

Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen im Schweizerischen Nationalpark
Herausgegeben von der Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
zur wissenschaftlichen Erforschung des Nationalparks

Résultats des recherches scientifiques au Parc National suisse
Publiés par la Commission de la Société Helvétique des Sciences Naturelles pour les études
scientifiques au Parc National

Band XV

79.

**Heutige Solifluktionsträge von Erdströmen
und klimamorphologische Interpretation
fossiler Böden**

von

MARTIN GAMPER

Druck Lüdin AG Liestal 1981

Heutige Solifluktionsträger von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden

von

MARTIN GAMPER

Summary

Today's **solifluidal** movements on and in **turf-banked gelifluction lobes (Erdströme)** have been registered at two sites on Munt **Buffalora** and Munt **Chavagl** in the **Swiss National Park**. On the backs of the **lobes** the mean rate of **annual downslope-movement** was **3,7 cm**. **Soil and air temperature** measurements on a lobe at Munt **Chavagl** showed, that the **annual downslope-movement** is composed of frost **creep** and gelifluction. A complete vegetation **cover hampers** the **solifluction almost totally**.

In **two lobes debris amounts** of **45/27 dm³** respectively **flew through** a **cross section** in the **middle** of those tongues. **Providing constant climatic** conditions, a **minimum of 1500/3000** years respectively **would be necessary to build up those lobes**.

Today the gelifluction **lobes** in the **Swiss National Park** are in a morphogenetic rest period. Most of **them** are covered with vegetation and therefore inactive. Depending on the present **research results, increasing solifluidal** activities and the formation of new tongues can only be expected, if wet and cold **summers occur more frequently**.

At **I Gess (Bernina region)** fossil soils **below gelifluction lobes** have been **examined**. The results of **35 ¹⁴C-dates**, as well as the **ones** of pollenanalyses and soil **researches** gave a **detailed summary of solifluidal** activity and **stability** periods for the last **5000** radio-carbon years. The **solifluction** was **increased by 4500 BP, between 3400 and 2200 BP, as well as from 1900 to 1400 BP and after 1100 BP**. A **comparison** of these **solifluidal** periods with the **depressions** of the tree line and the **glaciation fluctuations** in the Alps shows an **almost parallel** development. This proves, that the **changes** of soil forming **periods and times of increasing solifluction** are controlled by **climatic variations**.

Vorwort	357
1. Einleitung	358
2. Solifluktionsträger von Erdströmen im Schweizerischen Nationalpark	359
2.1. Untersuchungsgebiete Munt Chavagl und Munt Buffalora	359
2.2. Messung von Solifluktionsträgern	362
2.2.1. Solifluktion - Frostkriechen - Gelifluktion	362
2.2.2. Messmethoden	362
2.3. Ergebnisse der Messungen am Munt Buffalora	365
2.3.1. Korrektur der Messfehler	369
2.3.2. Räumliche und zeitliche Verteilung der Bewegungsträger der obersten Bodeuschicht	371
2.3.3. Bewegungsträger in den Erdströmen	377
2.4. Ergebnisse der Messungen am Munt Chavagl	382

3. Boden- und Lufttemperaturmessungen an Erdströmen im Nationalpark	390
3.1. Messgeräte	391
3.2. Resultate	392
4. Gegenwärtiges solifuidale Aktivität von Erdströmen im Nationalpark	404
5. Bodenkundliche Untersuchungen von Erdströmen im Berninagebiet	406
5.1. Untersuchungsgebiet I Gess – Plan da li Cüni	407
5.2. Form und Aufbau von Erdströmen bei I Gess	408
5.3. Bodenkundliche Untersuchungen	411
5.3.1. Methoden	411
5.3.2. Ergebnisse	415
5.4. ¹⁴C-Datierungen fossiler Böden	418
5.5. Pollenanalytische Untersuchungen	422
6. Solifuidale Aktivität von Erdströmen bei I Gess (Berninagebiet) während der letzten 5000 Radiocarbonjahre	426
7. Hinweise zur solifuidalen Aktivität in den Alpen während des Postglazials	427
Zusammenfassung	429
Tabellen	430
Literaturverzeichnis	440

Vorwort

Diese Arbeit entstand in den Jahren **1976/1980** unter der Leitung von Prof. Dr. G. **FURRER** und Dr. G. **KASPER** am Geographischen Institut der Universität Zürich. Prof. **FURRER** regte sie als Fortsetzung seiner eigenen Untersuchungen an Erdströmen im Nationalpark an. Er unterstützte mich jederzeit im Gelände und bei der weiteren Bearbeitung meiner Ergebnisse, wofür ich ihm an dieser Stelle herzlich danken möchte.

Dr. G. **KASPER** danke ich für seine ständige Hilfe bei den Feldarbeiten und seine wertvollen **Anregungen** bei der Auswertung **der Ergebnisse** sowie für die geodätischen Vermessungen im Nationalpark.

Meinen Kollegen vom Geographischen Institut, **Dr. P. FITZE**, **PD Dr. K. GRAF**, **Dr. T. STRÜBY**, **Frl. dipl. geogr. K. FANGHÄNEL**, **dipl. geogr. M. MAISCH**, **dipl. geogr. F. RENNER** und besonders meinem **«Feldnachbarn»** **dipl. geogr. J. SUTER** danke ich für ihre Unterstützung bei den Feldarbeiten und manche interessante Diskussion. Ebenfalls danke ich meinem Schwager **M. SCHOLLENBERGER** für seine Hilfe bei den Grabarbeiten.

Dank gebührt auch Herrn **Prof. Dr. H. SCHMID** und **dipl. ing. J. RADY** vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich für die Vermessungen mit terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen. Dieses Institut stellte mir auch die Instrumente für die geodätischen Vermessungen zur Verfügung.

An dieser Stelle möchte ich **Dr. W. A. KELLER** und **R. ERNE** vom **¹⁴C-Labor** des Geographischen Instituts der Universität Zürich danken für die **Altersbestimmungen** meiner Bodenproben und für ihre stete Bereitschaft, dabei auftauchende Probleme zu diskutieren und Lösungen zu finden.

Dr. C. BURGA vom Geographischen Institut der Universität Zürich sei für die **pollenanalytische** Untersuchung und Interpretation von Proben aus Aufschlüssen bei I Gess gedankt.

Im weiteren danke ich **PD Dr. G. GENSLER** von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt in Zürich für die Hilfe bei der Auswertung der **Temperaturmessungen**. **C. BROCKMANN** und **M. v. SPRECKELSEN** vom Institut für Meereskunde an der Universität Kiel danke ich in diesem Zusammenhang für die Auswertung der **Magnetbänder der Temperaturmessanlage**. Diese wurde von der Stiftung für wissenschaftliche Forschung an der Universität Zürich finanziert, wofür hier gedankt sei.

Der Schweizerische Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung hat die vorliegende Arbeit während **zweier** Jahre finanziell unterstützt. Die Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft zur wissenschaftlichen Erforschung des Nationalparks erleichterte die Feldarbeiten durch finanzielle Beiträge. Dafür und für die Publikation dieser **Arbeit** sei ihr gedankt.

Abschliessend möchte ich meinen Eltern für die Unterstützung während meines Studiums danken. Meiner Frau, **dipl. geogr. B. GAMPER-SCHOLLENBERGER**, danke ich von Herzen; sie war meine **grösste** Hilfe, sowohl bei den Feldarbeiten und der Aufarbeitung meiner Ergebnisse, als auch durch ihr Verständnis und ihre ständige Aufmunterung.

alpark . . .	390
.	391
.	392
ark	404
et	406
.	407
.	408
.	411
.	411
.	415
.	418
.	422
während der letzten	
.	426
Postglazials . . .	427
.	429
.	430
.	440

1. EINLEITUNG

Die Arbeiten von **FURRER** und seinen Schülern (**FURRER** 1954, 1972, 1977; **FURRER** und **BACHMANN** 1972; **FURRER** et al. 1971, 1975; **SCHNEEBELI** 1976; **RÖTHLISBERGER** 1976; **BEELER** 1977), insbesondere das **Heft 65** (Band XI) der «**Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen im Schweizerischen Nationalpark**» von **FURRER**, **BACHMANN** und **FITZE** (1971) mit dem Titel «**Erdströme als Formelemente von Solifluktsdecken im Raum Munt Chavagl/Munt Buffalora (Schweiz. Nationalpark)**», bilden die wichtigsten Grundlagen für die vorliegenden Untersuchungen. **FURRER** et al. (1971, S. 191) beschreiben Erdströme wie folgt: «Im Bereich der subnivalen Höhenstufe erscheinen Hänge oft in auffälliger Weise gestaltet: Sie sind von einer Schuttmasse überdeckt, die sich talwärts in zungenartige Ausläufer auflöst. Diese Zungen bilden jedoch nicht immer eine einfache, lineare Begrenzung der Hangüberdeckung, sondern bestehen vielfach aus mehreren einander aufliegenden Formelementen. So besitzt die Schuttdecke gewissermassen einen Fransensaum aus mehreren Lagen, deren untere jeweils weiter hangabwärts reichen als die oberen. Die mehr oder weniger parallel zueinander verlaufenden Seitenränder und die Stirnregionen der Zungen heben sich durch Pflanzenbewuchs deutlich ab. Diese Formen, welche dem Formenschatz der subnivalen Höhenstufe **einzuordnen** sind, wurden unseres Wissens im Schweizerischen Nationalpark **erst-mals** beobachtet und beschrieben (**FURRER** 1954). Zugleich erhielten sie die Bezeichnung Erdströme.»

Erdströme sind Formen der gehemmten Solifluktion (**GRAF** 1971, S. 23) im **Gegensatz** zu den vegetationsfreien Steinzungen, einer ähnlichen Form der ungebundenen Solifluktion (**GRAF** 1971, S. 30). Der Begriff **Fliesszunge** (**HÖLLERMANN** 1964, S. 80) umfasst beide Formen. In ihrer Arbeit befassten sich **FURRER**, **BACHMANN** und **FITZE** vorerst mit dem äusseren Erscheinungsbild und dem vertikalen Aufbau von Erdströmen. Einen wichtigen Teil der Untersuchungen widmeten sie den situmetrischen Merkmalen der Solifluktion. Ausserdem wurden bodenkundliche Untersuchungen und Bewegungsmessungen auf Erdstromrücken durchgeführt.

FURRER et al. 1971 (S. 266/267) fassen die Ergebnisse ihrer Untersuchungen so zusammen: «Ein Erdstrom ist eine komplex aufgebaute Form, gegliedert in verschieden-altrige Fliesserdeteildecken. Diese können durch fossile Bodenhorizonte voneinander getrennt sein. Im Formaufbau gibt sich die Mehrphasigkeit der Genese zu erkennen. **Fliesserdeteildecken** entsprechen **Solifluktionsphasen**, **Bodenhorizonte** bedeuten als Ruhephasen mehr oder weniger lang währende Zäsuren im **Formbildungsprozess**. Die Wechselphasigkeit ist durch Klimaschwankungen bedingt. Die Formbildung hat nach der letzten Enteisung begonnen und ist im gegenwärtigen Zeitpunkt noch keineswegs abgeschlossen, wie die Bewegungsmessungen zeigen. Somit repräsentieren Erdströme einen bestimmten Abschnitt der Landschaftsentwicklung und bezeugen in ihrem Aufbau den **Klimaablauf** während dieser Periode. ... die eingehende Untersuchung von Erdströmen (vermag somit) **neue** Erkenntnisse über den Klimaablauf im **Postglazial** zu liefern.»

In den neueren Arbeiten (**FURRER** et al. 1975, **FURRER** 1977) befasste sich **FURRER** vor allem mit fossilen Böden und deren paläoklimatischer Bedeutung. Auf die einzelnen Ergebnisse aus den erwähnten Arbeiten und auf die weitere Literatur wird jeweils in den betreffenden Kapiteln näher eingegangen.

Bei meinen Untersuchungen standen zwei Problemkreise im Vordergrund:

1. Die heutigen solifluidalen Bewegungen auf und in Erdströmen wurden auf zwei Messfeldern im Nationalpark registriert. Neue Messmethoden und eine grosse Zahl von

Messpunkten sollen es ermöglichen, diese **Bewegungen** genau und umfassend zu beschreiben. Um dieses Ziel zu erreichen, erstreckten sich die Bewegungsmessungen auf den Zeitraum von 1975 bis 1979. Die Bewegungen wurden ausserdem auf einem Messfeld bis in eine Tiefe von 90 cm unter der Erdoberfläche erfasst. Zur Klärung des **Bewegungsmechanismus**, insbesondere des Einflusses der tages- und jahreszeitlichen **Bodengefrorenis** und der damit zusammenhängenden jahreszeitlich verschiedenen **Bewegungsbeträge**, wurden Aufzeichnungen von Luft- und Bodentemperaturen auf den Messfeldern durchgeführt. Diese Untersuchungen sollen es erlauben, Wechsellagerungen von **Solifluktionsschutt** und fossilen Böden in Erdströmen klimageschichtlich besser auszudeuten.

2. Um die bereits aus dem Nationalpark (FURRER et al. 1971, 1975; FURRER 1977; BEELER 1977), den **Walliser Alpen** (SCHNEEBELI/RÖTHLISBERGER 1976) und aus den **Südtiroler Dolomiten** (STEINMANN 1978) publizierten **¹⁴C-Daten** fossiler Böden aus Erdströmen zu ergänzen und zu einem einheitlichen Bild des solifluidalen Geschehens im Postglazial im Bereich der Schweizer Alpen zusammenzufassen, wurden bei I Gess (Berninagebiet) mehrere Erdströme **aufgegraben** und 18 neue **¹⁴C-Daten** fossiler Böden gewonnen. Ergänzt wurden diese Datierungen durch **bodenkundliche** Untersuchungen, Pollenanalysen von Einzelproben und durch **¹⁴C-Datierungen** von Torf aus einem Moor, das die Erdströme am **Rande** überflossen.

Dadurch, dass die heutigen morphologischen und **mikroklimatischen** Prozesse, die auf und in Erdströmen der **Alpen** ablaufen, **genau** erfasst werden, ist es möglich, die teilweise komplizierten und auf verschiedene Art und Weise interpretierbaren **Wechsellagerungen** von **Solifluktionsdecken** und fossilen Böden in ihrer Bedeutung für die **Klimageschichte** und die **Landschaftsentwicklung** klarer zu erfassen.

2. SOLIFLUKTIONS BETRÄGE VON ERDSTRÖMEN IM SCHWEIZERISCHEN NATIONALPARK

2.1. Untersuchungsgebiete Munt Chavagl und Munt Biiffalora

Im Gebiet des Munt Chavagl und des Munt Buffalora im Südosten des Schweizerischen Nationalparks sind viele besonders schön ausgebildete Erdströme zu finden. FURRER et al. 1971 (S. 191) bezeichnen den Raum deshalb als Typuslokalität dieser Solifluktionsform. Das Gebiet stand aus zwei Gründen für die **Bewegungsmessungen** auf Solifluktionsdecken fest: Zum einen enthalten die bisherigen Untersuchungen an diesen Erdströmen durch FURRER die nötigen Grundlagen für die Durchführung und spätere Interpretation der Bewegungsmessungen; zum anderen kommt für die Messung von oberflächlichen **Bewegungsbeträgen** nur ein Gebiet in Frage, das nicht **beweidet** wird und in dem die Messmarken vor allzu neugierigen Wanderern geschützt sind.

Die Erdströme sind hier einige Meter breit und können bis mehrere Dekameter lang sein. Die bis zu 60 cm hohe Stirn ist meist abgestuft. Seitlich endet ein Erdstrom in **parallel laufenden** Steilrändern, diese verlieren bergwärts ihre Prägnanz und Höhe. In der **Wurzelregion** geht der Erdstrom in eine ungegliederte Fliessersededecke über, die bei den am Munt **Buffalora** untersuchten Formen nach wenigen Metern zu einer **Schutthalde** wird; dies zeigt sich **daran**, dass praktisch keine **Feinerde** mehr vorhanden ist.

Eine geschlossene Vegetationsdecke findet sich nur an den seitlichen Steilrändern, seltener an der Stirne. Der Rücken des Erdstroms ist bis auf einzelne Polster von *Dryas octopetala* L. und *Carex firma* (nach ZUBER 1968) vegetationsfrei.

Die Oberfläche des Erdstroms wird von Feinschutt und Steinchen von wenigen Millimetern bis zu Blöcken mit 10–20 cm Durchmesser gebildet. Das Skelettmaterial ist stellenweise dicht gepackt. Grössere Blöcke und Pflanzenpolster stauen das feinere Material auf. Auf älteren Erdströmen finden sich oft Girlanden als sekundäre Formen.

Zum inneren Aufbau der Erdströme: Wichtig für meine Untersuchung sind vor allem die Korngrössenanalysen (FURRER et al. 1971, s. 205 ff.): Bei der **Feinerde** entfällt der Hauptanteil auf die Siltfraktion (5–50 μ), die feinste Fraktion (Ton) enthält nur CaCO_3 und MgCO_3 , also keine Tonminerale. Demnach kann die Tonfraktion nur durch physikalische Verwitterung entstanden sein. Die Ergebnisse sämtlicher von FURRER durchgeführten Korngrössenanalysen lassen **darauf schliessen**, dass die den Erdstrom aufbauenden Materialien frostempfindlich sind (FURRER et al. 1971, s. 213), sofern hinreichender Wassernachschub gewährleistet ist. Ausführliche situmetrische Messungen (FURRER et al. 1971, s. 217–236) ergaben unter anderem, dass die für Solifluktionstypische Einregelung des Schutts bei Hangneigungen von 3–30° auftritt.

Bestimmungen der Fließgrenze (FURRER et al. 1971, s. 248 ff.) ergaben sehr niedrige Werte (zwischen 12 und 32 % Wassergehalt), was auf den hohen Siltanteil zurückzuführen ist. Die Resultate deuten darauf hin, dass Bewegungen bereits vor dem Erreichen der Fließgrenze stattfinden können. Die Kuppen des Munt Chavagl und des Munt Buffalora bestehen aus Dolomiten, Zellendolomiten und Rauhwacken des oberen Ladin und untern **Carn** (KARAGOUNIS 1962, Tafel VI, Profil 7 und 8).

In den Untersuchungen für meine Diplomarbeit (GAMPER 1976) richtete ich ein Messfeld am nach Westen exponierten Hang des Munt Buffalora ein. 1977 wurde ein weiteres am **Südwesthang** des Munt Chavagl angelegt. Gleichzeitig wurde die Temperaturmessanlage installiert. Die Abbildung 1 zeigt die Verbreitung der Erdströme sowie die Lage der Messfelder im Arbeitsgebiet. Der **Höhenbereich**, in dem Erdströme vorkommen, erstreckt sich nach GRAF 1970 (S. 21) im Gebiet des Nationalparks von 2200 m ü. M. bis 2800 m ü. M. (zitiert in FURRER et al. 1971, Figur 4, S. 204). Meine beiden Messfelder liegen auf einer **Höhe** von 2370–2410 m ü. M. am Munt Buffalora und auf einer Höhe von 2385–2400 m ü. M. am Munt Chavagl.

Abbildung 17 zeigt das Gebiet am Munt Chavagl. Die Erdströme liegen hier ziemlich flach. Auch ihre Rücken sind teilweise von Vegetation bedeckt. Die mittlere Hangneigung der **beiden** untersuchten Zungen beträgt 14°. Die Erdströme liegen am Hangfuss beinahe horizontal. Zwischen ihnen und dem Einzugsgebiet besteht kein direkter Zusammenhang, vielmehr breiten sich von der flachen Kuppe des Chavagl übereinander mehrere Solifluktiondecken aus. Die untersuchten Erdströme bilden die Ausläufer der untersten Solifluktiondecke (vgl. Karte, Abb. 1).

Die **Westflanke** des Munt Buffalora (Abb. 2) ist ebenfalls durch Erdströme gegliedert, nur ist der Hang wesentlich **steiler** (im Mittel bei 30°). Die Morphologie ist einfacher als am Munt Chavagl. Eine Schutthalde geht über in eine geschlossene **Solifluktiondecke**, die gegen unten in mehrere Erdströme ausläuft. Diese Zungen sind nur am Rande von Vegetation bedeckt.

n seitlichen Steilrändern,
 einzelne Polster von *Dryas*
 rei.
 inchen von wenigen Milli-
 . Das Skelettmaterial ist
 ter stauen das feinere Ma-
 ls sekundäre Formen.
 tersuchung sind vor allem
 der Feinerde entfällt der
 (Ton) enthält nur CaCO_3
 afraktion nur durch physi-
 ichter von FURRER durch-
 ass die den Erdstrom auf-
 1971, s. 213), sofern hin-
 situmetrische Messungen
 lass die für Solifunktions-
 von 3-30" auftritt.
 8 ff.) ergaben sehr niedrige
 nohen Siltanteil zurückzu-
 bereits vor dem Erreichen
 t Chavagl und des Munt
 hwacken des oberen Ladin
 3).
 1976) richtete ich ein Mess-
 in. 1977 wurde ein weiteres
 wurde die Temperaturmess-
 Erdströme sowie die Lage
 n Erdströme vorkommen,
 parks von 2200 m ü. M. bis
 . Meine beiden Messfelder
 ora und auf einer Höhe von
 ströme liegen hier ziemlich
 ekt. Die mittlere Hangnei-
 tröme liegen am Hangfuss
 besteht kein direkter Zu-
 des Chavagl übereinander
 ie bilden die Ausläufer der
 arch Erdströme gegliedert,
 orphologie ist einfacher als
 lossene Solifunktionsdecke,
 n sind nur am Rande von

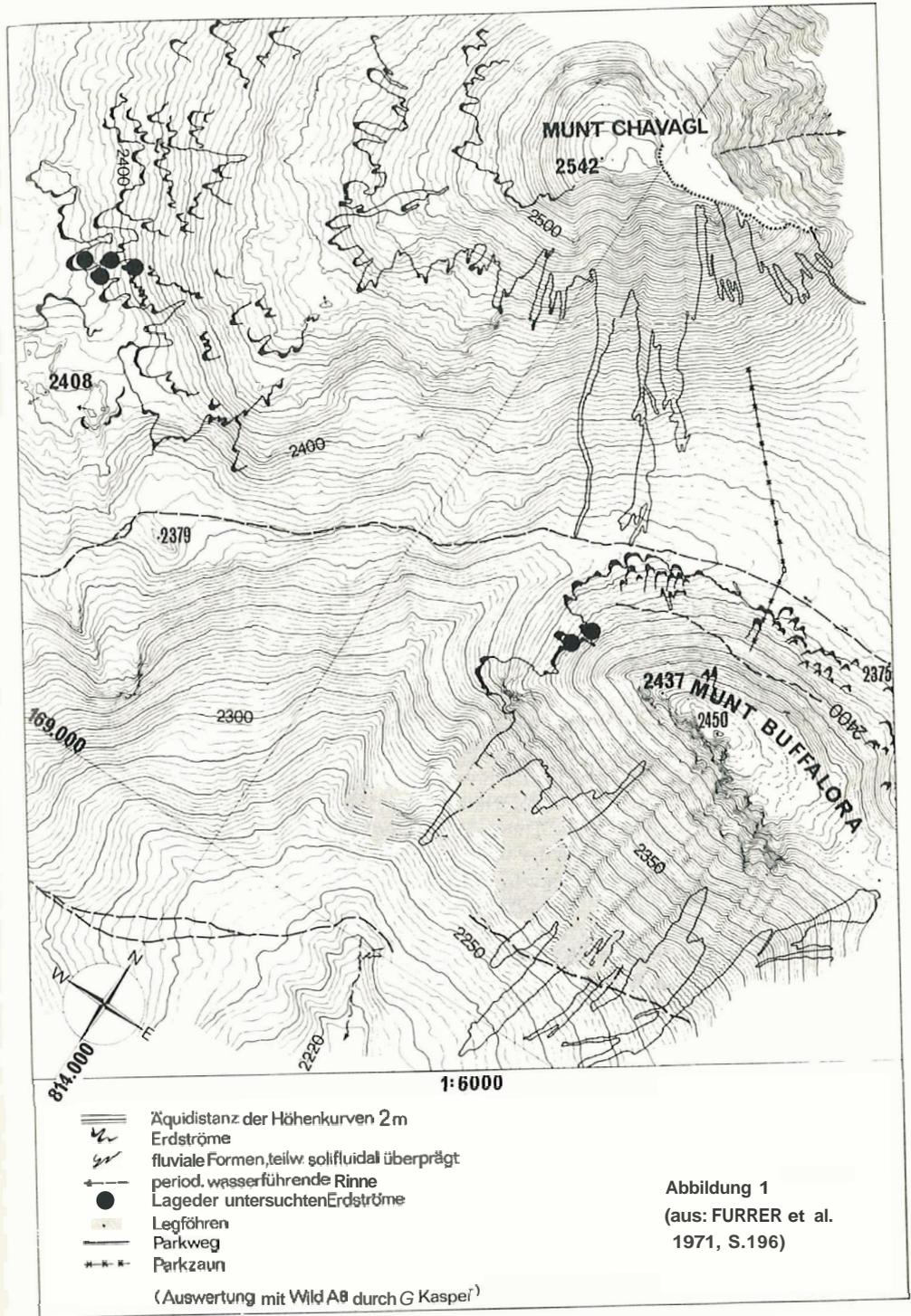


Abb. 1 Verbreitung der Erdströme im Untersuchungsgebiet.

Abbildung 1
 (aus: FURRER et al.
 1971, S.196)

2.2. Messung von Solifluktionsträgern

2.2.1. Solifluktion - Frostkriechen - Gelifluktion

Im deutschsprachigen Raum werden unter Solifluktion oft «die frostbedingten langsamen und tiefgründigen Fließbewegungen der polaren Böden (verstanden), die, der Schwerkraft hangabwärts folgend, auf flachen bis mittelsteilen Hängen zeitlich kontinuierlich und räumlich allgemein vor sich gehen, solange und soweit das erzeugende Frostklima herrscht» (BÜDEL 1959, S.298). Auch TROLL 1944, HÖLLERMANN 1964 und 1967 und FURRER et al. 1971 betonen in ihren ansonsten etwas verschiedenen Definitionen, die Klimagebundenheit der Solifluktion. Eine Ausweitung des Begriffes Solifluktion auf ähnliche langsame Bodenbewegungen in nicht kalten Klimaten, «aklimatisch durch irgendwelche Lokalumstände erzeugt» (BÜDEL 1959, S. 298) wird abgelehnt. Da der Ausdruck Solifluktion auf ANDERSSON 1906 zurückgeht, der diesen Prozess zwar in der Arktis beschrieb, aber nicht einem bestimmten Klimabereich zuordnete, wird er von WASHBURN 1973 und 1979 nur als Sammelbegriff für jede Form des Bodenfließens verwendet (vgl. auch JÄCKLI 1957, S. 34). Solifluktion in Abhängigkeit von gefrorenem Boden bezeichnet WASHBURN 1973 (S.173) als Gelifluktion. Der Begriff geht in dieser Form zurück auf BAULIC 1956 (S. 50).

Ein weiterer Prozess, der zum hangabwärtsgerichteten Transport von Lockermaterial führt, ist das Frostkriechen: «Frost creep is the ratchelike downslope movement of particles as the result of frost heaving of the ground and subsequent settling upon thawing, the heaving being predominantly normal to the slope and the settling more nearly vertical» (WASHBURN, 1967, 10) (WASHBURN 1973, S.170). Da sich das Material beim Auftauen des Bodens oft nicht senkrecht setzt, sondern dazu neigt, wieder die Ausgangslage vor dem Gefrieren des Bodens einzunehmen, werden die maximal möglichen Frostkriechbeträge nicht erreicht.

Die Kombination von Gelifluktion und Frostkriechen ergibt bei Bewegungsmessungen den Solifluktionsträger, das «Downslope movement» WASHBURN 1973. Die Hangabwärts-Bewegung - sie entspricht der Solifluktion nach BÜDEL, TROLL, HÖLLERMANN und FURRER - besteht also aus dem Durchtränkungsfließen über gefrorenem Unterboden, der Gelifluktion, und der Hangabwärts-Verfrachtung von Material bei kurzfristigem Gefrieren und Auftauen der obersten Bodenschichten, dem Frostkriechen. Je nach den lokalen Begebenheiten kann auch Durchtränkungsfließen ohne Bodenfrost einen Anteil an der gesamten solifluidalen Bodenbewegung ausmachen. Meines Erachtens ist es bei der näheren Untersuchung von Bodenbewegungen nötig, die Gelifluktion und das Frostkriechen als wichtigste Prozesse der Solifluktion zu berücksichtigen. Von entscheidender Bedeutung für die Interpretation von Wechselagerungen von fossilen Böden und Solifluktionsschutt sind jedoch die jährlichen Solifluktionsträger, das heisst, das Ergebnis des Zusammenwirkens aller solifluidalen Massenbewegungen.

2.2.2. Messmethoden

Um Solifluktionsträger zu ermitteln, wurde bereits mit verschiedenen Methoden gemessen. Einige davon sollen hier kurz erläutert werden, um den Vergleich meiner Messdaten mit denjenigen anderer Autoren zu erleichtern:

- *Matrixmethode* (Stahlstifte) (ZUBER 1968; FURRER et al. 1971; FURRER 1972; FITZE 1971): Durch eine Plexiglasplatte, in der die Positionen der Messmarken vorgebohrt sind, werden 16 stumpfe Stahlstifte (\varnothing 3 mm) von 5 und 10 cm Länge im Abstand von

rängen

on oft «die frostbedingten Böden (verstanden), die, **stielsteilen** Hängen zeitlich **lange** und soweit das **erzeugen** (ROLL 1944, **HÖLLERMANN** 1959, S. 298) wird **ab-** 36 zurückgeht, der diesen **immten** Klimabereich **zu-** elbegriff für jede Form des **liffuktion** in Abhängigkeit) als Gelifluktion. Der

a Transport von **Locker-** itchelike **downslope move-** d and **subsequent** settliig **the slope and the settling** (1973, S.170). Da sich das **sondern** dazu neigt, wieder **werden** die maximal mög-

bt bei Bewegungsmessun- **ASHBURN** 1973. Die **Hang-** **DEL, TROLL, HÖLLERMANN** n über gefrorenem **Unter-** g von Material bei **kurz-** **en**, dem Frostkriechen. Je **ssfließen** ohne Bodenrost **machen**. Meines Erachtens **nötig**, die Gelifluktion **ktion** zu berücksichtigen. **isellagerungen** von fossilen **Solifluktionsbeträge**, **len Massenbewegungen**.

rschiedenen Methoden ge- **en** Vergleich meiner **Mess-**

071; **FURRER** 1972; **FITZE** r Messmarken vorgebohrt **cm** Länge im Abstand von

8 cm in Form einer quadratischen Matrix in den Boden geschlagen. Die Stifte dringen in ihrer ganzen Länge, **senkrecht** zur Bodenoberfläche, ein. Als **Fixlinie** für die **Bewe-** gungsmessungen dienen **Plastikschnüre**, die unverrückbar **fixiert** werden. Da die Stifte oft durch Frosthub ausfrieren, müssen sie vor jeder Messung in den Boden gedrückt werden. Aus den Differenzen zwischen den Bewegungen der langen und kurzen Stifte kann man auf den Tiefgang der Bewegung **schliessen**.

- **Markierte Steine und Holzplättchen** (ELSASSER 1968; FURRER et al. 1971; FURRER 1972): Holzplättchen und bemalte Steine werden auf der Oberfläche des Messobjekts ausgelegt. Ihre **Bewegungen werden** wiederum relativ zu einer gut verankerten Nulllinie gemessen. Man erhält die Resultate entweder direkt im Feld oder auf periodisch gemachten Photographien. Holzplättchen und Steine sollen etwa gleiche Ergebnisse liefern.
- **Nahbereichsphotogrammetrie** (KASPER 1973): «Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie des Nahbereichs (lassen sich) Frostbodenmuster und -formen **his** zu einigen Quadratmetern Fläche erfassen und exakt ausmessen. Diese Methode gestattet objektive quantitative Vergleiche entsprechender Formen. Sie kann sowohl bei metergrossen **Steinringen** als auch bei zentimetergrossen Erdknospen angewendet **werden.**» (KASPER 1973, S. 2). Durch den Vergleich von Aufnahmen der gleichen Form in bestimmten **Zeitabständen** können **Bewegungen** an der **Erdoberfläche** genau ausgemessen werden.
- **Im Boden versenkte Holzstäbchen** (RUDBERG 1958; ELSASSER 1968; HARRIS 1972; BENEDICT 1970 und 1976; JAHN 1974): Etwa 5 cm lange Holzstäbe werden in einem lotrecht gebohrten Loch versenkt; sie bilden zum Zeitpunkt der Versenkung eine senkrechte Säule. **ELSASSER** variierte diese Methode, indem er seine Stifte mit wasserlöslichem Leim zu einem Stab verband und diesen senkrecht zur Erdoberfläche einschlug. Beim Ausgraben der Stäbe nach einem oder mehreren Jahren misst man deren Bewegung gegenüber der rekonstruierten Ausgangslage. Diese Methode gibt Resultate **über** die Bewegung in verschiedenen Tiefen.
- **Einmessung von Messmarken mit einem Theodolit** (WASHBURN 1960; BENEDICT 1970): **WASHBURN** verwendete Holzkegel von 10 cm **Höhe** und 10 cm Basisdurchmesser. Diese Messmarken wurden mit 10 beziehungsweise 20 cm langen Holzstäben im Boden verankert. **Mit** einem Theodolit **konnte** er die Spitzen der Kegel einmessen und so periodisch absolute Bewegungsbeträge der oberen Bodenschichten ermitteln. **BENEDICT** verwendete anstelle von Holzkegeln einfache Holzstäbe, die 25 oder 50 cm tief in den Boden geschlagen **wurden**. Diese Stäbe vermäss er ebenfalls von **Fixpunk-** ten aus mit einem Theodolit.
- **Mass-Wastingmeter** (WASHBURN 1960): Diese Methode erlaubt ein ständiges Ablesen von **Bewegungen** in tieferen Bodenschichten. Dazu wird eine 1,8 m lange **Aluminium-** röhre, die an drei Stellen durchbohrt ist, lotrecht im Boden vergraben. Durch Öffnungen führen Drähte, an denen Holzklötzchen befestigt sind. Diese Klötzchen **werden** auf Höhe der Bohrungen im Boden vergraben; die Drähte laufen in der Röhre nach oben zu einem Registriergerät. Da die **Aluröhre** fest im unbewegten Untergrund verankert ist, wird sie durch die Solifluktion kaum bewegt. Das Fliesserdematerial reisst dagegen die Holzklötzchen mit. Die Bewegung relativ zur **Aluröhre** kann man jederzeit am Registriergerät ablesen. Sollte die Röhre sich trotzdem verschieben, so kann dies mit einem Theodolit bestimmt und die Bewegung der Holzklötzchen entsprechend korrigiert werden.
- **Elektrische Bewegungsmessungen** (WILLIAMS 1957): Elektrische **Dehnungsmessonden**, welche an einem 1 m langen Streifen Stahlblech befestigt sind, messen die **Verbiegung** des Bleches. Die Messsonde wird lotrecht im Boden vergraben. Aus der Verbiegung

des Blechstreifens lassen sich relative Bewegungen zwischen höheren und tieferen Bodenschichten bestimmen. Ein Schreiber ermöglicht ein kontinuierliches **Ablese**n der Bodenbewegungen.

Die **beiden** zuletzt beschriebenen Messmethoden ermöglichen ein kontinuierliches Messen von Bewegungen in der Tiefe, sie verlangen jedoch einen **grossen** apparativen Aufwand. Ausserdem stört das Vergraben der **Messsonden** die natürlichen **Bodenverhältnisse** empfindlich, was zwar in der Arktis bei **grossen Bewegungsbeträgen** nicht stark ins Gewicht fällt, wohl aber bei den zu untersuchenden Erdströmen, **wo** mit kleinen Solifluktionbeträgen von wenigen **cm/Jahr** gerechnet werden muss. Messmethoden mit **Stahlstiften** beziehungsweise markierten Steinen liefern demgegenüber nur Bewegungswerte an der Bodenoberfläche. Darüber hinaus sind nur Messungen relativ zu einer **Nulllinie** möglich, weil die Marken **für** eine geodätische Messung zu klein sind. Die versenkten Holzstäbchen liefern **zwar** erst nach Ablauf der gesamten Messperiode Resultate **über** Bewegungen in der Tiefe – ist aber das oberste Holzstäbchen genügend lang, lässt es sich mit dem Theodolit periodisch einmessen.

Für meine Untersuchungen auf dem Messfeld habe ich folgende Messmarken verwendet, die es erlauben, einerseits periodische **Solifluktionbeträge** der obersten Bodenschichten zu ermitteln, und die andererseits nach Abschluss der Messungen auch die **Bewegungsbeträge** bis in 90 cm Tiefe angeben:

– **Holzstäbe:** Mit einem Schlagbohrer habe ich lotrechte Löcher von zirka 3 cm \varnothing und 90 cm Tiefe gebohrt. **Darin** habe ich **zuerst** zehn 8 cm lange Holzstäbe ($\varnothing = 2$ cm) versenkt. Den Abschluss der Hölzchensäule bildet ein 20 cm langer, weiss bemalter Stab, der zur Hälfte aus dem Boden ragt. An seinem oberen Ende trägt er einen 1 cm breiten Ring roter Leuchtfarbe. Die Linie **rot/weiss** dient als Ziel für den Theodolit. Diese Anordnung (**Abb. 15**) **ermöglicht** es nun, die oberflächennahen Bewegungen durch Vorwärtseinschneiden **zu** kontrollieren.

– **Aluminiumfolien¹:** Mit einer 60 cm langen, 10 cm breiten und 1 cm dicken Stahlplatte schlug ich lotrechte Schlitze in den Boden. In einen solchen Schlitz wurde jeweils eine Alufolie gestossen. Die 10 cm breiten und 60 cm langen Folien wurden 40 cm tief im Boden versenkt, die restlichen 20 cm **über** der Oberfläche zu einem 10 cm hohen gleichschenkligen Dreieck gefaltet. Die Spitze diente als Ziel für die Vermessung.

Die Folien **werden** vom Boden mitbewegt. Da die Bewegungen in verschiedenen Tiefen **ungleich** gross sind, passen sich die Folien diesen Bewegungen an, indem sie sich verbiegen. Die Streifen sind so fest, dass sie durch diesen Vorgang oder durch **Frosthub** der obersten Bodenschicht nicht reissen sollten; andererseits sind sie doch **genügend** flexibel, um den Bodenbewegungen zu folgen. Beim Ausgraben der Folien nach einigen Jahren wird ebenfalls der Betrag der Bewegungen bis in 40 cm Tiefe ersichtlich (Abb. 13). Diese Methode weist aber auch gewisse Nachteile auf: Das Aludreieck, das als **Messpunkt** dient, muss vor jeder Messung wieder lotrecht gestellt werden. Dies ergibt einen zusätzlichen Messfehler.

– **Holzkegel:** Am Munt Chavagl wurden Holzkegel von 10 cm Höhe und etwa 7 cm Basisdurchmesser als Messmarken aufgestellt. Sie sind mit 10 cm langen **Holzstäben** im Boden verankert (**Abb. 19**).

Die Vermessung der Marken am Munt Buffalora erfolgte durch Vorwärtseinschneiden vom Gegenhang aus. Die geodätischen Vermessungen wurden von Dr. G. KASPER (Geographisches Institut der Universität **Zürich**) und dem Verfasser durchgeführt. Die **Basispunkte** liegen **auf** anstehendem Fels. Der mittlere Fehler der Koordinaten beträgt $\pm 0,5$ cm. Dieser Fehler beinhaltet auch die Abweichungen, die sich ergeben, **weil** die

¹ Folienstärke 0,05 mm.

Aludreiecke vor der Messung **wieder** aufgerichtet werden mussten. Alle Messresultate wurden deshalb auf ganze Zentimeter gerundet.

Das Messfeld am Munt Chavagl – es wurde erst im Sommer 1977 aufgebaut – konnte ebenfalls von einer Basis, deren Endpunkte auf anstehendem Fels liegen, vermessen werden. Um die Theodolitmessungen zu kontrollieren, wurden erstmals im Herbst 1977 beide Messfelder mit terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen vermessen. Diese Aufnahmen wurden von Prof. Dr. H. SCHMID und seinem Assistenten J. RADY vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich durchgeführt. Dazu wurden von den Endpunkten einer **Basislinie** je eine Aufnahme mit einer Messkamera **Wild P 31** (Brennweite 200 cm, Plattenformat $10,2 \times 12,7$ cm) gemacht. Um beste Einsicht in das gesamte Messfeld zu gewährleisten und höchste Genauigkeit zu erhalten, **wurden** von 3 Basispunkten 2 konvergente Stereoaufnahmen ausgeführt. Die Aludreiecke und die Holzstäbe mussten mit Styroporkugeln von 8 cm \varnothing markiert werden, da sie sonst auf den Aufnahmen nicht eindeutig zu identifizieren gewesen wären. Die Holzkegel auf dem Messfeld Chavagl sind auf den Photos einwandfrei auszumachen, so dass sich eine zusätzliche Signalisation erübrigte.

