

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 21 (1980)
Heft: 3

Artikel: Heutige Solifluktionsbeträge von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden
Autor: Gamper, Martin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088885>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Heutige Solifluktionsbeträge von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden.

MARTIN GAMPER

1 Einleitung

Die heutigen solifluidalen Bewegungen auf und in Erdströmen wurden auf zwei Messfeldern am Westhang des Munt Buffalora und am Südwesthang des Munt Chavagl im Schweizerischen Nationalpark registriert¹. Die beiden Untersuchungsgebiete liegen ca. 4 km westlich des Ofenpasses auf einer Höhe von 2350 m. Verschiedene Messmethoden und eine grosse Anzahl von Messpunkten ermöglichen es, die Solifluktionsbeträge genau zu erfassen. Zusammen mit den Aufzeichnungen von Luft- und Bodentemperaturen am Munt Chavagl war es auch möglich, den Bewegungsmechanismus nachzuweisen. Diese Untersuchungen sollen es erlauben, Wechsellagerungen von Solifluktionsschutt und fossilen Böden in Erdströmen klimageschichtlich auszudeuten².

2 Räumliche und zeitliche Verteilung der Bewegungsbeträge der obersten Bodenschicht im Messfeld Munt Buffalora

Abb. 1 zeigt den Westhang des Munt Buffalora. Deutlich sind an der Vegetationsgrenze die zungenförmigen Ausläufer einer Solifluktionsdecke zu erkennen. Es handelt sich dabei um Erdströme. Sie sind hier etwa 6 bis 8 m breit und 20 bis 30 m lang. Der Verlauf der etwa 60 cm hohen Steilränder der Erdströme sowie die beinahe parallel dazu ziehende Obergrenze der mehr oder weniger geschlossenen Vegetationsdecke sind auch auf dem Plan des Messfeldes Munt Buffalora (Abb. 2) eingetragen.

Insgesamt wurden hier 79 Messmarken aufgestellt: 30 Hölzchensäulen (Durchmesser 2 cm, Länge der ganzen Säule 90 cm) und 49 Alufolien (Stärke der Folien 0,05 mm, Länge 40 cm, Breite 10 cm)³. Die Bewegungsbeträge der Messmarken wurden von September 1975 bis September 1979 jeweils zwei bis viermal pro Jahr registriert. Die Vermessung erfolgte durch Vorwärtseinschneiden mit einem Theodoliten oder durch terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmen⁴.

¹ Diese Arbeiten wurden vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung und von der Kommission der SNG zur wissenschaftlichen Untersuchung des Nationalparks unterstützt.

² Meine Untersuchungen bilden die Fortsetzung der Arbeiten von *Furrer* 1954 und 1977, *Furrer et al.* 1971 und 1975 sowie *Beeler* 1977.

³ In Abbildung 7 sind Aufnahmen von beiden Typen von Marken zu sehen.

⁴ Die geodätischen Vermessungen wurden von Dr. G. Kasper (Geogr. Institut der Univ. Zürich) und vom Verfasser durchgeführt, die terrestrischphotogrammetrischen Aufnahmen von Prof. Dr. H. Schmid und dipl. Ing. J. Rady (Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich).

Die Messgenauigkeit liegt bei beiden Verfahren bei $\pm 0,5$ cm. Die Messinstrumente wurden auf anstehendem Fels aufgestellt. Die so ermittelten Beträge entsprechen den Bewegungen der obersten 5 bis 10 cm des Bodens.

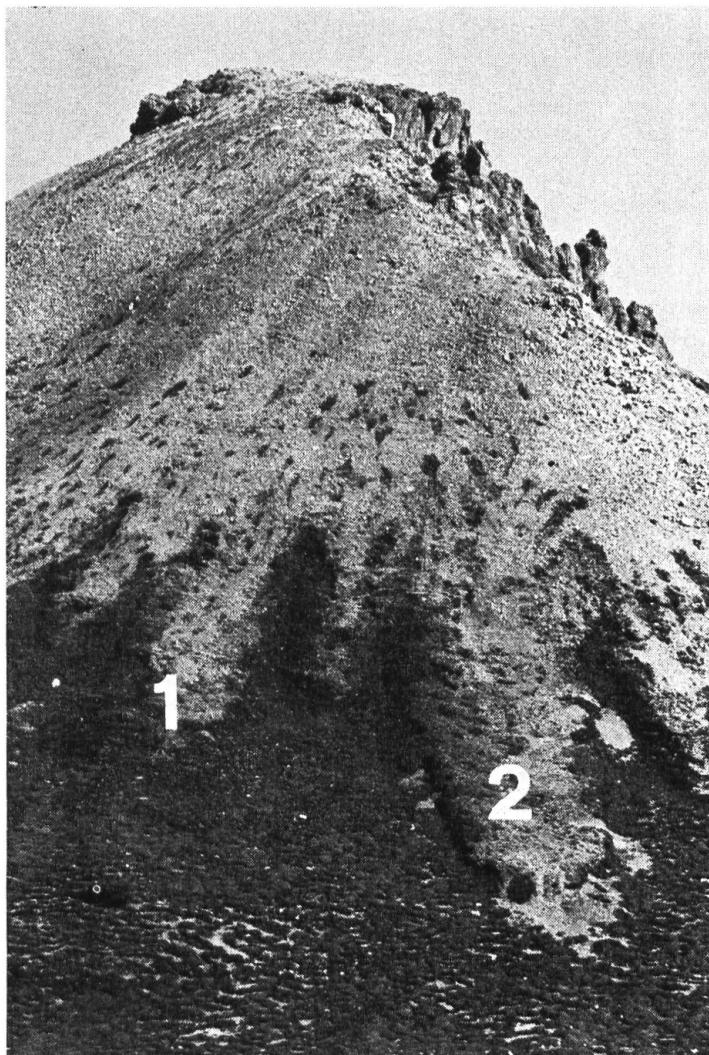


Abb. 1 Erdströme am Westhang des Munt Buffalora. Auf den Zungen 1 und 2 wurden Bewegungsmessungen durchgeführt

Von Mitte Juli bis Ende September konnten jeweils keine Bewegungen festgestellt werden. Solifluktion tritt nur im Herbst und während der Schneeschmelze im Juni auf. In den Abbildungen 3–6 wurden die Jahresbeträge der Solifluktion (von September bis September des folgenden Jahres) dargestellt. Die Karten zeigen vier Zonen:

- Gebiete mit: 0,0–1,0 cm Jahresbewegung
- 1,1–3,0 cm Jahresbewegung
- 3,1–6,0 cm Jahresbewegung
- 6,1 cm und mehr Jahresbewegung

Die Grenzlinien der Flächen mit gleichen Jahresbewegungen wurden durch lineare Interpolation zwischen benachbarten Messpunkten ermittelt. In der Zone mit

