Internationales Symposion
INTERPRAEVENT 1988 — GRAZ
Tagungspublikation, Band 3, Seite 205—226

ZUM PROBLEM DER GLEITSCHNEELAWINE

The problem of the glide avalanche

B.Lackinger

ZUSAMMENFASSUNG Gleitschneelawinen entstehen bei ausgeprägtem Gleiten des Schnees, nachdem sich Risse geöffnet haben. Die komplexen Zusammenhänge und die maßgebenden Faktoren ihres Anbruchs werden aufgezeigt. In einem Beobachtungsgebiet wurden Meßfelder und eine Meßstation eingerichtet. Über Meßverfahren (besonders Gleitgeschwindigkeit und Temperaturprofil) und Ergebnisse wird berichtet. Gegenüber publizierten Gleitgeschwindigkeiten ergaben sich teils wesentlich größere Werte. Die Geschwindigkeitsentwicklung während des Reißens der Schneedecke konnte gemessen werden. 25 dokumentierte Gleitschneelawinen sind mit topografischen, chronologischen und meteorologischen Daten und den Bildungsursachen in Tab. 1 erfaßt. 0°-Isothermie der Schneedecke spielte dabei eine wichtige Rolle. Aufgrund verschiedener Theorien über den Scherwiderstand zwischen Schnee und Boden wird ein Modell der Bruchphasen einer Gleitschneelawine entwickelt. Die Risse entstehen durch unterschiedliche Einleitung der treibenden Schubspannungen in den Boden, die inhomogenen Längsspannungen in der Schneedecke erreichen die Zugfestigkeit. Spannungsumlagerungen und andere Gleitverhältnisse schaffen ein neues Gleichgewicht. Die Lawine entsteht später durch einen Scherbruch am Boden infolge eines Festigkeitsverlustes. Ein solcher kann durch einen begrenzten Wasserstau entstehen. Eine Parameterstudie ergab, daß die Abmessungen des bruchauslösenden Staus nur wenige Prozent der Lawinenfläche ausmachen.

SUMMARY Glide avalanches occur when the snow can glide well, after cracks have opened. The complex relations and the factors influencing their release are shown here. Measuring sites and an experimental station were established in a test area. Experimental techniques (glide speed, temperature profile) and results are reported. Compared to published glide speeds partly much higher values were recorded. The speed development during cracking could be measured. Table 1 contains 25 documented glide avalanches including topographic, chronological and meteorological data, and the causes of their respective formation. It turned out important for the snow pack to be 0°-isothermal. Based on various theories on the shear resistance between the snow and the ground, a model of the evolving fractures of a glide avalanche has been developed. The cracks form due to locally varying diversion to the ground of the driving stresses. The inhomogeneous longitudinal stresses in the snow cover approach the tensile strength. Stress redistribution and changed gliding conditions lead to a new equilibrium. The avalanche is initiated later by shear fracture at the bottom caused by loss of strength. This can arise from local damming up of water. It was concluded from a sensitivity study that the extent of this trigger-active dammed water mass is only a few percent of the avalanche area.

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

In Wintern mit ausgeprägtem Gleiten der Schneedecke auf dem Boden treten in unterschiedlich glatten oder kupierten Hängen zuerst auffallende Gleitrisse oder Gleitspalten (Abb. 1a, 9) auf. Sie können Vorzeichen einer Lawine oder eines Rutsches sein. Diese Gleitschneelawinen (Abb. 1b, 9) lösen sich manchmal unmittelbar mit dem Entstehen des Risses, in der Regel aber mehr oder weniger lang danach, wenn die Risse sich verbreitert und verlängert haben.

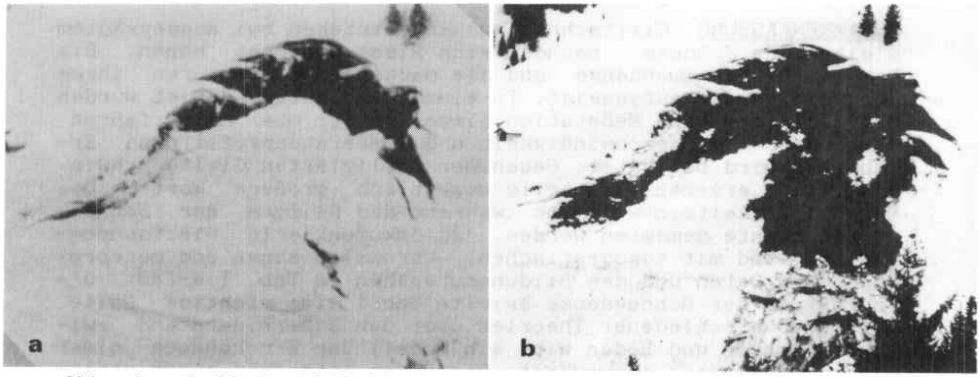


Abb. 1 a) Gleitriß/Glide crack 13.2.84 b) Gleitschneelawine/ Glide avalanche 22.2.84 (Nr.13 in Tab. 1: Höttinger Alm)

Eine solche Gleitschneelawine verursachte eine Skifahrerkatastrophe mit 12 Todesopfern im Skigebiet Silvretta Nova in Vorarlberg/Österreich am 31. 12. 1974 (**Längle** 1975). Versuche, bei einem seit 2 Wochen beobachteten Gleitriß durch Sprengungen eine Lawine auszulösen, waren erfolglos. Ursache der 2 m dicken, bis 100 m breiten Gleitschneelawine aus einem 33 - 37° steilen Westhang, die einen Skilift verschüttete, waren Hangquellen und zusätzliche Belastung durch Neuschnee.

Bisher war wohl der Zusammenhang zwischen intensivem Gleiten und den auftretenden Gleitschneelawinen offensichtlich, die Vorgänge im Einzelnen, bei denen flüssiges Wasser die entscheidende Rolle spielt, und die maßgebenden Faktoren des Abbruches liegen aber weitgehend im Dunkeln. In der Literatur finden sich zwar schon früh Hinweise auf das Schneegleiten (z.B. **Zdarsky** 1929), Arbeiten über Gleitschneelawinen sind aber selten. **Haefeli** (1963) behandelt nur kurz den Spannungszustand und das Aufreißen der gleitenden Schneedecke. **Shoda** (1967) zeigt in einer Fotoserie eindrucksvoll die Entwicklung von Rissen und einer Gleitschneelawine innerhalb von 10 Tagen und gibt dazu meteorologische Daten an. **Endo** und **Akitaya** (1978) sowie **Endo** (1985) berichten über Messungen und Beobachtungen an einem Hang mit Bambussträuchern, in dem sich Risse und Lawinen bildeten. Auf die Arbeiten von **In der Gand** und von **McClung** wird später eingegangen.

Die komplexen Vorgänge beim Gleiten der Schneedecke und die mehrphasigen Abläufe bei der Auslösung von Gleitschneelawinen

sollen hier beleuchtet werden. Über Methoden, Einrichtungen und Ergebnisse eines Forschungsprojektes des Verfassers an der Universität Innsbruck, mit langjährigen Beobachtungen und Messungen in einem Gebiet mit starkem Gleiten wird berichtet. Ein Modell der Bruchvorgänge bei Gleitschneelawinen wird entwickelt.

2. GLEITPHÄNOMENE der SCHNEEDECKE

2.1 Gleiten des Schnees am Boden

Die Schneedecke am Hang zeigt infolge der Eigengewichtsspannungen und der großen Verformbarkeit langsame und langdauernde Deformationen (Abb. 2):

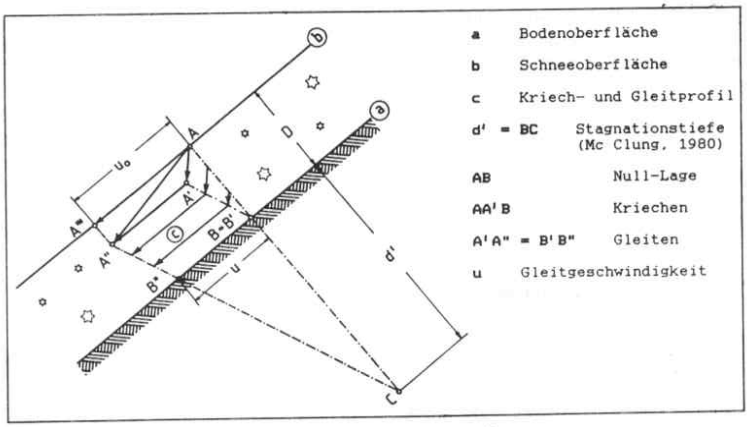


Abb. 2 Kriechen, Gleiten und Stagnationstiefe der Schneedecke
Creep, gliding and stagnation depth of the snow cover

- Kriechen ist ein viskoser, innerer Formänderungsvorgang mit der Rotation von Querschnittsflächen, der von Schnee-Eigenschaften (z. B. Viskosität, Struktur) und Spannungszustand, der sich durch das Kriechen ändert, gesteuert wird.