Zusätzlich zu den Aufnahmen mussten jeweils pro Feld **mindestens** 4 Messmarken von den Aufnahmestandorten aus mit dem Theodolit eingemessen werden. Die Aufnahmen wurden auf dem Stereokomparator Wild STK 4 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich durch Dr. G. KASPER **ausgemessen** und die Koordinaten auf Lochkarten registriert. Aus den 4 geodätisch ermittelten Passpunkten und den Koordinaten der Punkte auf der terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme wurden die Koordinaten **aller** Messpunkte, bezogen auf einen der Basispunkte, errechnet. Die Messgenauigkeit ist der direkten geodätischen Vermessung gleichzusetzen, die **Messresultate** wurden auch hier auf ganze Zentimeter gerundet.

2.3. Ergebnisse der Messungen am Munt Buffalora

Die Abbildung 2 zeigt die Westflanke des Munt Buffalora. Das Messfeld umfasst die **beiden** markanten Erdströme im Zentrum sowie ihr Einzugsgebiet bis hinauf zur Krete. Ausserdem wurden mehrere Messmarken unterhalb und **zwischen** diesen Erdströmen aufgestellt. Die Lage der einzelnen Marken und ihre Art – Alufolie oder Holzstäbe – ist aus der Abbildung 3 ersichtlich. Diese Karte wurde aufgrund der Lage und der **Höhenkoten** der Messpunkte gezeichnet. Sie dient im folgenden auch als Grundlage für die **Bewegungskarten** und das Blockdiagramm.

Insgesamt wurden 79 Messmarken (30 Holzstäbchensäulen und 49 Alufolien) auf dem Erdstrom 1 und seinem Einzugsgebiet **sowie** auf dem durch Girlanden gegliederten Hang unterhalb der Zunge verteilt. Die Holzstäbchensäulen sind vor allem auf den Erdstromrücken aufgestellt. Um die Messungen nicht nur auf einen Erdstrom zu beschränken, liegen einige Holzmarken auch auf dem Erdstrom 2 und auf der kleinen, **beinahe** vollständig bewachsenen Zunge (**vgl.** Abb. 2) zwischen den **beiden** grossen Erdströmen. Neben den Messmarken sind auf der Karte auch die Steilränder der **Solifluktion**szungen und die Grenze der mehr oder weniger geschlossenen Vegetationsdecke dargestellt.

Wie man auf der Abbildung 2 sieht, ist der Begriff «geschlossene **Vegetationsdecke**» nicht ganz korrekt, denn die bewachsenen Partien des Hanges sind durchgehend von Girlanden bedeckt, die auf ihrem Rücken vegetationsfrei sind. Einzelne Vegetations-

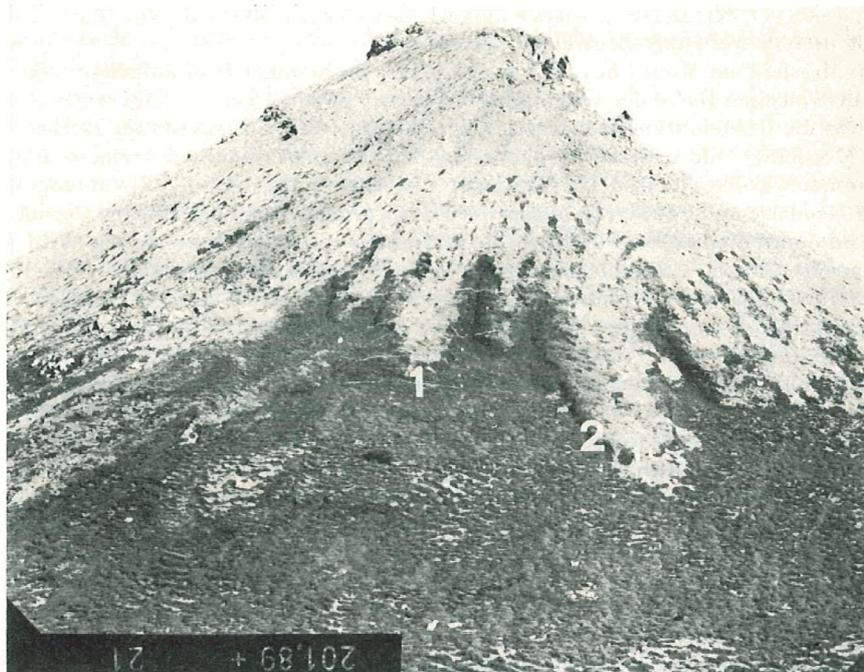


Abb. 2 Erdströme am Westhang des Munt Buffalora. Auf den beiden Zungen 1 und 2 wurden Bewegungsmessungen durchgeführt. Auf dem Erdstrom 1 sind Markierstreifen zu erkennen, sie erleichtern das Finden der Messpunkte in der Aufnahme (Aufnahme mit Messkamera Wild P 31, am 25. September 1978).

inseln finden sich zudem auch auf den Erdströmen 1 und 2. Die tatsächlich geschlossene Vegetation zieht sich zwischen den einzelnen Zungen am weitesten hangaufwärts. Dies ist einerseits auf den Windschutz zurückzuführen, andererseits aber auch auf die relativ höhere Schneebedeckung im Winter.

Der Schnee gleicht die Reliefunterschiede aus: Auf den Erdstromzungen liegen nur etwa 30 cm, im Gebiet der geschlossenen Vegetationsdecke dagegen 100 cm und mehr. Ausserdem nimmt die Schneehöhe auch gegen die Kcrete hin ab, was ebenfalls auf Windverfrachtung zurückzuführen ist. Abbildung 4 zeigt, dass die Schneedecke im Einzugsgebiet der Erdströme nur geringmächtig ist.

Morphologisch gliedert sich der Westhang des Munt Buffalora in drei Abschnitte: Oben liegt eine vegetationsfreie Schutthalde, das Einzugsgebiet, dann folgt eine Soliflukationsdecke, die sich gegen unten in mehrere zungenartige Ausläufer aufteilt. An diese schliesst unten ein Hang mit Girlanden an. Ausführliche situmetrische Untersuchungen an diesen Fliesserdedecken durch FURRER et al. (1971, S.217–224) ergaben, dass die für Soliflukationsschutt typischen situmetrischen Verhältnisse sich bereits wenige Meter unterhalb des anstehenden Felses einstellen. Die Arbeiten wurden etwas weiter östlich meines Messfeldes durchgeführt. Dort dehnt sich die geschlossene Soliflukationsdecke bedeutend weiter hangaufwärts aus als über dem Messfeld, und die Schutthalde umfasst nur die obersten Meter des Hanges. Ihre Grenze zur ungliederten Soliflukationsdecke ist aber nicht nur an der Vegetation und der solifluidalen Einregelung der Steine zu



den Zungen 1 und 2 wurden sind Markierstreifen zu einer Aufnahme (Aufnahme mit

die tatsächlich geschlossene ersten hangaufwärts. Dies aber auch auf die relativ

Erdbestromzungen liegen nur gegen 100 cm und mehr, was ebenfalls auf Wind-Schneedecke im Einzugs-

Buffalora in drei Abschnitte: ist, dann folgt eine Solifluktläufer aufteilt. An diese geographische Untersuchungen (1924) ergaben, dass die für die bereits wenige Meter sind etwas weiter östlich die Solifluktsdecke bedeckt die Schutthalde umfasst lerten Solifluktsdecke die Anordnung der Steine zu

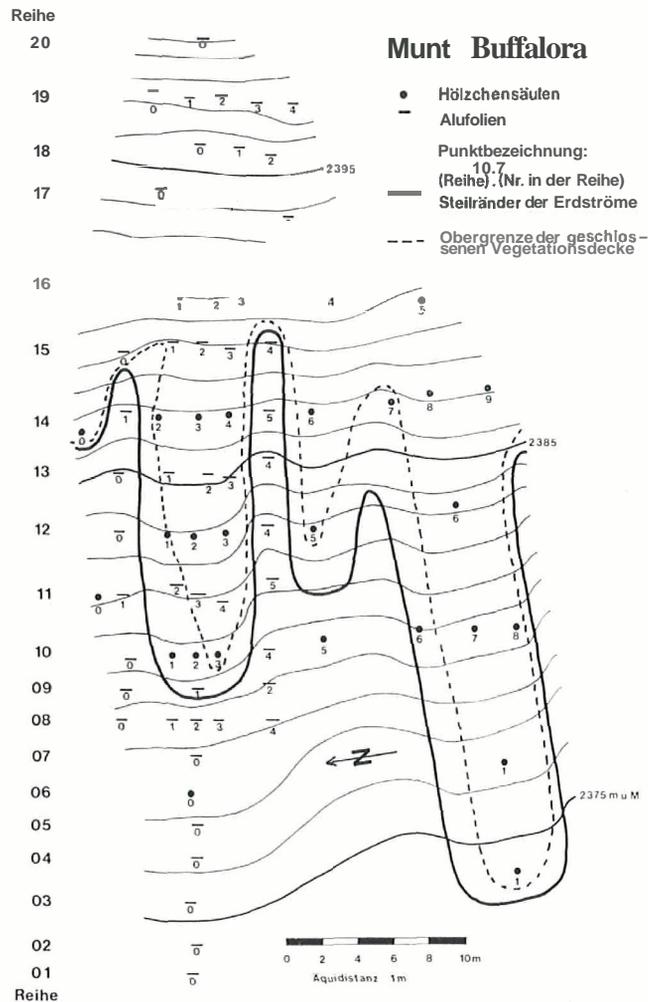


Abb. 3 Plan des Bewegungsmessfeldes Munt Buffalora.

erkennen: Im Gegensatz zur geschlossenen Solifluktsdecke und den Erdstromrücken ist keine Feinerde mehr vorhanden, sondern nur noch Steine und Blöcke. Sondierungen mit einem 1 m langen Schlagbohrer ergaben, dass der Feinerdeanteil von der Erdstromzunge gegen die Schutthalde hin auch in der Tiefe abnimmt. Im Bereich der geschlossenen Fliesserdedecke scheint die Schuttschicht zudem höchstens noch 70–90 cm mächtig zu sein, denn ich konnte den Bohrer dort nicht tiefer in den Bodentreiben. Der Feinerdeanteil in der Schutthalde ist so gering, dass die Bohrkammer bis auf einige Steinchen leer blieb, ausserdem stiess ich bereits nach wenigen Dezimetern auf den festen Untergrund. Aus diesem Grund konnten auch keine Holzsäulen im Einzugsgebiet aufgestellt werden, sondern nur Alufolien. Die Hangneigung beträgt im Bereich der Schutthalde und der geschlossenen Solifluktsdecke etwa 30°, auf den Erdströmen 25° und



Abb. 4 Der Munt Buffalora von Westen im Februar 1976. Vom Messfeld ist nur rechts unten im Bild der oberste Teil sichtbar (Pfeil).

auf dem Hang darunter etwa 15° . Bei den einzelnen Messmarken kann die Hangneigung von 2° (auf einer Girlandenstufe) bis zu 40° (im Graben zwischen den Erdströmen) schwanken.

Das Messfeld am Munt Buffalora wurde im Verlauf des Sommers 1975 aufgebaut (GAMPER 1976). Die Messmarken wurden am 13. und 14. September 1979 wieder ausgegraben; es liegen also Resultate aus 4 Jahren vor. Um die Bewegungen der obersten Bodenschicht zu ermitteln, wurden die Spitzen der Messmarken insgesamt elfmal vermessen:

30. 7.1975	geodätisch
17. 9.1975	geodätisch
31.10.1975	geodätisch
23. 6.1976	geodätisch
8. 9.1976	geodätisch
5. 7.1977	geodätisch
5. 8.1977	geodätisch
28. 9.1977	terrestrisch-photogrammetrisch
20. 7.1978	geodätisch
25. 9.1978	terrestrisch-photogrammetrisch
12. 9.1979	terrestrisch-photogrammetrisch

Die Messungen fanden im Frühsommer nach Abschluss der Schneeschmelze und im September vor den ersten grösseren Schneefällen statt, also vor Beginn der herbstlichen Frostwechselperiode. Die sommerlichen Bewegungen waren so gering, dass sie innerhalb der Fehlergrenze der Messungen blieben. Daher konnte die Auswertung auf das Ermitteln der Jahresbewegungen von September zu September reduziert werden. Diese Jahresbeträge der Solifluktion sind in den Tabellen I, II und III im Anhang in den Kolonnen «Jährliche Bewegungen der Messmarken» aufgeführt. Dabei muss man jedoch be-

achten, dass diese Bewegungen – gemäss Vermessungsergebnis – **ausschliesslich** im Herbst und während der Schneeschmelze im Mai und Juni stattfanden. **Frostunabhängige** Bewegungen **im** Sommer, reines **Durchtränkungsfließen**, konnten nicht nachgewiesen werden oder lagen unterhalb der Fehlergrenze von $\pm 0,5$ cm.

Die Resultate der Vermessungen **wurden** jeweils als **x-, y- und z-Werte** in einem dreidimensionalen Koordinatensystem ausgedrückt und auf ganze Zentimeter gerundet. In den Tabellen **I, II** und **III** sind die Längen der Vektoren (x, y, z) als **Jahreswerte** angegeben. Die Tabellen enthalten ferner die Nummern der einzelnen Messmarken, den Grad der Vegetationsbedeckung, den Typ (Holz oder Alufolie), die mittleren **Jahresbewegungen** in den Tiefen 0, 5, 10, 20, 30, 40 und 50 cm unter der Erdoberfläche sowie den maximalen Tiefgang der Bewegungen.

2.3.1. Korrektur der Messfehler

Die Messergebnisse in den Kolonnen «Jährliche Bewegungen der Messmarken» wurden aufgrund der geodätischen und der terrestrisch-photogrammetrischen Vermessungen ermittelt, die Werte in den Kolonnen «Mittlere Jahresbewegung in 0 cm Tiefe» habe ich **jedoch** beim Ausgraben der Marken erhalten. Die Rekonstruktion der **Ausgangslage** jeder Messmarke **erfolgte** aufgrund der in ihrem unteren Teil nicht verstellten **Hölzchensäule**, analog dazu bei den **Alufolien**. Dieses Vorgehen korrigiert die Messwerte bei jenen Säulen, die nicht exakt lotrecht eingeschlagen worden waren. Trotzdem können im oberen Bereich der Hölzchensäulen beziehungsweise im obersten Abschnitt der Alufolien, wo die grössten Bewegungsbeträge auftraten, noch Fehler **von** etwa 1–2 cm vorkommen. Aber auch die Vermessung der Marken mit dem Theodolit enthält verschiedene Fehlerquellen, der Messfehler liegt hier bei $\pm 0,5$ cm. Diese Ungenauigkeiten bei der Vermessung sowie beim Einmessen der Marken nach dem Ausgraben führen natürlich zu Differenzen.

Bei den Holzstäbchen ist noch eine weitere Abweichung zu berücksichtigen: Die Stäbe waren lotrecht eingeschlagen. Da die obersten zirka 10 cm tief im Boden verankert waren, sind sie im Verlauf der Zeit nach vorne gekippt, denn die **Bewegungsbeträge** an der **Erdoberfläche** sind grösser als in 10 cm Tiefe. Vermessen wurden jeweils die Spitzen der Stäbe. Dadurch ergibt sich für die **Gesamtbewegungen** ein grösserer Betrag als aus der Messung an der Erdoberfläche **beim** Ausgraben. Die Differenz ist um so grösser, je stärker der Stab gekippt ist. Bei den Alufolien treten diese Messfehler nicht auf, da ihre aus dem Boden ragenden Spitzen vor den Messungen lotrecht gestellt **wurden**. Reduziert man die jeweiligen Summen der Jahresbeträge jeder Holzmessmarke um diese Kippung – sie wurde beim Ausgraben der Messmarken ermittelt – so erhält man die korrigierte Hangabwärtsbewegung der Messmarken von 1975–1979.

Ein statistischer Vergleich dieser korrigierten Vermessungswerte mit jenen, die beim Ausgraben ermittelt wurden, ergab für die Holzmessmarken, dass die zwei Stichproben bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % der gleichen Grundgesamtheit angehören (Wilcoxon-Test für Paardifferenzen; SACHS 1974, S.244–246). Beide **Messmethoden** haben ihre Messfehler, dies führt zu kleinen Differenzen bei einzelnen Wertepaaren; bei einer grösseren Anzahl von **Messpunkten** gleichen sich diese jedoch aus.

Bei der weiteren Bearbeitung der Daten konnte man aber auch die Kippung der Holzstäbe vernachlässigen. Dies aus folgenden Gründen: Einmal ist der Zeitpunkt des Kippens unbekannt – **welcher** Jahresbetrag sollte also korrigiert werden? Ausserdem führt die Verankerung der Messmarken im Boden auch dazu, dass die oberste **raschbewegte** Bodeiischicht die Marken **umfließt** und nicht mitreisst. Die **beim** Ausgraben

festgestellten Beträge sind deshalb kleiner als die tatsächlichen Bewegungen an der Erdoberfläche.

Die Abbildungen 5 und 6 sind Senkrechtaufnahmen der beiden Holzmessmarken 16.3 und 14.3. Die beiden linken Photos wurden bei Beginn der Messungen im September 1975 aufgenommen, die beiden rechten drei Jahre später im September 1978. Beide Messmarken liegen auf dem vegetationsfreien Erdstromrücken 1. Auf der Abbildung 5 ist deutlich zu sehen, wie die Messmarke vom Solifluktionsschutt umflossen wurde. Einige identifizierbare Steine (1-5) sind auf der jüngeren rechten Aufnahme 5-10 cm weiter hangabwärts verfrachtet worden als die Messmarke selbst, die zudem gekippt ist.

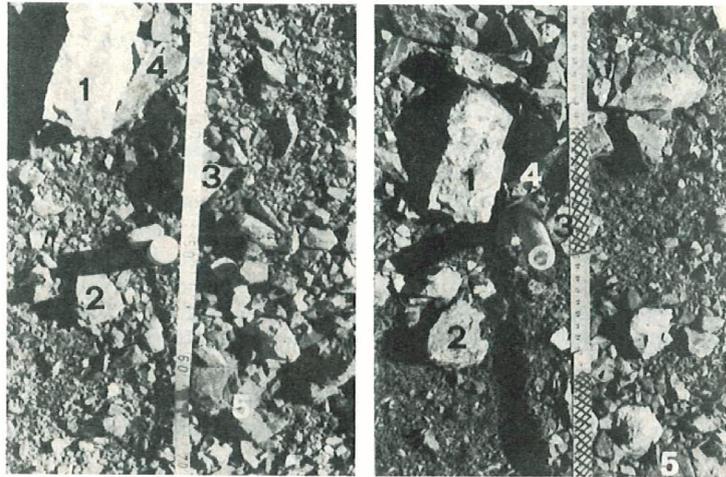


Abb. 5 Senkrechtaufnahmen der Holzmessmarke 16.3 (links September 1975, rechts September 1978). Die Zahlen bezeichnen auf beiden Aufnahmen die gleichen Steine.

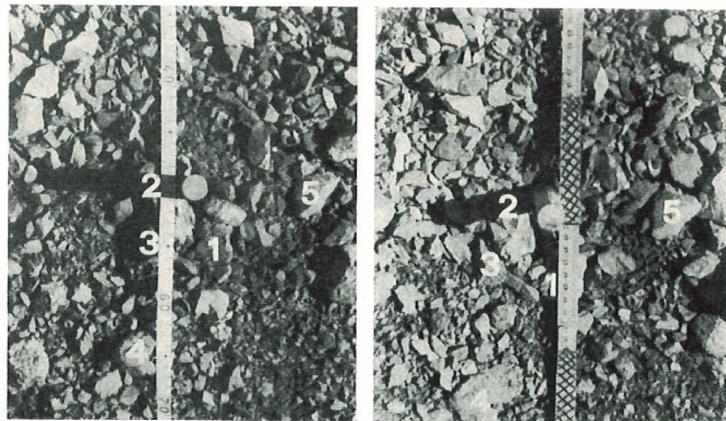


Abb. 6 Senkrechtaufnahmen der Holzmessmarke 14.3 (links September 1975, rechts September 1978). Die Zahlen bezeichnen auf beiden Aufnahmen die gleichen Steine.

en Bewegungen an der

en Holzmessmarken 16.3
messungen im September
September 1978. Beide
1. Auf der Abbildung 5
schutt umflossen wurde.
ten Aufnahme 5–10 cm
t, die zudem gekippt ist.



er 1975, rechts September
nen Steine.



er 1975, rechts September
nen Steine.

Aus den Werten des Punktes 16.3 in der Tabelle I sieht man, dass sich bei dieser Messmarke insgesamt nur die obersten 15 cm des Bodens bewegt haben, wobei sich die Bewegungen vor allem in den obersten 2–5 cm des Bodens abgespielt haben, denn die Messmarke wurde – weil 10 cm tief im Boden verankert – umflossen.

Im Gegensatz dazu zeigt die Abbildung 6 eine erstaunliche Übereinstimmung einzelner grösserer Steine bezüglich der Messmarke. Ein Blick auf die Tabelle I zeigt aber, dass sich diese Marke von 1975 bis 1978 insgesamt um 20 cm hangabwärts bewegt hat. Da hier die Solifluktion bis in eine Tiefe von 53 cm nachzuweisen war, muss das oberste Holzstäbchen gemeinsam mit den grösseren Steinen verfrachtet, also nicht umflossen worden sein. Die Holzmarke ist auch entsprechend weniger gekippt. Die Differenz zwischen geodätisch ermittelter Verschiebung und der beim Ausgraben der Messmarke an der Erdoberfläche festgestellten Bewegung beträgt bei der Marke 16.3 9 cm und bei der Marke 14.3 nur 3,3 cm (Messperiode 1975–1979).

In beiden Bildpaaren sind im übrigen kleinere Steine von weniger als 3 cm Länge nicht mehr zu identifizieren: Das Feinmaterial rutscht nicht einfach hangabwärts, sondern wird dabei oft gekippt, gedreht und umgelagert. Alle dreissig Holzmessmarken wurden 1975 und 1978 photographiert. Die oben beschriebenen Erscheinungen waren dabei auch bei anderen Messmarken zu beobachten: Messpunkte auf Vegetationsinseln oder in einer geschlossenen Vegetationsdecke zeigten beim Vergleich der beiden Aufnahmen die geringsten Differenzen. Kleinere Vegetationspolster von 10–20 cm Durchmesser verhielten sich wie grössere Steine und wurden gemeinsam mit der Messmarke verlagert.

2.3.2. Räumliche und zeitliche Verteilung der Bewegungsbeträge der obersten Bodenschicht

In den Tabellen I, II und III sind die Resultate der Bewegungsmessungen am Munt Buffalora zusammengefasst. In der Tabelle I sind alle Messpunkte aufgeführt, die auf Erdströmen oder im Bereich der geschlossenen Solifluktionsdecke über den Erdströmen liegen. Die Tabelle II zeigt die Resultate der Bewegungsmessungen im Gebiet unterhalb und zwischen den Solifluktionzungen — im Gebiet also, das von einer meist mehr oder weniger geschlossenen Vegetation bedeckt ist. Die Messungen aus dem Einzugsgebiet der Solifluktionsdecke (Schutthalde) stehen in Tabelle III.

Vorerst behandle ich die jährlichen Bewegungen von 1975 bis 1979. Bei der Auswertung dieser Resultate kann man auf eine getrennte Untersuchung der Holzmessmarken und der Alufolien verzichten. Ich möchte aber wiederholen, dass es sich bei diesen Messergebnissen zwar um Jahresbeträge der Solifluktion handelt, dass diese Bewegungen jedoch ausschliesslich im Winterhalbjahr in der Zeit zwischen Anfang Oktober und Ende Juni des folgenden Jahres stattfanden.

In den drei Teilgebieten des Messfeldes lassen sich aus den Mittelwerten der einzelnen Jahre die wichtigsten Unterschiede erkennen:

	1975/76	1976/77	1977/78	1978/79
Erdströme und Solifluktionsdecke (Tabelle I)	1,9 cm	2,3 cm	6,0 cm	4,8 cm
Gebiet vor den Erdströmen (Tabelle II)	0,2 cm	0,2 cm	0,6 cm	0,3 cm
Schutthalde über der Solifluktionsdecke (Tabelle III)	2,9 cm	3,0 cm	6,2 cm	3,3 cm

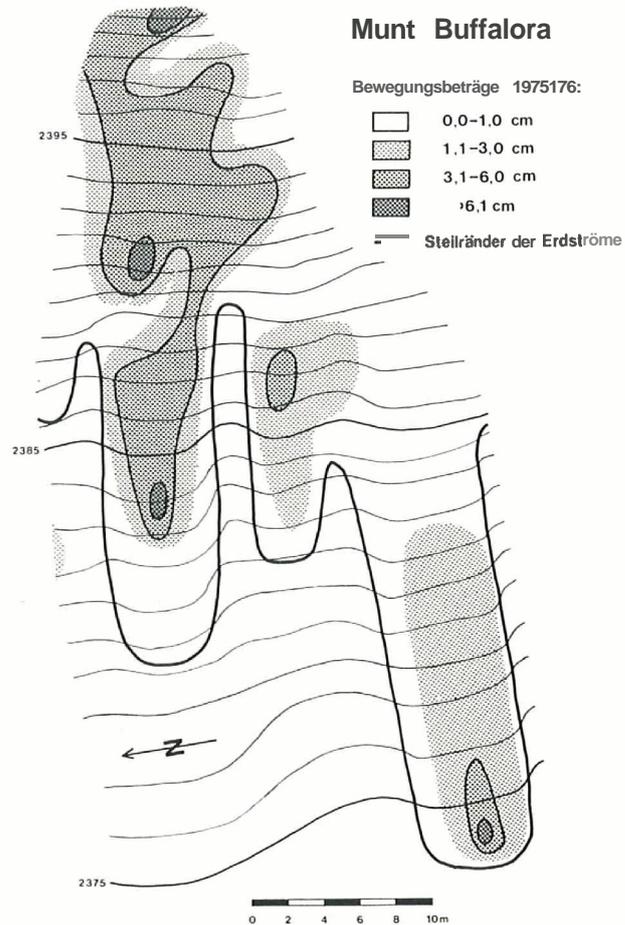


Abb.7 Verteilung der Solifluktionbeträge im Jahr 1975/76.

Die mittleren Bewegungsbeträge im Bereich der Schutthalde und auf den Erdströmen sind sehr ähnlich, im Gegensatz zu den deutlich kleineren Werten im Gebiet neben und unterhalb der Solifluktionsszungen. Betrachtet man die Mittelwerte der vier Messjahre, so fällt auf, dass die Bewegungen in den Jahren 1977/78 und 1978/79 beinahe doppelt so gross sind wie in den Jahren 1975/76 und 1976/77. Diese Unterschiede zeigen sich nicht nur in den Mittelwerten, sondern sie lassen sich auch mit statistischen Testverfahren nachweisen.

Für den Vergleich der drei Gruppen wählte ich den «Kolmogoroff-Smirnoff-Test» (SACHS 1974, S. 228–230). Dieser gilt als schärfster Homogenitätstest, um festzustellen, ob zwei unabhängige Stichproben von Messwerten derselben Grundgesamtheit angehören oder nicht.

Für jedes der vier Messjahre ergab sich aufgrund dieses Testes, dass die Werte der Tabellen I und III zur gleichen Grundgesamtheit gehören, die Werte der Tabelle II aber

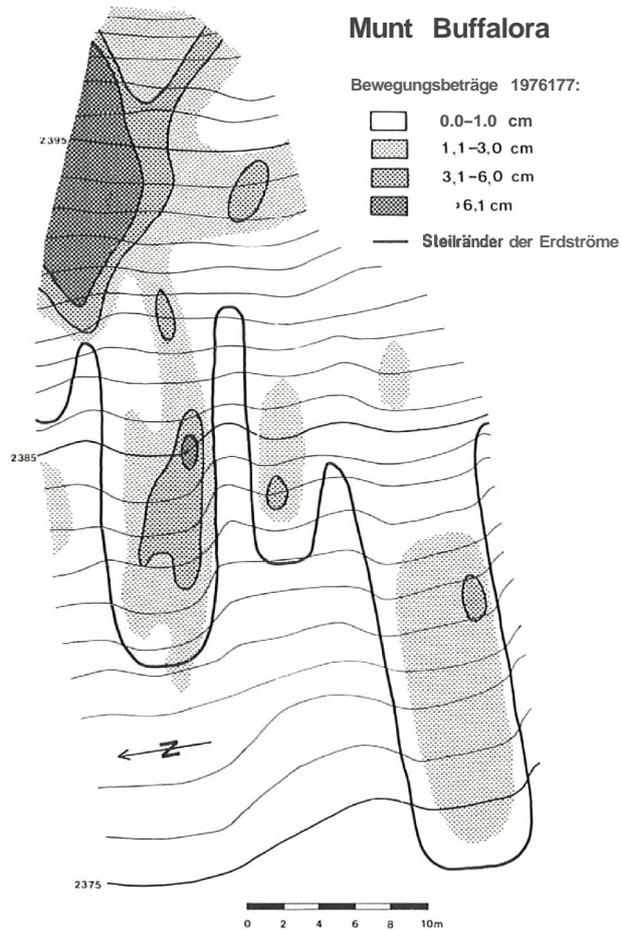


Abb.8 Verteilung der Solifluktionsträge im Jahr 1976/77.

verglichen mit den Werten der Tabellen I und III nicht. Die Irrtumswahrscheinlichkeit lag bei allen Tests bei 5 %. Die Bewegungsbeträge im Gebiet der Schutthalde und der Solifluktionsdecke sind also signifikant verschieden von denjenigen im übrigen Gebiet.

Um auch die Unterschiede zwischen den Messergebnissen der einzelnen Jahre statistisch abzusichern, wählte ich den Wilcoxon-Test für Paardifferenzen (SACHS 1974, S. 244–246). Er eignet sich für den Vergleich zweier abhängiger empirischer Stichproben. Dafür wurden die Werte aus Tabelle I und III zu einer Stichprobe zusammengefasst. Die Werte der Tabelle II konnten nicht getestet werden, da die meisten Paardifferenzen (das heißt Wert $x_{1975/76}$ — Wert $x_{1976/77}$) Null ergaben, weil sich die einzelnen Jahreswerte der Tabelle II kaum voneinander unterscheiden. Die Tests ergaben für die Tabellen I und III, dass die Ergebnisse der Jahre 1975/76 und 1976/77 sowie diejenigen der Jahre 1977/78 und 1978/79 jeweils der gleichen Grundgesamtheit angehören, die Werte der Jahre 1976/77 und 1977/78 aber verschiedenen Grundgesamtheiten (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %).

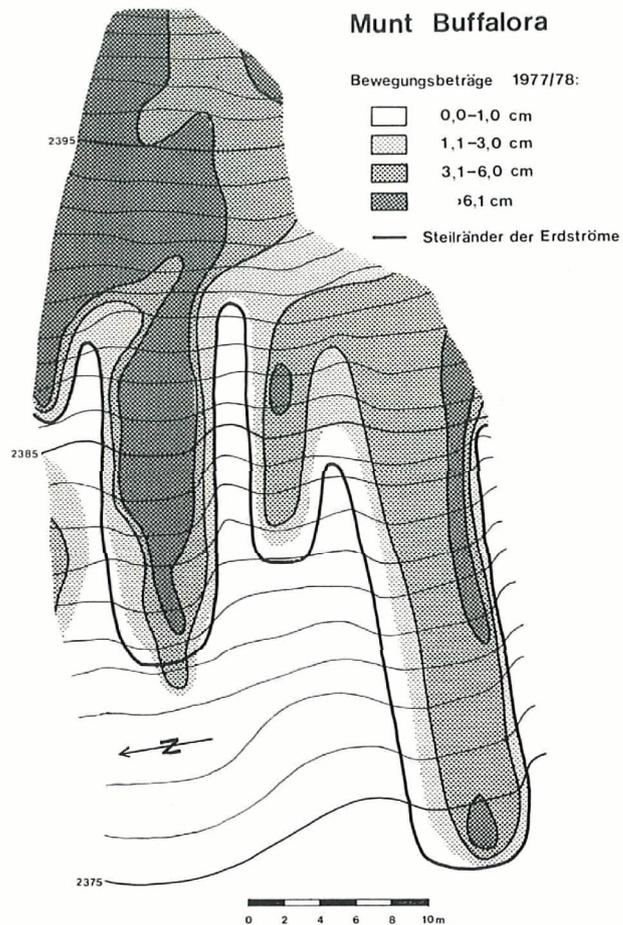


Abb.9 Verteilung der Solifluktionsträge im Jahr 1977/78.

Die Messpunkte lassen sich nicht ~~nur~~ aufgrund der Morphologie in verschiedene Gruppen aufteilen, sondern auch nach der Ausbildung der Vegetationsdecke. Um den Einfluss der **Vegetationsbedeckung** auf die **Solifluktionsträge** darzustellen, wurden die Messpunkte in drei Klassen eingeteilt. Die Klasse «+» umfasst alle Messpunkte, wo die Vegetation mehr oder weniger geschlossen ist; kleinere Lücken können auf Girlanden vorkommen. In der Klasse «—» sind alle Messpunkte auf vegetationsfreien Stellen zusammengefasst. **Einzelne** Polster (vor **allem** von *Dryas octopetala*) können aber auch hier noch auftreten. Alle Punkte, die weder der Klasse «+» noch «—» zuzuordnen waren, kamen in die Klasse «○»: Sie umfasst den **Übergangsbereich**, wo die Vegetation bereits deutlich aufgelockert, aber nicht inselhaft vorkommt. Zu welcher Klasse die Umgebung jeder Messmarke gehört, ist in den **Tabellen I, II und III** angegeben. Betrachten wir wiederum zunächst die Mittelwerte der drei Klassen:

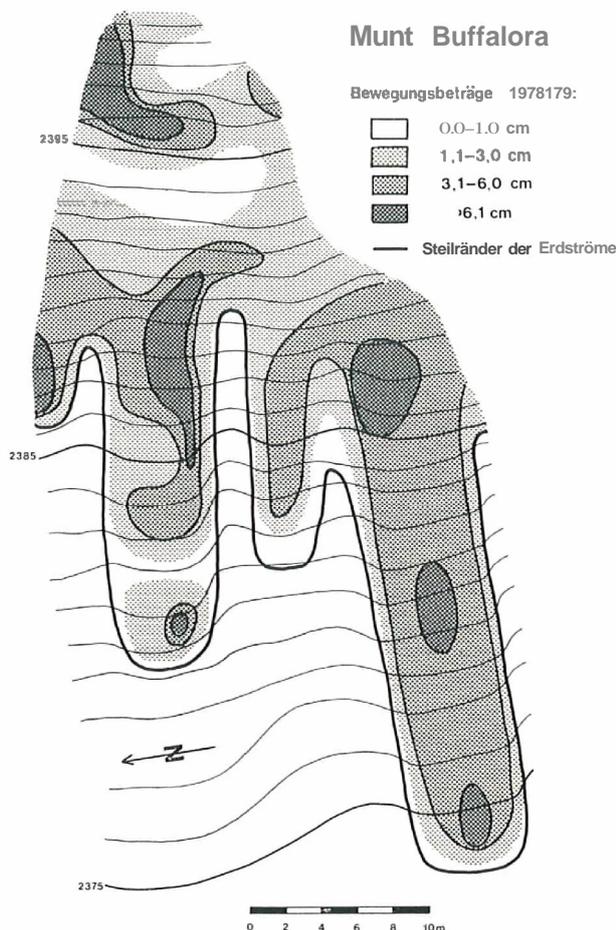


Abb. 10 Verteilung der Solifluktionsträge im Jahr 1978/79.

	1975/76	1976/77	1977/78	1978/79
Klasse «+»	0,2 cm	0,6 cm	1,0 cm	1,0 cm
Klasse «○»	1,6 cm	1,8 cm	5,8 cm	4,0 cm
Klasse «—»	2,9 cm	3,0 cm	7,0 cm	4,8 cm

Da es sich um dieselben Messwerte handelt wie bei den Untersuchungen, bei denen die Morphologie als Einteilungskriterium diente, stellt man auch hier deutlich fest, dass die Bewegungen der Jahre 1977/78 und 1978/79 grösser waren als 1975/76 beziehungsweise 1976/77. Wegen Verwendung dieser Werte erübrigt sich eine nochmalige statistische Absicherung.

Was uns hier besonders interessiert, ist das Ansteigen der Bewegungs-Mittelwerte in der Reihenfolge der Klassen «+», «○», «—»; in der letzten wurden jedes Jahr die höchsten durchschnittlichen **Bewegungsbeträge** erreicht. Auch diese Unterschiede lassen sich mit Hilfe des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests überprüfen. In den Jahren 1977/78 und 1978/79 ergaben sich die folgenden **Zusammenhänge** (Irrtumswahrscheinlichkeit =

1 %): Die Klassen «+» und «—» gehören verschiedenen Grundgesamtheiten an, ebenso die Klassen «+» und «○». Die Stichproben «○» und «—» dagegen gehören zur gleichen Grundgesamtheit. In den Jahren 1975/76 und 1976/77 unterschieden sich die Werte der drei Klassen etwas weniger deutlich, die oben aufgezählten Unterschiede sind nur mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % gesichert. Zusammenfassend kann man feststellen, dass der Grad der Vegetationsbedeckung das Ausmass von solifluidalen **Bewegungen** wesentlich beeinflusst. Der Mittelwert der jährlichen Solifluktionsträge liegt bei 0,2–1,0 cm in Hangbereichen mit geschlossener Vegetation; wo diese deutlich aufgelockert ist oder ganz fehlt, schwanken die Mittel von 1,6–7,0 cm. Nur eine vollständig geschlossene Vegetationsdecke hemmt die Solifluktion. Wo sie stark aufgelockert ist, werden die Bewegungsbeträge an der Erdoberfläche bereits so gross, dass sie sich von Gebieten ohne Bewuchs kaum mehr unterscheiden lassen. Wie ein Blick auf die Tabellen zeigt, umgibt eine geschlossene Pflanzendecke die Erdströme. Nur auf ihren Rücken und in der Schutthalde dominieren die Klassen «○» und «—». Die Vegetation, die morphologische Gliederung des Hanges und das Ausmass der solifluidalen Bewegung zeigen die gleiche Verteilung.

Es wäre naheliegend, einen Zusammenhang zwischen Bewegungsbeträgen an der Oberfläche und der Hangneigung zu vermuten, doch diese beiden Variablen sind nicht abhängig voneinander: Eine Korrelationsrechnung ergab einen Korrelationskoeffizienten von lediglich 0,0073.

Diese mit Hilfe der Statistik ausgearbeiteten Zusammenhänge lassen sich auch anschaulich darstellen (**Abb. 7, 8, 9 und 10**). Im Gegensatz zur statistischen Behandlung der Werte, wo die Gemeinsamkeiten verschiedener Gruppen von Werten herausgearbeitet wurden, kann man diesen Karten Details und Unterschiede innerhalb einer morphologischen Einheit, zum Beispiel auf einem Erdstromrücken, entnehmen. Für die Konstruktion dieser Karten **wurden** die Werte aus den Tabellen I, II und III in den Kolonnen «**Jährliche** Bewegungen der Messmarken» verwendet. Die Karten zeigen jeweils vier Zonen:

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

Die Grenzlinien der Flächen **wurden** durch lineare Interpolation zwischen benachbarten **Messpunkten** ermittelt. (In der Zone mit 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**).

Die vier Karten zeigen, wie stark sich die oberste Bodenschicht in verschiedenen Bereichen des Messfeldes Munt Buffalora verschoben hat: Die Bewegungsspielten sich auf den Erdstromrücken und in deren Einzugsgebiet ab. Man sieht ausserdem, dass in den Zeiträumen 1977/78 und 1978/79 sowohl die betroffenen Flächen als auch die Beträge der **Verschiebungen** grösser waren. Dies haben schon die statistischen Auswertungen der **Messresultate** ergeben. Darüber hinaus zeigt sich, 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. Von links greift Vegetation **auf** den Rücken **des** Erdstroms **1** über und kanalisiert so den **Solifluktionsschutt** am rechten Rand beim Ansatz der Zunge. Auf allen vier Karten sind die **grösseren Bewegungsbeträge** in dieser Zone sichtbar. Vergleicht man die Darstellungen, so erkennt man auf den **Erdstromrücken**, dass die jährlichen relativen Bewegungen ähnlich verteilt sind, lediglich ihre

esamtheiten an, ebenso
en gehören zur gleichen
den sich die Werte der
erschiede sind nur mit
essend kann man fest-
von solifluidalen Bewe-
lfluktionsbeträge liegt
wo diese deutlich auf-
n. Nur eine vollständig
stark aufgelockert ist,
ross, dass sie sich von
Blick auf die Tabellen
r auf ihren Rücken und
vegetation, die morpho-
n Bewegung zeigen die

gungsbeträgen an der
n Variablen sind nicht
Korrelationskoeffizien-

ge lassen sich auch an-
tistischen Behandlung
n Werten herausgear-
e innerhalb einer mor-
nehmen. Für die Kon-
und III in den Kolo-
rten zeigen jeweils vier

tion zwischen benach-
resbewegung hat sich
n $\pm 0,5$ cm sind keine

nicht in verschiedenen
wegungen spielten sich
eht ausserdem, dass in
ichen als auch die Be-
statistischen Auswer-
1, dass die Bodenbe-
und gegen die Steil-
gte «Solifluktions-
ation auf den Rücken
m rechten Rand beim
gungsbeträge in dieser
m auf den Erdstrom-
ilt sind, lediglich ihre

absolute Grösse schwankt von Jahr zu Jahr. Anders dagegen im Einzugsgebiet: Hier findet man die **bewegten Zonen** jedes Jahr verschieden verteilt, auch die Beträge schwanken anscheinend ohne Gesetzmässigkeit.

