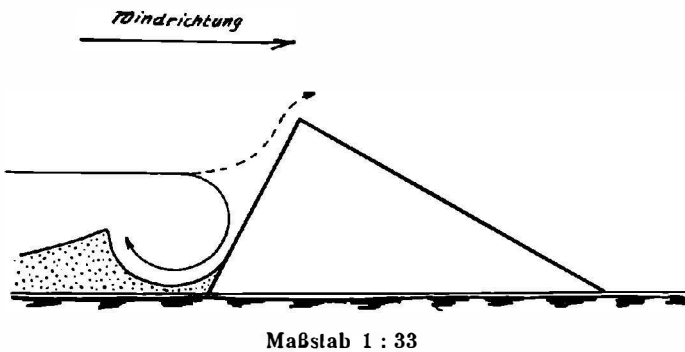


Abb. 18. Experimente mit künstlichen Graten zum Studium der Gesetze der Wächtenbildung:
Luvhang steil, Leehang flach

(In der Zone zwischen 42° und 60° wurde zwar noch etwas Schnee von Luv nach Lee gewirbelt, doch war die Energie der Luftströmung schon so geschwächt, daß keine Wächtenbildung mehr stattfinden konnte.)

Im Stauraum der Luvseite nahmen die Schneecablagerungen mit wachsender Neigung ständig zu. Bei 40° zeigten sich die ersten Ansätze einer Kolkbildung infolge der Stauwalze; bei 60° war der Kolk außerordentlich stark entwickelt, während die Schneeablagerungen davor ihre größte Mächtigkeit erreichten.

Die Grenze zwischen Kolk und Wächtenbildung ist also zwischen 40° und 42° zu suchen. Diese Feststellung stimmt ziemlich genau mit dem auf S. 36 gezeitigten Ergebnis aus der Untersuchung über die Intensität der Wächtenbildung

überein, wonach Wächten nur bis zu einer maximalen Neigung der luvseitigen Gratflanke von 43° auftreten.

Neben den durch die Bergmorphologie bedingten Einflüssen ist jedoch die Einwirkung der vorherrschenden Windrichtung nicht ganz zu vernachlässigen. Diese Einwirkung kommt um so mehr zur Geltung, je geringer der Unterschied in der Neigung der beiderseitigen Gratflanken ist. Es ist deshalb der Fall wohl möglich, daß die Summe der durch die vorherrschende Windrichtung bedingten häufigen aber kleinen Einzelwirkungen größer ist als die Summe der durch die Bergmorphologie bedingten, hin und wieder auftretenden größeren Kräfte. Auf jeden Fall wird jedoch die Wächtenbildung unter diesen Voraussetzungen eine geringe sein¹⁾.

11. Bruchebene

Von großem allgemeinem Interesse ist die Frage, nach welcher Ebene der Abbruch einer Wächte erfolgt, wie weit also die Gefahrzone in den Luvhang hineinreicht. Die luvseitige Bruchlinie wurde früher sowohl senkrecht über dem Wächtenfußpunkt liegend angenommen, als auch als Schnittlinie des verlängert gedachten Leehanges mit dem Luvhang. Beides ist unrichtig. Eine einfache Überlegung zeigt, daß der Abbruch nach der Ebene des geringsten Widerstandes, also an der Stelle erfolgen wird, an der die Bruchebene am schmalsten ist. Im Profil zeigt sich demnach die Bruchebene als Linie des kürzesten Abstandes vom Wächtenfußpunkt zum Luvhang (Abb. 19).

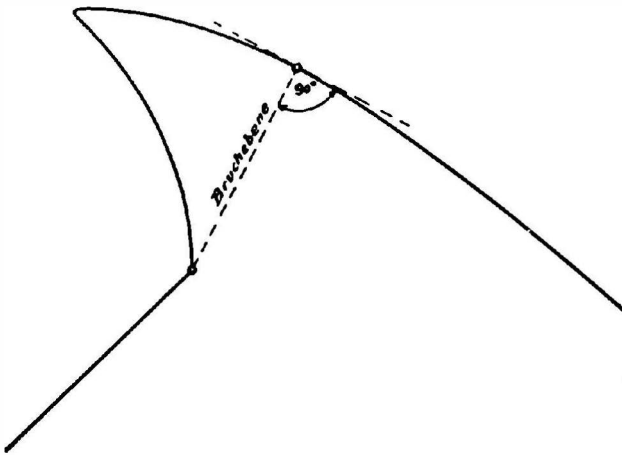


Abb. 19. Darstellung der Bruchebene von Wächten

12. Spaltenwächten

Die oben gebrachten Ausführungen über die Plateauwächten legen den Gedanken nahe, daß für die Entstehung von Spaltenwächten, also für das Über-

¹⁾ Ein Beispiel hierfür ist der Bianco grat. Die steilere Gratfläche fällt zum Tschiervagletscher ab, die weniger steile zum Morteratschgletscher. Trotzdem hängen die Wächten zum Morteratschgletscher über.

wegen von Gletscherspalten dieselben physikalischen Gesetze maßgebend sind. Um das Problem experimentell zu erforschen, wurden auf Plateaubenen im Schwarzwald (Hornisgrinde) und bei Station Eigergletscher Gräben im Schnee gezogen und der Vorgang der Spaltenverwehung beobachtet. Dabei zeigte sich, daß am luvseitigen Grabenrand eine Wächte entstand, die unter ständiger Vergrößerung sich allmählich vorschob. Die Schneeteilchen, die nicht an der Wächte haften blieben, kamen auf der Grabensohle zur Ablagerung. Der Prozeß der Wächtenbildung dauerte an, bis die Spalte vollkommen überbrückt war (siehe Abbildung 20).

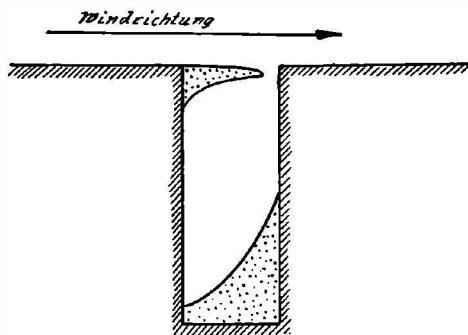


Abb. 20. Entstehung von Spaltenwächten
(Experiment)

Ist die Windrichtung häufigem Wechsel unterworfen, so ist es möglich, daß sich an beiden Spaltenrändern Wächten bilden, die einander entgegenwachsen.

Die schwächste Stelle der Brücke ist jeweils die Stelle, wo die Wächte an die Gegenseite anschließt, bzw. wo sich zwei einander entgegenwachsende Wächten berühren.

Der eben geschilderte Vorgang der Spaltenüberbrückung hat seine Richtigkeit bei genügender Breite der Spalten (etwa über 30 cm). An schmalen Spalten wurde hingegen bei heftigem Schneetreiben neben der Wächtenbildung am luvseitigen Rand auch ein Anraum am leeseitigen Rand beobachtet, der dadurch entsteht, daß Schneeteilchen über die Spalte hinweggetragen und am jenseitigen Rand angeschlagen werden, wo sie haften bleiben. Je schmaler eine Spalte wird, um so größere Bedeutung kommt für die Überbrückung derselben der Entstehung dieses Anraumes zu¹⁾.

13. Beziehung zwischen Hangneigung und Wächtenbildung

a) BEGRIFF DER GRENZNEIGUNG

Die aerodynamischen Vorgänge an den Graten der Berge haben eine Vergrößerung der Hangneigungen auf Luv wie auf Lee zur Folge. Diese Wirkung kommt in erster Linie am Leehang zur Geltung, da die vom Wind über den Luvhang geführten Schneeteilchen nur zum geringeren Teil am Wächtendach zur Ablage-

¹⁾ Aus Einzelbeobachtungen ergab sich, daß die Anraumwurzel stets schmaler ist wie die Wächtenwurzel. Ausgedehntes Beobachtungsmaterial steht noch aus.

rung kommen, zum größeren hingegen auf dem Leehang zur Schüttung gelangen. Da der Leehang gemäß dem Grundprinzip der Wächtenbildung die steilere der beiden Gratflanken darstellt, so wird hier die Schneeschüttung alsbald den Grad erreichen, der als der natürliche Böschungswinkel von Schnee (bzw. Eis) zu bezeichnen ist. Dieser Winkel wurde an einer Reihe von Wächtergraten der Hohen Tauern gemessen. Es ergaben sich hierbei als Maxima der Neigung dicht unter dem Wächterfußpunkt folgende Werte:

1. Profil I am Kaindlgrat	50 Grad
2. „ II „ „	54 „
3. „ III „ „	52 „
4. „ IV „ „	53 „
5. Gipfelwächte an der Glockerin	54 „
6. „ I am Wiesbachhorn	52 „
7. „ II „ „	51 „
8. Venedigerwächte	55 „

$$\text{Mittel: } \frac{421}{8} = 52 \text{ Grad } 37 \text{ Minuten}$$

Es zeigt sich demnach das Ergebnis: Die Neigung des Leehanges (wie überhaupt die Neigung eines jeden Firn- oder Eishanges) wird normalerweise über den Betrag von durchschnittlich $52\frac{1}{2}^{\circ}$ nicht hinausgehen. (Diese Neigung kann sich in kurzen Strecken je nach lokalen Verhältnissen auf 55 bis 60° steigern.)

Über diesen als „Grenzneigung“ zu bezeichnenden Wert findet kein Fallen des Schnees mehr statt. Die über die Gratschneide von luv nach lee getriebenen Schneeteilchen werden am Hang abgleiten und erst in den tieferen flacheren Partien bzw. in der Gletschermulde zur Ablagerung kommen.

Anders verhält sich die Sache am Luvhang. Hier macht sich eine Erhöhung der Hangneigung nur in den Gratnahen Partien, also in erster Linie am Wächterdach geltend, welches sich durch Schneeeablagerungen ständig aufhöht. Durch diese Aufhöhung wird ein Angleich an die steileren gratfernen Hangpartien erzielt. Die Neigung kann also im Maximum jene der nach unten anschließenden Hänge erreichen, sie kann jedoch dieselbe niemals überschreiten. Die Schneebewegungen und -umlagerungen üben also auf die Neigung des Luvhanges lediglich eine ausgleichende Wirkung aus (s. Abb. 14 und 15).

Dieser prinzipielle Unterschied zwischen Lee und Luv kommt am besten in Abbildungen 22—24 zum Ausdruck. Während die Leehänge in allen Abbildungen die ungefähre Grenzneigung zeigen, weisen die Luvhänge die verschiedensten Neigungsgrade auf.

b) INTENSITÄT (STÄRKE) DER WÄCHTENBILDUNG UND IHRE ABHÄNGIGKEIT VON DER NEIGUNG DES LUVHANGES

Zunächst einige Worte zur Erklärung des Begriffs „Intensität der Wächtenbildung“ (μ):

Bringt man den Leehang (unter Abschneiden der Wächterspitze) mit dem Luvhang zum Schnitt, so erhält man den ideellen First des Grates als Schnittlinie beider Flächen. Die durch die Schnittebene abgetrennte Wächte zeigt

sich im Profil als Dreieck mit zwei krummlinigen Seiten und einer geradlinigen Basis. Das Verhältnis $\mu = \frac{\text{Höhe}}{\text{Basis}}$ des Dreiecks stellt die Intensität der Wächtenbildung dar, das Maß der Vorkragung bezogen auf die Einheit der Wächtenbasis (s. Abb. 21). Der Wert μ gibt die Größe der für die Wächtenbildung günstigen Faktoren wieder.

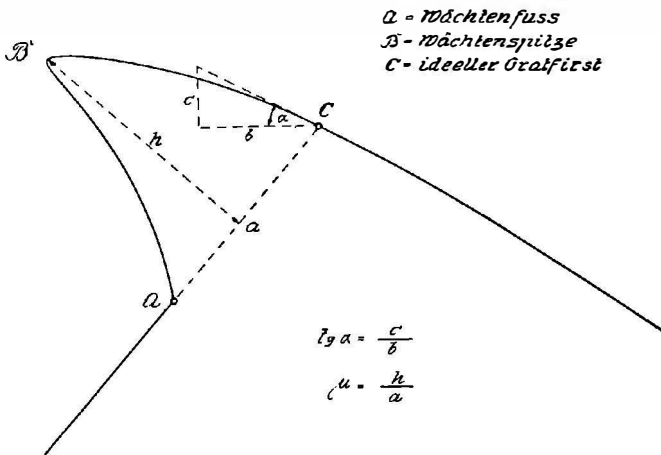


Abb. 21

Mit der Festlegung des Begriffes Intensität der Wächtenbildung wird zugleich die Frage aufgerollt: „Was ist als Wächte im wissenschaftlichen Sinn zu betrachten?“ Als Wächte im wissenschaftlichen Sinn ist der über die Verlängerung des Leehanges als Basis vorragende Bereich zu betrachten (nicht der über die durch den Fußpunkt der Wächte gezogene Vertikale vorragende Teil). Eine Wächte wissenschaftlich betrachtet braucht als nicht unbedingt ein überhängendes Gebilde darzustellen. Sie kann sich mit ihrer Vorderfront senkrecht, ja sogar zurückliegend ausbilden.

Da der Leehang eines jeden Grates durch den ständigen Schneetransport von Luv nach Lee automatisch die Grenzneigung von 50° bis 55° annehmen wird, so kann die Wächtenbildung im wesentlichen nur durch die Neigungsverhältnisse des Luvhanges beeinflusst werden. Eine geringe Rolle spielt jedenfalls noch die allgemeine Morphologie der Umgebung, doch wird sich deren Einwirkung nie exakt erfassen lassen.

Wenn sich bei der graphischen Darstellung die Beziehung zwischen Intensität der Wächtenbildung (μ) und Neigung des Luvhanges (ausgedrückt durch $\operatorname{tg} \alpha$) kleine Unstimmigkeiten ergeben, so beruht dies auf der Unmöglichkeit, alle störenden Beiwerte vollkommen aus der Untersuchung auszuschließen. Diese kleinen Fehlerquellen spielen jedoch für die Erkenntnis der Zusammenhänge keine Rolle.

Als die für die Untersuchung maßgebende Neigung des Luvhanges wurde jene gewählt, die senkrecht zum Streichen des ideellen Gratfirstes herrscht, also an jener Linie, in der die Verlängerung des Leehanges den Luvhang schneidet (in Abb. 21 Punkt C).

c) AUSWERTUNG DER MESSUNGSERGEBNISSE

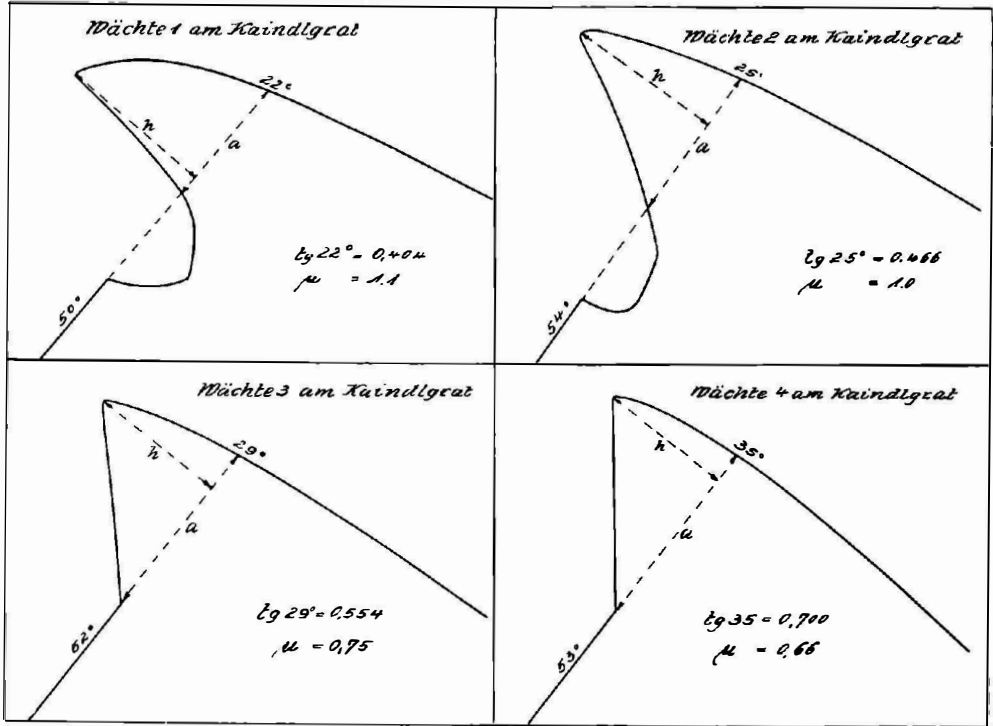


Abb. 22

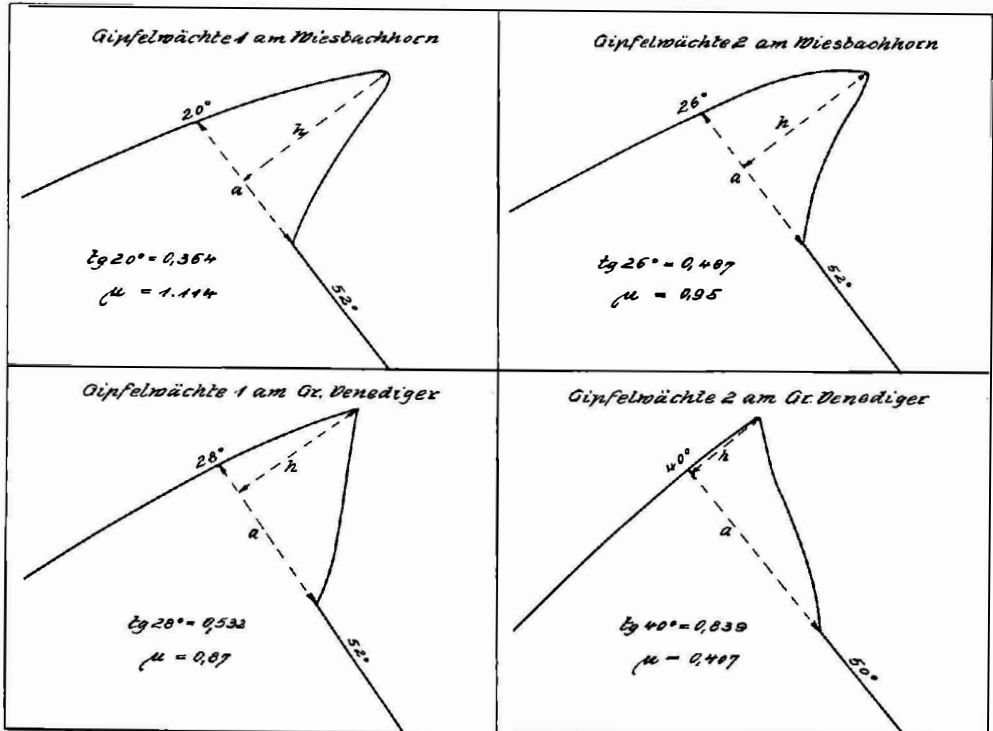


Abb. 23

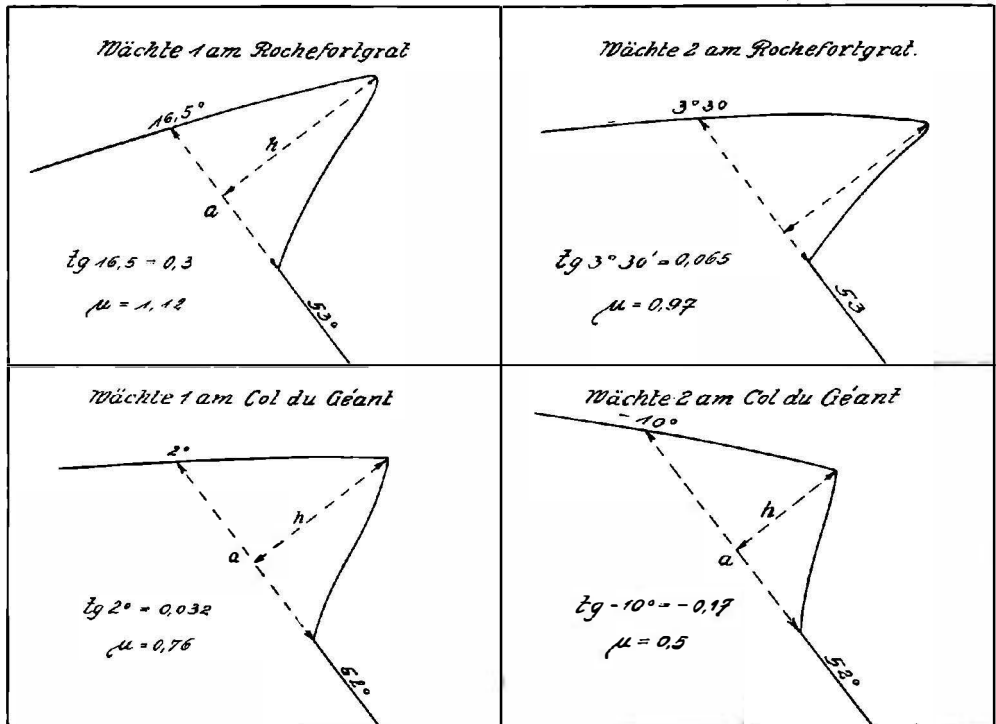


Abb. 24

I.f.d. Nr.	Bezeichnung der Wächte	μ	$\text{tg } \alpha$
1	Wächte 1 am Kaindlgrat.....	1,100	0,404
2	Wächte 2 am Kaindlgrat.....	1,000	0,466
3	Wächte 3 am Kaindlgrat.....	0,750	0,554
4	Wächte 4 am Kaindlgrat.....	0,660	0,700
5	Gipfelwächte 1 am Wiesbachhorn .	1,114	0,364
6	Gipfelwächte 2 am Wiesbachhorn .	0,950	0,487
7	Gipfelwächte 1 am Großenediger..	0,870	0,532
8	Gipfelwächte 2 am Großenediger..	0,407	0,839
9	Wächte 1 am Rochefortgrat.....	1,120	0,300
10	Wächte 2 am Rochefortgrat.....	0,970	0,065
11	Wächte 1 am Col du Géant.....	0,760	0,022
12	Wächte 2 am Col du Géant.....	0,500	0,170

Trägt man die erhaltenen Werte graphisch auf, so erhält man eine parabolisch gekrümmte Kurve, die im Punkte $\text{tg } \alpha = -0,33$, $\mu = 0$ ihren Ausgang von der Abszissenachse nimmt, und im Punkte $\text{tg } \alpha = 0,3$, $\mu = 1,12$ ihren Scheitel erreicht; für $\text{tg } \alpha = 0,93$ ist μ wieder 0 (s. Abb. 25).

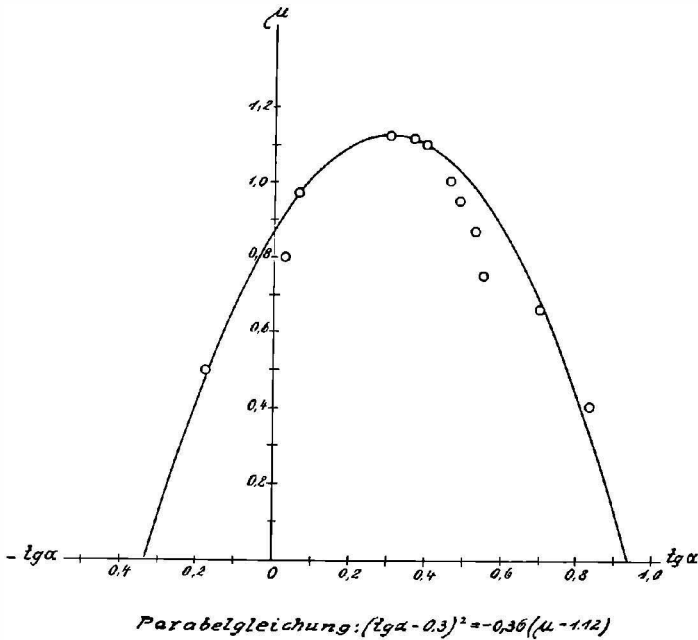


Abb. 25

Die Gleichung der Parabel lautet:

$$(\text{tg } \alpha - 0.3)^2 = -0.36 (\mu - 1.12)$$

Die Diskussion der Kurve zeigt folgendes Ergebnis:

Die Wächtenbildung nimmt bei einer maximalen Neigung von $\text{tg } \alpha = 0,93$ oder $\alpha = 43^\circ$ des Luvhanges ihren Anfang und erreicht (erst in raschem, später im langsamer werdenden Anstieg) bei $\text{tg } \alpha = 0,3$ oder $\alpha = 16^\circ 40'$ ihren Größtwert. Bei weiterer Abnahme des Winkels α nimmt auch die Intensität der Wächtenbildung wieder ab und erreicht bei $\text{tg } \alpha = -0,33$ oder $\alpha = -18^\circ 20'$ ihren 0-Wert.

14. Entwicklung der Firngrate

Neben dem das Wächtenproblem betreffenden Material gaben die Untersuchungen auch wertvolle Aufschlüsse über die Entwicklung der Firngrate im allgemeinen. Es interessieren hier vor allem zwei Fragen:

1. Wie verändern sich die Neigungsverhältnisse der Flanken bei fortschreitender Aufhöhung?

2. Wie verändert der Gratfirst (ideeller First) seine Lage in Bezug auf die Vertikale mit fortschreitender Aufhöhung?

Die erste Frage wurde im wesentlichen schon auf S. 31 und 32 behandelt mit dem Ergebnis: Jede Aufhöhung hat eine Vergrößerung der Hangneigung zur Folge. Es ergibt sich denn auch die Erfahrungstatsache, daß in niederschlagsreichen Jahren eine Verschärfung der Firngrate eintritt (Beobachtungen am Kaundlgrat).

Die weitere Frage: „Welche Verlagerung nimmt bei dieser Aufhöhung der ideelle Gratfirst ein“, ergibt sich aus dem Studium des Profils in Abb. 26. Es zeigt sich: Solange der Leehang seine Grenzneigung noch nicht erreicht hatte, kam die Tendenz der Aufhöhung in der Hauptsache auf dieser Flanke zur Auswirkung, denn der Wind hat das Bestreben, die Schneeteilchen von Luv auf Lee zu schütten (s. S. 17). Der ideelle Wächtenfirst rückte also gegen Lee vor (von A bis B; s. Abb. 26).

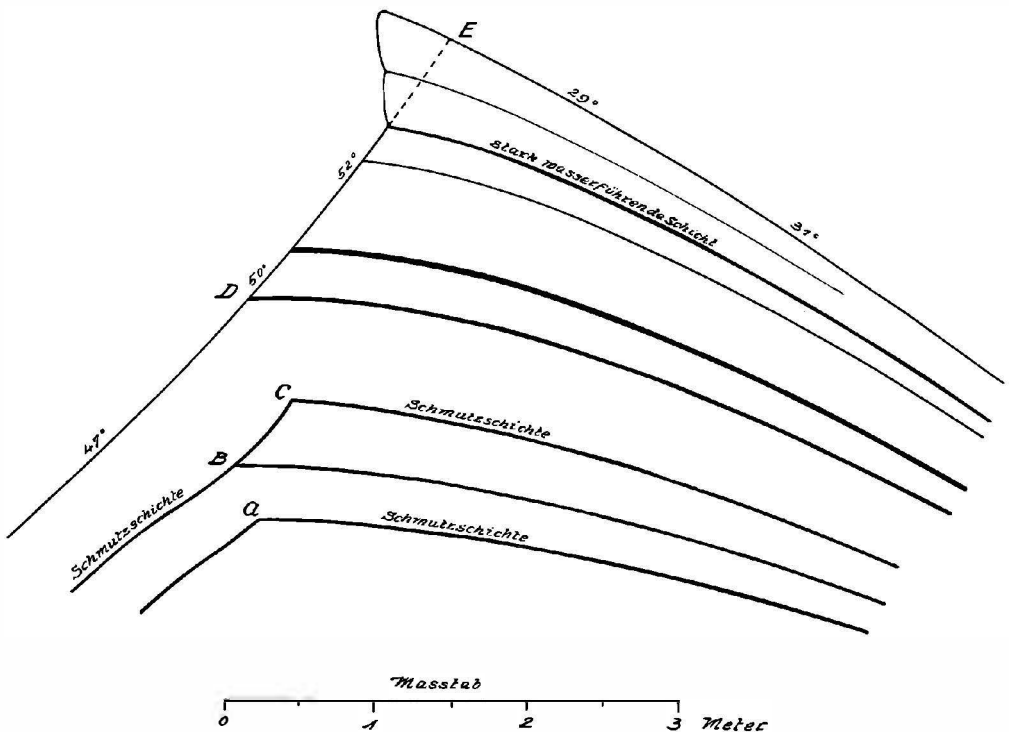


Abb. 26. Querschnitt durch den Kaendlgrat am Großen Wießbachhorn
Das Profil zeigt die Lagenveränderungen des (ideellen) Gratfirstes (A-B-C-D-E) mit zunehmender Aufhöhung durch Schneeablagerungen

Dieses Bild änderte sich mit einem Schlage, nachdem der Leehang die Grenzneigung erreicht hatte. Weiterer Schnee blieb daselbst nicht mehr haften, die Aufhöhung konnte nur noch auf der Luvseite erfolgen. Der First rückte nunmehr nach Luv (von B nach C). Daraufhin folgte eine längere Schönwetterperiode (dafür spricht die Schmutzschicht durch C), welche die Wächten zum Abbruch brachte und durch Schneerutsche oder Lawinen eine Verflachung des Leehanges bewirkte. Neuerlicher starker Schneefall höhte den Luv- wie Leehang auf und rückte den Gratfirst nach D. Daraufhin folgten sich die Schneefälle in rascher Folge, so daß ausgeprägte Schmutzschichten nicht mehr zur Entwicklung kamen. Die Gegenböschung hat in dieser Zeit die Grenzneigung nicht mehr verloren, so daß eine Aufhöhung durch Schneeschüttung am Leehang nicht erfolgen konnte. Die Wächten spitzen gelangten in den Schönwetterperioden stets wieder zum Abbruch, lediglich die zuletzt gebildeten Druckwächten spitzen blieben erhalten.