- Gleiten auf der Bodenoberfläche erzeugt über die Schneehöhe gleichbleibende Verschiebungen, d. h. eine Translation der Schneedecke in Richtung der Hangfallinie. Das Gleiten hat seinen Ursprung in der Diskontinuitätsfläche zwischen Schnee und Boden und wird daher maßgebend von deren Eigenschaften (Beschaffenheit, Bewuchs, Rauhigkeit, Neigung, Exposition, Temperatur, Wasserhaushalt), aber auch von Schneedeckenparametern gesteuert. Nach **In der Gand** (1968) müssen 2 Bedingungen an der Grenzfläche vorliegen, damit es zum Gleiten kommt:

1) Die Geländeoberfläche muß glatt sein, in größeren Bereichen darf keine Verzahnung mit der Schneedecke vorliegen, also z. B. bei glatten Felsplatten oder langem Gras.

2) An der Unterseite der Schneedecke muß eine, wenn auch nur dünne, durchnäßte Schicht mit sehr geringem Scherwiderstand vorhanden sein. Diese Schmierschicht entsteht durch Schmelzvorgänge infolge der Bodenwärme (frühes Einschneien!) oder Wärmezufuhr von außen, durch Regen oder Schmelzwasser sowie Vernässung des Bodens. Eine notwendige, aber nicht ausreichende Bedingung ist also, daß die Bodenoberfläche mindestens 0° C hat und die Schneedecke nicht an ihr angefroren ist. Hänge mit Exposition im Südsektor sind dafür bevorzugt. Auch **McClung** (1980, S. 6) nennt das Vorhandensein von flüssigem Wasser als notwendige Voraussetzung für das Schneegleiten.

2.2 Gleitrisse

Sichtbares Zeichen von starkem und besonders von unterschiedlichem Schneegleiten in einem Hang sind Risse, die die Schneedecke bis zum Boden trennen (Abb. 1 a, 9). Ihre Flanken stehen normal zum Boden, ihre Länge erstreckt sich bis zu einigen Zehnermetern. Die Weiten vergrößern sich im Laufe von Tagen bis Wochen auf einige Meter. Meist verlaufen sie entlang der Höhenschichtenlinien, oft zeigen sie sich auch sichelförmig (volkstümlich "Lawinenmaul"). Sie treten oft an konvexen Hängen und Rücken auf und können ein bedrohliches Vorzeichen für einen Lawinenabgang sein. In den Hangpartien unterhalb von Gleitspalten kommt es zu Aufschiebungen, Falten und Hohlräumen

2.3 Gleitschneelawinen

Dieser besondere Lawinentyp tritt manchmal gleichzeitig mit Gleitrissen, meist aber erst Stunden, Tage oder Wochen später auf, wenn die Risse sich aufgeweitet haben (Abb. 1 und 9). Besonderes Kennzeichen ist, daß die Scherfläche in der Bodenoberfläche liegt. Sehr kritisch für die Gefährdung von Skipisten und Siedlungsräumen ist die langdauernde Bedrohung durch die Unsicherheiten in der Vorhersehbarkeit des Abbruchzeitpunktes. Auch sind Versuche einer künstlichen Auslösung durch Sprengungen mehrfach erfolglos geblieben.

3. EIGENE BEOBACHTUNGEN und MESSUNGEN

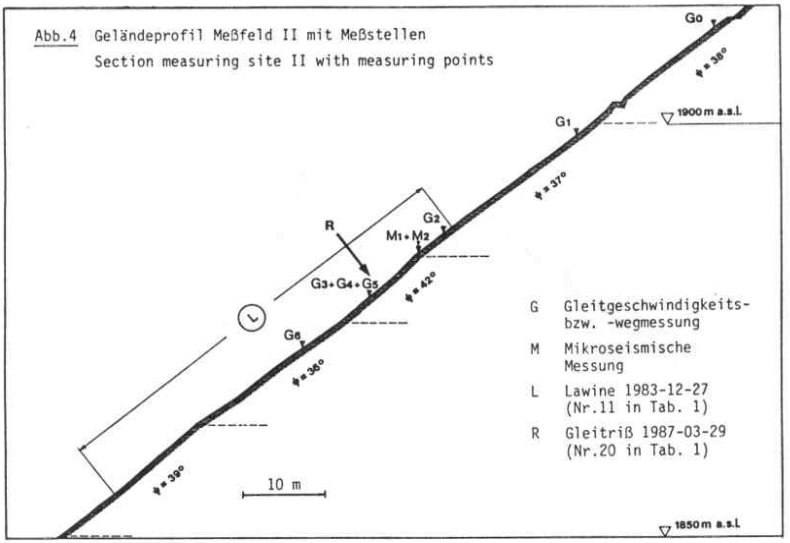
3.1 Versuchsgebiet und Meßverfahren

Das Beobachtungsgebiet mit 5,5 km² Fläche liegt oberhalb von Innsbruck am Südabhang der Nordkette im Bereich der Mittelstation "Seegrube" der Seilschwebebahn. Die großräumige Leelage zu den vorherrschenden NW-Winden sorgt für ausreichende Schneemengen, in normalen Wintern beträgt die mittlere Schneehöhe ca. 2 m. In 200 m - 400 m Entfernung von der Seilbahnstation sind die Meßstation mit Stromanschluß und die beiden instrumentierten Meßfelder gelegen (**Lackinger** 1986). Derzeit wird das Meßfeld II (Abb. 3), ein 36°- 42° steiler Grashang mit einzelnen felsigen Bereichen in SW-Exposition betrieben. Das maßgebende Geländeprofil mit den Meßstellen zeigt Abb. 4.

Abb. 3 Meßfeld II mit Gleitrissen

Measuring site II with glide cracks

"Schlipfenbrand" Seegrube 26.4.84



Das erforderliche, umfangreiche Meßprogramm kann mangels personeller und finanzieller Ressourcen nur schrittweise verwirklicht werden. Zunächst wurde mit systematischen und laufenden Beobachtungen des gesamten Testgebietes auf Gleitschnee-Erscheinungen sowie deren Dokumentation im Vergleich der verschiedenen Winter begonnen. Neben Schneeprofilen werden periodisch Temperaturprofile der Schneedecke in verschiedenen Expositionen mittels einer selbst konstruierten Abstichsonde (NTC-Fühler und Digitalthermometer) aufgenommen. Mit verwendet werden die Wetter- und Schneedaten des Standardmeßfelds Seegrube des Lawinenwarndienstes Tirol auf 1 905 m SH.

Hauptgewicht wird auf 2, permanent das Meßfeld überwachende Meßverfahren gelegt: die Messung der mikroseismischen und akustischen Emissionen (MSE) der Schneedecke (**Lackinger** 1981) und der Gleitwege und -geschwindigkeiten. Über die Bedeutung

der MSE, ihre Messung und dabei auftretende Probleme sowie über bisherige Ergebnisse wird aus Platzgründen an anderer Stelle berichtet (**Lackinger** 1987, 1988).

Die Messung der Gleitgeschwindigkeiten an 4 Meßstellen und der Saisongleitwege (2 - 4 Stellen) basiert auf dem Prinzip von **In der Gand** (1954) mit Gleitschuhen. Zur Geschwindigkeitsmessung werden die Gleitstrecken durch Impulsgeber in elektrische Signale umgewandelt, die zyklisch abgefragt werden. Die Datenerfassung und in situ-Auswertung erfolgt mit dem Mikrocomputersystem MIKROMET (**Lackinger** 1985), das aus dem Pocketcomputer Sharp PC 1500 mit Peripheriegeräten besteht. Jede Stunde werden Zwischenergebnisse aller Meßstellen ausgedruckt. Durch eine automatische Vorauswertung ist eine ereignisangepaßte Verkürzung dieses Druckintervalles möglich, um besonders aktive Perioden detailliert erfassen zu können. Die gesamte Meßgerätekonfiguration ist aus Abb. 5 zu ersehen.

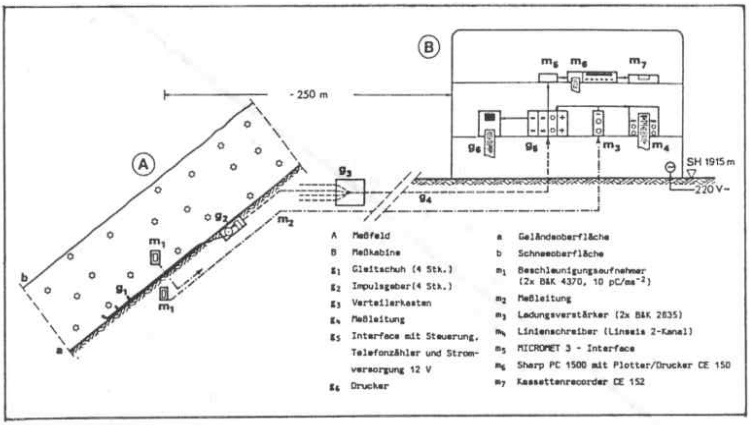


Abb. 5 Schema der Meßgerätekonfiguration
Measuring equipment (schema)