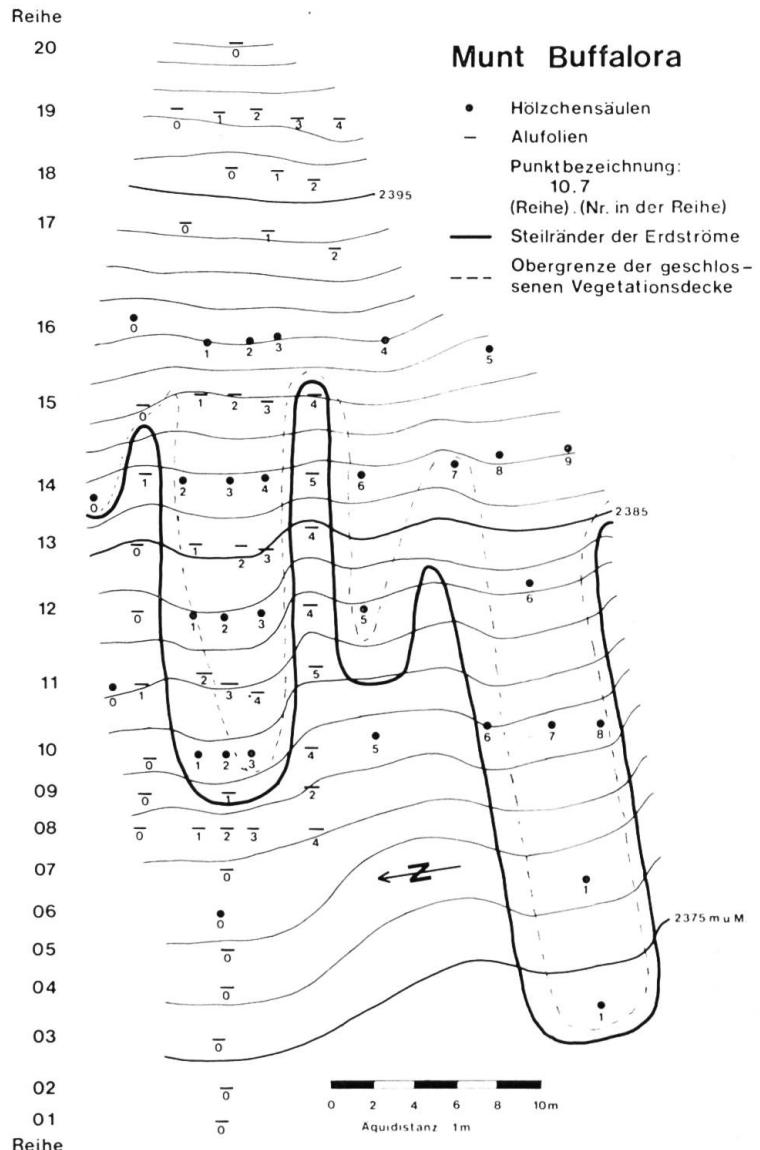


Abb. 2 Plan des Messfeldes
Munt Buffalora

0,0–1,0 cm Jahresbewegung hat sich nichts oder nur sehr wenig verändert; wegen des Messfehlers von $\pm 0,5$ cm sind keine genaueren Angaben möglich.

Oberhalb der Erdströme, in ihrem Einzugsgebiet, und auf den Erdstromrücken sind die Verschiebungen deutlich grösser als unterhalb der Zungen. Die Fläche, wo keine oder nur geringste Bodenbewegungen auftraten, deckt sich mit dem Bereich der geschlossenen Vegetationsdecke. Der hemmende Einfluss der Vegetation auf die Bewegungsbeträge liess sich auch statistisch absichern. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% gehören die Messwerte der Marken auf vegetationsfreiem Gebiet einer anderen Grundgesamtheit an, als die Werte der Messmarken im vegetationsbedeckten Gebiet⁵. Man erkennt auf den Karten auch deutlich, dass in den Jahren 77/78 und 78/79 sowohl die betroffenen Flächen als auch die

⁵ Kolmogoroff-Smirnoff-Test, in *Sachs* 1974, S. 228–230

Beträge der Bewegungen grösser waren, als in den ersten beiden Messperioden. Diese Unterschiede zeigen sich auch in den Mittelwerten der einzelnen Jahre:

	75/76	76/77	77/78	78/79	75/79
Marken auf und oberhalb der Erdströme	2,2 cm	2,5 cm	6,1 cm	4,4 cm	3,8 cm
Marken unterhalb der Erdströme	0,2 cm	0,2 cm	0,6 cm	0,3 cm	0,3 cm

Die Unterschiede der Messwerte in den einzelnen Jahren wurden auch statistisch abgesichert. Die Tests ergaben bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1%, dass die Werte der Jahre 75/76 und 76/77 sowie diejenigen der Jahre 77/78 und 78/79 jeweils der gleichen Grundgesamtheit angehören, die Werte der Jahre 76/77 und 77/78 aber verschiedenen Grundgesamtheiten⁶. Es zeigt sich auch, dass die Bodenbewegungen im Zentrum der Erdstromrücken am grössten sind und gegen die Steilränder abklingen. Der von *Furrer et al.* 1971 (S. 243) aufgezeigte «Solifluktionsstrich» tritt hier deutlich zum Vorschein.

3 Räumliche und zeitliche Verteilung der Bewegungsbeträge der obersten Bodenschicht im Messfeld Munt Chavagl

Am Südwesthang des Munt Chavagl wurden auf vier Erdströmen 100 Messmarken aufgestellt und von September 1977 bis September 1979 vermessen. Die solifluidalen Bewegungen der obersten 10 cm des Bodens erreichten trotz verschiedener Exposition und Hangneigung (hier durchschnittlich 12°, gegenüber ca. 25° am Munt Buffalora) das gleiche Ausmass wie am Munt Buffalora. Ein Vergleich der Messdaten vom Munt Chavagl mit denjenigen vom Munt Buffalora ergab, dass diese sowohl im Jahr 77/78, als auch 78/79 der gleichen Grundgesamtheit angehören⁷. Der hemmende Einfluss einer geschlossenen Vegetationsdecke zeigte sich auch am Munt Chavagl. Da hier auch Bewegungsmessungen auf zwei vollständig bewachsenen Erdströmen durchgeführt wurden, muss davon ausgegangen werden, dass der Grad der Vegetationsbedeckung der entscheidende Faktor für das Ausmass solifluidaler Bewegungen auf Erdströmen ist, und nicht etwa die Morphologie; denn auf diesen vegetationsbedeckten Erdstromrücken konnten keine Bewegungen festgestellt werden.

4 Bewegungsbeträge in den Erdströmen

Die Messmarken am Munt Buffalora wurden Ende September 1979 ausgegraben. Dabei konnten nun auch die Bewegungsbeträge während der letzten vier Jahre bis in eine Tiefe von 90 cm gemessen werden. Die Hölzchensäulen wurden in einem lotrecht gebohrten Loch versenkt, die Aluminiumfolien wurden mit einer

⁶ Wilcoxon-Test für Paardifferenzen, *Sachs* 1974, S. 244–246

⁷ Kolmogoroff-Smirnoff-Test, Irrtumswahrscheinlichkeit 1%.