15. Entstehung der Eisgrate

Bei den Wächtengrabungen am Kaindlgrat zeigte sich, daß in wenigen Metern Tiefe die Firnkonsistenz des Schnees unvermittelt in den vollkommen vereisten Gratkern überging. Derselbe hatte eine Form, die sich in der Hauptsache der Oberflächengestaltung der Gratflanken anglich, jedoch eine geringere Seitenneigung aufwies als diese. Seine Ausbildung zeigte sich jedoch vollkommen unabhängig vom Aufbau des Firngrates, also von der Schneeschichtung. Die Eislagen fielen in den Eiskern vielfach diskordant zu dessen Oberfläche ein (siehe Abb. 2) und ließen sich in denselben als dichtere Blätter noch weiter verfolgen.

Der plötzliche Übergang von mäßig festem Firnschnee zum Eiskern läßt einen Schluß zu über dessen Entstehen. Die Theorie des Kernwachstums unter erhöhtem Druck (Hess, S. 163) kann jedenfalls nicht die ausschlaggebende Rolle spielen, denn erstens bedingt eine Schneeauflast von 3—4 m noch keinen allzu hohen Druck, zweitens müßte die Umwandlung von Firn zum Eis sich mit zunehmender Tiefe allmählich vollziehen, nicht im plötzlichen Übergang. Die Beobachtungen berechtigen vielmehr zu der Annahme, daß die Schmelzwassermengen, welche von der Wächtenoberfläche durch sämtliche Eislagen hindurchdringen, sich auf der Felsunterlage hochstauen und zur Bildung des Eiskerns Anlaß geben.

Die Eiskerne werden immer fossilen Charakter haben. Sie wachsen, wenn auch sehr langsam, gegen die Schnee-Oberfläche und werden in besonders trockenen Sommern — nachdem Wächten und Firnüberlagerungen abgeschmolzen sind — als Eisgrate erscheinen. Das periodische Größenwachstum der Eiskerne findet also ein vorläufiges Ende durch das Zutagetreten an der Oberfläche und Abschmelzen infolge Sonnenstrahlung. Bei Eintritt von Niederschlägen bilden sie die Grundlage, auf der die neuerliche Firngrat- und Wächtenbildung vor sich geht.

III. Lawinen¹⁾

1. Vorbemerkung

Die Lawinenfrage fand bisher eine ausgedehnte Beachtung sowohl in der alpinen, wie in der technischen Literatur. Man schenkte diesen Fragen wohl deshalb mehr Aufmerksamkeit, weil die Lawinen einerseits die sich äußerlich am stärksten bemerkbar machenden Phänomene des Schnees sind, andererseits weil sie durch die ständige Bedrohung von Leben und Besitztum des Menschen schon frühzeitig darauf hinwiesen, ihre Ursachen zu ergründen und geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen.

Bei der Forschung nach den Ursachen fanden denn auch die Beschaffenheit des Schnees und die Unterlage, sowie die äußeren Einwirkungen von Wind und Temperatur Beachtung. Was hingegen bisher noch nicht erforscht war, das ist der ausgesprochene Schichtencharakter der Schneeablagerungen in Verbindung mit seiner Bedeutung für die Entstehung von Lawinen.

¹⁾ Zur Ergänzung vorliegender Ausführungen diene: W. Paulcke, „Lawinengefahr, ihre Entstehung und Vermeidung“, München 1926.



Abb. 27. Schneebrettlawine an der Jungfrau

Angewelter windgepreßter Schnee lagerte auf harter glatter Harstunterlage, ohne mit derselben Verbindung eingegangen zu haben. Infolge Störung (Wind) löste sich die Spannung in den Schneebrettlagen aus; sie zerbarsten und fuhren als Lawine auf der Harstunterlage ab

2. Schichtung und Lawinenbildung

Beim Studium des Einflusses der Schneesichtung auf die Lawinenbildung können zweierlei Fälle unterschieden werden:

a) trockener, normal sedimentierter Lockerschnee oder umgelagerter (angewelter) Schnee lagert auf glatter Schmelz oder Windharstschicht ohne mit der Unterlage nennenswerte Verbindung eingegangen zu haben. Bei Störungen gleiten die Schneeschichten auf dieser Unstetigkeitsebene ab (s. Abb. 27) (Trockenschneelawine).

b) In der über einer wasserführenden Firnschicht¹⁾ liegenden feinkörnigen, dichten, ursprünglich trockenen Schicht saugt sich infolge Infiltration das Wasser kapillar hoch. (Das kapillare Aufsaugen kann, wenn analoge Verhältnisse vorliegen, auch nach abwärts erfolgen.) Die auf diese Weise gebildete wassergesättigte Lage wirkt geradezu als Schmierschicht, die das Abgleiten der darüber liegenden Schichtkomplexe fördert (Feuchtschneelawine).

In der Regel liegt der Fall so, daß die Hauptaufsaugung nach oben erfolgt, so daß die entstehende Schmierschicht gleichzeitig auf einer harten Unterlage ruht, auf der sich der Bewegungsvorgang vollzieht (s. Abb. 28!).

Die Färbungsversuche machten die Wasserbewegungserscheinungen deutlich sichtbar. Die Beobachtungen ergaben, daß wohl die meisten Feuchtschnee-

¹⁾ Über Entstehung dieser wasserführenden Firnschichten s. S. 12 und 13.



Abb. 28. Feuchtschneelawine am First (Spitzmeilengebiet)

Das infolge Sonnenwirkung und durch die Wärmestrahlung der am oberen Ende des Hanges anstehenden Felsen entstandene Schmelzwasser drang in den Schnee ein und bildete längs einer tieferliegenden grobkörnigen Firnschicht eine wasserführende Lage. Aus dieser wurde die darüber liegende feinkörnige Schicht durch kapillare Aufsaugung infiltriert und bildete so in 1 m Tiefe eine 4 cm mächtige „Schmierschicht“, auf welcher der darüber ruhende Lagenkomplex infolge äußerer Einwirkung (Abbrechen und Aufschlagen einer Wächte) abglitt

lawinen durch diese Schmierschichtbildung bedingt sind¹⁾. Sie gleiten dann ähnlich wie beim Bergschliff ab, bei dem die voll Wasser gesaugten Tonschichten als Schmiermittel dienen. Dabei sind zum Teil ähnliche Erscheinungen (Schürfung des Untergrundes, randliche Scherungszonen (s. Abb. 30), Abrißnischen oben, Stauungswülste im Ablagerungsgebiet), zum Teil durch das Schneematerial bedingte Sondererscheinungen zu beobachten.

Temperaturen um 0° halten selbst in geringer Tiefe noch lange Zeit an, nachdem bei eintretender Kälte der Schnee oberflächlich schon vollkommen hart und tragfähig geworden ist. Die Wasserbewegung geht demnach in der Tiefe noch geraume Zeit weiter (Dauerbeobachtungen sind noch nachzuholen), so daß auch die Feuchtschneelawine gefahr noch andauern kann, wenn die Beschaffenheit der Oberfläche keinerlei Verdacht aufkommen läßt. (An Profilaufschlüssen bei Station Eigergletscher konnte auf Grund der Färbungsversuche die Wasserbewegung im Schnee trotz empfindlicher Kälte noch bis 22 Uhr 30 Min. beobachtet werden.)

Aus der Feststellung der Wasserbewegung im Firn folgert weiter die Erkennt-

¹⁾ Eine besonders mächtige Lawine, welche bei den Lawinenstudien im Spitzmeilengebiet zum Abbruch gebracht wurde, glitt als 1 m starker Schichtkomplex auf Hartschneeunterlage ab. Eine wassergesättigte Zwischenlage von 4 cm wirkte hierbei als Schmierschicht.

nis, daß Feuchtschneelawinengefahr bei Temperaturen u n t e r 0° selbst auf beschatteten Hangpartien herrschen kann, wenn dieselben durch die Schmelzwässer aus höher liegenden sonnenbeschienenen Hangteilen infiltriert werden. Die Sammlung von reichlichem Material über die Geschwindigkeit der Wasserbewegung ist wichtig zur Beurteilung des Zeitpunkts, von dem ab mit Lawinengefahr zu rechnen ist (s. Tabelle S. 13).

3. Schneebeschaffenheit und Lawinenbildung

In Ergänzung der Ausführungen von Professor Paulcke („Lawinengefahr“, München 1926) seien hier einige neue Beobachtungen mitgeteilt. Bei den Versuchen durch (gesicherte) Schiläufer künstlich Lawinen zum Abgang zu bringen, zeigte sich, daß die Lawinengefahr nicht während oder sofort nach dem Neuschneefall ihr Maximum erreicht, sondern erst einige Zeit (etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Tag) später. Es ergab sich, daß frisch gefallener Schnee bei Belastung durch Schiläufer zwar außerordentlich leicht u n t e r den Skiern zum Abgleiten kommt, jedoch werden kaum je die über dem Störungspunkt liegenden Hangteile beeinflusst. Dieselbe Erscheinung wurde vom Verfasser wiederholt bei vollkommen wasserdurchtränktem Firnschnee (Sulzschnee) beobachtet. Die Erklärung dieser Erscheinung dürfte in der großen Beweglichkeit der Schneeteilchen, also in dem geringen inneren Verband der Schneelage zu suchen sein. Dadurch löst sich die durch Belastung zum Abgleiten gebrachte Hangpartie ohne Störung von den übrigen Hangteilen los. Ist hingegen durch innere Veränderungen (Setzen) und äußere Einwirkungen (Wind, Schmelz- und Gefriervorgänge) ein enger Verband der Schneeteilchen erreicht, so wirkt die Schneelage als ein einheitliches Ganzes und wird deshalb bei Störungen i n s g e s a m t abgleiten. Eine gewisse Rolle spielen hierbei sicher auch die als Folge der Umbildung in der Schneelage auftretenden Spannungen, die bei Störungen in weitem Bereich plötzlich zur Auslösung kommen. (Als Extremfall sei hier auf das Schneebrett hingewiesen!)

Des weiteren wurde im Laufe der von Professor Paulcke und vom Verfasser gepflogenen Untersuchungen — August 1926 am Kaindlgrat (Wiesbachhorn) und April 1928 bei Station Eigergletscher (Jungfraugebiet) — eine bisher kaum beachtete Sorte Schnee festgestellt, die in hohem Maße geeignet ist, Lawinen zu bedingen. Dieser Schnee besteht aus luftfreien Eiskristallen, die eine außerordentlich große Beweglichkeit gegeneinander aufweisen. Infolge dieses Verhaltens wurde die Schneesorte vom Verfasser und von Professor Dr. Paulcke (als Analogon zum Schwimmsand) als Schwimmschnee bezeichnet. Festgestellt wurde dieser Schnee nur in der Tiefe und zwar entweder über dem Erdboden (bei Station Eigergletscher) oder über einer Eisunterlage (am Kaindlgrat). Die Korngröße dieser Eiskristalle beträgt 2—3 mm, sie kann aber auch bis zu 5 mm anwachsen. Diese Schneeart verdankt zweifellos einer Umkristallisation ihre Entstehung, wobei die Einwirkung von Wasserdampf eine maßgebende Rolle spielen dürfte. Bei tiefer Schneelage (bei der die Außentemperatur keinen Einfluß mehr auf bodennahe Schichten ausübt) finden auf der Unterlage infolge der Bodenwärme immer geringe Schmelzvorgänge statt. (Der Nachweis wurde erbracht durch eine Reihe von Temperaturmessungen im Schnee, die unmittelbar über dem Boden $+1\frac{1}{2}^{\circ}$ bis $+1^{\circ}$ ergaben.) Durch das entstehende Schmelzwasser wird eine Sättigung der in den Hohlräumen des Schnees enthaltenen Luft mit Wasserdampf bewirkt. Diese wassergesättigte Luft zirkuliert in den feinen

Hohlräumen des Schnees und bewirkt die allmähliche Umkristallisation desselben.

Etwas anders ist der Vorgang bei Schneeschichten, die auf einer Eisunterlage in Gletschergebieten aufliegen. Hier bilden die an der Oberfläche entstehenden und durch Lockerzonen eingedrungenen Schmelzwässer einen Wasserhorizont über der Eisunterlage, von dem aus Wasser verdunstet und die Umkristallisation bewirkt.

Für die Lawinenfrage dürfte dieser Schwimmschnee insofern eine Rolle spielen, als die leichtbeweglichen Schneekristalle die Reibung derart vermindern können, daß der darüber lastende Schneekomplex als Lawine abgleiten muß. Es wird also auch bei sehr kaltem Wetter über dem gewachsenen Boden eine ausgesprochene Unstetigkeitsebene erzeugt; die die Lawinenbildung begünstigt. Dazu kommt noch, daß durch die Umkristallisation vom pulverigen Schnee in luftfreie Eiskriställchen eine beträchtliche Raumverminderung und somit Bildung von Hohlräumen (wiederholt nachgewiesen) erzielt wird. Setzungserscheinungen, also Störungen des Gleichgewichts und Lawinenbildung sind die notwendige Folge.

Wie durch zahlreiche Grabungen festgestellt wurde, scheint dieser Schwimmschnee meist als Unterlage älterer Schneeschichten vorhanden zu sein. Eine Verfrüfung des Schnees mit der Unterlage findet demnach — im Gegensatz zu früheren Annahmen — nur in seltenen Fällen statt.

4. Abbruchlinie von Lawinen

Wenn man die Abbruchlinie von Lawinen studiert, so wird man in vielen Fällen feststellen, daß sie bogenförmigen Verlauf nimmt. Die über dem Abbruchgebiet lagernden Schneemassen verspannen sich gleich einem Bogen zwischen den als Widerlager dienenden seitlichen Rändern. Die Abbruchlinie muß sich deshalb zwangsläufig der Form der Stützlinie dieses natürlichen Gewölbes anpassen. Diese bogenförmige Abbruchlinie ist besonders charakteristisch ausgeprägt bei Lawinen, die in Geländemulden oder Rinnen zum Abbruch kommen, da sich die stehenbleibenden Schneemassen gut zwischen den seitlichen Begrenzungsrippen verspannen können.

Es liegen hier dieselben Gesetze vor, wie sie für die Entstehung des Bergschrundes maßgebend sind. Auch hier löst sich das bewegte Eis des Gletschers in einer bogenförmigen Linie vom unbewegten der Eiswand oder Eisrinne ab. Das Eis der letzteren verspannt sich bogenförmig zwischen zwei seitlichen Widerlagern (Felsen). Wir können hier eine gewisse Parallelität zwischen Gletscherbewegung und Lawinenbewegung feststellen.

5. Die Mechanik der Lawinenbewegung

Die Bewegungsarten der Lawinen lassen sich in drei große Gruppen einteilen:

- a) Reine Bodenbewegung,
- b) Reine Luftbewegung,
- c) Boden-Luftbewegung.

Zwischen diesen drei Gruppen können naturgemäß noch verschiedene Übergangsformen vorkommen. Welche von diesen Bewegungsarten jeweils eintritt, hängt einerseits von der Schneebeschaaffenheit, andererseits von der Geländeform ab.

Bevor auf die dynamischen Vorgänge bei der Lawinenbewegung eingegangen werde, mögen die einzelnen Begriffe eine nähere Erklärung finden.

Reine Bodenbewegung findet statt, wenn die Lawine als kompaktes Ganzes auf der Unterlage niedergleitet, ohne daß sich die Schneemassen oder Teile derselben in die Luft erheben. Hierbei ist es gleichgültig, ob diese Unterlage aus gewachsenem Boden, Schnee oder Eis besteht. Die Voraussetzungen für die Entstehung reiner Bodenbewegungen sind günstig bei dichtem, weniger beweglichem, sowie nassem schwerem Schnee, ferner bei gleichmäßig und wenig geneigter Gleitbahn.

Im Gegensatz hierzu stehen die reinen Luftbewegungen, bei denen die Schneemassen im Laufe ihres Talweges vollkommen oder doch nahezu vollkommen in die Luft zerstäuben, um hierauf als Schneewolke langsam in die Tiefe zu sinken. Günstige Vorbedingungen sind einerseits lockerer, leicht beweglicher Schnee, andererseits steiles kupiertes Gelände, welches ein Zerstäuben der Schneemasse begünstigt.

Unter Boden-Luftbewegung versteht man ein Mittelding zwischen reiner Boden- und reiner Luftbewegung. Es wird nur ein Teil des Schnees in die Luft zerstäubt, während der Rest am Boden dahingleitet. Sie entsteht, wenn einerseits der Schnee zu schwer und zu zäh ist, um vollkommen zu zerstäuben, andererseits aber das Gelände doch so steil und gegliedert ist, daß ein Teil der Schneemassen in die Luft verspritzt wird.

So unterschiedlich wie ihre Erscheinungsformen sind auch die dynamischen Vorgänge beim Niedergehen der Lawinen.

a) REINE BODENBEWEGUNG

Jedes Niedergehen einer Lawine tritt zunächst als eine rein gleitende Bewegung auf der Unterlage ein. Die einzelnen Schneeteilchen werden dabei ihre Lage zu einander wenig oder gar nicht verändern. Manche Teile der abgleitenden Schicht bleiben bei nicht allzu langer Bahn als Schollen in ihrer ursprünglichen Zusammensetzung erhalten (bei Schneebrettern, siehe Abbildung 29).

Bei größerer Fallhöhe und mit zunehmender Geschwindigkeit geht diese gleitende Bewegung allmählich in eine fließende über. Der ursprüngliche Verband der Schneedecke wird zerstört, die einzelnen Schneeteilchen werden frei beweglich gegeneinander. Die größte Fließgeschwindigkeit tritt dabei in der Mitte des Lawinenstromes auf und zwar an seiner Oberfläche, da hier die Reibungswiderstände am geringsten sind.

Wie jedoch aus zahlreichen Beobachtungen folgert, dürfte eine rein fließende Bewegung nur in seltenen Fällen eintreten und zwar einerseits bei außerordentlich beweglichem Schnee (trockener Pulverschnee), andererseits bei einer Bahn, auf der die Reibungswiderstände gering sind. Bei feuchtem Schnee hingegen, bei dem die einzelnen Teilchen wenig Beweglichkeit gegeneinander besitzen und in eingegengten Bahnen, welche eine starke Pressung der Lawine und somit Erhöhung der Reibung bewirken, so daß dieselbe (insbesondere bei rauhem Bette) eine starke Steigerung von der Strommitte gegen die Unterlage und die Ufer erfährt, tritt neben der fließenden wieder eine gleitende Bewegung ein, diesmal aber nicht — wie eingangs erwähnt — auf der Unterlage, sondern längs Scherflächen, die sich im Lawinenstrom ausbilden. Die rascher bewegten mittleren Teile des Schneestroms verschieben sich gegen die gehemmten randlichen Partien. Diese Abscherungsflächen wurden bereits von Sprecher beobachtet und im S. A. C.-Jahrbuch 1902 beschrieben. Weitere eingehende Beobachtungen wur-



Abb. 29. Schneebrettlawine an der Jungfrau
Teile der abgeglittenen Schneeschicht blieben als Schollen erhalten

den von Professor Paulcke an der großen Eigerlawine bei Station Eigergletscher der Jungfrauabahn gemacht (s. Abb. 30). Die Gleitflächen durchsetzen trogartig den Lawinenkörper. Sie fallen an den Rändern des Lawänenkörpers steil ein, um sich gegen die Lawinenmitte allmählich horizontal umzubiegen. In der Regel sind in einem Lawinenkörper nur eine oder zwei Gleitflächen festzustellen, in seltenen Fällen finden sich jedoch auch mehrere ineinander geschachtelt. — Während die randlichen und bodennahen Teile der Lawine infolge der großen Bodenreibung alsbald zur Ruhe kommen, wird der Kern der Lawine infolge der ihm innewohnenden lebendigen Kraft auf der Abscherungsfläche weiter gleiten, so daß diese oft völlig vom Schnee befreit wird und als Hohlkehle sichtbar wird¹⁾. Ihre geglättete und infolge starker Druckwirkung erhärtete Oberfläche (Regelation) bildet oft die Bahn nachfolgender Lawinen, welche infolge der geringen Reibungswiderstände und der gleichmäßigeren und kürzeren Sturzbahn (Ausgleichung der toten Winkel auf der Unterlage und an den Flanken, sogenanntes „Ausschmieren“ des Untergrundes durch die vorausgehende Lawine) außerordentlich weit zu Tal getragen werden können.

Diese an den Lawinen beobachteten zweifachen Bewegungsvorgänge ermöglichen gewisse Rückschlüsse auf die Bewegung des unter ähnlichen Bedingungen

¹⁾ Ein derartiger Fall ist in anschaulicher Weise im „Schnee“ 1914, S. 181 beschrieben: „Die Lawine am Schneeborg.“



Abb.30. Bahn der Eigerlawine bei Station Eigergletscher (Jungfraugebiet)

Die Lawinenbahn ist seitlich durch eine große Scherungsfläche zwischen der bewegten Hauptmasse der Lawine und den früher zur Ruhe gekommenen seitlich aufgeworfenen Schneemengen begrenzt. Solche Scherungszonen wurden auch schon mehrfach ineinandergeschachtelt festgestellt. Es ergibt sich hier gewissermaßen ein Analogon zur Bewegung des Gletschereises

stehenden Gletschereises. Auch hier haben wir ein Material, das einerseits durch seine Plastizität eine gewisse Beweglichkeit der Massenteilchen gegeneinander ermöglicht, andererseits hingegen doch nicht imstande ist, die durch die große Reibung an Boden und den Ufern auftretenden Geschwindigkeitsunterschiede durch plastische Formänderungen zu überwinden. Auch im Gletschereis dürfte ebensowenig nur eine rein molekulare Formänderung für die Bewegung maßgebend sein als ein reines Gleiten längs von Abscherungsflächen allein. Vielmehr scheinen beide Vorgänge durch Zusammenwirkung die Gletscherbewegung zu bedingen.

Sind demnach Gleiten und Fließen die wichtigsten Bewegungsvorgänge im Lawinenkörper, so kommt daneben noch ein dritter vor, dem allerdings nur eine untergeordnete Bedeutung zukommt, das Rollen. Jede Lawine, die aus mehr oder minder feuchtem Schnee besteht, wird sich auf ihrem Talweg zu Knollenballen, die Sprecher treffend als „Schneeerölle“ bezeichnet¹⁾ (s. Abb. 31). Diese Schneeerölle können je nach der Beschaffenheit des Schnees die verschiedenste Größe annehmen. Sie werden klein sein (etwa 10—20 cm Durchmesser) bei verhältnismäßig trockenem Schnee, können aber Größen bis zu 2 m Durchmesser erreichen²⁾ bei zäher, sich leicht ballender Schneesorte (etwa angelauter oder bei hoher Temperatur gefallener Neuschnee).

¹⁾ Grundlawinenstudien I und II, Jahrb. des S. A. C. 1900 u. 1902.

²⁾ Derartige Gerölle wurden vom Verfasser im Fließer Tal (Samnaun) beobachtet.



Abb. 31. Schneeegerölle einer künstlich losgelösten Feuchtschneelawine am First (Flumser Berge)

Im Lawinenstrom erfahren wegen der Geschwindigkeitsabnahme von der Oberfläche gegen die Unterlage zu die jeweils unteren Teile der Gerölle eine Verzögerung gegenüber den oberen. Sie werden dadurch in drehende Bewegung versetzt. Neben der Translationsbewegung¹⁾ hat man also im Lawinenstrom als sekundäre Bewegung auch eine rotierende.

Zuletzt wäre noch eine Bewegungsart zu erwähnen, nämlich die fallende, welche dann eintritt, wenn der Lawinenstrom über eine Wandstufe herabstürzt. Die Fallkurve ist annähernd eine Wurfparabel. Inwieweit die Lawine oder ein Teil derselben beim freien Flug zerstäubt und so Anlaß zur Entstehung von Luft- oder Boden-Luftbewegungen gibt, hängt von der Fallhöhe und der Schneebeschaffenheit ab.

Der Vollständigkeit halber seien noch einige Beobachtungen erwähnt über das „Zur-Ruhe-Kommen“ von Lawinen. Stellt sich der Lawine ein Hindernis entgegen, so staut sie sich. Die Schneemassen werden sich zusammenstauchen, auftürmen, überschieben. Durch diese Pressung und die damit verbundenen Regulationserscheinungen erhält der Lawinenkegel außerordentliche Festigkeit.

¹⁾ Nicht zu verwechseln mit der Translation innerhalb der Eiskristalle im Gletschereis.



Abb. 32. Lawine an der Jungfrau
(reine Luftbewegung)

Hat die Lawine hingegen einen mehr oder minder flachen Auslauf, so treten ähnliche dynamische Vorgänge auf wie in den Gletscherzungen. Die Schneemassen breiten sich nach allen Seiten aus, wodurch im Lawinenkegel Ringspannungen auftreten, die die Bildung von (allerdings nur selten beobachteten) Radialklüften zur Folge haben können. Sprecher führt in seinen „Grundlawinenstudien“ einen solchen Fall an.

Neben den eben dargelegten Bewegungen des Lawinenkörpers gehen noch solche der Luft einher. Da nicht zwei Körper gleichzeitig denselben Raum einnehmen können, so preßt die Lawine auf ihrem Talweg die Luftsäule vor sich her, deren Raum sie füllt. Gleichzeitig wird im Rücken der Lawine in dem entstehenden luftverdünnten Raum die Luft von der Seite nachströmen. Die Bewegung dieser Luftmassen ist wohl in der Hauptsache eine linear strömende. An den Rändern des Luftstromes treten jedoch infolge Reibung an den ruhenden Luftmassen turbulente Bewegungen auf.

Der Querschnitt einer in reiner Bodenbewegung zu Tal gleitenden Lawine ist im Vergleich zu den unten erörterten Lawinenarten ein ziemlich beschränkter. Der durch eine solche Lawine erzeugte Luftstrom zeichnet sich dementsprechend durch eine geringe Ausdehnung aus. Da andererseits solche Lawinen meist aus zähen, sich langsam bewegenden Schneemassen bestehen, so wird auch der Luftstrom in der Regel keine große Geschwindigkeit aufweisen. Aus diesen beiden

Gründen wird seine Wirkung gewöhnlich nicht so stark sein wie bei den unten besprochenen Boden-Luftbewegungen (größerer Querschnitt und größere Geschwindigkeit).

b) REINE LUFTBEWEGUNG

Wesentlich anders zeigt sich die Dynamik der reinen Luftbewegung. Wie schon oben erwähnt, sind einerseits trockener beweglicher Schnee, andererseits steiles kupiertes Gelände Vorbedingungen für ihr Eintreten. Die Bewegung ist zunächst eine gleitende auf der Unterlage. Infolge steigender Bewegungsgeschwindigkeit und in gleichem Maße wachsenden Luftwiderstandes wird der Schnee jedoch alsbald in die Luft gewirbelt und daselbst fein verteilt. Vorschub geleistet wird dieser Zerstäubung des Schnees durch Wandabbrüche, die die Lawine im freien Flug überwinden muß. Es entstehen bei dieser Zerstäubung feine Schneewolken, die langsam zur Erde schweben oder vom Winde davongetragen werden (s. Abb. 32!).

Da bei dieser Zerstäubung der vom Schnee erfüllte Raum um ein viel Hundertfaches vergrößert wird und entsprechend die der Schneemasse inwohnende Wucht auf einen viel größeren Querschnitt verteilt wird, sind solche (reine) Luftbewegungen nicht in der Lage, nennenswerten Schaden anzurichten. Derartige Lawinen, bei denen eine vollkommene wolkenartige Zerstäubung des Schnees stattfindet, können deshalb als ungefährlich bezeichnet werden. Die charakteristische Bewegung ist hier das langsame „Z u - T a l - S c h w e b e n“.

c) BODEN-LUFTBEWEGUNGEN

Diese in folgendem besprochene Art der Bewegung ist wohl die häufigste und in ihrer Wirkung verheerendste Erscheinungsform der Lawinen. Bei ihr wird nur ein Teil des Schnees in die Luft zerstäubt oder besser gesagt verspritzt, während der Rest am Boden zu Tale fließt. Voraussetzung für ihr Zustandekommen ist einerseits eine Schneesorte von geringer Beweglichkeit, welche verhindert, daß die ganzen Schneemassen in die Luft zerstäuben und daselbst allzufein verteilt werden, andererseits ein genügend steiles Gelände, welches es ermöglicht, daß sich doch Teile der Lawine in die Luft erheben. Die in die Luft gewirbelten Teile der Lawine begleiten dieselbe auf ihrem Talweg, fallen wieder in die Lawinenbahn zurück und werden von neuem aufgewirbelt. Die Lawine arbeitet dadurch mit einem wesentlich größeren Querschnitt wie bei reiner Bodenbewegung, während außerdem ihre Dichte eine bedeutend größere ist als in den bei reiner Luftbewegung entstehenden, fein verteilten Schneewolken.