Zusammenfassung über die **solifluidalen** Bewegungen der obersten **Bodenschichten** am Munt Buffalora:

- Im Einzugsgebiet und auf den Erdstromrücken sind die Verschiebungen deutlich grösser als unterhalb der Zungen.
- Die Fläche, wo keine oder nur geringste Bodenbewegungen auftreten, deckt sich mit der mehr oder weniger geschlossenen Vegetationsdecke; deren Auftreten scheint mit der unterschiedlichen Schneehöhe im Winter in Beziehung zu stehen.
- Auf den Erdstromrücken ist deutlich ein «**Solifluktionsstrich**» nachzuweisen.
- Im Einzugsgebiet der Erdströme wechseln Ort und Grösse der Bewegungen von Jahr zu Jahr **mehr** oder weniger zufällig.
- Die Messergebnisse zeigen die durchschnittlichen Verschiebungen der obersten 10 **cm** des Bodens. Nimmt die Bewegung bis in 10 cm Tiefe stark ab, so werden die **Messmarken** umflossen, und die Vermessung liefert zu geringe Beträge. Sofern jedoch eine mehr als 10 **cm** mächtige Bodenschicht talwärts fliesst oder eine Vegetationsdecke die Oberfläche **zusammenhält**, sind die Messresultate durchaus repräsentativ.
- Die mittleren jährlichen **Solifluktionsbeträge** schwanken: In **den** Perioden 1975/76 und 1976/77 waren sie signifikant kleiner als **in** den folgenden zwei Messjahren.

2.3.3. Bewegungsbeträge in den Erdströmen

Die Messmarken am Munt Buffalora wurden aufgestellt, **um** neben den **Verschiebungen** an der Erdoberfläche auch Daten über die Bewegungen im Innern der **Solifluktionsdecken** zu erhalten. Es interessierten vor allem der Tiefgang, Ausmass und der Verlauf der Bewegungsprofile. Diese erlauben Rückschlüsse auf den Bewegungscharakter. Abbildung 11 (nach: BENEDICT 1970, S. 196) zeigt schematisch Profile bei vorherrschendem Frostkriechen oder bei Gelifluktion **sowie** beim Auftreten **beider Solifluktionsprozesse**. Beim **Vergleich** dieser theoretischen Profile mit denjenigen in der Abbildung 12 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, neben einigen rein **gelifluidalen**. Die Messäulen vor den Erdströmen zeigen nur geringe und nicht tiefgreifende Bewegungen **an**, die wahrscheinlich auf **Frostkriechen zurückzuführen** sind.

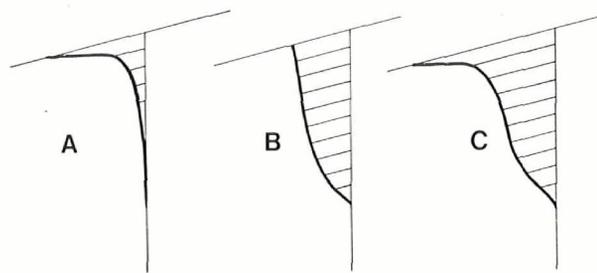


Abb. 11 Schematische Bewegungsprofile: A bei vorherrschendem Frostkriechen; B bei vorherrschender Gelifluktion; C graphische Addition von A und B zu einem kombinierten Bewegungsverlauf, wie er beim Auftreten beider Solifluktionsprozesse vorkommt. (Darstellung nach BENEDICT 1970, S. 196).

Munt Buffalora

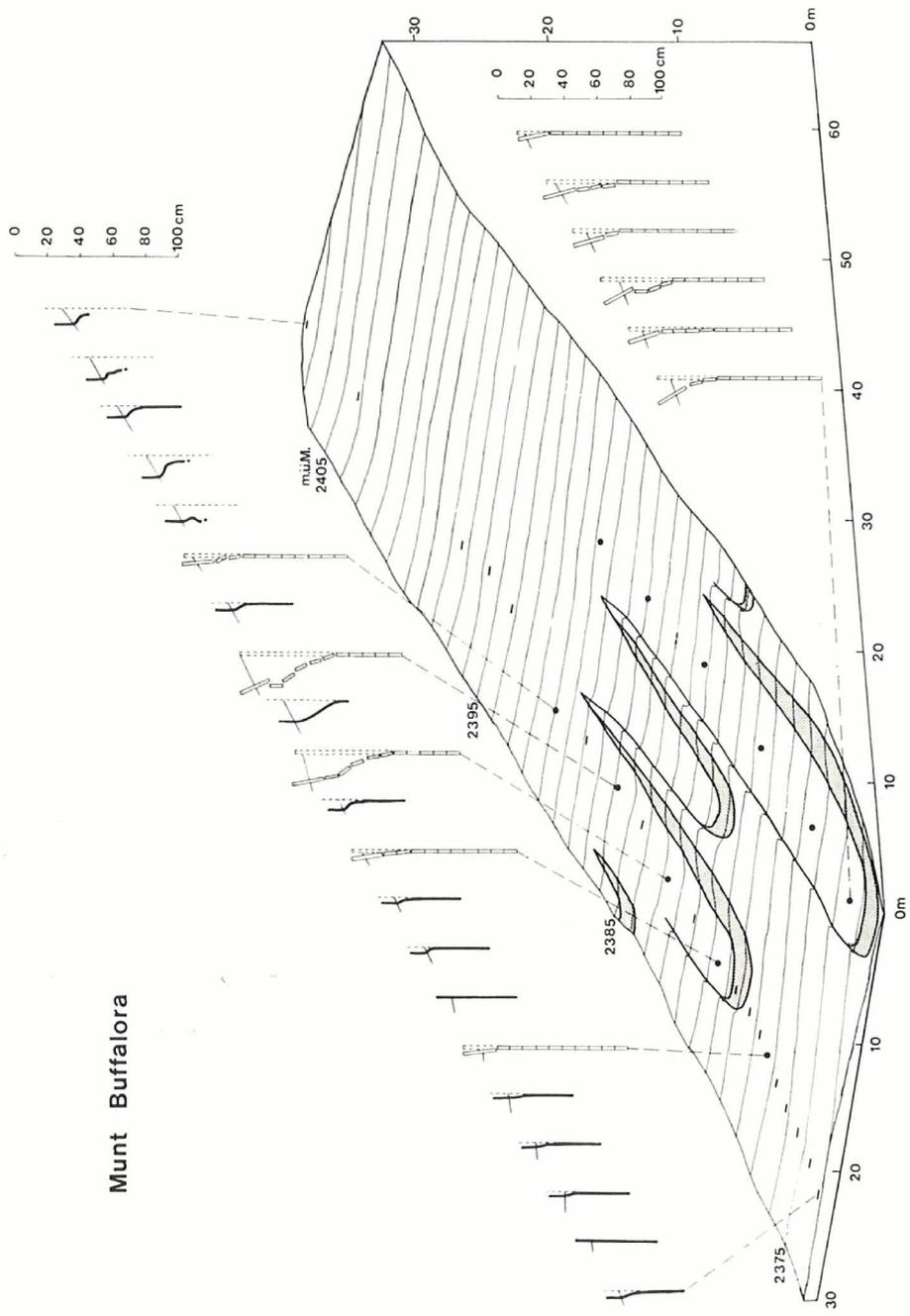


Abb. 12 Blockdiagramm des Messfeldes Munt Buffalora. Die eingezeichneten Profile zeigen den Bewegungsverlauf bis in 90 cm Tiefe.

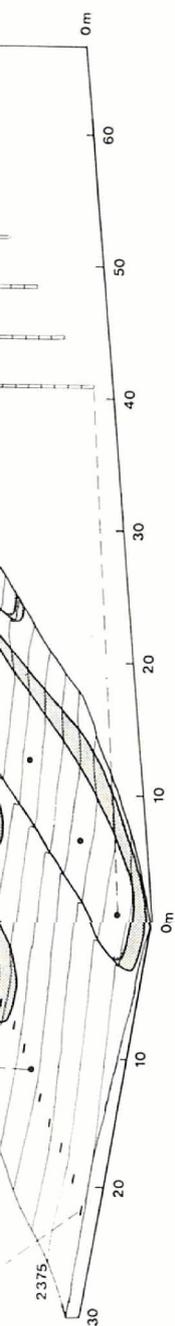


Abb. 12 Blockdiagramm des Messfeldes Munt Buftalora. Die eingezeichneten Profile zeigen den Bewegungsverlauf bis in 90 cm Tiefe.

Die stärksten und zugleich auch am tiefsten reichenden Bewegungen finden sich im Erdstrom 1. Vier Profile dazu sind auf den Abbildungen 13, 14, 15 und 16 dargestellt. Die Alufolie 11.3 zeigt den typischen Verlauf eines Bewegungsprofils, wenn Frostkriechen vorherrscht: Die obersten Zentimeter zeigen eine starke **Hangabwärts-Bewegung** an. Die tieferen Bodenschichten wurden dagegen nur noch wenig bewegt. Dieser Verlauf des Profils ist dadurch zu erklären, dass bei der Frosthebung die obersten Zentimeter des Bodens durch das dort gebildete Eis besonders stark gehoben werden. Der mögliche **Frostkriechbetrag** (Tangens der Hangneigung mal Frosthub) ist deshalb hier am höchsten und nimmt nach unten rasch ab. Dazu kommt noch, dass das Wasser beim Auftauen und darauffolgenden Kriechen des Bodens hier angesammelt ist, da es beim Gefrieren aus den tieferen Bodenschichten gesogen wurde: «Das (Eis-) Kristallwachstum hat eine lokale Entwässerung, das heisst eine **Absenkung** des hydraulischen Potentials zur Folge, die eine ausgleichende Wasserbewegung erzeugt. Das Wasser fliesst also zum Eis hin und lässt die Eisschicht immer höher **werden.**» (HARTGE 1978, S.281/282.)

Die Folie 11.4 zeigt dagegen ein Profil, das auf vorwiegend gelifuidale Verfrachtung des Bodens schliessen lässt, das heisst, das Ausmass der Bewegung bleibt bis in etwa 20 cm Tiefe ziemlich konstant und fällt dann rasch auf 0 zurück. Der ganze bewegte Bodenhorizont gleitet zusammenhängend über einen kaum bewegten Unterboden. Das Profil zeigt auch, dass die Bewegung mit der Tiefe abnimmt, das heisst, auch **Frostkriechen** kommt – allerdings untergeordnet – vor. Die Abbildung 15 zeigt die Situation bei der Messsäule 12.2. Es handelt sich hier um ein gemischtes Profil mit dem **charakteristischen** Absatz in etwa 30 cm **Tiefe**. Die Profilsäule 16.0 zeigt noch eine Besonderheit. Im Prinzip handelt es sich auch um ein Profil der kombinierten **Art**. Der grössere Block hinter der **Messmarke** führte jedoch zu einem verstärkten Abgleiten der **obersten** 20 cm des Bodens. Die gewöhnlichen solifluidalen Bewegungen werden hier durch den Schub dieses kleinen «Wanderblocks» verstärkt. Das Vegetationspolster vor dem Stein macht die Bewegungen mit.

Aus den Daten in den Tabellen und den **Bewegungsprofilen** (Abb. 12) scheint hervorzugehen, dass die Verschiebungen an der Erdoberfläche mit dem Tiefgang der **Bewegung** verknüpft sind. Diesen Zusammenhang prüfte ich mit einer Regressionsrechnung. Es ergab sich die Regressionsgerade $y = 9,86 x + 2,91$ mit einem Korrelationskoeffizienten $r = 0,88$ und einem Bestimmtheitsmass von 77 %. Der Korrelationskoeffizient ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% signifikant von null verschieden. Anders ausgedrückt: Es besteht eine lineare Abhängigkeit **zwischen** dem Tiefgang der Bewegung und dem **oberflächlichen** Solifluktionstrag. Je grösser dieser ist, desto tiefer sind die Verschiebungen im Boden noch festzustellen. Da die **Solifluktionsträge** bei **vegetationsfreiem** Boden grösser sind als bei bedecktem, bedeutet dies, dass bei nackter Oberfläche die Bewegungen auch tiefer reichen.

Analog zum «**Solifluktionstrich**» in der obersten Bodenschicht stellt man fest, wie der Tiefgang der Verschiebungen von der Mitte der Erdströme gegen die Ränder abnimmt. Beim Erdstrom 1 zeigte sich folgende Verteilung der **Bewegungstiefe**:

	linker Rand	Mitte	rechter Rand
Zungenansatz (oberes Erdstromende)	11,5 cm	53,5 cm	42,5 cm
	40 cm	40 cm	40 cm
	40 cm	54,3 cm	31,2 cm
	15,5 cm	16,0 cm	27,2 cm
	10,5 cm	26,5 cm	32,0 cm
Zungenende		11,0 cm	

Es liegt also eine deutliche Zunahme der Bewegungstiefe gegen die Mitte vor – mit Ausnahme der Messreihen im unteren Drittel der Zunge, wo sich die maximale Tiefe der Bewegung an den rechten Rand des Erdstroms verlagert. Diese Abweichung zeigt sich auch bei den Solifluktsbeträgen der obersten Bodenschicht. Sie ist darauf zurückzu-

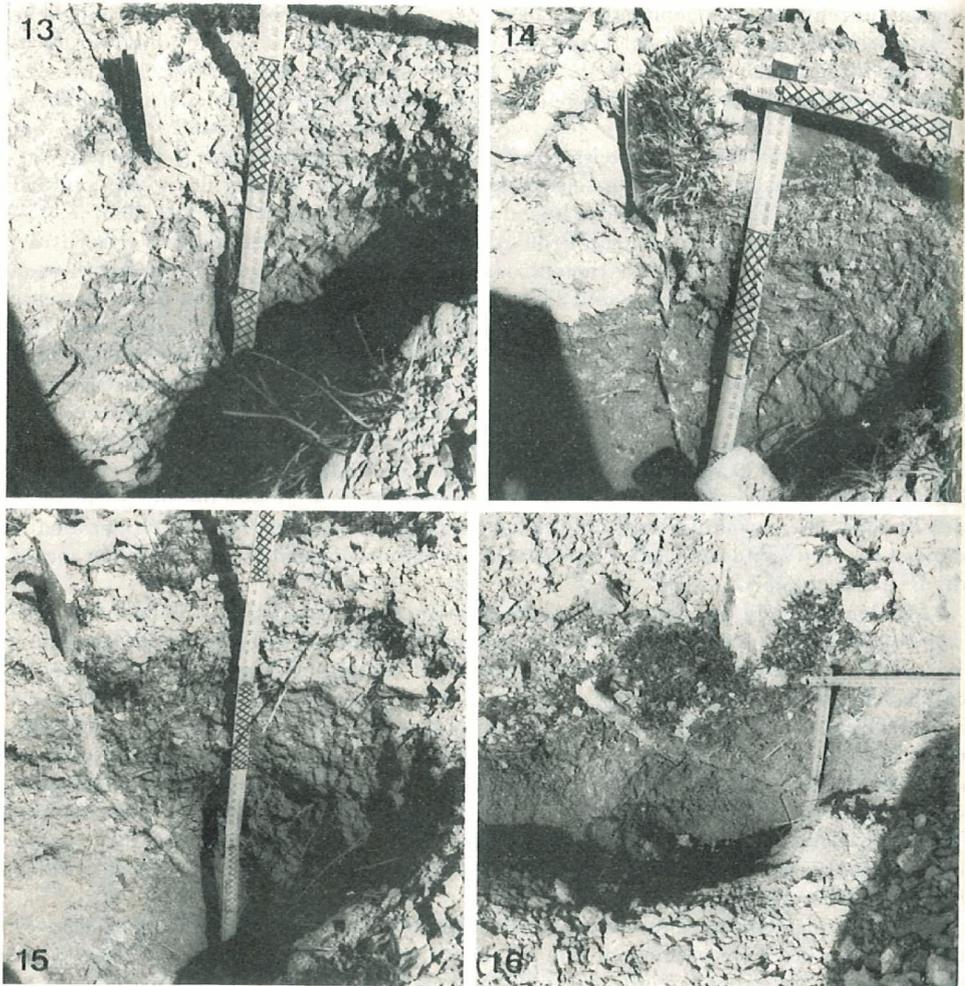


Abb. 13 Alufolie 11.3: Das Bewegungsprofil lässt darauf schliessen, dass der Schutt vorwiegend durch Frostkriechen transportiert wurde.

Abb. 14 Alufolie 11.4: Der Verlauf des Profils lässt erkennen, dass hier die Bodenbewegungen vor allem auf Gelifluktion zurückzuführen sind.

Abb. 15 Holzmesssäule 12.2: Ein gemischtes Profil, Frostkriechen und Gelifluktion ergeben diese Verteilung der Bewegungen im Boden.

Abb. 16 Holzmesssäule 16.0: Ein kombiniertes Profil, bei dem die Solifluktion in den obersten 20 cm des Bodens durch den Schub eines Felsblocks verstärkt wurde.

gen die Mitte vor – mit
die maximale Tiefe der
Abweichung zeigt sich
Sie ist darauf zurückzu-



s der Schutt vorwiegend

die Bodenbewegungen vor

solifluktion ergeben diese

solifluktion in den obersten
wurde.

führen, dass die Vegetation aus dem Graben auf den linken Rand des Erdstroms übergreift. Zum Tiefgang der Bewegung bleibt noch nachzutragen, dass er im Gebiet zwischen und unterhalb der Erdströme durchschnittlich 5 cm beträgt, auf ihren Rücken 29 cm und in deren Einzugsgebiet darüber etwa 40 cm, wobei hier die Bewegungstiefe oft nicht gemessen werden konnte, da die Alufolien zu kurz waren und keine Hölzchensäulen eingeschlagen werden konnten.

Aus den Bewegungsprofilen lassen sich für verschiedene Erdstrom-Querschnitte Schuttvolumina berechnen, die während eines Jahres durch diesen Querschnitt flossen (= Durchtrittsvolumen). Solche Berechnungen waren bei sechs Querschnitten möglich. Es ergaben sich dabei auf dem Erdstrom 1 die folgenden Werte:

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 Meter lang. Die Durchtrittsvolumina zeigen somit, dass die Menge des im Erdstrom jährlich transportierten Solifluktionsschutts bis über seine 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 untersuchten Erdstroms 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 4045 dm³ Schutt pro Jahr angeliefert wurden, so ergibt dies eine Bildungsdauer für diese Form von etwa 1500 Jahren. Da jedoch zu Beginn weniger Material zufließen konnte, und zudem ein Grossteil des Feinmaterials durch Wind, oberflächliche Abschwemmung und Kalklösung vom vegetationsfreien Rücken abgetragen wurde, können 1500 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 entsprechen haben.

Beim Erdstrom 2 konnte nur ein Durchtrittsvolumen im oberen 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 Meter, 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 anzeigt. Aufgrund des kleineren Durchtritts- sowie des etwas grösseren Gesamtvolumens errechnete ich für diesen Erdstrom eine minimale Bildungsdauer von etwa 3000 Jahren.

Die beiden Erdströme 1 und 2 sind heute unterschiedlich aktiv, was ja bereits aus der Bewegungsverteilung an der Erdoberfläche sowie aus den Bewegungsprofilen ersichtlich

war. Die Überlegungen zur Bildungsdauer der Erdströme – heutige klimatische Bedingungen vorausgesetzt – werden in den Kapiteln 6 und 7 bei der Interpretation von Altersbestimmungen fossiler Böden aus Erdströmen wieder aufgegriffen.

Die Ergebnisse der Bewegungsmessungen in Erdströmen lassen sich so zusammenfassen: Der Schutt in den Erdströmen des Messfeldes Munt Buffalora wird durch Frostkriechen und Gelifluktion bewegt. Der Tiefgang der Bewegung ist linear vom Ausmass der Solifluktionsbeträge der obersten Bodenschicht abhängig. Der «Solifluktionsstrich» zeigt sich nicht nur an der Oberfläche der Erdstromrücken, sondern auch in den tieferen Bodenschichten und im Tiefgang der Bewegungen: Dieser nimmt von der Mitte der Erdströme zu den Rändern hin ab. Die Bildung der Erdströme würde unter heutigen klimatischen Bedingungen mindestens 1500 beziehungsweise 3000 Jahre erfordern, dies lässt sich aus den Durchtrittsvolumina der Schuttmassen abschätzen.

2.4. Ergebnisse der Messungen am Munt Chavagl

Abbildung 17 ist eine terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme des Messfeldes vom 25. September 1978. Mindestens zwei Generationen von Solifluktionsdecken liegen hier übereinander. Insgesamt wurden 10 Messreihen mit je 10 Messkegeln aufgestellt.

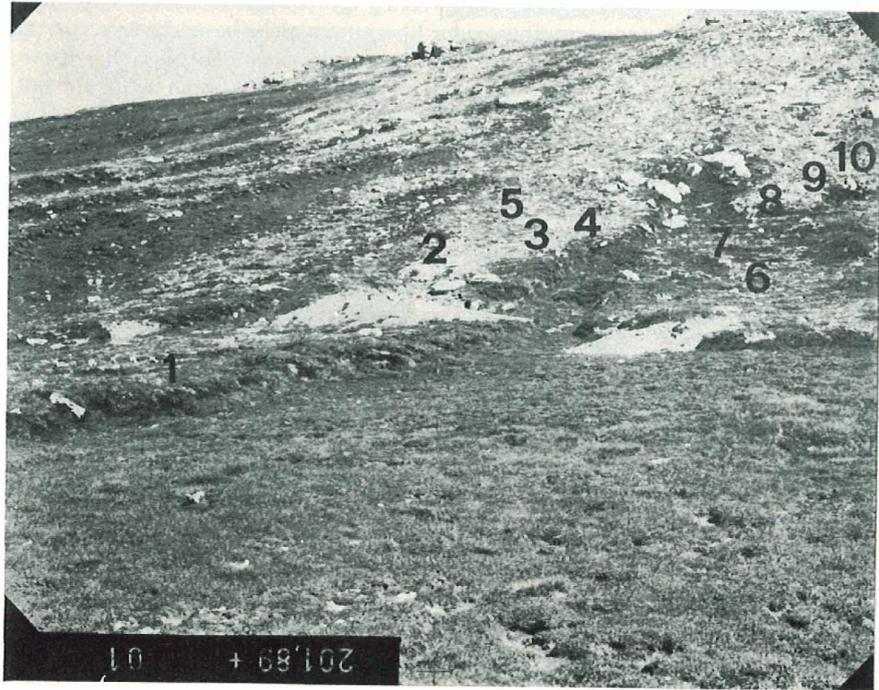


Abb. 17 Erdströme am Südwesthang des Munt Chavagl. Die Bewegungsmessreihen 1 bis 10 sind eingetragen (Aufnahme mit Messkamera Wild P 31, am 25. September 1978).

itige klimatische Bedin-
der Interpretation von
gegriffen.

ssen sich so zusammen-
alora wird durch Frost-
ist linear vom Ausmass
er «Solifluktsstrich»
ern auch in den tieferen
mmt von der Mitte der
e würde unter heutigen
00 Jahre erfordern, dies
ätzen.

Chavagl

fnahme des Messfeldes
ifluktsdecken liegen
Messkegeln aufgestellt.



smessreihen 1 bis 10 sind
tember 1978).

Die drei Reihen 1, 6 und 7 (vgl. **Abb. 17** und Profil **Abb. 18**) liegen auf den unteren **Erdströmen**, 2, 3, 4 und 5 auf dem linken, **höherliegenden Erdstrom**, die Reihen 8, 9 und 10 auf dem rechten. Die Messreihen 6, 7 und 10 wurden erst im Sommer 1978 eingerichtet, die übrigen im Sommer 1977. Alle sind zirka 4,5 m lang, das heisst, die Messkegel liegen jeweils 50 cm auseinander. Die Reihen wurden möglichst **isohypsenparallel** angelegt.

Die hellen **Erdhaufen** in der **Bildmitte** (**Abb. 17**) sowie links und rechts sind nicht natürlichen Ursprungs. Es handelt sich um **Feinmaterial**, das aus früheren Sondiergräben in den **Erdstromstirnen** ausgeschwemmt wurde. Die **Messpunkte** sind genügend weit von diesen alten Gräben entfernt – dies **betrifft** vor allem die Reihe 2 – so dass eine **Beeinflussung** der **solifluidalen** Bewegungen durch **Schuttverlagerungen**, die mit den Gräben im Zusammenhang stehen, ausgeschlossen werden kann. Die bewachsenen **Steilränder** der **Erdströme** sind durch die Gräben nur unwesentlich **unterbrochen**. Ein **Ausfliessen** des Feinmaterials fand deshalb nur in unmittelbarer Nähe der Aufschlüsse statt. Zudem wurden die **letzten** Grabungen im Sommer 1974 **durchgeführt**, die **Bewegungsmessungen** aber **erst** im Herbst 1977 aufgenommen.

Die **beiden** unteren Erdströme (Reihen 1, 6 und 7) deckt eine weitgehend **geschlossene** Vegetation; die **beiden** oberen sind nur am Rand bewachsen. Die **Erdstromrücken** tragen einzelne Vegetationspolster. Aus den **beiden** Profilen in der **Abbildung 18** kann man die **Hangneigung** entnehmen. Bei der Reihe 1 beträgt sie nur **8°**, bei den Reihen 5, 8, 9 und 10 dagegen etwa **19°**. Sie ist also wesentlich geringer als beim Messfeld Buffalora mit **25°**. Alle Messkegel wurden senkrecht **zur** Erdoberfläche eingesetzt. Da sie zwischen den Messungen gelegentlich etwas ausfroren (vgl. **Abb. 19**) wurden sie jeweils vor dem **Anzielen** wieder ganz in den Boden **gedrückt**. Im November 1978 war der Boden bereits gefroren, die Kegel konnten zum Teil nicht zurückgedrückt werden. Die **Messergebnisse** wurden deshalb **nachträglich** um die **Ausfrierhöhe** jeder Marke korrigiert. Ganz **ausgefrorene** und **umgekippte** Kegel wurden bei den folgenden Messungen jeweils nicht mehr berücksichtigt. Die Vermessungen fanden an folgenden Tagen statt:

25. 8.1977	geodätisch	Reihen 1–7
28. 9.1977	terrestrisch-photogrammetrisch	Reihen 1–7
21. 7.1978	geodätisch	Reihen 1–4, 6, 7
25. 9.1978	terrestrisch-photogrammetrisch	Reihen 1–10
22.11.1978	geodätisch	Reihen 1–10
19. 7.1979	geodätisch	Reihen 1–10
12. 9.1979	terrestrisch-photogrammetrisch	Reihen 1–10

Munt Chavagl

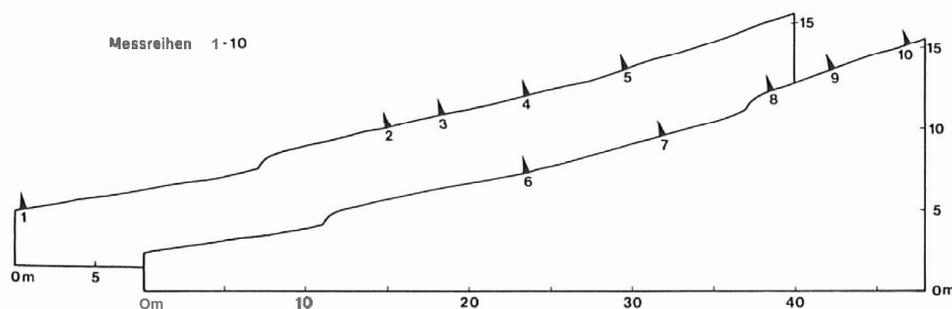


Abb. 18 Zwei Profile durch das Messfeld.

Aus dem Vergleich aufeinanderfolgender Messungen ergaben sich die Längen der Vektoren (x, y, z) als Bewegungsbeträge in den einzelnen Zeitabschnitten. Die Tabelle IV enthält die jährlichen Solifluktionsbeträge, die aus den Messungen im September 1977, 1978 und 1979 resultieren. Betrachtet man die durchschnittlichen Verschiebungen der Reihen, so stellt man fest, dass erwartungsgemäss die Reihen 1, 6 und 7 mit Beträgen von 1,2 bis 2,8 cm pro Jahr deutlich hinter den Reihen 2–5 und 8–10 mit 4,7 bis 12,4 cm pro Jahr zurückbleiben. Diese Unterschiede sind auf die geschlossene Vegetationsdecke auf den unteren Erdströmen zurückzuführen.

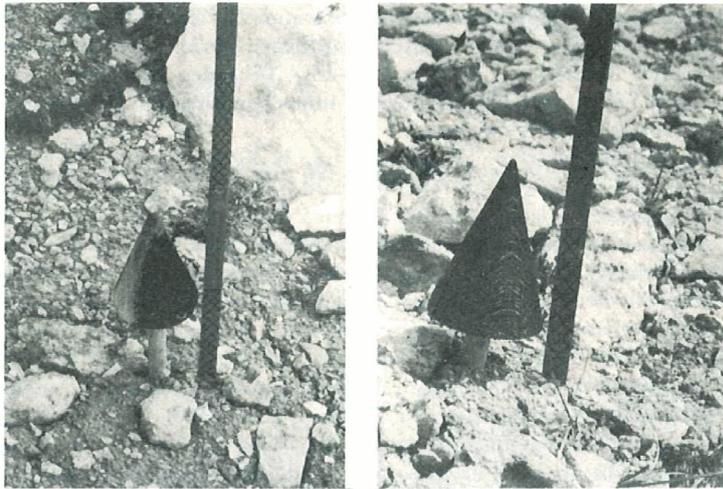


Abb. 19 Zwei Holzkegel des Messfeldes Munt Chavagl. Vor jeder Vermessung wurden sie auf die Erdoberfläche zurückgedrückt.

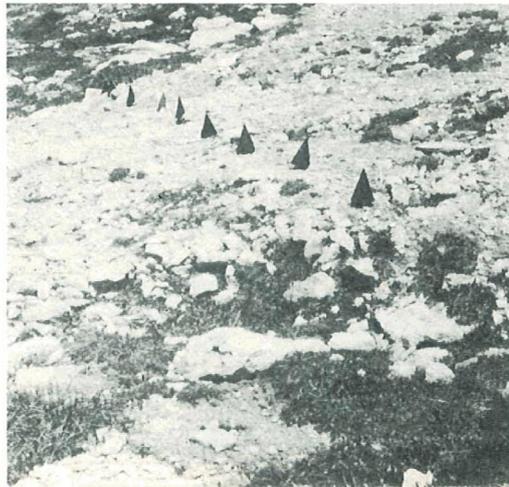


Abb. 20 Messreihe 2. Die 10 Holzkegel wurden mit 50 cm Abstand isohypsenparallel aufgestellt.

en sich die Längen der
chnitten. Die Tabelle IV
en im September 1977,
en Verschiebungen der
, 6 und 7 mit Beträgen
1-10 mit 4,7 bis 12,4 cm
essene Vegetationsdecke



essung wurden sie auf die



ypsenparallel aufgestellt.

Um den Einfluss des Pflanzenkleides auf die Bewegungen zu erfassen, teilte ich die einzelnen Messpunkte wie am Munt Buffalora in drei Klassen ein. Die Klasse «+» umfasst diejenigen Punkte, die in einem Gebiet mit geschlossener Vegetationsdecke liegen. Die zweite Klasse «○» enthält alle **Kegel** auf Teilen des Messfeldes, wo der Bewuchs deutlich aufgelockert ist; die einzelnen Punkte können dabei in oder neben Vegetationsstreifen liegen; Klasse «—» umfasst die Marken im vegetationsfreien Gebiet (einzelne kleine Vegetationspolster, meistens von *Dryas octopetala*, können hier noch vorkommen). Für die drei Gruppen von Messmarken ergaben sich die folgenden mittleren Jahresbewegungen:

	1977/78	1978/79
Klasse «+»	2,2 cm	1,7 cm
Klasse «○»	4,6 cm	4,1 cm
Klasse «—»	7,8 cm	8,3 cm

Die Verschiebungen sind **erwartungsgemäss** bei geschlossener Vegetationsdecke am kleinsten, betragen bei aufgelockertem Bewuchs etwa das Zweifache, **und** auf nacktem Boden verdoppelt sich dieser Betrag noch einmal.

Diese Unterschiede lassen sich auch statistisch absichern. Es handelt sich bei den Gruppen von Messwerten um unabhängige empirische Stichproben, es wurde deshalb wieder der Test von Kolmogoroff und **Smirnof** (SACHS 1974) verwendet.

Die drei Kategorien der Messdaten **gehören** sowohl im Jahr 1977/78 als auch 1978/79 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% nicht denselben Grundgesamtheiten an. Im Gegensatz zu den Messwerten vom Munt Buffalora lässt sich hier am Munt Chavagl bereits bei einer aufgelockerten Vegetationsdecke ein hemmender Einfluss auf die **Bodenbewegungen** nachweisen.

Die Aufnahme des Messfeldes Munt Chavagl vom 20. Juni 1979 (Abb. 23) zeigt, dass auch hier, wie am Munt Buffalora, die vegetationsfreien Rücken der **Erdströme** nur von einer dünnen, bereits lückenhaften **Schneeschi**ct überzogen sind. Im stärker bewachsenen Gebiet **unterhalb** der Zungen liegt noch eine zusammenhängende und wesentlich höhere Schneedecke.

Mit dem Wilcoxon-test für Paardifferenzen (SACHS 1974, S. 244–246), der als optimaler Test für zwei abhängige gepaarte Stichproben gilt, wurden die Paardifferenzen der 63 Messpunkte untersucht, für die **sowohl** aus dem Jahr 1977/78 als auch 1978/79 Resultate vorlagen. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% ergab sich, dass die **beiden** Wertegruppen der gleichen **Grundgesamtheit** angehören: Die Bewegungen sind in den **beiden** Jahren nicht signifikant voneinander verschieden.

Ein **Zusammenhang** zwischen der Hangneigung und der durchschnittlichen **Jahresbewegung** der Messmarken besteht auch am Munt Chavagl nicht. Der Korrelationskoeffizient zwischen diesen **beiden** Variablen beträgt lediglich = 0,03. Eine Gliederung der Messwerte **aufgrund** morphologischer Kriterien erübrigt sich, da alle Messmarken auf Erdstromrücken liegen.

Naheliegender ist auch ein Vergleich zwischen den Messdaten vom Munt Chavagl und Munt Buffalora. Dazu verwendete ich vom Munt Buffalora nur Werte von **Messpunkten** auf den Erdströmen selber und auf der darüberliegenden geschlossenen Solifluktuationsdecke. Für den Vergleich kam wiederum der Kolmogoroff-Smirnof-Test für unabhängige, nicht normal verteilte Stichproben zur Anwendung. Die **beiden** Gruppen von Messdaten unterscheiden sich bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% nicht

signifikant voneinander. Die Mittelwerte stimmen dementsprechend gut miteinander überein:

	Munt Chavagl	Munt Buffalora
1977/78	6,0 cm	6,0 cm
1978/79	5,8 cm	4,4 cm

Die geringen Expositionsunterschiede zwischen den beiden Messfeldern (Buffalora nach Westen exponiert, Chavagl nach Südwesten) sowie die unterschiedlichen Hangneigungen scheinen die solifluidalen Bewegungen nicht entscheidend zu beeinflussen. Wegen der guten Übereinstimmung der Jahresbeträge kann auch am Munt Chavagl mit einem durchschnittlichen Tiefgang der Bewegung von 25–30 cm gerechnet werden.

Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die Bewegungen aller Messpunkte in der Zeit vom 25.8.1977 bis zum 12.9.1979 für die Reihen 1–7 und in der Zeit vom 25.9.1978 bis zum 12.9.1979 für die später eingerichteten Reihen 8–10. Um die Darstellungen nicht zu überladen, wurden nur die y- und die z-Werte aufgezeichnet. Dies ist aus den folgenden Gründen sinnvoll: Die x-Werte sind sehr klein, sie liegen vielfach unter der Fehlergrenze. Zudem gleichen sie sich häufig bei aufeinanderfolgenden Messungen aus.

Die Abbildung 21 zeigt die Messreihen auf den beiden linken Erdströmen (vgl. auch Profil Abb. 18). Es fällt auf, dass die Bewegungen von Oktober bis Ende Juni deutlich grösser sind als im Sommer. Sie bestehen dann meist nur aus einer geringen Hebung des Bodens und einer zusätzlichen kleinen hangabwärts gerichteten Verschiebung. Diese Bewegungen in der Falllinie sind minim: Sie liegen im Bereich des Messfehlers. Die

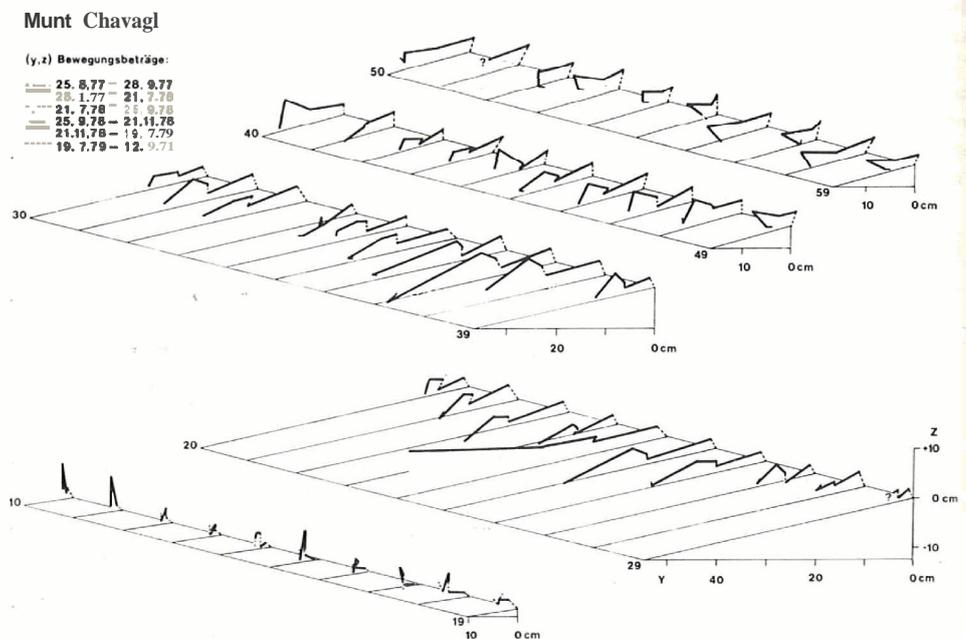


Abb. 21 Solifluktionbeträge auf dem Messfeld Munt Chavagl (Reihen 1–5).

schend gut miteinander

Munt Buffalora

6,0 cm

4,4 cm

feldern (Buffalora nach niedlichen Hangneigung zu beeinflussen. Wegen Munt Chavagl mit einem net werden.

punkte in der Zeit vom vom 25.9.1978 bis zum Darstellungen nicht zu ist aus den folgenden fach unter der Fehler-Messungen aus.

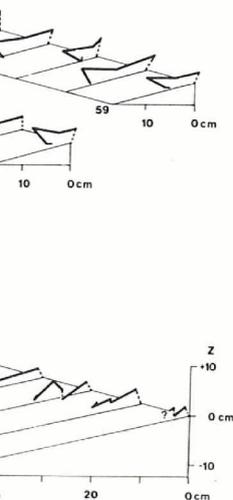
Erdströmen (vgl. auch bis Ende Juni deutlich er geringen Hebung des n Verschiebung. Diese h des Messfehlers. Die

allgemein feststellbare Hebung des Bodens im Sommer kann dadurch erklärt werden, dass **erste** Bodenfröste, die **häufig** im September auftreten, die oberste Bodenschicht auflockern. Die **Verschiebungen** im Winter liefern den überwiegenden Anteil der gesamten **Jahresbewegung** der Messmarken. Im ersten Messjahr **1977/78** konnte im Spätherbst keine Vermessung mehr durchgeführt werden. Die Beträge entsprechen also der solifluidalen **Jahresbewegung** am Munt Buffalora.

Im zweiten Jahr gelang es, wegen des **aussergewöhnlich** späten Einschneiens, noch am 22. November eine Vermessung durchzuführen. Die Bodenoberfläche war bereits gefroren. Alle Messkegel waren durch den Frost etwas aus dem Boden gehoben; sie konnten nicht **wie** üblich vor der Vermessung zurückgedrückt werden. Die Ausfrierbeträge wurden bei allen Kegeln gemessen und die Vermessungsergebnisse entsprechend korrigiert. Die Erdoberfläche lag als Folge der Gefrorenis um bis zu 6 cm höher als im September. Durchschnittlich **betrug** die Frosthebung der Erdstromrücken etwa **2,5 cm**.

Die Temperaturmessungen in einem unmittelbar benachbarten Erdstrom (vgl. Kapitel 3) ergaben, dass am 22. November die **Nullgradisotherme** **40 cm** unter der Erdoberfläche lag. Darüber **wies** der Boden eine Temperatur von minus 0,2 Grad Celsius auf. Eine Bodengefrorenis von maximal **40 cm** Mächtigkeit hebt die Erdoberfläche um 2,5 cm an (Durchschnitt von **100** Messmarken, Maximalbetrag **6 cm**). Neben der Hebung zeigen alle Messmarken auch bereits eine **grössere Hangabwärts-Bewegung** auf. Sie ist, wie die Temperaturmessungen belegen, auf **Frostkriechen** zurückzuführen.

In der Zeit vom **1. Oktober** bis zum **22. November 1978** gefror der Boden **24mal** mindestens 5 cm tief, **10mal** bis in 10 cm und 2mal sogar bis in **30 cm** Tiefe. Jeder **Frostwechsel** konnte zu einer mehr oder weniger starken Hebung des Bodens senkrecht zur



Munt Chavagl

(y, z) Bewegungsbeträge:

..... 25.8.77 - 28.9.77
 ——— 28.9.77 - 21.7.78
 - - - 21.7.78 - 25.9.78
 ——— 25.9.78 - 21.11.78
 - - - 21.11.78 - 19.7.79
 19.7.79 - 12.9.79

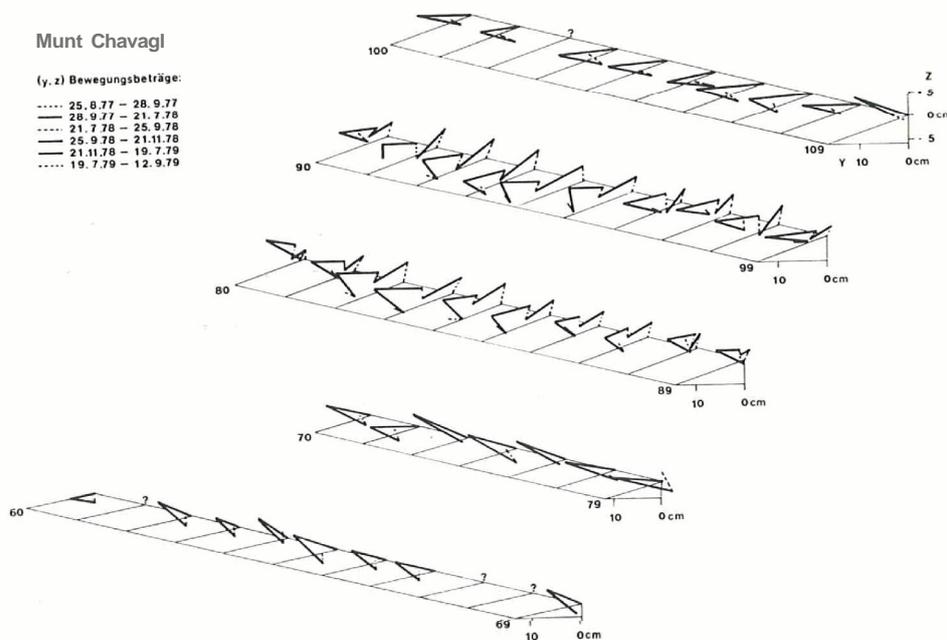


Abb. 22 Solifuktionsbeträge auf dem Messfeld Munt Chavagl (Reihen 6-10). Die Reihen 6, 7 und 10 wurden am 25. September 1978 erstmals vermessen.

1-5).

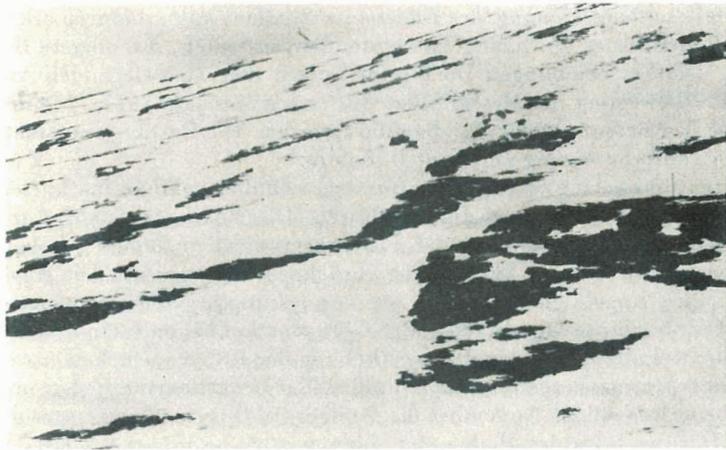


Abb. 23 Das Messfeld **Munt Chavagl** am 20. Juni 1979. Erst wenige **Stellen** sind schneefrei, **unter** anderem die Umgebung der Temperaturmessanlage (rechter Bildrand).

Oberfläche und **anschliessend zu** einer vertikalen **Setzung** des Materials führen. Dieses Frostkriecheii konnte noch durch **Kammeissolifluktion** an besonders feuchten Stellen **und durch Schmelzwasser** von **einigen** herbstlichen Schneefällen verstärkt werden.

Wegen seines inneren Zusammenhalts neigt der **Boden** dazu, sich **beim** Auftauen – entgegen der Schwerkraft – nicht lotrecht, **sondern** senkrecht zur Oberfläche **zu** setzen. Die mögliche Bewegung der Partikel hangabwärts stellt sich daher nicht vollständig ein. Diese scheinbar rückwärts, das heisst **hangaufwärts** gerichtete Bewegung wurde von verschiedenen Autoren beschrieben (**WASHBURN 1973/1979**, **BENEDICT 1970**, **JAHN 1974**). Sie zeigt sich auch bei meinen Messungen: Bei den Reihen 5–10 war zwischen dem **22. November 1978** und dem 19. Juli 1979 keine weitere **Hangabwärts-Bewegung** der Messmarken mehr festzustellen – im Gegenteil, die **meisten** Marken lagen im Juli tiefer und auch etwas weiter hangaufwärts als **im** vorhergehenden **November**, denn das Bodeneis **war** aufgetaut und der Boden wieder in seine Ausgangslage zurückgesunken.

Man kann also annehmen, dass sich **bei** diesen Reihen die solifluidalen Jahresbewegungen nur aus Frostkriechen im Herbst und nach der winterlichen Bodengefrorenis zusammensetzen. Die an den Kegeln gemessenen Verschiebungen sind kleiner als in den besonders kräftig bewegten obersten 5 cm des Bodens, weil die Kegel von dieser dünnen Schuttschicht umflossen werden (vgl. Kapitel 2.3.1).

Bei den Reihen 2, 3 und 4 dagegen **lagen** die Messmarken **im** Juli 1979 ein **deutliches** Stück weiter hangabwärts als im November 1978. Neben **dem Frostkriechen**, reduziert **um** die **Rückwärtsbewegung**, **muss** also **noch eine** weitere hangabwärts gerichtete Bewegung stattgefunden haben. Weil der Boden nach dem **22. November 1978** nicht **mehr** auftaute (vgl. Kapitel 3.2) und **im** Juni nach **dem** Auftauen nicht nochmals gefror, **kommt für** diesen Anteil der solifluidalen Jahresbewegung das Frostkriecheii nicht in Betracht. Es **muss** sich **um** Gelifluktion handeln, **denn** der Boden taute **im** Juni von **oben** her auf. Somit lag während der **Schneesmelze** (vgl. Abb. 23) eine **wasserdurchtränkte Bodenschicht** über **einem** noch gefrorenen, wasserindurchlässigeii Unterboden.



Abb. 24 Die Reihe 2 am 20. Juni 1979. Eine kleine Schutzzunge hat zwei Messkegel weit hangabwärts geschoben (vgl. Abb.20).

Aufnahme 24 zeigt die Reihe 2 am 20. Juni 1979. Deutlich sieht man, wie eine kleine Schutzzunge die beiden Messkegel 24 und 25 mitgerissen hat, die ursprünglich mit den andern Kegeln auf gleicher Höhe gestanden waren. Diese Reihe zeigte auch die grössten gelifluidalen Bewegungsanteile.

Auch auf dem Messfeld Chavagl setzt sich die solifluidale Jahresbewegung somit aus Gelifluktion und Frostkriechen zusammen, frostunabhängige Bewegungen im Sommer konnte ich nicht beobachten. Dieser Befund deckt sich mit den Resultaten aus der Untersuchung der Bewegungsprofile vom Messfeld Buffalora.

Besonders bei den Reihen 1, 6 und 7 sind die Jahresbewegungen sehr gering. Es handelt sich hier, wie die Ergebnisse des zweiten Messjahres zeigen, vor allem um ein Heben und Senken des Bodens durch Bodeneis, ohne dass daraus hangabwärts gerichtete Bewegungen resultieren. Diese 3 Reihen liegen auf den beiden unterm, stark bewachsenen Erdströmen. Hier zeigt sich der bereits statistisch nachgewiesene bewegungshemmende Einfluss der Vegetation deutlich. Ausserdem sieht man bei den Reihen 2, 3, 4, 8 und 9 auch den bekannten «Solifluktionsstrich». Besonders deutlich erscheint er bei den vor allem gelifluidal bewegten Reihen 2 und 3.

Zusammengefasst stimmen die Resultate vom Munt Chavagl und Munt Buffalora weitgehend überein: Bei beiden Messfeldern treten sowohl Frostkriechen als auch Gelifluktion auf und ergeben zusammen die solifluidale Jahresbewegung. Eine geschlossene Vegetationsdecke blockiert alle Verschiebungen, obwohl dort Frosthebung im gleichen Ausmass wie auf nacktem Boden vorkommt. Auf einzelnen Abschnitten der nicht bewachsenen Erdstromrücken wird die solifluidale Jahresbewegung vor allem durch Gelifluktion, auf andern durch Frostkriechen verursacht. Die durchschnittlichen Solifluktionsbewegungen und ihre Verteilungen sind trotz verschiedener Exposition und Hangneigung auf beiden Messfeldern gleich.



llen sind schneefrei, unter bildrand).

des Materials führen. an besonders feuchten eefällen verstärkt wer-

sich beim Auftauen - r Oberfläche zu setzen. r nicht vollständig ein.

Bewegung wurde von BENEDICT 1970, JAHN 5-10 war zwischen dem ubwärts-Bewegung der en lagen im Juli tiefer vember, denn das Bo e zurückgesunken.

lifluidalen Jahresbewe- lichen Bodengefrorenis . sind kleiner als in den egel von dieser dünnen

uli 1979 ein deutliches rostkriechen, reduziert wärts gerichtete Bewe- mber 1978 nicht mehr icht nochmals gefror, Frostkriechen nicht in en taute im Juni von (23) eine wasserdurch- hlässigen Unterboden.

3. BODEN- UND LUFTTEMPERATURMESSUNGEN AN ERDSTRÖMEN IM NATIONALPARK

Messungen von Bodentemperaturen über längere Zeit sind im Bereich der Alpen bisher selten durchgeführt worden. Besonders im Zusammenhang mit **solifluidalen** Prozessen liegen nur spärlich Daten vor.

ELSASSER (1966 und 1968) macht in seinen Arbeiten Angaben zum Frostverlauf in Strukturböden auf der Fuorcla da **Fäller**. Unter seinem Messfeld lag eine **Permafrost**-linse. Er zeigte mit seinen Messungen, dass die Oberfläche des Permafrosts im Verlauf des Sommers bis auf **50–60 cm** Tiefe **absinkt**. Im Herbst gefror der Boden **ausschliesslich** von unten her wieder zu.

FREUND (1968 und 1972) kommt aufgrund seiner Bodentemperaturmessungen auf der Lenzerheide (1470 m ü. M.) und auf dem Parpaner Rothorn (2810 m ü. M.) zu folgenden Erkenntnissen:

- Die Bodentemperaturen zeigen allgemein viel geringere Amplituden als die **Lufttemperaturen**. Eine Wärme- oder Kältewelle wird demnach mit zunehmender Tiefe abgeschwächt und zeitlich verzögert.
- Beim **Jahresgang** der Temperatur lässt sich ein Sommertyp (Mai bis September) und Wintertyp (Oktober bis April) unterscheiden: Der Sommertyp zeigt in **Oberflächen**-nähe höhere Temperaturen als in **grösserer Bodentiefe**; beim Wintertyp dagegen verläuft das Temperaturgefälle umgekehrt.
- Der Tagesgang der Temperatur war auf dem Parpaner Rothorn bis in 30 cm Tiefe **feststellbar**.
- Der **Isolierereffekt** der Schneedecke (schlechte Temperaturleitfähigkeit und hohe Albedo des Schnees) war **äusserst** ausgeprägt. Auch scharfe Luftfröste vermochten den Boden auf der Lenzerheide nicht zum **Gefrieren** zu bringen. Ein Tagesgang der Temperatur im Boden fehlt **vollständig**. Auf dem Parpaner Rothorn gefror der Boden zwar unter der Schneedecke, die extremen Temperaturen der Luft wurden aber nie erreicht.
- Der gefrorene Boden auf dem Parpaner Rothorn taute stets Mitte Juni auf, also rund **1½** Monate vor der **Ausaperung**.

E. VORNDRAN (1969) befasste sich mit Problemen der Schuttentstehung in **Hoch**-regionen der Silvretta aufgrund von **Temperaturmessungen** an Gesteinsoberflächen am Piz Buin (3312 m ü. M.) und am **Gamshorn** (2996 m ü. M.). Die Messreihen ergaben für die Nordwände 109 **Frostwechseltage/Jahr**, für die Südwände 135. Die Frostwechselhäufigkeit (Anzahl **Frostwechsel** / Anzahl Beobachtungstage) betrug dagegen für die Nordwände nur **0,44**, für die Südwände aber **0,70**, denn diese zeigten auch im Winter Frostwechsel. Es traten zwei Frostwechselmaxima im Herbst und **M** Frühjahr auf.

Ähnliche Untersuchungen führte **MATHYS** (1974) am Jungfrauostgrat (3700 m ü. M.) durch. Die Unterschiede zwischen Süd- und Nordexposition waren hier noch deutlicher (Südwand 196 **Frostwechseltage/Jahr**, Nordwand 22 **Frostwechseltage/Jahr**). An der Südwand traten auch im Winter Frostwechsel auf.

G. VORNDRAN (1972) berichtet über Bodentemperaturmessungen in der **Verwitterungsdecke** eines zonalen **Strukturbodenvorkommens** in 2915 m Höhe in der **Silvretta-gruppe**: Er konnte zwei thermische Grenzen (die auch granulometrisch und **situmetrisch** nachweisbar sind) im Boden feststellen: Die Obergrenze des Dauerfrostbodens in 100 bis 120 cm Tiefe und die Grenze zwischen alpinem und **arktischem** Typ des Frostbodens (nur noch zwei **Frostwechsel/Jahr**) in **40–60** cm Tiefe. Die Durchmesser von **Struktur-**

MESSUNGEN PARK

im Bereich der Alpen
g mit **solifluidalen Pro-**

en zum Frostverlauf in
ld lag eine **Permafrost-**
Permafrosts im Verlauf
er Boden **ausschliesslich**

ipermessungen auf
2810 m ü. M.) zu **folgen-**

plituden als die **Luft-**
nit zunehmender Tiefe

Mai bis September) und
p zeigt in **Oberflächen-**
Wintertyp dagegen **ver-**

bis in 30 cm Tiefe **fest-**

fähigkeit und hohe **Al-**
fröste vermochten den
in Tagesgang der **Tem-**
horn gefror der Boden
uft wurden aber **nie er-**

tte Juni auf, also rund

ttentstehung in **Hoch-**
Gesteinsoberflächen am
Messreihen ergaben für
135. Die **Frostwechsel-**
etrag dagegen für die
igten auch im Winter
d im Frühjahr auf.

ostgrat (3700 m ü. M.)
en hier noch deutlicher
selstage/Jahr. An der

agen in der **Verwitte-**
Höhe in der **Silvretta-**
risch und situmetrisch
rfrostbodens in 100 bis
Typ des Frostbodens
nmesser von **Struktur-**

bodenmakroformen könnten ein Mass für die mittlere Lage dieser Grenzen im Boden darstellen.

In einer ausführlichen Abhandlung über periglaziale Bildungen im Jura beschreibt **PANCZA** (1979) auch Ergebnisse von Temperaturmessungen im Fels auf der Vue des Alpes (1280 m ü. M.) im Winter 1972/73. Pro Jahr treten dort 45 **Frostwechselzyklen** auf, wovon 20 tief in den Fels eindringen. Laboruntersuchungen an Juragesteinen **zeigten**, dass Frostsprengung nur auftritt, wenn das Gestein wassergesättigt und dazu **frost-anfällig**, das heisst porös und spaltenreich ist. Kräftige und wiederholt auftretende Fröste sind unter diesen Voraussetzungen besonders **wirkungsvoll**.

FURRER (1954) führte einige Temperaturmessungen in Kammeisfeldern im Nationalpark durch. Er stellte dabei fest, dass Kammeis durchwegs über nicht gefrorenem Unterboden ($+0,2$ bis $+2,2^{\circ}\text{C}$) auftritt, also durch blosse **Luftfröste** gebildet wird.

Durch eigene Bodentemperaturmessungen im Nationalpark sollten im Zusammenhang mit den **Bewegungsmessungen** folgende **Fragen** geklärt werden:

- Wie gross ist die Anzahl Frostwechseltage in der Luft und in verschiedenen **Boden-** tiefen?
- Wie **tief** reicht die **winterliche** Bodengefrorenis in den Erdströmen, und wie **lange** dauert sie?
- Im Zusammenhang mit **gelifluidalen** Bodenbewegungen ist das **Auftauen** des Bodens im Frühjahr von grösster Bedeutung: Taut der Boden von der Erdoberfläche oder von unten her auf, und findet dieser Vorgang vor, während oder nach **der Schneeschmelze** statt?

3.1. Messgeräte

Zur Lösung dieser Probleme wurden zunächst Versuche mit einem **batteriebetriebenen** Thermografen mit sechs elektrischen Widerstandsthermometern durchgeführt. Diese Messungen erfolgten auf dem Erdstrom 2 am Munt **Buffalora** und später am Munt Chavagl. Die Anlage erwies sich jedoch als sehr störanfällig, sobald die **Bodentemperaturen** unter 5°C fielen. Deshalb erhielt ich nur eine unvollständige Messreihe von August bis Ende Dezember 1977. Mit einer so lückenhaften und kurzen Reihe **liess** sich aber keine der gestellten Fragen beantworten.

Die Stiftung für wissenschaftliche Forschung an der Universität Zürich finanzierte in verdankenswerter Weise ein **neues** Gerät. Es handelt sich um einen 12-Kanal «**Data-** logger **DL-1**» der Firma Aanderaa Instruments in Bergen (Norwegen). An diesem Messinstrument können 11 elektrische Widerstandsthermometer angeschlossen werden. Jeder Messfühler wurde durch die Lieferfirma bei **0** und **33,6** °C kalibriert. Die geringen Unterschiede, die **bei** den einzelnen Fühlern festgestellt wurden, werden bei der Auswertung der Daten in die Berechnung der **Temperaturwerte** einbezogen. Die **Messgenauigkeit** **liegt** deshalb 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 automatisch auf **Magnetband** aufgezeichnet. **Die** Auswertung der Bänder erfolgte am Institut für Meereskunde an der Universität Kiel.

Diese Temperaturmessanlage wurde auf einem Erdstrom direkt **neben** dem **Bewegungsmessfeld** am Munt Chavagl installiert. Die Fühler wurden in der Mitte der Zunge unter **vegetationsfreiem** Boden vergraben. Die Abbildung 26 zeigt die **Messstelle** mit dem Fühler für die Lufttemperatur in 150 cm Höhe über dem Erdboden. Dieser und der Fühler für die Lufttemperatur 2 cm über dem Boden sind mit Strahlungsschutzhülsen



Abb. 25 Temperaturmessgerät «Datalogger DL-1». Die Mess- und Registrierapparatur ist durch eine wasserdichte Hülle geschützt. Die Fühler können für Bodeii- und Lufttemperaturmessungen verwendet werden.

ausgerüstet. Die übrigen neun Widerstandsthermometer messen in Bodeii. Wie die Abbildung 27 zeigt, wurden sie so vergraben, dass entlang den Kabeln kein Wasser einsickert, welches dann die Temperaturen bei den Thermometern verfälschen könnte. Die Messanlage wurde am 30. September 1978 eingerichtet und in Betrieb gesetzt. Für die vorliegende Arbeit konnten die Daten bis zum 30. September 1979 verwendet werden. Leider weist die Messreihe wegen Schwierigkeiten beim Baidtransport vom 24. Juni 1979 bis zum 8. August 1979 eine Lücke auf. Für die Beantwortung meiner Fragen ist dieser Zeitraum jedoch nicht von Bedeutung.

3.2. Resultate

Die wichtigsten Daten sind in der Tabelle V zusammengefasst. Die Lufttemperaturen vom Munt Chavagl (2400 m ü. M.) stimmen mit denjenigen der Klimastation Bernina-Hospiz gut überein. Diese eignet sich für einen Vergleich mit dem Munt Chavagl besser als die nähergelegene von Biiffalora, da die Höhe von 2258 m ü. M. und die Passage von Bernina-Hospiz den Verhältnissen auf dem Munt Chavagl eher entsprechen als die Tal-lage von Biiffalora. Die Zuverlässigkeit meiner Daten konnte durch diesen Vergleich bestätigt werden. Der allgemeine Witterungsablauf stimmt mit demjenigen überein, den GENSLER 1980 für das Gebiet des Nationalparks im Jalesberiecht der Wissenschaftlichen Nationalpark-Konimissioii aufzeichnete:

«Der Spätherbst 1978 (Oktober und November) war bis zum 25. Noveuiber durch ein aussergewöhnlich schönes und sehr mildes Wetter gekeiinzeichnet. Scharfe Kaltluftein-

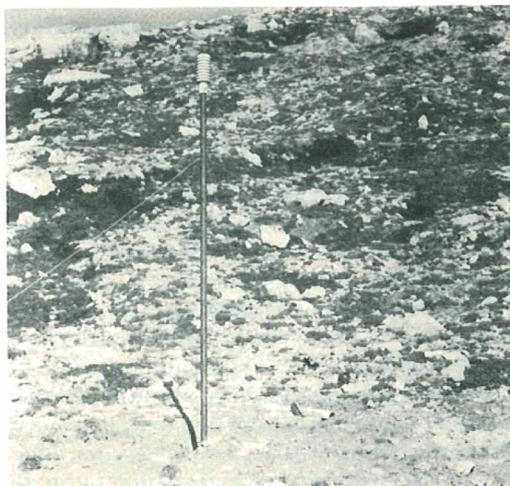


Abb. 26 Von der ganzen Temperaturmessanlage am Munt Chavagl sind nur die Stange mit dem Fühler in 150 cm Höhe und der Strahlungsschutz für den Fühler 2 cm über der Erdoberfläche sichtbar. Das Registriergerät ist etwa 10 m weiter weg vergraben.

registrierapparatur ist durch
den- und Lufttemperatur.

en im Boden. Wie die
n Kabeln kein Wasser
ern verfälschen könnte.
in Betrieb gesetzt. Für
er 1979 verwendet wer-
Bandtransport vom 24.
wortung meiner Fragen

Die Lufttemperaturen
Klimastation Bernina-
n Munt Chavagl besser
l. und die Passlage von
entsprechen als die Tal-
durch diesen Vergleich
emjenigen überein, den
sicht der Wissenschaft-

5. November durch ein
t. Scharfe Kaltluftein-

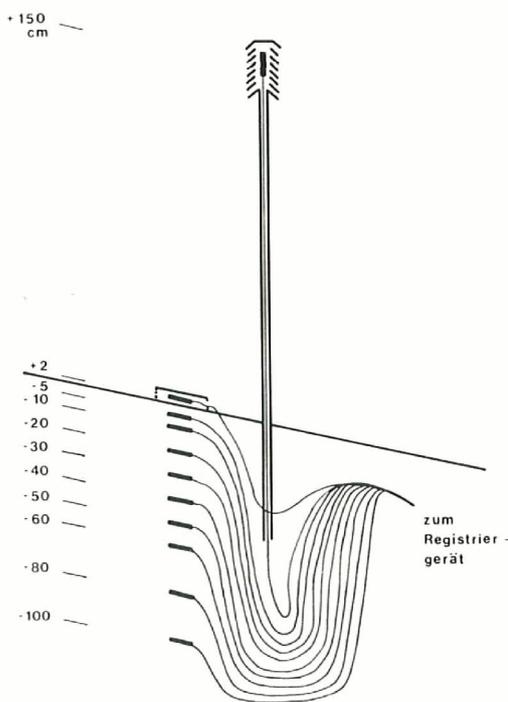


Abb. 27 Lage der Temperaturmessfühler auf einem Erdstrom am Munt Cliavagl.

brüche traten jedoch anfangs und Mitte Oktober sowie Ende November auf. Am 26. November schneite es **in Buffalora** ein.

Der Winter 78/79 (Dezember bis Februar) begann mit einem noch etwas zu milden und zu trockenen Dezember bei knapp normaler Besonnung. Der Januar führte sich mit strengster Kälte ein: mit -19 auf 1300 m, -28 auf 2700 und -34 auf 3300 m **wurde** bei steifen Nordwinden ein nur selten vorkommendes **Winterminimum** erreicht, dennoch blieb der Januar als einziger **Wintermonat** zu kalt. Schnee fiel erst gegen **Ende** Januar reichlich, wodurch erstmals am 27. Januar die Dicke der Schneedecke in Buffalora 50 cm **überschritt** und 100 cm erreichte. Der Februar wechselte zu mildem Wetter über bei knapp normalen Niederschlägen und **Sonnenstunden**.

Der Frühling 79 (März bis Mai) begann **mit** einem zwar etwas zu milden, aber **sehr** trüben und **schneereichen** März. Die Schneehöhe lag in der zweiten Monatshälfte in **Buffalora** zwischen 110 und 130 cm (**Wintermaximum**). **Im** April fielen **wohl** nur gegen das Monatsende nennenswerte Schneefälle, doch wurde er **merklich** zu kalt und zu trüb. Als Folge **hievon** lag beim Monatswechsel **zum** Mai noch 90–95 cm Schnee in Buffalora! **Ein** ungewohnt **ausgeprägter** Wärmeanstieg in der zweiten Maiwoche bewirkte, dass dort am **20. Mai** die **Winterschneedecke** verschwand (ihre totale Dauer: 176 Tage).

Der Sommer 79 (Juni bis August) begann im Juni mit zwei langen **sommerlich** warmen Abschnitten, unterbrochen durch eine markante **«Schafskälte»** vom 15. bis 19. **Juni**. Die teils gewittrigen Niederschlägelagen etwas über der **Norm**, die Besonnung entsprach dem Mittel. Trotz eines geringen **Wärmedefizits** vermochte der **Juli** dank leicht defizitären Niederschlages und normaler Besonnung zu befriedigen, da scharfe Kälterückfälle mit Ausnahme des Monatsanfanges ausblieben. Der August übernahm diesen annehmbaren Witterungscharakter. Zwei **Kaltluftvorstöße** auf den 16. und **24. August** verursachten allerdings einen Temperaturfall bis zu 10 Grad und überdurchschnittliche Regenmengen, wobei etwas Schnee bis auf 1900 m fiel. Am 29. Juli und 15. August wurde mit $+28$ in 1300 m und $+21$ in 2000 m das **Wärmemaximum** dieses Sommers erreicht.

Der Frühherbst 79 (September und Oktober) war bis zum 20. September spätsommerlich warm und sonnig. Am 22. September leiteten ergiebige Schneefälle zum Herbst **über**. Der Oktober wurde zwar noch etwas zu mild, aber deutlich zu nass und zu trüb.» (**GENSLER** 1980).

Auf dem Munt Chavagl schneite es auch am **25. November** 1978 ein, die Winter-Schneedecke war aber an der **Messstelle** bis zum **30. Mai** 1979 vorhanden. Sie lag also während 186 Tagen.

Die **Isothermendarstellungen** (Abb. 28 und 29) veranschaulichen den Jahresgang der Bodentemperaturen. Diese **Grafiken** wurden mit den Tagesmitteln der Temperaturen konstruiert. Sie zeigen also nicht die **Tagesschwankungen**, 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 Schneeschmelzwasser zugeführt wird, kann eine solche Verunreinigung mit ziemlicher Sicherheit ausgeschlossen werden. Eine Bestätigung dafür, dass der Boden bei 0°C gefriert, ergab sich bei der Vermessung am 22. November 1978. Damals war der Boden auf dem **Messfeld** und bei der Temperaturmessanlage gefroren. Die ursprünglich 10 cm tief **im** Boden verankerten **Bewegungsmessmarken konnten** nicht **bewegt** werden. An diesem Tag lag die 0°-Isotherme in 40 cm Tiefe. Die darüber liegenden Messfühler zeigten Temperaturen von $-0,2^{\circ}\text{C}$ an.

Im Mai und Juni 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.

Am 10. November 1978 begann der Boden vorerst 5 cm tief zu gefrieren, am 25. Dezember waren dann auch in 100 cm Tiefe negative Temperaturen zu messen. Im folgenden Frühjahr, während der Schneeschmelze, taute die oberste Schicht des Bodens am **30. Mai** 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 2 Tagen vollständig auf. Während beinahe 20 Tagen herrschten also Verhältnisse **wie** in einem **Auftauboden über** Permafrost. Abbildung 23 zeigt das Messfeld Munt Chavagl am 20. Juni 1979. Erst kleine Partien des Hangs sind schneefrei, unter anderem die Umgebung der Temperaturmessanlage (am rechten **Bildrand**) und die Kegelreihen 2, 3, 8, 9 und 10. Während der Schneeschmelze steht somit viel Wasser zur Verfügung, und der Unterboden ist noch gefroren: Also ideale Bedingungen für die **Gelifluktion**.

Zusätzlich ist Wasser in den obersten Horizonten des Bodens vorhanden, das beim Gefrieren im Herbst aus tieferen **Bodenschichten** zur Zone des **Gefrierens** gesogen wurde (HARTGE 1978, S. 281 und 282) und dort in Eislinsen gebunden blieb. Diese Wirkung des Bodenfrosts wurde auch von **JÄCKLI** 1957 (S. 34 und 35) beschrieben.

Solche Verhältnisse herrschten auch bei **I Gess** (Berninagebiet) am 11. Juli 1978 (vgl. Kapitel 5.1). Der Hang des Gess war erst stellenweise aper. Bei Grabungen wurde in **zwei Erdströmen in 35–40 cm** Tiefe massive **Bodengefrorenis** vorgefunden mit Eislamellen von bis zu 2 mm Dicke. 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.

Die **Isothermendarstellungen** zeigen auch, **wie** die **Nullgradlinie** im Oktober und November vor dem **endgültigen** Gefrieren mehrmals in den Boden dringt. **Diese** kurzfristigen Bodenfröstofführen durch Frostkriechen und Kammeissolifluktion vor allem zu Bewegungen der obersten Bodenschicht.

Die Tautochronendarstellungen (**Abb. 30**) geben einen Eindruck vom **Tagesverlauf** der Temperatur während der herbstlichen Frostwechselperiode. An den **beiden** Tagen herrschte **wolkenloses** Wetter. Die **bodennahe** Luftschicht kühlt sich nachts stark ab und wird tagsüber kräftig aufgeheizt. Dies überträgt sich auch auf den Boden: Die **Tagesschwankungen** betragen am 15. Oktober 2 cm über der Erdoberfläche **15,3°C**, in **5 cm** Bodentiefe nur noch **10,4°C**, in **20 cm** **5,0°** und in **60 cm** **0,5°**. Das Tagesmaximum, **beziehungsweise** Minimum verzögert sich mit zunehmender Bodentiefe immer stärker. Die Verzögerungszeiten gegenüber dem Tagesmaximum der **bodennahen** Luftschicht betragen **in** 5 cm Tiefe etwa 45 Minuten, in 20 cm 3 Stunden und in 60 cm etwa 13 Stunden. Ab 70 cm Tiefe waren keine Veränderungen mehr festzustellen.

Die **Tagesschwankung** in 150 cm Höhe beträgt **7,2°**, also nur halb so viel wie am Boden. Die **Nullgradgrenze** wird im Boden nicht unterschritten. Ein Frostwechselzyklus findet nur an der Erdoberfläche statt, in **5 cm** Tiefe bereits nicht mehr.

Die zweite Darstellung vom **9. November** 1978 zeigt im wesentlichen den gleichen **Temperaturverlauf**. Da die Abkühlung in **Bodennähe** nun intensiver ist und länger andauert **als** im Oktober, kommt es auch im Boden zu **Frostwechseln**. Dieser gefriert dabei bis in eine Tiefe von 10 cm, taut jedoch im Laufe des Tages wieder auf.

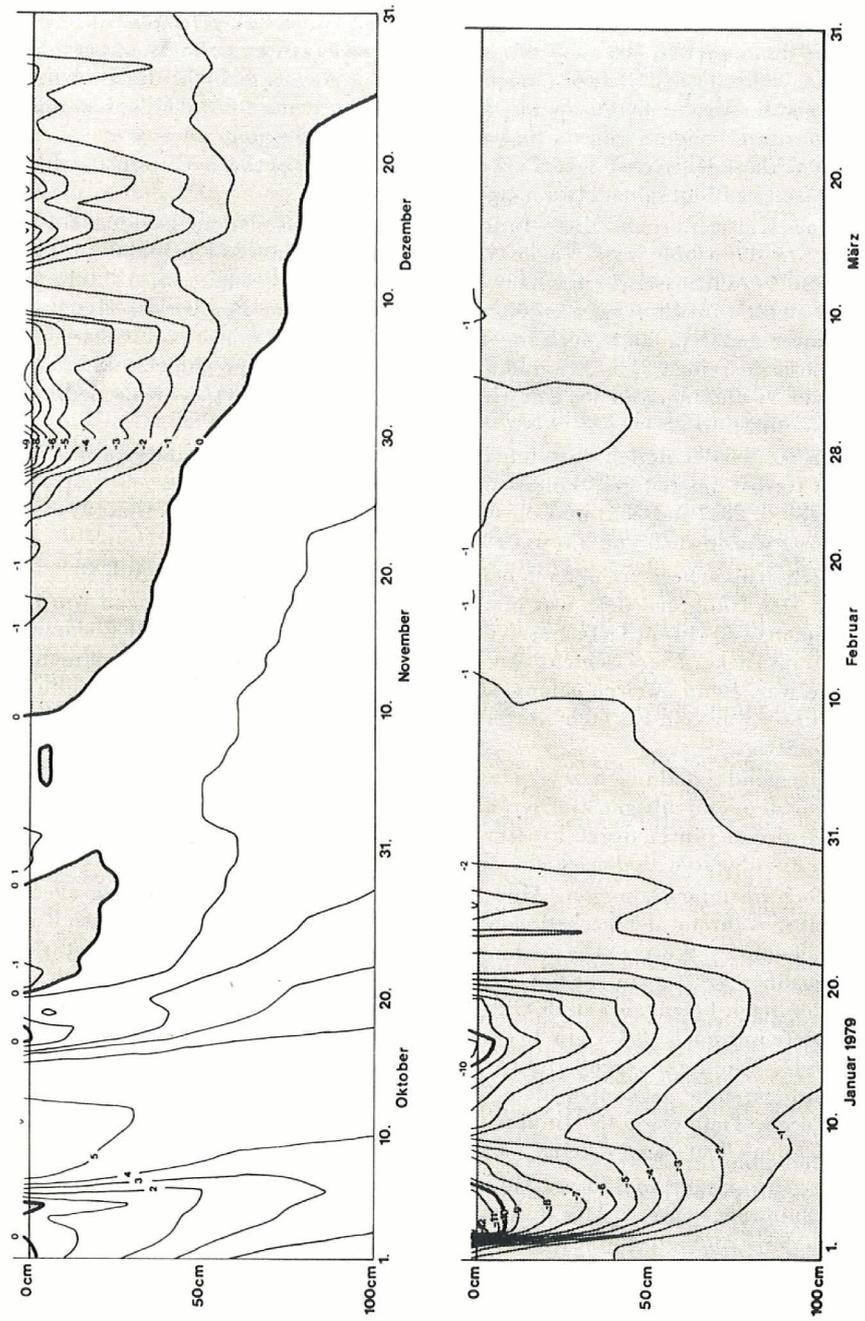


Abb. 23 Isothermendarstellung der Bodentemperaturen am Munt Chavagl (grau = Tagesmittel unter 0° C).

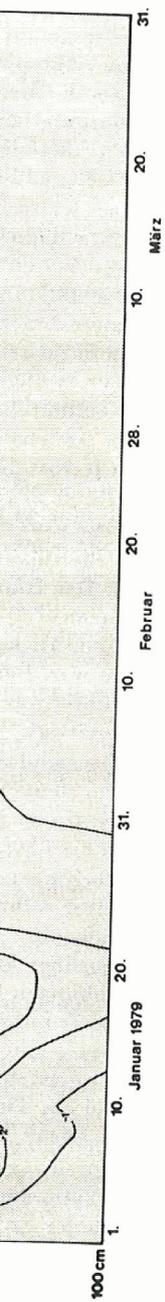


Abb. 28 Isothermendarstellung der Bodentemperaturen am Munt Chavagl (grau = Tagesmittel unter 0°C).

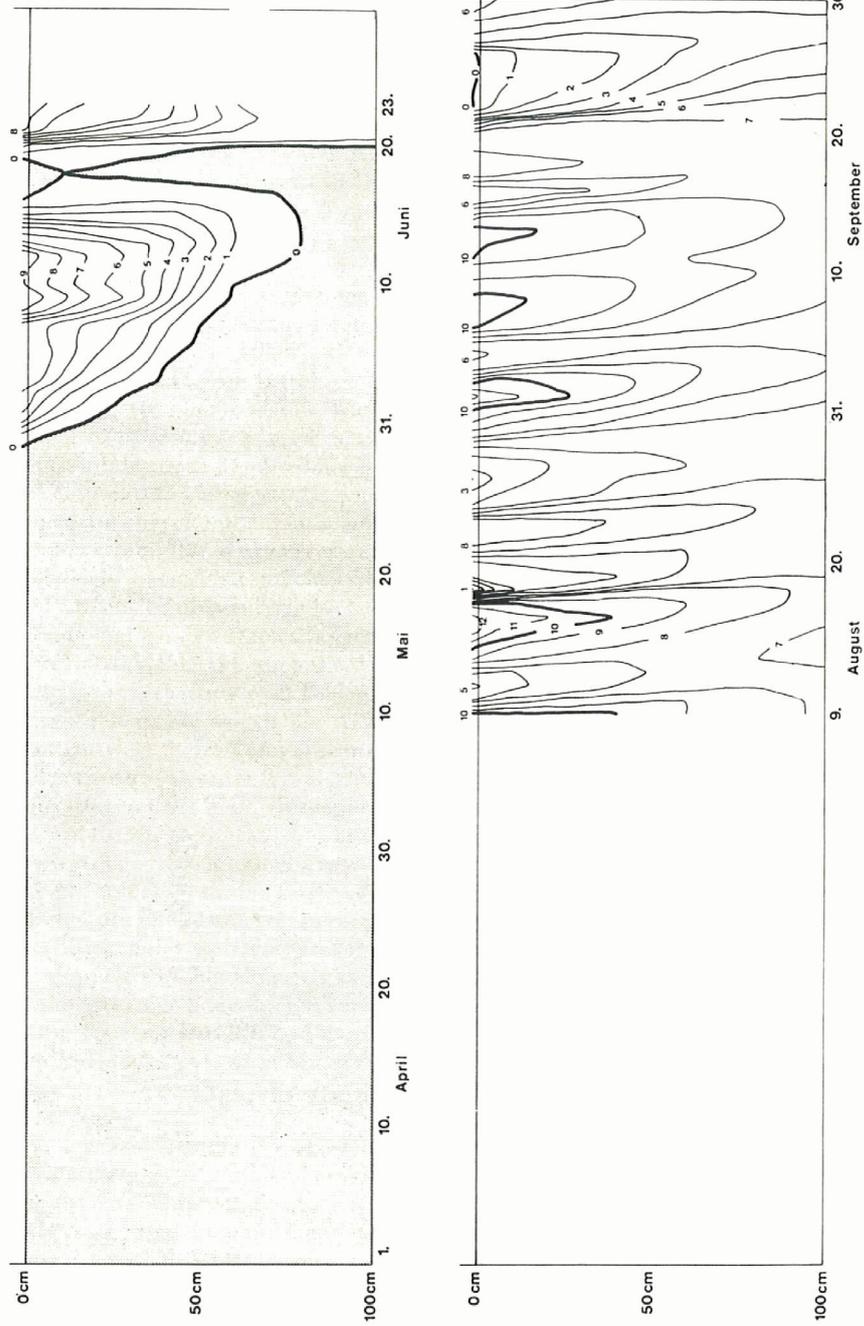


Abb. 29 Isothermendarstellung der Bodentemperaturen am Munt Chavagl (grau = Tagesmittel unter 0°C).