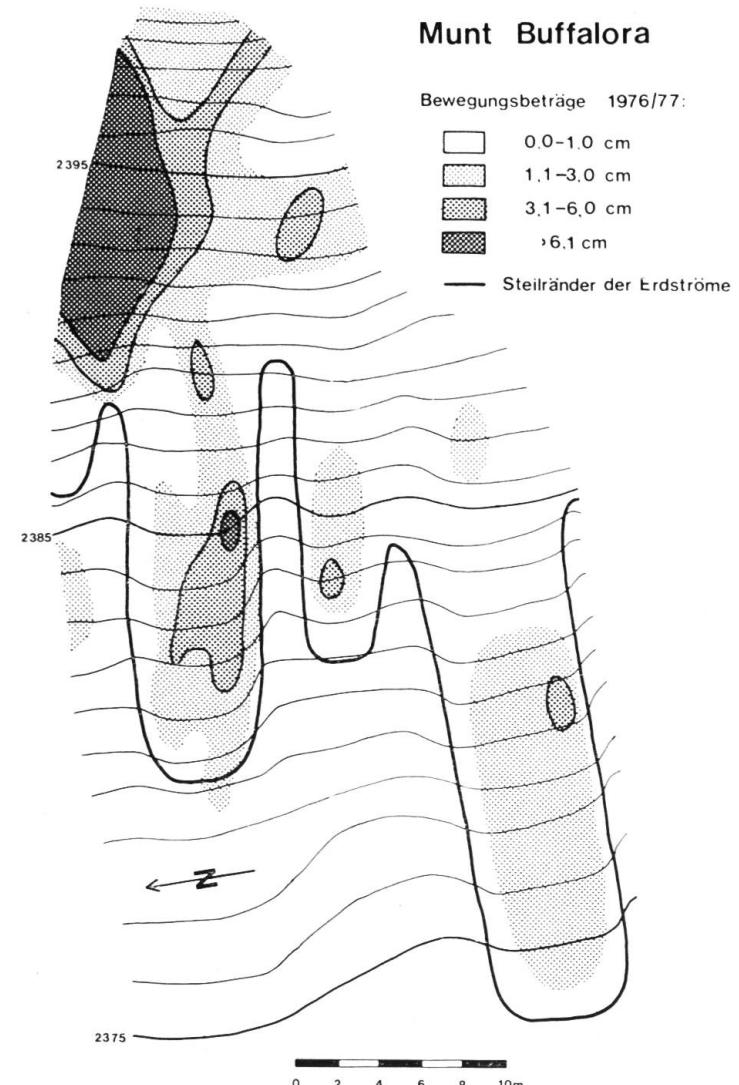
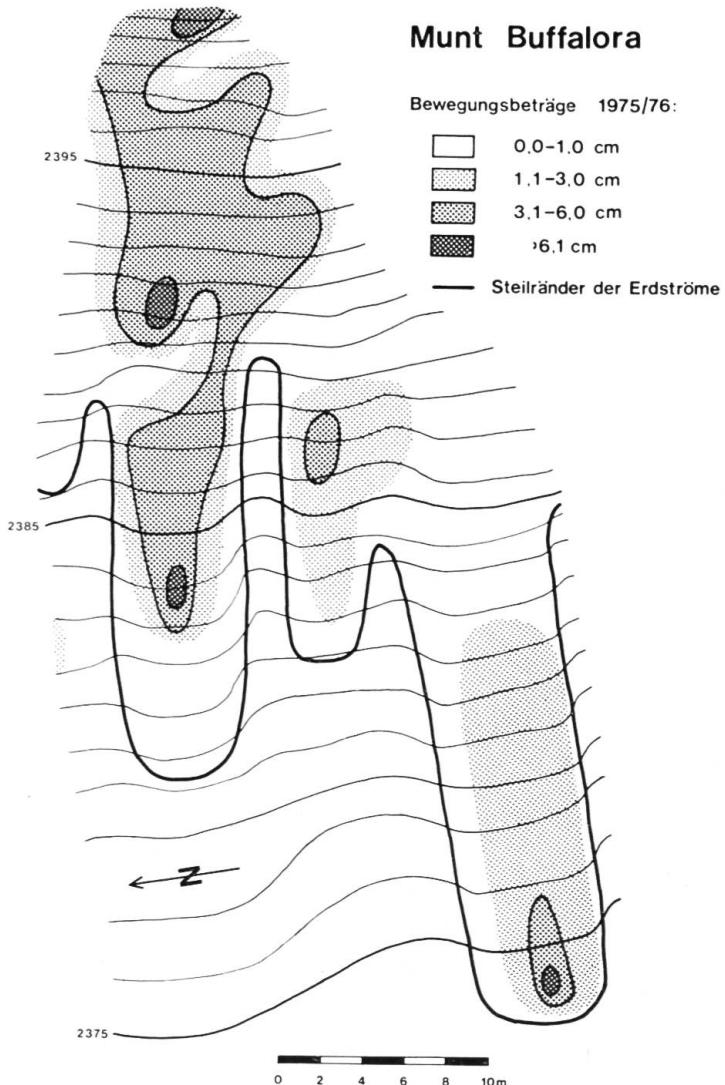


Abb. 3/4 Die Karten zeigen die Hangabwärtsbewegungen der obersten 5–10 cm des Bodens auf dem Messfeld Munt Buffalora in den Jahren 1975/76 und 1976/77.

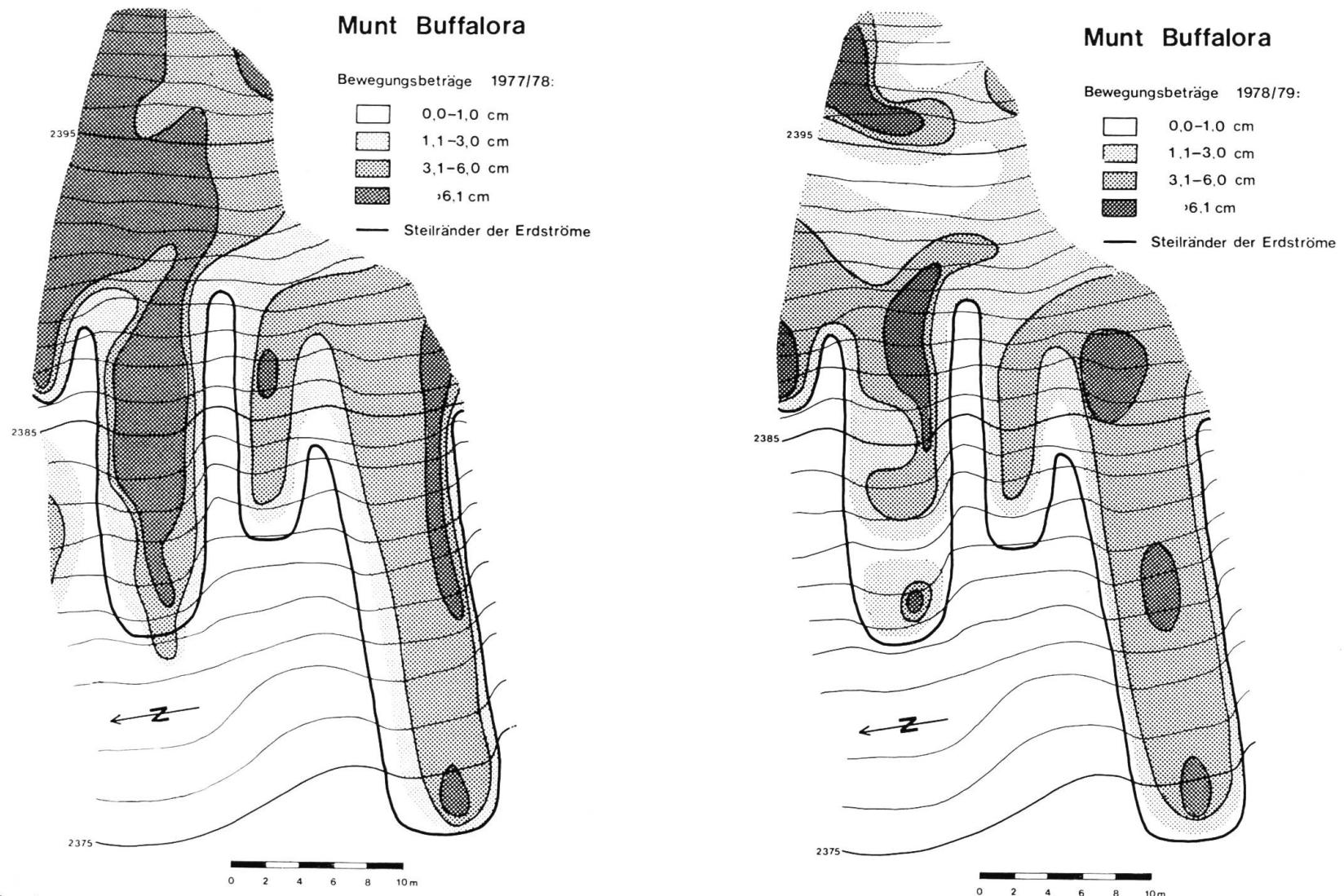


Abb. 5/6 Die Karten zeigen die Hangabwärtsbewegungen der obersten 5–10 cm des Bodens auf dem Messfeld Munt Buffalora in den Jahren 1977/78 und 1978/79.