3.2 Ergebnisse der Messungen und Beobachtungen

3.21 Gleitmessungen außerhalb von Gleitrissen

Gezeigt werden einige exemplarische Ergebnisse aus 2 Wintern. 1983/84 traten große Gleitwege (2 m und mehr) sowie zahlreiche Risse und Gleitschneelawinen (s. Abschn. 3.3) auf. Bereits Anfang Dezember lag genügend Schnee, der infolge einer Wärmeperiode um Weihnachten stark durchfeuchtete. Abb. 6 zeigt das Gleitweg-Zeitdiagramm mit den Gleitgeschwindigkeiten u und den Schneehöhen im horizontalen Meßfeld. Schon ab dem Einbauzeitpunkt wurde starkes Gleiten gemessen, das zur Lawine Nr. 11 (Abb. 4 und Tab. 1) führte. Trotz der Entspannung stieg danach - wegen Temperaturen bis +11°C - die Geschwindigkeit auf 21.5 mm/d an. Im Jänner und Feber trat eine Verlangsamung auf 2mm/d ein, der später aufgrund der extremen Schneefalle (s. 3.3 c)

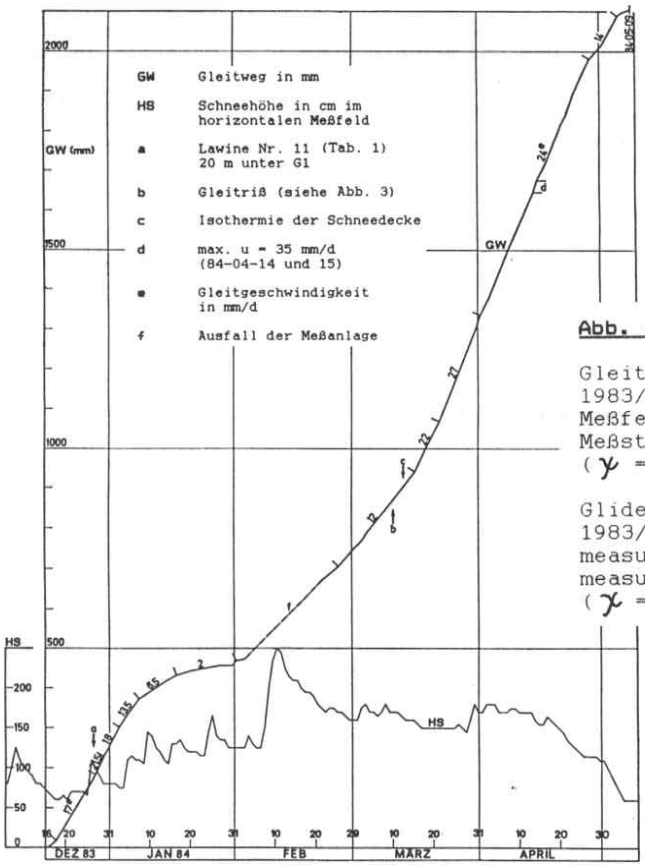


Abb. 6

Gleitwege 1983/84: Meßfeld II Meßstelle G1 (γ = 38°)

Glide distances 1983/84: measuring site II measuring point G1 (γ = 38°)

wieder eine Beschleunigung folgte. Nach dem Erreichen der 0°C-Isothermie der Schneedecke stellte sich, wie auch in anderen Wintern und bei **In der Gand** (1959) und **In der Gand** und **Zupančič** (1966), eine höhere Geschwindigkeit (hier 22 - 27 mm/d) ein. Max. u = 35 mm/d wurde Mitte April registriert. Folgen des starken Gleitens waren neuerliche Risse (Abb. 3).

Der Winter 1986/87 schien anfangs wegen des späten Einschneiens und der unternormalen Schneemengen wenig zu versprechen. Ab Anfang März kam aber Bewegung in die inzwischen angewachsene Schneedecke (Abb. 7 und 8). Während G1 mit 7 - 11 mm/d relativ gleichmäßig und langsam glitt, zeigten G2, G3 und G4 auffallend hohe, progressiv zunehmende Gleitgeschwindigkeiten. Da diese Vorgänge zu einem wachsenden Gleitriß führten, werden sie im Abschnitt 3.22 behandelt.

In der Literatur fallen die wesentlich geringeren Gleitgeschwindigkeiten als die von uns gemessenen auf. So hat **McClung** (1980) in einem bewaldeter Hang unbekannter Neigung mit ≤6 m

Schneehöhe nur 0,8 - 4,5 mm/d (von November bis April stark abnehmend) gemessen. Die umfangreichsten Messungen hat **In der Gand** (1954, 1956, 1957, 1959, 1968) in den Wintern 1948/49 bis 1957/58 und 1967/ 68 sowie 1962/63 (**In der Gand** und **Zupančič** 1966) durchgeführt. Die Diagramme zeigen große Ähnlichkeit mit Abb. 6: Nach raschem Gleiten zu Winterbeginn folgt eine langsame Phase im Hochwinter, die wieder in schnelles Gleiten im Spätwinter und Frühjahr übergeht. Auch hier sind die Gleitgeschwindigkeiten i.A. kleiner als unsere Werte: Mittelwerte über mehrtägige bis mehrwöchige Perioden mit gleichmäßigem Gleiten betragen zwischen 2 und 24 mm/d, überwiegend um 10 mm/d, mit geringer Korrelation zur Hangneigung (32°-37°). Sie sind größer, wenn ein "Gleitschneewinter" vorliegt. Tageweise werden bis 28 mm/d gemessen. Außerdem treten Rucke ($\leq$ ¼h) mit sehr hoher Geschwindigkeit (u $\approx$ 370 mm/h) auf.

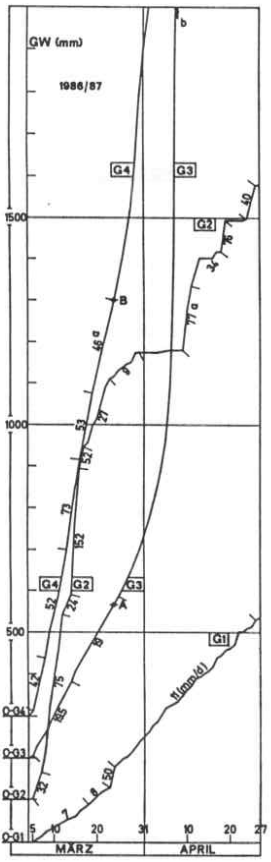
3.22 Gleitmessungen mit Gleitrissen

Für den Bruchmechanismus von Gleitschneelawinen ist die Geschwindigkeitsentwicklung vor, während und nach dem Aufreißen der Schneedecke von größter Bedeutung. Meßergebnisse dazu sind nur unvollständig und wenig publiziert. **Haefeli** (1963) nennt Öffnungsgeschwindigkeiten von Gleitrissen von wenigen mm/h bis dm/h. **In der Gand** (1954) gibt die mittlere Geschwindigkeit nach dem Entstehen eines Gleitrisses im November 1952 in einem 38° steilen SSE-Hang mit anfangs 168 mm/h (d.h. $\approx$4 m/d), später dann noch 35 - 66 mm/h an. Nach **In der Gand** (1956) betrug die Öffnungsgeschwindigkeit eines Gleitrisses in einem bis 40° steilen Südhang Ende Dezember 1954 in den ersten beiden Tagen i.M. 220 mm/h ($\approx$5,3 m/d) und nahm dann - wahrscheinlich wegen einer Kälteperiode - auf 25 mm/h (ca. 6 d lang) und zuletzt (Mitte Jänner 1955) auf 9 mm/h ab. Auffallend war eine 1 cm dicke, nasse Schmierschicht am Boden bei ziemlich gut gesetzter, kalter Schneedecke. Ende März rutschte die Schneedecke talseits des Risses als Gleitschneelawine ab.

Nach **In der Gand** und **Zupančič** (1966) zeigte ein ebener Hang (36°, SSE-Exposition) innerhalb einer Lawinenstützverbauung nach schnellem Gleiten von 72 mm/d Ende Jänner 1963 eine kurze Ruhephase, nach der sich eine Periode gleichmäßigen Gleitens mit u = 34 mm/d bis 5. März 1963 einstellte. Nachdem das Gleiten eher langsamer geworden war, riß die Schneedecke an diesem Tag 8 m oberhalb der Meßstelle auf, diese glitt einige Tage lang mit 251 mm/d, um sich dann deutlich zu verlangsamen, vermutlich wegen der unteren Abstützung an einer Schneebrücke. Ein Extremwert von über 10 m/d nach dem Aufreißen (Fig. 8 a.a.O.) wird von den Autoren nicht kommentiert.

Eigene Messungen brachten folgende Ergebnisse: Ein Riß im sog. "Osthang" unterhalb der Seegrube mit 30°-35° Neigung hat sich im Januar 1982 während einer Wärmeperiode (T_{max} = +6,4°C) bei 0°C-isothermer Schneedecke von 2 m ca. eine Woche lang mit Geschwindigkeiten bis 3 cm/h bzw. bis 0,5 m/d aufgeweitet.