Die Lawine ist durch diese Umstände in der Lage, eine verhältnismäßig große Wucht und Schnelligkeit bei räumlich großer Ausdehnung zu entwickeln und einen mächtigen Luftstrom als longitudinale Welle vor sich herzutreiben. In dem im Rücken der Lawine erzeugten luftverdünnten Raum fließt die Luft nach und verursacht so einen zweiten, weniger ausgeprägten Luftstrom, welcher dem ersten folgt.

Die Bewegung der Luftsäule wird vielleicht treffend als *Schießen* bezeichnet. Dieses Schießen ist von außerordentlich starken turbulenten Bewegungen in den randlichen Partien begleitet, wie aus der qualmenden Bewegung der von solchen Lawinen erzeugten Schneewolken ersichtlich ist (s. Abb. 33).

Die Wirkung der als Folge der Schneelawine auftretenden Luftlawine ist verächtend. Sie schreitet in der Bewegungsrichtung der Schneelawine fort und ist viele hunderte, ja tausende Meter von deren Endpunkt entfernt noch in der Lage,



Abb. 33. Lawine am Schießhorn bei Arosa (Boden-Luftbewegung)

Wälder und Gebäulichkeiten niederzulegen. Geländemulden, sog. „Tote Winkel“, bleiben hierbei unberührt.

6. Statische Druckwirkung ruhender Schneemassen

a) MASSGEBENDE PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN DES SCHNEES

Wir haben es bei Schnee mit einem Material zu tun, dessen Konsistenz (im Gegensatz zu Erde) einem außerordentlich starken Wechsel unterworfen ist. Von den möglichen Annahmen müssen wir zur Bestimmung des Schneedrucks jeweils diejenigen zugrunde legen, welche die ungünstigsten Werte für die Beanspruchung des widerstehenden Hindernisses ergeben.

Zur Bestimmung der statischen Druckwirkung von Lawinen ist die Kenntnis verschiedener Größen vonnöten. Diese Größen sind:

- α) Das spezifische Gewicht des Schnees (γ).
- β) Der natürliche Böschungswinkel von Schnee (φ).
- γ) Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage (φ').
- δ) Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Mauerrückfläche (φ'').
- ε) Die Kohäsion des Schnees.

α) Das spezifische Gewicht des Schnees

Das spezifische Gewicht des Schnees schwankt innerhalb weiter Grenzen; es wird von Professor Dr. Paulcke für verschiedenartige Schneesorten wie folgt angegeben:

Frisch gefallener Schnee (Lockerschnee)	. 0,06—0,08	l/cbm
gesetzter Schnee	0,2 —0,3	„
Firnschnee	0,5 —0,6	„
wassergetränkter Altschnee	0,6 —0,8	„

Wichtig ist die Frage, welches spezifische Gewicht man der Berechnung zugrunde legen soll. Die im Laufe eines Winters sedimentierten Schneemassen werden niemals von gleichmäßiger Beschaffenheit sein; die tieferen, älteren und verfirnten Schichten werden eine dichtere Konsistenz aufweisen als die oberflächlichen Schichten frisch gefallenen Schnees. Man wird deshalb der Rechnung etwa ein spezifisches Gewicht von 0,4 bis 0,5 zugrunde legen, was einen mittleren Wert zwischen dem spezifischen Gewicht des Firnschnees und jenem des gesetzten Schnees darstellt. Die zu erwartende maximale Schneehöhe ist nach Erfahrungswerten zu schätzen. Falsch wäre es, den Schneedruck unter Zugrundelegung der maximalen Schneehöhe und des maximalen spezifischen Gewichts zu bestimmen, da diese Größtwerte sich gegenseitig ausschließen. Das maximale spezifische Gewicht von 0,8 entspricht gesetztem wasserdurchtränktem Altschnee, dessen Höhe nur mehr einen Bruchteil der maximalen Schneehöhe des Winters darstellt.

β) Der natürliche Böschungswinkel von Schnee (φ)

Der natürliche Böschungswinkel von Schnee schwankt je nach der Konsistenz des Schnees zwischen zwei Grenzwerten. Der obere Grenzwert ergab sich gemäß der Überlegung auf Seite 32 als Grenzneigung von Firn- bzw. Eishängen zu etwa $52\frac{1}{2}^{\circ}$. Den Kleinstwert des Böschungswinkels besitzt vermutlich der Seite 41 beschriebene „Schwimmschnee“, dessen außerordentlich leicht bewegliche Kristalle sich erfahrungsgemäß unter einem Winkel von etwa 30° böschen.

γ) Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage (φ')

Auf Grund von Erfahrungstatsachen steht fest, daß der kleinste Neigungswinkel, bei dem eine Lawinenbildung noch möglich ist, 24° beträgt. Man kann also annehmen, daß eine Neigung von 23° den Winkel darstellt, bei dem eine Schneeschicht sich im Grenzzustand des Gleitens befindet. Der Winkel von 23° ist demnach der minimale Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage. Diese Unterlage kann aus gewachsenem Boden (Gras) oder Eis bestehen, sie kann aber auch die verharschte oder vereiste Oberfläche einer tieferliegenden älteren Schneeschicht darstellen. Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage kann sich je nach der Rauigkeit dieser Unterlage wesentlich steigern. Überschreitet seine Größe diejenige des Reibungswinkels φ zwischen Schnee und Schnee, so ist der letztere für die Bestimmung der Krafrichtung des Auflagerdruckes auf die Unterlage maßgebend.

δ) Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Mauerrückfläche (φ'')

Der Reibungswinkel zwischen Schnee und Mauerrückfläche kann zwischen sehr weiten Grenzen schwanken. Für die Bestimmung der Richtung des Schneedrucks können jedoch (aus gleichen Gründen wie sie unter γ) dargelegt wurden) nur Werte von $\varphi'' = 0$ bis $\varphi'' = \varphi$ in Frage kommen: Je größer dieser Winkel ist, desto günstiger ist die Beanspruchung der Mauer. Es handelt sich also in der Praxis darum, durch raue Ausgestaltung der Mauerrückfläche diesen Winkel möglichst zu vergrößern (unverputztes Bruchsteinmauerwerk!). Für Stand sicherheitsuntersuchungen kann man bei Voraussetzung einer sehr rauhen Mauerrückfläche $\varphi'' = \varphi$ setzen.

e) Die Kohäsion des Schnees

Zur Beurteilung der Größe der Kohäsion dienen verschiedene Beobachtungen des Verfassers. So wurde für den bereits oben erwähnten „Schwimmschnee“ erkannt, daß die einzelnen Schneekristalle keinerlei inneren Verband zeigen. Für diese Schneesorte kann demnach der Koeffizient der Kohäsion zu 0 angenommen werden.

Fernerhin ist jedem Schiläuler die große Beweglichkeit durchgefrorenen Pulverschnees bekannt, für den der Koeffizient der Kohäsion gewiß einen von 0 wenig verschiedenen Minimalwert erreicht.

Andererseits kann aber der Betrag der Kohäsion für Schnee je nach dem Grad der Verfrierung der Schneeteilchen beträchtliche Größen annehmen. Für die Ermittlung des Schneedrucks nach Rebhann muß man jedoch den ungünstigsten Fall des kohäsionslosen Schnees zugrunde legen.

b) ERMITTLUNG DES SCHNEEDRUCKS

Zur Lösung der Aufgabe ist in erster Linie die Frage zu klären, in welcher Höhe der Mauerrückfläche, der Angriffspunkt für die Kraft S anzunehmen ist. Nach Untersuchungen von R. Petersen¹⁾ schwankt dieser Wert je nach der Geländeneigung zwischen $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{3}$ der Wandhöhe. Er ist in $\frac{1}{3}$ der Höhe anzunehmen bei flachem Gelände; erreicht hingegen die Geländeneigung den natürlichen Böschungswinkel des Materials, sind also (wie auch in nachfolgendem Fall β) Ober-

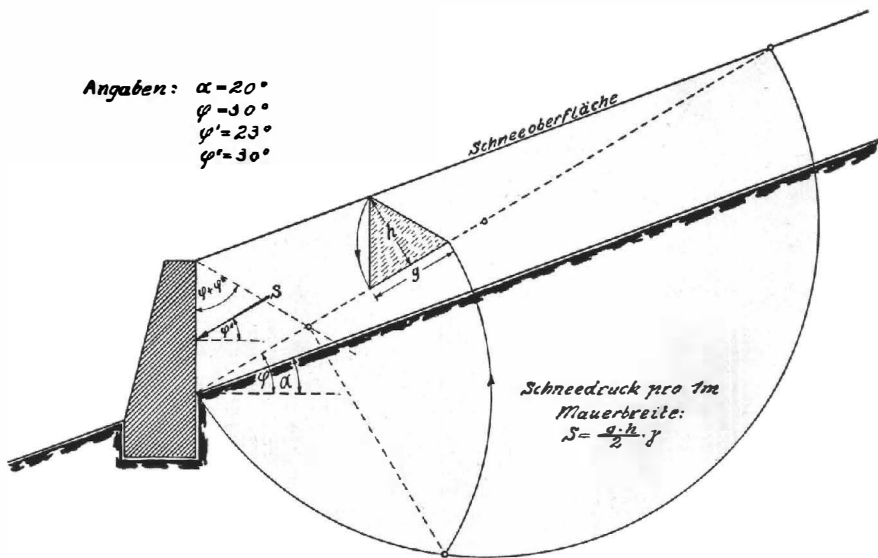


Abb. 34

fläche und Gleitfläche parallel, so rückt die Angriffskraft bis fast in die Mitte der Mauer empor. Es ist aber zu beachten, daß sich Petersens Untersuchungen auf Erde bezogen, deren Dichte von der Oberfläche gegen die Tiefe nicht wesentlich zunimmt. Bei Schnee haben wir es hingegen mit einem Material zu tun, dessen oberflächliche jüngere Schichten eine wesentlich geringere Dichte aufweisen als die bodennahen älteren. Dadurch wird der Schwerpunkt des Schneekörpers und

¹⁾ R. Petersen, Erddruck auf Stützmauern, Berlin 1924.

damit auch der Angriffspunkt des Schneedrucks wieder mehr in die Tiefe verlagert. Wählt man einen Mittelwert und nimmt man den Angriffspunkt der Kraft S in $\frac{2}{5}$ der Mauerhöhe an, so dürfte man den tatsächlichen Verhältnissen wohl ziemlich nahe kommen.

Für die Ermittlung des Schneedrucks sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- α) Die Hangneigung ist kleiner als der minimale Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage; $\alpha < \varphi'$

Unter der Voraussetzung kohäsionslosen Schnees würde sich beim Nachgeben der Mauer eine Bruchebene im Schneekörper ausbilden, längs der das Bruchprisma abgleitet. Die Bestimmung des Schneedrucks kann nach einer der Erddruck-Theorien erfolgen, z. B. nach der Rebhansschen (s. Abb. 34).

Die Ermittlung des Schneedrucks nach Fall α) hat jedoch nur theoretische Bedeutung. Da nämlich $\alpha < \varphi'$ vorausgesetzt ist, so kann ein Abgleiten des Schnees auf der Unterlage nicht eintreten. Auf Hängen von solch flacher Neigung hat man mit Lawinenbildung nicht zu rechnen; es erübrigt sich deshalb auch jegliche Verbauung.

- β) Die Hangneigung ist größer als der minimale Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage; $\alpha > \varphi'$

Es sind dies die Verhältnisse, wie sie tatsächlich an Lawinhängen bestehen und wie sie für die Entstehung von Lawinen Voraussetzung sind. Beim Nachgeben der Mauer kann sich kein Bruchprisma im Schneekörper ausbilden, da die Reibung zwischen Schnee und Schnee größer ist wie zwischen Schnee und Unterlage. Als Gleitebene kann deshalb nur die Unterlage selbst in Frage kommen. (Noch

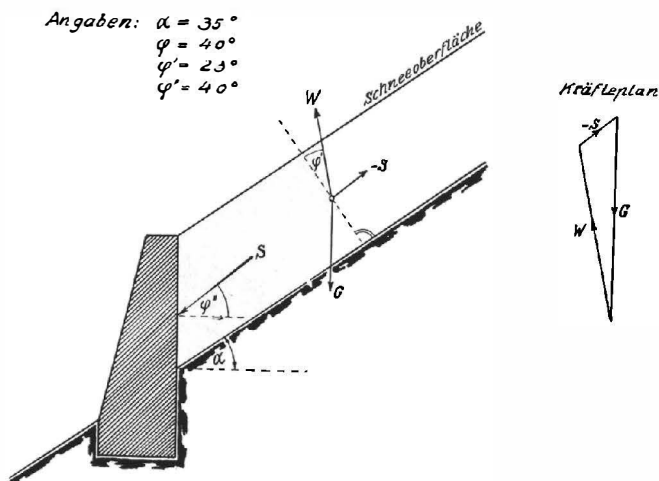


Abb. 35

verständlicher wird diese Auffassung, wenn man sich den Schneekörper als einen durch Schmelz- und Gefriervorgänge verfestigten Block vorstellt.) Es besteht nun die Aufgabe, den Schneedruck für eine beliebige Gleitebene zu ermitteln. Die Lösung dieser Aufgabe geschieht in Anlehnung an die von Möller zur Ermittlung des Erddrucks für eine beliebige Gleitebene angegebene Methode¹⁾.

¹⁾ M. Möller, Erddrucktabellen, Leipzig 1922.

In dem gewählten Angriffspunkt der Kraft S fällt man eine Senkrechte auf die Wand und trägt daran den $\angle \psi''$ an. Es ergibt sich damit die Richtung des Schneedrucks S , sowie die Richtung dessen Reaktion — S . Auf gleiche Weise findet man die Richtung der Auflagerreaktion W des Schneeprismas auf die Gleitebene durch Antragen des Winkels φ' an die Normale zur Gleitebene.

Stellt man nun das Gesamtgewicht G des Schneeprismas mit den Kraftrichtungen von — S und W zu einem Kräfteck zusammen, so erhält man den gesuchten Wert des Schneedrucks S auf die Mauer bzw. dessen Reaktion — S .

Setzt man das Gewicht G des Schneeprismas = 100, so erhält man aus dem Kräfteck den Schneedruck S auf die Mauer in % des Schneegewichtes G . Die Untersuchung kann man für verschiedene Geländeneigungswinkel und Reibungswinkel durchführen und die Beziehung zwischen den errechneten Schneedrücken (in % des Schneegewichts) und den Tangenten der zugehörigen Neigungswinkel graphisch darstellen. Man kann damit für jede beliebige Geländeneigung die Größe des Schneedrucks rasch ermitteln.

Aus der Größe des zu erwartenden Schneedrucks läßt sich die erforderliche und zugleich wirtschaftlichste Mauerdimension ermitteln oder umgekehrt: Bei gegebenem Mauerprofil läßt sich der größte zulässige Schneedruck und damit der größtmögliche Abstand zweier Mauersysteme feststellen.

Bei Entwurf von Schneeschutzanlagen ist zu beachten, daß zahlreichere, schwächer dimensionierte Mauersysteme ihre Aufgabe besser erfüllen als wenige kräftige. Es ist verständlich, daß im letzteren Fall infolge des zu großen Mauerabstandes der Druck der zu stützenden Schneemassen so groß werden kann, daß er durch den plastischen Schnee nicht mehr auf die Mauer übertragen werden kann. Der Schnee würde dann durch den Druck der nachdrängenden Massen vor der Mauer aufgewulstet und über dieselbe hinweggeschoben werden, womit die Verbauung ihren Zweck verfehlt.

Es ist noch die Frage zu erörtern, wie sich auf einem Hang, dessen Neigung größer ist als der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage, das Vorhandensein größerer Schneemengen überhaupt erklären läßt. Der Fall liegt praktisch so, daß während der Sedimentation des Schnees der Reibungswinkel zwischen Schnee und Unterlage unbedingt größer gewesen sein muß als der Neigungswinkel des Hanges, denn sonst hätte sich ja gar kein Schnee auf der Unterlage halten können. Erst nachdem die Schneelage eine gewisse Mächtigkeit erreicht hatte und sich innerlich gefestigt hatte, trat eine Verminderung des Reibungswinkels φ' ein. Diese Verminderung des Reibungswinkels kann bewirkt werden durch Wasserinfiltration und die Bildung von Schmierschichten (s. S. 39 u. 40), durch Lostauen des Schnees von der Unterlage infolge Bodenwärme oder durch Umkristallisation (Bildung von Schwimmschnee) in bodennahen Schichten. Es ist auch möglich, daß eine Schneeschicht sich während der Sedimentation und oft auch noch längere Zeit hernach annähernd im Grenzzustand des Gleitens befindet. Tritt nun plötzliche Erschütterung ein (infolge Windwirkung, Abbrechen einer Wächte, Befahren des Hanges durch Schiläufer), so werden die geringen Widerstände, welche die Schneemasse noch am Hang hielten, überwunden; die Voraussetzungen für das Abgleiten des Schnees als Lawine sind damit gegeben. Die gleiche Wirkung tritt ein bei plötzlichen Spannungsauslösungen infolge Zerbersten eines Schnee Brettes.

Diese Betrachtungen leiten über zur Dynamik der Schneebewegungen, welche im folgenden Abschnitt behandelt wird.

7. Dynamische Druckwirkung von Lawinen

Die exakte Berechnung der dynamischen Druckwirkung von Lawinen auf ein Hindernis (Lawinenschutzbauten) ist mit den uns zur Verfügung stehenden Gesetzen der Mechanik kaum möglich.

In folgendem sei auf zwei Wege verwiesen, die bei der Berechnung einzuschlagen wären. Sie gründen sich jeweils auf verschiedene Annahmen und Voraussetzungen.

α) Die Lawine kommt am Hindernis zum Stillstand

Unter der Annahme, die Lawine wirke als einheitlicher Körper, gilt der Impulssatz, welcher lautet

$$\int P \cdot dt = m \cdot v$$

Abgesehen davon, daß in dieser Gleichung die Zeit t , die die Lawine (d. h. ihr Schwerpunkt) benötigt, um zur Ruhe zu kommen, geschätzt werden müßte, ist auch die Annahme eines einheitlich wirkenden Körpers ziemlich unhaltbar.

Es liegt deshalb nahe, zur Vermeidung dieser Schwierigkeit die Lawine als Flüssigkeitsstrahl aufzufassen und die Kraft P zu berechnen, die dieser auf ein ruhendes Hindernis ausübt.

Sie beträgt:

$$P = \frac{\gamma \cdot v^2 \cdot F}{g}$$

Wobei bedeutet: γ = spezifisches Gewicht des Schnees.
 v = Geschwindigkeit der Lawine.
 F = Querschnittsfläche der Lawine.
 g = Erdbeschleunigung.

Wenn auch dieser Berechnungsweise mehr Wahrscheinlichkeit zukommen dürfte als der erstgenannten, so ist doch einzuwenden, daß die Voraussetzung (Annahme eines Flüssigkeitsstrahles) nur bei sehr beweglichem Schnee erfüllt wird.

β) Die Lawine umfließt das Hindernis

Um hier zum Ziele zu gelangen, müssen wir die Lawine als strömende Flüssigkeit von unbegrenztem Querschnitt betrachten. Der Druck, den diese Flüssigkeit auf ein widerstehendes Hindernis ausübt, kann nach Föppl, Dynamik IV. Bd. S. 409, angegeben werden durch die Gleichung:

$$P = \xi \cdot m \cdot v^2 F = \xi \cdot \frac{\gamma}{g} v^2 F$$

Hierbei ist: P = Staudruck.
 ξ = ein Zahlenkoeffizient.
 γ = spez. Gewicht des Schnees.
 v = Geschwindigkeit.
 F = Fläche des Hindernisses.
 g = Erdbeschleunigung.

Hier treffen wir auf die Schwierigkeit, die Größe des Koeffizienten ξ zu bestimmen. Nimmt man diesen Koeffizienten mit 0,75 an, was der Annahme von

Bierbaumer¹⁾ entspricht, der hierfür, allerdings ohne nähere Begründung, Werte zwischen 0,6 und 1,0 angibt, und berechnet den spezifischen Druck $p = \frac{P}{F}$, so findet man für $\gamma = 0,3$ (gesetzter Pulverschnee) und eine Geschwindigkeit $v = 50 \text{ m/sec}^1$):

$$p = \frac{0,75 \times 0,3 \times 50^2}{9,81} = 574\,000 \text{ kg/m}^2 \\ = 5,74 \text{ kg/cm}^2$$

Der Druck p bedeutet den m i t t l e r e n spezifischen Druck auf das Hindernis. Tatsächlich wird sich jedoch der Druck nicht gleichmäßig verteilen, sondern in der Mitte der Aufprallfläche wesentlich stärker sein und nach den Rändern hin abnehmen.

8. Künstliche Veranlassung von Lawinen

Über dieses Thema hat sich W. S p r e c h e r in der Schweizer Zeitschrift für Forstwesen 1910 des längeren verbreitet. Sprecher empfiehlt zur Erreichung dieses Zwecks eine Reihe von Methoden, die jedoch nur theoretischen Erwägungen entsprangen und praktisch nicht erprobt waren. Im Laufe der Arbeiten im S p i t z - m e i l e n g e b i e t und bei Station Eigergletscher wurden nun einige praktische Erfahrungen gesammelt, die hier kurz mitgeteilt seien.

Zunächst einige Worte über die p r a k t i s c h e B e d e u t u n g der künstlichen Veranlassung von Lawinen. Diese Frage kann von besonderem Interesse sein für den Bergsteiger, der einen lawinengefährlichen Hang gerne gereinigt wissen möchte, bevor er ihn betritt, dann aber auch ganz allgemein für Gebirgsbewohner, Forstleute, Ingenieure, welche die durch die Lawinen den Verkehrswegen und Siedlungen drohenden Gefahren gerne auf einen bestimmten Zeitpunkt beschränken möchten, um nachher sicher zu sein.

Unsere Versuche erstreckten sich einerseits auf das künstliche A b s t ü r z e n v o n W ä c h t e n zur Auslösung von Lawinen, anderseits auf das A n s c h n e i - d e n l a w i n e n g e f ä h r l i c h e r H ä n g e durch gesicherte Schiläufer.

Ein erster Versuch durch W ä c h t e n a b s t u r z Lawinen auszulösen, wurde im März 1928 am First (Spitzmeilengebiet) unternommen. Die durch Abgraben zum Sturz gebrachte Wächte von 100 cbm löste eine Lawine von 25 000 cbm aus. Die Grabarbeit erwies sich jedoch als zu langwierig (wir benötigten dazu 2½ Stunden) und unwirtschaftlich. Im April 1928 versuchten wir deshalb Wächten durch Absägen mittels dünner Drahtkabel zum Absturz zu bringen, was sich außerordentlich gut bewährte. Zur Verwendung kamen Kabellängen von 20—50 m. An den Enden waren die Kabel mit hölzernen Knebeln versehen. Von sicheren Standplätzen aus wurde die Wächte durch Ausschwingen des Kabels unterfangen und dann von unten herauf durchgesägt. Mit dieser Methode gelang es oft in wenigen Minuten Wächten von vielen Tonnen zum Absturz zu bringen. Natürlich wird sich der Bergsteiger zum eventuellen Absägen von Wächten niemals mit einem Drahtkabel ausrüsten, doch kann man sich im Notfalle auch mit dem Seil behelfen.

Die zweite, von uns erprobte Methode zur Lawinenauslösung, das A n - s c h n e i d e n g e f ä h r d e t e r H ä n g e durch von oben gesicherte Schiläufer kann

¹⁾ Bierbaumer: „Sicherung des Eisenbahnbetriebes gegen Lawinengefahren“. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 1925, Heft 17.

natürlich nicht so wirkungsvoll sein wie die erstere, da die Störung des Hanges durch den Schiläufer eine wesentlich geringere ist als durch eine stürzende Wächte. Auf diese Art können deshalb nur Lawinen an solchen Hängen zum Abfahren gebracht werden, deren Schneeauflagerung sich annähernd im labilen Gleichgewichtszustand befindet.

Immerhin gelang es uns nach einem stärkeren Neuschneefall, beträchtliche Schneemassen durch Schiläufer zum Abgleiten zu bringen. Sorgfältige Sicherung vom Grat oder von vorspringenden Rippen aus ist selbstverständlich.

Außer den oben beschriebenen, von uns erprobten Methoden zur künstlichen Veranlassung von Lawinen wurden von S p r e c h e r noch andere Vorschläge gemacht, z. B. Unterspülung mit Wasser, Anwendung von Sprengmitteln. Inwieweit es möglich ist, letztere Vorschläge zu verwirklichen, muß späteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

II. TEIL:
TECHNISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN
UND SCHUTZMASSNAHMEN

E i n l e i t u n g

Schon frühzeitig wurde die Technik gezwungen, sich mit dem Schutz ihrer Bauwerke vor den Einwirkungen des Schnees und seiner Phänomene zu beschäftigen. Mit dem Problem des Lawinenschutzes befaßte sich der Mensch wohl schon seit jenen Zeiten, da er die Alpenwelt zu besiedeln begann, wenngleich planmäßige Sicherungen erst um die Mitte des vorigen Jahrhunderts (und zwar erstmals in der Schweiz) zur Durchführung kamen.

Zur selben Zeit trat auch das Problem in den Vordergrund, Verkehrswege vor Schneeverwehungen zu schützen. Brennend wurde diese Forderung vor allem durch den Bau der Eisenbahnen. Insbesondere die russische Eisenbahntechnik hatte in den weiten Steppengebieten fast vom ersten Tag ihres Bestehens an mit Schneeverwehungen zu kämpfen und hier hatte sich denn auch der Schneeschutz schon frühzeitig zu brauchbaren Methoden entwickelt.

All diese Schutzmaßnahmen sind aus der Praxis entstanden. Sie wurden unter dem Zwang der Verhältnisse ausgebildet, ohne daß hierbei theoretische Erwägungen genügende Berücksichtigung gefunden hätten. Mancherlei Fehlkonstruktionen und Mißerfolge waren die notwendige Folge, denn nur auf Grund genauester Kenntnis des physikalischen Verhaltens vom Schnee, der dynamischen und aerodynamischen Vorgänge bei Schneebewegungen und Umlagerungen lassen sich die geeignetsten Schutzmaßnahmen ermitteln.

I. Schutz gegen Schneeverwehungen

I. Vorbemerkung

Es interessiert zunächst die Frage, welche Bauwerke besonders unter Schneeverwehungen zu leiden haben und an welchen Stellen solche vorkommen. In erster Linie wären hier die Verkehrswege zu nennen: Eisenbahnen und Straßen. Besonders gefährdet sind jene Stellen, an denen diese Verkehrswege tiefer als das Gelände liegen, also in **Einschnitten**. Es sind hier dieselben Gesetze bestimmend, wie sie für die Entstehung von Plateauwächten dargetan wurden (s. S. 19). Der Wind fegt unter Mitführung von Schneeteilchen über die Ebene. Am Böschungssaume angelangt, hat die Luftströmung unter Verringerung der Geschwindigkeit Gelegenheit, sich auszubreiten. Sie verliert ihre Transportfähigkeit und lagert die mitgeführten Schneeteilchen im toten Winkel zwischen Stromlinien und Böschung als Wächte ab (s. Abb. 7!).

Es ist verständlich, daß **kleine Einschnitte mehr gefährdet sind als große**; denn je größer der Einschnitt ist, desto größer ist der ohne Störung des Verkehrs zwischen Böschung einerseits und Lichtraumprofil der Fahrzeuge andererseits mögliche Ablagerungsquerschnitt.

Des weiteren können Schneeablagerungen auf **hohen Dämmen** vorkommen, ferner an **Anschnitten** (s. Abb. 36 und 38!). Doch können diese Schneeverwehungen den äußeren Umständen entsprechend nie die Mächtigkeit erreichen, wie in Einschnitten.

Wir sehen hier dieselben Gesetze in Wirksamkeit, wie sie bei der Entstehung von Gratwächten maßgebend sind. Die mit Schnee beladene Luftströmung wird durch die Dammböschung abgelenkt und streicht hoch. An der Dammkrone angelangt, vermag sich die Luftströmung dem plötzlichen Geländeknick nicht anzupassen. Es entsteht hier ein toter Winkel, in dem die mitgeführten Schneeteilchen zur Ablagerung gelangen. Der Neigungsknick am Dammfuß wird, entsprechend dem Stromlinienverlauf, durch einen Schneekeil ausgeglichen (s. Abb. 36!).

Absolut **nicht gefährdet** sind die **niederen Dämme** (Abb. 37). Die Luftströmung erfährt durch sie keine wesentliche Ablenkung, die Dammkrone wird deshalb durch den darüber streichenden Wind frei geblasen. Im Stauraum auf der Luvseite bilden sich Schneeablagerungen und bei entsprechend steiler luvseitiger Böschung auch eine Stauwalze, die zunächst noch einen Kolk am Böschungsfuße freibläst (hinsichtlich Stauwalze s. auch S. 68!). Mit fortschreitender Schneeschüttung wird jedoch dieser Kolk ausgefüllt. Auf der Leeseite bildet sich eine kleine Wächte mit fallendem Wächtendach, die sich allmählich verbaut und schließlich im Gelände verliert.

(Näheres über die Beziehungen zwischen Geländeform, Schneeablagerungen und Windgeschwindigkeiten s. S. 60—63.)

Besonders in Mitleidenschaft gezogen durch Schneeverwehungen sind endlich **Einschnitte** (gleichgültig welcher Tiefe), die in Krümmungen liegen. Fällt der Anfang der Krümmung in die Windrichtung, so streicht der Luftstrom in den Einschnitt ein. Er kann jedoch nicht dem Verlauf der Kurve folgen, sondern wird gezwungen, die allgemeine Windrichtung beizubehalten, über die Böschung aufzusteigen und den Einschnitt zu verlassen. Hierbei büßt die Luftströmung an

Bewegungsenergie ein und lagert die Schneemassen an jener Stelle ab, wo sie den Einschnitt verläßt.