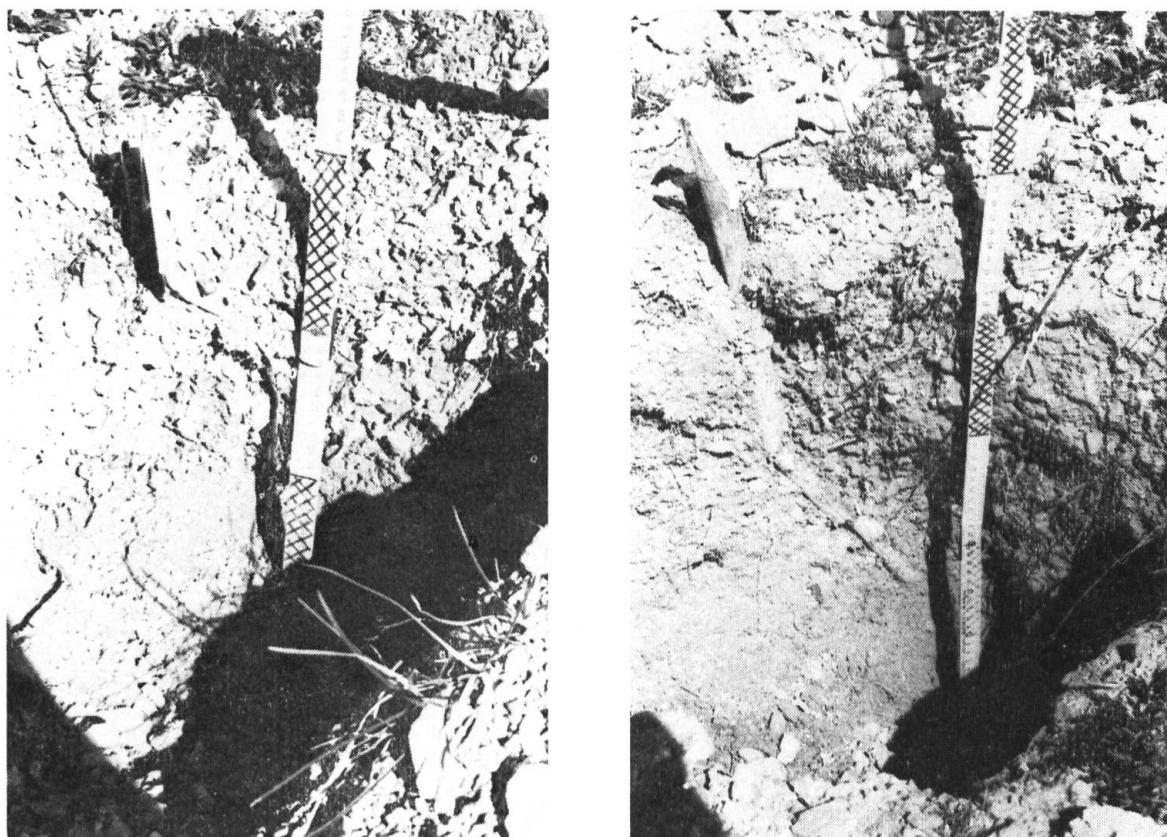


Abb. 7 Die Aluminiumfolie (links) zeigt ein Bewegungsprofil wie es bei vorherrschendem Frostkriechen entsteht. Die Hölzchensäule (rechts) deutet auf eine Bodenbewegung durch Gelifluktion.

Stahlplatte lotrecht in den Boden geschlagen. Die Hölzchen, bzw. die Folien wurden vom Solifluktionsschutt mitbewegt und zeigen beim Ausgraben die Bewegungen während der gesamten Messperiode. Die Abb. 7 zeigt zwei typische *Bewegungsprofile*. Die Alufolie links in der Abbildung weist den grössten Bewegungsbetrag an der Erdoberfläche auf. Mit der Tiefe nimmt die Bewegung rasch ab und klingt dann langsam aus. Die Hölzchensäule rechts in der Abbildung hat wiederum den grössten Bewegungsbetrag an der Erdoberfläche. Danach bleibt aber das Ausmass der Verschiebung bis in etwa 25 cm Tiefe konstant und fällt dann rasch auf 0 zurück. Neben diesen beiden Typen von Bewegungsprofilen konnten auch verschiedene Profile ausgemessen werden, die als Kombination der beiden abgebildeten Bewegungsverläufe interpretiert werden können.

In der Abb. 8 sind die drei Bewegungsprofile schematisch dargestellt. Nach Benedict 1970 ist das *Profil A* typisch für Bodenbewegungen, die durch Frostkriechen verursacht werden. Frostkriechen (nach Washburn 1973 und 1979) ist die Hangabwärtsbewegung von Bodenpartikeln als Folge der Frosthebung des Bodens und darauffolgendem Setzen beim Auftauen. Die Hebung erfolgt senkrecht zur Erdoberfläche, das Setzen des Bodens aber lotrecht. Der Bewegungs-

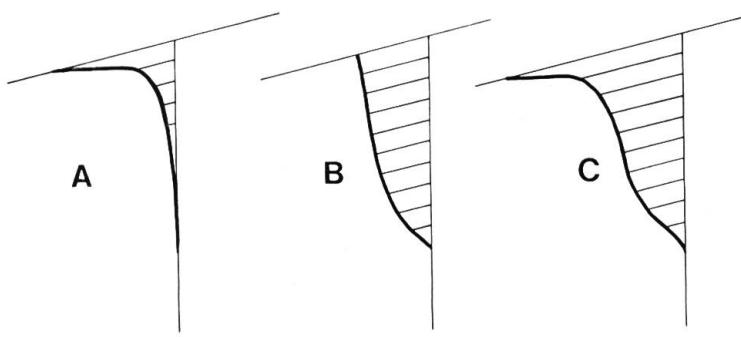


Abb. 8 Schematische Bewegungsprofile: A bei vorherrschendem Frostkriechen; B bei Gelifluktion; C graphische Addition der Profile A und B zu einem kombinierten Bewegungsverlauf, wie er beim Auftreten beider Solifluktionprozesse vorkommt. (Darstellung nach Benedict 1970, S. 196)

betrag ist abhängig von der Hangneigung und vom Ausmass der Frosthebung, also von der Bodengefrobnis. Die Bewegungsbeträge sind an der Erdoberfläche am grössten, weil dort die Frosthebung am intensivsten ist; denn das Bodeneis bildet sich vorwiegend nahe an der Erdoberfläche. Kürzere Frostperioden von einigen Tagen, wie sie im Herbst auftreten können, bringen den Boden nur in den obersten Zentimetern zum Gefrieren.

Das *Profil B* entsteht bei Bodenbewegungen infolge Gelifluktion. Gelifluktion (nach Washburn 1973 und 1979) ist das Durchtränkungsfließen von Schutt über gefrorenem Unterboden, der als Wasserstauer wirkt. Beim gefrorenen Boden kann es sich dabei um Permafrost oder wie bei den untersuchten Erdströmen um jahreszeitliche Bodengefrobnis handeln. Gelifluktion tritt vor allem während der Schneeschmelze auf, wenn der Boden unten noch gefroren und gleichzeitig viel Wasser vorhanden ist.

Das *Profil C* ist eine graphische Addition der Profile A und B. Es entspricht also einem Bewegungsverlauf, der auftritt, wenn sowohl Frostkriechen als auch Gelifluktion vorkommen. Dabei können die Anteile des Frostkriechens und der Gelifluktion unterschiedlich gross sein, so dass alle möglichen Arten von kombinierten Profilen entstehen können. Jede Art eines kombinierten Profils wäre demzufolge als Solifluktionsprofil zu bezeichnen.