Eine vollständige Messung der Gleitrißentwicklung, d.i. der Übergang aus dem Gleiten der ungerissenen Schneedecke bis zum



GW — Gleitweg in mm (tageweise aufgetragen)

G1 γ = 38°
G2 γ = 37°
G3 γ = 40°
G4 γ = 36°
} Gleitmeßstellen (gemäß Abb. 4)

A, B — Anschlußpunkte für Abb. 8

a — Gleitgeschwindigkeit in mm/d

b — Gleitriß sichtbar

Abb. 7

Gleitwege und Gleitgeschwindigkeiten März und April 1987 Meßfeld II Meßstellen G1, G2, G3, G4

Glide distances and glide speeds march and april 1987 measuring site II measuring points G1, G2, G3, G4

Abgleiten des talseitigen Teils, ist uns im Frühjahr 1987 im Meßfeld II gelungen (Abb. 7 und 8). Ab Anfang März wurden bei G2, G3 und G4 (s. Abb. 4) relativ hohe Gleitgeschwindigkeiten gemessen, die bei G 3 und G4 zwischen 19 und 73 mm/d lagen und bei G2 bis 152 mm/d erreichten. Danach verlangsamte sich G2 und kam ab 29. März für einige Tage völlig zum Stillstand. Dies ist auf die Entlastung durch den 11 m unterhalb G2 entstandenen Gleitriß zurückzuführen. Er verlief 1 m oberhalb von G3 und 5 m oberhalb von G4. Bei diesen beiden Meßstellen erhöhte sich die Geschwindigkeit nach dem Reißen der Schneedecke progressiv, um sich ab dem 8. April auf i.M. 60 mm/h bei G3 bzw. 44 mm/h bei G4 einzustellen (Abb. 8). Zu dieser Zeit war der Riß im Meßfeld vom Tal aus deutlich zu erkennen. Während er sich bei G3 vom 8.-11. April mit 1086 bis 1656 mm/d öffnete, trat bei G4 nach der besonders aktiven Periode (1088 mm/d am 8. April) eine kurze Ruhepause ein, der wieder schnelles Gleiten (45 mm/h bzw. 874 mm/d) folgte. Nach Gleitwegen von 6,2 bzw. 7,4 m fielen die beiden Meßstellen aus.

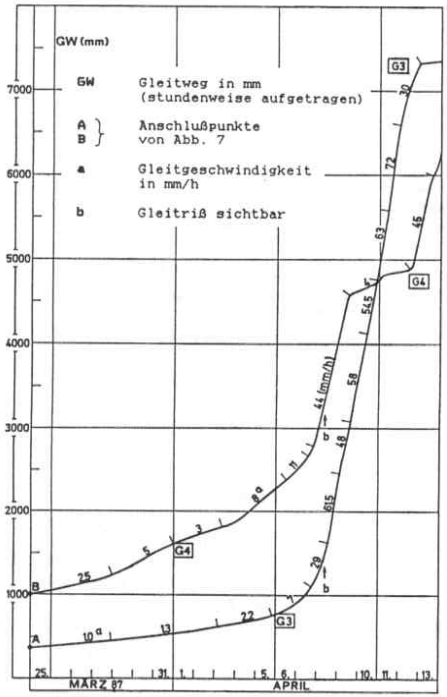


Abb. 8

Gleitwege und Gleitgeschwindigkeiten während der Gleitriß-Entstehung Ende März bis Mitte April 1987 Meßfeld II Meßstellen G3 und G4

Glide distances and glide speeds during the development of glide cracks on march and april 1987 measuring site II measuring points G3, G4

Leider sind die wenigen eigenen und fremden Daten über die Gleitvorgänge bei der Rißbildung noch zu widersprüchlich für zuverlässige Aussagen. Auch konnte der Abbruch einer Gleitschneelawine noch nicht registriert werden. Vermutlich wird eine weitere, progressive Beschleunigung stattfinden, bis die einige m/s betragende Lawinengeschwindigkeit erreicht ist.

3.3 Beobachtungen an Gleitrissen und Gleitschneelawinen

Seit Beginn des Forschungsprojektes 1981 (**Lackinger** 1981) gab es in 3 Wintern viele Gleitrisse und Gleitschneelawinen, in den 3 anderen Wintern nur sehr geringes Gleiten (wenige dm) und einzelne Risse. Eine umfassende Beurteilung, welche Parameter eines Winters für das Auftreten von Gleitschneelawinen relevant sind, ist noch nicht möglich. Soviel ist aber sicher, daß in schneearmen, spät beginnenden Wintern (wie 1982/83, 1984/85 und 1985/86) kaum Gleitrisse und keine Gleitschneelawinen auftreten. Wenn starkes Schneegleiten bereits ab Winterbeginn einsetzt (wie 1981/82 und 1983/84), was bei frühem Einschneien und genügend Schneehöhe der Fall ist, sind beide vermehrt zu erwarten. Wenn erst spät im Winter reichlich Schnee vorhanden ist (wie 1986/87), kann es noch im Frühjahr zu Gleitrissen und gelegentlichen Gleitschneelawinen kommen.

Tab. 1 Gleitschneelawinen und -rutsche 1981 – 1987
(aus **Lackinger** 1987; ergänzt)
Glide avalanches and sluffs 1981 – 1987
(**Lackinger** 1987, with supplements)

No.	LOCATION	ELEVATION m a.s.l.	EXPOSITION ORIENTATION	RELEASE AREA max.	RELEASE AREA mean.	RELEASE TIME date	RELEASE TIME hour	TEMPERATURE max. + °C	TEMPERATURE days c) -2	DEPTH OF SNOW (cm) b) ~200 d)	CAUSE OF AV. FORMATION f) 6(4)	ISOTHERM g) –	REMARKS
-	Silvretta Nova Schwalzbergbahn Vermaletal	1840	W-WNW	37°	35°	1974-12-31	1 p.m.	+4,0	-2		1/2	+	crack 2 weeks ago 12 persons killed
1	Measuring site I	1870	SSE	39°	34°	1981-04-15	12.30	+ 11,0	0	d) 65	1/2	+	see Lackinger(1981)
2	Sellraintal	950	SE	---	(34°)e)	1982-01-01	4.30 p.m.	---	-	d) (60)	3/1	+	a) Between 5 p.m. of the preceding day and 8 a.m. of date
3	Direttissima-E-Rücken	1950	S	42°	36°	1982-01-22	a)	+ 4,4°	-6	150	(2) e)	h)	cracks > 23 days ago
4	Immediately E of No.3	1950	S	41°	36°	1982-02-14	a)	+ 5,0°	-5	205	1	+	b) At standard test area of Tyrolean avalanche service, 1905 m a.s.l.
5	Hüttinger Alm	1580	ESE	42°	33°	1982-02-17	11.30 a.m.	+ 5,0°	-7	205	1	+	cracks 6 weeks ago
6	Immediately E of No.4	1950	S	---	36°	1982-02-20	?	+ 2,1°	-2	205	(1)	+	c) Days before the date of release
7	Osthang (southern part)	1780	ENE	38°	34°	1982-04-01	10.00 a.m.	+ 6,5°	-5	220	1/5/2	+	slide of a few m
7a	Osthang (southern part)	1800	ENE	38°	34°	1982-04-05	?	+ 5,8°	-4	205	1/5	+	d) Value from the avalanche site
8	Hafeleker-Südhang	1900	SSE	---	35°	1982-04-04	a)	+ 5,8°	-3	210	1/2	+	crack 21h ago j)
9	Measuring site I	1880	SSE	40°	34°	1982-05-07	5.00 a.m.	+ 6,1°	-3	165	1/(4)	+	post failure to No.7
9a	Measuring site I (the same as No.1)	1880	SSE	40°	34°	1982-05-20	4-6 p.m.	+11,8°	-3	d) 60	1	+	e) (Data) in brackets are uncertain
10	Measuring site I	1890	SE	41°	35°	1982-05-17	5-7 p.m.	+11,8°	0	d) 90	1/2	+	slide <2 m new cracks formed sluff
	Winter 1982/83 : very few glide, no glide cracks, no glide avalanches												f) 1... warm period 2... radiation 3... rain 4... new snow 5... greater snow depth by accumulation 6... water in the subsoil
11	Measuring site II	1888	SW	40°	38°	1983-12-27	12-3 p.m.	+11,0	-2	d) 75	3/1/A	+	g) +... uniform temperature of 0°C in the whole snow pack
12	Hüttinger Alm (the same as No.5)	1580	ESE	42°	33°	1983-12-27	?	+11,0	-2	110	3/1/A	+	h) Lower part of 80 cm of 150 cm snow depth was at 0°C
13	Hüttinger Alm (the same as No.5 and 12)	1580	ESE	42°	33°	1984-02-(22)	?	- 3,0	-2	175	?	-	wide cracks since 1984-02-13
14	Langer Sattel-Südhang	1930	S	?	?	1984-03-01	8.30-1 p.m.	+ 2,5	0	160	2/1	+	i) Few glide, very few glide cracks, no other glide avalanches
15	Direttissima-E-Rücken (the same as No.3)	1950	S	42°	36°	1984-03-20	a)	+ 0,5	-3	150	1	+	cracks 4 weeks ago
16	4th gully	1900	(SE)	---	---	1984-03-29	?	+ 3,5	-1	145	(2)	+	j) D> 3m snow accumulation
17	Junger Lehner (E)	1600	SE	---	37°	1984-04-22	1 p.m.	+ 8,5	0/-7	145	2/1	+	1 person killed at 900 m a.s.l.
18	Osthang (the same as No.7)	1780	ENE	38°	34°	1984-04-24	a)	+ 9,0	-1	130	1/5/2	+	
19	Osthang (northern part)	1840	E	(48°)	42°	1985-04-05	12.10	—	—	70	1/2	+	i)
	Winter 1985/86 : almost no glide, no glide cracks, no glide avalanches												
20	Measuring site II (similar to No. 11)	1888	SW	40°	38°	since (87-03-29)	-			240	?	+	growing crack, sluff max 0.5 m
21	Junger Lehner (W)	1680	E	48°	37°	(87-04-23)	?			215	1	+	
22	Direttissima-West-Rücken	1870	SSE	35°	30°	1987-04-25	(a)			195	1	+	crack 7 days ago

Risse und Rißzonen im Beobachtungsgebiet treten praktisch identisch wiederkehrend auf, bevorzugt auf Grashängen mit konvexen Geländepartien, wechselnder Hangneigung oder unterschiedlicher Bodenrauhigkeit.