Außer den Verkehrswegen können natürlich auch alle anderen Werke von Menschenhand durch Schneeverwehungen und Wächtenbildung in Mitleidenschaft gezogen werden, so menschliche Siedlungen und Hütten, besonders im Gebirge, Stellungsbauten und Befestigungsanlagen in der Ebene wie im Gebirge usw. Doch kommt diesen Fällen infolge ihrer geringen Häufigkeit auch die geringere Bedeutung zu.

2. Einfluß der Bodenform auf die Windgeschwindigkeit

Interessante Versuche über den Einfluß der Bodenform auf die Windgeschwindigkeit wurden in den Kriegsjahren in Rußland zum Studium der Gaskampfmethode unternommen und 1916 von Kajgorodow in der Veröffentlichung der „Kriegsmeteorologischen Hauptverwaltung“ publiziert¹⁾.

Diese Untersuchungen erstreckten sich vor allem auf die Erforschung der Windbewegungen bei verschiedenartigen Geländeformen, so in Talsenkungen, Schluchten, an Gehängen usw.

Durch diese Arbeiten angeregt, wurde der Verfasser veranlaßt, ähnliche Messungen mittels Flügelradanemometer an Erdbauobjekten (Dämmen, Ein- und Anschnitten) vorzunehmen und den Einfluß dieser Objekte auf die Windgeschwindigkeiten und die Bildung von Schneeablagerungen zu ermitteln.

a) MESSUNGEN AN EINEM HOHEN DAMM

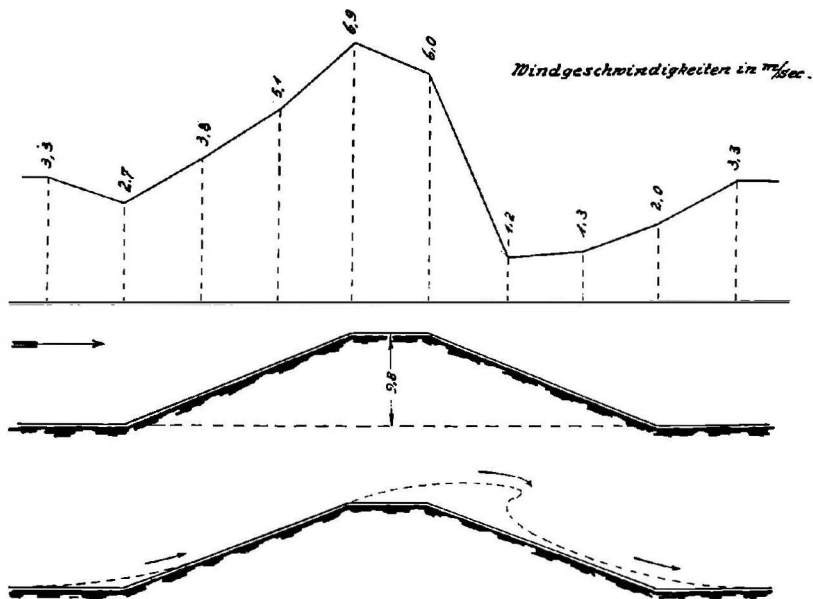


Abb. 36. Windgeschwindigkeiten und Windbewegungen an einem hohen Damm

¹⁾ Kajgorodow: „Material für die Beurteilung des Geländeeinflusses auf Geschwindigkeit und Richtung des Windes an der Erdoberfläche.“ Hierüber berichtet W. K. Dorochowski in *Technika i Ekonomika* 1923, Nr. 12. Auszugsweise ins Deutsche übertragen von Dr.-Ing. Saller, *Bautechnik* 1924, Heft 8.

In Abb. 36 sind die Ergebnisse dieser Messung graphisch dargestellt. Es zeigt sich, daß der Wind am Fuß des Dammes seine normale Geschwindigkeit etwas verlangsamt, da die Stromlinien hier bereits nach oben ausbiegen, der Wind also den Winkel nicht voll bestreicht. (Ablagerungsstelle für Schnee.) Bis zum oberen Ende der luvseitigen Böschung steigert sich infolge Zusammendrängung der Stromlinien die Geschwindigkeit ständig. Im Bereich der Dammkrone nimmt sie bereits wieder ab und am Leehang sinkt sie rasch auf geringe Werte herab, da sich die Stromlinien dem plötzlichen Geländeknick nicht anzugleichen vermögen. Hier findet deshalb auch die Hauptablagerung von Schnee statt, die als Wächte gegen die Leeseite weiterwächst. Im Rücken des Dammes wird sich die Strömung allmählich wieder dem Gelände anschmiegen, so daß die Geschwindigkeit dementsprechend wieder ihren normalen Wert erreicht. Die negativen Werte auf der Leeseite lassen auf rückläufige Luftbewegungen, d. h. auf Bildung von Luftwalzen, schließen.

b) MESSUNGEN AN EINEM NIEDEREN DAMM (Abb. 37)

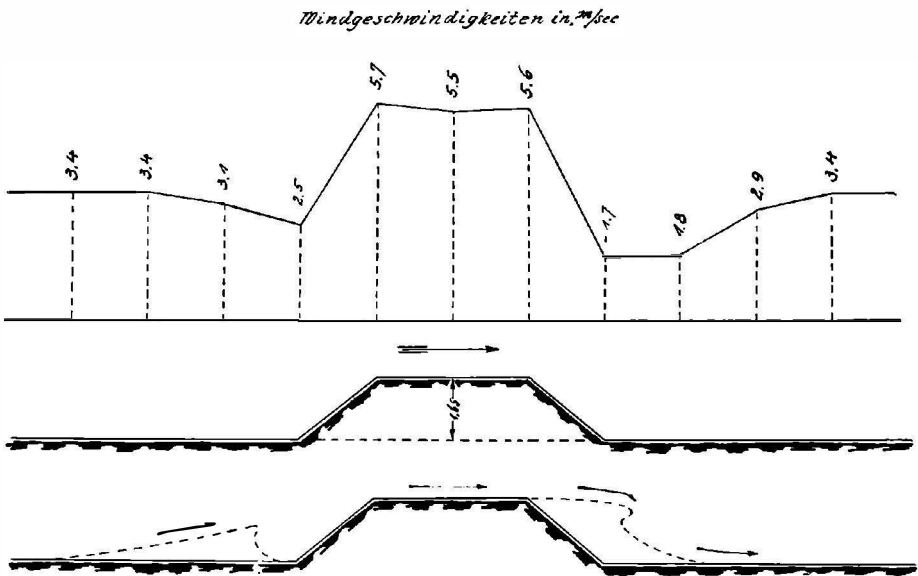


Abb. 37. Windgeschwindigkeiten und Windbewegungen an einem niederen Damme

Hier zeigt sich ein wesentlicher Unterschied gegenüber den Windbewegungen an einem hohen Damme, der vor allem darin begründet ist, daß die Luftströmung durch den niederen Damme keine wesentliche Ablenkung erfährt, die Dammkrone also voll bestreichen kann. Wie aus dem Diagramm zu ersehen ist, kommt der Wind mit einer konstanten Geschwindigkeit von 3,4 m/sec. an. In der Nähe des Hindernisses macht sich bereits eine Stauwirkung geltend. Die Stromlinien biegen nach oben aus, die Windgeschwindigkeit sinkt. Vom Böschungsfuß bis zur Dammkrone steigt infolge Zusammendrängens der Stromlinien die Geschwindigkeit rasch an und erreicht an der vorderen Kronenkante ihren Größtwert, den sie bis zur hinteren Kronenkante nahezu beibehält. Hier setzt der Sograum an, der von der Strömung nicht voll bestrichen werden kann (Absinken der Strö-

mungsgeschwindigkeit). Hier bilden sich infolgedessen wieder Schneeablagerungen in Form von kleinen Wächten.

Der Vergleich mit dem vorigen Fall zeigt, daß mit abnehmender Dammhöhe die vom Wind freigefegte Zone von Luvhang auf die Krone rückt, während der Sograum, der beim hohen Damm die Krone und den Lechhang beherrscht, vollkommen auf letzteren verlagert wird.

c) MESSUNGEN AN EINEM HANG MIT ANSCHNITT (Abb. 38)

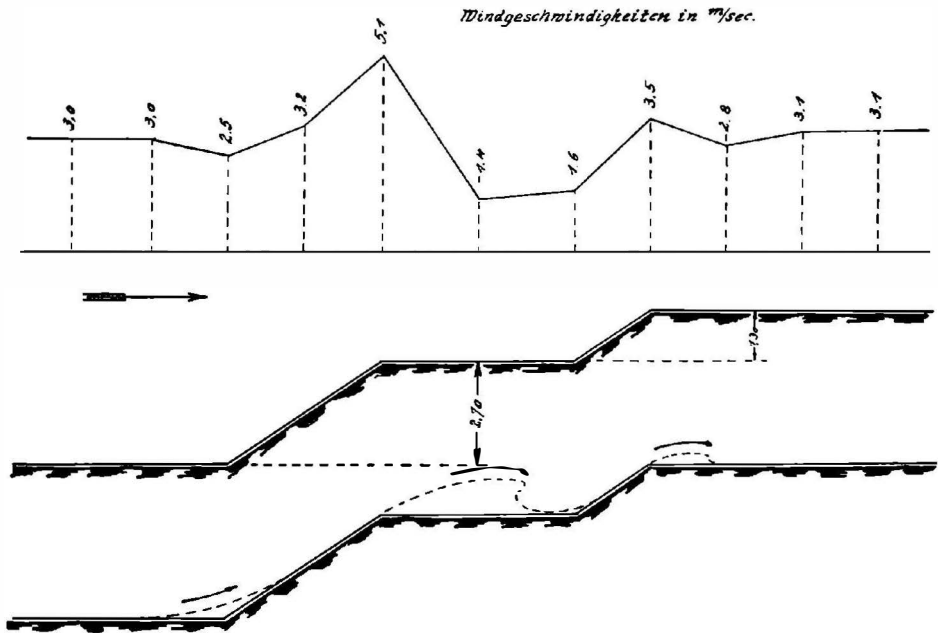


Abb. 38. Windgeschwindigkeiten und Windbewegungen an einem Hang mit Anschnitt

Die Luftströmung verlangsamt am Böschungsfuß etwas ihre Geschwindigkeit (toter Winkel), strömt unter ständiger Vergrößerung derselben die Böschung empor, erreicht an der Anschnittsvorderkante ihren Maximalwert und fällt dann rasch ab, da sie den toten Winkel nicht bestreichen kann. Sie steigt daraufhin bis zur Oberkante der Anschnittsböschung abermals an, ohne jedoch den Maximalwert von früher zu erreichen, fällt hinter dieser Kante ab (Strömung kann sich dem Geländeknick nicht anschmiegen) und erreicht schließlich wieder annähernd ihren Normalwert.

Es zeigt sich auf Grund dieser Messung weiterhin, daß die Windgeschwindigkeit auf der höheren Geländeterrasse wieder nahezu auf denselben Wert zurücksinkt, den sie auf der niedrigeren Terrasse innehatte. Es ergibt sich daraus, daß die Luftströmung sich in weitgehendem Maße der Geländegestaltung anzuschmiegen vermag und daß wesentliche Unstetigkeiten im Strömungsverlaufe nur durch plötzliche starke Geländeknicke bedingt sind. Es deckt sich diese Beobachtung mit jener von Kajgorodow, welcher feststellte, daß an sanften Gehängen die Windgeschwindigkeit vom Fuße bis zum Kamm nahezu konstant bleibt.

d) MESSUNGEN AN EINEM EINSCHNITT (Abb. 39)

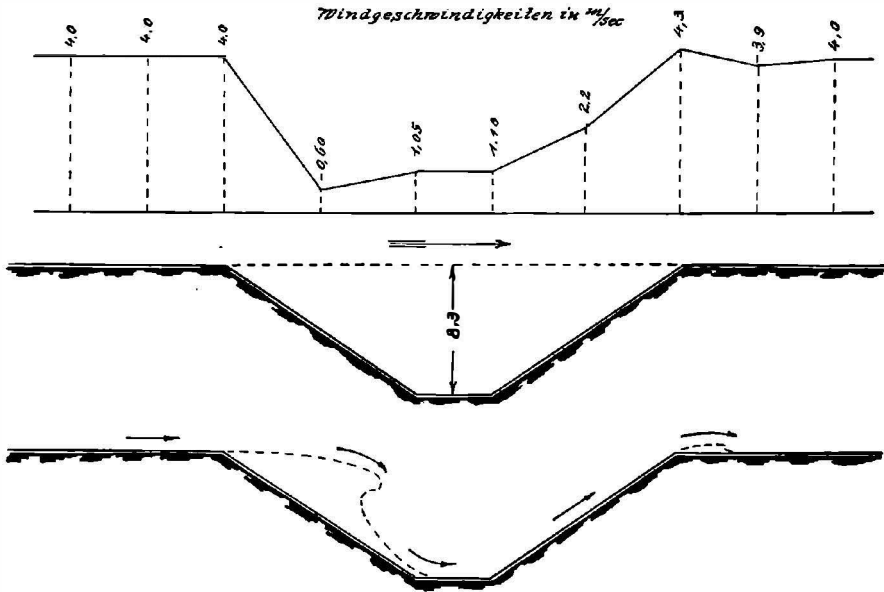


Abb. 39. Windgeschwindigkeiten und Windbewegungen an einem Einschnitt

Das Geschwindigkeitsdiagramm zeigt folgendes Bild: Der Wind streicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit über die Ebene. Hinter der Kante, im Windschatten des Leehanges, sinkt die Geschwindigkeit rasch ab, da sich die Strömung dem plötzlichen Neigungsbruch nicht anzuschmiegen vermag. Hier setzen auch die Schneeablagerungen an. Bis zur Grabensohle nimmt die Geschwindigkeit wieder etwas zu, um dann bis zum Fuß der aufsteigenden Böschung annähernd gleich zu bleiben. Der Luftstrom streicht dann die Böschung empor, die Stromlinien werden zusammengedrängt, die Geschwindigkeit vergrößert sich und erreicht an der Kante ihren Maximalwert. Jenseits der Kante erfolgt nochmals ein kleines Absinken der Geschwindigkeit, da die Strömung sich dem Geländeknick nicht anzuschmiegen vermag (linsenförmige Schneecablagerung!). Erst in einiger Entfernung vom Einschnitt erreicht die Geschwindigkeit wieder ihren Normalwert.

3. Schneeschutzanlagen (Allgemeines)

Die Vorkehrungen des Schneeschutzes seien in erster Linie unter dem Gesichtspunkt des Schutzes von Verkehrswegen betrachtet, da diese Frage die weitest große Rolle auf dem Gebiete des Schneeschutzes spielt. Man unterscheidet hier zweierlei Maßnahmen, nämlich

1. solche, die den Schnee über den Verkehrsweg hinwegführen sollen, ohne daß er sich darauf ablagern kann,
2. solche, die den Schnee zur Ablagerung bringen sollen, bevor das zu schützende Objekt erreicht.

Ich möchte von vornherein feststellen, daß die Maßnahmen erster Art mit einer bedingten Ausnahme (Abflachen der Einschnittsböschungen) als verfehlt zu betrachten sind. Wenn sie trotzdem heute noch empfohlen werden, so

beruht dies wohl auf der Unkenntnis der aerodynamischen Vorgänge und der Wirkungsweise dieser Anlagen. Eine befriedigende Lösung der Schneeschutzfrage ist im allgemeinen nur durch Maßnahmen der zweiten Art zu erzielen. Die Maßnahmen ersterer Art wurden jedoch im folgenden erwähnt, einerseits aus historischem Interesse, anderseits um aus verfehlten Anlagen Schlüsse zu ziehen für zweckmäßige Schutzmaßnahmen.

4. Maßnahmen, durch die der Schnee über den zu schützenden Verkehrsweg hinweggeführt werden soll

a) ABFLACHEN DER EINSCHNITTSBÖSCHUNGEN AUF EINE NEIGUNG VON 1 : 10

Diese Maßnahme fußt auf der Beobachtung, daß die Luftströmung Geländemulden, die mit einer Neigung von $\frac{1}{8}$ geböschet sind, noch voll zu bestreichen vermag, ohne daß hierbei Luftwalzenbildung und Schneeablagerung eintritt. Diese Beobachtung stimmt mit der weiteren Erfahrungstatsache überein, daß beim Verwehen von Einschnitten die Oberfläche der Schneewehe sich in einer Neigung von $\frac{1}{8}$ einstellt. (Auch bei Schneeablagerungen an Schneezäunen kann stets eine Neigung der Oberfläche von etwa $\frac{1}{8}$ beobachtet werden; siehe hierüber S. 77).

Um mit dieser Methode Erfolg zu erzielen, ist es jedoch notwendig, die Einschnittsböschung bis zur Sohlenkote der beiderseitigen Gräben abzufachen, damit der Bahn- bzw. Straßenkörper als niederer Damm aus dem Grund der Mulde einporragt und so vom Winde mit erhöhter Kraft bestrichen und freigekehrt werden kann (s. Abb. 40). Verfehlt wäre es, die Abflachung der Ein-

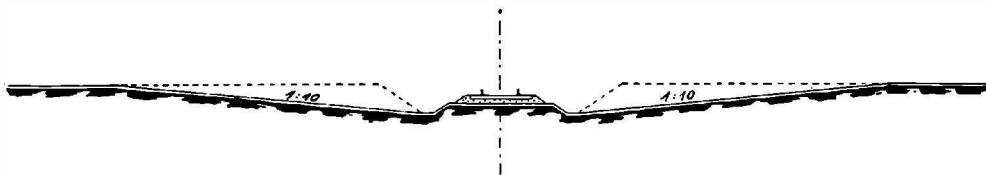


Abb. 40. Abgeflachte Einschnittsböschungen

schnittsböschungen nur bis auf die Höhe der Beltungs- bzw. Fahrhahnoberkante vorzunehmen. Der Wind ist dann nicht mehr in der Lage, den Bahn- bzw. Straßenkörper freizuwehen. Der durch normale Schneesedimentation auf dem Verkehrsweg abgelagerte Schnee wird durch Fahrzeuge oder Schneepflüge zur Seite gedrückt und häuft sich beiderseits an (s. Abb. 41!). Damit sind die Vorbedingun-

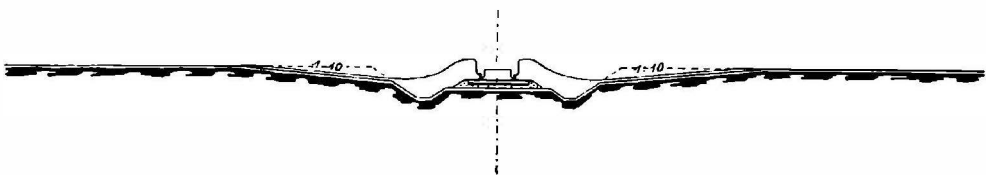


Abb. 41. Schneeablagerungen in einem Einschnitt mit ungenügend abgeflachten Böschungen

gen gegeben für die Bildung von Schneeverwehungen. Der entstandene Graben füllt sich bei jedem Gutwetter wieder mit Schnee, der vom folgenden Gefährt abermals zur Seite gedrückt werden muß. Das „Spiel“ wiederholt sich so lange bis kein Durchkommen mehr möglich ist.

Die Methode der Böschungsabflachung bedingt erhöhte Kosten für Erdarbeiten und Grunderwerb. Sie ist deshalb nur in Gegenden wirtschaftlich, wo Grund und Arbeitskräfte billig sind. In früheren Jahren kam sie vielfach in Rußland zur Anwendung, doch ist man auch hier in jüngerer Zeit zur ausgedehnteren Anwendung anderer Schneeschutzmethoden übergegangen.

b) ABLENKUNGSBAUTEN

Diese sollen dem Zwecke dienen, entweder die mit Schnee beladene Luftströmung über den Verkehrsweg hinwegzuführen, oder den Wind auf den Straßen- bzw. Bahnkörper hinzuführen, so daß durch seine Anriffskraft derselbe freigefegt wird.

Zu den Maßnahmen erster Art gehören die 6 m hohen Schneeschutzmauern, wie sie 1869 bereits im Karst zum Schutz von Bahnen errichtet wurden. Durch diese Mauern sollte der Luftstrom eine derartige Ablenkung nach oben erfahren, daß der mitgeführte Schnee „in hohem Bogen über die Bahn hinweggetrieben wird“. Diese Annahme beruht jedoch auf einer vollkommenen Unkenntnis des tatsächlichen Stromlinienverlaufes. Die Stromlinien biegen hinter jedem Hindernis hinter jeder Kante um (s. Abb. 5) und diesem Strömungsverlauf folgen auch die mitgeführten Schneeteilchen, die daraufhin im Windschatten hinter dem Hindernis abgelagert werden. Die Luftströmung kann deshalb niemals in der Lage sein, den Schnee „in hohem Bogen“ fortzuführen. Wenn diese Mauern tatsächlich Schutz gewähren, so beruht die Wirkung darauf, daß der Schnee zum einen Teil in dem Stauraum vor der Mauer sedimentiert wird, zum anderen (bei genügendem Abstand der Mauern von der Bahnachse) in dem freien Raum zwischen der Mauerrückfläche und dem Lichtraumprofil der Fahrzeuge (s. Wirkungsweise der Schneezäune, S. 68 und 69).

Auch Rudniki glaubte durch besondere Maßnahmen den Schnee über den zu schützenden Verkehrsweg hinwegführen zu können. Er ersann pyramidenförmige Körper, 11 m breit und 6 m hoch, die mit Zwischenräumen von 1 m möglichst nahe am Gleis aufgestellt wurden. Die Geschwindigkeit des ankommenden Windes sollte beim Durchstreichen der Zwischenräume so gesteigert werden, daß der Schnee im Bogen über den zu schützenden Einschnitt hinweggeführt und eine Ablagerung hinter den Pyramiden vermieden wird. Die mit dieser Schutzwehr angestellten Versuche zeitigten jedoch — wie nicht anders zu erwarten — einen vollkommenen Mißerfolg. Der Luftstrom bewegte sich weder in der gewollten Bahn, noch wurden Schneeablagerungen hinter den Schutzwehren vermieden. Es bildeten sich vielmehr hinter den einzelnen Pyramiden aus verständlichen Gründen lange Schneewehen, die den naheliegenden Verkehrsweg besonders gefährdeten.

Während durch die bisher besprochenen Anordnungen der Luftstrom über den Einschnitt hinweggeführt werden sollte, beruht die Anordnung von Howie auf dem Bestreben, den Wind auf den Verkehrsweg hinzulenken und so ein ständiges Freiwehen desselben zu bewirken. Er suchte diese Wirkung durch schräge, auf der Einschnittsböschung aufgestellte Tafeln zu erreichen (Abb. 42). Durch diese Anordnung wird zwar der Wind auf den Grund des Einschnitts hinabgedrückt, verliert aber hier durch die Querschnittserweiterung ferner durch das Hochstreichen an der jenseitigen Böschung soviel an Bewegungs-Energie und Transportfähigkeit, daß der Schnee sich abgelagert. Verschlimmert wird diese Wirkung

durch etwa vorhandene Tafeln auf der jenseitigen Böschung bei beiderseits gefährdeten Einschnitten (s. Abb. 42).

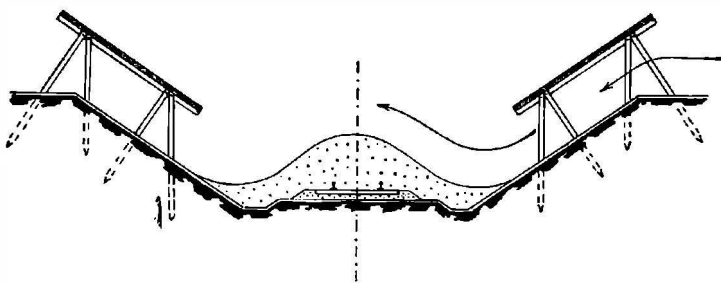


Abb. 42. Schneeschutzanordnung von Howie
Schneeablagerung im Einschnitt infolge verfehlter Wirkung der Ablenkungstafeln

Auch die sogenannte „englische Bauweise“ hofft durch Hinabführen des Windes in den Einschnitt und durch Verstärken der Windwirkung ein Freiwehen desselben zu bewirken. Die Anordnung besteht aus vollen, gegen den Bahnkörper geneigten Tafeln, die auf senkrechten Pfosten längs der Böschungskante aufgestellt werden. Die tatsächliche Wirkung (s. Abb. 43) entspricht jedoch in keiner Weise der gewollten. Ein Teil des mitgeführten Schnees lagert sich infolge Stauwirkung vor dem Schild ab; der Wind streicht hierauf mit erhöhter Geschwindigkeit unter dem Schild hindurch. Im Einschnitt verlangsamt die Luftströmung ihre Geschwindigkeit wieder, die Windenergie wird geschwächt (durch Querschnittserweiterung, ferner durch turbulente Strömungen und das Emporsteigen an der jenseitigen Böschung), so daß der Rest des mitgeführten Schnees sich hier ablagert. Noch ungünstiger werden die Verhältnisse bei doppelseitiger Anordnung der Schilde, da sich die Wirkungen gegenseitig verstärken. Es ist unverständlich, daß diese Bauweise in einem neuzeitlichen Bericht über den Schneeschutz von Bahnen als brauchbar aufgeführt wird¹⁾.

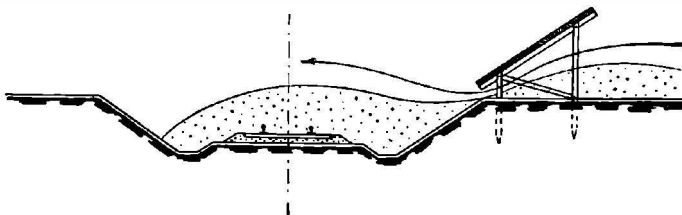


Abb. 43. Englische Bauweise
Schneeablagerung im Einschnitt infolge verfehlter Wirkung des Schildes

5. Maßnahmen, durch die Schnee zur Ablagerung gebracht wird, bevor er das zu schützende Bauwerk erreicht

a) WALDSCHUTZSTREIFEN

Ihre Wirkung besteht darin, daß der Wind beim Durchlaufen des Waldstreifens seine Geschwindigkeit derart ermäßigt, daß der Schnee vor und zwischen den Bäumen sedimentiert wird. Der Streifen muß natürlich eine solche Breite

¹⁾ P. Merle, „Protection des voies ferrées contre la neige“ in Annales des Ponts et Chaussées, 1926.

aufweisen, daß der Schnee nicht zwischen den Bäumen hindurch geweht werden kann. Die Abmessungen hängen von der gewählten Baumart ab. Laubhölzer, die im Winter das Laub verlieren, müssen breiter angelegt und dichter gepflanzt werden als Nadelhölzer. Nadelholz kam auf verschiedenen Strecken Deutschlands und des nördlichen Rußlands zur Verwendung. Laubholz (Eichen in Mischung mit Ölweide, Weißdorn und gelber Akazie) im südlichen Rußland, wo Nadelbäume nicht gedeihen.



Abb. 44. Anordnung von Waldschutzstreifen

Nadelholzstreifen werden nach Schubert zweckmäßig in einer Breite von 12,0m angelegt, wobei man sie noch 4,0m vom Böschungsaume abrückt (Abbildung 44a). Man wählt entweder Fichten allein oder untermischt sie mit Lebensbäumen, Knieholz und Kiefern. Wichtig ist es, die Bäume in einer Höhe von 2,5 bis 3 m unter Schnitt zu halten, da sonst die unteren Zweige absterben und dem Schnee den Durchtritt gestatten. Läßt man jedoch den Waldstreifen in die Höhe wachsen, so ist es notwendig, nach einigen Jahrzehnten Längsschneusen auszuheuen, die wieder mit Jungholz bepflanzt werden. Die überständigen alten Bäume werden später gleichfalls ausgehauen und durch Jungholz ersetzt (Abb. 44b). Eine andere Methode ist die, den Waldstreifen in doppelter Breite anzulegen und so zu bepflanzen, daß die eine Hälfte um 10—14 Jahre älter ist als die andere, so daß stets alle Lücken gedeckt sind. Bei wechselndem Umtriebe erhält man auf diese Weise dauernd Schutz.

Ein Nachteil der Waldschutzstreifen ist der notwendige Erwerb breiter Grundstücksstreifen. Sie kommen deshalb nur in Gegenden in Frage, wo das Gelände billig ist.

b) SCHNEEZÄUNE

Diese können entweder für Wind undurchlässig sein, wie Bohlenwände, Mauern, Erdwälle, oder mehr oder minder durchlässig, wie Hecken, Zäune, Drahtgitter. Da jedoch all diese Anordnungen in ihrer Wirkungsweise (was das Endstadium der Ablagerungen betrifft) gleich sind, seien sie auch gemeinsam behandelt.

Ein Unterschied zeigt sich nur in der Art und Weise der Ablagerung und im Fortgang derselben.