Das Blockdiagramm (Abb. 9) zeigt 27 *Bewegungsprofile* von Messmarken am Munt Buffalora. Vergleicht man diese mit den theoretischen Profilen in der Abb. 8, so stellt man fest, dass ein Verlauf, der deutlich auf Frostkriechen hinweist, vor allem im Einzugsgebiet der Erdströme vorkommt. In den Erdströmen selber herrschen kombinierte Profile vor. Der Tiefgang der Bewegungen beträgt in den Erdströmen etwa 40–50 cm, im Einzugsgebiet der Zungen mehr als 40 cm. Vor den Erdströmen traten praktisch keine Bewegungen auf.

Aus den Bewegungsprofilen lassen sich für verschiedene Erdstromquerschnitte *Schuttvolumina* berechnen, die während eines Jahres durch diesen Querschnitt flossen (= Durchtrittsvolumina). Solche Berechnungen waren bei sechs Querschnitten von Erdströmen am Munt Buffalora möglich. Es ergaben sich dabei für den Erdstrom 1 (vgl. Abb. 1) die folgenden Werte:

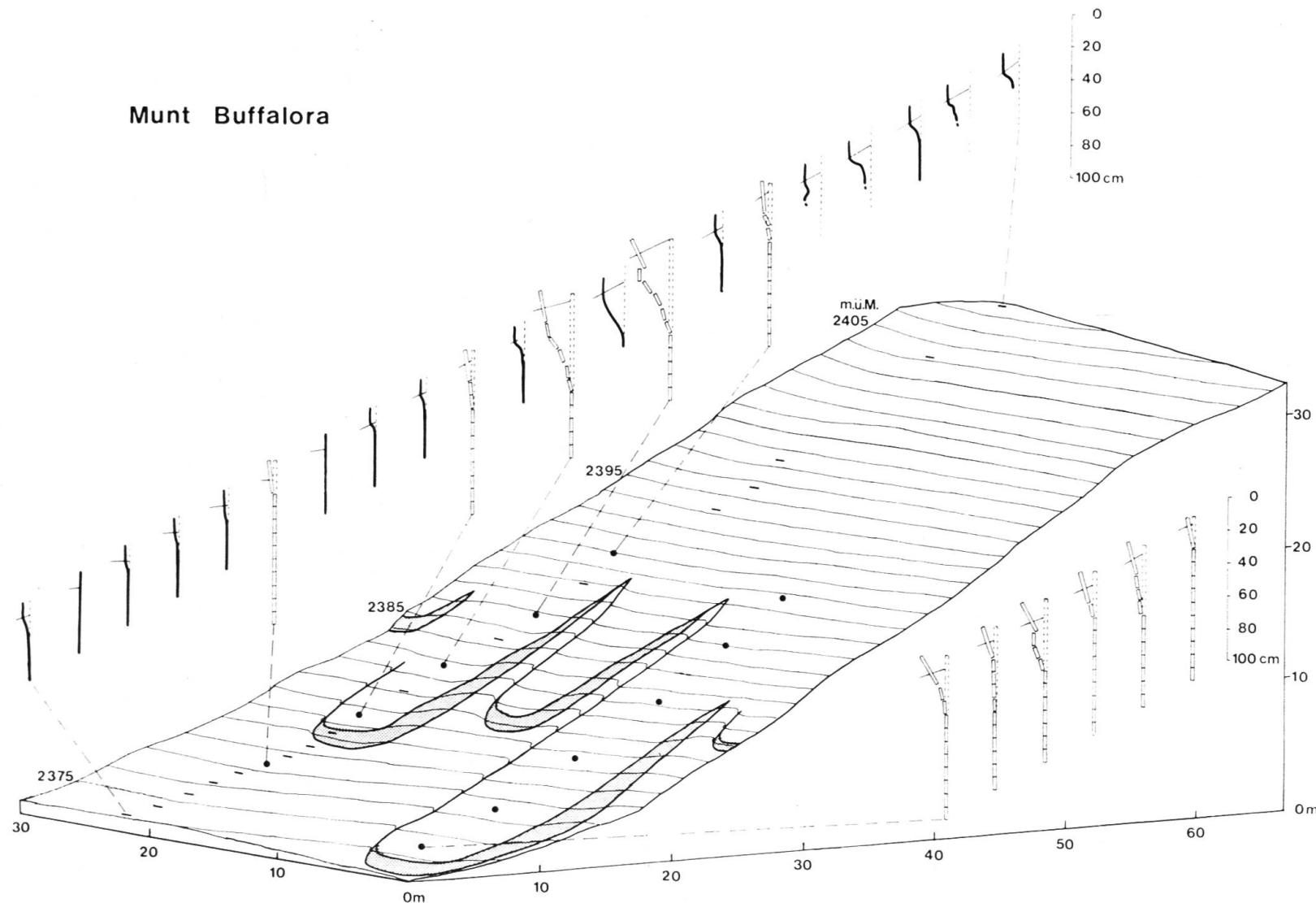


Abb. 9 Blockdiagramm des Messfeldes Munt Buffalora. Eingetragen sind 27 Bewegungsprofile (Alufolien und Hölzchensäulen). Sie zeigen die solifluidalen Bodenbewegungen von September 1975 bis September 1979 bis in eine Tiefe von 90 cm.

Durchtrittsvolumen / Jahr	Entfernung vom unteren Erdstromende
45 dm ³	15,4 m
43 dm ³	12,4 m
41 dm ³	9,0 m
6 dm ³	6,0 m
8 dm ³	2,4 m

Der *Erdstrom 1* ist von der Ansatzstelle der beiden parallel laufenden Steilränder bis zu seinem Zungenende 18 m lang. Die Durchtrittsvolumina zeigen somit, dass die Menge des im Erdstrom jährlich transportierten Solifluktionschuttes bis über die Mitte hinaus nur geringfügig abnimmt. Die Akkumulation des Schuttes erfolgt somit zur Hauptsache im untersten Drittel des Erdstroms. Die Zunge selber nimmt dabei an Volumen zu, stösst aber nur geringfügig oder überhaupt nicht hangabwärts vor. Das gesamte Volumen des Erdstroms 1 lässt sich aufgrund der Koordinaten der Messmarken ungefähr berechnen: Es beträgt 70 m³, wenn man die mittlere Mächtigkeit des Erdstroms aufgrund der Höhe seiner seitlichen Steilränder mit 60 cm festsetzt. Da bei keiner Messsäule Bewegungen in mehr als 55 cm Bodentiefe auftraten, ist damit sicher der aktive Teil des Erdstroms vollständig erfasst. Nimmt man nun an, dass ständig 40–45 dm³ Schutt pro Jahr angeliefert wurden, so ergibt dies eine Bildungsdauer für diese Form von etwa 1 500 Jahren. Da jedoch zu Beginn weniger Material zufliessen konnte, und zudem ein Grossteil des Feinmaterials durch Wind, oberflächliche Abschwemmung und Kalklösung vom vegetationsfreien Rücken der Zunge abgetragen wurde, können 1 500 Jahre nur als minimale Bildungsdauer für diesen Erdstrom gelten. Meiner Meinung nach ist sie wesentlich grösser, da die oben erwähnten Prozesse während der gesamten Bildungsdauer zu erheblichen Materialverlusten führten. Alle diese Überlegungen gelten nur unter der Voraussetzung, dass die klimatischen Bedingungen, die die solifluidalen Prozesse steuern, immer den heutigen Gegebenheiten entsprochen haben.