Bisher wurden die in der Tabelle 1 zusammengestellten 25 Gleitschneelawinen bzw. -rutsche beobachtet, fotografisch dokumentiert und mit verschiedenen Daten korreliert. Wohl ist diese Anzahl noch nicht für eine statistische Auswertung ausreichend, Tendenzen lassen sich aber deutlich ablesen. Verschiedene Beobachtungen entsprechen denen von **In der Gand** und **Zupančič** 1966), einige weichen davon ab.

a) örtliches Auftreten: Nicht in allen Rißzonen entstehen Gleitschneelawinen. Wenn aber, so treten sie immer wieder an denselben Orten mit fast identischen Begrenzungen des Lawinenanbruches auf. Der Bruchspannungszustand ist also wesentlich eine Funktion der lokalen Geländeparameter: Morphologie, Neigung, Exposition und Bewuchs. **Haefeli** (1963) hat gleiche Anbruchfiguren auch bei Hochwinterlawinen beobachtet.

Zum Unterschied von trockenen Schneebrettlawinen kommt es gelegentlich zu Nachbrüchen von oberhalb (Lawine Nr. 7 und 7a in Tab. 1) oder seitlich (Lawine Nr. 3 und 4). Die Höhenzone des Auftretens zwischen 1 600 und 2000 m SH ist vorwiegend topographisch bedingt. Die bevorzugte Exposition der Abbruchgebiete ist SE bis SW, es gibt aber auch Lawinen aus ENE-Hängen. Die mittlere Hangneigung bewegt sich zwischen 30° und 38°, die maximale zwischen 37° und 48°. **In der Gand** und **Zupančič** (1966) geben als bevorzugte Neigung 34° an.

b) Zeitliches Auftreten: Wenn Gleitschneelawinen in einem Winter auftreten, so können sie in allen Monaten vorkommen. Der zeitliche Abstand zwischen Rißentstehung und Lawinenabgang betrug wenige Stunden (eventuell 0) bis einige Wochen. Die genaue Uhrzeit ist naturgemäß schwierig festzustellen. Auffällig oft erfolgte der Abgang abends oder in der Nacht. Als Grund dafür kommen 3 Effekte in Frage: Durch das nächtliche Absinken der Temperatur frieren Schneeoberfläche und Rißflanken. Dabei ändern sich zum ersten infolge thermischer Längenänderung und der anderen schneemechanischen Parameter die Spannungen, zum zweiten kann von oben nachrinnendes Schmelzwasser gestaut werden, wenn die Rißflanken am Boden anfrieren. Der 3. Effekt ist dem Skifahrer wohl bekannt: Bei der Abkühlung von Naßschnee sinkt der Reibungswiderstand gegenüber dem Ski stark ab. Zumindest bereichsweise ist ein ähnlicher Vorgang zwischen Schnee und Boden denkbar. Leider finden sich zum Gleitwiderstand Schnee/Boden praktisch keine Meßergebnisse in der Literatur. Auch für andere Materialien sind die Angaben für niedrige Relativgeschwindigkeiten und um 0°C spärlich. Hinweise auf geringfügiges Absinken des Reibungskoeffizienten knapp unter 0°C finden sich bei **Lang** und **Dent** (1982).

c) Ursachen der Lawinenbildung: Besonders nach Wärmeperioden von einigen Tagen treten vermehrt Gleitschneelawinen auf, auch wenn es am Abgangstag selbst kalt ist. Offenbar wird die Schmierschicht gleitwilliger, sodaß es auch zur Beschleunigung

des Gleitens in Wärmeperioden kommt (Abschn. 3 und **In der Gand** 1954, 1957). Zusätzlich können sich die 3 oben beschriebenen Effekte überlagern. Ähnlich wie Wärmeperioden wirken Regenfälle. Oft sind mehrere Ursachen gemeinsam möglich. Im Widerspruch zu **In der Gand** und **Zupančič** (1966), die der Auslösung durch Temperaturanstieg bzw. durch Belastungserhöhung infolge Niederschlags gleiches Gewicht zumessen, war Neuschneezuwachs nur einmal alleinige Auslöseursache (Lawine Nr. 13 in Tab. 1). Dabei waren katastrophale Schneefälle zu verzeichnen: Die Neuschneesumme vom 7. - 12. 2.1984 betrug 263 cm. Bei den Lawinen Nr. 11 und 12 war 50 cm Neuschnee Mitursache. Sonst wurden im Zeitraum von 10 Tagen vor dem jeweiligen Abbruchstag nur wenige cm Neuschnee gemessen, die keine zusätzliche Belastung bewirkten. Vielmehr hat das rasche Abschmelzen des Neuschnees am Boden der Risse zu einer besseren Schmierung der Gleitfläche geführt, sodaß sich allgemein auch Risse beschleunigt öffneten.

Besonders auffällig bezüglich der Bildungsursache ist, daß bei 22 der 25 Gleitschneelawinen aus Tab. 1 die Schneedecke auf ganze Dicke 0°-isotherm war. Auch bei der Lawine Nr. 3 hatten die unteren 80 cm von 150 cm Schneehöhe 0°C, so wie bei der Silvretta Nova-Lawine wahrscheinlich das untere Drittel. Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß 0°C-Isothermie für Gleitschneelawinenabgänge notwendig ist. Dabei ist die Ableitung der Bodenwärme durch die Schneedecke gehemmt, sodaß das Schmelzen an der Schneeunterseite begünstigt wird. Die entstehende gleitfördernde Schmierschicht führt bei sinkendem Scherwiderstand zum Abgang der Gleitschneelawine.

Wie für ausgeprägtes Gleiten ist auch für Gleitschneelawinen eine Mindestschneehöhe erforderlich. Sonst entstehen sie nur in Steilhängen bei starker Erwärmung oder ausgiebigem Regen.

4. SCHERWIDERSTAND in der GLEITFLÄCHE

4.1 Modellansätze

Eine Kernfrage beim Gleiten des Schnees und beim Übergang zur Gleitschneelawine ist, wie der Scherwiderstand τ_B in der Gleitfläche entsteht und welches Stoffgesetz ihn mit der Gleitgeschwindigkeit u verbindet. Wissenschaftliche Untersuchungen und Meßergebnisse dazu wurden unter anderen von **Haefeli** (1939), **In der Gand** und **Zupančič** (1966), **Mc Clung** (1980, 1981) und **Salm** (1977) publiziert. Daraus können verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Kombinationen von trockener Reibung, Adhäsion und viskosen Widerständen in verschieden dicken Schmierschichten abgeleitet werden.

a) **Haefeli** (1939):
$$\tau_B = k \cdot u \qquad (4.1)$$
trockene Reibung:
$$\tau_B = \mu \cdot \sigma_z \qquad (4.2)$$

b) Neuinterpretation von **Salm** (1977): Adhäsion u. viskoser Scherwiderstand eines dünnen Wasserfilms
$$\tau_B = c' + \eta_w/\delta \cdot u \qquad (4.3)$$

c) **In der Gand und Zupančič** (1966): "dicke" Schmierschicht und trockene Reibung $\tau_s = \eta_L/d \cdot u + \mu \cdot \sigma_z$ (4.4)

d) **Mc Clung** (1981): Stagnationstiefe als scheinbare Grenzschicht (Kriechmechanismus) $\tau_s = \eta_s/d' \cdot u$ (4.5)

e) **Salm** (1977): Überlagerung des reinen Gleitmechanismus b) u. des Kriechmechanismus d) $\tau_{s,ap} = (\eta_w/\delta + \eta_s/d') \cdot u$ (4.6)

Es bedeuten:

τ_s	Scherwiderstand	u	Gleitgeschwindigkeit
k	Proportionalitätsfaktor k = f (ψ, Material, T)	μ	Koeffizient d. trockenen Reibung μ = f (u, σ_z, T)
σ_z	Normalspannung auf die Gleitfläche	c'	Adhäsion