An dichten Schneeschutzbauten (s. Abb. 45) spielen sich in exakter Weise die aerodynamischen Vorgänge ab, wie sie für das Umströmen von Hindernissen bestimmend sind¹⁾. Die Stromlinien werden gezwungen, nach oben über das Hindernis auszubiegen. Dadurch bildet sich vor demselben eine Stauzone, in der sich der Schnee in erster Linie ablagert. Gleichzeitig entsteht dicht vor dem Hindernis eine Stauwalze, die — solange die Schneeablagerungen ein ge-

¹⁾ Die Vorgänge wurden an Bohlenwänden, die vor Station Eigergletscher (Jungfraubahn) zu Versuchszwecken aufgestellt wurden, eingehend studiert. Zur Sichtbarmachung der Luftbewegungen wurden Konfetti in den Wind gestreut und die Strömungen kinematographisch aufgenommen.

wisses Maß nicht überschreiten — eine Hohlkehle freibläst. Hinter dem Hindernis entsteht ein Sograum und eine Sogwalze. Schneeteilchen, welche nicht im Stauraum zur Ablagerung kamen, werden im Sograum sedimentiert (Abb. 45). Die Ablagerungen im Sograum werden anfangs gering sein. Sie werden sich jedoch verstärken mit fortschreitender Auffüllung des Stauraumes und der dadurch bedingten, ständig sich steigierenden Schneeförderung von Luv nach Lee.

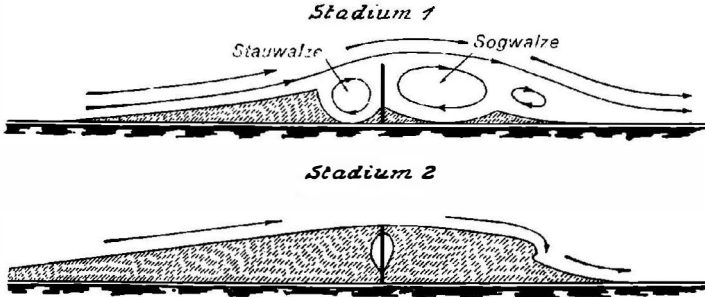


Abb. 45. Wirkungsweise eines dichten Schneeschutzzaunes

Die von der Stau- wie Sogwalze freigehaltenen Räume werden mit fortschreitender Schneesedimentation immer mehr verschwinden (nur kleine Hohlräume deuten zuletzt ihre Lage an), so daß schließlich ein einheitlicher Schneekörper entsteht, dessen Kern die Stauwand bildet (s. Abb. 45). Am leeseitigen Abfall dieses Schneekörpers wird sich nach den wiederholt erläuterten aerodynamischen Gesetzen eine kleine Wächte samt Gegenböschung ausbilden.

Ein etwas anderes Bild zeigen nun die Ablagerungen an mehr oder minder durchlässigen Hindernissen (durchlässige Zäune, Hecken und dgl.) (s. Abb. 46). Der Unterschied ist dadurch bedingt, daß die Luftströmung das Bauwerk nicht lediglich überschreitet wie im obigen Fall, sondern — wenigstens zum Teil — durch dasselbe hindurchströmt. Es entsteht dadurch vor dem Bauwerk wohl ein Stauraum, der die Bildung einer linsenförmigen Schneeablagerung bedingt, nicht hingegen eine Stauwalze, da die Voraussetzung für die Bildung einer solchen (toter Winkel, aus dem die Luft nicht abfließen kann) fehlt. Beim Durchschreiten des Hindernisses erfährt der Luftstrom infolge Querschnittsverengung eine bedeutende Erhöhung seiner Geschwindigkeit und somit seiner Transportfähigkeit, er wirkt *a u s w e h e n d*, Schneeablagerungen können sich also unmittelbar vor und hinter dem Zaun nicht bilden; es entstehen deshalb hier Kolke, ähnlich wie an der dichten Wand. Nach Durchlaufen des Hinder-

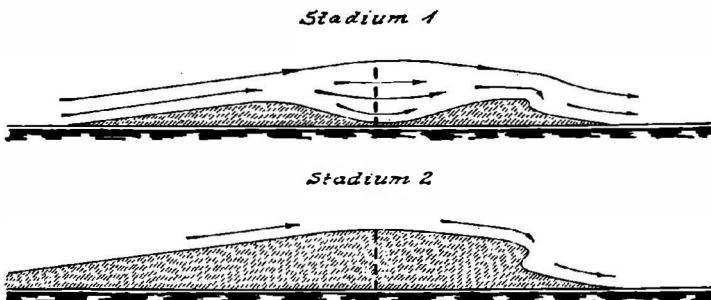


Abb. 46. Wirkungsweise eines durchlässigen Schneeschutzzaunes

nisses kann die Luftströmung sich wieder ausbreiten. Sie verlangsamt ihre Geschwindigkeit und sedimentiert hier den Rest des mitgeführten Schnees. (Diese Schneeablagerungen weisen auf ihrer Leeseite schon vom Anfang ihrer Entstehung an eine Ähnlichkeit mit Wächten auf, s. Abb. 46.)

Mit fortschreitender Ablagerung auf Luv wird der Luftstrom allmählich vollkommen über den Zaun hinweggeführt, während die Kolke mit Schnee ausgefüllt werden. Weitere Ablagerungen an diesem Schneekörper finden dann nur noch am leeseitigen Steilabfall statt, wo sich Wächte und Gegenböschung ausbilden. In ihrem Endstadium gestalten sich demnach die Ablagerungen an der dichten und der durchlässigen Wand vollkommen gleich (s. Abb. 45 und 46).

Die Erfahrung zeigt, daß bei dichten Schutzwerken sich infolge starker Stauwirkung in erster Linie die Vorlagerungen mächtig entwickeln, während die Hinterlagerungen sich langsamer bilden. Bei stark durchlässigen Schutzwerken kann hingegen beobachtet werden, daß sich infolge geringer Stauwirkung und wegen des erleichterten Schneetransportes von Luv nach Lee erst die Hinterlagerungen sedimentieren, während die Vorlagerungen verhältnismäßig schwach ausgeprägt sind. Mit zunehmender Schüttung der ersteren werden jedoch infolge Erhöhung der Stauwirkung sich auch die letzteren kräftig entwickeln. Je nach der mehr oder minder großen Dichtheit des Schneezaunes sind natürlich zahlreiche Variationen im Vorgang der Schneeablagerungen möglich.

In der Folge mögen die einzelnen Schneeschutzwerke kurz besprochen und auf ihren Wert kritisch geprüft werden.

a) Dichte Schutzwerke

Bohlenwände aus alten hölzernen Eisenbahnschwellen

Wagrecht liegende Schwellen werden hochkant zwischen zwei senkrecht gestellte Schwellen geschichtet. Die senkrechten Hölzer werden 0,70 bis 1,0 m eingegraben, so daß man je nach der Schwellenlänge Zaunhöhen von 1,50 bis 2,0 m erhält (s. Abb. 47).

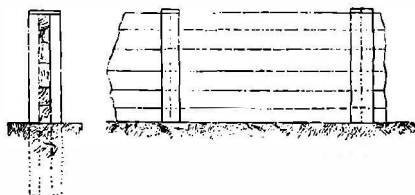


Abb. 47. Bohlenwand aus Eisenbahnschwellen

Diese Bohlenwände haben sich gut bewährt. Ihre Lebensdauer beträgt etwa 15—20 Jahre.

Bretterwände aus einsetzbaren Brettertafeln

Die einzelnen Tafeln werden in gewünschter Höhe bei einer Länge von 3,0 m und einer Bretterstärke von 2 bis 2,5 cm erstellt und zwischen senkrecht eingegrabenen Schwellen oder Pfosten eingesetzt. Diese Anordnung bietet den Vorteil, daß die Tafeln, wenn sie bis zu einem gewissen Grad eingewehlt sind, höhergestellt und durch untergenagelte Klötze fixiert werden können, so daß dadurch

eine weitere Vergrößerung des Ablagerungsquerschnittes erzielt werden kann (s. Abb. 48).

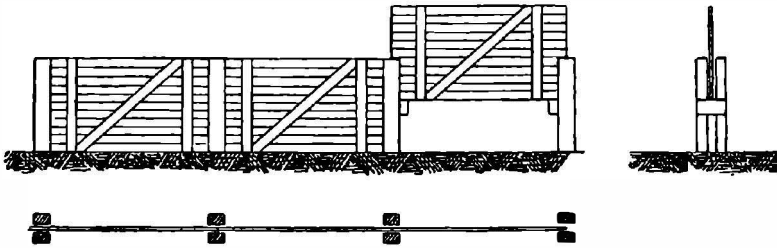


Abb. 48. Bretterwände aus einsetzbaren Bretttafeln

Der amerikanische Bockzaun

Er ist zwar im Prinzip beweglich, jedoch nur, so lange er nicht eingeschneit ist. Er gleicht demnach in seiner Wirkungsweise einem festen Zaun. Um das Überströmen des Bockes durch den Wind zu erschweren, um also die Stauwirkung zu vergrößern, ist die Stauwand durch eine vorspringende Konsole überdacht (s. Abb. 49).

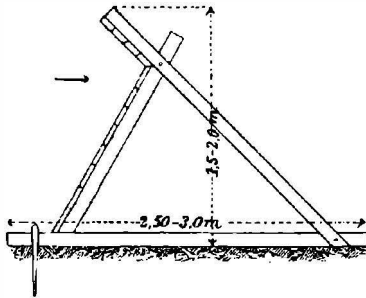


Abb. 49. Amerikanischer Bockzaun

Mauern

Diese erfüllen dieselben Dienste wie Schneeschutzzäune und besitzen noch den Vorzug einer wesentlich größeren Lebensdauer. Ihre Verwendung ist jedoch nur wirtschaftlich in felsigem Gelände, wo Bruchsteine in genügender Menge zur Verfügung stehen. Ihre Ausführung geschieht als Trockenmauerwerk, da verputztes Mauerwerk zu hohe Gestehungskosten erfordern würde.

Erdwälle

Wird das Material für die Erdwälle durch Einschnittserweiterung gewonnen (Vergrößerung des Ablagerungsquerschnittes), so wird hiermit ein doppelter Zweck

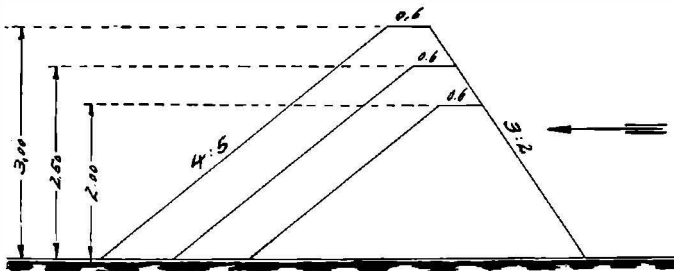


Abb. 50. Schneeschutzwälle

erreicht. Erdwälle können entweder für sich Verwendung finden oder in Verbindung mit Hecken, Zäunen und Bohlenwänden, die auf der Krone der Wälle zu versetzen sind. Die Erdwälle sind etwa nach obenstehenden Profilen auszuführen (Abb. 50); pflanzt man hingegen Hecken auf ihrer Krone an, so ist für dieselbe eine Breite von 1,0 bis 1,25 m zu wählen. Der Steilabfall der Wälle ist gegen den Wind zu richten, um seiner Wirkung einen möglichst großen Widerstand entgegenzusetzen.

β) Durchlässige Schutzwerke

Neben lebenden Hecken werden an Stelle von dichten Bohlenwänden zwecks Materialersparnis vielfach Stangengitter oder durchlässige Bretterzäune verwendet. Da die Hinterlagerungen sich mächtiger entwickeln als bei dichten Wänden (s. S. 69) sind sie etwas weiter von dem zu schützenden Objekt abzurücken als erstere.

Auch Drahtgitter fanden als Schneeschutzzäune schon Verwendung. Sie dürfen — sofern sie nicht zu weit vom schutzbedürftigen Verkehrsweg abgerückt werden sollen — höchstens 3 mm Maschenweite aufweisen (nach Schubert).

Lebende Hecken

Weitaus am meisten wird unter den durchlässigen Schutzwerken die lebende Hecke verwendet (s. Abb. 51). Als Pflanzenart dient hier in erster Linie die Fichte, dann die Hainbuche. Die Fichte bietet den Vorteil, daß sie im Winter ihre Nadeln behält, also dicht bleibt, während die Hainbuche gerade im Winter zur Zeit der Schneefälle ihr Laub verliert und damit für Wind und Triebschnee durchlässiger wird. Hecken aus Nadelholz haben hingegen den Nachteil, daß sie sich bei trockenem Wetter durch Funkenflug (aus der Lokomotive) leicht entzünden und abbrennen.

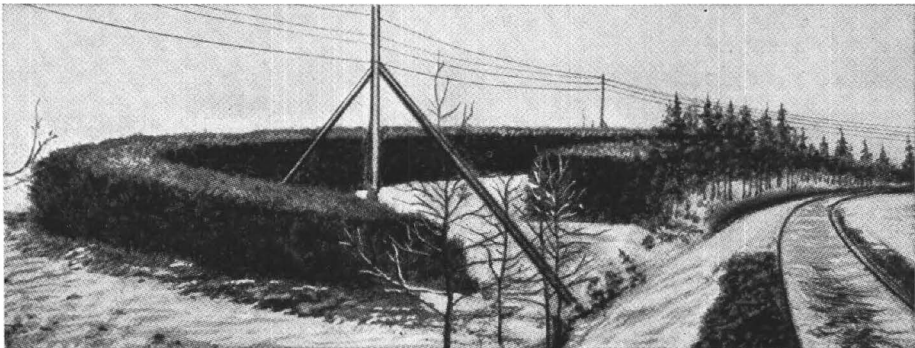


Abb. 51. Schneeschutzzaun aus lebenden Hecken

Sollen Heckenanpflanzungen dauernd ihren Zweck erfüllen, so bedürfen sie sorgfältiger Pflege. Sie müssen stets unter Schnitt gehalten werden, da sonst die unteren Zweige absterben, und die Pflanzungen damit ihre Dichtigkeit und Schutzwirkung gegen Triebschnee einbüßen. Gegenüber hölzernen Bohlenwänden und Zäunen bieten sie den Vorteil größerer Lebensdauer.

Russische Bauweise

Eine besondere Art durchlässiger Schutzwerke ist der bewegliche Schneeschild russischer Bauweise. Seit 60 Jahren schon wird er auf russischen Bahnen mit Erfolg zur Anwendung gebracht¹⁾. Man hat es hier mit einer typisch russischen Einrichtung zu tun, die m. W. in keinem anderen Land Nachahmung fand (Abb. 52!).

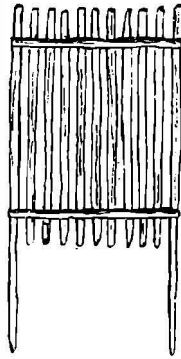


Abb. 52. Russisches Schneeschild

Diese beweglichen Schneeschutzzäune bestehen aus einzelnen, aus Latten zusammengenagelten kurzen Zaunfeldern; die Anordnung der Latten ist lotrecht. Die beiden äußersten Latten sind nach einer Seite verlängert und am Ende zugespitzt (Abb. 52). Bei Winterbeginn werden nun die Felder bockartig und wechselseitig aneinander gelehnt und zwar in der Weise, daß die zugespitzten Seitenlatten in die Höhe stehen. Bei einsetzendem Schneetreiben lagern sich vor dem Zaun infolge Stauwirkung und hinter demselben infolge Querschnittserweiterung Schneemassen ab. Ist nun der Zaun bis zu $\frac{2}{3}$ seiner Höhe eingeschnitten, so erfolgt die Umstellung in der Weise, daß nun die Schilde mit den zugespitzten Lattenfüßen in einer Flucht in den Schnee gesteckt werden und zwar auf dem leeseitigen Wall der Ablagerungen, also mit einer Verschiebung gegen den Einschnitt (siehe Abb. 53!). Nach abermaligem Einschneiden werden die Zäune wieder versetzt.

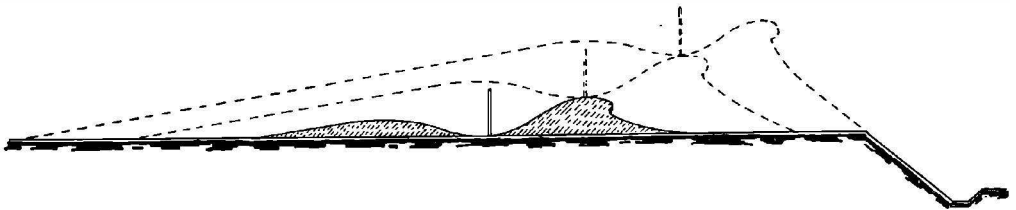


Abb. 53. Wirkungsweise der russischen Bauweise

Die durch diese Maßnahmen erzielten Schneeablagerungen können eine Höhe von 8 m erreichen. Es entstehen künstliche Einschnitte von bedeutender Größe. Durch die somit bedingte Vergrößerung des Ablagerungsquerschnitts zwischen der Böschung und dem Lichttraumprofil der Fahrzeuge wird der Verkehrsweg vor

¹⁾ Erstmals eingeführt von Ingenieur Titow im Jahre 1868 auf der Linie Moskau—Nischegorodsk.

weiteren Verwehungen geschützt. Von einer bestimmten Höhe ab kann demnach das Umsetzen der Zäune unterbleiben.

Abb. 53 stellt die Wirkungsweise der russischen Schneeschutzschilder und die einzelnen Stadien der Aufhöhung (wie sie sich aus den aerodynamischen Überlegungen auf S. 68 u. 69 ergeben) dar. Die von anderen Autoren¹⁾ gebrachten Darstellungen¹⁾ erscheinen nicht überzeugend. Sie dürften auf Grund ungenauer Beobachtungen und ohne Berücksichtigung der aerodynamischen Vorgänge zustande gekommen sein.

Schneeschutzzaun „Beku“

Eine neuartige Konstruktion ist der Schneeschutzzaun „Beku“²⁾, welcher nach untenstehender Abb. 54 aus Betonplanken mit Flacheiseneinlagen zusammengesetzt ist. Die einzelnen Planken greifen mittels Falze ineinander. An ihrem Kopfe befindet sich ein keilförmiger Schlitz, durch den ein 5 mm starker Draht gezogen wird, der die Planken miteinander verbindet und so dem ganzen System Halt gewährt.

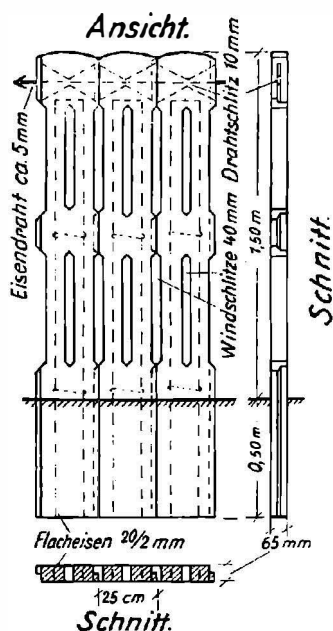


Abb. 54. Schneezäunplanke „Beku“

Dänische Bauart

Die dänische Bauart (s. Abb. 55!) ähnelt bis zu einem gewissen Grad dem amerikanischen Bockzaun. Durch die vertikale Anordnung der Stauwand und eine darüber vorkragende Konsole wird eine außerordentlich gute Stauwirkung erzielt. Erhöht könnte diese Wirkung noch werden durch eine vollkommen ge-

¹⁾ „Eisenbahnbau der Gegenwart“, Wiesbaden 1906, Abb. 46 (Schubert nach Wurzel). Ferner: P. Merle: „Protection des voies ferrées contre la neige“ in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1926.

²⁾ Firma „Beku“ Beton- und Kunststeinindustrie G.m.b.H. in Kgl. Neudorf bei Oppeln.

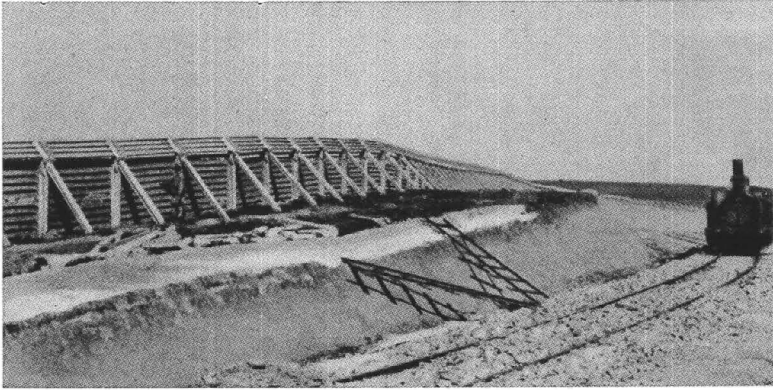


Abb. 57. Schneeschutzzaun französischer Bauart.

sten durch ebenfalls im Boden einbetonierte Schrägpfähle; diese sind am oberen freien Ende mit Seitennuten versehen, in die gleichfalls 4 Stück Betondielen eingeschoben werden. Weitere Einzelheiten sind aus der Abbildung zu ersehen.

Es scheint, daß die dänische und die ihr nachgebildete französische Bauart bis heute die beste Lösung des Schneeschutzproblems darstellt.

6. Überwölbung des Verkehrsweges

Diese Maßnahme wird nur in außerordentlich schneereichen Gegenden und bei stetig wechselnden Windrichtungen vonnöten werden, wenn alle Schutzmaßnahmen durch Schneeschirme versagen. So finden Schneeschutzdächer ausgedehnte Verwendung bei den norwegischen Gebirgsbahnen (Linie Oslo—Bergen) (s. Abb. 58!).

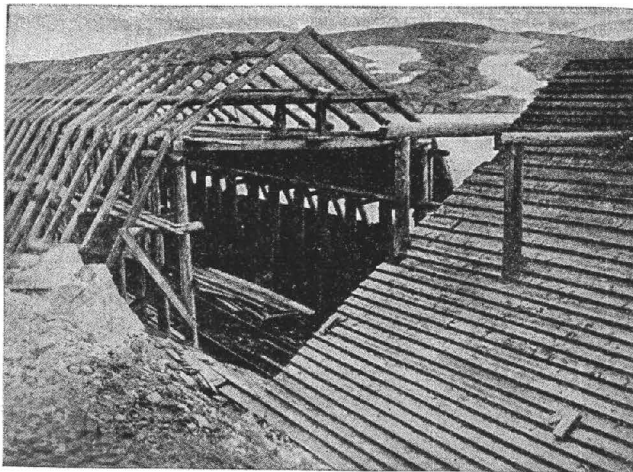


Abb. 58 Schneeschutzdach an der Linie Oslo-Bergen

Besonders gefährdet durch Schneeverwehungen sind oft Tunnelausgänge, da derartige Öffnungen im Gchänge immer Anlaß zu Unstetigkeiten in der Luftbewegung und somit zur Energievernichtung und Sedimentation von

Schnee geben. Tunnels werden deshalb zweckmäßig durch künstliche Schneedächer bis in Gegenden verlängert, die von Verwehungen frei sind.

Die Schneeschutzdächer können entweder in Beton oder Mauerwerk ausgeführt werden oder billiger in Holz (s. Abb. 58). Da diese Dächer oft viele Meter hoch vom Schnee überschüttet werden, so müssen sie für einen gewaltigen Schneedruck dimensioniert werden. Bei gesetztem und verfrorenem Schnee kann freilich eine gewisse Gewölbewirkung der überlagernden Schneemassen angenommen werden. Wenn hingegen im Frühjahr der Schnee naß wird, wodurch die innere Reibung auf einen Minimalwert verringert wird, so wirkt er nahezu mit seinem vollen Gewicht auf die Konstruktion. Einzelheiten derselben sind aus der Abbildung erkennbar.

7. Ermittlung des Ablagerungsquerschnittes¹⁾

Zur Ermittlung des Ablagerungsquerschnitts in Einschnitten ist man auf Erfahrungswerte angewiesen. Man kann im allgemeinen annehmen, daß bei Vorlandstiefen bis zu 750 m auf je 100 m Tiefe ein Querschnitt von 3 bis 5 m² zugrunde gelegt werden kann. Doch wurden auch schon bedeutend größere Querschnitte beobachtet. So sind auf der Strecke Libau—Parschnitz und Königshau—Schatzlar in Nordböhmen Schneeeablagerungen von 90 bis 120 m² Querschnitt beobachtet worden. Da die Vorlandtiefe durchschnittlich 750 m betrug, so trifft auf 100 m Tiefe ein Ablagerungsquerschnitt von 12 bis 16 m². Ähnliche Werte wurden auch schon am Karst und auf den süddeutschen Hochebenen ermittelt. Noch erheblich größere Werte wurden im südrussischen Steppengebiet beobachtet. Beträgt die Vorlandtiefe mehr als 750 m, so brauchen im allgemeinen nur etwa 2 m² Ablagerungsquerschnitt pro 100 m Tiefe gerechnet werden.

Man sieht aus diesen Darlegungen, daß der Ablagerungsquerschnitt sich niemals generell bestimmen läßt. Zu seiner Ermittlung wird es immer vonnöten sein, die örtlichen Verhältnisse in Betracht zu ziehen und Beobachtungen und Messungen an Ort und Stelle vorzunehmen. Trotzdem werden auch den Beobachtungsergebnissen bei der Fülle der Fehlerquellen immer gewisse Ungenauigkeiten anhaften.

8. Bestimmung der erforderlichen Höhe des Schneeschutzzaunes²⁾

Die folgenden Formeln stellen einen Versuch von Schubert dar, auf Grund eines bestimmten Ablagerungsquerschnitts die erforderliche Zaunhöhe zu bestimmen. Bei der Unsicherheit, die schon der Festlegung des Ablagerungsquerschnitts zugrunde liegt, kann den mittels dieser Formeln ermittelten Ergebnissen nur angenäherte Richtigkeit zuerkannt werden, zudem noch manch andere Fehlerquellen das Ergebnis beeinflussen. Die Formeln haben außerdem nur Gültigkeit für dichte Zäune (oder doch annähernd dichte Zäune), bei denen die Hinterlagerungen nicht zu weit ausgedehnt sind.

Um eine Beziehung zwischen Ablagerungsquerschnitt und Zaunhöhe aufstellen zu können, ist die Kenntnis des Neigungsverhältnisses not-

¹⁾ S. hierüber „Eisenbahnbau der Gegenwart“, Wiesbaden 1906, Abschnitt IV (Schneeschutz) von Schubert.

²⁾ S. hierüber „Eisenbahnbau der Gegenwart“, Wiesbaden 1906, Abschnitt IV (Schneeschutz) von Schubert.

wendig, unter dem sich der Schnee sowohl auf Lee wie auf Luv gegen den Zaun böschet. Beobachtungen haben gezeigt, daß dieses Neigungsverhältnis an der Luvseite größer ist als auf der Leeseite, wie ja auch die Stromlinien an der Stirnseite eines Hindernisses stärker gekrümmt sind wie an der Rückseite (Tropfenform). Schubert hat nun beobachtet, daß dieses Neigungsverhältnis auf der Luvseite in der Regel 1 : 6 beträgt, auf der Leeseite hingegen 1 : 8 — 1 : 12. Diese Werte sind natürlich in keiner Weise fest, sondern können sich je nach Umständen ändern. Insbesondere kann nach langen Sedimentationsperioden infolge der ausgleichenden Wirkung der Schneeeablagerungen noch eine wesentliche Verflachung dieser Böschungen eintreten.

Zur Vereinfachung der Rechnung und der nachstehend angeführten Formeln hat Schubert bei Aufstellung der genannten Beziehung eine gleichmäßige Neigung der lee- und luvseitigen Schneeeablagerungen von 1 : 8 angenommen.

Den Formeln liegt die Bedingung zugrunde, daß die Schneeweche höchstens bis Bettungs- bzw. Fahrbahnkante vorschreiten darf; ferner wurde die Böschungeneigung zu 1 : 1½ angenommen und der Grabenquerschnitt vernachlässigt.

Wir können dann 2 Fälle unterscheiden:

a) DER ZAUN SITZT AN DER EINSCHNITTSKANTE (s. Abb. 59)

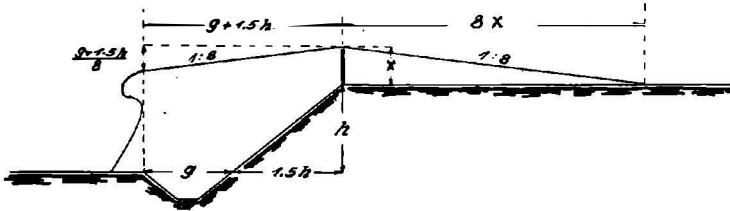


Abb. 59

Es gilt dann folgende Beziehung:

$$F = (x + h) \cdot (g + 1,5 h) - \frac{g + 1,5 h}{2} \cdot \frac{g + 1,5 h}{8} - \frac{1,5 h^2}{2} + 4 x^2$$

Durch Auflösung dieser Gleichung nach x erhält man die erforderliche Zaunhöhe zu

$$x = \sqrt{\frac{F}{4} + \frac{g^2}{32} - \frac{5 gh}{32} - \frac{15 h^2}{128}} - \frac{g + \frac{3}{2} h}{8}$$

Für h = 0 (also am Anfang eines Einschnittes) wird

$$x = \sqrt{\frac{F}{4} + \frac{g^2}{32}} - \frac{g}{8}$$

Setzt man x = 0 und löst obige Gleichung nach h auf, so erhält man die Einschnittstiefe, bei welcher der Zaun unnötig wird, zu:

$$h = \sqrt{\frac{64}{39} F + \frac{64}{117} g^2} - \frac{4}{3} g$$

Der Zaun muß demnach am höchsten sein zu Beginn des Einschnitts und kann mit zunehmender Tiefe desselben an Höhe abnehmen. Bei einer gewissen Einschnittstiefe ist er überhaupt entbehrlich.

b) DER ZAUN IST VON DER EINSCHNITTSKANTE ABGERÜCKT (s. Abb. 60).

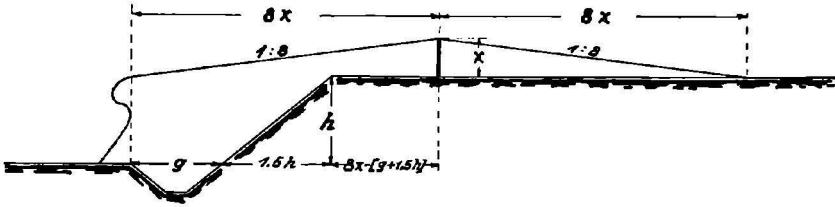


Abb. 60

Unter der Annahme, daß sich der abgelagerte Schnee in einer Neigung von $\frac{1}{8}$ bösch, ergibt sich der größte Ablagerungsquerschnitt bei einem Abstand von der Bettungs- bzw. Fahrbahnkante gleich der achtfachen Zaunhöhe (s. Abb. 60). Die erforderliche Zaunhöhe ergibt sich aus der Beziehung

$$F = 8x^2 + gh + 0,75h^2$$

durch Auflösen nach x zu:

$$x = \sqrt{\frac{F}{8} - \frac{gh + 0,75h^2}{8}} \quad 1)$$

Diese Formel hat nur so lange Gültigkeit, als der Zaun nicht an die Einschnittskante rückt, so lange also

$$8x \geq g + 1,5h^1)$$

Steht der Zaun an der Einschnittskante, so ist der Ablagerungsquerschnitt nach der unter a) angegebenen Gleichung zu berechnen.

Soll der Einschnitt ganz von Verwehungen freibleiben, sollen also die Ablagerungen in ebenes Gelände fallen, so wird die Zaunhöhe

$$x = \sqrt{\frac{F^1}{8}}$$

Der Abstand von der Böschungskante muß dann mindestens $8x$ betragen.

Ist bei weiten Einzugsgebieten der notwendige Ablagerungsquerschnitt so groß, daß er nur durch eine abnorm große Zaunhöhe zu erreichen wäre, so ist es zweckmäßiger den erforderlichen Querschnitt durch hintereinandergeschaltete Zaunsysteme zu erzielen.

Der Abstand der einzelnen Zaunreihen ist so zu wählen, daß die Summe der Einzelquerschnitte den erforderlichen Gesamtquerschnitt ergibt.

9. Anordnung der Schneeschutzzäune

Die Schneeschutzzäune erreichen den bestmöglichen Wirkungsgrad, wenn sie senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung aufgestellt sind. Geschlossene Zaunreihen längs der Bahn- bzw. Straßenachse sind deshalb nur zweckmäßig, wenn die Hauptwindrichtung annähernd senkrecht zu dieser streicht. Andernfalls sind die Zäune in Teilstücke aufzulösen und gestaffelt aufzustellen. Hierbei ist dafür zu sorgen, daß sich (in der Projektion der Hauptwindrichtung) die Enden der Zäune überdecken, so daß nirgends eine Lücke entsteht, durch die Schnee hindurchgeweht werden könnte.

1) Formeln vom Verfasser abgeändert nach Schubert.

Schwierig gestaltet sich die Schneesicherung, wenn die Hauptwindrichtung annähernd parallel zur Bahnachse verläuft. Es ist in diesem Fall nur möglich, die Schilde schräg zur Windrichtung (und somit zur Bahnachse) aufzustellen (s. Abb.61). Größere Erfahrungen hierüber liegen bei den norwegischen Gebirgsbahnen vor¹⁾, wo sich ein Winkel von 25—30° zur Windrichtung als zweckmäßig erwiesen hat. Durch diese Anordnung wird bei eintretendem Guxwetter der Schnee vom Gleis weg- und längs der Schirme nach außen getrieben. — Kommen gelegentlich auch andere Windrichtungen vor, so ist die Bahn durch weitere entsprechend orientierte Schirmsysteme auch gegen diese zu schützen (s. Abb.61!).

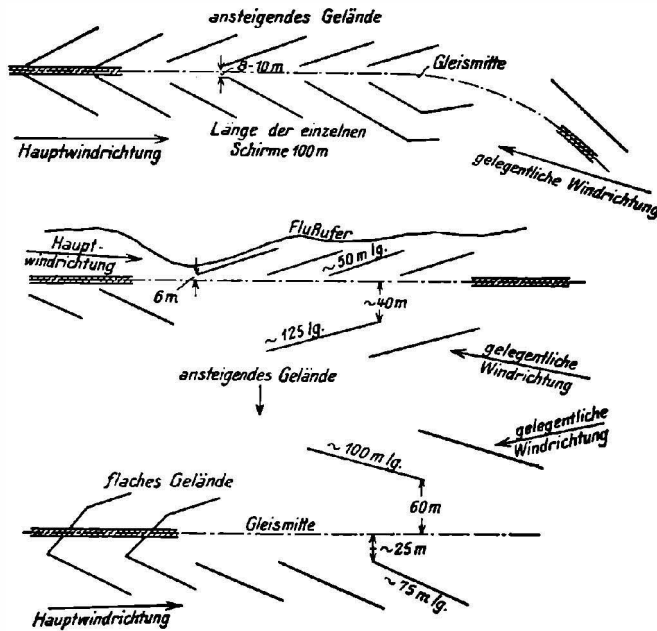


Abb.61. Anordnung der Schneeschutzzäune

Eines besonderen Schutzes gegen Verwehung bei wechselnder Windrichtung bedürfen die Einschnittsenden. Würden die Zaunenden hier unvermittelt aufhören, so würde bei schräg zur Bahnachse streichenden Winden Schnee in den Einschnitt hineingeweht werden. Um dies zu verhindern, führt man entweder um die beiden Endpunkte des Längszaunes halbkreisförmig einen zweiten Zaun herum (s. Abb. 51, 62 a und 63) oder man führt die Enden der

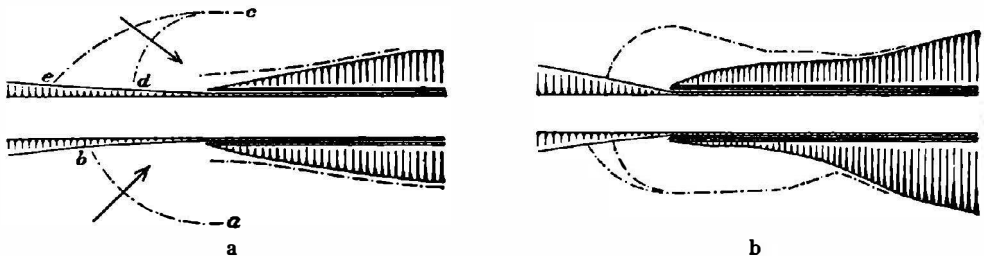


Abb. 62. Sicherung von Einschnittsenden

¹⁾ Aufsatz von Lorange in „Engineering News Record“ vom 24. Februar 1927.

Schneezäune in einem Bogen gegen die Bahn hin (s. Abb. 62 h). Zur Verstärkung der Wirkung werden auch beide Maßnahmen gleichzeitig angewendet oder mehrere Zäune hintereinander geschaltet.



Abb. 63. Bogenförmig angeordneter amerikanischer Bockzaun zur Sicherung eines Einschnittsendes

10. Gesichtspunkte für die Anlage von Verkehrswegen und die Wahl geeigneter Schneeschutzmittel

Es ist verständlich, daß die Verwehungsgefahr überall da am größten ist, wo der Wind ungehemmt über weite Flächen streichen kann und wo ihm ein großes Einzugsgebiet zur Verfügung steht. Sie ist also auf Ebenen größer wie im Gebirge, auf Höhenrücken größer wie in Geländemulden, auf Luvhängen größer wie auf Leehängen.

Bei Trassierung von Bahnen und Straßen wird es freilich nur selten möglich sein, diese Erkenntnisse in weitgehendem Maße zu berücksichtigen. Eine mäßige Rücksichtnahme ist hingegen oft möglich. So wird man in welligem Gelände die Höhenzüge meiden und die Talmulden aufsuchen, man wird Leehängen gegenüber Luvhängen¹⁾ den Vorzug geben. Man wird die Linie im Schutze von Wäldern führen und freie Flächen meiden.

Was endlich die bauliche Ausgestaltung eines Verkehrsweges betrifft, so ist die wirksamste vorbeugende Maßnahme die Vermeidung aller kleinen Einschnitte und die Führung des Weges auf niederem Damm, selbst unter Inkaufnahme erhöhter Anlagekosten.

Unter den Schneeschutzmitteln sind (neben der vollkommenen Überdachung des Verkehrsweges) alle jene brauchbar, die den Trieb Schnee zur Ablagerung bringen, bevor das zu schützende Objekt erreicht.

Als wirksamste, aber auch kostspieligste dieser Maßnahmen sind die Waldschutzstreifen anzusehen.

Unter den Schneezäunen dürfte wegen der durch die vorragende Konsole erhöhten Stauwirkung die dänische Bauart die besten Dienste tun, desgleichen die ihr nachgebildete französische Bauart in Eisenbeton. Doch auch die gewöhnlich üblichen Schneeschutzzäune aus einfachen Bretter- und Bohlenwänden oder aus Eisenbetonplanken stehen den erstgenannten Bauweisen an Wirksamkeit wenig nach.

Hecken haben den Nachteil, daß sie stets sorgfältiger Pflege bedürfen, bei Absterben einzelner Bäumchen und Äste undicht werden und infolge Funkenflug (bei Eisenbahnen) leicht abbrennen (insbesondere Nadelhölzer).

¹⁾ Lee und Luv hinsichtlich der vorherrschenden Windrichtung.

Erd- und Steinwälle kommen wohl nur in Gegenden in Frage, wo andere Baustelle schwer zu beschaffen sind (Gebirge, Steppen).

Die russische Bauweise endlich ist nur in Gegenden zweckmäßig, wo große Tribschneemengen aus weiten Einzugsgebieten abzufangen sind und wo seitlich der Verkehrswege genügend Raum zu deren Sedimentation zur Verfügung steht (also in russischen Steppengebieten).

Was endlich das Maß der Durchlässigkeit betrifft, so wurde bereits oben betont, daß es lediglich den Ablagerungsvorgang beeinflußt; in ihrer Endwirkung sind hingegen undurchlässige und durchlässige Bauwerke gleichwertig. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen (Materialersparnis) wird man oft die durchlässigen Bauwerke vorziehen.

II. Schutz gegen Lawinen

1. Vorbemerkung

Seit historischer Zeit haben die Lawinen Opfer an Gütern und Menschenleben gefordert; trotzdem bestand bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts die einzige Schutzmaßnahme in der Meidung der Gefahr. Gefährdete Wege wurden im Winter nicht begangen und befahren und Siedlungen nur an geschützten Stellen angelegt. Die Technik früherer Jahrhunderte war auch gar nicht befähigt, einem Naturereignis, wie es die Lawinen darstellen, wirkungsvoll entgegenzutreten.

Dieser Zustand änderte sich durchgreifend, als mit der Entwicklung des neuzeitlichen Verkehrs die Notwendigkeit einer planmäßigen Bekämpfung der Lawinengefahr in den Vordergrund trat.

Das Land, welches durch seine geographische und verkehrspolitische Lage zuerst darauf hingewiesen wurde, sich mit dem Problem des Lawinenschutzes zu befassen, ist die Schweiz. Hier entwickelten sich denn auch zuerst brauchbare Methoden, die im Laufe der Zeit auch von anderen Ländern übernommen und weiterentwickelt wurden. Insbesondere war es der Schweizer Oberforstinspektor Dr. J. Coaz, der sich um das Problem des Lawinenschutzes große Verdienste erworben hat.

2. Sicherungsmethoden

(Allgemeines)

Als Schutzmittel gegen Lawinen gibt es eine Reihe von Methoden, die sich meist im Laufe der Jahrzehnte aus der Praxis entwickelt haben. Man unterscheidet etwa folgende Maßnahmen:

Die Bekämpfung der Grundursachen, also die Verhinderung der Entstehung lawinengefährlicher Schneelagen,

die Bepflanzung oder Verbauung der Abbruchgebiete,

die Ablenkung des Lawinensturzes durch Leitwerke in Gebiete, wo er keinen Schaden anrichten kann und endlich

der unmittelbare Schutz von Bauwerken. Als letztes wäre noch der

telegraphische bzw. telephonische Warnungsdienst zu erwähnen, für Fälle, wo alle baulichen Maßnahmen zu unwirtschaftlich erscheinen.

3. Bekämpfung der Grundursachen

Der Gedanke, die Lawinen in ihren Grundursachen zu bekämpfen, drückt sich in dem Bestreben aus, von vornherein zu verhindern, daß eine für die Lawinenbildung günstige Schneelage bzw. Schneebeschaffenheit entsteht. Dieser Idee ist vor allem die durch die Untersuchungen der letzten Jahre erhärtete Erkenntnis förderlich, daß für Lawinen disponierte Schneelagen seltener aus normal sedimentiertem Schnee, als aus umgelagertem Schnee gebildet werden, ferner, daß die durch Windumlagerung angehäuften Schneemassen oft eine Mächtigkeit aufwiesen, wie sie durch normale Sedimentation niemals erreicht wird¹).

Diese Tatsachen legen den Gedanken nahe, in geeigneten Fällen ein luvseitiges Verbaunungssystem zu schaffen, indem man entweder die Trieb-schneeursprungsgebiete oder bei zu großer Ausdehnung derselben wenigstens die gratnahen Partien des Luvhanges durch Bohlen- und Mauerwände verbaut und so den Schneetransport von Luv nach Lee und damit die Bildung großer Schneecansammlung auf Lee verhindert (s. Abb.64!). In der Regel wird es genügen, den Luvhang in der Nähe der Gratregion durch ein System hintereinandergestellter Bohlenwände oder Steinmauern zu verbauen. Dieselben werden auch den von entfernteren Zonen herangewehten Trieb-schnee zurückhalten und zur Ablagerung bringen. Voraussetzung ist nur, daß der durch die Anordnung, die Anzahl und die Höhe der Bohlenwände bedingte Ablagerungsquerschnitt der durch die Größe des Einzugsgebietes und die Höhe der Niederschläge bedingten Schneemenge entspricht. Diese angedeuteten Beziehungen in mathematische Formeln pressen zu wollen, erscheint ziemlich aussichtslos, vor allem wegen der Fülle der das Ergebnis beeinflussenden Fehlerquellen. Man wird hier immer auf Versuche angewiesen sein und die Schutzbauten vermehren, falls sie sich als unzureichend erweisen sollten.

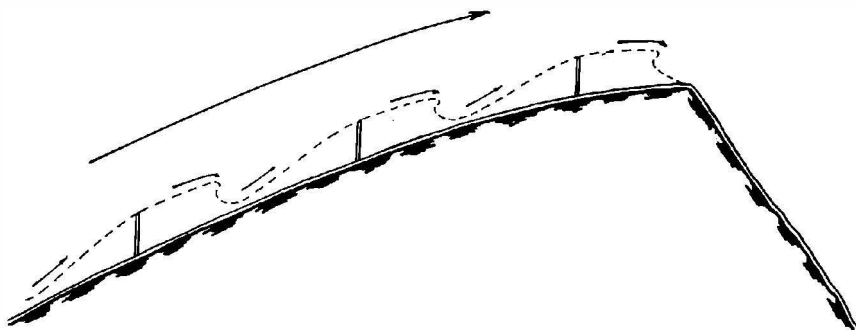


Abb. 64. Luvseitige Verbaunung zur Verhinderung des Schneetransportes von Luv nach Lee. Dem in der Zeichnung dargestellten Stadium der Schneeablagerung geht jenes der Kolkbildung vor und hinter den Schutzwänden voraus.
(Vergleiche hiezu Abb. 45, S. 68)

Zur Durchführung kam dieser Gedanke (der übrigens — wie nachträglich festgestellt — schon von J. W. Sprecher²) ausgesprochen wurde) meines Wis-

¹) Auf der Tatsache der Schneeuumlagerung durch Wind beruht auch der Vorstoß einzelner, durch Windtransport ernährter Gletscher in Gebieten, deren übrige Gletscher eine rückläufige Tendenz aufweisen.

²) Schweizer Zeitschrift für Forstwesen, 1910.

sens bis heute noch nicht. Mit seiner Verwirklichung würde ein ganz neuartiges Verbaunngsprinzip geschaffen, das in geeigneten Fällen ein — auf jeden Fall kostspieligeres — leeseitiges ersetzten könnte.

Bei ausgedehnteren luvseitigen Verbaunngsmaßnahmen hätte sich die Anordnung der Schirmwände ganz nach den Geländebeziehungen zu richten. Dabei wäre Sorge zu tragen, daß der Schnee vor allem in ausgesprochenen Einzugsgebieten festgehalten wird.

Ein durch Schneeuumlagerungen entstehendes besonderes Gefahrobjekt sind die W ä c h t e n , die durch ihren Abbruch oft ausgedehnte Lawinenbildung verursachen. Sofern man nicht verhindern will, daß überhaupt Tribschnee von Luv nach Lee geschafft wird — in welchem Fall das oben geschilderte luvseitige Verbaunngssystem anzuwenden wäre —, sondern lediglich an bestimmten Stellen der Wächtenbildung entgegengetreten will (Gratlücken), kann dies erreicht werden durch Errichtung von Sturmbrechern aus Bohlenwänden, Erd- oder Steinwällen in der Nähe der Gratregion. Diese haben dieselbe Wirkung wie die Schneezäune zum Schutze von Einschnitten. Die Luftströmung wird derart gestört, daß der Tribschnee sich schon am Schutzbauwerk ablagert und Wächtenbildung dadurch vermieden wird.

Diese (rein örtliche) Schutzmaßnahme kommt vor allem für L ü c k e n v e r b a u n g in Frage. Es ist eine bekannte Erscheinung, daß in Gratscharten und Sätteln die gefährlichsten und größten Wächten entstehen. Dies beruht auf der Tatsache, daß die Luftströmung durch das seitliche Gehänge zusammengedrängt wird und so mit erhöhter Wucht und Geschwindigkeit durch die Lücke bläst. Da außerdem sich in den Hängen unter den Lücken meist Rinnen oder Gräben befinden, die besonders günstige Lawinenbahnen abgeben, so bedingen solche Wächten immer ein erhöhtes Gefahrmoment, das durch geeignete Maßnahmen leicht zu beheben wäre¹⁾.

4. Maßnahmen im Lawinenabbruchgebiet

An Maßnahmen im Lawinenabbruchgebiet kommen in Frage: die B e p f l a n z u n g und die V e r b a u n g.

a) BEPFLANZUNG

Die B e p f l a n z u n g mit H o c h w a l d läßt sich natürlich nur unterhalb der Baumgrenze durchführen und da wieder nur, wenn die Bodenbeschaffenheit für die Aufforstung günstig ist (also nicht auf Geröll oder Steinboden).

Hinreichenden Schutz gewährt nur d i c h t e r , g e r a d s t ä m m i g e r , n i c h t z u a l t e r H o c h w a l d. Derselbe darf natürlich keine Lücken und offene Streifen aufweisen, durch die sich die Lawine einen Weg zur Tiefe bahnen könnte. Da junge Anpflanzungen nicht in der Lage sind, irgendwelchen Schutz zu gewähren, und durch Lawinen zerstört würden, so müssen sie solange durch Bauwerke geschützt werden, bis sie genügend Widerstandsfähigkeit erlangt haben.

¹⁾ Über eine erfolgreiche Verbaunng dieser Art an der S c h m i t t e n h ö h e bei Zell a. See berichtet P o k o r n y. Oberhalb des Schnittenbachtals entstand alljährlich an der Kammhöhe eine 8—10 m weit vorkragende Wächte, die durch ihren Abbruch gefährliche Lawinenstürze hervorrief. Durch die Errichtung eines 3,5 m hohen, 7—10 m vom Steilabfall entfernten Sturmbrechers (als Steinwall mit Böschungen 1 : 2 und 1 m Kronenbreite) wurde die Entstehung der Wächte (und somit der Lawinen) verhindert.

Man wird hierzu die weiter unten besprochenen hölzernen Baumaßnahmen (Verpfählungen, Schneezäune, Schneebrücken) wählen, deren Lebensdauer nicht länger zu wahren braucht, als bis der Waldbestand hochgewachsen ist.

Als Baumarten wählt man am zweckmäßigsten die zähen Zirben und Bergföhren, wobei Lärchen und Fichten eventuell beigemischt werden können. Krummholz ist wegen seiner Nachgiebigkeit unbrauchbar.

Zu alte Waldbestände sind als Schutz ungeeignet, da die Bäume zu weit auseinander stehen und durch Überständigkeit leicht zu Fall kommen.

Bannwald darf niemals durch Kahlhieb genützt werden, sondern nur durch vorsichtigen Planterhieb (Entnehmen von einzelnen Stämmen bei gleichzeitiger Wiederaufforstung).

b) VERBAUUNG

In Abbruchgebieten, wo die Aufforstung entweder wegen zu hoher Lage oder wegen ungeeigneten Untergrundes nicht möglich ist, kann nur durch Verbauung Abhilfe geschaffen werden.

Als Baustoffe kommen Holz, Stein und Eisen in Frage, letzteres freilich nur in Verbindung mit einem der beiden vorgenannten Baustoffe. Holzbauwerke haben nur eine begrenzte Lebensdauer. Sofern sie nicht gerade in der Waldregion zu stehen kommen, so daß das Holz billig zu beschaffen ist, wird es in der Regel unwirtschaftlich sein, sie für Bauwerke zu verwenden, die dauernd Schutz gewähren sollen. Man wird sie deshalb — wie schon oben erwähnt — in der Regel in Verbindung mit gleichzeitig betriebener Aufforstung zur Anwendung bringen.

Die Verpfählung

Die Verpfählung des Abbruchgebietes ist die einfachste Art der Lawinen-Verbauung. Die etwa 1,6 bis 2,0 m langen und etwa 15 cm starken Pfähle werden in schachbrettartiger Anordnung in den Boden eingetrieben. Die Diagonale eines jeden Quadrats soll dabei in die Hangfalllinie zu liegen kommen. Eine andere Methode ist die reihenweise Anordnung der Pfähle mit gleichzeitiger Terrassierung des Gehänges (Abb. 65). Die Pfähle sollen mindestens 70 bis 80 cm in den Boden eingetrieben werden, da sie sonst infolge des Schneedrucks umgebogen werden. Nach jedem Winter sind die Pfähle mit Steinen frisch zu verkeilen und zu festigen. Spaltholzpflocke sind geeigneter als Rundholzpflocke, da sie dem Schnee mehr Widerstand bieten. An Holzarten ist am zweckmäßigsten Lärche, Zirbe und Bergkiefer; nach ihnen kommen Fichte und Tanne.

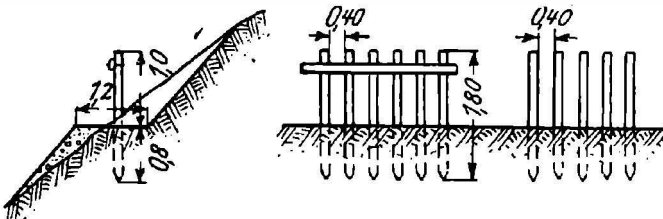


Abb. 65. Verpfählung

Um bei geringer Bodentiefe den Pfählen Halt zu geben, ist es zweckmäßig, sie pyramidenartig anzuordnen und am Kopfende durch einen Bolzen oder Eisenring zu verbinden.

Schneezäune

Eine gegenüber der Verpfählung verbesserte, aber auch kostspieligere Bauweise ist die Anwendung von Schneezäunen (Abb. 66). Diese können in verschiedener Weise zur Ausführung kommen. Gewöhnlich bestehen sie aus Pfahlreihen, die mit Astwerk und Abraumholz verflochten werden. Ihre Anwendung empfiehlt sich vor allem da, wo in steilem Gelände das Durchrutschen des Schnees zwischen den nicht verflochtenen Pfählen zu erwarten wäre. Die Schneezäune werden in Flechtreihen von 4 bis 10 m Länge und in einem Querabstand von 5 bis 15 m erstellt. Die Anordnung geschieht derart, daß über dem Zwischenraum einer Reihe stets ein Flechtzaun der nächstfolgenden Reihe zu stehen kommt.

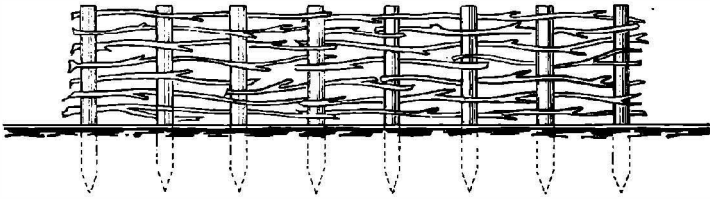


Abb. 66. Schneezäun aus Flechtwerk

Durch diese versetzte Anordnung der Schneezäune wird bei größtmöglicher Material- und Kostenersparnis eine weitgehende Zergliederung des Gehänges erreicht und so im Störungsfalle das Abgleiten größerer zusammenhängender Schneemassen verhindert.

Erdgräben

Horizontale Erdgräben sind nach Angabe von Coaz von guter Wirkung, da sich der Schnee in ihnen festsetzt und dadurch die Schneedecke im Hang verankert wird. Sie haben jedoch den Nachteil geringer Bestandfähigkeit. Die Grabenränder brechen nach und die Gräben füllen sich besonders im Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze immer wieder mit Erdmassen, so daß sie jährlich gereinigt werden müssen.

Terrassierung von Hängen

Dasselbe gilt für die Terrassierung von Hängen in wenig standfestem Boden (s. Abb. 67). Gute Erfahrungen wurden hingegen im felsigen Gelände gemacht. Kommt das ausgebrochene Steinmaterial zur Aufführung von Trockenmauern am vorderen Terrassenrand zur Verwendung, so kann der Wert der Terrassen noch erhöht werden. Da die Terrassen zur Erhöhung der Wirkung mit einer Querneigung gegen die Bergflanke ausgebildet werden, so ist — um einer Durchweichung des Bodens infolge Wasseransammlung und somit jeglicher Hangrutschgefahr vorzubeugen — für sorgfältige Entwässerung Sorge zu tragen. Dies wird am zweckmäßigsten dadurch erreicht, daß man die Terrassen ihrer Längsausdehnung nach nicht vollkommen horizontal anlegt, sondern mit abwechselnd fallendem und wieder steigendem Längsprofil. Von den tiefsten Punkten wird das Wasser durch Röhren oder Sickerdohlen nach der Teilseite abgeführt.

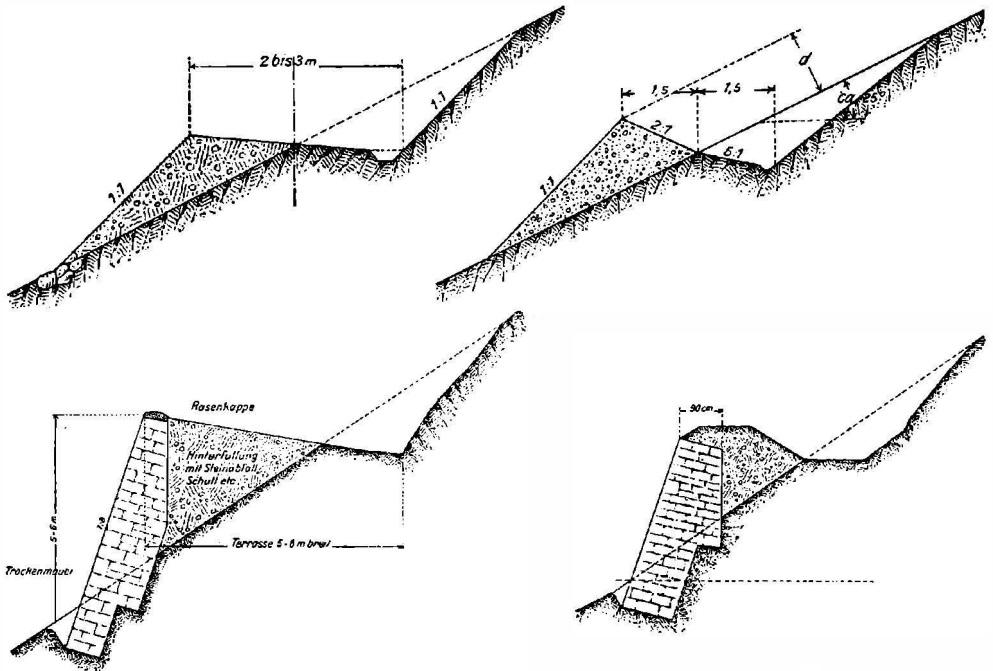


Abb. 67. Terrassierung von Hängen (im steilen Gelände mit Hilfe von Trocken-Stützmauern)

Schneebrücken

Auch die allerdings nur in beschränktem Umfang verwendeten Schneebrücken sollen eine künstliche Terrassierung des Geländes bewirken. Sie kommen vor allem bei der Verbauung von Rinnen und Gräben zur Verwendung, aber auch gelegentlich am freien Hang, wenn bessere Bauherstellungen zu teuer sind, oder wenn bei großer Steilheit des Geländes Verpfählung nicht mehr anwendbar ist (Gefahr des Umgedrücktwerdens). Ihre Konstruktion und Wirkungsweise ist aus den Abb. 68 und 73 leicht zu entnehmen.