Beim *Erdstrom 2* (vgl. Abb. 1) konnte nur ein Durchtrittsvolumen im obern Drittel der Zunge errechnet werden. Es ergab sich ein Wert von 27 dm³. Das Volumen dieses Erdstroms ist mit 80 m³ nur wenig grösser als dasjenige des Erdstroms 1. Seine Fläche ist zwar grösser (Länge 24 m, Breite durchschnittlich 6,6 m), dafür liegt die mittlere Mächtigkeit bei nur 50 cm. Dies ergibt sich wiederum aus der Höhe seiner Steilränder sowie aus dem Verlauf eines fossilen Bodens der unter der ganzen Zunge in dieser Tiefe vorkommt und die Basis des Erdstroms anzeigen. Aufgrund des kleineren Durchtrittsvolumens und des etwas grösseren Gesamtvolumens errechnete ich für diesen Erdstrom eine minimale Bildungsdauer von etwa 3 000 Jahren.

Drei 14C-Datierungen des fossilen Bodens, der die Basis dieses Erdstroms bildet (Beeler 1977, Gamper 1981), ergaben aber, dass 70% dieser Zunge innert 400 Jahren entstanden sein müssen – der Rest bildete sich während weiteren 700–800 Jahren – insgesamt also wesentlich schneller, als dies aufgrund der heutigen

Bewegungen möglich wäre. Dies bedeutet, dass Phasen mit verstärkter Solifluktion abwechselten mit Zeiträumen, in denen die solifluidale Aktivität gering war.

5 Boden – und Lufttemperaturmessungen an Erdströmen

Weil Ausmass und Art der Solifluktion abhängig sind von der Bodengefornis, wurden am Munt Chavagl auch Messungen der Boden- und Lufttemperaturen durchgeführt. Derartige Messungen über längere Zeit sind im Bereich der Alpen bisher selten durchgeführt worden. Besonders im Zusammenhang mit solifluidalen Prozessen liegen nur spärlich Daten vor⁸.

Die *Temperaturmessanlage* wurde auf einem Erdstromrücken neben dem Bewegungsmessfeld am Munt Chavagl installiert. Als Registriergerät diente ein 12-

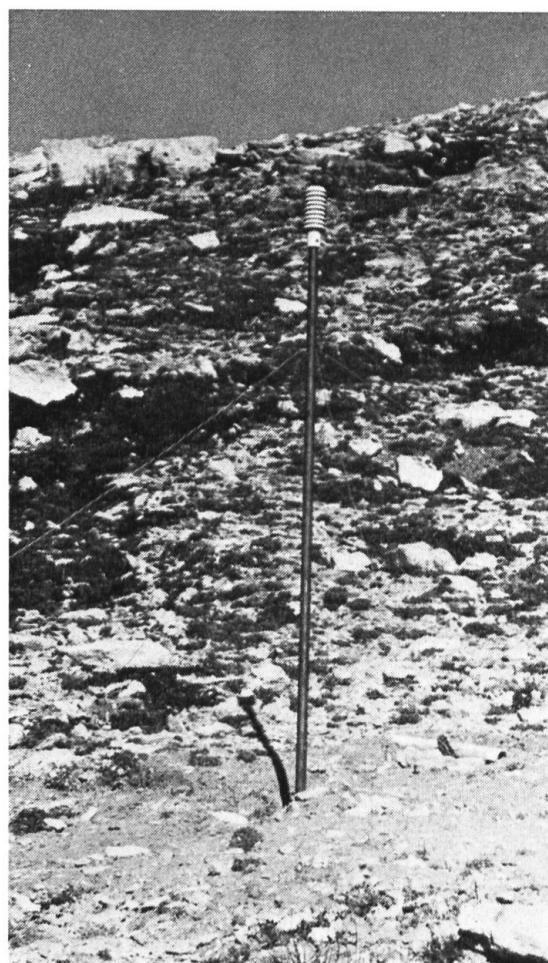


Abb. 10 Temperaturmessanlage am Munt Chavagl. Die Stange mit dem Fühler in 150 cm Höhe ist zu erkennen. Das Registriergerät ist 10 m weiter weg vergraben.

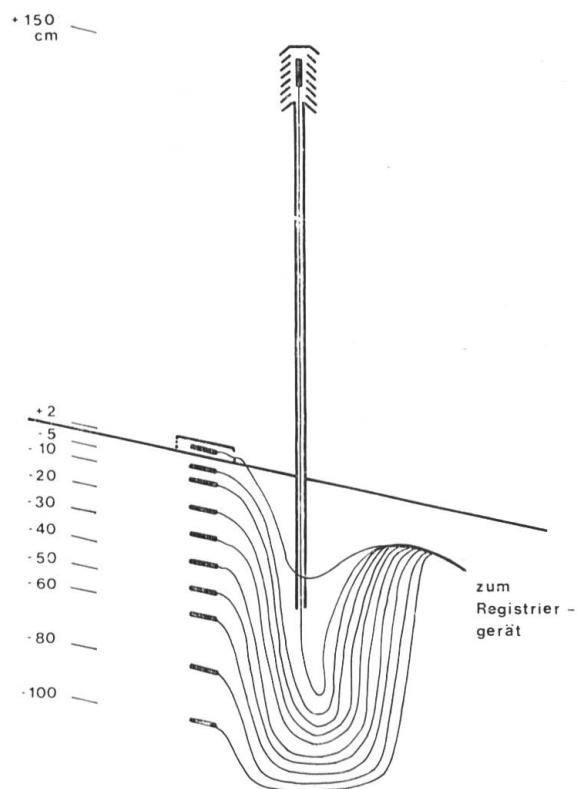
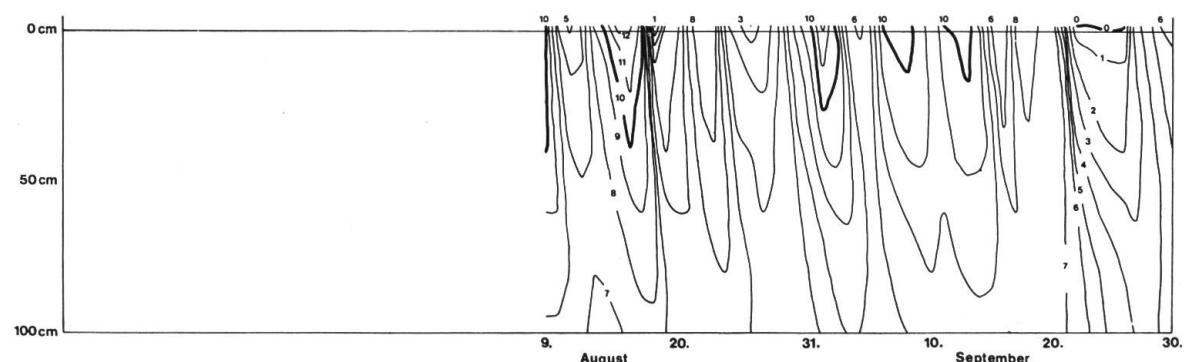
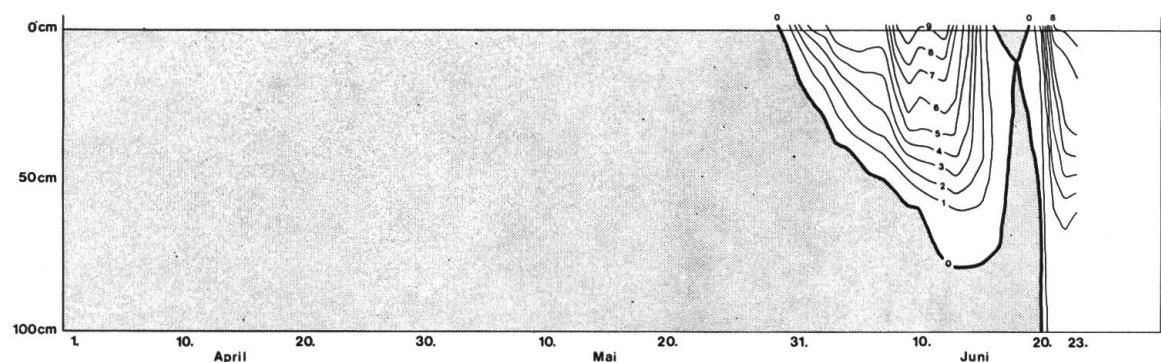
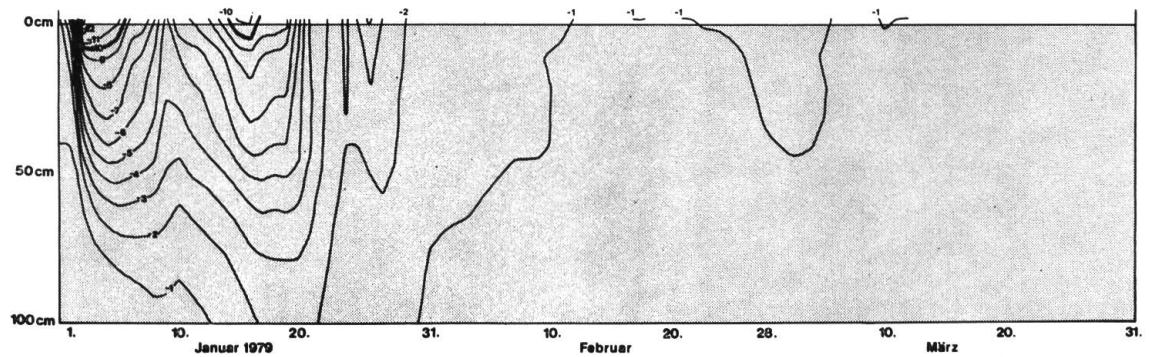
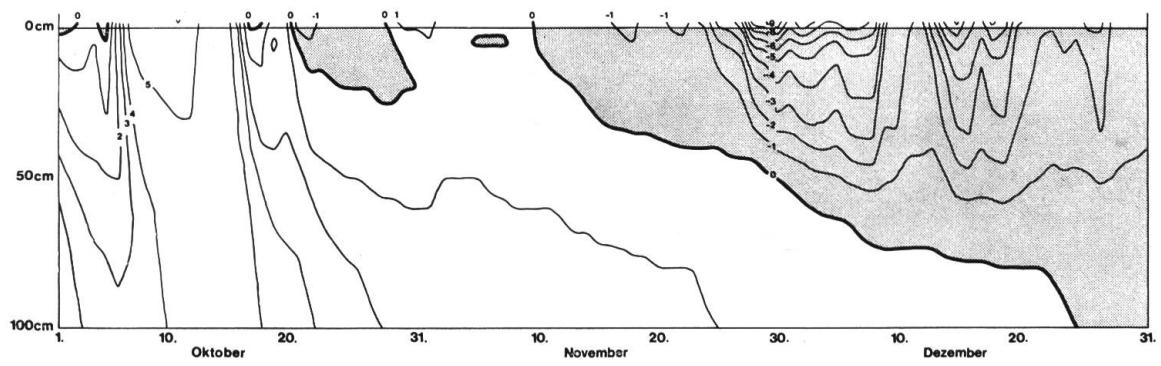