η_w Viskosität von Wasser mit 0°C
δ Dicke des schmierenden Wasserfilms ($\delta \approx 10^{-4}$cm); δ=f (σ_z)
η_L Viskosität der "dicken" Schmierschicht
d Dicke der "dicken" Schmierschicht (nach **In der Gand** und **Zupančič** d = 0,8 cm)
η_s Scherviskosität von Schnee η_s = f (σ)
$\tau_{s,ap}$ "scheinbarer" Scherwiderstand (apparent shear resistance)
d' Stagnationstiefe d' = f (Geometrie, Schneeeigenschaften, Schmierschicht, Gleitmechanismus);

Bei linearisiertem Kriechprofil (Abb. 2) errechnet **Salm** (1977) aus dem Gleitfaktor (**Haefeli** 1948)

$$d' \approx D \cdot u/(u_o - u) \qquad (4.7)$$

mit D ..... Schneedeckendicke (normal zum Hang gemessen)
u_o ..... hangparallele Verformungsgeschwindigkeitskomponente an der Schneeoberfläche

mit praktischen Grenzen von $0{,}15\ D \leq d' \leq 3.1\ D$

4.2 Praktischer Ansatz des Scherwiderstands

Die obigen Modellvorstellungen gelten nur für kleine Gleitgeschwindigkeiten bzw. geringe Stagnationstiefen. Wie gezeigt sind diese Voraussetzungen bei der Gleitrißbildung und beim Gleitschneelawinen-Abbruch nicht gegeben. Vorallem ist die Kriechverformung der 0°-isothermen Schneedecke weitgehend abgeklungen, sodaß sich bei den hohen Gleitgeschwindigkeiten viel zu große Stagnationstiefen ergeben.

Gemäß der Aussage von **Lang** und **Dent** (1982): ... *consensus on the friction mechanism with snow is far from resolved. Continued effort to identify regimes of application of the simple mechanisms is warranted at this stage until a more complete understanding of the processes is known.*" wird vorgeschlagen, den Scherwiderstand wie folgt anzusetzen:

$$\tau_s = \tau_f + \tau_{c'} + \tau_v \qquad (4.8)$$

Es bedeuten:

$\tau_f = \sigma_z \cdot \tan \varphi_r$ trockene Reibung (4.9)
φ_r.... Restreibungswinkel (wegen der großen Scherwege)

$\tau_{c'} = c'$ materialabhängige Adhäsion (4.10)

$\tau_v = (\eta_s/d' + \eta_w/\delta) \cdot u$ viskoser Scherwiderstand (4.11)

Dann läßt sich für Bruchbetrachtungen der Scherwiderstand auf das Mohr-Coulomb-Gesetz vereinfachen:

$$\tau_s = c + \sigma_z \cdot \tan \varphi_r \qquad (4.12)$$

mit $$c = \tau_{c'} + \tau_v \qquad (4.13)$$

Bis zur Lösung der noch offenen Probleme beim komplexen Gleitvorgang wird diese Näherung, wie auch für andere Festigkeitsfragen des Schnees, allgemein für Bruchprobleme akzeptiert.

5. MECHANISMUS der GLEITSCHNEELAWINENAUSLÖSUNG

5.1 Bruchphasen und Ursachen der Brüche

Anders als bei trockenen Schneebrettlawinen, bei denen sich die schnell ablaufenden Bruchphasen einer Beobachtung weitgehend entziehen, zeigen sich bei Gleitschneelawinen verschiedene Bruchabläufe recht deutlich:

a) Risse öffnen sich an der späteren Krone der Lawine (Abb. 1a). Große Stauchungen im Druckbereich treten auf (nicht immer). Der Lawinenabbruch tritt in der Gleitfläche ein. Ein Stauchwall ist vorhanden (Abb. 1b).

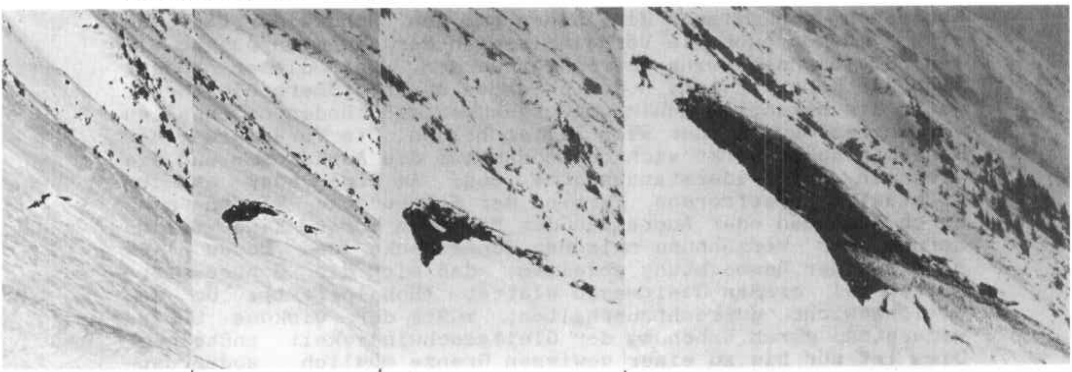


Abb. 9 Entwicklung von Gleitrissen und nachfolgende Gleitschneelawine (Nr. 15 in Tab. 1)
Development of glide cracks and a following glide avalanche (Nr. 15 in Tab. 1)

b) Risse öffnen sich an der unteren Begrenzung der späteren Lawine (Abb.9). Risse öffnen sich oben (nicht immer). Der Bruch in der Gleitfläche tritt oberhalb der erstgenannten Risse ein. Ein Stauchwall fehlt oder ist kaum ausgeprägt.

Als auslösend für die Brüche beim Entstehen der Gleitschneelawine kommen zwei Ursachen in Frage:

1) Erhöhung der äußeren Belastung: Durch Anwachsen der treibenden Spannungen (um ein beträchtliches Maß) wird die Festigkeitsgrenze erreicht. Diese Auslöseursache ist nach den beschriebenen Beobachtungen für Gleitschneelawinen von geringer Bedeutung. Dies bestätigen auch die Mißerfolge bei versuchter künstlicher Auslösung von solchen Lawinen mittels Sprengung. Die Festigkeit wird andererseits durch den veränderten Spannungszustand beeinflußt, z.B. kann der Scherwiderstand mit steigender Normalspannung sinken.

2) Verminderung des Scherwiderstandes in der Gleitfläche: Hierin liegt die Hauptursache der Gleitschneelawinenbrüche. Die Abnahme der Festigkeit kann auf verschiedene Weise geschehen, weil sie von vielen Parametern abhängt:

- Die Temperaturverhältnisse beeinflussen die Verformbarkeit (Viskosität), Festigkeit und den Wassergehalt des Schnees, besonders beim Schmelzpunkt und bei 0°-Isothermie.
- Der Wassergehalt steuert die Dicke der Schmierschicht und deren Viskosität, aber auch die Ablösung der Schneeunterseite vom Boden und damit den Gleitmechanismus (Übergang von Kriechen zu reinem Gleiten; **McClung** 1981). Bei Wasserzutritt wird die Schmierschicht dicker, der viskose Scherwiderstand sinkt.
- Die Rauhigkeit der Bodenoberfläche ist für den Reibungswinkel und die Verzahnung (Kohäsion/Adhäsion,) aber auch den Gleitmechanismus (s. oben und Abschn. 4) verantwortlich.

Abgesehen von diesen Einflüssen auf den Scherwiderstand an sich, müssen auch die Verhältnisse an der gesamten potentiellen Gleitschneelawine betrachtet werden. Bei dieser ändert sich die Kontaktfläche Boden - Schnee durch größere Gleitwege, weil die bekannten Hohlräume gegenüber den Bodenunebenheiten verschoben werden oder sich Falten bilden. Die Veränderung der Kontaktflächen wirkt sich besonders auf die Adhäsions- und die viskosen Scherwiderstandskräfte aus. Am Boden oder an der Vegetation angefrorene Partien der Schneedecke können sich durch Auftauen oder Ausreißen der Pflanzen lösen. Eine Verminderung der Verzahnung zwischen Schneedecke und Boden läßt sich aus der Beobachtung ableiten, daß sich die Schneeunterseite bei großen Gleitwegen glättet (Hobeleffekt). Um das Gleichgewicht aufrechtzuerhalten, müßte der viskose Scherwiderstand durch Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit ansteigen. Dies ist nur bis zu einer gewissen Grenze möglich, sodaß sowohl **Haefeli** (1939) als auch **In der Gand** und **Zupančič** (1966) eine kritische Geschwindigkeit als Anzeichen für einen bevorstehenden Gleitschneelawinenabbruch vermuten.

5.2 Entstehung der Risse und Spannungsumlagerungen

Wenn der in der Gleitfläche geweckte Scherwiderstand zur Abtragung der treibenden Scherkraft in den Boden nicht ausreicht, muß das Defizit durch Längskräfte in der Schneedecke aufgenommen werden. Das Defizit resultiert aus den infolge wechselnder Hangneigung und Rauhigkeit, veränderlicher Schneehöhen und -eigenschaften örtlich und zeitlich variablen treibenden und rückhaltenden Spannungen. Wenn die sich akkumulierenden Längszugspannungen in der Schneedecke an einer Stelle deren Zugfestigkeit erreichen, so reißt sie auf. Die Spannungszustände dabei behandelt **Lackinger** (1987, 1988).