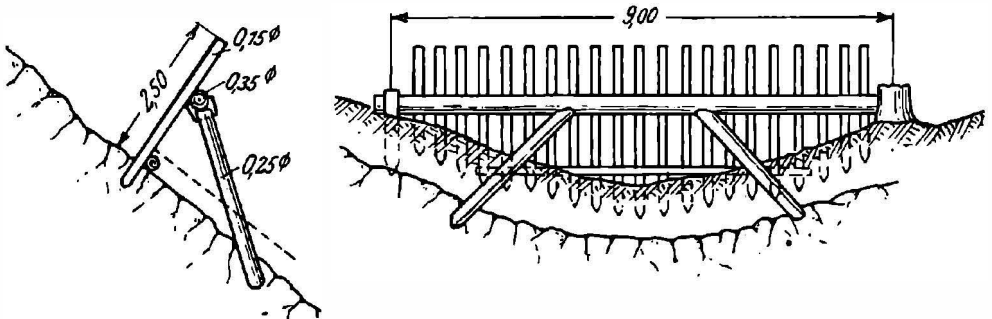


Abb. 68. Schneebrücke

Schneefänge

Mit der Besprechung der Schneefänge (Abb. 69 bis 72) kommen wir zu der am häufigsten zur Anwendung gelangenden Verbauungsart. Ihre Ausführung geschieht in der Regel in Stein und zwar als Trockenmauerwerk, selten in Massivmauerwerk; letzteres kommt vor allem für die Mauerenden in

Frage, welche erhöhten Angriffen ausgesetzt sind. Trockenmauern bieten gegenüber den Massivmauern den Vorteil größerer Billigkeit, ferner ist bei ihrer Anwendung ein gefahrloses Abfließen von Sickerwasser gewährleistet. Hin und wieder kamen auch gemischte Bauweisen unter Anwendung von Rasenziegeln und Steinpackungen zur Verwendung.

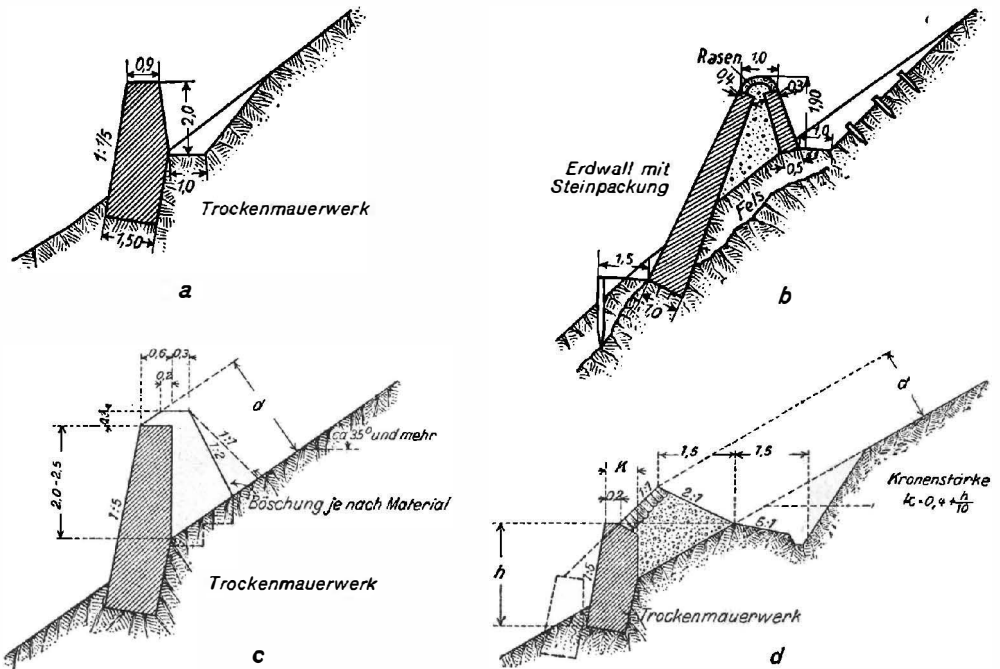


Abb. 69. Schneefänge aus Trockenmauerwerk, Erdwällen und Steinpackungen

Schneefänge in Gestalt von Bohlenwänden sind selten, da sie durch billigere andere Holzbauweisen ersetzt werden können (Verpfählung, Schneezäune). In der Waldregion, wo Holz billig zur Verfügung steht, können jedoch hölzerne Schneefänge nach Abb. 70 von Vorteil sein. Zum Schutze von Eisenbahntrassen,

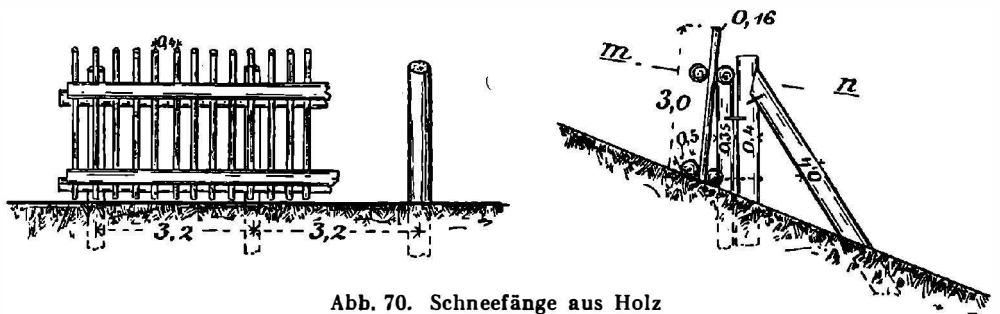


Abb. 70. Schneefänge aus Holz

in deren Bereich Altschienen billig zu haben sind, wird eventuell eine Bauweise mit eingerammten oder eingemauerten Eisenbahnschienen und dazwischengelegten Bohlen oder Altschwellen wirtschaftlich sein (Abb.72). Im Felsgelände wird man die Schienen in vorgebohrte Löcher einlassen und verkeilen.



Abb. 71. Schneefänge auf Muot bei Bergün (Albulabahn)

Schneefänge können wegen ihrer größeren Widerstandskraft in wesentlich größerem Querabstand errichtet werden, als dies bei Schneezäunen notwendig ist. In der Längsrichtung wird man sie nie auf längere Strecken durchlaufen lassen, sondern immer in unterbrochenen Reihen erbauen, wobei die Lücken der einen Reihe durch Mauerteile der folgenden Reihe zu decken sind (siehe Abb. 71 und 79). Auch für diese Anordnung sind dieselben Gesichtspunkte bestimmend, wie sie für die Anordnung der Schneezäune dargelegt wurden. (Möglichst weitgehende Zergliederung des Hanges s. S. 85.)

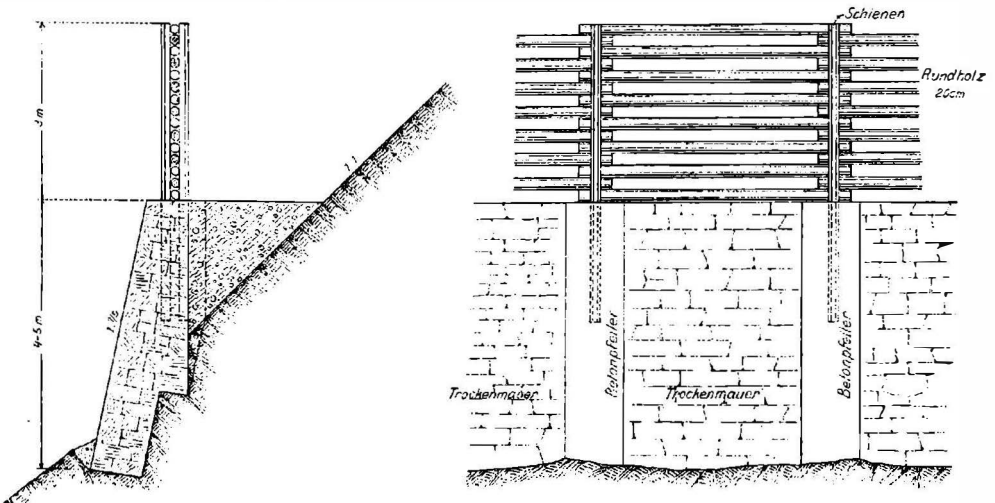


Abb. 72. Schneefänge aus Altschienen und Rundhölzern

In gefurchtem Gelände wird es in den allermeisten Fällen genügen, wenn die Mulden verbaut werden, während die Rippen ungedeckt bleiben.

Unterteilung des Abbruchgebietes

Eine neuartige Verbauungsmethode empfiehlt J. W. S p r e c h e r¹⁾. Er schlägt vor, in Fällen, wo eine Sicherung durch Querbauten zu kostspielig erscheint, das ganze Abbruchgebiet durch einzelne, in der Hangfalllinie zu erstellende L ä n g s - b a u t e n in Teile zu zerlegen, um den gleichzeitigen Abbruch größerer Schneemassen zu verhindern. Praktische Erfahrungen liegen meines Wissens mit dieser Bauweise noch nicht vor. Doch kann man diese Methode von vornherein wohl nur als eine n o t d ü r f t i g e bezeichnen, da sie nicht die Gefahr behebt, sondern nur in ihren Auswirkungen schwächt.

Wirkungsweise der Verbauungsmethoden

Zum Schlusse dieses Abschnitts sei in Abb. 73 die Wirkungsweise der Verbauungsmethoden dargestellt. Die Aufnahmen stammen aus dem Verbauungsgebiet der Gotthardbahn bei Piotta im Tessin (nach Coaz).

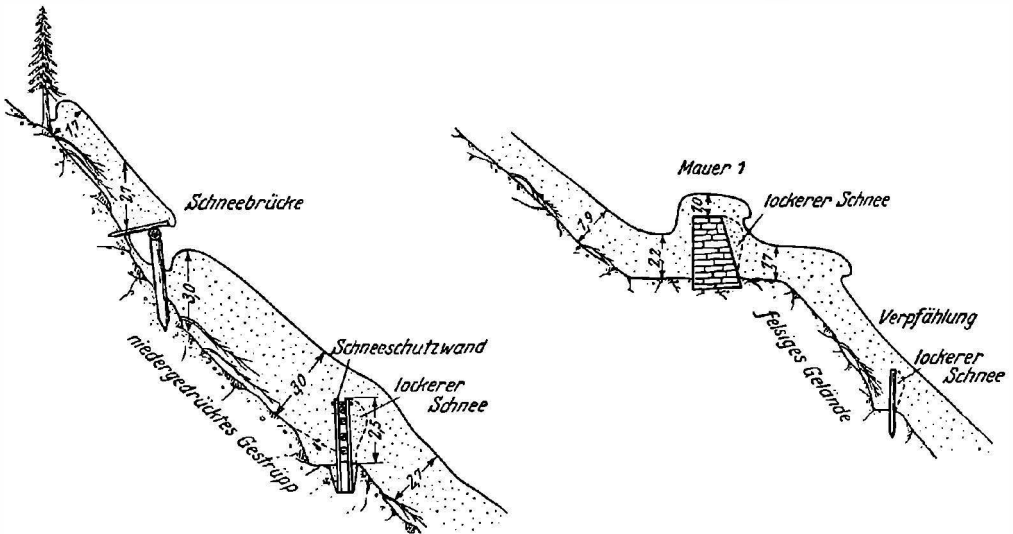


Abb. 73. Wirkungsweise der Verbauungsmethoden

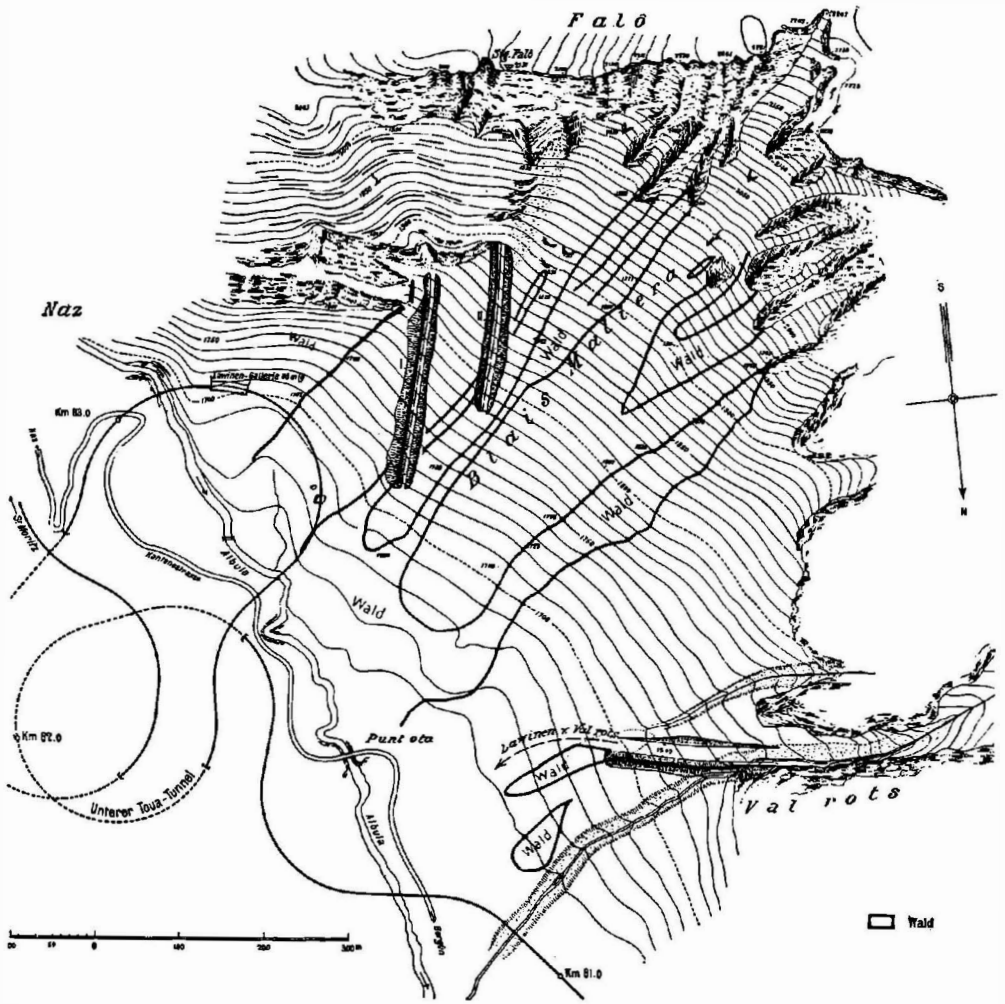
5. Lawenleitwerke

(Abb. 74 und 75)

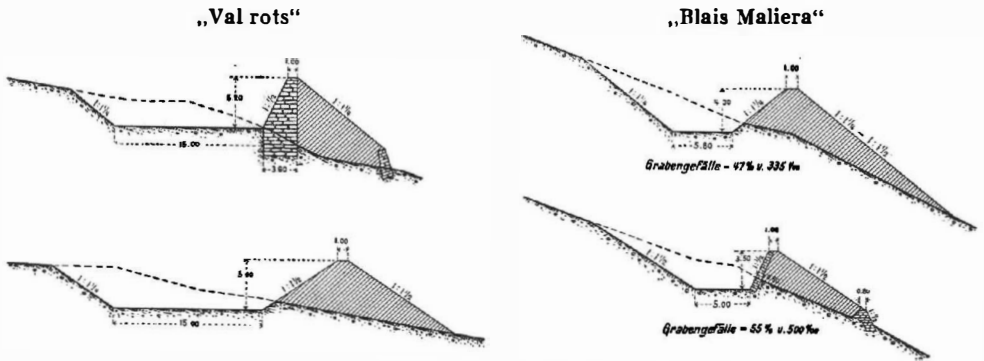
Die Gefahrenabwehr durch Lawenleitwerke empfiehlt sich in all den Fällen, wo einerseits ein Verbauen der Lawen im Abbruchgebiet wegen zu großer Ausdehnung desselben unwirtschaftlich wäre, wo es aber anderseits möglich ist, die Lawe in ein Gelände abzulenken, wo sie sich, ohne Schaden anzurichten, totlaufen kann²⁾.

¹⁾ Schweizer Zeitschrift für Forstwesen, 1910.

²⁾ Ein Verbauen der Lawensturzbahn ist vollkommen aussichtslos, da derartige Anlagen durch die Wucht des Lawensturzes sofort zerstört würden. Es hat höchstens einen Sinn, sekundäre Seitenrinnen an der Einmündung in die Hauptrinne zu verbauen, damit der Schnee aus diesen im Falle eines Lawenganges in der Hauptrinne nicht nachstürzt.



a. Lageplan der Leitwerke



b. Querschnitte der Leitwerke, 1 : 750

Abb. 74. Lawenleitwerke an der Albulabahn bei Preda

Es ist verständlich, daß die auf das Leitwerk wirkenden Kräfte um so geringer sind, daß also die Ablenkung um so widerstandsloser vor sich geht, je geringer der Ablenkungswinkel ist. Ist hingegen der Ablenkungswinkel zu groß, so besteht die Gefahr, daß das Leitwerk durch die beim Lawinenanprall auftretenden Kräfte beschädigt oder durch die Lawine überstiegen wird. Sollen große Richtungsänderungen erzielt werden, so ist es notwendig, durch gekrümmte Leitwerke die ankommenden Schneemassen allmählich in die gewünschte Richtung überzuführen. Auch kann daran gedacht werden, in geeigneten Fällen durch ein System von kurzen gestaffelten Leitwerken eine allmähliche Richtungsänderung zu erzielen. Durch die Staffelung ist es möglich, zwischen den einzelnen kurzen Leitwerken größere Lücken freizulassen, die von der Lawine in ihrem Sturze übersprungen werden. Infolge der durch diese Anordnung bedingten geringeren Gesamtlänge lassen sich solche gestaffelten Leitwerke unter Umständen billiger erstellen als ein zusammenhängender Bau.

Je kleiner der Winkel zwischen Leitwerk und Lawinenrichtung ist, desto länger muß wegen der langsamer wirkenden Ablenkung das Leitwerk werden, was naturgemäß die Kosten steigert. Als brauchbaren Mittelwert wird man etwa einen Winkel von 30° wählen. 45° stellt etwa das Maximum dar, das man erfahrungsgemäß nicht überschreiten soll. Bei der Wahl dieses Winkels sind auch die zu erwartenden Schneemassen sowie deren voraussichtliche Geschwindigkeit bestimmend, da sich kleine Schneemengen mit geringer Geschwindigkeit leichter ablenken lassen als große Schneemengen mit bedeutender Geschwindigkeit.

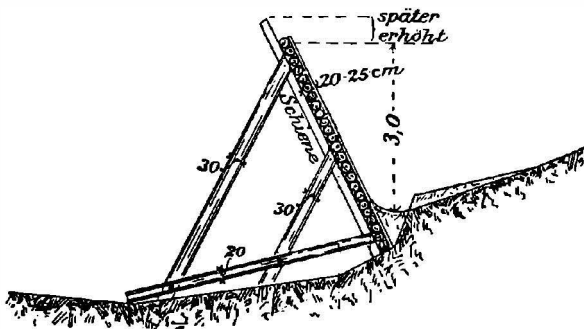


Abb. 75. Querschnitt des hölzernen Lawenleitwerks am Sonnenstein (Traunsee)

Die lawinenseitigen Böschungen sollen möglichst steil gehalten werden, da sonst die Gefahr des Überstiegens gefördert wird. Öffnungen in Leitwerken sind zu vermeiden, da sie Angriffspunkte für die zerstörende Wirkung der Schneemassen bilden. — Die Höhe der Leitwerksbauten richtet sich ganz nach den zu erwartenden Schneemassen, sie läßt sich deshalb nur von Fall zu Fall bestimmen.

Als Baumaterial kommt in erster Linie Stein oder Erde, dann auch Holz und Eisen in Frage. (Eisenbahnschienen und Schwellen.) Steinwälle werden in Trockenmauerwerk aus Bruchsteinen zusammengefügt (s. Abb. 74). Holzleitwerke werden etwa nach Abb. 75 erstellt. Erstere besitzen gegenüber letzteren den Vorzug weitaus größerer Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit.

6. Unmittelbarer Schutz von Bauwerken

Der unmittelbare Schutz der bedrohten Bauwerke, Siedlungen und dgl. war die Methode, mit der man in früheren Zeiten der Lawinengefahr begegnen wollte. In der unzureichenden Art und Weise, in der diese Bauten zur Durchführung kamen, haben sie jedoch meist ihre Wirkung verfehlt. Erst in neuerer Zeit wurden Bauweisen entwickelt, die hinreichenden Schutz gewähren. Man ist deshalb — insbesondere was den Schutz von Bahn- und Wegtrassen betrifft — wieder mehr von der kostspieligen Verbauung der Abbruchgebiete abgekommen und trachtet die Objekte direkt zu schützen.

Zweckmäßige Ausgestaltung von Gebäulichkeiten

Gebäulichkeiten können dadurch geschützt werden, daß man sie mit der einen Seite in den Berg hinein baut und die Bedachung flach in den Hang übergehen läßt. Abstürzende Lawinen werden auf diese Weise über das Gebäude hinweggeführt (Beispiel: Station Jungfraujoch).

Gebäude können aber nicht nur durch die Lawinen bedroht werden, sondern auch durch den von den Lawinen erzeugten Luftdruck. Um sie in dieser Hinsicht besonders widerstandsfähig zu gestalten, wird man sie nicht mit der breiten Dachfront gegen die Richtung stellen, aus der der Luftdruck zu erwarten ist (Gefahr der Abdeckung), sondern mit der schmalen Giebelfront.

Spaltecken



Abb. 76. Primitive Spaltecke zum Schutze einer Almhütte

Spaltecken sind keilförmige Erd- oder Steinkörper, die den Lawinstrom zerteilen und zu beiden Seiten des zu schützenden Objekts vorbeiführen sollen. — Spaltecken in Form schmaler Betonpfeiler oder Holzkonstruktionen finden weiterhin Anwendung zum Schutze von Leitungsmasten, Seilbahnständern und dgl.

Lawinenschutzmauern

Gebäulichkeiten, ja ganze Siedlungen und Ortschaften können durch genügend starke **Lawinemauern** geschützt werden (Beispiel: Stuben am Arlberg). Diese Mauern werden zweckmäßig nach Art der Leitwerke schräg zur Lawinrichtung oder auch keilförmig erstellt, um die Wucht des Anpralls möglichst zu verringern und ein Übersteigen der Mauer hintanzuhalten.

Lawinemauern und Spaltecken stellen auch einen wirksamen Schutz dar gegen die, die Schneelawinen begleitenden, in ihren Wirkungen oft ebenso verheerenden **Luftlawinen**.

Schutzgalerien und künstliche Tunnel

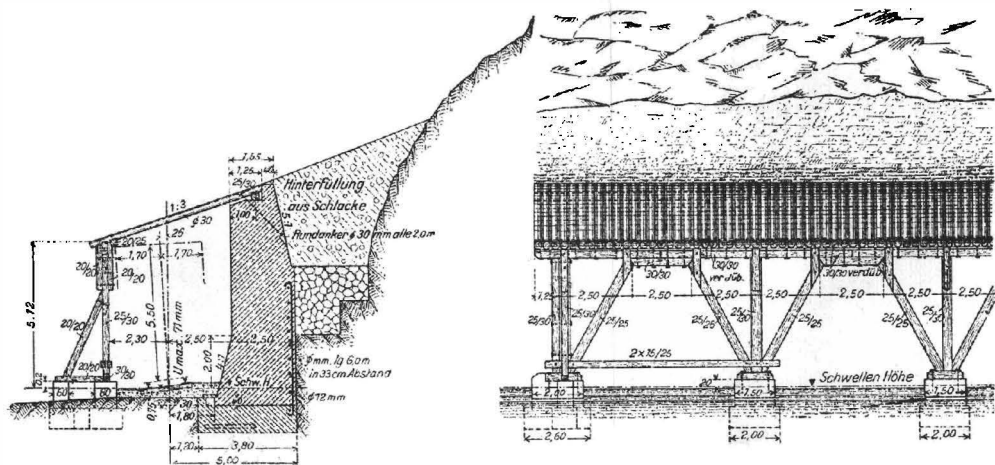


Abb. 77. Hölzerne Lawingalerie an der Arlbergbahn

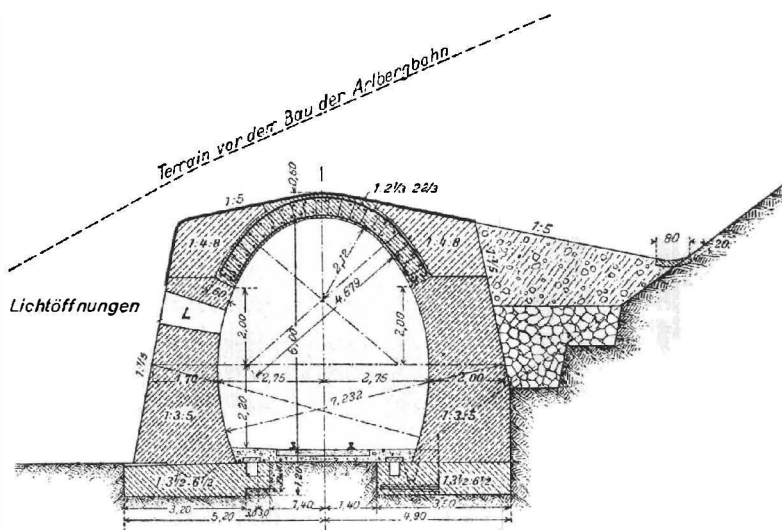


Abb. 78. Künstlicher Tunnel an der Arlbergbahn

Der wirkungsvollste unmittelbare Schutz von Bahn- und Wegtrassen besteht in der Erstellung von **Schutzgalerien**, durch welche die Schneemassen über



Abb. 79. Lawinenschutzbauten (Lawinengalerie und Schneefänge) an der Albulabahn bei Kreuzungsstelle Muot

den gefährdeten Verkehrsweg hinweggeführt werden. Die Lawinengalerien können in Holz- (Arlbergbahn), Eisen- (Albulabahn) und Eisenbetonkonstruktionen (Albula- und Lötschbergbahn) erstellt werden, dann aber auch in massiver Betonbauweise (Arlbergbahn, Lötschbergbahn), wodurch sie den Charakter künstlicher Tunnel annehmen.

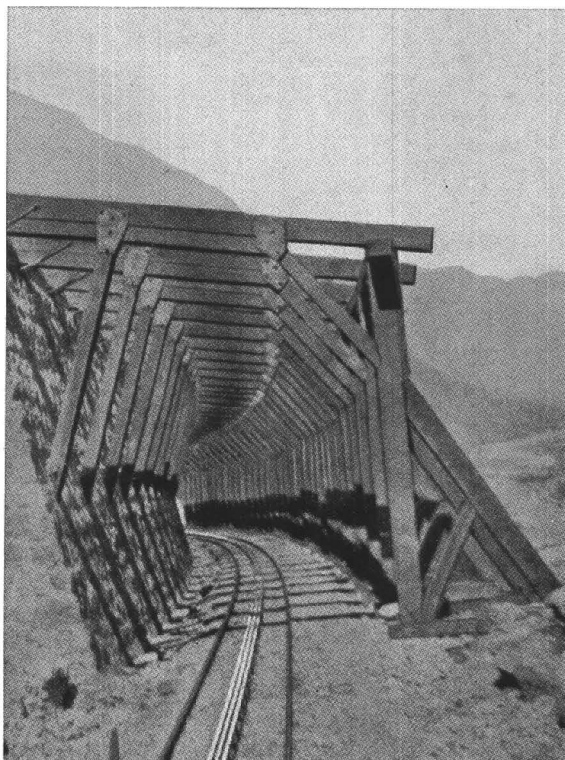


Abb. 80. Hölzerne Lawinengalerie an der Transandenbahn
(im Bau)

Die Galerien müssen so dimensioniert werden, daß sie die größten zu erwartenden Schneedrücke mit genügender Sicherheit aufnehmen können. Dabei ist auch Bedacht zu nehmen auf besondere Stoßwirkungen infolge mitgeführter Felsstücke. Verschiedene Typen von Lawinengalerien sind in den beigefügten Abbildungen 77 bis 80 gezeigt. Aus ihnen mögen auch alle Einzelheiten erschen werden.

Fallböden

Die (von Coaz so bezeichneten) Fallböden wurden meines Wissens bisher nur an der Bahnlinie Davos-Filisur zum Schutze gegen die Breitrüfe-Lawine verwendet (s. Abb. 81). Sie stellen trogartige Vertiefungen zwischen Bergflanke und Bahnkörper dar, die zur Aufnahme der abstürzenden Schneemassen dienen sollen.

Diese Fallböden dürften aber nur unter bestimmten Voraussetzungen verwendbar sein. Fürs erste darf die Fallhöhe der Lawine nicht sehr groß sein, da sonst die Gefahr besteht, daß die Lawine infolge der ihr innewohnenden lebendigen Kraft die Fallböden durchläuft und den Bahnkörper übersteigt. Dann muß das Einzugsgebiet und die zu erwartende Schneemasse bekannt sein, um die Fallböden für Aufnahme der gesamten Schneemenge dimensionieren zu können.