Abb. 11 Lage der Temperaturmessfühler.

⁸ u.a. von E. Vorndran 1969, Freund 1972, G. Vorndran 1972, Stocker 1977



Kanal «Datalogger DL-1» der Firma Aanderaa Instruments in Bergen (Norwegen). An diesem Messinstrument können 11 elektrische Widerstandsthermometer angeschlossen werden. Die Messgenauigkeit liegt bei $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Das Gerät wird von einer Quarzuhr gesteuert und misst alle drei Stunden die Temperaturen der elf angeschlossenen Fühler. Die Daten werden auf Magnetband registriert⁹.

Die Fühler wurden in der Mitte der Zunge unter vegetationsfreiem Boden vergraben. Die Abb. 10 zeigt die Messstelle mit dem Fühler für die Lufttemperatur in 150 cm Höhe über dem Erdboden. Dieser und der Fühler für die Lufttemperatur direkt über dem Boden sind mit Strahlungsschutzhülsen ausgerüstet. Die übrigen neun Widerstandsthermometer messen im Boden. Wie Abbildung 11 zeigt, wurden sie so vergraben, dass entlang den Kabeln kein Wasser einsickert, welches die Temperaturen bei den Messstellen verfälschen könnte.

Die Messanlage wurde am 30. September 1978 eingerichtet und in Betrieb genommen. Für die vorliegende Arbeit konnten die Daten bis zum 30. September 1979 verwendet werden. Leider weist die Messreihe wegen Schwierigkeiten beim Bandtransport vom 24. 6. 79 bis zum 8. 8. 79 eine Lücke auf (vgl. Abb. 12). Für die Beantwortung meiner Fragen ist dieser Zeitraum jedoch nicht von Bedeutung.

Die *Isothermendarstellungen* (Abb. 12) veranschaulichen den Jahresgang der Bodentemperaturen. Diese Grafiken wurden mit den Tagesmitteln der Temperaturen konstruiert. Sie zeigen also nicht die Tagesschwankung, sondern geben ein generalisiertes Bild des Temperaturverlaufs. Besonders interessant ist die 0° -Isotherme. Sie zeigt an, wann das Bodenwasser gefriert, sofern dieses nicht beispielsweise durch Salze verunreinigt ist. Da die Messstelle auf vegetationsfreiem Boden liegt, und Wasser nur durch Regen oder Schneesmelzwasser zugeführt wird, kann eine solche Verunreinigung mit ziemlicher Sicherheit ausgeschlossen werden¹⁰.

Die Isothermendarstellungen zeigen auch, wie die Nullgradlinie im Oktober und November vor dem endgültigen Gefrieren mehrmals in den Boden dringt. Diese kurzfristigen Bodenfröste führen durch Frostkriechen und Kammeissolifluktion zu Bewegungen in den obersten Zentimetern des Bodens.

Am 10. November 1978 begann der Boden dann vorerst 5 cm tief zu gefrieren, am 25. Dezember waren auch in 100 cm Tiefe negative Temperaturen zu messen. Im folgenden Frühjahr taute, während der Schneesmelze, die oberste

⁹ Die Auswertung der Magnetbänder wurde durch die Herren C. Brockmann und M. v. Spreckelsen am Institut für Meereskunde an der Universität Kiel durchgeführt.

¹⁰ Eine Bestätigung dafür, dass der Boden bei 0°C wirklich gefriert, ergab sich bei der Vermessung der Marken am 22. 11. 78. Damals war der Boden beim Messfeld Munt Chavagl und auch bei der Temperaturmessanlage gefroren. Die 10 cm tief im Boden verankerten Messmarken konnten nicht bewegt werden. An diesem Tag lag die 0° -Isotherme in 40 cm Tiefe. Die darüberliegenden Messfühler zeigten Temperaturen von $-0,2^\circ\text{C}$ an.

Im Mai und Juni 1979 vor dem Auftauen blieben alle Bodentemperaturen wochenlang bei $-0,2^\circ\text{C}$ konstant. Nach dem Auftauen schwankte die Temperatur in den Horizonten um die Messfühler täglich gleich um mehrere Grad – ein weiterer Hinweis dafür, dass das Bodenwasser wiederum erst bei 0°C auftaut.

Schicht des Bodens am 30. Mai 1979 auf, als die Messstelle ausaperte. Die Messfühler, 2 cm über der Erdoberfläche sowie 5 cm darunter, zeigten von da an wieder Tagesschwankungen wie vor dem Einschneien. Im Verlauf der nächsten 15 Tage sank die Nullgradisotherme bis in 80 cm Tiefe ab. In dieser Zeit tauten täglich etwa 5 cm des Bodens auf. Wegen eines Kälteeinbruchs Mitte Juni gefror der ganze Boden noch einmal für vier Tage und taute dann aber in zwei Tagen vollständig auf. Während beinahe 20 Tagen herrschten also Verhältnisse wie in einem Auftauboden über Permafrost. Während dieser Zeit stand wegen der gleichzeitigen Schneeschmelze viel Wasser zur Verfügung, und der Unterboden war noch gefroren: ideale Bedingungen für die Gelifluktion¹¹!