Nach dem Aufreißen der Schneedecke fällt die rückhaltende Wirkung der Längsspannungen weg, die treibende Belastung bleibt aber gleich. Entweder kommt es sofort zum Lawinenabbruch oder neue Stützkräfte müssen aktiviert werden. In der Schneetafel finden Spannungsumlagerungen statt. Durch Weitergleiten können neue Rauhigkeiten und Verankerungen zwischen Schnee und Boden aktiviert werden. Die Hohlräume an der Schneeunterseite können zusammenbrechen, sodaß größere Kontaktflächen entstehen. Dadurch wachsen die Adhäsions- und die viskosen Widerstandskräfte an. Auch eine untere Abstützung oder eine seitliche Verhängung sind möglich. Durch die beobachtete Beschleunigung des Gleitens nach der Rißbildung (s. Abschn. 3.) wird zudem ein höherer viskoser Scherwiderstand geweckt. Das neuhergestellte Gleichgewicht verhindert vorläufig den Lawinenabgang, wohl aber klaffen die Rißflanken zunehmend auseinander.

5.3 Abbruch der Gleitschneelawine

Vor allem aufgrund des flächenmäßig größten Anteils wirkt nach dem Aufreißen im wesentlichen der Scherwiderstand am Boden rückhaltend auf die Schneetafel. Der Bruch der Gleitschneelawine erfolgt als Scher- oder Schiebungsbruch durch Verminderung des Scherwiderstandes (s. Abschn. 5.1) bei praktisch unveränderter Gesamtbelastung.

Die Verminderung der Festigkeit (unter Ansatz des Mohr-Coulomb-Gesetzes Gl. 4.12) wird anhand der im Meßfeld abgegangenen Lawine Nr. 11 (Tab. 1) mit folgenden Daten abgeschätzt:

schräge Länge $L = 52$ m Dicke $D = 0{,}6$ m
Wichte $\gamma = 2{,}8$ kN/m³ mittlere Hangneigung $\psi = 38°$
Reibungswinkel $\varphi_r = 30°$ (angenommen)

Bei einer angenommenen Gesamtstabilität $s = 1{,}2$ vor dem Bruch

$$s = (c.L + \gamma.D.L.\cos\psi.\tan\varphi_r) / (\gamma.D.L.\sin\psi) \qquad (5.1)$$

waren in der Sohle Adhäsion und viskose Scherfestigkeit von $c \approx 0{,}48$ kPa wirksam.

Es kann zum Bruch kommen, wenn sich c und/oder die Reibung vermindern. Ein völliger Abbau von c in der gesamten Sohlfläche ist unwahrscheinlich. Bei unverändertem c läßt sich

einfach nachweisen, daß ein Absinken des Reibungswinkels um 7° über die ganze Lawinenfläche oder auf 0° in 27% dieser Fläche notwendig wären, damit der Bruch eintritt. Derart große Veränderungen sind kaum vorstellbar.

Der Scherbruch läuft daher mit sehr großer Wahrscheinlichkeit, wie auch bei trockenen Schneebrettlawinen, progressiv ab. Von der Initialbruchstelle aus pflanzt er sich durch Überlastung der Nachbarbereiche fort. Diese Vorgänge sind sehr komplex und zur Zeit Gegenstand allgemeiner Lösungsbemühungen (z.B. **McClung** 1986, **Gubler** 1988, **Salm 1988**).

Eine weitere sehr wahrscheinliche Auslöseursache für Gleitschneelawinen, auf die auch **McClung** (1980) hinweist, besteht darin, daß sich ein Wasserstau zwischen Schnee und Boden bildet. Besonders wenn große Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht auftreten oder wenn bodennahe Eisschichten existieren - wie dies bei der "Silvretta-Nova"-Lawine der Fall war (**Längle** 1975), ist ein solcher Stau in Rißzonen oder in Bereichen mit Kompression und Faltung des Schnees vorstellbar.

Die Wirkung eines Schmelzwasserstaus in einer begrenzten Zone wird im folgenden geomechanisch untersucht (Abb. 10). Bei gering wasserdurchlässigem Schnee entsteht ein Staudruck, der die Normalspannungen σ_z reduziert, ähnlich wie der Porenwasserdruck in gering durchlässigen Böden. Dadurch vermindern sich die rückhaltenden Reibungsspannungen in der Scherfläche beträchtlich. Wenn die stützenden Randkräfte außer Betracht bleiben, kann aus einer Gleichgewichtsbetrachtung an einem 1 m breiten Streifen die Veränderung der Stabilität infolge eines Staus von der Länge L_w ermittelt werden.

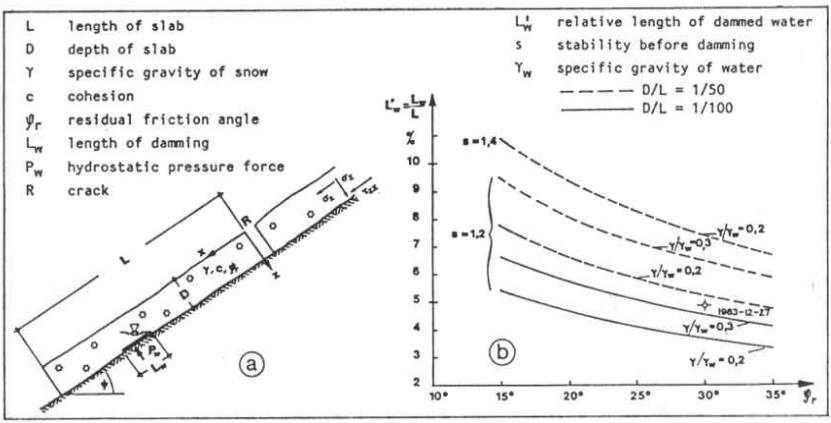


Abb. 10 Begrenzter Schmelzwasserstau unter einer potentiellen Gleitschneelawine. a) Geometrie b) Relative Staulänge für den Bruchzustand (aus **Lackinger** 1987)
Limited damming up of water under a potential glide avalanche. a) geometry b) relative length of dammed water for the state of failure (from **Lackinger** 1987)

Stabilität vor dem Stau: siehe Gleichung (5.1)

Staudruckkraft: (normal zum Boden)
$$P_w = \tfrac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot L_w^2 \cdot \sin\gamma \qquad (5.2)$$

Stabilität mit Stau:
$$s' = [c.L + (\gamma.D.L.\cos\gamma - \tfrac{1}{2}.\gamma_w.L_w^2.\sin\gamma).\tan\varphi_r]/(\gamma.D.L.\sin\gamma) \qquad (5.3)$$

Stabilitätsänderung:
$$\Delta s = s - s' = (\gamma_w \cdot L_w^2 \cdot \tan\varphi_r)/(2 \cdot \gamma \cdot D \cdot L) \qquad (5.4)$$

Für die Verminderung der Stabilität s bis zum Bruch der Lawine (s'= 1) errechnet sich die erforderliche relative Staulänge L'_w

$$L'_w = L_w/L = \sqrt{2 \cdot \Delta s \cdot \gamma/\gamma_w \cdot D/L \cdot 1/\tan\varphi_r} \qquad (5.5)$$

Interessanterweise ist L'_w vom Neigungswinkel der Gleitfläche unabhängig und wird vorwiegend von der Geometrie bzw. der Stabilität vor dem Stau bestimmt. Es entspricht der Anschauung, daß umso mehr Staulänge erforderlich ist, je höher die Stabilität vorher war und je schwerer der Schnee ist. Abb.10b zeigt L'_w für einige gebräuchliche Parameter.

Als Beispiel wird wieder die am 27.12.1983 im Meßfeld abgegangene Gleitschneelawine Nr. 11 (Tab. 1) untersucht. Mit Gl. 5.5 errechnet sich eine Staulänge L_w = 2,5 m, d.h. weniger als 5% der Gesamtlänge, die den Bruch herbeigeführt hat, vorausgesetzt sie tritt über die gesamte Breite auf.

Nicht genauer eingegangen wird hier auf die Änderung der Scherparameter infolge des Wasserstaus. Wie eine Kontrollrechnung ergab, vermindert ein totaler Verlust der Kohäsion im Staubereich die zur Herbeiführung des Bruches nötige Staulänge nur wenig (ca. -10%).

Es ist unbestritten, daß die notwendigen Idealisierungen im mechanischen Modell den sehr komplexen Verhältnissen in der Natur nicht voll gerecht werden können. Zahlreiche Meßaufgaben und umfangreiche Beobachtungen sind noch zu tätigen.

6. ZUSAMMENFASSUNG der ERGEBNISSE und AUSBLICK

Beim Gleiten des Schnees, bei Gleitrissen und Gleitschneelawinen konzentrieren sich die zahlreichen steuernden Parameter auf die Grenzfläche Schnee - Boden, in der flüssiges Wasser die entscheidende Rolle spielt. Da sich alle Phänomene um den Schmelzpunkt des Schnees abspielen, reagieren sie auf kleinste Änderungen sehr empfindlich.