Aber selbst bei Erfüllung dieser Voraussetzungen ist die Wirkung der Fallböden keine unbedingt zuverlässige. Sie können in schneereichen Wintern durch

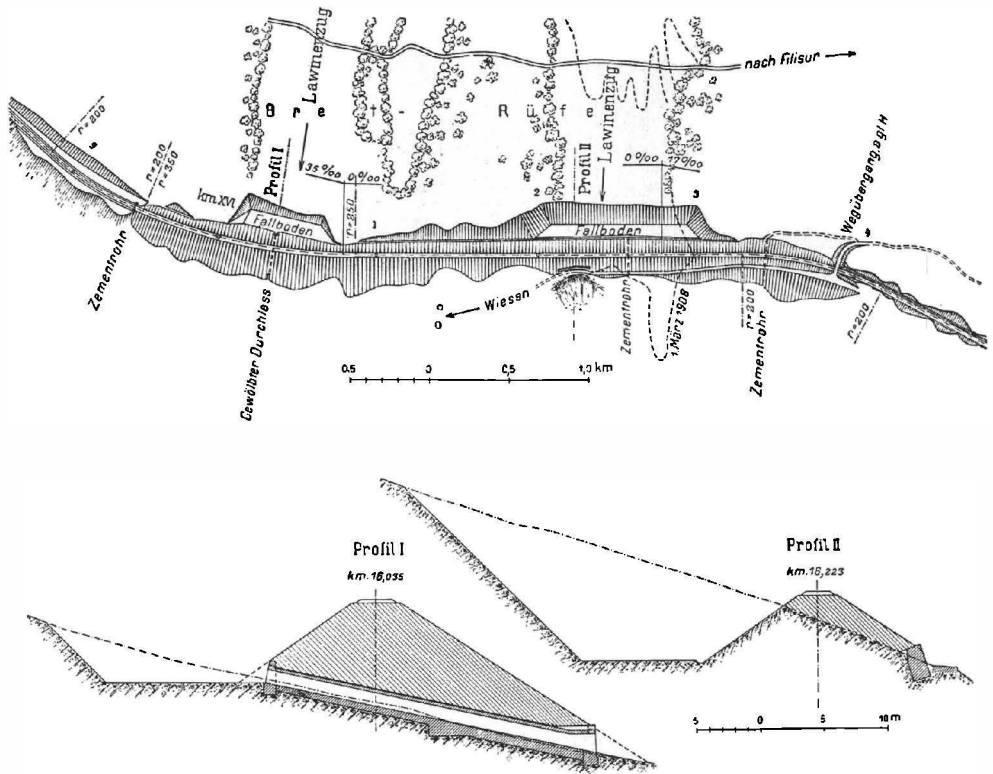


Abb. 81. Lageplan und Querschnitte der Fallböden bei der „Breit-Rüfe“ an der Bahnlinie Filisur-Davos

die Lawenstürze des Frühwinters aufgefüllt werden, so daß die Lawen des Spätwinters hemmungslos darüber hinweggehen.

Schutzwände

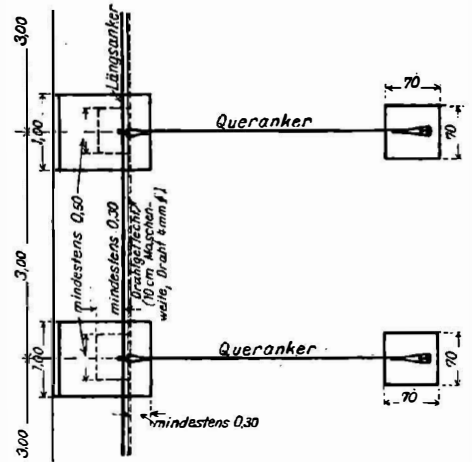
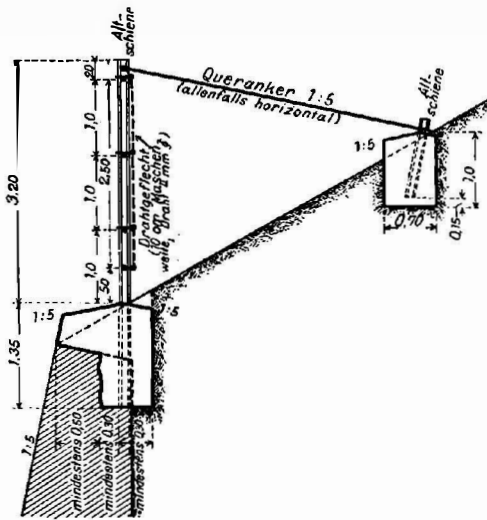
Bahn und Straßentrassen werden oft durch kleinere Schneerutsche in Mitleidenschaft gezogen, die zwar nicht besonders gefährlich sind, aber trotzdem empfindliche Betriebsstörungen verursachen können. Solche Rutschungen treten z. B. an steilen Abschnittsböschungen auf oder an Hängen, die zwar nicht hoch genug sind, um ausgedehnte Lawenbildung zu ermöglichen, aber doch steil genug, um ein Abgleiten des Schnees zu ermöglichen. In solchen Fällen schützt man die Bahn bzw. Straße durch Aufführung von Schutzwänden, wie aus der Abbildung 82 zu ersehen ist.

Versteinung gepflasterter Böschungen

Einen ähnlichen Zweck, d. h. den Schutz eines Verkehrsweges gegen örtliche Schneerutsche an steilen gepflasterten An- oder Einschnittsböschungen erreicht man, indem man aus dem Mauerwerk der Pflasterung in gewissen Abständen einzelne Steine herausstehen läßt, die die Schneeauflage festhalten (s. Abb. 83).

Querschnitt

Draufsicht



Ansicht

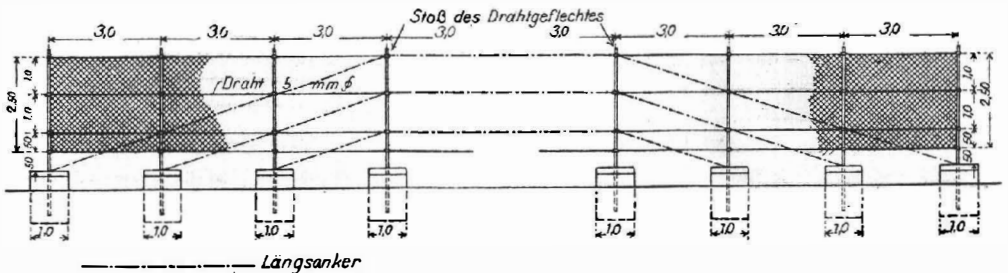


Abb. 82. Schutzwände aus Eisen mit Drahtgeflecht

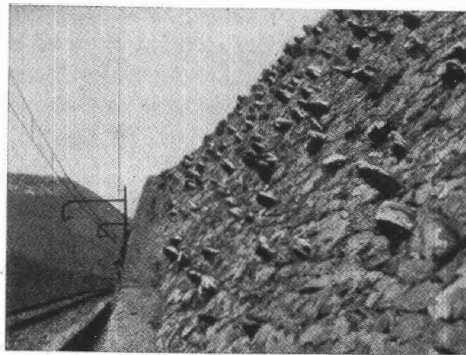


Abb. 83. Verkleinerung gepflasterter Böschungen

7. Telephonischer und telegraphischer Warnungsdienst¹⁾

Als letzte Schutzmaßnahme muß noch der telephonische oder telegraphische Sicherungs- bzw. Warnungsdienst erwähnt werden, der für alle jene Fälle in Frage kommt, wo bauliche Maßnahmen zu kostspielig sind. Eine derartige Sicherungsmaßnahme wurde z. B. an der Bahnlinie Chur—Davos getroffen. Auf dieser Strecke fuhr im Jahre 1917 ein von Chur nach Davos verkehrender Personenzug in eine aus dem Drusatschgebiet abgehende Grundlawine hinein. Die Verbauung des Gebietes erwies sich als zu kostspielig, ebenso eine Verlegung der Linie. Es wurden deshalb zwei in fernmündlicher Verbindung stehende Wärtterposten geschaffen, einer an der Bahnlinie und einer am Bergeshang an einem Punkt, von dem aus das Abbruchgebiet überblickt werden kann. Die Gefahrzone ist durch Signale gesichert, die in der Grundstellung auf „Halt“ stehen. Wärtter 1 kann die Strecke erst frei geben, wenn er vom Posten 2, der das Abbruchgebiet beobachtet, die Zustimmung hat (s. Abb. 84!).

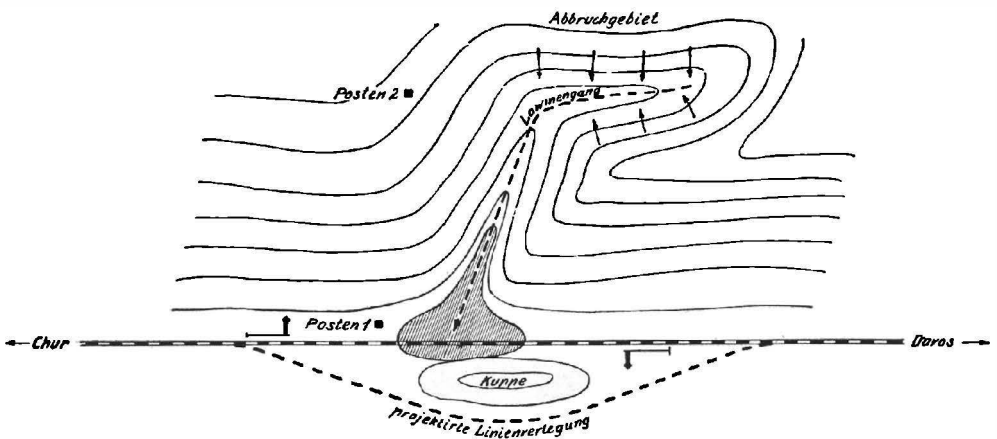


Abb. 84. Sicherung einer gefährdeten Eisenbahnstrecke durch Signale

Diese Sicherungsart erweist sich jedoch nur dann als ausreichend, wenn als gefährdende Lawinenart nur Frühjahrslawinen in Frage kommen, die eine verhältnismäßig langsame Sturzgeschwindigkeit aufweisen. Für blitzartig niederfahrende Trockenschneelawinen wäre diese Sicherungsart nicht verwendbar.

Zur Sicherung der Bahnstation Hiefiau im Ennstal vor der meist anfangs Februar aus dem Haindlkar niederbrechenden Tamischbachturm-lawine, hat man sich aus diesem Grund nur auf einen Warnungsdienst beschränkt²⁾. Man errichtete im Abbruchgebiet auf dem Mitterriegel (s. Abb. 85) eine zur Gefahrzeit von lawinenkundigen Bediensteten bezogene Blockhütte, die mit meteorologischen Instrumenten ausgerüstet ist. Besteht auf Grund der von diesem und drei anderen meteorologischen Beobachtungsposten eingeholten fernmündlichen Nachrichten die begründete Annahme erhöhter Lawinengefahr, so wird der Bahnverkehr eingestellt.

¹⁾ S. hierüber: Bierbauer, Sicherung des Eisenbahnbetriebes gegen Lawinengefahren. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, 1925, Heft 17.

²⁾ Eine Verbauung des Haindlkares wäre wegen der außerordentlich großen Ausdehnung viel zu kostspielig (s. Bierbauer: „Sicherung des Eisenbahnbetriebes gegen Lawinengefahr“. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 1925, S. 336).

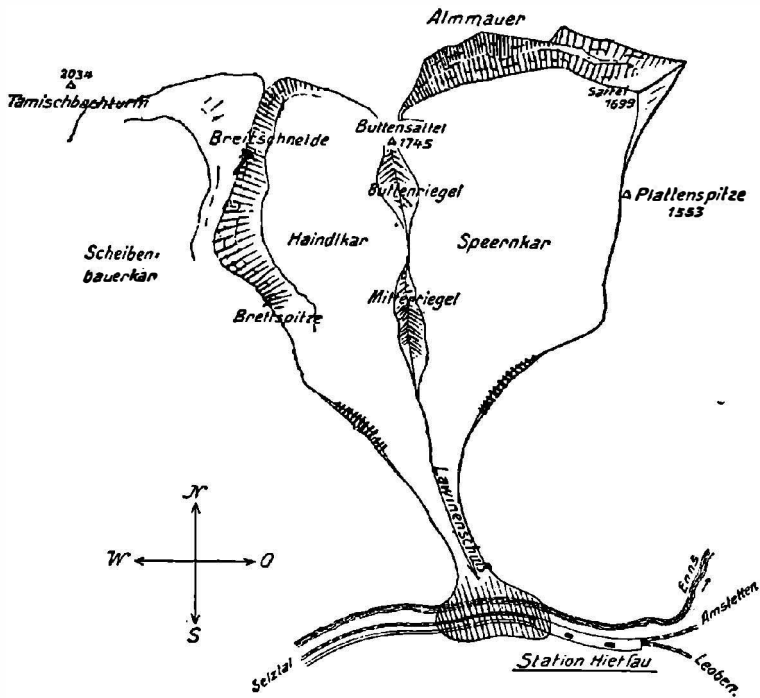


Abb. 85. Einzugsgebiet der Tamischbachturmlawine (Gesäuse)

8. Gesichtspunkte für die Anlage von Verkehrswegen und die Wahl geeigneter Lawinenschutzmittel

Reich ist die Zahl der Sicherungsmethoden bzw. der Möglichkeiten, einen Verkehrsweg (und selbstverständlich alle sonstigen Werke von Menschenhand) vor den Einwirkungen der Lawinen zu schützen. Welche von den möglichen Methoden die vorteilhafteste ist, läßt sich nicht generell bestimmen. Es bedarf in jedem einzelnen Fall eingehendster Untersuchung der geologischen, morphologischen und meteorologischen Verhältnisse, um die zweckmäßigsten Maßnahmen ermitteln zu können.

Diese zweckmäßigsten Maßnahmen sind jedoch nicht immer wirtschaftlich vertretbar. Es wird deshalb beim Bau von Bahnen und Straßen ein Gegenstand eingehender Wirtschaftlichkeitsberechnungen sein, zu untersuchen, ob die als zweckmäßig erkannten Maßnahmen auch aus finanziellen Gründen durchführbar sind, oder ob vielleicht unter geringen Zugeständnissen an die Zweckmäßigkeit eine wesentlich billigere Lösung zu finden ist. So wird man beispielsweise Lawinen, die aus einem weiten Abbruchgebiet kommen, hingegen nur einen engbegrenzten Gefahrenbereich bestreichen, nicht durch Verbau des Abbruchgebietes zu bekämpfen suchen, sondern durch Leitwerke oder örtliche Maßnahmen.

Weiterhin wäre zu beachten, daß ein und dieselbe Maßnahme nicht unter allen Verhältnissen brauchbar ist. So können Lawinenschutzbauten, die auf trockenem Kalkboden langen Bestand haben, im nassen, leicht verwitterbaren Felsch alsbald der Zerstörung anheimfallen. Während also im ersten Fall eine

Verbauung wirtschaftlich ist, können im zweiten Fall örtliche Schutzvorkehrungen zweckmäßiger sein.

Insbesondere ist aber auch die Frage zu untersuchen, ob es nicht vorteilhafter ist, eine Trasse überhaupt im Tunnel zu führen, um sich dadurch der Notwendigkeit jeglicher Sicherungsmaßnahmen zu entheben¹⁾.

Die Methoden, durch die man die Lawinen zu bekämpfen suchte, haben im Laufe der Zeit verschiedene Wandlungen durchgemacht. Während man in den Anfängen der Lawinensicherung sich auf rein örtlichen Schutz (allerdings durch unzureichende Mittel) beschränkte, ging man in Erkenntnis der Zwecklosigkeit dieser Maßnahmen in späteren Jahrzehnten dazu über, die Abbruchgebiete zu verbauen.

In jüngster Zeit ist nun wieder eine etwas rückläufige Tendenz festzustellen. Man hat erkannt, daß die Verbauung der Abbruchgebiete in Herstellung und Unterhaltung meist außerordentlich kostspielig ist und daß sich mit den Hilfsmitteln moderner Technik ein unmittelbarer Schutz (Lawingalerien bei Verkehrswegen) meist billiger erstellen läßt.

Unter allen Gesichtspunkten, die für den Lawinenschutz von Verkehrswegen zu beachten sind, ist jedoch der wichtigste die zweckmäßige Wahl der Trasse, denn dadurch kann die Lawinengefahr am ehesten gebannt werden. Insbesondere ist zu untersuchen, welche von zwei Talseiten die günstigere ist, ob Geländeterrassen zur Aufnahme der Linie vorhanden sind, ob bewaldete Hänge Schutz gewähren usw. Endlich ist zu beachten, daß unter sonst gleichen Verhältnissen Nordhängen stets der Vorzug vor Südhängen zu geben ist, da sie nicht den die Lawinenbildung begünstigenden Einwirkungen der Sonnenstrahlung ausgesetzt sind²⁾.

¹⁾ Als eine in dieser Hinsicht verfehlt Anlage ist die Flexenstraße von Stuben nach Zürs zu betrachten. Hier hat man auf Kosten der Zweckmäßigkeit an die Preisfrage so weitgehende Zugeständnisse gemacht, daß die Straße in schneereichen Wintern überhaupt nicht benutzbar ist. Das aus steilem Fels- und Schrofengehänge ausgesprengte Straßenprofil wird durch Lawinen und Schneerutsche so weit aufgefüllt und der allgemeinen Hangneigung angeglichen, daß jeder Verkehr unmöglich wird. Lawingalerien und Tunnelstrecken sind nur in ungenügender Zahl vorhanden. Die einzig mögliche, allerdings auch teure Lösung wäre hier die Führung der Straße in der gefährdeten Strecke im Tunnel gewesen, oder die durchgehende Überdachung derselben mit Schutzgalerien. Als Gegenbeispiel sei hier die Schalkelstraße von Weinberg durch das Spießertal nach Compatsch genannt. Diese Straße quert zahlreiche ausgedehnte Lawinentobel, ist aber in Tunnels und Galerien so geschützt, daß der Verkehr selbst in schneereichen Wintern anstandslos durchgeführt werden kann.

²⁾ Eine hinsichtlich der Linienführung verfehlt Anlage ist die Westrampe der Arlbergbahn, welche in jedem schneereichen Winter durch Lawinenstürze verschüttet wird. Die Linie ist an der von zahlreichen Lawinenrinnen durchrissenen nördlichen Seite (also am Südhang) des Klostertals geführt, während die gegebene Lösung die Führung der Trasse an der stark bewaldeten südlichen Talseite (also am Nordhang) gewesen wäre.

ANHANG

I. S c h l u ß w o r t

Durch die vorliegende Arbeit wurde das Thema keineswegs restlos erschöpft. Der Stoff ist zu umfangreich und die Beschaffung des notwendigen Beobachtungsmaterials so zeitraubend, schwierig und von den verschiedensten Zufälligkeiten abhängig, daß es selbst in langjähriger Arbeit kaum möglich ist, die Phänomene des Schnees vollkommen zu klären.

Die wissenschaftliche Bedeutung, sowie die Verluste an Menschenleben und Sachwerten lassen es jedoch durchaus notwendig erscheinen, daß dem systematischen Studium der Lawinen- und Wächtengefahr sowie den Bewegungen und Umlagerungen des Schnees weiterhin erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt wird. Dies kann geschehen:

1. Durch Sammlung von Beobachtungs- u. Erfahrungsmaterial.
2. Durch planmäßige Forschungen in der Natur.
3. Durch Experimente im Freien wie im Laboratorium nach Art der in den Wasserbaulaboratorien getriebenen Forschungen, d. h. Erstellung von Geländemodellen zur Beobachtung der Einwirkung des Windes, der Bewegung von feinkörnigem Lockermaterial und Versuche, die gefährdenden Bewegungen des Lockermaterials zu verhindern oder ihnen durch Vorbeugungsmaßnahmen die gewünschte Richtung zu geben.

Als Grundstock und Basis für weitere Forschungen ist vorliegende Arbeit aufzufassen. Insbesondere wurden durch sie die Methoden der Untersuchung entwickelt und die Wege gezeigt, auf denen weiterzuschreiten wäre. Dadurch würde es zweifellos möglich sein, alle noch ungeklärten Fragen auf diesem Gebiete in absehbarer Zeit zu lösen.

Zum Schlusse möchte ich all jenen Herren meinen Dank aussprechen, die sich um das Zustandekommen der Arbeit verdient gemacht haben.

Es ist dies in erster Linie Herr Professor Dr. W. P a u l c k e - Karlsruhe, unter dessen Anleitung das Werk entstand. Auch für seine persönliche Mithilfe bei den Arbeiten im Gelände und für die stete Unterstützung und Anteilnahme möchte ich ihm meinen besonderen Dank zum Ausdruck bringen, desgleichen für die Überlassung eines großen Teiles der in der Arbeit verwendeten photographischen Aufnahmen.

Besonderer Dank gebührt ferner Herrn Professor Dr.-Ing. O. A m m a n n - Karlsruhe, welcher die Arbeit einer eingehenden Durchsicht und Würdigung unterzog, ferner Herrn Baurat Dr.-Ing. F. R a b für Prüfung des Manuskriptes.

An den Arbeiten im Gelände beteiligten sich in aner kennender Weise die Herren Dr. W. H o f m e i e r - Berlin, Dr. G. K e r s c h b a u m - Berlin, Dipl.-Ing. R. S e i d e l - Berlin und Dr. K. W i e n - München; auch ihnen gilt mein Dank.

II. Literaturverzeichnis

- Abr, Schneedichten. Meteorol. Zeitschrift, 1887.
- Bierbaumer, A., Sicherung des Eisenbahnbetriebes gegen Lawinengefahren. Organ f. d. Fortschritte des Eisenbahnwesens. München 1925, Heft 17.
- Blum-v. Borris-Barkhausen, Eisenbahnbau der Gegenwart. Erster Abschnitt. Wiesbaden 1906 (Schubert).
- Brückner, E., Gletscherabbruch an der Altels. Himmel und Erde, 1896.
- Bruhlin, Th. A., Lawinennoth in der Schweiz im Jahre 1888. Zürich 1888.
- Coaz, J., Die Lawinen der Schweizeralpen. Bern 1881, 2. Aufl. 1888.
- Coaz, J., Der Lawinenschaden im schweizerischen Hochgebirge im Winter und Frühjahr 1887/88. Bern 1889.
- Coaz, J., Statistik und Verbau der Lawinen in den Schweizer Alpen. Bern 1910.
- Defant, A., Schneedichtebestimmungen auf dem Hohen Sonnblick. Wien 1908.
- Eberhardt, C., Einführung in die theoretische Aerodynamik. München 1927.
- Exner, F. M., Dynamische Meteorologie. Wien 1925.
- Ficker, H. v., Winterschnee und Lawinenbildung. Ö. A. Z. 1905.
- Frech, Fr., Lawinen und Gletscher in ihrer gegenseitigen Beziehung. Zeitschr. d. D. u. Ö. A.-V. 1908.
- Gruber, E., Lawinen. D. A. Z., X. Jahrg. Heft 20.
- Heim, A., Die Lawinen. Schweizerisches Schularchiv, 5. Band. Zürich 1884.
- Heim, A., Lawinen und Lawinenschutz. Die Alpenwelt. St. Gallen 1888.
- Hennings, F., Projekt und Bau der Albulabahn. Chur 1908.
- Karmann Th. v. und T. Levi-Civita, Vorträge aus dem Gebiete der Hydro- und Aerodynamik. Berlin 1924, Bd. I.
- Kleibelsberg, R. v., Glazialgeologische Erfahrungen aus Gletscherstollen. Zeitschr. für Gletscherkunde, Bd. XI, 1920, Heft 4/5.
- Kurz, M., Les corniches de neige et leur formation. Écho des Alpes 1919.
- Luncheater, F. W., Aerodynamik. Berlin und Leipzig 1909.
- Lunn, A., Alpine Skiing. 2. Aufl. London 1926.
- Madlener, Über Schneelawinengefahr. D. A. Z. Beil. III, Heft 19.
- Mercanton, A propos d'avalanches. Zeitschr. für Gletscherk. Bd. III, Heft IV. Berlin 1909.
- Merle, P., Protection des voies ferrées contre la neige. Annales des Ponts et Chaussées. Paris 1926.
- Möller, M., Erddrucktabellen mit Erläuter. über Erddruck und Verankerungen. Leipzig 1922.
- Öchslein, M., Ein Beitrag zur Kenntnis der Lawinen. Alpina 1923, Nr. 12.
- Örtel, E., Die Lawinengefahr und wie der Alpinist ihr begegnet. München 1924.
- Paulcke, W., Lawinengefahr. München 1926.
- Paulcke-Welzenbach, Schnee, Wächten, Lawinen. Zeitschr. für Gletscherk., XVII. Jahrg. 1928, Heft 1/2.
- Penck, W., Die Naturgewalten im Hochgebirge.
- Petersen, R., Erddruck auf Stützmauern. Berlin 1924.
- Petersen, R., Grenzzustände des Erddrucks auf Stützmauern. Berlin 1925.
- Philipp, H., Über den Mechanismus der Gletscherbewegung. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Palaeontologie, Beilage-Band 43, 1920.

- Pokorny, Über Verbauung von Schneelawinen mit Anführung zweier ausgeführter Verbauungen. Österr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst 1901, Heft 11 und 12.
- Pollak, V., Über die Lawinen Österreichs und der Schweiz und deren Verbauungen. Wien 1891.
- Pollak, V., Über die Mechanik des Lawinensturzes. Wien 1894.
- Pollak, V., Über Erfahrungen im Lawinenverbau in Österreich. Leipzig und Wien 1906.
- Pollak, V., Gebirgswinter und Lawinenfall. Meteorologische Zeitschrift 1909.
- Prantl, L., Ergebnisse der aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen. München 1925.
- Ratzel, Fr., Die Schneedecke, besonders in deutschen Gebirgen. Stuttgart 1889.
- Saller, Der Kampf gegen die Schneeüberwehungen auf den russischen Eisenbahnen. Die Bautechnik, 2. Jahrgang 1924, Heft 8.
- Schnelawinenverbauung, Die, im Schmittentale bei Zell am See. Zentralblatt für das gesamte Forstwesen 1900.
- Schneeschutzmaßnahmen bei der Transandenbahn. The Railway Gazette 1927, Heft 12.
- Schubert, E., Schneewehen und Schneeschutzanlagen. Wiesbaden 1888.
- Schubert, E., Schutz der Eisenbahnen gegen Schneeüberwehungen und Lawinen. Leipzig 1903.
- Sprecher, F. W., Grundlawinenstudien I u. II. Jahrb. d. S. A. C. Bern 1900 u. 1902.
- Sprecher, F. W., Lawinen an der Jungfrau. Jahrb. d. S. A. C. Bern 1904.
- Sprecher, F. W., Über die Mechanik der Staublawinen. D. A. Z. XI. Jahrg., Heft 22.
- Sprecher, F. W., Über die künstliche Veranlassung des Abgangs von Lawinen. Schweizerische Zeitschr. für Forstwesen, Bern 1910.
- Staff, H. v., Wind und Schnee. Zeitschr. d. D. und Ö. A.-V. 1906.
- Terzaghi, K., Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Leipzig u. Wien 1925.
- Tutton, A. C. H., The natural History of Ice and Snow. London 1927.
- Wang, Ferd., Grundriß der Wildbachverbauung, II. Teil. Leipzig 1903.
- Wang, Ferd., Die Lawinenverbauung. Loreys Handbuch der Forstwissenschaft, III. Bd. Tübingen 1903.
- Wiesmann, E., Über Lawinenverbauungen in den Schweizer Alpen. Die Bautechnik, Berlin 1927, Heft 27.
- Wright and Buestley, British („Terra Nova“) Antarctic Expedition 1910—1914. London 1915.
- Zsigmondy-Paulcke, Gefahren der Alpen. München 1927.

III. Quellenverzeichnis der Abbildungen

A) AUTOTYPIEN

- Abb. 3, 8, 10, 27, 28, 29, 30, 31, 32 Lichtbilder von Prof. Dr. W. Paulcke, Karlsruhe.
Abb. 13 Lichtbild von H. Huber, München.
Abb. 16 Lichtbild von E. Gyger, Adelboden.
Abb. 33 Lichtbild von M. v. Klenk.
Abb. 51, 63 aus dem Werk „Der Eisenbahnbau der Gegenwart“, Wiesbaden 1906 (Schubert).
Abb. 57 aus „Annales des Ponts et Chaussées, Paris 1926, V.
Abb. 58 aus dem „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens, München 1927, Heft 19.
Abb. 71 Lichtbild von A. Reinhardt, Chur.
Abb. 76 Lichtbild von Dr. Strebler, Zürich.
Abb. 80 aus „The Railway Gazette“, London 1927, No. 12.
Abb. 1, 12 und 83 Quellen unbekannt.

B) STRICHÄTZUNGEN

- Abb. 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 45, 46, 53, 64, 66 Zeichnungen des Verfassers.
Abb. 40, 41, 42, 50, 59, 60 vom Verfasser umgezeichnet und geändert nach Abbildungen aus der Zeitschrift „Der Eisenbahnbau der Gegenwart“, Wiesbaden 1906 (Schubert).
Abb. 43 vom Verfasser umgezeichnet und geändert nach einer Abbildung aus „Annales des Ponts et Chaussées“, Paris 1926, V.
Abb. 44, 47, 48, 49, 62, 70, 75 aus dem Werk „Der Eisenbahnbau der Gegenwart“, Wiesbaden 1906 (Schubert).
Abb. 52 aus der Zeitschrift „Die Bautechnik“, Berlin 1924, Heft 8.
Abb. 54 aus einem Prospekt der Firma „Beton- und Kunststein-Industrie G.m.b.H.“, Kgl. Neudorf h. Oppeln.
Abb. 55, 56 aus „Annales des Ponts et Chaussées“, Paris 1926, V.
Abb. 61, 67, 69 (c.u.d.), 72, 77, 78, 82, 84, 85 aus dem „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens“, München 1925, Heft 17.
Abb. 65, 68, 69 (a.u.b.), 73, 74, 79 aus „Statistik und Verbau der Lawinen in den Schweizer Alpen“, Bern 1910, von I. Coaz.
Abb. 81 aus der „Schweizer Bauzeitung“, 1908.