6 Schwankungen der solifluidalen Aktivität von Erdströmen im Postglazial

Die Bodentemperaturmessungen ergaben, dass die solifluidalen Bodenbewegungen im Frühjahr eine Kombination von Gelifluktion und jahreszeitlichem Frostkriechen darstellen. Eine Aufteilung der Hangabwärtsbewegung im Frühjahr in Gelifluktion und Frostkriechen wäre nur möglich, wenn der maximale Frosthub im Winter gemessen werden könnte. Daraus liesse sich, zusammen mit der Hangneigung, der maximale Frostkriechgang errechnen. Dies ist jedoch nicht möglich, da der Boden auch nach dem Einschneien noch weiter gefrieren kann, die Bewegungsmessmarken aber nicht mehr vermessen werden können. Abschliessend seien die wichtigsten Resultate kurz zusammengefasst:

1. Die obersten 5–10 cm des Bodens auf Erdströmen und in deren Einzugsgebiet wurden von September 1975 bis September 1979 durchschnittlich um 3,8 cm/Jahr hangabwärts bewegt.
2. Die solifluidale Jahresbewegung setzt sich vor allem aus jahreszeitlichem Frostkriechen und Gelifluktion zusammen. Das Bodenfliessen erfolgt zur Hauptsache während der Schneeschmelze im Frühsommer (Juni/Juli). Die obersten Zentimeter des Bodens werden im Herbst zusätzlich durch Kammeissolifluktion und Frostkriechen transportiert, frostunabhängiges Durchtränkungsfliessen nach Regenfällen im Sommer konnte nicht festgestellt werden, oder diese Bewegungen waren so gering, dass sie im Messfehler liegen.
3. Die jährlichen Unterschiede der Solifluktionsbeträge lassen sich durch den Zeitpunkt des Einschneiens erklären: Liegt im November bereits eine mächtige Schneedecke auf den Erdströmen, so kann der Boden nicht tief gefrieren. Im

¹¹ Solche Verhältnisse herrschten auch bei I Gess (2 km nordöstlich der Berninapasshöhe) am 11. Juli 1978. Der Westhang des Gess war erst stellenweise aper. Bei Grabungen wurde in zwei Erdströmen auf 2320 m Höhe in 35–40 cm Tiefe massive Bodengefronis vorgefunden mit Eislamellen von bis zu 2 mm Mächtigkeit. Diese Schicht war so hart, dass sie im ersten Erdstrom nicht zu durchdringen war. Beim zweiten gelang es, diese etwa 15 cm mächtige Lage zu durchbrechen; darunter war kein Eis mehr vorhanden. Der Schutt über dem gefrorenen Boden war wassergesättigt.

Frühjahr werden dadurch Frostkriechen und Gelifluktion reduziert. Ausserdem verhindert eine Schneedecke Bewegungen der obersten Bodenschicht durch Kammeissolifluktion und Frostkriechen während der herbstlichen Regelationsperiode.

4. Eine geschlossene Vegetationsdecke unterhalb oder auf den Erdströmen hemmt die Solifluktion vollständig.
5. Die Erdströme im Nationalpark befinden sich heute, gesamthaft betrachtet, in einer Ruhephase, da viele ganz bewachsen und demzufolge inaktiv sind; die meisten anderen zeigen nur Bewegungen auf ihren Rücken, die Steilränder sind stabil. Stärkere Solifluktion und die Bildung neuer Erdströme sind nur bei einer Klimaverschlechterung zu erwarten; die Vegetationsdecke muss zuerst zerstört oder zumindest aufgelockert werden. Bei I Gess (Berninagebiet) wurden in diesem Zusammenhang fossile Böden, die durch Erdströme überdeckt wurden, untersucht (*Gamper 1981*). Die Ergebnisse von 35 ^{14}C -Datierungen sowie die Resultate von pollanalytischen und bodenkundlichen Untersuchungen ergaben für die letzten 5 000 Radiocarbonjahre ein recht detailliertes Bild der solifluidalen Aktivitäts- und Stabilitätsphasen. Die Solifluktion war um 4 500 BP, zwischen 3 400 und 2 200 BP sowie von 1 900 bis 1 400 BP und nach 1 100 BP verstärkt. Vergleicht man diese Solifluktionsphasen mit den Depressionen der Waldgrenze und den Gletscherhochstandsperioden, so zeigt sich eine weitgehend parallele Entwicklung. Dies bestätigt, dass der Wechsel von Bodenbildungsphasen mit Zeiten verstärkter Solifluktion durch Klimaänderungen gesteuert wird.

LITERATUR

- Beeler, F.* (1977): Geomorphologische Untersuchungen am Spät- und Postglazial im schweizerischen Nationalpark und im Berninapassgebiet (Südrätische Alpen). Ergebni. d. wiss. Unters. im schweiz. Nat. Park 15, S. 131–276
- Benedict, J. B.* (1970): Downslope soil movement in a Colorado alpine region: Rates, processes and climatic significance. Arctic and Alpine Research 2, S. 165–226
- (1976): Frost creep and gelifluction features: A review. Quaternary Research 6, S. 55–76
- Freund, R.* (1972): Vergleichende Betrachtung von Kleinformen der Solifluktion im Raum Mittelbünden (Schweiz), auf West-Spitzbergen und am Kilimandjaro. Diss. Univ. Zürich
- Furrer, G.* (1954): Solifluktionsformen im schweizerischen Nationalpark. Ergebni. d. wiss. Unters. im schweiz. Nat.-Park 4, S. 203–276
- (1977): Klimaschwankungen im Postglazial im Spiegel fossiler Böden: Ein Versuch im schweizerischen Nationalpark. In *Frenzel, B.*: Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Europa. Erdwissenschaftliche Forschung 13, S. 267–270
- Furrer, G., Bachmann, F. und Fitze, P.* (1971): Erdströme als Formelemente von Solifluktionsdecken im Raum Munt Chavagl / Munt Buffalora (Schweizerischer Nationalpark). Ergebni. d. wiss. Unters. im schweiz. Nat.-Park 11, S. 189–269
- Furrer, G., Leuzinger, H. und Ammann, K.* (1975): Klimaschwankungen während des alpinen Postglazials im Spiegel fossiler Böden. Vierteljahrsschrift d. Naturf. Ges. Zürich 120, S. 15–31
- Gamper, M.* (1981): Heutige Solifluktionsbeträge von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden. Ergebni. d. wiss. Unters. im schweiz. Nat.-Park (im Druck)
- Sachs, L.* (1974): Angewandte Statistik. Berlin, Heidelberg, New York, 4. Aufl.
- Stocker, E.* (1977): Der witterungsbedingte Temperatursturz von Bodentemperaturen an einem Hangrücken der alpinen Stufe in der Kreuzeckgruppe. Sitzungsber. der Österr. Akademie d. Wiss., Mathem.-naturw. Kl. Abt. I 186. Bd., 1. bis 3. Heft, S. 99–117
- Vorndran, E.* (1969): Untersuchungen über Schuttentstehung und Ablagerungsformen in der Hochregion der Silvretta (Ostalpen). Diss. Univ. Kiel
- Vorndran, G.* (1972): Kryopedologische Untersuchungen mit Hilfe von Bodentemperaturmessungen (an einem zonalen Strukturbodenvorkommen in der Silvrettagruppe). Münchner Geogr. Abhandl. 6
- Washburn, A. L.* (1973): Periglacial processes and environments. London
- (1979): Geocryology: A survey of periglacial processes and environments. London