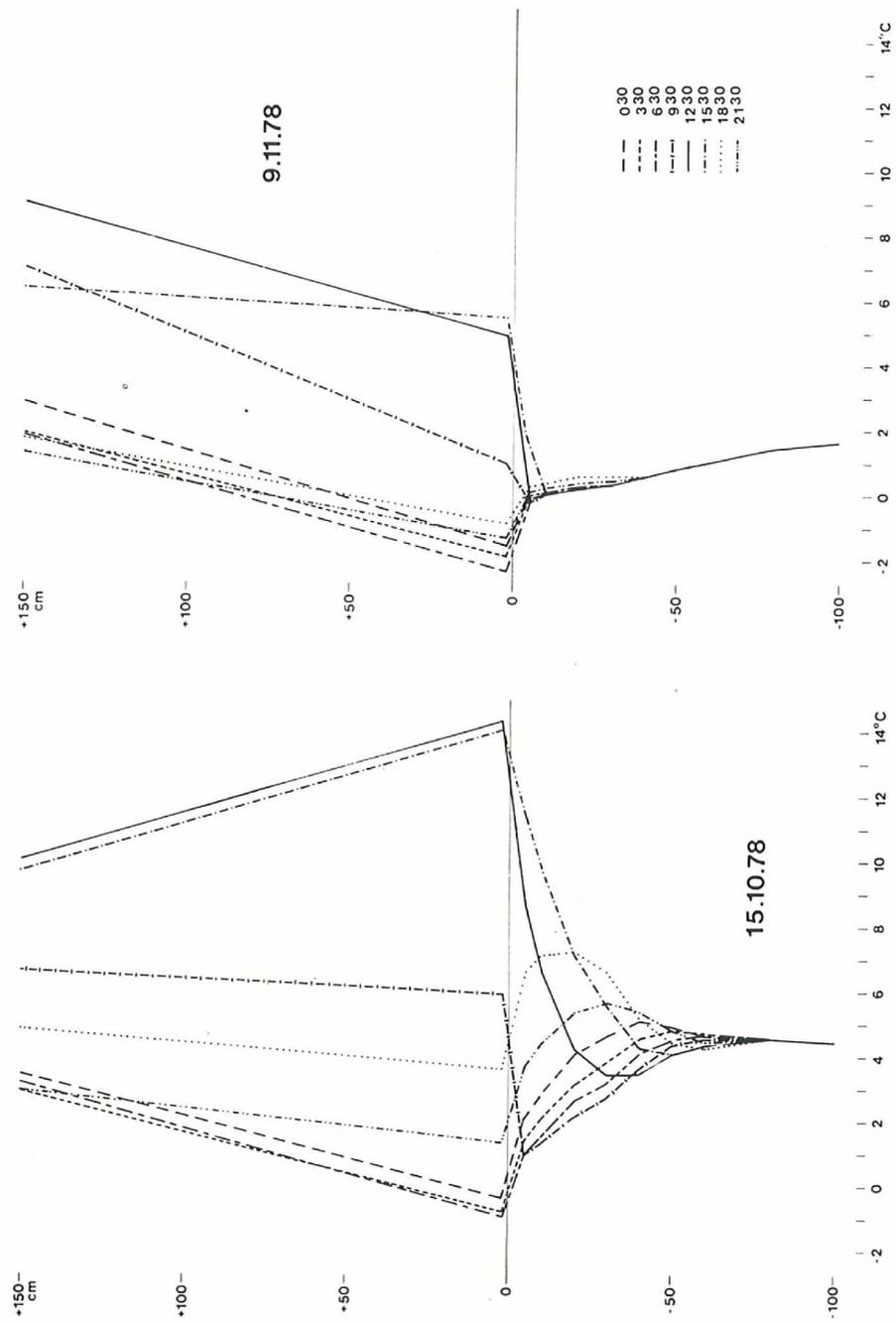


Abb. 30 Tautochronendarstellungen der Boden- und Lufttemperaturen von zwei Tagen im Herbst 1978.

15
lässt
wurd
Verd
bode
werd
D
selbs
Schn
fläch
Gefr
ren p
1979
Verz
weil
Tiefe
dass
dage
D
der
Tem
Extr
Mete
man
bis F
nahe
D
wied
einen
alle
turn
ein M
verw
tritt.
kom
Dars
nahe
näch
meis
gege
wech
Schr
W
schn
Früh
gabe
hand
jahr
den.
desh

150 cm über dem Boden lag das Tagesmaximum höher als an der Erdoberfläche; dies lässt sich dadurch erklären, dass der Höchstwert am Boden nur für kurze Zeit erreicht wurde und zufällig gerade **zwischen** zwei Registrierterminen. **Allerdings** kühlt auch die Verdunstungskälte des zu dieser Jahreszeit erfahrungsgemäss feuchten Bodens die bodennahe Luftschicht zusätzlich ab, sie kann deshalb nicht mehr stark erwärmt werden.

Die **Tagesschwankung** von nur $7,9^{\circ}\text{C}$ an der Erdoberfläche führt auch im Boden selbst zu entsprechend kleineren Ausschlägen. Eine zusätzliche Dämpfung rührt von der Schmelzwärme des **Bodenwassers** her, denn beim Gefrieren muss sie durch die Erdoberfläche abgestrahlt und beim Tauen dem Boden wieder zugeführt werden, bevor der Gefrierpunkt unter- beziehungsweise überschritten werden kann. Die **Bodentemperaturen** pendeln deshalb nur wenig um den Nullpunkt (vgl. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1979, S. 195). Das Temperaturmaximum stellt sich in 10 cm Tiefe auch erst nach einer Verzögerungszeit von 6 Stunden ein (am 15. Oktober dagegen schon nach $1\frac{1}{4}$ Stunden, weil der Boden nicht gefror). Die Tagesschwankungen reichen nur noch bis in 30 cm Tiefe. Der Boden ist im Durchschnitt etwa 3° kälter als am 15. Oktober. Dies bedeutet, dass am **15. Oktober** nur mit **Kammeissolifluktion** zu rechnen war, am **9. November** dagegen zusätzlich auch mit Frostkriechen.

Die **Abbildungen** 31 und 32 zeigen die Monatsmittel sowie die monatlichen Extrema der Temperaturen aller elf Messstellen am Munt Chavagl. Auch hier glätten sich die **Temperaturkurven** mit zunehmender Bodentiefe, sowohl bei den Mittel- als auch bei den Extremwerten. Der Kurvenverlauf zeigt, wie sich der sehr kalte Januar bis in einen Meter Tiefe bemerkbar macht. Ab Februar (mit deutlich höherer Schneebedeckung) manifestiert sich die **winterliche** Temperaturkonstanz, denn die drei Kurven decken sich **bis** Ende Mai **bei** den Darstellungen der Bodentemperaturen und der Werte der **bodennahen** Luftschicht (vgl. auch die Abb. 28 und 29).

Die Frostverhältnisse im Boden und in der Luft sind auf den **Abbildungen** 33 und 34 wiedergegeben. Sie zeigen die Anzahl der Frostwechseltage (= Tage mit mindestens einem Durchgang der Temperatur durch den Nullpunkt), die Eistage (= Tage an denen alle Temperaturen unter 0°C liegen) und die Zahl der frostfreien Tage (= alle **Temperaturmessungen** über 0°C). Besonders interessant sind die Frostwechseltage. Ihre Zahl ist ein Mass für die **Zerkleinerung** und den Abtrag des anstehenden Gesteins durch Frostverwitterung; sie zeigt auch an, wie **häufig** sich Kammeis bildet und Frostkriechen auftritt. Frostwechsel in der Luft (150 cm über Boden) können das ganze Jahr **über** vorkommen; am häufigsten treten sie im Herbst und Frühjahr auf. Ein Vergleich der **beiden** Darstellungen der Lufttemperaturen zeigt: An der Erdoberfläche finden im Herbst beinahe doppelt so viele Frostwechsel statt wie in 150 cm **Höhe**, denn in **Ausstrahlungsnächten** wird der bodennahen Luftschicht Wärme entzogen (GEIGER 1961, S. 14). Die meisten Frostwechsel, die in 150 cm Höhe und gleichzeitig am Boden auftreten, sind dagegen auf advective **Abkühlung** durch kalte Luftmassen zurückzuführen. Die **Frostwechselperiode** im Frühjahr zeigt sich in **Bodennähe** nicht mehr, da zu dieser Zeit noch Schnee lag.

Weil **grosse** Teile des Einzugsgebietes der Erdströme und des Anstehenden **M** Winter schneefrei sind (vgl. **Abb. 4**), bewirken dort die Frostwechselzyklen auch im Winter und Frühjahr Frostsprenzung. Die Untersuchungen von PANCZA 1979 an Juragesteinen ergaben, dass Frostsprenzung nur dann erfolgt, wenn genügend Wasser im Gestein vorhanden ist und die Fröste intensiv sind. Während des Frostwechselmaximums im Frühjahr ist im Einzugsgebiet der Erdströme wegen der Schneeschmelze viel Wasser vorhanden. Das stark zerklüftete und poröse Gestein am Munt Chavagl und Munt Buffalora ist deshalb besonders anfällig für die Frostsprenzung.

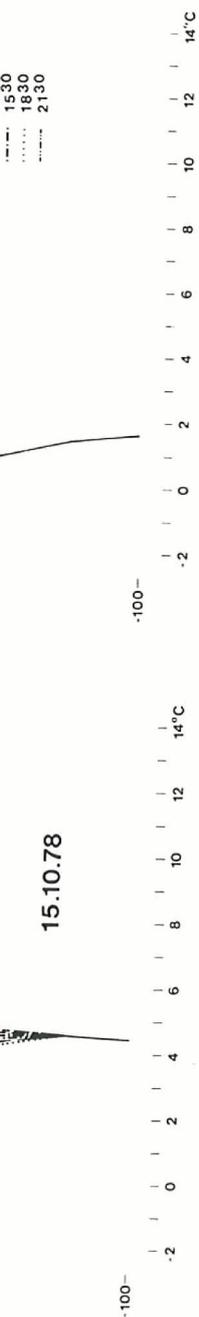


Abb. 30 Tautochronendarstellungen der Boden- und Lufttemperaturen von zwei Tagen im Herbst 1978.

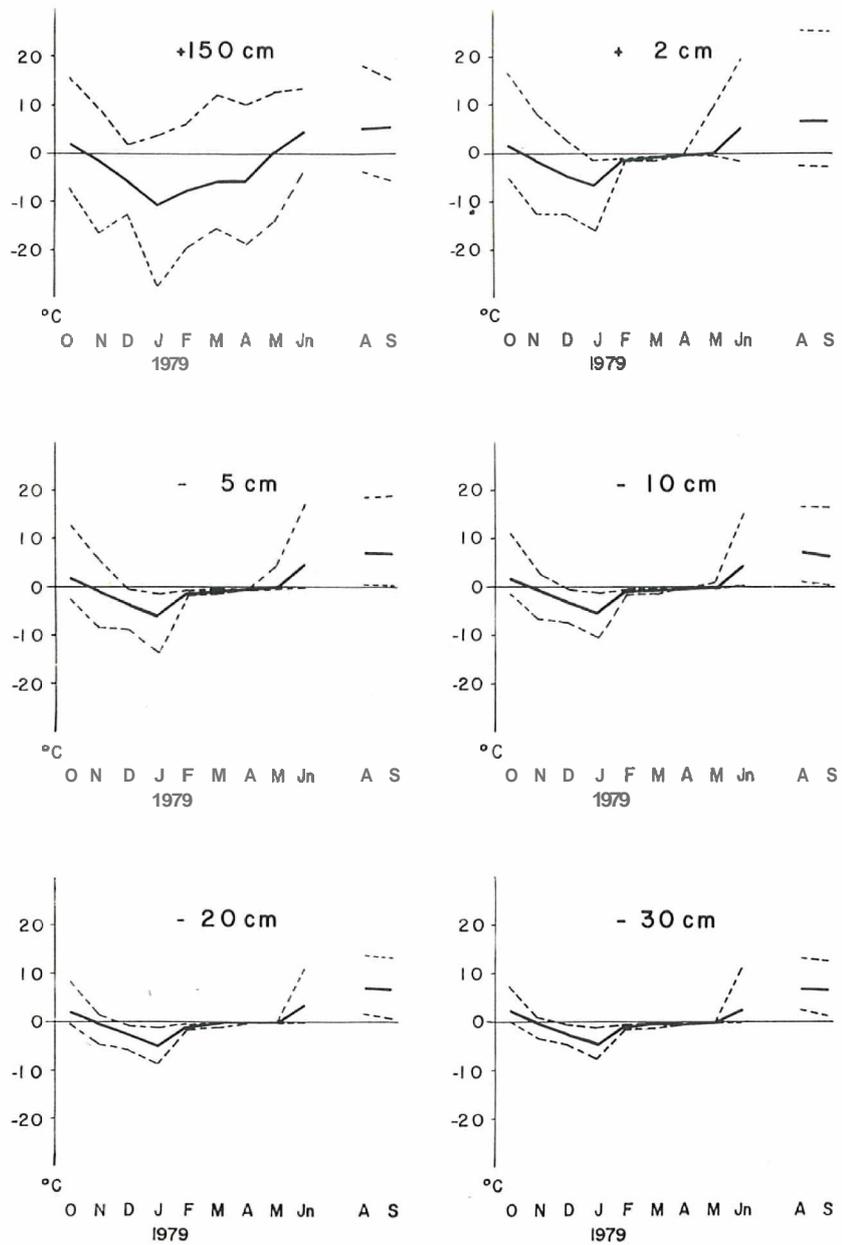
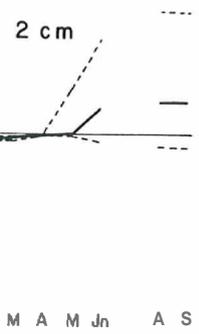
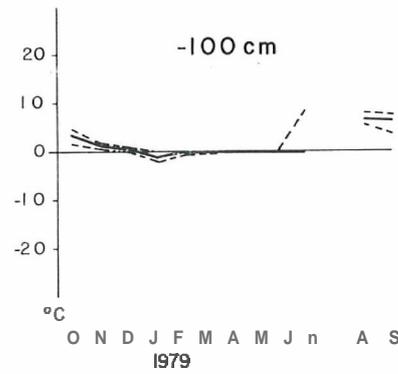
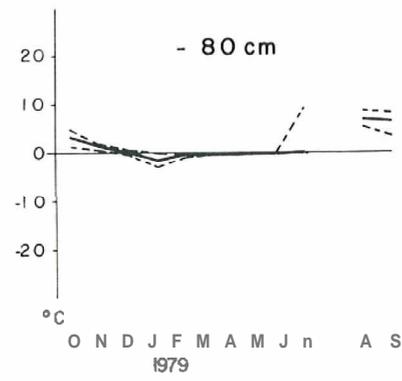
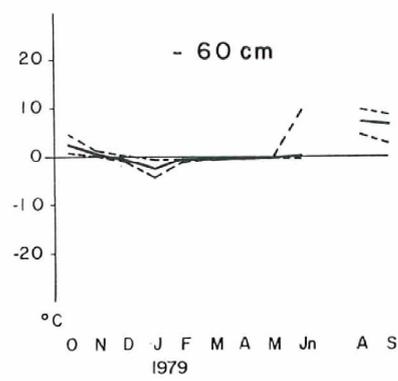
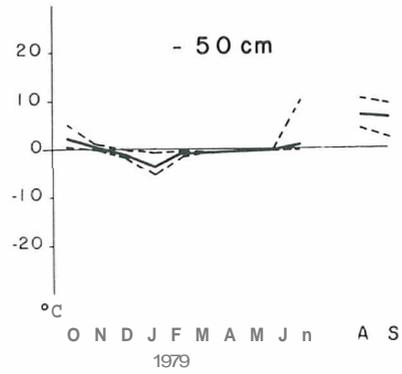
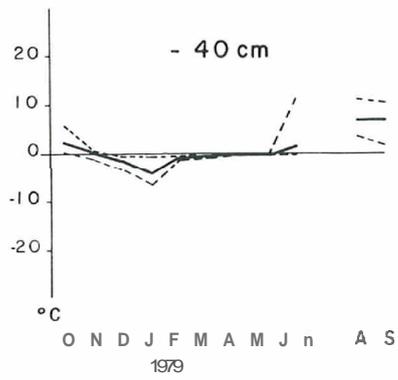


Abb. 31 Monatsmittel und Extrema der Boden- und Lufttemperaturmessungen am Munt Chavagl (Legende s. Abb. 32).



urmessungen am Munt



--- Monatsmaximo
 — Monatsmittel
 - - - Monatsminima

Abb.32 Monatsmittel und Extrema der Boden- und Lufttemperaturmessungen am Munt Chavagl.

Im Boden ist die Zahl der Frostwechseltage deutlich kleiner als in der Luft. Nur etwas mehr als ein Drittel der **Frostwechsel** (vgl. **Tabelle V**, Jahreswerte) machen sich in 5 cm Bodentiefe noch bemerkbar. Auffallend ist, dass die kurzen Fröste im Oktober noch kein Gefrieren des Bodens zur **Folge** haben, sondern erst die intensiveren und länger dauernden im November. Ab 10 cm Tiefe **wirken** sich kurzfristige Fröste im Herbst kaum mehr aus – der jahreszeitliche Wechsel von Gefrieren und Auftauen des **Bodens** dominiert. Die **wenigen** Frostwechseltage im Juni sind die Folge eines Kälteeinbruchs vom 15. bis 19. Juni, **kurz** nachdem der Boden bis in 80 cm Tiefe aufgetaut war.

Die Zahl der Eistage nimmt in **Bodennähe** und in der Erde gegenüber der Luft um etwa einen Drittel zu. In der **bodennahen Luftschicht** gibt es weniger **frostfreie** Tage, im Boden dagegen weniger Frostwechseltage. Die Eistage erreichen in 10 cm Tiefe ein Maximum von 206 Tagen pro Jahr. Bis in einen Meter Tiefe verringert sich ihre Zahl auf

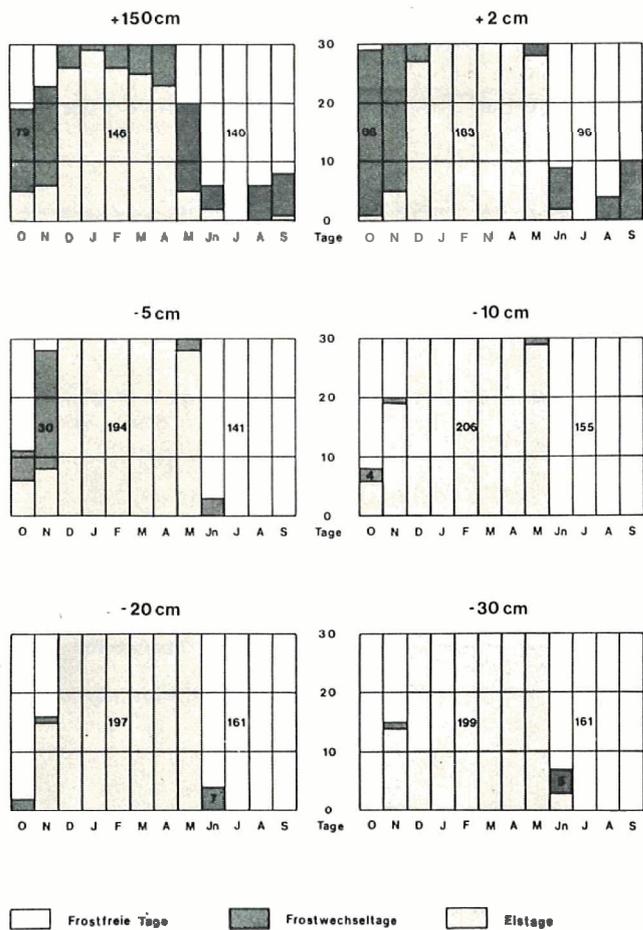
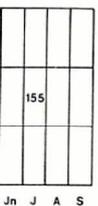
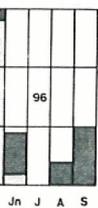


Abb.33 Häufigkeitsverteilung der Eis-, Frostwechsel- und frostfreien Tage (die Jahressummen der entsprechenden Kategorien sind in den Darstellungen eingetragen).

mer als in der Luft. Nur (Werteswerte) machen sich in Fröste im Oktober noch intensiveren und länger istige Fröste im Herbst und Auftauen des Bodens lge eines Kälteeinbruchs fe aufgetaut war. gegenüber der Luft um eniger frostfreie Tage, im hen in 10 cm Tiefe ein ringert sich ihre Zahl auf



ien Tage (die Jahressum- n eingetragen).

168, da der Boden im November und Dezember nur sehr langsam bis in diese Tiefe gefriert. Die Eistage nehmen im Juni von 0 in 5 cm bis auf 20 in 100 cm Tiefe zu, denn der Boden taut von der Erdoberfläche her auf.

Zusammengefasst lassen die Temperaturmessungen am Munt Chavagl die folgenden Auswirkungen auf die solifluidalen Bodenbewegungen erkennen:

- Die Erde gefror im Januar bis in eine Tiefe von zirka 1,5 m (Extrapolation aufgrund des Temperaturminimums von $-2,4^{\circ}\text{C}$ in 1 m Tiefe). Dies kann zu einer Frosthebung des Bodens von etwa 10 cm führen. Für das Messfeld lässt sich daraus ein potentieller Frostkriechbetrag von 2,5 bis 3,5 cm (je nach Hangneigung) errechnen.
- Da es erst Ende November einschneite, konnten die herbstlichen Frostwechselzyklen auch im Boden auftreten und durch Kammeisbildung und Frosthebung solifluidale Bewegungen in den obersten Zentimetern des Bodens auslösen.
- Das Frostwechselmaximum im Frühjahr hatte in den Erdströmen keine Wirkung, da diese noch unter einer mächtigen Schneedecke lagen.
- Die Frostwechsel in der Luft, die auch im Winter und Frühjahr auftraten, führten im

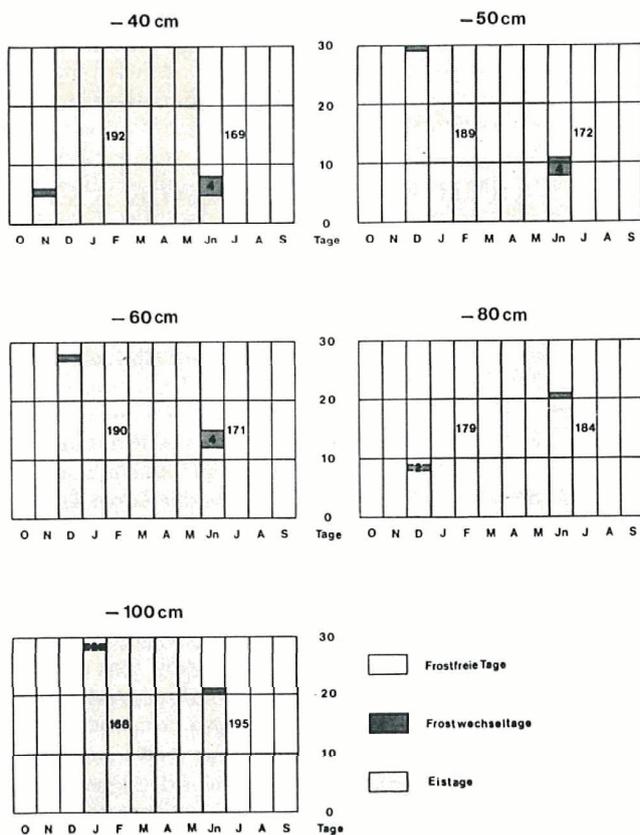


Abb. 34 Häufigkeitsverteilungen der Eis-, Frostwechsel- und frostfreien Tage (die Jahressummen der entsprechenden Kategorien sind in den Darstellungen eingetragen).

- meist schneefreien Einzugsgebiet der Erdströme und im anstehenden Fels zu Verwitterung durch Frostsprengung (sobald genügend Wasser vorhanden war).
- Der Boden taute im Juni während der Schneeschmelze von der **Oberfläche** her auf. **Gelifluktion** war in dieser Zeit möglich, da während drei Wochen der gefrorene Unterboden das Schmelzwasser im **höherliegenden** Schutt staute.
 - Kalte und wenigstens zu Beginn **schneearme** Winter sind für solifluidale Bewegungen - sei es nun **Frostkriechen** oder **Gelifluktion** - von Bedeutung. Dies kann mit Hilfe der **Temperaturwerte** der Klimastation **Bernina-Hospiz** für die Jahre 1975 bis 1979 überprüft werden: In den **Wintern 1975/76 und 1976/77** erreichte die Schneedecke bereits Ende November eine Höhe von einem Meter, **1977/78 und 1978/79** dagegen erst Mitte Januar. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Bewegungsmessungen: Die Jahre **1975/76 und 1976/77** wiesen deutlich geringere **Verschiebungsbeträge** als die **beiden** folgenden Jahre auf. Die Winter (Dezember bis Februar) waren in den Jahren **1976/77, 1977/78 und 1978/79** zudem auf dem **Berninapass** etwas zu kalt mit Werten von $-8,3^{\circ}$, $-7,5^{\circ}$ und $-8,1^{\circ}$, denn das Wintermittel der Jahre 1931-1960 beträgt nur $-7,3^{\circ}$ (**berechnet aufgrund** der korrigierten Werte der Station Bernina-Hospiz; **diese nicht** publizierten Werte wurden mir von J. SUTER und U. SUTER vom Geographischen Institut der Universität **Zürich freundlicherweise zur Verfügung gestellt**). Der Winter **1975/76** war mit $-6,3^{\circ}$ zu warm. Der kalte Winter 1976/77 **konnte** sich aber im Boden nicht **auswirken**, da es ja bereits anfangs November einschneite.

4. GEGENWÄRTIGE SOLIFLUIDALE AKTIVITÄT VON ERDSTROMEN IM NATIONALPARK

FURRER, BACHMANN und FITZE (1971, S.236-247) führten mit Hilfe der Matrixmethode **Bewegungsmessungen** auf Erdströmen am Munt Chavagl durch. Die Messungen in den Jahren 1967-1969 mit Stahlstiften von 5 beziehungsweise 10 cm Länge ergaben: Jährlich wurden die kurzen Stifte am Rand einer Zunge um **4,0 cm** bewegt, in der Mitte dagegen um **7,5 cm**. Die langen Stifte **wurden** am Rand um **3,0 cm** und in der Mitte des Erdstroms um **6,3 cm** verschoben. Es zeichnete sich also ein **«Solifluktionstrich»**, das heisst stärkere Verschiebungen im Zentrum der Zunge als an deren Rändern ab. Aus der **Differenz** der Bewegungsbeträge zwischen kurzen und langen Stiften wurde auf einen Tiefgang der Verschiebungen von 20-35 cm geschlossen. Ein **fAh-Horizont** bestätigte diese Annahme, da er keine Spuren **solifluidaler** Verlagerung aufwies (S.243). Im weiteren wurde festgestellt: **«Die** Fliessbewegungen erfolgen nicht kontinuierlich, sondern ruckweise... Im **Jahresverlauf** der Bewegungen zeichnet sich im Spätsommer eine Phase besonders intensiver Fliessvorgänge ab (S.239). Aus diesem Ergebnis geht hervor, dass Fliessbewegungen nicht nur durch Schmelzwasser, sondern auch durch Sommerniederschläge ausgelöst werden **können**» (S. 246).

Meine Untersuchungen am Munt Chavagl und Munt Buffalora bestätigen diese Resultate weitgehend. Durch bessere Methoden für die Ermittlung von **Bodenbewegungen** und zusätzliche **Luft-** und Bodentemperaturmessungen konnten die Kenntnisse über solifluidale Bewegungen und deren klimatische Voraussetzungen noch erweitert werden:

- Die Messmarken auf den Erdstromrücken ergaben die folgenden jährlichen **Bewegungsbeträge** für die obersten 10 cm des Bodens:

stehenden Fels zu Verwitterung (den war).
 der Oberfläche her auf.
 en der gefrorene Unter-

solifluidale Bewegungen
 utung. Dies kann mit
 für die Jahre 1975 bis
 reichte die Schneedecke
 3 und 1978/79 dagegen
 Bewegungsmessungen
 hiebungsbeträge als die
 ir) waren in den Jahren
 was zu kalt mit Werten
 ihre 1931–1960 beträgt
 ation Bernina-Hospiz;
 d U. SUTER vom Geo-
 ur Verfügung gestellt).
 er 1976/77 konnte sich
 mber einschneite.

AKTIVITÄT LPARK

mit Hilfe der Matrix-
 gl durch. Die Messun-
 gsweise 10 cm Länge
 um 4,0 cm bewegt, in
 um 3,0 cm und in der
 also ein «Soliflukti-
 » als an deren Rändern
 llangen Stiften wurde
 en. Ein fA_1 -Horizont
 erung aufwies (S. 243).
 nicht kontinuierlich,
 t sich im Spätsommer
 diesem Ergebnis geht
 , sondern auch durch

bestätigen diese Re-
 on Bodenbewegungen
 die Kenntnisse über
 och erweitert werden:
 den jährlichen Bewe-

	Munt Buffalora	Munt Chavagl
1975/76	1,9 cm	–
1976/77	2,3 cm	–
1977/78	6,0 cm	6,0 cm
1978/79	4,8 cm	5,8 cm

Aus den vier Messungen resultierte für Buffalora ein Mittel von 3,7 cm/Jahr. Dies liegt nahe beim Durchschnittswert von 4,7 cm/Jahr, den FURRER et al. für die 10 cm langen Stifte gemessen haben.

- Die solifluidale Jahresbewegung setzt sich vor allem aus Frostkriechen und Gelifluktion zusammen. Die maximal möglichen Frostkriechbeträge werden oft nicht erreicht, denn es können rückwärtsgerichtete Bewegungen auftreten, weil sich der Boden nach dem Tauen entgegen der Schwerkraft nicht vertikal, sondern beinahe senkrecht zur Oberfläche setzt.
- Das Bodenfließen erfolgt zur Hauptsache während der Schneeschmelze im Frühsommer (Juni und Juli).
- Die obersten Zentimeter des Bodens werden im Herbst zusätzlich durch Kammeissolifluktion und Frostkriechen transportiert. Die regelmässigen Vermessungen im Juli und September jedes Jahres zeigten, dass im Sommer keine Bewegungen auftraten, oder diese im Bereich des Messfehlers lagen und somit nicht erfasst werden konnten. Meiner Ansicht nach sind Fließbewegungen nach Sommerniederschlägen, wie sie FURRER et al. 1971 beschreiben, nur in Kombination mit Kammeisbildung durch Fröste – die das ganze Jahr über auftreten können – möglich.
- Frostunabhängiges Bodenfließen ist allenfalls im Frühjahr zu erwarten. Es kann dann soviel Schmelzwasser vorhanden sein, dass der Boden sich noch bewegt, wenn der gefrorene Unterboden, der als Wasserstauer bei der Gelifluktion dient, bereits aufgetaut ist. Dieser Anteil der solifluidalen Jahresbewegung kann mit meinen Messungen nicht erfasst werden.
- Die jährlichen Unterschiede des Solifluktionsbetrages 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 Frühjahr werden dadurch Frostkriechen und Gelifluktion reduziert. Ausserdem verhindert eine Schneedecke Bewegungen der obersten Bodenschicht durch Kammeissolifluktion und Frostkriechen während der herbstlichen Regelationsperiode.
- Der Tiefgang der Bewegungen ist linear abhängig vom Ausmass der Verschiebungsbeträge der obersten Zentimeter des Bodens. Am Munt Buffalora ergibt sich für diesen Zusammenhang ein Bestimmtheitsmass von $r^2 = 77\%$. Auf diesen Erdstromrücklagen sind die Verschiebungen bis in eine Tiefe von zirka 30 cm festzustellen.
- Der «Solifluktiionsstrich» ist auf allen Erdströmen vorhanden. Er kann auch in der Tiefe nachgewiesen werden: Die bewegte Bodenschicht ist in der Mitte der Erdströme am mächtigsten, dort sind auch die Verschiebungsbeträge am grössten.
- In den beiden Erdströmen des Messfeldes Buffalora fließen pro Jahr 45 beziehungsweise 27 dm³ Schutt durch einen Querschnitt in der Mitte der Zungen. Konstante klimatische Bedingungen vorausgesetzt, würde dies eine minimale Bildungsdauer von 1500 beziehungsweise 3000 Jahren für diese beiden Erdströme erfordern.
- Eine geschlossene Vegetationsdecke unterhalb oder auf den Erdströmen hemmt die Solifluktion vollständig.
- Stärkere solifluidale Fließbewegungen und die Bildung von neuen Erdströmen sind zu erwarten, wenn nasse und kühle Sommer häufiger auftreten. Diese beeinträchti-

- gen die Entwicklung der Pflanzen und können so zu einer **Auflockerung** oder zum vollständigen **Verschwinden** der Vegetation führen. Die Obergrenze der geschlossenen Vegetation wird absinken. Ausserdem sind kalte und wenigstens zu **Beginn** schneearme Winter für aktivere Solifluktion erforderlich: Der Boden gefriert im Herbst tiefer, das Frostkriechen und die Gelifluktion werden dadurch verstärkt. Auch die Pflanzen werden durch eine geringe Schneebedeckung im Winter stärker in Mitleidenschaft gezogen, da sie vor tiefen Temperaturen nicht mehr geschützt sind.
- Im **Engadin** und im Gebiet des Nationalparks kommen kalte und nasse Sommerwochen bei übernormaler Nordlagenhäufigkeit vor (GENSLER 1978, S.96). Eine Verstärkung der **Solifluktion** im Engadin und im Nationalpark ist deshalb bei einem häufigeren Eintreten von Nordwest- und Nordlagen zu erwarten; allgemein also bei einer Klimaverschlechterung.
 - **Abschliessend** kann festgestellt werden, dass sich die Erdströme im Nationalpark heute in einer weitgehend stabilen Phase befinden. Viele sind ganz bewachsen und demzufolge inaktiv, die anderen zeigen Materialverlagerungen nur auf ihren Rücken, die Steilränder bewegen sich nicht.

5. BODENKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN VON ERDSTRÖMEN IM BERNINAGEBIET

Die Untersuchung von Erdströmen am Westhang des Gess, der anorganischen Sedimente und des Torfs im Plan da li Cüni sollen vor allem mit ^{14}C -Datierungen fossiler Böden weitere Anhaltspunkte zum **solifluidalen** Geschehen im Postglazial ergeben. In den Schweizer Alpen wurde dieser Fragenkomplex von FURRER 1954 erstmals aufgegriffen und später in weiteren Arbeiten ausführlich behandelt (FURRER et al. 1971 und 1975, FURRER 1972 und 1977). Die Resultate dieser Arbeiten veranlassten RÖTHLISBERGER 1976 und SCHNEEBELI 1976 in ihren gletschergeschichtlichen **Arbeiten** über die Walliser Alpen und BEELER 1977 in seiner Arbeit über die Gletschergeschichte des Spät- und Postglazials im **Berninagebiet** dazu, ebenfalls ^{14}C -**Datierungen** fossiler Böden aus Erdströmen vorzunehmen. Diese Datierungen verglichen sie mit den vorwiegend aus Pollenanalysen und Ergebnissen ihrer glazialmorphologischen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen über **Klimaschwankungen** im Spät- und Postglazial.

FURRER und die oben genannten Autoren kommen **aufgrund** der bisherigen Untersuchungen zur folgenden Interpretation: «Somit zeigt ein vertikaler Schnitt durch die Solifluktionsdecke, beziehungsweise ihre als Erdströme bezeichneten Ausläufer, einen mehrfachen Wechsel zwischen Phasen der Klimaverbesserung, die wir als Zeiten morphologischer Ruhe betrachten und Phasen höherer morphologischer Aktivität, während denen die einst gebildeten Böden durch von oben kommenden jüngeren Solifluktionsschutt überdeckt und fossilisiert wurden.» (FURRER 1977, S.268.)

STEINMANN 1978 gelangt bei ihren vegetationskundlichen und chronostratigraphischen Untersuchungen an **Erdströmen** in den Südtiroler Dolomiten zu ähnlichen **Schlüssen**: «Die Reliefgeschichte wird durch die Ergebnisse stratigraphischer Untersuchungen an **Akkumulationsstandorten** rekonstruiert: Zu Beginn entwickelten sich kräftige Böden, die anschliessend fluvial verlagert wurden. In den Umlagerungsprodukten entstanden stellenweise polygenetische Böden. Es schloss sich ein Abschnitt an, in dem Aktivi-

Auflockerung oder zum
ergrenze der geschlosse-
wenigstens zu Beginn
Der Boden gefriert im
len dadurch verstärkt.
ig im Winter stärker in
it mehr geschützt sind.
te und nasse Sommer-
1978, S.96). Eine Ver-
ist deshalb bei einem
arten; allgemein also bei

röme im Nationalpark
d ganz bewachsen und
nur auf ihren Rücken,

UNGEN GEBIET

er anorganischen Sedi-
C-Datierungen fossiler
Postglazial ergeben. In
1954 erstmals aufgegrif-
ER et al. 1971 und 1975.
assten RÖTHLISBERGER
eiten über die Walliser
chichte des Spät- und
fossiler Böden aus Erd-
den vorwiegend aus
ntersuchungen gewon-
stglazial.

der bisherigen Unter-
aler Schnitt durch die
eten Ausläufer, einen
ie wir als Zeiten mor-
mer Aktivität, während
üngerer Soliflukti-
ns-

nd chronostratigraphi-
n zu ähnlichen Schlüs-
scher Untersuchungen
elten sich kräftige Bö-
gsprodukten entstan-
mitt an, in dem Aktivi-

tätsphasen mit dominierend solifluidaler **Geomorphodynamik** und **Stabilitätsphasen** mit Humusbodenentwicklung einander mehrmals ablösen» (S.72). Sie relativiert allerdings die klimatische Steuerung dieser Prozesse: «Es wird noch einer ganzen Reihe von Einzeluntersuchungen zur Geschichte holozäner Klimaschwankungen bedürfen, bevor ein grossräumig gültiges Konzept entwickelt werden kann, und bevor schlüssig erwiesen ist, ob auch geomorphodynamische Aktivität und Stabilität in der periglazialen Höhenstufe als Indikatoren für vorzeitliche Klimaschwankungen gewertet werden können» (S.58). Diese Einschränkung begründet **STEINMANN** vor **allem** mit Schwierigkeiten bei der Interpretation ihrer 1%-Daten von Huminsäurepräparaten aus **Mineralböden** (S.49 ff.).

5.1. Untersuchungsgebiet I Gess – Plan da li Cüni

Die Erdströme am Gess liegen auf 2300–2350 m ü. M. und somit etwa 50 m tiefer als die am Munt Chavagl und Munt Buffalora untersuchten Beispiele. Das anstehende Gestein ist hauptsächlich triadische **Rauhwaacke** (Raiblerschichten nach der geologischen Karte von **STAUB 1946**), im Nationalpark dagegen finden sich vorwiegend Dolomit, Zellendolomit und untergeordnet **Rauhwaacke**. Wie **ZUBER 1968 (S.130)** zeigen konnte, ist die Bodentextur dolomitischer Böden feinsandig, **Rauhwaacken** dagegen bilden eher schluffhaltige **Bodenarten**. Die Unterschiede sind jedoch nicht sehr deutlich. Beide

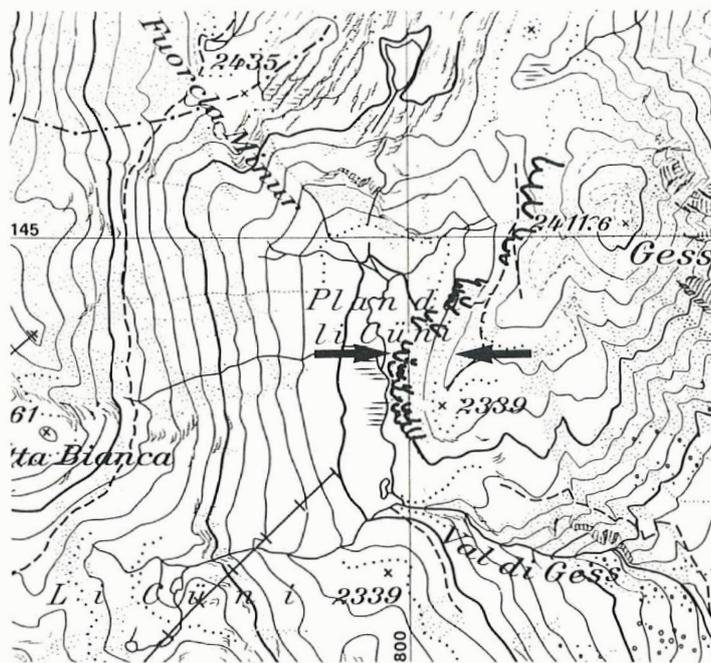


Abb. 35 Untersuchungsgebiet I Gess (2 km nordöstlich der Berninapasshöhe): Eingetragen sind die Erdströme und das detailliert untersuchte Gebiet (vgl. Abb. 37). Massstab 1:13 500. «Reproduziert mit **Bewilligung** der Eidg. Landestopographie vom 12. Juni 1980.n

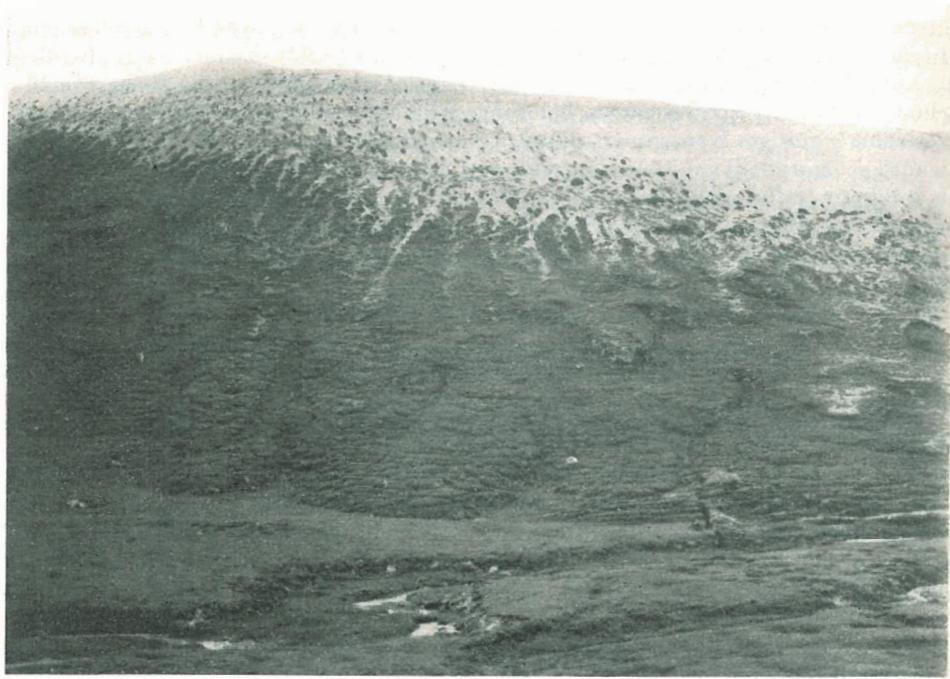


Abb. 36 Die stark bewachsenen Erdströme am Westhang des Gess. In der rechten Bildhälfte ist der Graben 2 zu erkennen. Im Vordergrund liegt die Ebene (Plan da li Cüni), in die der Bach etwas eingeschnitten ist.

Bodenarten sind nach RUCKLI 1950 als frostempfindlich zu bezeichnen (unregelmässige Bodenart, Feinmaterialanteil von mehr als 22 % < 75 μ).

Die Vegetation am Gess ist ähnlich wie am Munt Chavagl. Die Ebene des Plan da li Cüni dagegen wird teilweise von einem Moor eingenommen. Im Gegensatz zum Nationalpark wird das Gebiet heute noch beweidet. Die Vegetation, insbesondere die empfindlichere am Hang des Gess, wird dadurch beeinträchtigt. Ebenso leidet auch die Entwicklung der solifluidalen Kleinformen, es finden sich nur wenige Girlanden, dafür ausgeprägte Viehtrittpfade. Die Erdströme am Hangfuss sind vollständig bewachsen, erst etwa 20 Höhenmeter über der Ebene beginnt die Auflösung der geschlossenen Vegetationsdecke. Die Erdströme zeigen ab hier die charakteristische Gliederung der Vegetation, mit stark bewachsenen Steilrändern und lückenhafter Vegetation auf den Rücken.

5.2. Form und Aufbau von Erdströmen bei I Gess

Zur Untersuchung des Aufbaus der Solifluktsdecken am Gess wurden mehrere Gräben ausgehoben (Abb. 37). Dabei wurde versucht, ein möglichst durchgehendes Profil von der Ebene bis zur Krete zu erfassen. Von besonderem Interesse war der Verlauf der fossilen, verschütteten Böden in den Erdströmen und das Ineinandergreifen von Solifluktschutt und Schwemmsedimenten. Die Abbildungen 38 und 39 sowie 41 und 42

zeigen den Verlauf der fossilen Böden in den Erdströmen sowie die **Wechselagerung** von Torf und **Schwemmsedimenten** in der Ebene:

Profil 1 (**Abb.38**): Der Graben ist 3,4 m lang und zeigt den **Übergang** von der Ebene zum Hang. Auffällig ist die **Zweiteilung** des **Profils** in horizontalliegende, feingeschichtete Sedimente in der Ebene und in **Solifluktionsschutt**, der diese Sedimente vom Hang her überdeckt. Etwa 60 cm **unter** der Oberfläche findet sich ein 0,5 bis 1 cm mächtiges, dunkelbraunes, humoses Band. Dieses Band enthält **Holzkohlenreste**. Es handelte sich dabei um Holz von *Pinus*, die **Art** war allerdings wegen des schlechten **Erhaltungszustandes** nicht mehr bestimmbar (mündliche Mitteilung von PD Dr. F. **SCHWEINGRUBER**, Eidgenössische **Forschungsanstalt** für das forstliche **Versuchswesen**,



der rechten Bildhälfte ist (Plan da li Cüni), in die der

hnen (**unregelmässige**

Ebene des Plan da li **Gegensatz** zum **Natio-** **esondere** die **empfind-** **leidet** auch die **Ent-** **Girlanden**, dafür **aus-** **ändig** bewachsen, erst **geschlossen** **Vege-** **liederung** der **Vegeta-** **tion** auf den Rücken.

I Gess

Gess wurden mehrere **durchgehendes Profil** **e** war der Verlauf der **ndergreifen** von **Soli-** **d 39** **sowie** 41 und 42

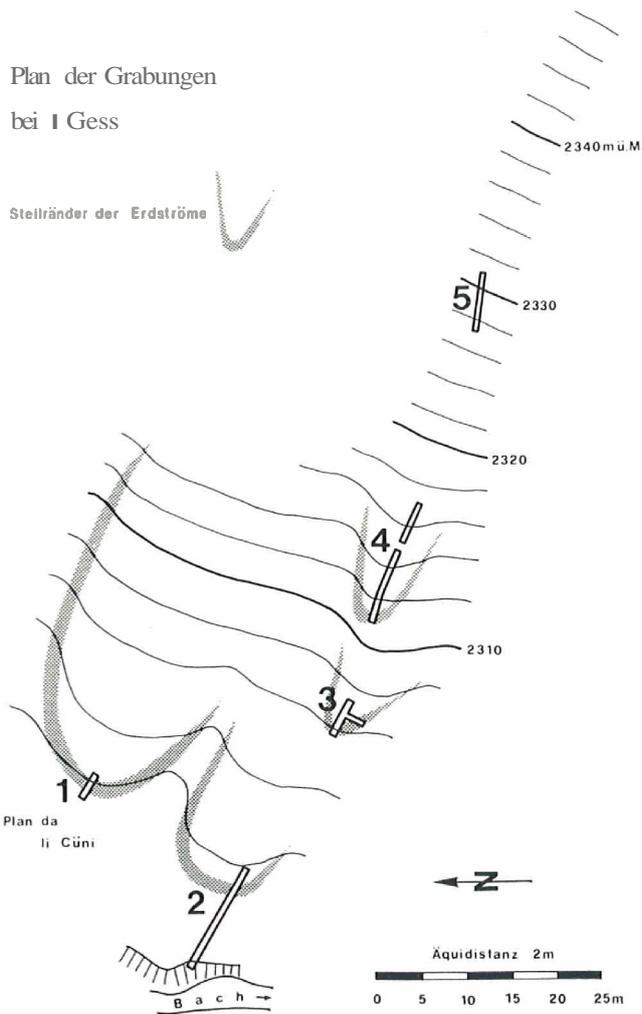


Abb.37 Lage der Grabungen am Westhang des Gess.

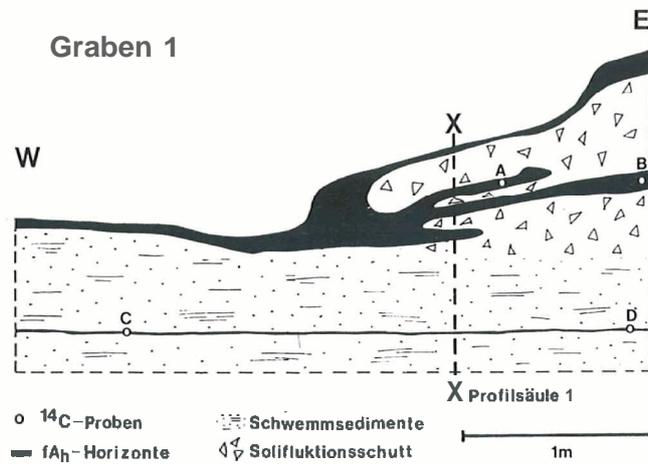


Abb. 38 Profil des Grabens 1.

Birmensdorf). Der Solifluktionsschutt, der auf den Schwemmsedimenten **aufliegt**, ist durch einen braunen, **humosen, 6–10 cm** mächtigen Horizont in **zwei** Teile gegliedert. Wie aus der Abbildung 37 ersichtlich ist, handelt es sich um die Stirne eines 20 Meter breiten und 40 Meter langen Erdstroms.

Profil 2 (Abb. 39): Dieser 13 m lange Graben gibt nochmals einen Einblick in den **Übergang** Schwemmsedimente/Solifluktionsschutt. In der Ebene ist eine **Wechsel-lagerung** von Torf und geschichtetem **Feinmaterial** aufgeschlossen. Darunter liegt Solifluktionsschutt. Dieser konnte **nicht weiter aufgegraben** werden, da trotz **Einsatz** einer Pumpe **zuviel** Wasser eindrang. Die Torflagen keilen gegen den Hang **hin grössten-teils** aus. **Zwei** humose Horizonte in etwa **20 cm** Tiefe und das oberste Torfband in **40 cm** Tiefe ziehen jedoch **durch** den ganzen Graben und tauchen gegen den Hang **hin** unter die **Erdstromstirne** ab. Dieser etwa 11 m breite und 17 m lange Erdstrom ist durch drei humose Horizonte – getrennt durch **Solifluktionsschutt** – gegliedert.

Profil 3 (Abb. 41): Die hier aufgegrabene **Solifluktionsschuttzunge** ist nur durch einen fossilen Boden gegliedert. Dieser Boden zieht an der Stirne **sowie** seitwärts in den heutigen Boden ausserhalb des **Erdstromrandes**.

Profil 4 (Abb. 42): Der 13 m lange Aufschluss zeigt den vertikalen Aufbau eines ebenso langen und etwa 7 m breiten Erdstroms. Die bereits an der Oberfläche **auf-fallende** Unterteilung der Stirne in zwei Stufen widerspiegelt sich auch im **Innern** am Verlauf der **beiden** besonders deutlich ausgeprägten **fossilen Ah-Horizonte**. Der untere **Erdstrom** ist durch mehrere, **allerdings** dünne, fossile Böden gegliedert. Die obere Solifluktionsschuttdecke weist nur an der Stirne **einen** zusätzlichen humosen Horizont auf, der bereits nach **50 cm** **auskeilt**. Die fossilen **Böden** werden im allgemeinen **hangaufwärts** **dünn** und undeutlich. Dieses **langsame** Auslaufen der **Bodenbildung hangaufwärts** lässt sich auch beim rezenten **Boden** neben dem **Erdstrom** feststellen. **Auch** die **Mächtigkeiten** der **Solifluktionsschuttdecken**, die die fossilen Böden überdecken, nehmen **hangaufwärts** ab.

Profil 5: Dieser Graben wurde **geöffnet**, um festzustellen, ob oberhalb der Erdströme, in der **ungegliederten Solifluktionsschuttdecke**, **noch** fossile **Böden** gefunden werden **können**. Da dies bis in eine Tiefe von etwa **80 cm** nicht der Fall war, **wurde** auf eine weitere Untersuchung **dieses** Aufschlusses verzichtet.



...edimenten aufliegt, ist
...a zwei Teile gegliedert.
...e Stirne eines 20 Meter

...einen Einblick in den
...ene ist eine Wechsel-
...n. Darunter liegt Soli-
...len, da trotz Einsatz
...len Hang hin grössten-
...oberste Torfband in 40
...gen den Hang hin unter
...rdstrom ist durch drei
...ert.

...t nur durch einen fossi-
...twärts in den heutigen

...rtikalen Aufbau eines
...n der Oberfläche auf-
...ch auch im Innern am
...Horizonte. Der untere
...iedert. Die obere Soli-
...sen Horizont auf, der
...meinen hangaufwärts
...ng hangaufwärts lässt
...uch die Mächtigkeiten
...en hangaufwärts ab.
...erhalb der Erdströme,
...len werden können. Da
...uf eine weitere Unter-

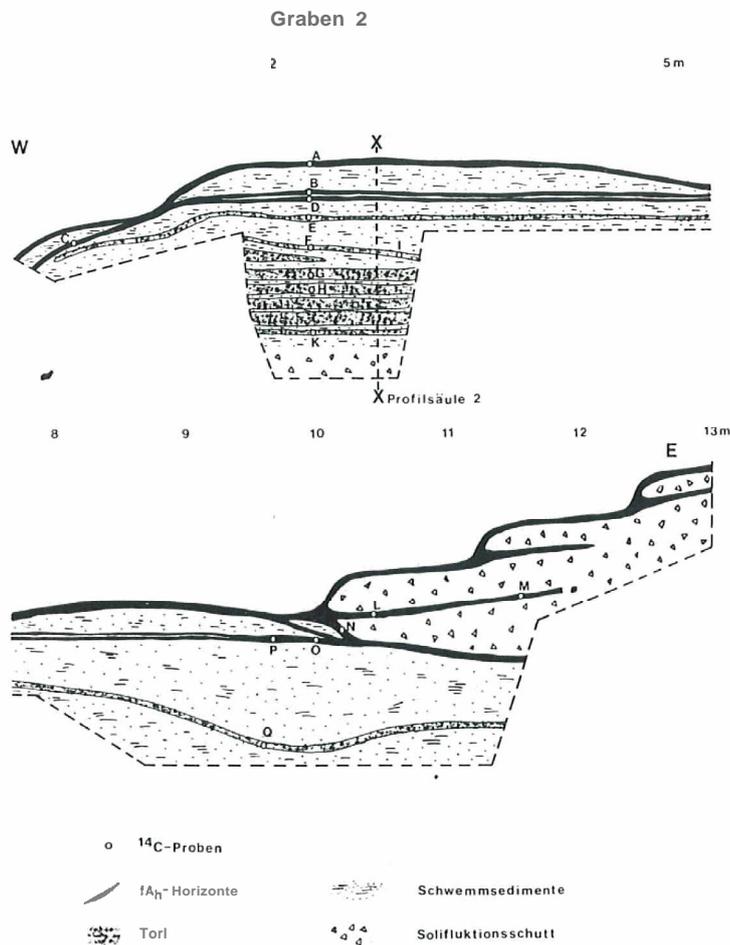


Abb. 39 Zwei Ausschnitte aus dem Profil des Grabens 2.

5.3. Bodenkundliche Untersuchungen

5.3.1. Methoden

FURRER et al. 1971 (S.203) schreiben zum vertikalen Aufbau der Erdströme am Munt Chavagl: «... dass die Fließsedimente aus zwei sich durch verschiedene Merkmale voneinander unterscheidenden Materialien aufgebaut ist: 1. Graue, sandige Masse mit viel Grobmaterial (Skelett). 2. Braune, humose Horizonte mit absinkendem **Karbonat**- und ansteigendem organischem C-Gehalt. Insgesamt prägen sich vier durch ihre braune Färbung sich deutlich abhebende humose Horizonte aus, welche bodenkundlich gesehen als **fA_h**-Horizonte zu betrachten sind, das heisst als fossile humose A-Horizonte. Die dazwischen liegenden grauen Massen von verschiedener Mächtigkeit weisen keine Spur

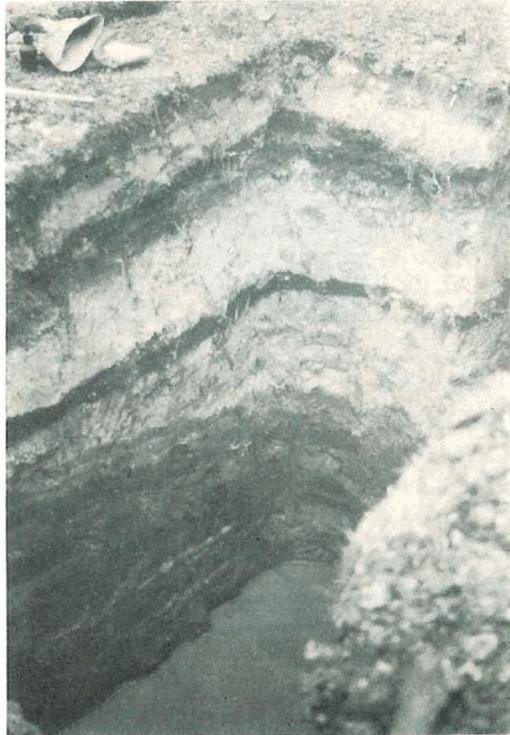


Abb. 40 Graben 2 (Abschnitt von 1,8 bis 3,0 m). Die Proben für die Profilsäule 2 und die ^{14}C -Analysen wurden hier entnommen. In der Bildmitte ist ein durchgehender schwarzer Torfhorizont zu erkennen, darunter liegt eine Wechsellagerung von Torf und Schwemmsedimenten. Darüber sind auch Schwemmsedimente aufgeschlossen, welche durch eine zweigeteilte fossile Bodenbildung gegliedert sind.

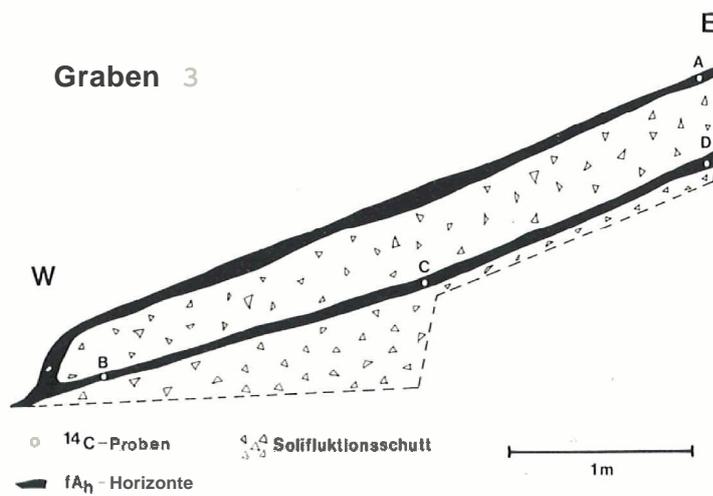


Abb. 41 Profil des Grabens 3.

Graben 4

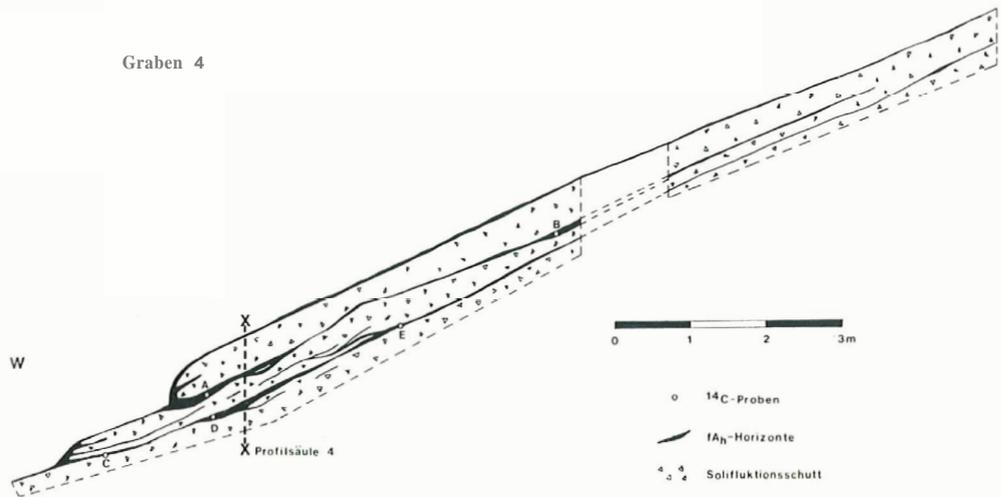


Abb.42 Profil des Grabens 4.

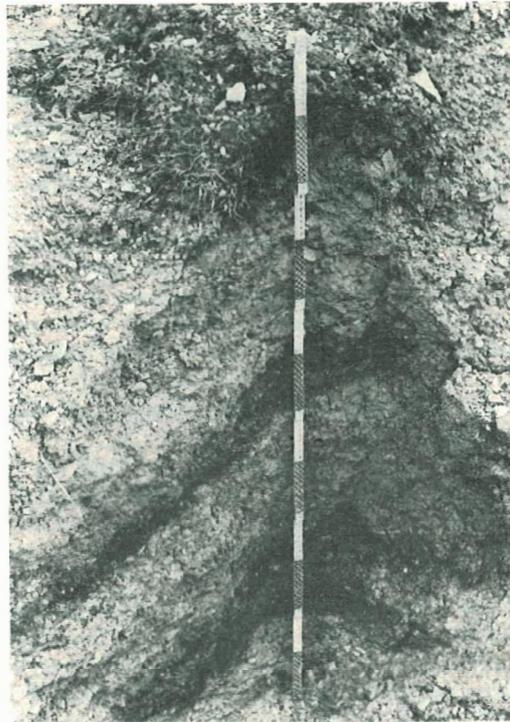


Abb.43 Graben 4 (2 m oberhalb der Stirne des Erdstroms). Deutlich zu erkennen sind die beiden fossilen Böden in 50 und 90 cm Tiefe. Die Proben für die Profilsäule 4 wurden hier entnommen.

Profilsäule 2 und die ¹⁴C-
durchgehender schwarzer
g von Torf und Schwemm-
lossen, welche durch eine



n

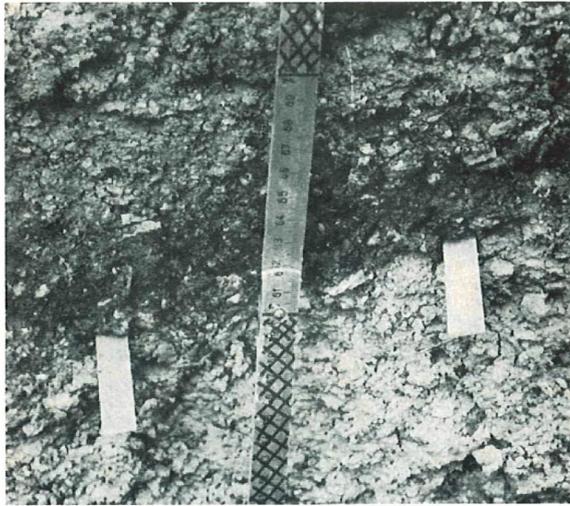


Abb. 44 Graben 4. Ein fossiler Boden in 50 cm Tiefe (1,8 m oberhalb der Erdstromstirne).

von Bodenbildung auf. Sie stellen offensichtlich Ausläufer von höher liegenden zusammenhängenden Solifluktsdecken dar, welche zungenförmig niederreichen. Somit spiegelt sich die oberflächlich festgestellte Gliederung des ausgewählten Abschnittes der Fliesserdedecke in verschiedene Erdstromgenerationen im vertikalen Aufbau wider.» Diesen Befund erhärtet FURRER durch bodenkundliche Untersuchungen von mehreren Profilen. Auch in den Grabungen im Untersuchungsgebiet I Gess ergab sich der gleiche Aufbau der Erdströme.

Um die Datierungen von fossilen Böden in Erdströmen bei I Gess in Beziehung zu setzen zu den ^{14}C -Datierungen und weiteren Untersuchungen an Erdströmen im Nationalpark, wurden 3 Profilsäulen im Untersuchungsgebiet I Gess mit bodenkundlichen Methoden bearbeitet. Einen weiteren Schwerpunkt der Laboruntersuchungen bildete die Trennung des Solifluktschuttes am Hang von den Ablagerungen im Plan da li Cüni.

In den Gräben 1, 2 und 4 wurden Proben entnommen (vgl. Abb. 37) und auf die folgenden Merkmale untersucht:

– *Korngrößen:* Bestimmt wird die Korngrößenverteilung der Feinerde kleiner als 2 mm. Zur Ermittlung der Fraktionen zwischen 2 mm und $63\ \mu$ erfolgt eine Siebung mit Prüfsieben DIN 4188. Die Siebdauer ist einheitlich auf 20 Minuten beschränkt. vor der Siebung wird das organische Material durch Kochen in 3prozentigem H_2O_2 zerstört.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung unter $63\ \mu$ erfolgt mit der Aräometermethode. 20 g des bei 105°C getrockneten Rückstandes der Siebung werden während 6 Minuten in $50\ \text{cm}^3$ 0,2prozentiger Natriumhexametaphosphat-Lösung beschallt. Dazu wurde ein Ultraschall-Desintegrator (Marke «Lehfeldt» 2 D III) mit einer Frequenz von 22 kHz und mit einer Leistung von 135 Watt verwendet.

Die Aräometeranalyse erfolgt in einem Wasserbad von 20°C . Mit Hilfe der Summationskurve lassen sich die prozentualen Anteile der einzelnen Korngrößenfraktionen bestimmen. Es wurden dabei folgende Abgrenzungen vorgenommen:

kleiner als 2 μ	Tonfraktion
2– 6 μ	Feinsilt
6– 20 μ	Mittelsilt
20– 63 μ	Grobsilt
63– 200 μ	Feinsand
200– 630 μ	Mittelsand
630–2000 μ	Grobsand

- **Bestimmung des pH-Wertes:** Die Messung des pH-Wertes wird in 1-nKCl-Lösung mit einer Elektrode vorgenommen.
- **Bestimmung des Gehalts an organischem Kohlenstoff** (aus FURRER et al. 1971, S.206): «Zu diesem Zweck wurde die Methode von WALKLEY und BLACK (siehe JACKSON, 1962) angewandt. Es handelt sich dabei im wesentlichen um einen Oxydationsprozess zwischen organischem Kohlenstoff und Kaliumbichromat ($K_2Cr_2O_7$), wobei die Probe mit H_2SO_4 aufgeschlossen wird. Durch Titration mit «Mohrschem Salz» (Fe-II-Lösung) lässt sich die Menge des nicht für die Oxydation des organischen Kohlenstoffs verbrauchten Bichromats ... bestimmen, die dem Gehalt an organischem Kohlenstoff direkt proportional ist.»

5.3.2. Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse sind in den Abbildungen 45, 46 und 47 dargestellt. Man beachte dazu auch die Profile der Grabungen 1, 2 und 4.

- **Profilsäule 4** (Abb.47): Diese zeigt den charakteristischen Aufbau eines Erdstroms. Die zwei bereits im Gelände erkannten **fA₁-Horizonte** zeichnen sich besonders deutlich im Gehalt an organischem Kohlenstoff ab. Der rezente **A₁-Horizont** enthält 1,2 %, die fossilen **A₁-Horizonte** 2,0 beziehungsweise 2,8 % organischen Kohlenstoff. Auch in den **pH-Werten** zeigen sich die Bodenbildungen durch eine leichte **Versauerung**. Die **Bodenbildungen** zeigen eine Erhöhung des Sandanteils und dementsprechend

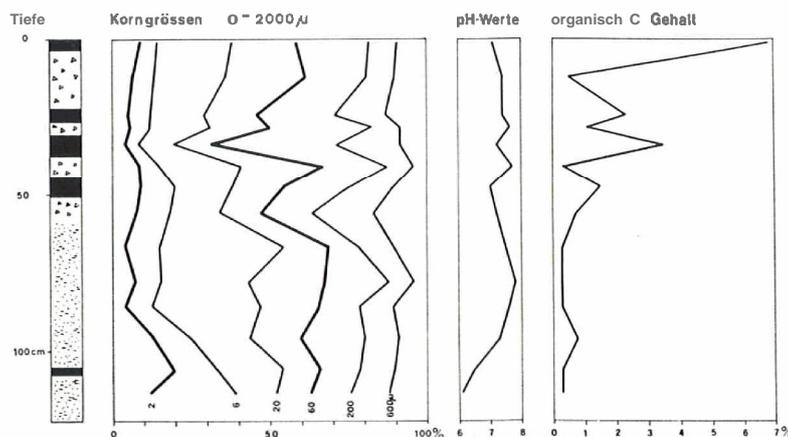


Abb.45 Zusammenstellung der Analyseergebnisse von Profilsäule 1 (Graben 1).

einen etwas geringeren Siltanteil. Dies könnte durch Ausblasung und **Abspülung** des Silts während der morphologischen Ruhephase, in welcher die **Bodenbildung** stattfand, erklärt werden.

Zu den fossilen **Bodenbildungen** schreiben FURRER et al. 1971: «Es ist somit festzuhalten, dass die braunen Humushorizonte... Protorendzinen sind, die sich in situ gebildet haben » (S.210). Diese Interpretation, die FURRER et al. durch **Dünnschliffuntersuchungen** erhärten konnten, ergibt sich auch aus den Untersuchungen am Gess. Ähnliche, meist nur visuelle Befunde finden sich auch in den Untersuchungen von RÖTHLISBERGER 1976, SCHNEEBELI 1976, BEELER 1977 und STEINMANN 1978.

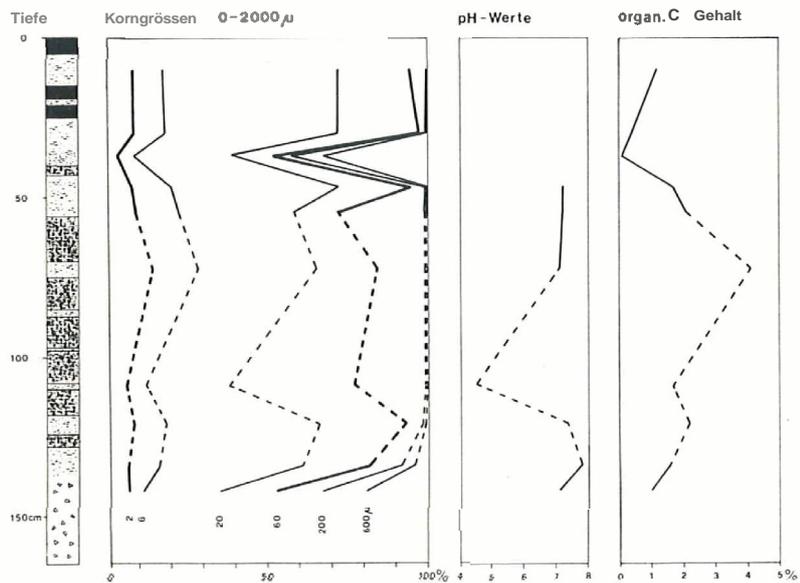


Abb.46 Zusammenstellung der Analyseergebnisse von Profilsäule 2 (Graben 2).

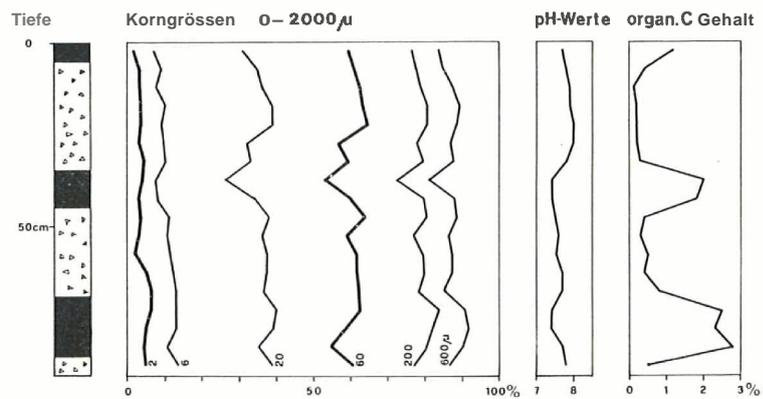
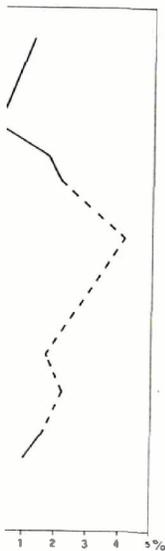


Abb.47 Zusammenstellung der Analyseergebnisse von Profilsäule 4 (Graben 4).

lasung und Abspülung
cher die Bodenbildung

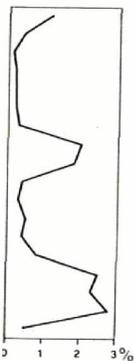
71: «Es ist somit festzu-
1 sind, die sich in situ
al. durch Dünnschliff-
tersuchungen am Gess.
n Untersuchungen von
TEINMANN 1978.

rgan. C Gehalt



ablen 2).

organ. C Gehalt



ablen 4).

- **Profilsäule 1** (Abb.45): In den oberen 60 cm dieses Profils erkennt man erneut eine Wechsellagerung von fossilen Böden und Solifluktionsschutt. Diese zeigt sich beim Gehalt an organischem Kohlenstoff, bei der Zunahme des **Sandanteils** von zirka 30 % bis auf 70 % der **Feinerde** und, weniger ausgeprägt, bei den **pH-Werten**. Der untere Abschnitt der Profilsäule - 50 bis - 120 cm umfasst geschichtete Sedimente. Die Schichtung ist im unteren **Teil** (bis - 90 cm) sehr deutlich. Die Mächtigkeit der einzelnen Sedimentbänder variiert zwischen 1 und 15 Millimetern. Gegen oben im Bereich von - 90 bis - 50 cm ist die Schichtung weniger deutlich und stellenweise sekundär wieder zerstört. Material in grösserer Tiefe als 50 cm besteht beinahe nur aus **Feinerde** (kleiner als 2 mm), **währenddem** im oberen Teil des Profils noch viel **Skelettmaterial** vorhanden ist.

Die Korngrößenverteilung des **Feinmaterials** im untern Teil des Profils zeigt noch keine sehr grosse Differenz von derjenigen des Solifluktionsschuttes im **oberen** Teil der Profilsäule 1 und der Profilsäule 4. Einzig der Anteil der Silt- und **Tonfraktion** zusammen ist mit zirka 70 % **etwas** höher als die Werte aus der Profilsäule 4 (Abb.47). Das Fehlen von Skelettmaterial, die Zunahme des **Ton-** und Siltanteils und **die** beinahe horizontale Schichtung der Sedimente zeigt, dass es sich dabei um fluvial abgelagerte **Feinerde** handelt. Das Material wurde nur über sehr kurze Distanz transportiert, da die Korngrößenverteilung noch sehr gut mit jener der **Feinerde im Solifluktionsmaterial** der Profilsäulen 4 und 1 übereinstimmt.

Die gestörten Schichten im Bereich von - 90 bis - 50 cm deuten auf eine nachträgliche Umlagerung der Sedimente - vielleicht in gefrorenem **Zustand** - beim **Überfließen** des Solifluktionsschuttes hin. Dabei wurde das Material nur in seiner Lagerung gestört und nicht transportiert oder mit Solifluktionsschutt vermischt, denn die Korngrößenverteilung ist identisch mit der des darunterliegenden nicht-gestörten Sediments.

- **Profilsäule 2** (Abb.46): Sie zeigt eine Wechsellagerung von Torf und **siltig/tonigen** Einschwemmungen ohne Skelettmaterial. Nach unten abgeschlossen **wird** das Profil durch skelettreiches, nicht geschichtetes Material, das **von** - 135 bis - 165 cm aufgeschlossen wurde. Die Korngrößenverteilung der **Einschwemmungen** zeigt, dass die **Silt- und Tonfraktionen** mit Anteil von 66 bis 95 % deutlich überwiegen. Die Sedimente sind gut sortiert. In Abbildung 39 sieht man, dass die torfigen Lagen gegen den Hang des Gess hin zum grössten Teil auskeilen und durch die mächtig werdenden Schwemmsedimente ersetzt werden. Das skelettreiche Material unterhalb der **Torfbasis** entspricht in der Korngrößenverteilung dem Solifluktionsschutt. Auch das Auftreten von eckigem Kies und Steinen spricht für diese Interpretation.

Um die fossilen Böden genauer zu erfassen, **wurden** weitere Bestimmungen des Gehalts an organischem Kohlenstoff in den Gräben 1, 3 und 4 durchgeführt. Diese Ergebnisse und jene aus den Profilsäulen 1, 2 und 4 sind hier zusammengefasst:

Solifluktionsschutt (32 Proben):	$\bar{x} = 0,3 \%$ organisch-C
Fossile A_h-Horizonte (26 Proben):	$\bar{x} = 1,8 \%$ organisch-C
Rezente A_h-Horizonte (6 Proben):	$\bar{x} = 5,3 \%$ organisch-C

Der Mittelwert des organisch C-Gehalts von Solifluktionsschutt liegt deutlich unter demjenigen der fossilen Böden. Das Mittel der rezenten **A_h-Horizonte** ist nochmals um einiges höher. Schutt und Bodenbildungen (fossile und rezente) lassen sich also mit Bestimmungen des Gehalts an organischem Kohlenstoff gut voneinander unterscheiden. Ob der durchschnittlich höhere Gehalt in den rezenten **A_h-Horizonten** signifikant

ist, kann wegen der geringen Zahl der Proben von rezenten Böden nicht entschieden werden.

Die vier untersuchten Erdströme am Westhang des Gess zeigen in ihrem vertikalen Aufbau eine **Wechselagerung** von Solifluktionsschutt und fossilen Böden. In einer Zunge können bis zu drei fissile **A_h-Horizonte** übereinander ausgebildet sein. Die deutlich sichtbaren **Bodenhorizonte** sind in den Korngrößenverteilungen, an den pH-Werten und besonders am Gehalt an organischem Kohlenstoff in den **Profilsäulen** zu erkennen.

Am Hangfuss in der Ebene des Plan da li Cüni liegen die untersten Erdstromstirnen auf feinkörnigen **Schwemmsedimenten**. Sie enthalten beinahe kein Skelettmaterial (**größer** als 2 mm) mehr. Diese Ablagerungen sind bereits 10 m weit vom Hang entfernt deutlich sortiert, die Sedimente direkt **unter** den Erdströmen dagegen weisen noch eine ähnliche Verteilung der Feinerdefraktion auf wie der **Solifluktionsschutt** in den Zungen.

5.4. ¹⁴C-Datierungen fossiler Böden

Um die **Wechselagerungen** von Solifluktionsschutt und fossilen **Böden** zeitlich einzuordnen und damit Anhaltspunkte über **Änderungen** der solifluidalen **Bodenbewegungen** während der letzten Jahrtausende zu erhalten, **wurden** einige fossile **A_h-Horizonte** aus Erdströmen und **Torfproben** aus dem Plan da li Cüni mit der **¹⁴C-Methode** (vgl. dazu u. a. GEYH 1971, WILLKOMM 1976) datiert.

Radiocarbonatierungen von Böden mit mehr als 1 % organischem Kohlenstoff sind kein Problem. **Grundsätzlich kann** man den organischen Kohlenstoff **bei** der Aufbereitung des Bodens in zwei Fraktionen **trennen**: Einerseits die **NaOH-löslichen** Anteile, das **heisst** die **Huminsäuren** und **Fulvosäuren**, und andererseits die organische **Restsubstanz**, das heisst Zellulose und **Humine** (= **nicht NaOH-lösliche** Anteile der **Huminstoffe**). **Im ¹⁴C-Labor** des Geographischen Instituts der Universität **Zürich** wird bei allen Proben meistens **nur** die **nicht NaOH-lösliche** organische Restsubstanz datiert. Die **Huminsäuren** **werden** entfernt, da eine Verunreinigung der Proben durch **jüngere** Huminsäuren oft nicht **ausgeschlossen** werden kann.

Bei fossilen Böden, die **durch karbonathaltige** Schichten vom rezenten Boden getrennt **sind**, ist diese Gefahr allerdings klein, da Huminsäuren in Form von Ca-Humaten gebunden **werden** (STEINMANN 1978, S. 51). Die organische Restsubstanz kann **allerdings** auch **Verunreinigungen** aufweisen, vor **allem** durch jüngere **Durchwurzelung**.

Bei **karbonathaltigem Ausgangsgestein** «kann ‚toter‘ Kohlenstoff aus **Kalkgestein** freigesetzt werden, der von den Mikroorganismen des Bodens verwertet oder als **‚badendürftige‘** Kohlensäure über die **höhere** Pflanze dem Boden wieder zugeführt wird.» (LÜDERS et al. 1970, S. 244). **Das Bodendatum** wird dadurch **zu** alt. Diese Kontamination soll jedoch 3 % **nicht** überschreiten (nach GEYH, zitiert in STEINMANN 1978, S. 51) und ist demzufolge für meine maximal 4800 **Radiocarbonjahre** alten Daten unbedeutend.

Welche Fraktion der organischen **Bodensubstanz** nun auch datiert wird, «**die** Radiocarbonmethode kann nur die **Gesamtaktivität** organischen Kohlenstoffs ermitteln, ohne dass sie zu unterscheiden vermag, ob es sich um **±** einheitlich **alten** Kohlenstoff oder um **unterschiedlich grosse** Spannen verschieden alten Kohlenstoffs **handelt**.» (LÜDERS et al. 1970). Die **¹⁴C-Daten** von fossilen Böden = nicht verunreinigte **Proben** vorausgesetzt = entsprechen also **irgendeinem** Zeitpunkt innerhalb der **Bodenbildungsphase**: **Anfang**, **Ende** und **Dauer** sind damit noch nicht bekannt.

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit ^{14}C -Alter von 35 Bodenproben bestimmt. 21 dieser Datierungen wurden mir von Prof. Dr. G. FURRER als Basismaterial für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt, dafür sei an dieser Stelle nochmals gedankt. Die Resultate aller Analysen sind in der Tabelle VI zusammengestellt (siehe Anhang).

Die Entnahmestellen der Proben sind in den Profilen Abb. 38 bis 42 eingetragen.

Graben 1 (vgl. Abb.38): An dieser Stelle des Plan da li Cüni wurde die Schwemmsedimentation (deren Korngrösse entspricht derjenigen des Feinmaterials von Solifluktionsschutt) vor 2345 ± 80 BP (C/1) unterbrochen. Eine Bodenbildung setzte ein. Darin eingeschwemmte Holzkohlestücke von Pinus ergaben ein Alter von 4010 ± 60 BP (D/1), damals muss die Waldgrenze etwa 100 bis 150 m höher gelegen sein als heute. Nach 2350 BP ging die Sedimentation von Feinmaterial weiter. Schliesslich erreichte ein Erdstrom diesen Bereich der Ebene. Die Schichtung der Schwemmsedimente wurde beim Überfließen des Solifluktionsschutts gestört, und das Feinmaterial wurde zum Teil umgelagert. Diese Solifluktionsschicht wurde vor 1220 ± 60 BP (B/1) von Vegetation bedeckt und stabilisiert. Nach 1200 BP wurde auch diese Bodenbildung durch einen Erdstrom verschüttet. Um 730 ± 85 BP (A/1) wurde dessen Stirn nochmals bewachsen. Danach führte wiederum verstärkte Solifluktion zur Bildung der heutigen Oberfläche des Erdstroms. Heute ist er vollständig bewachsen und inaktiv. Die rezente Bodenbildung weist den hohen Gehalt von 6,8 % organischem Kohlenstoff auf.

Graben 2 (vgl. Abb.39): Vor 4250 ± 80 BP (K/2) muss eine Solifluktionsdecke oder ein einzelner Erdstrom bis weit in den Plan da li Cüni geflossen sein. Während dieser Solifluktionsphase wurde wahrscheinlich der Abfluss aus der Ebene in die Val di Gess verschüttet, denn anschliessend setzte auf dem Solifluktionsschutt eine Sedimentation von Torf und Schwemmsedimenten ein. Nahe am heutigen Hangfuss des Gess wurden vorwiegend Silt und Feinsand abgelagert, in 10 m Entfernung jedoch verlief das Torfwachstum ziemlich ungestört. Die Torfbildung endete um 3430 ± 80 BP (F/2)¹. Bis vor 2865 ± 80 BP (Q/2) wurde nur noch Feinmaterial sedimentiert. Danach entstand ein Torfhorizont, der im ganzen Graben 2 deutlich zu erkennen ist (vgl. Abb.40, schwarzes Band im oberen Drittel des Aufschlusses und Abb.39 Profil des Grabens 2). Die schwarze Torflage taucht gegen den Hang hin ab. Vermutlich lag das Bett des Baches, der den Plan da li Cüni entwässert, vor der Bildung des Torfs hier nahe an der Talflanke. Nach 2800 BP wurde diese Rinne von Solifluktionsschutt gefüllt. Am linken Rand des Grabens 2 wurde derselbe Torfhorizont erst nach 2075 ± 50 BP überschüttet².

Das Material über dem Torfhorizont ist bei der Profilsäule 2 (Abb.46) bedeutend weniger gut sortiert als die anorganischen Einschwemmungen im darunterliegenden Torf. Die Korngrössenverteilung über dem Torf ist ähnlich wie die des Feinmaterials von Solifluktionsschutt. Um 2000 BP entstand eine zweifache Bodenbildung, die sich im ganzen Graben 2 nachweisen liess. Sie wurde nach 2000 BP (Proben O/2 und P/2), aber vor 1670 ± 80 BP (M/2) am Hangfuss von einem Erdstrom überfahren. In der

¹ Mindestalter für zwei Unterbrüche der Torfsedimentation durch anorganische Einschwemmungen sollten die Proben G/2 und H/2 ergeben. Die Alter von 2415 ± 80 BP beziehungsweise 2800 ± 80 BP können aber nicht korrekt sein, denn diese Torfsedimentation muss bereits vor 2865 ± 80 BP (Q/2) beendet gewesen sein, da die darüberliegende schwarze Torflage zu diesem Zeitpunkt am Hangfuss verschüttet wurde. Diese Fehldatierungen können durch eine Verwechslung von Proben im Felde oder durch einen Fehler bei der Aufbereitung beziehungsweise Datierung im ^{14}C -Labor entstanden sein.

² Die Probe E/2_I (2175 ± 85 BP) wurde nachdatiert. Dazu wurde der Graben 2 noch einmal geöffnet und neues Material entnommen. Es resultierte ein Alter von 2020 ± 65 BP (E/2_{II}). Aus den beiden Radiocarbonaten lässt sich bei 1% Irrtumswahrscheinlichkeit ein mittleres Alter von 2075 ± 50 für diese Torflage berechnen (GEYH 1971, S. 38/39).

Ebene wurde dieselbe Bodenbildung am linken **Grabenrand** (heutiges Bachbett) nach 1680 ± 75 BP (**C/2**), zwei Meter näher am Hang erst nach 1200 ± 75 BP (**B/2**) von sandigem **Silt** fossilisiert.

Solifluktionsschutt überfloss am Hang nach 1670 ± 80 BP (**M/2**) beziehungsweise 1030 ± 85 BP (**L/2**) den Boden, der auf dem zuvor gebildeten Erdstrom entstanden war. Gleichzeitig **wurde** zum letzten Mal Feinmaterial in der Ebene abgelagert. Die heutige **Bodenbildung** setzte dort spätestens um 820 ± 70 BP (**A/2**) ein.

Am **Hangfuss** wurde die **solifluidale** Akkumulation von Schutt nach 1030 BP noch zweimal kurz unterbrochen. Die **beiden** dazugehörenden fossilen Böden konnten nicht datiert werden, da sie einen zu geringen Gehalt an organischem Kohlenstoff aufwiesen. Die Zunge ist heute vollständig bewachsen und inaktiv.

Graben 3 (vgl. Abb.41): Dieser Erdstrom ist einfach aufgebaut. Ein einziger fossiler Boden, der an der Basis der **Steilränder** unter die Zunge zieht, ist in der Grabung zu erkennen. Nahe an der Stirne weist dieser Horizont ein Alter von 760 ± 75 BP (**B/3**) auf, 2 m weiter hangaufwärts eines von 1800 ± 100 BP (**C/3_I**). Dies erschien mir aufgrund der Datierungen in Graben 4 zu alt. Eine Nachdatierung mit neuem Material ergab denn auch 1100 ± 95 BP (**C/3_{II}**). Eine weitere Datierung etwa 4 m oberhalb der Stirn mit 390 ± 60 BP (**D/3**) ist wahrscheinlich falsch. Ein Fehler im **¹⁴C-Labor** scheint bei der Serie der Datierungen, zu der diese Probe gehörte, zu junge Alter bewirkt zu haben (mündliche Mitteilung von R. ERNE, Geographisches Institut der Universität Zürich (1%-Labor) vom 5. Mai 1980).

In der gleichen Serie wurde der rezente **A_h-Horizont** auf diesem Erdstrom datiert. Dabei interessierte nicht das absolute Alter¹, sondern die Differenz zwischen den Huminsäuren und der organischen Restsubstanz, die getrennt datiert wurden. Beide Fraktionen ergaben Alter mit negativem Vorzeichen (Atombomben-Effekt, WILLKOMM 1976, S. 130 ff.). Die organische Restsubstanz enthält mit -2210 ± 45 BP wesentlich mehr rezenten Kohlenstoff als die Humin- und Fulvosäuren mit einem «Alter» von -435 ± 50 BP (**A/3_{II}**). Dies bedeutet, dass bei der Interpretation von Daten fossiler Böden davon ausgegangen werden kann, dass die Alter der organischen Restsubstanz nicht ein mittleres **Bodenalter** anzeigen wie die der Huminsäuren, sondern eher den Abschluss der Bodenbildung, also die **Überschüttung** mit Solifluktionsschutt. Eine Erklärung für diese Altersdifferenz ist, dass die Huminsäuren die Abbauprodukte von abgestorbenem organischem Material sind, die organische Restsubstanz dagegen besteht vorwiegend aus Wurzeln und noch nicht abgebauter, junger Zellulose. Humine, ebenfalls nicht **NaOH**-lösliche Huminstoffe, die aus Huminsäuren gebildet werden und demzufolge eine der ältesten Kohlenstofffraktion des Bodens darstellen, sind nicht oder nur in **geringen** Mengen vorhanden, da sonst die Huminsäuren jünger sein sollten als die organische Restsubstanz.

Graben P (vgl. Abb.42): Die Basis dieses Erdstroms bildet ein fossiler Boden, der an drei Stellen datiert wurde (Proben **C/4**, **D/4** und **E/4**). Die drei Alter sind nicht signifikant verschieden voneinander und lassen sich zu einem Mittelwert von 1180 ± 45 BP zusammenfassen (GEYH 1971, S. 38/39). Im darüberliegenden Solifluktionsschutt ist ein zweiter fossiler Boden aufgeschlossen. Er wurde zweimal datiert mit 3935 ± 105 BP (**A/4**)² und 4765 ± 90 BP (**B/4**). Dieser Boden wurde nach 4700 BP von Schutt bedeckt.

¹ Durch den **obenerwähnten** Fehler im **¹⁴C-Labor** wurde nur das absolute Alter der Proben verfälscht, nicht aber deren relative Alter untereinander.

² Diese Datierung nahe der Stirn des Erdstroms **könnte** durch jüngeres Material verfälscht worden sein, welches beim Abgleiten des älteren Erdstroms aus dem überfahrenen Boden mitgerissen wurde.

heutiges Bachbett) nach 1200 ± 75 BP (B/2) von san-

(M/2) beziehungsweise Erdstrom entstanden war. abgelagert. Die heutige

nach 1030 BP noch in Böden konnten nicht Kohlenstoff aufweisen.

Ein einziger fossiler ist in der Grabung zu 760 ± 75 BP (B/3) auf, schien mir aufgrund der Material ergab denn oberhalb der Stirn mit Labor scheint bei der Alter bewirkt zu haben der Universität Zürich

dem Erdstrom datiert. **Übereinstimmung** zwischen den **Hu-** wurden. Beide **Frak-** effekt, WILLKOMM 1976, 1205 ± 75 BP wesentlich mehr «Alter» von -435 ± 50 in fossiler Böden davon Substanz nicht ein **mitt-** her den Abschluss der eine Erklärung für diese in abgestorbenem **orga-** besteht aus ebenfalls nicht **NaOH-** demzufolge eine der oder nur in geringen Alten als die organische

fossiler Boden, der an Alter sind nicht **signi-** wert von 1180 ± 45 BP **Solifluktionsschutt** ist ein **ert** mit 3935 ± 105 BP P von Schutt bedeckt.

ute Alter der Proben **ver-**

geres Material verfälscht **überfahrenen** Boden mit-

Diese Altersinversion kann nur so erklärt werden: Der nach 4700 BP entstandene Erdstrom floss nach 1200 BP zusammenhängend über einen wesentlich jüngeren Boden. Dieser Vorgang muss rasch abgelaufen sein, da die drei Datierungen des jüngeren Bodens gleiche Alter ergaben. Im oberen Teil des Grabens konnten beide Böden nicht mehr datiert werden, da sie zu wenig organisches Material enthielten; dies trifft auch für die Schmitzen und geringmächtigen Bodenbildungen an den Stirnen der **übereinander-** liegenden Erdströme zu.

Erdstrom 2 Munt Buffalora (Nationalpark): Auf dem Erdstrom 2 am Munt **Buffalora** führte ich Bewegungsmessungen durch. Daraus errechnete ich – heutige klimatische Bedingungen vorausgesetzt – dass für die Bildung dieses Erdstroms mindestens 3000 Jahre erforderlich waren (vgl. Kapitel 2.3.3.). Mit einem Schlagbohrer konnte im **Erd-** strom nur ein einziger deutlicher fossiler **A_h-Horizont** gefunden werden. Das Alter dieses Bodens, die Basis der ganzen Zunge, ist deshalb von Bedeutung. BEELER 1977 (S. 134 ff.) hat diesen Boden an drei Stellen datiert. Am oberen Ende des 21 m langen Erdstroms erhielt er ein Alter von 1925 ± 85 BP (Hv-4422), an der Stirne 605 ± 80 BP (Hv-4423), aber 6 m oberhalb des Zungenendes das erstaunlich hohe Alter von $12\ 185 \pm 100$ BP (Hv-4886). Aufgrund der **Untersuchungsergebnisse** von I Gess, die keine derart **grosse** Altersunterschiede innerhalb einer Bodenbildung ergaben, schien mir eine nochmalige Datierung dieser sehr alten Stelie des fossilen **A_h-Horizontes** notwendig. Der Erdstrom wurde wieder 6 m oberhalb des Zungenendes aufgegraben. Ergebnisse der **Radiocarbondatie-** rungen: Huminsäuren 1370 ± 65 BP (A/II), organische Restsubstanz 1485 ± 70 BP (A/I). Diese wesentlich jüngeren Daten ergeben mit 605 ± 80 BP an der Stirne und 1925 ± 85 BP an der **Ansatzstelle** der Zunge eine einleuchtende Abfolge: Der Erdstrom deckte in einer kräftigen **Solifluktionsphase** von 1900 BP bis 600 BP einen Boden zu. Dieses **Bodenfließen** muss zwischen 1900 und 1500 BP besonders intensiv gewesen sein, da in dieser Zeit etwa drei Viertel des heute fossilen Bodens verschüttet **worden** sind. Da beim Andauern der heutigen Materialverschiebungen in diesem Erdstrom mindestens 3000 Jahre für seine **Bildung** notwendig gewesen wären, müssen während dieser Solifluktionsphase die **Bodenbewegungen** etwa **fünffmal** stärker gewesen sein als heute.

Die Erklärung für die falsche Altersbestimmung Hv-4886 ($12\ 185 \pm 100$ BP) konnte gefunden werden. Aus dem Kommentar zu dieser Analyse geht hervor, dass die **Gesamt-** probe untersucht wurde, das heisst Huminsäuren und organische Restsubstanz wurden **nicht** getrennt. Wahrscheinlich ist dabei die Bodenprobe **vor** dem Verbrennen nicht oder nur ungenügend mit Salzsäure behandelt worden, um sie karbonatfrei zu machen. Beim Verbrennen der Probe wurde somit auch «toter», **¹⁴C-freier** Kohlenstoff aus den **Mineral-** körnern (hier vorwiegend Dolomit und Rauhwacke) des Bodens ausgetrieben. Der eigentlich zu datierende organische Kohlenstoff **wurde** dadurch mit **¹⁴C-freiem** Kohlenstoff stark angereichert; das eigentliche Probenalter kann so beliebig hoch werden. Um dies zu überprüfen, wurde ein Teil meiner Bodenprobe ohne Salzsäurebehandlung verbrannt und datiert; es ergab sich ein «**Scheinalter**» von 6985 ± 85 BP (A/III). Dies ist zwar **weniger** als die 12 185 Radiocarbonjahre der Analyse Hv-4886, es zeigt aber dennoch deutlich, wie diese **Fehldatierung** entstehen konnte. Wahrscheinlich war der Gehalt an organischem Kohlenstoff bei der in Hannover datierten Probe etwas geringer als bei **meiner** Probe. Dies würde zu einer noch stärkeren Verdünnung des zu datierenden Kohlenstoffs durch «**toten**» Kohlenstoff und damit zu einem noch höheren Alter führen.

Bei meinen Datierungen **zeigen** die nicht signifikant verschiedenen Alter der **beiden** Fraktionen des organischen Kohlenstoffs, dass auch bei einer **Überdeckung** eines fossilen Bodens durch eine mehr als 60 cm mächtige feinkörnige, karbonathaltige **Schuttschicht**

eine Verunreinigung der fossilen Huminsäuren durch rezente nicht vollständig **ausgeschlossen** werden kann, denn **aufgrund** der Untersuchungen an einem rezenten Boden bei I Gess (Graben 3) hätten die Huminsäuren auch im fossilen Boden wesentlich älter sein sollen als die organische Restsubstanz. Es ist deshalb anzunehmen, dass die Bindung von Huminsäuren als Ca-Humate nur bei kalkhaltigen Böden wirksam ist, nicht aber bei solchen, die vorwiegend Dolomit enthalten. Der **A_h-Horizont** dieser **Protorendzinen** ist neutral oder sogar leicht basisch (vgl. **Profilsäulen** 1, 2 und 3), dies genügt nicht, um Ca-Ionen in ausreichender Menge aus dem Dolomit zu lösen.

Bei den am Anfang dieses Kapitels erwähnten Unsicherheiten und **Interpretationsschwierigkeiten** bei 1%-Datierungen von fossilen Böden schaffen meine Untersuchungen etwas Klarheit:

- Verunreinigungen von Proben fossiler Böden durch jüngere Huminsäuren können auch bei einer **Überdeckung** durch **feinkörnigen Dolomit-** und **Rauhwarenschutt** **nicht** ausgeschlossen werden. Deshalb sind Altersbestimmungen der organischen Restsubstanz bei Untersuchungen von fossilen Böden sicherer als solche von **Huminsäuren**.
- Datierungen der organischen Restsubstanz geben zudem eher ein Alter für den Zeitpunkt der **Überschüttung** und **Fossilisierung** eines Bodens und nicht ein mittleres **Bodenalter** an. Sie sind dadurch **einfacher** zu interpretieren, denn sie entsprechen einem genaueren definierten Zeitpunkt als mittlere Bodenalter. Dies gilt aber nur für die **während** kurzer Zeit (das heisst 100–500 Jahren) gebildeten und anschliessend **fossilisierten** Protorendzinen auf Erdströmen.
- **¹⁴C-Altersbestimmungen** sind besonders bei Bodendatierungen nicht frei von Fehlern. Von meinen 35 Radiocarbonaten sind drei falsch und drei weitere nur relativ zueinander verwendbar. Nachdatierungen und Datierungen verschiedener Fraktionen des organischen Kohlenstoffs sind deshalb in zweifelhaften Fällen unbedingt **notwendig**.
- Eine enge Zusammenarbeit zwischen Probeneinsender und 1%-Labor ist bei **Bodendatierungen** von Vorteil, da genaue Kenntnisse über die Art der Aufbereitung und der Fraktionierung der Proben bei der Interpretation der Daten unerlässlich sind.

5.5. Pollenanalytische Untersuchungen

Aus **Torf-** und **Lehmhorizonten** am Rande des Plan da li Cüni (Graben 2, **Profilsäule** 2, **Abb. 39** und **46**) analysierte Dr. **C. BURGA** vom Geographischen Institut der Universität Zürich fünf Einzelproben. Einerseits sollte festgestellt werden, ob sich in diesem Moor die Bearbeitung eines durchgehenden Profils lohnen **würde**, andererseits war abzuklären, ob die intensivste Torfbildung, der dunkle **Torfhorizont** in 40 cm Tiefe, einer Warmphase zugeordnet werden kann. Die Resultate sind in der **Abbildung 48** dargestellt und wurden von **BURGA** interpretiert: «Die Pollenanalysen der Proben K 17, K 12, K 16, K 3 und K 2 von I Gess (**Lagalb**) ca. 2300 m ü. M. (Westexposition), hat gezeigt, dass Pollenanalysen von Ton-Material der **Bernina** möglich und in Einzelfällen lohnend sind. Aus einzelnen, nicht unmittelbar nacheinanderfolgenden Pollenspektren lassen sich nur beschränkt Schlüsse ziehen. Die Lokalität «I Gess» liegt in der Val Lagune, wo die heutige Waldgrenze bei zirka 2160 m liegt, also zirka 140 m tiefer als die untersuchte Lokalität.

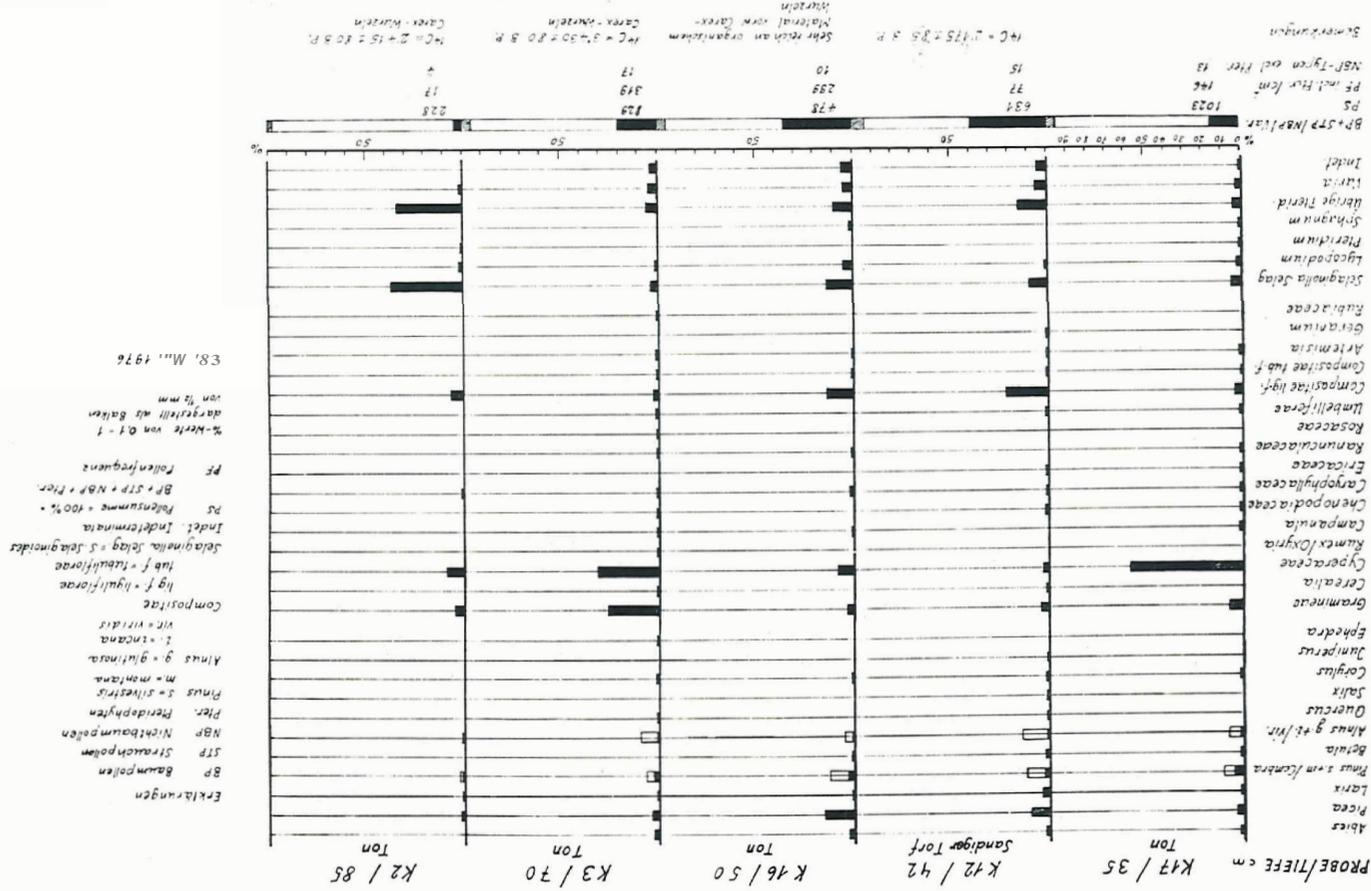
... nicht vollständig aus-
in einem rezenten Boden
1 Boden wesentlich älter
nehmen, dass die Bin-
öden wirksam ist, nicht
rizont dieser Protorend-
and 3), dies genügt nicht,
en und Interpretations-
meine Untersuchungen

e Huminsäuren können
und Rauhwackenschutt
nungen der organischen
r als solche von Humin-
r ein Alter für den Zeit-
d nicht ein mittleres Bo-
an sie entsprechen einem
ilt aber nur für die wä-
nsschliessend fossilisierten
n nicht frei von Fehlern.
i weitere nur relativ zu
rschiedener Fraktionen
Fällen unbedingt not-
C-Labor ist bei Boden-
er Aufbereitung und der
merlässlich sind.

gen

i (Graben 2, Profilsäule
a. In titut der Universi-
an, ob sich in diesem
, andererseits wa abzu-
at in 40 cm Tiefe dt, ener
bbildung 48 dargestellt
roben K 17, K 112, K 16,
tion), hat gezc igt, (ass
nzelfällen lohnen:nd.
spektrcn lassen sich nur
der Val Lagumé, wo
m tiefer als die tuncr-

Abb. 48 Ergebnisse der Pollenanalyse von fünf Proben aus dem Graben 2 (Profilsäule 2), Analyse und Darstellung von Dr. C. BURCA.



Probe K 17 (Ton)

Die BP und STP machen 12 % von der PS aus, wobei vorwiegend *Pinus* (9%) im Verhältnis P. s. und m. : *P. Cembra* = 1:1 und *Alnus viridis* (6,5%) vertreten sind. Die Hauptmasse der NBP (79%) machen die Cyperaceen (58%) aus. Weiter vertreten sind die Gramineen (6%), *Selaginella S.* (5%), übrige Pter. (4%) sowie Compositae lig. f. (1,5%) *Alnus viridis* mag an Wald- und Bachrändern gewachsen haben. Die vielen Cyperaceen lassen auf ein ausgedehntes Moor schliessen.

Mögliches Vegetationsbild:

Vorwiegend Moorvegetation, nass, offen, zum Teil krautig, sehr wahrscheinlich waldlos, vereinzelte **Grünerlen** in der Nähe.

Probe K 12 (sandiger Torf)

BP und STP betragen 39%, wovon *Alnus viridis* 12%, *Pinus* 11% (vorwiegend die Arve mit 9%), *Picea* 9% sowie *Larix* 3% ausmachen. Die NBP-Prozente betragen 53,5%, wobei die Compositen mit 21% vorherrschen; weiter häufig sind die Pter. mit 14% und *Selaginella S.* mit 9%.

Mögliches Vegetationsbild:

Krautreicher Rasen, offen, an feuchten **Rinnen** *Alnus viridis*, eventuell einzelne Kiefern (Arve?) in der Nähe.

Der **grössere** Anteil an BP und STP gegenüber tieferen Proben lässt auf eine relative **Klimabesserung schliessen**, besonders auch deshalb, weil das ¹⁴C-Datum von 2175 ± 85 BP in die Zeitspanne nach der Göschener Kaltphase I fällt.

Probe K 16 (Ton)

BP und STP betragen zusammen 35%, wovon *Picea* mit 14% und *Pinus* mit 12,5% (vorwiegend Arve mit 10%) sowie *Alnus viridis* mit 4% den Hauptanteil ausmachen. Der NBP-Anteil beträgt 60,4%, wobei die **ligulifloren** Compositen mit 14% und *Selaginella S.* mit 14% den Hauptanteil bilden. Weiter vertreten sind die übrigen Pter. (10%), Cyperaceen (9%) und die Gramineen (5%).

Mögliches Vegetationsbild:

Krautige, offene Vegetation, eventuell mit einzelnen Fichten **und/oder** Arven in der Nähe (da 30% BP, hauptsächlich *Picea* und wohl *Pinus cembra*). Die hohe **PF** von 299/cm³ und der sehr hohe Gehalt an organischem Material stützen diese Annahme. Ein Auffinden von Nadeln **würde** die Frage, ob ein Wald in der Nähe gestockt hat, weitgehend abklären.

Probe K 3 (Ton)

BP und STP machen 20,5% aus. Hauptvertreter sind *Alnus viridis* (8%), *Pinus* (5,5%) mit Arve (4%), *Picea* (4%) und *Abies* (1,5%).

Die NBP betragen 74%. Hier treten vorwiegend auf Cyperaceen (31%), Gramineen (26%), Pter. (6,5%), *Selaginella S.* (3,5%) und **liguliflore** Compositen (2,5%).

Mögliches Vegetationsbild:

Das ¹⁴C-Datum von 3430 ± 80 BP stellt diese **Probe** ins Subboreal. Nach dem **Pollen**-spektrum ist das Gebiet von **I Gess** deutlich über die **Waldgrenze** zu stellen. Dies passt

nicht schlecht zusammen mit dem Ansatz von PATZELT und BORTENSCHLAGER (1973), wonach in den Ostalpen die Waldgrenze im Subboreal nicht über 2400 m lag. Das Vegetationsbild mag damals von einer krautreichen Rasengesellschaft (viele NBP-Typen) und einem Moor geprägt gewesen sein.

Probe K 2 (Ton)

Die BP und STP machen hier nur 4,3 % aus. Mit 93,4 % herrschen die NBP vor, wobei die Pteridophyten mit 70,5 % die Hauptmasse bilden. Weiter vertreten sind Cyperaceen (9 %), liguliflore Compositen (6 %) und Gramineen (5 %). Der sehr hohe Farn-Anteil kann auf selektive Pollenzerstörung deuten, weshalb eine weitere Interpretation nur mit Vorbehalt richtig ist.

Mögliches Vegetationsbild:

Offene, krautarme, eventuell lückenhafte Vegetation (nur 4 NBP-Typen, die PF beträgt nur 17/cm²). Das Gebiet lag sicher über der Waldgrenze.

Zusammenfassende Bemerkungen zu «I Gess»:

Da die analysierten Proben stratigraphisch nicht unmittelbar aufeinander folgen, darf den Schlüssen zu den einzelnen Proben nicht zu viel Gewicht beigemessen werden, weil man die einzelnen Spektren immer im gegenseitigen Vergleich miteinander betrachten muss. Wie bereits gesagt, kann in Probe K 12 eine relative Klimabesserung abgelesen werden. Unerklärlich ist jedoch die Altersinversion¹ bei den Proben K 3 und K 2.

Die Pollenanalyse wurde noch zur Lösung einer weiteren Frage beigezogen: In einem Erdstrom am Gess (Graben 4, Abb. 42) wurden zwei fossile Böden aufgeschlossen. Die ¹⁴C-Datierungen ergaben für den tieferen fA_h-Horizont ein Alter von 1180 ± 45 BP (Mittel der drei ¹⁴C-Analysen C/4, D/4 und E/4) für den oberen ein Alter von 3935 ± 105 BP (A/4) beziehungsweise 4765 ± 90 BP (B/4). Diese somit mehrfach datierte Altersinversion sollte auch mit Hilfe einer Pollenanalyse bestätigt werden. Aufgrund der ¹⁴C-Daten sollte der jüngere Boden sowohl Pollen von Juglans als auch Castanea enthalten, der ältere fossile Boden aber keine der beiden, da diese Pflanzen erst seit der Römerzeit im Veltlin und Puschlav angepflanzt wurden. STEINMANN 1978 (S. 51/52) konnte ihre Datierungen fossiler Böden mit Juglans-Pollen absichern. Erfahrungen von AMMANN (in: FURRER et al. 1975, S. 24) liessen allerdings von vornherein keine sicheren Aussagen aus Pollenanalysen von fossilen Böden erwarten.

BURGA analysierte je eine Probe aus den beiden zu untersuchenden fossilen Böden sowie zu Vergleichszweck eine Probe des rezenten A_h-Horizontes. Juglans-Pollen wurden erwartungsgemäss nur im untersten, jüngeren fossilen Boden und im A_h-Horizont des heutigen Bodens gefunden, Castanea-Pollen dagegen in allen drei Bodenbildungen.

Dieses Resultat erlaubte aber keine Beurteilung der ¹⁴C-Daten, denn die Pollenspektren der drei Proben weisen niedrige Pollenfrequenzen von nur 100–160 Pollen/cm² auf. Zudem sind die Pollen sehr schlecht erhalten, und eine starke Dominanz von Farnsporen (bis zu 75 %) und anderen widerstandsfähigen Pollen weist auf selektive Pollenzerstörung durch Oxydation hin. Die Castanea-Pollen könnten zudem durch zirkulierendes Bodenwasser in den ältesten A_h-Horizont geschwemmt worden sein.

¹ Vgl. Anmerkung 1, S. 419

6. SOLIFLUIDALE AKTIVITÄT VON ERDSTRÖMEN BEI I GESS (BERNINAGEBIET) WÄHREND DER LETZTEN 5000 RADIOCARBONJAHRE

Erdströme bieten die seltene Gelegenheit, mit ¹⁴C-Untersuchungen von fossilen Böden **Änderungen** der **solifluidalen** Aktivität in der **subnivalen** Höhenstufe absolut zu datieren. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die **Wechsellagerungen** von **fossilen** BBden und Solifluktionsschutt in Erdströmen **klimamorphologisch** zu interpretieren.

Dazu wurden Bodenbewegungs- und Temperaturmessungen im Schweizerischen Nationalpark durchgeführt. Sie ergaben, dass viele Erdströme heute inaktiv sind, andere zeigen nur Materialverlagerungen auf ihren **vegetationsfreien** Rücken, die **Steilränder** der Zungen bewegen sich nicht. Die Messungen an einem Erdstrom zeigten, dass beim Andauern der aktuellen Bodenbewegungen mindestens 3000 Jahre nötig gewesen wären, um diese Zunge aufzubauen.

¹⁴C-Datierungen des fossilen Bodens, der die Basis des Erdstroms bildet, ergaben aber, dass 70 % dieser Form **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. Das bedeutet aber, dass Phasen mit verstärkter Solifluktion abwechseln mit Zeiträumen, in denen die solifluidale Aktivität gering ist. Eine **Klimaverschlechterung** (kalte und nasse Sommer sowie kalte Winter) ist Voraussetzung für die Bildung **neuer** Erdströme und die Verschüttung und **Fossilisierung** von Böden.

¹⁴C-Daten von fossilen **A_h-Horizonten** entsprechen **irgendeinem** Zeitpunkt innerhalb der Bodenbildungsphase. Deren Anfang, Ende **und** Dauer sind damit noch nicht bekannt. Die Datierung der organischen Restsubstanz, an Stelle von Gesamtproben oder Huminsäurepräparaten, **führt** hier weiter, da eine solche **Altersangabe** nahe beim **Zeitpunkt** der **Überschüttung** liegt, also dem Ende der Bodenbildung. Meine Untersuchungen erlauben es, **folgendes** Bild der **solifluidalen** Aktivität von Erdströmen bei I Gess zu entwerfen:

4700–4400 BP: Ausgedehnte **Solifluktion** am Westhang des Gess bis weit in den Plan da li Cüni; dadurch wahrscheinlich **«Verstopfung»** des Abflusses aus der Ebene. Die Ablagerung von Schwemmsedimenten und Torf wird **möglich**.

4400–3450 BP: Keine Anzeichen von **Solifluktion**. Das Torfwachstum verläuft ziemlich ungestört. **Ein Holzkohlefund** (*Pinus*) mit einem Alter von 4010 ± 60 BP lässt auf eine höhere Waldgrenze als heute **schliessen**. Somit dürfte auch der Westhang des Gess bewachsen und **stabilisiert** gewesen sein. Ein fossiler Boden aus dieser Zeit konnte allerdings nicht gefunden werden. Die Probe A/4, die in diese Warmphase **eingeordnet** werden könnte, ist wahrscheinlich durch **jüngeres** organisches Material verunreinigt und deshalb in die Bodenbildungsphase vor 4800 BP einzustufen.

3450–2200 BP: Kaltphase mit ausgeprägter Solifluktion. Das Torfwachstum in der Ebene endet. Kurze **Bodenbildungsphasen** unterbrechen die Akkumulation von Schutt im Plan da li Cüni.

2200–1900 BP: Die Daten der Proben E/2_I und E/2_{II} (in der Pollenanalyse ist dies die Probe **K 12**) fallen in eine Phase relativer **Klimaverbesserung**. Der dabei entstandene Torfhorizont wurde kurz vor 2000 BP von Solifluktionsschutt bedeckt, kurz **darauf setzte** in der ganzen Ebene eine weitere Bodenbildung ein.

ERDSTRÖMEN WÄHREND DER WARMPHASE

ungen von fossilen Böden
Höhenstufe absolut zu
agerungen von fossilen
ch zu interpretieren.
m Schweizerischen Na-
te inaktiv sind, andere
Lücken, die **Steilränder**
rom zeigten, dass beim
re nötig gewesen wären,

stroms bildet, ergaben
üssen - der Rest bildete
tlich schneller als dies
aber, dass Phasen mit
ie solifluidale Aktivität
ier sowie kalte Winter)
hüttung und Fossilisie-

em Zeitpunkt innerhalb
damit noch nicht be-
lle von Gesamtproben
altersangabe nahe beim
bildung. Meine Unter-
it von Erdströmen bei

ss bis weit in den Plan
ses aus der Ebene. Die

orfwachstum verläuft
von 4010 ± 60 BP lässt
auch der Westhang des
Boden aus dieser Zeit
diese Warmphase ein-
organisches Material ver-
einzustufen.

orfwachstum in der
ie Akkumulation von

Pollenanalyse ist dies
erung. Der dabei ent-
nsschutt bedeckt, kurz
in.

1900–1400 BP: Ein Erdstrom überfloss diesen Boden am **Hangfuss** des Gess. Die Bildung des **Erdstroms 2** am Munt Buffalora ist ebenfalls in diese Soliflukionsphase zu stellen.

1400–1100 BP: Ausgedehnte Bodenbildungsphase am Westhang des Gess. **Alle** hier aufgedragenen Erdströme enthielten einen Boden, der zu dieser «**Warmphase**» gerechnet werden muss.

1100–850 BP: Kräftige Soliflukionsphase: Ein alter fossiler Boden wurde, eingeschlossen in einem früher gebildeten Erdstrom, über eine jüngere Bodenbildung verlagert (Graben 4). In der Ebene wurde die Bodenbildung ein letztes Mal unterbrochen.

820 BP bis heute: Seit mindestens 820 BP entwickelt sich der heutige Boden in der Ebene ungestört. Am Hang des Gess wurde die Solifluktion vor dem Einsetzen der heutigen **Bodenbildung** noch mindestens zweimal kurzfristig durch aufkommende Vegetation gehemmt. Heute ist der Westhang des Gess beinahe vollständig bewachsen, alle Erdströme sind inaktiv.

7. HINWEISE ZUR SOLIFLUIDALEN AKTIVITÄT IN DEN ALPEN WÄHREND DES POSTGLAZIALS

In der Abbildung 49 wurde versucht, die Ergebnisse der Untersuchungen an fossilen Böden in Erdströmen und den dazu korrelaten Schwemmsedimenten bei **I Gess** darzustellen und mit Bodenbildungsphasen, die durch **Solifluktionsschutt** unterbrochen wurden, zu vergleichen. Derartige Angaben finden sich in den bereits mehrfach zitierten Arbeiten von **FURRER** et al. 1971 und 1975, **FURRER** 1977 und **BEELER** 1977 aus dem Schweizerischen Nationalpark, von **RÖTHLISBERGER** 1976 und **SCHNEEBELI** 1976 aus dem Wallis sowie von **STEINMANN** 1978 aus den Südtiroler Dolomiten. Auch die **Höhenänderungen** der Waldgrenze in den östlichen Schweizer Alpen (nach **ZOLLER**, in **FURRER** et al. 1978) und die Gletscherhochstandsperioden aus Österreich (nach **PATZELT** 1977) und den Schweizer Alpen (nach **ZOLLER** 1977, **Furrer** et al. 1978) wurden miteinbezogen.

Die Bodenbildungsphasen aus den verschiedenen Gebieten stimmen recht gut überein, obwohl es sich bei den **¹⁴C-Analysen** aus dem Nationalpark, dem Wallis und dem Südtirol meistens um Datierungen von Huminsäurepräparaten oder Gesamtproben handelt. Zwischen 4500 und 3500 BP können allgemein Bodenbildungen festgestellt werden. Ob diese Böden erst nach 3500 BP, wie bei **I Gess**, verschüttet wurden oder vielleicht bereits früher, ist nicht entschieden, da es sich um Huminsäuredaten (im Wallis auch um Holzkohle, die aber auch vor Abschluss der Bodenbildung in diesen eingelagert worden sein kann) handelt, und damit das Ende der Bodenbildung unbekannt ist. Nach 3500 scheint verstärkte Solifluktion (unterbrochen von zwei kurzen Stabilisierungsphasen am Gess) dominiert zu haben. Um 2000 BP zeichnet sich (mit Ausnahme des Südtirols) eine zweigeteilte Warmphase ab. Danach **wird** die Solifluktion wieder intensiver. Vor **1100 BP** (im Wallis bis um 900) wird sie noch einmal durch eine Bodenbildungsphase unterbrochen. Nach **1000 BF** treten nur noch kurze (häufig nicht datierbare) und zudem lokal unterschiedlich ausgeprägte Warmphasen auf. Die verstärkte Solifluktionstätigkeit wird erst während der letzten hundert Jahre durch ein Wiederbewachsen der Erdströme gehemmt. Heute sind die meisten Zungen, aus denen die hier verwendeten Daten fossiler

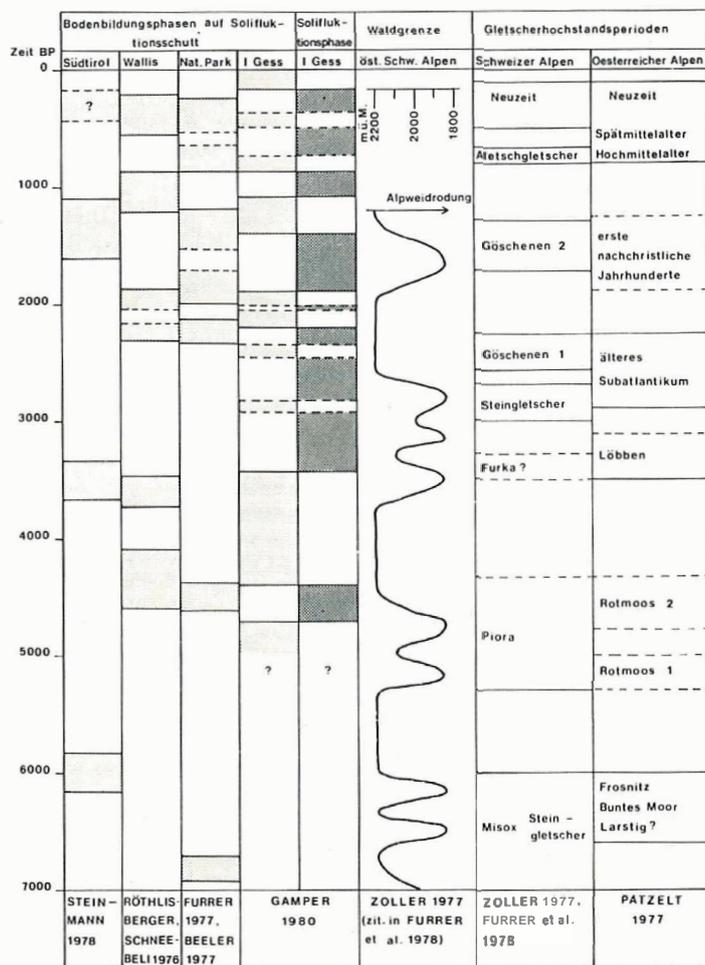


Abb.49 Chronologie der Gletscher- und Waldgrenzschwankungen sowie der Solifluk-tionsphasen während des alpinen Postglazials.

Böden stammen, ganz oder teilweise bewachsen und inaktiv. Aus der Zeit vor 5000 BP sind nur noch zwei Bodenbildungsphasen um 6000 und 6800 BP gefunden worden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Die bisherigen Untersuchungen ergaben für die letzten 5000 Radiocarbonjahre bereits ein recht detailliertes Bild der solifluidalen Aktivitäts- und Stabilitätsphasen, was früher geschah, ist dagegen noch weitgehend unbekannt. Dies ist nicht weiter verwunderlich, denn die Anzahl der noch erhaltenen fossilen Böden und damit die Anzahl der ¹⁴C-Daten nimmt mit zunehmendem Alter stark ab. Vergleicht man die Solifluk-tionsphasen am Gess 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 Solifluk-tion durch Änderungen des Klimas gesteuert wird. Solifluk-

landsperioden
Oesterreicher Alpen
Neuzeit
Spätmittelalter Hochmittelalter
erste nachchristliche Jahrhunderte
älteres Subatlantikum
Löbben
Rotmoos 2
Rotmoos 1
Frosnitz Buntes Moor Larstig?
PATZELT 1977

ie der Solifluktionsphasen

is der Zeit vor 5000 BP
gefunden worden.
rsuchungen ergaben für
s Bild der solifiuidalen
egen noch weitgehend
anzahl der noch erhal-
mt mit zunehmendem
s mit den Depressionen
t sich eine weitgehend
denbildungsphasen mit
esteuert wird. Solifluk-

tionsphasen in Erdströmen der subalpinen Stufe der Alpen können als Zeiten der Klima-
verschlechterung, das heisst mit niedrigeren Jahrestemperaturen als heute gedeutet
werden. Stabilitätsphasen mit Bodenbildungen auf Erdströmen entsprechen einer
Klimaverbesserung.

Bei Bodenaltern muss immer mit Verunreinigung der Proben und Fehldatierungen
gerechnet werden. Nur systematische Untersuchungen mit mehreren Dutzend ^{14}C -Ana-
lysen aus einem einzigen Arbeitsgebiet erlauben es, falsche Datierungen zu erkennen und
die Kenntnisse über die wechselnde solifluidale Aktivität von Erdströmen zu erweitern
und so einen Beitrag zur Klimageschichte des Postglazials zu erbringen.

Zusammenfassung

Die heutigen solifluidalen Bewegungen auf und in Erdströmen wurden am Munt
Buffalora und Munt Chavagl im Schweizerischen Nationalpark auf zwei Messfeldern
registriert. Auf den Erdstromrücken konnte ein durchschnittlicher Bewegungsbetrag
von 3,7 cm/Jahr festgestellt werden. Die solifluidale Jahresbewegung setzt sich, wie dies
Boden- und Lufttemperaturmessungen auf einem Erdstrom am Munt Chavagl ergaben,
aus Frostkriechen und Gelifluktion zusammen. Eine geschlossene Vegetationsdecke
hemmt die Solifluktion beinahe vollständig.

In zwei Erdströmen flossen pro Jahr 45 beziehungsweise 27 dm³ Schutt durch einen
Querschnitt in der Mitte der Zungen. Konstante klimatische Bedingungen vorausge-
setzt, würde dies eine minimale Bildungsdauer von 1500 beziehungsweise 3000 Jahren
für die beiden Erdströme erfordern.

Die Erdströme im Nationalpark befinden sich heute in einer weitgehend stabilen
Phase. Viele sind ganz bewachsen und demzufolge inaktiv. Stärkere solifluidale Fliess-
bewegungen und die Bildung von neuen Erdströmen sind aufgrund der vorliegenden
Untersuchungsergebnisse nur zu erwarten, wenn nasse und kühle Sommer häufiger auf-
treten.

Bei I Gess (Berninagebiet) wurden fossile Böden aus Erdströmen untersucht. Die
Ergebnisse von 35 ^{14}C -Datierungen sowie die Resultate von pollenanalytischen und
bodenkundlichen Untersuchungen ergaben für die letzten 5000 Radiocarbonjahre ein
recht detailliertes Bild der solifluidalen Aktivitäts- und Stabilitätsphasen. Die Solifluk-
tion war um 4500 BP, zwischen 3400 und 2200 BP sowie von 1900 bis 1400 BP und nach
1100 BP verstärkt. Vergleicht man diese Solifluktionsphasen mit den Depressionen der
Waldgrenze und den Gletscherhochstandsperioden, so zeigt sich eine weitgehend paral-
lele Entwicklung. Dies bestätigt, dass der Wechsel von Bodenbildungsphasen mit Zeiten
verstärkter Solifluktion durch Klimaänderungen gesteuert wird.

TABELLEN

Tabelle I: Munt Buffalora, Messpunkte auf Erdströmen

Punkt	Vege- tation	Mess- marke	Jährliche Bewegungen der Messmarken cm/Jahr					Mittlere Jahresbewegung in cm Tiefe					Tiefgang der Bewegungen cm			
			1975/76	1976/77	1977/78	1978/79	0	5	10	20	30	40		50		
09.1	+	Alu	0,0	3,0	0,0	2,2	0,7	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11
10.1	+	Holz	1,0	3,0	2,0	2,2	0,8	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10
10.2	+	Holz	0,0	0,0	3,6	1,0	1,1	0,9	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26
10.3	+	Holz	0,0	2,6	7,2	8,2	2,5	1,9	1,2	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	32
11.2	+	Alu	0,0	3,0	2,2	0,0	1,1	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15
11.3	-	Alu	2,2	0,9	6,2	0,0	1,6	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16
11.4	-	Alu	0,0	4,0	5,4	0,0	2,0	1,3	1,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27
12.1	○	Holz	1,1	0,0	7,3	3,6	2,8	2,6	2,3	1,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	40
12.2	-	Holz	6,0	4,0	10,2	4,5	4,7	4,4	4,2	3,3	1,8	0,8	0,3	0,0	0,3	54
12.3	-	Holz	2,2	5,4	11,0	3,6	4,2	3,8	3,1	1,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	31
12.5	○	Holz	2,2	4,1	5,0	-	0,9	0,6	0,6	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	32
13.1	○	Alu	4,1	1,0	12,2	1,4	4,7	4,5	3,8	2,7	2,0	1,9	1,5	1,5	1,5	40
13.2	○	Alu	3,0	2,2	13,0	2,2	5,1	4,9	4,3	2,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	40
13.3	-	Alu	1,4	6,3	6,0	6,4	5,0	4,6	3,8	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	40
14.0	-	Holz	0,0	0,0	7,6	9,0	2,0	1,2	1,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26
14.2	○	Holz	3,2	1,4	6,1	3,2	1,8	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11
14.3	-	Holz	5,0	0,0	15,0	6,1	5,7	5,1	5,4	4,6	2,3	1,2	0,0	0,0	0,0	53
14.4	-	Holz	3,0	2,2	10,0	6,1	4,1	3,5	2,9	1,8	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	42
14.6	-	Holz	5,0	1,0	7,3	5,1	2,9	2,0	1,0	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	32
15.1	-	Alu	0,0	0,0	2,0	3,2	1,4	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13
15.2	-	Alu	0,0	4,1	0,0	10,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15.3	-	Alu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16.0	-	Holz	1,0	18,4	6,7	12,4	9,4	8,4	7,3	4,4	2,0	1,0	0,7	0,7	0,7	52
16.1	-	Holz	8,9	1,1	6,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

14.0	—	Holz	0,0	0,0	7,6	9,0	2,0	1,2	1,1	0,7	0,0	0,0	0,0	26
14.2	○	Holz	3,2	1,4	6,1	3,2	1,8	1,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	11
14.3	—	Holz	5,0	0,0	15,0	6,1	5,7	5,1	5,4	4,6	2,3	1,2	0,3	53
14.4	—	Holz	3,0	2,2	10,0	6,1	4,1	3,5	2,9	1,8	1,0	0,1	0,0	42
14.6	—	Holz	5,0	1,0	7,3	5,1	2,9	2,0	1,0	1,0	0,2	0,0	0,0	32
15.1	—	Alu	0,0	0,0	2,0	3,2	1,4	0,9	0,3	0,0	0,0	0,0	—	13
15.2	—	Alu	0,0	4,1	0,0	10,4	—	—	—	—	—	—	—	—
15.3	—	Alu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16.0	—	Holz	1,0	18,4	6,7	12,4	9,4	8,4	7,3	4,4	2,0	1,0	0,7	52
16.1	—	Holz	8,9	1,1	6,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabelle I (Fortsetzung)

Punkt	Vegetation	Messmarke	Jährliche Bewegungen der Messmarken 1975/76	1976/77	1977/78	1978/79	Mittlere Jahresbewegung in cm Tiefe						Tiefgang der Bewegungen cm	
							0	5	10	20	30	40		50
16.2	○	Holz	0,0	0,0	4,1	2,2	1,2	1,1	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	25
16.3	—	Holz	4,1	0,0	7,0	6,0	2,1	1,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	15
16.4	○	Holz	0,0	0,0	2,8	2,8	0,8	0,3	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	22
03.1	—	Holz	6,1	2,2	7,8	8,2	3,1	2,4	1,2	0,2	0,0	0,0	0,0	26
06.1	○	Holz	2,0	1,4	5,0	—	1,8	1,2	0,5	0,3	0,1	0,0	0,0	41
10.6	+	Holz	0,0	3,0	2,2	3,2	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9
10.7	○	Holz	2,2	2,0	5,4	11,0	2,3	1,7	1,9	1,4	0,5	0,0	0,0	31
10.8	○	Holz	2,0	3,2	6,0	3,6	3,6	3,4	3,1	2,1	1,1	0,0	0,0	40
12.6	○	Holz	0,0	0,0	4,1	3,2	1,7	1,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	18
14.7	+	Holz	2,2	0,0	5,0	11,0	2,1	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	12
14.8	○	Holz	0,0	2,0	3,4	6,0	2,1	1,6	1,5	1,0	0,4	0,0	0,0	32
14.9	○	Holz	0,0	0,0	6,3	5,7	1,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9
16.5	○	Holz	0,0	0,0	3,0	—	0,9	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	16

Tabelle II: Munt Buffalora, Messpunkte vor den Erdströmen

Punkt	Vege- tation	Mess- marke	Jährliche Bewegungen der Messmarken cm/Jahr										Mittlere Jahresbewegung in cm Tiefe cm/Jahr					Tiefgang der Bewegungen cm
			1975/76	1976/77	1977/78	1978/79	0	5	10	20	30	40	50					
01.0	+	Alu	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21	
02.0	+	Alu	0,0	0,0	0,0	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
03.0	+	Alu	0,0	0,0	0,0	—	—	—	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2	
04.0	+	Alu	—	—	—	—	—	—	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	
05.0	+	Alu	0,8	0,8	—	—	—	—	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8	
06.0	+	Holz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8	
07.0	+	Alu	—	—	—	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
08.0	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
08.1	+	Alu	0,0	0,0	0,0	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
08.2	+	Alu	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	
08.3	+	Alu	0,0	1,8	3,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	
08.4	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
09.0	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2	
09.2	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
10.0	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
10.4	+	Alu	—	—	—	—	—	—	1,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9	
10.5	+	Holz	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,8	0,5	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	22	
11.0	+	Holz	2,2	1,4	5,4	4,0	0,0	0,0	1,4	1,0	0,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	24	
11.1	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
11.5	+	Alu	0,0	0,0	0,0	—	—	—	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3	
12.0	+	Alu	0,0	1,2	2,2	0,0	0,0	0,0	0,8	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15	
12.4	+	Alu	0,0	0,0	0,0	—	—	—	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6	
13.0	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
13.4	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
14.1	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
14.5	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
15.0	+	Alu	0,0	0,0	—	—	—	—	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	
15.4	+	Alu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	

Tabelle III: Munt Buffalora, Messpunkte oberhalb der Erdströme

Tabelle IV: Munt Chavagl

Punkt	Vegetation	Jährliche Bewegungen		Punkt	Vegetation	Jährliche Bewegungen	
		1977/178 cm	1978/179 cm			1977/178 cm	1978/179 cm
10	○	-	-	60	+	-	1,4
11	○	-	-	61	+	-	-
12	+	0,9	0,9	62	+	-	1,0
13	+	0,9	0,9	63	+	-	1,4
14	+	2,4	1,4	64	○	-	1,4
15	+	2,8	1,0	65	○	-	3,3
16	+	1,4	1,0	66	○	-	3,6
17	+	2,8	0,0	67	○	-	3,0
18	○	3,7	2,0	68	○	-	-
19	+	1,4	2,2	69	○	-	-
				69.1	○	-	2,2
20	—	4,1	5,1	70	○	-	-
21	—	7,5	7,3	71	○	-	-
22	—	11,4	10,3	72	○	-	-
23	—	7,6	7,3	73	○	-	2,2
24	—	12,3	40,3	74	○	-	5,2
25	—	13,4	19,0	75	○	-	3,0
26	—	9,4	13,6	76	○	-	2,0
27	—	6,4	5,1	77	+	-	3,2
28	+	5,7	3,2	78	+	-	1,7
29	+	2,2	-	79	+	-	2,2
30	—	5,1	7,0	80	+	2,2	2,4
31	—	9,7	9,9	81	—	4,2	3,7
32	—	9,3	9,8	82	—	6,4	8,1
33	○	6,2	5,8	83	—	8,3	7,3
34	—	8,3	6,8	84	—	6,6	6,7
35	—	10,2	10,8	85	—	5,2	8,1
36	—	8,2	18,3	86	—	5,5	3,6
37	—	11,2	21,6	87	—	5,5	3,0
38	—	12,2	11,2	88	+	1,4	2,4
39	—	6,2	5,7	89	+	2,2	1,4
40	○	7,3	7,3	90	+	2,4	3,3
41	○	5,9	6,5	91	—	6,7	6,4
42	○	4,9	5,4	92	—	7,7	8,1
43	○	6,6	6,2	93	—	7,3	5,9
44	○	6,2	6,1	94	—	9,5	7,7
45	—	7,9	7,7	95	—	7,3	7,6
46	—	8,8	6,7	96	○	4,1	4,2
47	—	7,3	6,7	97	○	3,2	3,7
48	—	6,2	6,8	98	—	5,5	3,3
49	○	3,2	2,8	99	—	3,7	5,4

Punkt

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

x Re

x Re

x Re

x Re

x Re

x all

x all

Tabelle V: Temperaturmessungen am Munt Chavagl (alle Temperaturangaben in °C)

+150 cm (Luft)	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	2,0	-1,2	-5,7	-10,7	-7,4	-5,8	-5,5	0,6	4,8	5,2	5,4
Minimum	-7,1	-16,3	-12,4	-27,3	-19,2	-15,4	-13,8	-14,1	-3,8	-3,8	-5,4
Maximum	15,6	9,5	2,0	3,8	6,2	12,2	10,0	12,8	13,4	18,2	15,1
Frostwechsel	27	37	8	4	8	12	14	29	6	10	12
Frosttage	19	23	31	31	28	31	30	20	6	6	8
Eistage	5	6	26	29	24	25	23	5	2	0	1
+2 cm (Luft)	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	1,6	-1,6	-4,5	-6,8	-1,2	-0,9	-0,5	0,0	5,5	6,9	6,6
Minimum	-5,0	-12,6	-12,6	-16,0	-1,6	-1,5	-0,6	-0,3	-1,6	-2,5	-2,4
Maximum	16,8	8,3	2,9	-1,2	-0,8	-0,6	-0,3	9,4	19,6	25,8	25,1
Frostwechsel	54	50	8	0	0	0	0	2	11	8	18
Frosttage	30	30	31	31	28	31	30	31	9	8	10
Eistage	1	5	26	31	28	31	30	29	2	0	0
-5 cm (Boden)	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	1,9	-1,0	-3,4	-6,0	-1,1	-0,8	-0,4	-0,1	4,8	7,0	6,8
Minimum	-2,2	-8,4	-8,8	-13,2	-1,5	-1,4	-0,6	-0,3	-0,1	0,6	0,2
Maximum	12,8	5,5	-0,4	-1,4	-0,8	-0,6	-0,3	4,4	17,2	18,3	18,8
Frostwechsel	8	41	0	0	0	0	0	2	5	0	0
Frosttage	11	28	31	31	28	31	30	31	3	0	0
Eistage	6	8	31	31	28	31	30	29	0	0	0
± 0 cm (Boden)	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	1,9	-0,8	-3,0	-5,3	-0,9	-0,7	-0,3	-0,1	4,3	7,1	6,8
Minimum	-1,3	-6,4	-7,3	-10,6	-1,4	-1,2	-0,4	-0,2	0,0	1,2	0,5
Maximum	11,0	2,8	-0,6	-1,2	-0,7	-0,4	-0,2	1,0	15,0	16,7	16,9
Frostwechsel	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Frosttage	8	20	31	31	28	31	30	31	0	0	0
Eistage	6	19	31	31	28	31	30	30	0	0	0

<i>-10 cm (Boden)</i>	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	1,9	-0,8	-3,0	-5,3	-0,9	-0,7	-0,3	-0,1	4,3	7,1	6,8
Minimum	-1,3	-6,4	-7,3	-10,6	-1,4	-1,2	-0,4	-0,2	0,0	1,2	0,5
Maximum	11,0	2,8	-0,6	-1,2	-0,7	-0,4	-0,2	1,0	15,0	16,7	16,9
Frostwechsel	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Frosttage	8	20	31	31	28	31	30	31	0	0	0
Eistage	6	19	31	31	28	31	30	30	0	0	0

Tabelle V (Fortsetzung, alle Temperaturangaben in °C)

<i>-20 cm (Boden)</i>	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	2,1	-0,4	-2,6	4,9	-1,0	-0,7	-0,4	-0,2	3,4	7,0	6,8
Minimum	-0,1	-4,6	-5,9	-8,9	-1,4	-1,2	-0,6	-0,3	-0,1	1,9	0,8
Maximum	8,3	1,4	-0,8	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	-0,1	10,6	13,9	13,5
Frostwechsel	4	1	0	0	0	0	0	0	5	0	0
Frosttage	2	16	31	31	28	31	30	31	4	0	0
Eistage	0	15	31	31	28	31	30	31	0	0	0

<i>-30 cm (Boden)</i>	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	2,1	4,2	-2,3	-4,5	-1,0	-0,7	-0,5	-0,2	2,9	7,0	6,7
Minimum	0,0	-3,3	4,8	-7,7	1	-1,1	4,6	-0,4	-0,2	2,4	1,1
Maximum	7,3	1,0	-0,9	-1,0	-0,8	4,6	-0,4	-0,2	11,5	13,1	12,6
Frostwechsel	0	1	0	0	0	0	0	0	7	0	0
Frosttage	0	15	31	31	28	31	30	31	7	0	0
Eistage	0	14	31	31	28	31	30	31	3	0	0

<i>-40 cm (Boden)</i>	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	2,4	0,2	-1,7	-4,0	-1,0	-0,7	-0,5	4,3	1,8	7,0	6,8
Minimum	0,4	-1,2	-3,3	-6,6	-1,4	-1,1	-0,6	-0,4	-0,2	3,5	1,6
Maximum	6,0	0,8	-0,8	-0,9	4,8	-0,6	-0,4	-0,2	11,5	11,1	10,5
Frostwechsel	0	1	0	0	0	0	0	0	5	0	0
Frosttage	0	6	31	31	28	31	30	31	8	0	0
Eistage	0	5	31	31	28	31	30	31	5	0	0

<i>-50 cm (Boden)</i>	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	2,7	0,6	-1,0	-3,2	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	1,0	7,0	6,8
Minimum	0,7	0,0	-1,8	-5,2	-1,3	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	4,3	2,3
Maximum	5,2	1,1	0,0	-0,6	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	10,1	10,2	9,4
Frostwechsel	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0
Frosttage	0	0	31	31	28	31	30	31	11	0	0
Eistage	0	0	30	31	28	31	30	31	8	0	0

Tabelle V (Fortsetzung, alle Temperaturangaben in °C)

- 60 cm (Boden)	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	2,8	0,7	-0,5	-2,5	-0,8	4,6	4,4	-0,3	0,3	7,0	6,6
Minimum	1,0	0,2	-1,0	4,2	-1,2	-0,8	-0,5	-0,4	-0,3	4,7	2,8
Maximum	4,8	1,2	0,2	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	9,9	9,4	8,8
Frostwechsel	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0
Frosttage	0	0	28	31	28	31	30	31	15	0	0
Eistage	0	0	27	31	28	31	30	31	12	0	0
- 80 cm (Boden)	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	3,3	1,2	0,1	-1,5	-0,5	-0,4	-0,2	-0,1	0,1	6,9	6,6
Minimum	1,5	0,6	-0,1	-3,0	-0,9	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	5,3	3,5
Maximum	4,9	1,6	0,7	-0,1	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	9,2	8,8	8,3
Frostwechsel	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Frosttage	0	0	9	31	28	31	30	31	21	0	0
Eistage	0	0	8	31	28	31	30	31	20	0	0
-100 cm (Boden)	Okt. 1978	Nov. 1978	Dez. 1978	Jan. 1979	Febr. 1979	März 1979	April 1979	Mai 1979	1.-24.6.	8.-31.8.	Sept. 1979
Monatsmittel	3,4	1,3	0,2	-1,1	-0,6	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	6,6	6,4
Minimum	1,7	0,8	0,0	-2,4	-0,9	-0,5	4,4	-0,3	-0,2	5,3	3,8
Maximum	5,0	1,7	0,8	0,0	-0,4	-0,4	-0,3	4,2	8,2	8,0	7,8
Frostwechsel	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
Frosttage	0	0	0	29	28	31	30	31	21	0	0
Eistage	0	0	0	28	28	31	30	31	20	0	0
Jahreswerte (Oktober 1978 bis September 1979)											
	+150 cm	+2 cm	-5 cm	-10 cm	-20 cm	-30 cm	-40 cm	-50 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm
Jahresmittel	-0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Minimum ¹	-27,3	-16,0	-13,2	-10,6	-8,9	-7,7	-6,6	-5,2	-4,2	-3,0	-2,4
Maximum ¹	18,2	25,8	18,8	16,9	13,9	13,1	11,5	10,2	9,9	9,2	8,2
Frostwechsel ¹	167	151	56	4	10	8	6	4	4	2	2
Frosttage ¹	225	269	224	210	204	204	196	193	194	181	170
Eistage ¹	146	183	194	206	197	199	192	189	190	179	168

¹ Ohne die Werte vom 25. Juni bis 7. August 1979.

Tabelle VI: ¹⁴C-Daten (konventionelle Alter BP)

	+150 cm	+2 cm	-5 cm	-10 cm	-20 cm	-30 cm	-40 cm	-50 cm	-60 cm	-80 cm	-100 cm
Jahresmittel	-0,5										
Minimum ¹	-27,3	-16,0	-13,2	-10,6	-8,9	-7,7	-6,6	-5,2	-4,2	-3,0	-2,4
Maximum ¹	18,2	25,8	18,8	16,9	13,9	13,1	11,5	10,2	9,9	9,2	8,2
Frostwechsel ¹	167	151	56	4	10	8	6	4	4	2	2
Frosttage ¹	225	269	224	210	204	204	196	193	194	181	170
Eistage ¹	146	183	194	206	197	199	192	189	190	179	168

¹ Ohne die Werte vom 25. Juni bis 7. August 1979.

Graben 1:

A/1	fossiler Boden	organische Restsubstanz	730 ± 85	UZ-185
B/1	fossiler Boden	Gesamtprobe	1220 ± 60	UZ-229
C/1	fossiler Boden	organische Restsubstanz	2345 ± 80	UZ-186
D/1	Holzkohle	organische Restsubstanz	4010 ± 60	UZ-228

Graben 2:

A/2	rezenter A_h-Horizont	organische Restsubstanz	820 ± 70	UZ- 69
B/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1200 ± 75	UZ- 57
C/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1680 ± 75	UZ- 72
D/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	2375 ± 85	UZ- 56
E/2I	Torf	organische Restsubstanz	2175 ± 85	UZ- 55
E/2II	Torf	organische Restsubstanz	2020 ± 65	UZ-272
F/2	Torf	organische Restsubstanz	3430 ± 80	UZ- 71
G/2	Torf	organische Restsubstanz	2415 ± 80	U Z 64
H/2	Torf	organische Restsubstanz	2800 ± 80	UZ- 65
I/2	Torf	organische Restsubstanz	3265 ± 85	UZ- 45
K/2	Torf	organische Restsubstanz	4250 ± 80	UZ-163
L/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1030 ± 85	UZ- 59
M/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1670 ± 80	U Z 68
N/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1805 ± 85	UZ- 67
O/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	2020 ± 75	UZ- 70
P/2	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1965 ± 85	UZ- 60
Q/2	Torf	organische Restsubstanz	2865 ± 80	UZ- 58

Graben 3:

A/3I	rezenter A_h-Horizont	organische Restsubstanz	-2210 ± 45	UZ-270
A/3II	rezenter A_h-Horizont	Huminsäuren	- 435 ± 50	UZ-271
B/3	fossiler Boden	organische Restsubstanz	760 ± 75	UZ- 66
C/3I	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1800 ± 100	UZ- 73
C/3II	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1100 ± 95	UZ-169
D/3	fossiler Boden	organische Restsubstanz	390 ± 60	UZ-262

Graben 4:

A/4	fossiler Boden	organische Restsubstanz	3935 ± 105	UZ- 75
B/4	fossiler Boden	organische Restsubstanz	4765 ± 90	UZ- 74
C/4	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1210 ± 75	UZ- 61
D/4	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1075 ± 75	U Z 62
E/4	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1275 ± 85	UZ-187

Erdstrom 2 (Munt **Buffalora**):

A/I	fossiler Boden	organische Restsubstanz	1485 ± 70	UZ-372
A/II	fossiler Boden	Huminsäuren	1370 ± 65	UZ-373
A/III	fossiler Boden	Gesamtprobe (nicht mit HCl behandelt)	6985 ± 85	UZ-374

LITERATURVERZEICHNIS

- ANDERSSON, J. G., 1906: Solifluction, a component of **subaerial** denudation. Journ. of Geol. 14, 91–112.
- BAULIG, H., 1956: **Pénéplaines et pédiplaines**. Soc. belge. études géogr. 25, 25–58.
- BEELER, F., 1977: Geomorphologische Untersuchungen am Spät- und Postglazial im Schweizerischen Nationalpark und im **Berninapassgebiet** (Südrätische Alpen). *Ergebn. d. wiss. Unters. im Schweiz. Nationalpark* 15, 131–276.
- BENEDICT, J. B., 1966: Radiocarbon dates **from a stone-banked terrace** in the Colorado Rocky Mountains, U.S.A., *Geografiska Annaler* 48 A, 24–31.
- , 1970: Downslope **soil movement** in a Colorado alpine region: Rates, processes and **climatic significance**. *Arctic and Alpine Research* 2, 165–226.
- , 1976: Frost creep and **gelifluction features: A review**. *Quaternary Research* 6, 55–76.
- BOESCH, H., 1937: Geologie der zentralen **Unterengadiner Dolomiten**. Diss. Univ. Zürich.
- BROCKMANN-JEROSCH, H., 1907: Die Flora des **Puschlav** (Bezirk **Bernina**, Kanton Graubünden) und ihre Pflanzengesellschaften. In: Die Pflanzengesellschaften der Schweizeralpen. Leipzig.
- BÜDEL, J., 1959: Periodische und episodische **Solifluktion** im Rahmen der klimatischen **Solifluktionstypen**. *Erdkunde* 13, 297–314.
- , 1977: **Klima-Geomorphologie**. Berlin und Stuttgart.
- CAMPELL, E. und TREPP, W., 1968: Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks. *Ergebn. d. wiss. Unters. im Schweizerischen Nationalpark* 12, 19–42.
- CASAGRANDE, A., 1934: Bodenuntersuchungen **M** Dienste des neuzeitlichen Strassenbaus. *Der Strassenbau* 25.
- ELSASSER, H., 1966: Untersuchungen an Erdbülten und Strukturböden im Avers. Diplomarbeit, Manuskript, Univ. Zürich.
- , 1968: Untersuchungen an Strukturböden im Kanton Graubünden. Diss. Univ. Zürich.
- EMBLETON, C. und KING, C. A. M., 1975: **Periglacial Geomorphology**. London.
- FITZE, P., 1969: Untersuchungen von Solifluktionerscheinungen im **Alpenquerprofil** zwischen Säntis und Lago di Como. Diss. Univ. Zürich.
- , 1971: Messungen von Bodenbewegungen auf West-Spitzbergen. *Geographica Helvetica* 26, 148–152.
- FREI, E. und SCHÜTZ, E., 1978: Ergebnisse und Interpretation einiger ¹⁴C-Altersbestimmungen an **Bodenproben**. *Bulletin d. bodenkundl. Ges. d. Schweiz* 2, 3241.
- FRENZEL, B. (Hrsg.), 1977: Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Europa. *Erdwissenschaftliche Forschung* 13.
- FREUND, R., 1968: **Solifunktionsformen** am Parpaner Rothorn. Diplomarbeit, **Manuskript**, Univ. Zürich.
- , 1972: Vergleichende Betrachtungen von Kleinformen der **Solifluktion** im Raume **Mittelbünden** (Schweiz), auf West-Spitzbergen und am **Kilimandjaro**. Diss. Univ. Zürich.
- FURRER, G., 1954: Solifunktionsformen im Schweizerischen Nationalpark. *Ergebn. d. wiss. Unters. im Schweizerischen Nationalpark*, 4, 203–276.
- , 1965: Die Höhenlage von **subnivalen** Bodenformen. **Habilitationsschrift** Univ. Zürich.
- , 1972: Bewegungsmessungen auf **Solifunktionsdecken**. *Z. Geomorph. N. F. Suppl. Bd. 13*, 87–101.
- , 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, 267–270.
- FURRER, G. und BACHMANN, F., 1972: Solifunktionsdecken im schweizerischen Hochgebirge als Spiegel der postglazialen **Landschaftsentwicklung**. *Z. Geomorph., N. F., Suppl. Bd. 13*, 163–172.
- FURRER, G., BACHMANN, F. und FITZE, P., 1971: Erdströme als Formelemente von **Solifunktionsdecken** im Raum Munt Chavagl / Munt **Buffalora** (Schweizerischer Nationalpark). *Ergebn. d. wiss. Unters. im Schweizerischen Nationalpark* 11, 189–269.

- FURRER, G. und FITZE, P., 1970: Beitrag zum Permafrostproblem in den Alpen. *Vierteljahresschrift d. Naturf. Ges. Zürich* 115,353–368.
- FURRER, G., GAMPER-SCHOLLENBERGER, B. und SUTER, J., 1978: Zur Geschichte unserer Gletscher in der Nacheiszeit. In: Gletscher und Klima, Jahrbuch der Schw. Naturf. Ges. 1978 (im Druck).
- FURRER, G., LEUZINGER, H. und AMMANN, K., 1975: Klimaschwankungen während des alpinen Postglazials im Spiegel fossiler Böden. *Vierteljahresschrift d. Naturf. Ges. Zürich* 120, 15–31.
- GAMPER, M., 1976: Bewegungs- und Temperaturmessungen an Erdströmen am Munt Buffalora (Schweizerischer Nationalpark). Diplomarbeit, Manuskript Univ. Zürich.
- GAMPER, M. und SUTER, J., 1978: Der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Länge von Gletscherzungen. *Geographica Helvetica* 33,183–189.
- GEIGER, R., 1961: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig, 4. Aufl.
- GENSLER, G. A., 1978: Das Klima von Graubünden. Arbeitsber. d. Schweiz. Meteor. Zentralanstalt Zürich 77.
- , 1980: Bericht der Wissenschaftlichen Nationalpark-Kommission: Meteorologie. In: Verhandlungen der Schw. Naturf. Ges., Administrativer Teil, Bern (im Druck).
- GEYH, M. A., 1970: Möglichkeiten und Grenzen der Radiokohlenstoff-Altersbestimmung von Böden – Methodische Probleme. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 10,239–241.
- , 1971: Die Anwendung der ¹⁴C-Methode. *Clanthaler Tektonische Hefte* 11.
- GEYH, M. A., BENZLER, J.-H. und RÖSCHMANN, G., 1971: Problems of dating pleistocene and holocene soils by radiometric methods. In: YAALON, D. H.: Paleopedology – origin, nature and dating of paleosols. Jerusalem.
- GRAF, K., 1970: Untersuchungen an Soliflukationsformen im Raum Ofenpass – Unterengadin. Diplomarbeit, Manuskript Univ. Zürich.
- , 1971: Beiträge zur Soliflukation in den Bündner Alpen (Schweiz) und in den Anden Perus und Boliviens. Diss. Univ. Zürich.
- , 1976: Zur Mechanik von Frostmusterungsprozessen in Bolivien und Ecuador. *Z. Geomorph. N. F.* 20, 417–447.
- HANTKE, R., 1978: Eiszeitalter. Bd. 1. Thun.
- HARRIS, C., 1972: Processes of soil movement in turf-banked solifluction lobes, Okstindan, northern Norway. In: PRICE, R. J. und SUGDEN, D. E.: Polar Geomorphology Inst. of British Geographers special publication 4, 155–173.
- , 1973: Some factors affecting the rates and processes of periglacial mass movements. *Geografiska Annaler* 55 A, 24–28.
- HARTGE, K. H., 1978: Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart.
- HÖLLERMANN, P. W., 1964: Rezente Verwitterung, Abtragung und Formenschatz in den Zentralalpen am Beispiel des oberen Suldentales (Ortlergruppe). *Z. Geomorph. N. F., Suppl.* Bd. 4, 1–257.
- , 1967: Zur Verbreitung rezenter periglazialer Kleinformen in den Pyrenäen und Ostalpen. *Göttinger Geogr. Abhandl.* 40.
- JÄCKLI, H., 1957: Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebietes. *Beitr. z. Geol. d. Schweiz, Geotechn. Serie* 36.
- JACKSON, M. L., 1962: Soil chemical analysis. London.
- JAHN, A. und CIELINSKA, M., 1974: The rate of soil movement in the Sudety Mountains. *Abh. d. Akademie d. Wiss. in Göttingen, Math.-Phys. Klasse, III. Folge*, 29, 86–101.
- KARAGOUNIS, K., 1962: Zur Geologie der Berge zwischen Ofenpass, Spöltal und Val del Gallo im Schweizerischen Nationalpark (Graubünden). *Ergebn. d. wiss. Unters. im Schweiz. Nat.-Park* 7, 376–452.
- KARTE, J., 1979: Räumliche Abgrenzung und regionale Differenzierung des Periglaziärs. *Bochumer Geogr. Arbeiten* 35.
- KASPER, G., 1973: Untersuchungen an Soliflukationsformen mit Hilfe der Nahbereichsphotogrammetrie. Diss. Univ. Zürich.
- LAMB, H. H., 1977: Climate: Present, past and future. Vol. 2: Climatic history and the future. London.

- LÜDERS, R. et al., 1970: Möglichkeiten und Grenzen der Radiocarbon-Altersbestimmung von Böden. II. Probleme der bodengenetischen Auswertung. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **10**, 242–245.
- MATHYS, H., 1973: Klimatische Aspekte zu der Frostverwitterung in der Hochgebirgsregion, Geogr. Inst. Univ. Bern.
- , 1974: Klimatische Aspekte zur Frostverwitterung in der Hochgebirgsregion, Mittl. d. Natrf. Ges. Bern. N. F. **31**, 49–62.
- MÜLLER-VONMOOS, M., 1971: Zur Korngrößenfraktionierung tonreicher Sedimente. Beitr. z. Geol. d. Schweiz, kl. Mittl. **54**, 245–257.
- PANZA, A., 1979: Contribution à l'étude des formations périglaciaires dans le Jura. Bulletin de la Société Neuchâteloise de Géographie **24**, 1–186.
- PATZELT, G., 1977: Der zeitliche Ablauf und das Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Alpen. In: FRENZEL, B.: Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Europa. Erdwissenschaftliche Forschung **13**, 248–259.
- PATZELT, G. und BORTENSCHLACER, S., 1973: Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). Z. Geomorph. N. F., Suppl. Bd. **16**, 25–72.
- RÖTHLISBERGER, F., 1976: Gletscher- und Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpècle und Arolla. Die Alpen **52**, 59–152.
- RÖTHLISBERGER, F. und SCHNEEBELI, W., 1979: Genesis of lateral moraine complexes, demonstrated by fossil soils and trunks; indicators of postglacial climatic fluctuations. In: SCHLÜCHTER, CH.: Moraines and varves. Rotterdam.
- RUCKLI, R., 1950: Der Frost im Baugrund. Wien.
- RUBBERG, S., 1958: Some observations concerning mass movement on slopes in Sweden. Meddelan från Uppsala Univ. Geografiska Institution, Ser. A, No. 126, 114–125.
- , 1964: Slow mass movement processes and slope development in the Norra Storfjäll area, southern Swedish Lapland. Z. Geomorph. N. F., Suppl. Bd. **5**, 192–203.
- SACHS, L., 1974: Angewandte Statistik. Berlin, Heidelberg, New York, **4. Aufl.**
- SCHAEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P., 1979: Lehrbuch der Bodenkunde., Stuttgart. **10. Aufl.**
- SCHMID, J., 1955: Der Bodenfrost als morphologischer Faktor. Heidelberg.
- SCHNEEBELI, W., 1976: Untersuchungen von Gletscherschwankungen im Val de Bagnes. Die Alpen **52**, 5–57.
- SCHUNKE, E. und STINGL, H., 1973: Neue Beobachtungen zum Luft- und Bodenfrostklima Islands. Geografiska Annaler **55** A, 1–23.
- SPITZ, A. und DYHRENFURTH, G., 1915: Monographie der Engadiner Dolomiten zwischen Schuls, Scans und dem Stilsferjoch. Beitr. z. Geol. Karte d. Schweiz, N. F. **44**.
- STAUB, R., 1946: Geologische Karte der Berninagruppe 1:50 000. Spezialkarte Nr. 118.
- STEINMANN, S., 1978: Postglaziale Reliefgeschichte und gegenwärtige Vegetationsdifferenzierung in der alpinen Stufe der Südtiroler Dolomiten (Puez- und Sellagruppe). Landschaftsgenese und Landschaftsökologie **2**.
- STOCKER, E., 1973: Bewegungsmessungen und Studien an Schrägterrassen an einem Hangauschnitt in der Kreuzeckgruppe (Kärnten). In: Beiträge zur Klimatologie, Meteorologie und Klimamorphologie, Festschrift für HANNS TOLLNER zum 70. Geburtstag. Arb. a. d. Geogr. Inst. d. Univ. Salzburg **3**, 193–203.
- TROLL, C., 1943: Die Frostwechselhäufigkeit in den Luft- und Bodenklimaten der Erde. Meteorologische Zeitschrift **60**, 161–171.
- , 1944: Strukturböden, Solifluktion und Frostklimata der Erde. Geol. Rundschau **34**, 545–694.
- TSYTOVICH, N. A., 1975: The mechanics of frozen ground. New York.
- 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**.

on-Altersbestimmung von
Dtsch. **Bodenkundl. Ges.**

n der Hochgebirgsregion,

gsregion, Mittl. d. Naturf.

Sedimente. Beitr. z. Geol.

ans le Jura. Bulletin de la

limaschwankungen in den

ichschwankungen in Europa.

cher- und Klimaschwan-

ph. N. F., Suppl. Bd. 16,

m Zermatt, Ferpècle und

rairie complexes, demon-

strations. In: SCHLÜCKER

opes in Sweden. Meddelan

he Norra **Storfjäll** area,

203.

. Antl.

le., Stuttgart. **10. Aufl.**

'g-

im Val de **Bagnes**. Die

und Bodenfrostdklima Is-

omiten zwischen **Schuls,**

4

lkarte Nr. **118.**

vegetationsdifferenzierung

(pp). **Landschaftsgenese**

sen an einem **Hangaus-**

ologie, Meteorologie und

g. **Arb. a. d. Geogr. Inst.**

ten der Erde. **Meteorolo-**

Rundschau **34, 545-694.**

lagerungsformen in der

odentemperaturmessun-

pp). **Münchner Geogr.**

WASHBURN, A. L., 1960: Instrumentation for mass-wasting and patterned-ground studies in north-east **Greenland**. **Biuletyn Peryglacjalny** **8, 59-64.**

- , 1970: Instrumental **observations** of mass-wasting in an arctic climate. **Z. Geomorph. N. F.**, Suppl. Bd. 9, 102-118.

- , 1973: **Periglacial** processes and **environments**. London.

- , 1979: **Geocryology: A survey of periglacial** processes and environments. London.

WILLIAMS, P. J., 1957: The **direct** recording of **solifluction** movements. **American Journal of Science** **255, 705-715.**

- , 1961: **Climatic** factors controlling the distribution of certain **frozen** ground phenomena. **Geografiska Annaler** **43, 339-347.**

WILKOMM, H., 1976: **Altersbestimmungen** im Quartär. München.

WORSLEY, P. und **HARRIS, C.**, 1974: **Evidence** for neoglacial **solifluction** at Okstindan, north Norway. **Arctic** **27, 128-144.**

ZUBER, E., 1968: **Pflanzensoziologische** und ökologische Untersuchung an **Strukturrasen** (besonders **Girlandenrasen**) im Schweizerischen Nationalpark. **Ergebn. d. wiss. Unters. im Schweizerischen Nationalpark** **11, 79-158.**

ZOLLER, H., 1977: Alter und Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Schweizer Alpen. In: **FRENZEL, B.**: Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in **Europa**. **Erdwissenschaftliche Forschung** **13, 271-281.**