Die Messungen in einem steilen Meßfeld mit Hilfe eines Mikrocomputersystems brachten wohl zahlreiche Erkenntnisse, aufgrund vieler Widersprüche zur Literatur aber noch keine vollständige Lösung der komplexen Zusammenhänge. Insbesondere ergaben die Gleitmessungen (aufgrund der steileren Neigungen und der fehlenden Abstützung der Schneedecke im Versuchshang) auch ohne Gleitrisse wesentlich höhere Gleitgeschwindigkeiten

(bis 152 mm/d) als in der Literatur zu finden sind. Erstmals gelang es, die Gleitvorgänge auch während und nach dem Aufreißen der Schneedecke zu messen. Auch hier sind gegenüber den meist lückenhaften publizierten Daten Unterschiede aufgetreten. Es kam nämlich nicht zu einer Verlangsamung des Gleitens nachdem sich der Riß geöffnet hatte, sondern zu einer mehrtägig gleichbleibenden, hohen Öffnungsgeschwindigkeit (bis 72 mm/h bzw. 1,66 m/d). Publiziert sind Werte zwischen 10 und 220 mm/h bzw. bis 10 m/d. Gleitwege von einigen Metern in einem Winter - in Rißzonen bis 20 m - sind keine Seltenheit.

25 Gleitschneelawinen bzw. -rutsche sind in Tab. 1 mit topographischen, chronologischen und meteorologischen Daten zusammengestellt. Auffallend war das Wiederkehren von örtlich fast identischen Rißzonen und Gleitschneelawinen in verschiedenen Jahren. Die mittlere Neigung der Abbruchgebiete liegt zwischen 30 und 38°, ihre Exposition zwischen ENE und WNW. Zeitlich verteilen sich Gleitschneelawinen recht gleichmäßig über die Saison, wenn ein Gleitschnee-Winter vorliegt, sonst häufen sie sich im Frühjahr. Festigkeitsabfall in der Gleitfläche und nicht Belastungserhöhung sind als Abbruchursache anzusehen. Eine ausschlaggebende Rolle spielt die 0°-Isothermie der Schneedecke, da sie bei fast allen dokumentierten Lawinen vorlag. Einige Widersprüche zu den spärlichen Publikationen über Gleitschneelawinen bedürfen noch der Klärung.

Aufgrund verschiedener Theorien über den Scherwiderstand zwischen Schnee und Boden und unter Berücksichtigung der eigenen Messungen und Beobachtungen wird ein einfaches mechanisches Modell der Bruchphasen von Gleitschneelawinen entwikkelt. Dabei kann das Absinken des Scherwiderstands als Auslöseursache für Gleitschneelawinen durch einen begrenzten Stau von Schmelzwasser an der Schneeunterseite entstehen. Die Kräfteverhältnisse an der potentiellen Gesamtlawine werden für diesen Fall untersucht. Eine Parameterstudie ergab, daß die Abmessungen des bruchauslösenden Staus nur wenige Prozent der Lawinenfläche ausmachen.

Zusammenfassend muß festgestellt werden, daß noch zahlreiche Probleme sowohl beim Gleiten als auch bei Gleitschneelawinen durch weitere systematische Experimente zu lösen sind. Zunächst soll die Fortsetzung der Beobachtungen und Messungen weitere Zusammenhänge mit Routinemeßgrößen und relevanten physikalischen Prozessen (z.B. Energiebilanz) herstellen. Weiters bedarf das Regime des freien Wassergehalts in der Schneedecke und in der Gleitfläche einer eingehenden Untersuchung. Vor allem werden aber der Scherwiderstand zwischen Schnee und Boden und seine Veränderungen als Zentralproblem des Gleitens und des Abbruchs der Gleitschneelawine zu erforschen sein. Die Bestimmung der tatsächlichen Berührungsfläche des Schnees am Boden einerseits und Scherversuche im Meßfeld andererseits sind geplant.

Ziel bleibt weiterhin, den Anbruch von Lawinen genauer zu verstehen, um sich besser gegen sie schützen zu können. Gerade im Hinblick auf den Zustand der Wälder in den Alpen stellt dies ein existentielles Problem in naher Zukunft dar. Obwohl

Haefeli (1963) zu Naßschneelawinen feststellt: "*The rupture situation is ..... very different from the one for dry snow slabs.*", existieren doch zahlreiche schneemechanische Parallelen. Erkenntnisse über Gleitschneelawinen tragen auch zur Klärung des Anbruchmechanismuses von trockenen Lawinen bei.

LITERATURVERZEICHNIS

Endo, Y. (1985): Release mechanism of an avalanche on a slope covered with bamboo bushes. Annals Glaciology 6: 256 - 257

Endo, Y. - Akitaya, E. (1978): Glide mechanism of a snow cover on a slope covered with dwarf bamboo-bushes. In: ANENA (ed.), Grenoble. 2. Rencontre Int. "Neige et Avalanche". Comptes Rendus: 71 - 80

Gubler, H.U. (1988): Aspekte der natürlichen Schneebrettauslösung. Mitt. Vers.Anstalt Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich 94: 287 - 305

Haefeli, R. (1939): Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. Separatdruck Geologie d. Schweiz, Geotechnische Serie - Hydrologie 3: 65 - 241

Haefeli, R. (1948): Schnee, Lawinen, Firn und Gletscher. In: L. Bendel: Ingenieur-Geologie; Springer Verlag, Wien. 2. Teil: 663 - 735

Haefeli, R. (1963): Stress transformations, tensile strengths and rupture processes of the snow cover. In: W.D. Kingery (ed.). "Ice and Snow". MIT-Press. Separatdruck: 560 - 575

In der Gand, H.R. (1954): Beitrag zum Problem des Gleitens der Schneedecke auf dem Untergrund. Winterbericht Eidg. Inst. Schnee- & Lawinenforschg. (WB EISLF) 1952/53. 17: 103 - 117

In der Gand, H.R. (1956): Spezielle Schnee- und Lawinenuntersuchungen im Parsenngebiet. Lawinen und Gleitschnee. WB EISLF 1954/55. 19: 93 - 101

In der Gand, H.R. (1957): Ergebnisse der Gleitmessung. WB EISLF 1955/56. 20: 111 - 114

In der Gand, H.R. (1959): Ergebnisse der Gleitmessung. WB EISLF 1957/58. 22: 122 - 126

In der Gand, H.R. (1968): Neue Erkenntnisse über das Schneegleiten. Schweiz. Bauzeitung 86(31): 557 - 561

In der Gand, H.R. - Zupančič, M. (1966): Snow gliding and avalanches. In: Int. Association of Scientific Hydrology (ed.), Gentbrugge. Int. Sympos. "Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches" 1965, Davos. IASH Publ. 69: 230 - 242

Lackinger, B. (1981): Mikroseismische Messungen in einer gleitenden Schneedecke. ZS. Gletscherkunde und Glazialgeologie 17(2): 213 - 222

Lackinger, B. (1985): Einsatz eines Mikrocomputersystems bei Gleitschneemessungen. Mitt. Forstl. Bd. Vers. Anstalt, Wien 156: 223 - 226

Lackinger, B. (1986): Lawinenmeßfelder und die Lawinenmeß-Station auf der Innsbrucker Nordkette. ZS. Gletscherkunde und Glazialgeologie 22(1): 79 - 87

Lackinger, B. (1987): Stability and fracture of the snowpack for glide avalanches. In: Int. Symp. "Avalanche Formation, Movement and Effects" 1986, Davos. IAHS-Publ.162: 229 - 241

Lackinger, B. (1988): Über die Stabilität der gleitenden Schneedecke und die Bruchmechanik der Gleitschnee-Lawine.

Mitt. Inst. f. Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau, Univ. Innsbruck. 10 (in Vorbereitung)
Lang, T.E. - Dent, J.D. (1982): Review of surface friction, surface resistance and flow of snow. Reviews Geophysics and Space Physics 20(1): 21 - 37
Längle, G. (1975): Gutachten und Unterlagen zum Gleitschnee-Lawinen-Unglück "Silvretta-Nova"/Gaschurn. Unveröffentlicht
McClung, D.M. (1980): Creep and glide processes in mountain snowpacks. Nation. Hydrology Research Institute, Ottawa/ Canada. Paper 6: 1 - 66 + IX
McClung, D.M. (1981): A physical theory of snow gliding. Canad. Geotechn. J. 18(1): 86 - 94
McClung, D.M. (1986): Mechanics of snow slab failure from a geotechnical perspective. Int. Sympos. "Avalanche, Formation, Movement and Effects" 1986, Davos. Review Paper
Salm, B. (1977): Snow forces. J. Glaciology. 19(81): 67 - 100
Salm, B. (1988): Scherrißfortpflanzung in der Schneedecke. Mitt. Vers.Anst. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich 94: 353 - 370
Shoda, M. (1967): Aerial observations and thin section studies on avalanches. In: Inst. of Low Temp. Science, Hokkaido/ Jap. (ed.). "Physics of Snow and Ice". 1. Conf. Sapporo, 1966. Proceed. I(2): 1137 - 1149
Zdarsky, M. (1929): Beiträge zur Lawinenkunde. Alpen-Ski-Verein (ed.), ABC-Verlag, Wien

Autor: Dipl.Ing. Dr. Bernhard Lackinger
Universitäts-Oberassistent und Lektor
Institut für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau
Universität Innsbruck. Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck