

- QUEZEL, P. (1965): La végétation du Sahara. Du Tchad à la Mauritanie. Geobotanica selecta. Bd. 2. Stuttgart.
- RANZ, E., SCHNEIDER, S. (1970): Der Äquidensitenfilm als Hilfsmittel bei der Photointerpretation. Bildmessung u. Luftbildwesen 123–134.
- REUSS, J., (1968): Die photogrammetrischen Aspekte der meteorologischen Satellitenbild-Interpretation. Allg. Vermess. Nachr. 7, 289–298.
- SCHOKALSKAJA, S. J. (1953): Die Böden Afrikas. Berlin.
- URVOY, Y. (1937): Notes sur la végétation au Sahara soudanais central. Ann. de Géogr. 46, 270–277.
- WOBBER, F. J. (1968): Orbital photography: applied earth survey tool. Phot. Appl. in Science 7, 21–29.
- WOBBER, F. J. (1969): Environmental studies using earth orbital photography. Photogrammetria 24, 107–165.
- ZEISS – Weltraumkalender 1970.

ABGRENZUNG UND GLIEDERUNG DER HOCHGEBIRGSSTUFE DER ALPEN MIT HILFE VON SOLIFLUKTIONSFORMEN

Mit 6 Abbildungen, 4 Photos und 2 Tabellen

GERHARD FURRER / GUIDO DORIGO*

Summary: Delineation and classification of the high mountain area of the Alps with the aid of solifluction forms.

The IGU Commission on High-Altitude Geoecology proposes the following three criteria for the delineation of the high-mountain area: the upper limit of forest, the snow line of the glacial period, and the lower limit of the solifluidal processes currently at work.

In the research presented here the delineation of the so-called "high region" of the Swiss Alps follows the third criterion, i. e., the use of certain forms of solifluction that takes place under the vegetation cover, called "Girlanden" (see Fig. 3) and "Wanderblöcke" (shifting boulders). These solifluidal forms are mapped in the field along chosen routes. Their vertical distribution reveals a frequency of occurrence of a normal distribution. Hence, within a zone of \pm one standard deviation from the average altitude of the phenomenon in question, nearly 70% of all the findings of that particular form should be situated. This is called the core zone. (See Figs. 1–3.)

The limit of solifluction is defined as the arithmetic average of lower limits of the core zone of "Wanderblöcke" and "Girlanden". The limit of solifluction was determined for forty-eight areas within the Swiss Alps and thereupon statistically generalized with the use of a regression equation (Fig. 4).

Zur Abgrenzung der Hochgebirgsstufe schlug TROLL (1955) die drei folgenden Kriterien vor:

- die heutige obere Waldgrenze als Ausdruck der gegenwärtigen klimatischen und vegetationskundlichen Verhältnisse
- die (letz-)eiszeitliche Schneegrenze als Ausdruck des im Eiszeitalter entstandenen, heute noch in Vorzeitformen vorhandenen und das Hochgebirge beherrschenden Formenschatzes
- die rezente Untergrenze der subnivalen Bodenabtra-

gung als Ausdruck der gegenwärtigen bodenkundlichen und geomorphologischen Dynamik (Untergrenze der gegenwärtigen solifluidalen Vorgänge)

Auch die Kommission für erdwissenschaftliche Forschung der Mainzer Akademie der Wissenschaften und der Literatur (Jahrbuch 1970) hält weiterhin an diesen drei Kriterien zur unteren Begrenzung der Hochgebirgslandschaften fest.

Die gegenwärtige obere Waldgrenze ist in den Alpen schwer zu erfassen, da sie in hohem Maße anthropogen beeinflusst worden ist. Noch größeren Schwierigkeiten begegnet die Rekonstruktion der (letz-)eiszeitlichen Schneegrenze. Hingegen eröffnet sich, wie die nachfolgenden Ausführungen darzulegen suchen, in der Abgrenzung der Hochgebirgsstufe mit Hilfe der Solifluktionen(unter)grenze ein durchaus erfolgversprechender Weg.

Die „subnivale Höhenstufe“ (von einzelnen Autoren auch als „rezentes Periglazial“ bezeichnet) erstreckt sich von der Solifluktionen(unter)grenze zur Schneegrenze. Ihr Formenschatz bildet seit etwa 30 Jahren das Objekt geomorphologischer Untersuchung. Dabei liegt u. a. das Schwergewicht auf dem Studium der Verbreitung von Solifluktionsformen, sowohl im Hinblick auf das Problem der Grenzziehung als auch, um Auskunft über die Entstehungsbedingungen von subnivalen Formen zu erhalten.

In der subnivalen Höhenstufe bildet zwar die Solifluktion nicht den einzigen Vorgang, der reliefgestaltend wirkt, doch kommt ihr auf Flächen, deren Neigungswinkel einen Maximalwert von etwa 30° nicht übersteigt, die wesentlichste Bedeutung zu. Das Kleinrelief nämlich ist weitgehend durch die Auswirkung solifluidaler Vorgänge geprägt (vgl. auch KAISER, 1965). Somit dürfen Solifluktionsformen im Sinne des 3. Kriteriums von TROLL zur Grenzziehung herangezogen werden, da sie das ausgesprochene Charakteristikum für die subnivale Bodenabtragung bilden. Auf

* Wir danken der Stiftung für wissenschaftliche Forschung an der Universität Zürich für die Unterstützung unserer Feldarbeit.

stärker geneigten Hängen treten fluvial-lineare Prozesse und flächenhafte Abspülung an Stelle der solifluidalen Massenverlagerung. Außerdem sind Schnee (Nivation) und Wind (u. a. Deflation) an der Reliefbildung beteiligt.

Bei Verbreitungsstudien von Solifluktuionsformen als Wirkungen solifluidaler Massentransporte ergeben sich Schwierigkeiten beim Problem der Grenzziehung, und zwar aus zwei Gründen:

1. In der Natur liegen keine Grenzlinien, sondern Grenzsäume vor. Zwischen Kernbereichen von nach bestimmten Formen ausgesonderten Höhenstufen bestehen Übergangsbereiche, in denen für die benachbarten Stufen charakteristische Erscheinungen in geringerer Häufigkeit mit den stufentypischen Formen vergesellschaftet auftreten.
2. Zum Stillstand gelangte oder noch wirkende Solifluktion prägt sich nicht durchwegs in augenfälligen Oberflächenformen aus. Solifluktuionsdecken aber sind im Feld nicht ohne weiteres erkennbar, wenn sie keine oberflächliche Strukturierung aufweisen. Solifluidale Vorgänge, die sich unter Vegetationsdecken abwickeln, entziehen sich gern der unmittelbaren Beobachtung. Mit Recht weist KAISER (1970) darauf hin, daß selbst unter dichtem Pflanzenwuchs, ja sogar unter Wald, das Bodenfließen – wenn auch stark gehemmt – durchaus wirksam sein kann. In solchen Fällen läßt sich der solifluidale Charakter nur durch eingehende Untersuchung fassen (Situmetrie, Dünnschliffe und andere Methoden).

Aus diesen Gründen stützen wir uns beim Kartieren auf die häufigsten und deutlich sichtbaren Äußerungen der Solifluktion, nämlich auf Strukturböden (Steinringe und -polygone auf horizontalen und Steinstreifen auf geneigten Flächen) als Vertreter der Großformen und Erdstreifenböden als Vertreter der Kleinformen (Miniaturform), auf Erdströme als zungenförmige Ausläufer großer Wanderschuttdecken sowie auf Girlanden und Wanderblöcke (vgl. Photo 1–4).

Strukturböden und Erdstreifen sind als Formen der ungebundenen Solifluktion in der Frostschuttstufe beheimatet, Girlanden (gebundene oder gehemmte Solifluktuionsform) und Wanderblöcke gehören der Mattenstufe an, während Erdströme vorwiegend im Übergangssaum von der Frostschutt- zur Mattenstufe (alpiner Rasen) auftreten (Abb. 1). Es erfolgt somit beim Kartieren bewußte Beschränkung auf Formtypen, die sicher angesprochen werden können.

1. Ergebnisse von Routenkartierungen

Grundsätzlich lassen sich Flächen oder Routen bezüglich ihres Formschatzes kartieren. Routenkartierungen haben den Vorteil, daß sie in kürzerer Zeit eine Aussage über die vertikale Verbreitung der untersuchten Formtypen ermöglichen. Beim Kartieren eines Formtyps stellt sich die Frage der Wertung einer Fundstelle in qualitativer und quantitativer Hinsicht.

Qualitativ lassen sich bei jedem Formtyp zwei Ausprägungsgrade auseinanderhalten (FURRER 1965):

1. Form deutlich erkennbar, alle charakteristischen Merkmale vorhanden, Form aber nicht optimal ausgebildet
2. gut ausgebildete Form

FITZE (1969) wies bei Girlanden nach, daß sich schlecht ausgebildete Formen gleichmäßig über das ganze vertikale Verbreitungsgebiet dieses Formtyps verteilen, während sich gut ausgebildete Vertreter um die mittlere Höhenlage ihres Verbreitungsgebietes häufen (vgl. gleichen Hinweis für alle Formtypen bei FURRER 1965 „Kernzone“). Um Verbreitungsgebiete abzugrenzen, ist außerdem die Erkenntnis von FITZE wichtig, daß eine Wertung in qualitativer Hinsicht die Aussagen über mittlere Höhenlage und Ausdehnung der „Kernzone“ (Zone des häufigsten Vorkommens innerhalb eines vertikalen Verbreitungsgebietes) kaum beeinflussen kann.

Quantitative Gewichtung kann beim Kartieren mit Hilfe des „Bedeckungsgrades“ (FITZE 1969) oder durch Setzen mehrerer Symbole für eine große, mit einem bestimmten Formtyp gemusterte Fläche erreicht werden (FURRER 1965). Beim Ersteren wird eine Testfläche abgegrenzt und geschätzt, ob mehr oder weniger als 50% dieser Fläche gemustert sei. Sofern bei ein und demselben Formtyp zahlreiche Beobachtungen vorliegen, zeigt die Praxis, daß auch auf eine quantitative Gewichtung einer Fundstelle verzichtet werden kann, wenn lediglich Auskunft über die Verbreitung bezüglich der Höhenlage dieses Formtyps gewünscht wird.

Aus Abb. 1 geht hervor, wie man mit Hilfe der vorliegenden Kartierung die Hochgebirgsstufe abgrenzen und gliedern kann. Bemerkenswert sind dabei zwei Feststellungen:

1. Obwohl an der Waldgrenze und zwischen den höchsten Waldausläufern auf jeder Route zahlreiche Blöcke herumliegen, beginnen diese erst in einer bestimmten, über der Waldgrenze liegenden Höhe zu wandern.
2. Jeder Formtyp tritt in der mittleren Höhenlage seines Verbreitungsgebietes gehäuft auf (Kernzone). Diese Kernzone enthält rund 2/3 aller Vorkommen (FURRER 1965). DORIGO (1969) und FITZE (1969) kommt das Verdienst zu, darauf hingewiesen zu haben, daß die vertikale Verbreitung ein und desselben Formtyps Ähnlichkeit mit einer Normalverteilung aufweist.

Die Form der Häufigkeitsverteilungskurve wird ausschließlich durch die beiden Parameter Mittelwert und Streuung der vertikalen Fundverbreitung bedingt. Testen wir die der vorliegenden Kartierung aus dem Lötschental zugrunde liegenden Beobachtungen in dieser Hinsicht, ergibt sich das in Abb. 1 auf der rechten Seite festgehaltene Resultat. Wir sind uns zwar bewußt, daß die zur Verfügung stehende Datenmenge

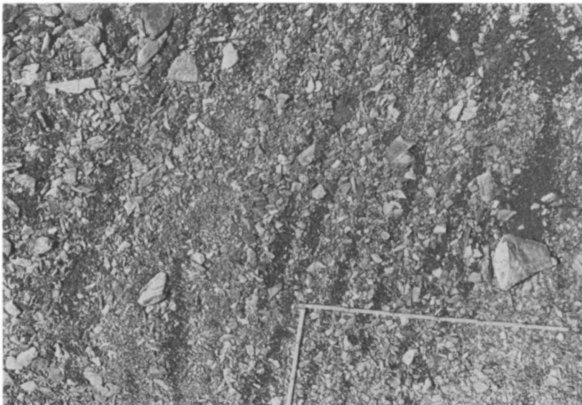


Photo 1: Ausschnitt aus einem Strukturboden (Großform), im Zentrum ist ein Steinpolygon von über 1 m Durchmesser sichtbar. Dieser Strukturboden liegt über Permafrost. Maßstab 1 m (längsseitenparallele Strecke). Fuorcla da Fäller ob Juf im Avers, 2850 m

Photo 3: Girlanden-Boden. Munt Chavagl (Schweiz. Nationalpark), um 2400 m
Girlanden forms. Munt Chavagl (Swiss National Park), around 2400 m

Part of a structural earthform (major), in the centre a stone polygon with a diameter of more than 1 metre is visible. This structural earth form overlies permafrost. Scale 1 metre (longside parallel stretch). Fuorcla da Fäller above Juf in the Avers, 2850 m

Photo 4: Solifluktionsdecke, die sich talwärts in drei Erdströme auflöst (die beiden seitlichen sind nur teilweise sichtbar). Munt Chavagl, 2450 m
Solifluction blanket, dissolving downhill in three earthflows (the two outside ones are only partially visible). Munt Chavagl 2450 m

Photo 2: Ausschnitt aus einem Erdstreifenboden. Maßstab 120 cm. Parpaner Rothorn, um 2800 m
Part of an earthstripe form. Scale 120 cm. Parpaner Rothorn, around 2800 m

für eine solche Untersuchung recht gering ist. Doch erscheinen folgende Feststellungen hinreichend belegt:

1. Bei jedem Formtyp enthält die Kernzone (Bereich zwischen Mittelwert \pm Streuung) 68–76% der Beobachtungen (zum Vergleich: Normalverteilung 68,27%)
2. Praktisch alle Beobachtungen liegen im Bereich von Mittelwert \pm 2 \times Streuung (im Falle einer Normalverteilung: 95,45%).

Tabelle 1 faßt die Beobachtungen über die vertikale Verteilung von Solifluktionsformen in Graubünden

zusammen. Werden die erfaßten Streifenvorkommen auf eine Normalverteilung hin überprüft, zeigt sich, daß die Kernzone 69% aller Funde enthält und daß innerhalb des Mittelwertes \pm 2 \times Streuung 96,8% aller Beobachtungen liegen. Dieser und weitere Tests ergeben tatsächlich, daß die Häufigkeitsverteilung der Fundstellen jedes kartierten Formtyps auf eine Normalverteilung schließen läßt.

Um die Kartierung im Gelände zu vereinfachen, kann sogar auf eine Gewichtung der Fundstellen bezüglich ihrer flächenhaften Ausdehnung – wie dies im Falle des Lötschentales geschah – verzichtet werden. Die folgende Zusammenstellung zeigt, daß sich dabei

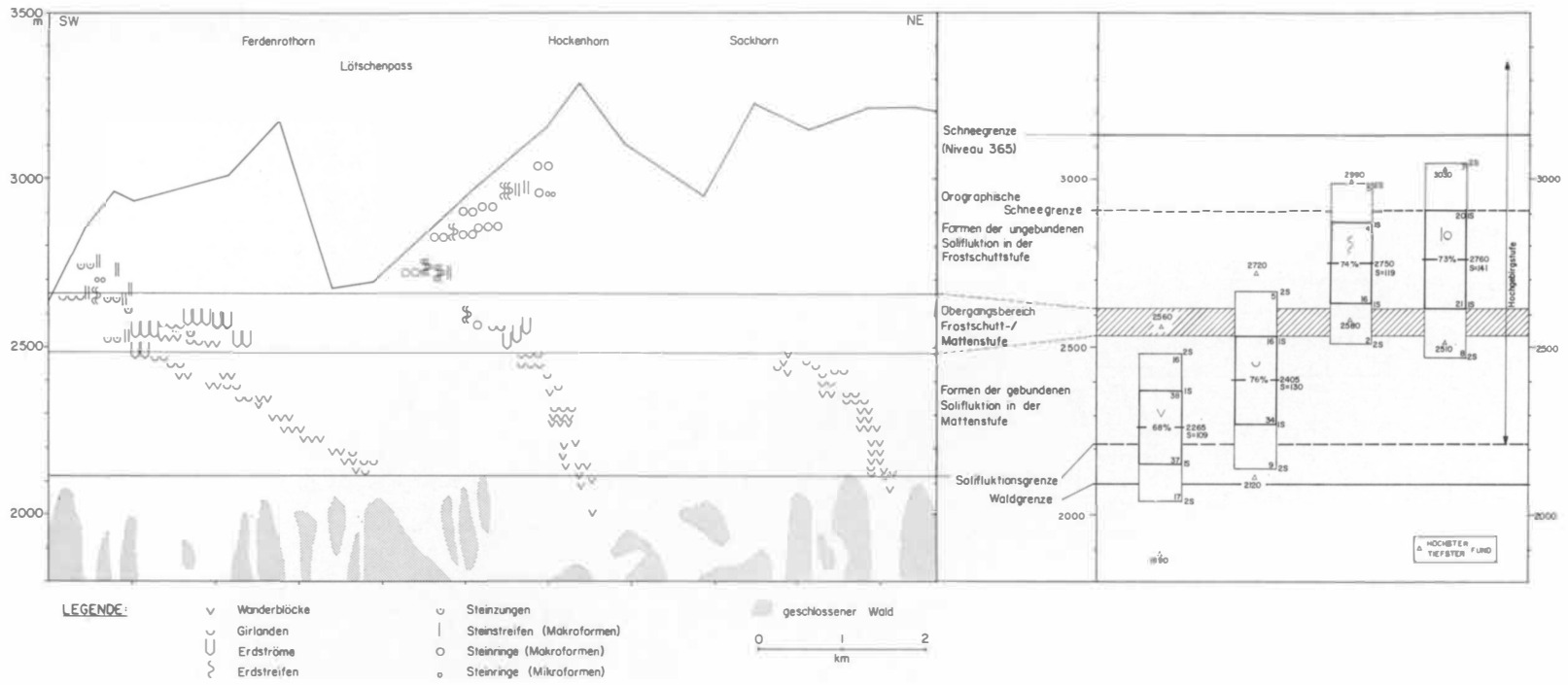


Abb. 1: Drei Routenkartierungen aus dem Lötschental (links) und die mathematische Auswertung der Beobachtungsdaten (rechts)
 Die Formen wurden in Vertikalabständen von je 10 m aufgenommen. Fundstellen mit großer flächenhafter Ausdehnung sind durch Setzen von bis zu drei Symbolen gewichtet. Die Festlegung der Solifluktionsgrenze erfolgt in jener Höhenlage, ab welcher die Solifluktionsformen gehäuft auftreten. Aus der graphischen Darstellung der Häufigkeit des Auftretens von Girlanden und Wanderblöcken resultiert eine Grenze, die bei allen drei Routen in der gleichen Höhe anzusetzen ist. – Rechts sind die Kernzonen (mittlere Höhenlage +/- Streuung S) und die Anzahl der darin liegenden kartierten Vorkommen absolut und relativ eingetragen, berechnet unter der Annahme einer Normalverteilung. Bei der Darstellung der vertikalen Verbreitung der Erdstreifen beispielsweise liegen 74% aller beim Kartieren gesetzter Symbole innerhalb der Kernzone, in absoluten Zahlen 4 über und 16 unter der mittleren Höhenlage aller kartierten Erdstreifenfundstellen. – Die Solifluktionsgrenze erscheint als arithmetisches Mittel der Kernzonenuntergrenzen von Wanderblöcken und Girlanden, und die orographische Schneegrenze wird an der Obergrenze der Kernzonen von Großformen der Strukturböden angesetzt.

Three route maps the Lötschen valley (left) and the mathematical evaluation of the observed data (right) –
 The forms were recorded at vertical intervals of 10 m. Sites of greater areal extent are weighted by columns of up there symbols. The delimitation of the solifluction boundary is made at the altitude from which the solifluction forms occur in large numbers. From the graphical presentation of the frequency of occurrence of Girlanden and Wanderblöcken a boundary is derived which can be located at the same height on all three routes; to the right are the core zones (medium altitude +/- scattering S) with the number of deposits mapped within them entered both in absolute and relative terms, calculated on the assumption of a normal distribution. It can be seen for example by the presentation of the vertical distribution of earth stripes, that 74% of all the mapped symbols fall within the core zone, in absolute values 4 over and 16 under the average altitude of all mapped earth-stripe sites. – The solifluction boundary appears as the arithmetic average of the lower boundary of the core zones of Wanderblöcke and Girlanden and the orographic snow line is taken as the upper boundary of the core zone of major forms of the soil structures.

<i>Steinstreifen</i>	N	S	W	E	
Anzahl	180	62	37	43	38
Mittlere Höhenlage (m)	2'809	2'751	2'836	2'851	2'830
Streuung	202	164	254	199	193
<i>Steinzungen</i>	N	S	W	E	
Anzahl	97	32	31	23	11
Mittlere Höhenlage (m)	2'771	2'653	2'845	2'818	2'811
Streuung	141	124	126	97	83
<i>Steinringe, -polygone</i>	<i>alle Strukturböden (Steinstreifen, -zungen, -ringe)</i>				
Anzahl	168		445		
Mittlere Höhenlage (m)	2'780		2'790		
Streuung	138		168		
<i>Erdstreifen (Miniaturform)</i>	N	S	W	E	
Anzahl	285	41	102	100	42
Mittlere Höhenlage (m)	2'792	2'669	2'825	2'784	2'850
Streuung	164	88	154	169	174
<i>Erdströme</i>	N	S	W	E	
Anzahl	308	55	116	85	52
Mittlere Höhenlage (m)	2'544	2'495	2'600	2'541	2'475
Streuung	171	152	170	187	120
<i>Girlanden</i>	N	S	W	E	
Anzahl	645	82	294	161	108
Mittlere Höhenlage (m)	2'488	2'470	2'503	2'486	2'467
Streuung	205	177	226	196	176
Untergrenze der Kernzone	2'283	2'293	2'277	2'290	2'291
<i>Wanderblöcke</i>	N	S	W	E	
Anzahl	276	86	116	39	35
Mittlere Höhenlage (m)	2'454	2'423	2'472	2'525	2'391
Streuung	172	161	180	146	164
Untergrenze der Kernzone	2'282	2'262	2'292	2'379	2'227
<i>Solifuktionsgrenze als Mittelwert der Kernzonenuntergrenze von Girlanden und Wanderblöcken</i>	2'283	2'278	2'285	2'335	2'259

nur geringfügige, für großräumige Betrachtungen nicht ins Gewicht fallende Verschiebungen ergeben (Tabelle 2):

Endlich steht die Frage des Einflusses der Exposition zur Diskussion. Aus Tabelle 1 geht hervor, daß die mittlere Höhenlage aller Solifuktionsformen in Südexposition höher verläuft als auf nordexponierten Hängen (vgl. dazu FURRER 1969). Außerdem fällt auf, daß besonders die Girlanden auf südexponierten Flä-

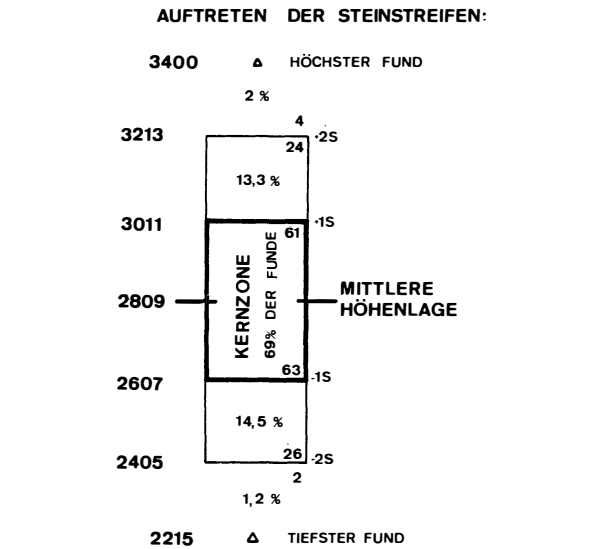


Tabelle 1: Die vertikale Verbreitung der kartierten Fundstellen von Solifuktionsformen in Graubünden. Diese Tabelle bildet die Grundlage von Abb. 2, linke Seite; in dem der Abb. 2 beigegefügt Text ist die Art der Kartierung beschrieben. – Von den Großformen der Strukturböden sind die Steinringe und -polygone als Formen praktisch horizontaler Flächen, Steinstreifen und -zungen als Formen geneigter Flächen gesondert sowie zusammengefaßt aufgeführt. Bei jedem Formtyp ist die Anzahl der kartierten Fundstellen, ihre mittlere Höhenlage sowie die Streuung angegeben.

The vertical distribution of the mapped sites of solifluction forms in Grisons. This table forms the basis of Fig. 2, left side; in the text which accompanies Fig. 2 the type of mapping is described. Of the major structural earth forms, stone rings and polygons are shown separately and together as forms of practically horizontal areas, and stone stripes and tongues are shown as forms of sloping areas. For every type of form the number of mapped sites, their average altitude and their distribution is given.

chen am häufigsten auftreten. Wir legen nun die Solifuktionsgrenze als arithmetisches Mittel aus den Kernzonenuntergrenzen von Girlanden und Wanderblöcken fest. Dabei zeigt sich, daß diese Grenze bei allen Expositionen auf praktisch gleicher Höhe durchzieht. Daraus folgern wir, daß für ihre Festlegung auf die Ermittlung von Expositionsunterschieden verzichtet werden kann.

Bei der Auswahl von Routen, die kartiert werden

Tabelle 2

Region Bernina-Bergell		mittlere Höhenlage	Streuung (S)
Großformen der Strukturböden	gewichtet	2835 m	128 m
	nicht gewichtet	2790 m	110 m
Erdstreifen	gewichtet	2810 m	113 m
	nicht gewichtet	2800 m	95 m
Girlanden	gewichtet	2580 m	150 m
	nicht gewichtet	2535 m	170 m

sollen, muß – neben dem Relief, das genügend Flächen von bis zu 30° Neigung aufweisen soll – den petrographischen Provinzen Beachtung geschenkt werden. Felduntersuchungen haben nämlich ergeben, daß das Auftreten von Solifluktsformen auch durch Gesteinsunterschiede beeinflusst wird. Die Lage der Solifluktsgrenze kann sich daher beim Übertritt von einer petrographischen Provinz in eine andere sprunghaft verlagern (FURRER und FITZE, 1970). Wir fordern deshalb, daß möglichst alle petrographisch verschiedenen Flächen einer Region mit Routen zu belegen sind.

2. Zusammenfassung von regionalen Routenkartierungen zu einem Gesamtbild

Es soll mit Hilfe von Solifluktsformen die Untergrenze der subnivalen Bodenabtragung bestimmt werden. Da über der Soliflukts(unter)grenze die Zone der „gebundenen“ Soliflukts liegt, werden sämtliche Funde von Girlanden und Wanderblöcken (also von Formen der Mattenstufe) zur Grenzziehung herangezogen.

Wo innerhalb des gesamten Höhenprofils der solifluidalen Formen die Solifluktsgrenze angesetzt werden soll, wird heute intensiv diskutiert. Das Problem besteht vor allem darin, ob sie auf der Höhe der untersten Funde oder aber unter den letzten gehäuft auftretenden Formen zu lokalisieren ist. Da die untersten Funde oft weit außerhalb der Kernzone auftreten, kommen sie – gemäß der Normalverteilung – auch nur sehr selten vor. Daß gerade diese Formen bei einer Routenkartierung gefunden werden, ist nicht wahrscheinlich; aus diesem Grunde tendieren wir auf das andere Abgrenzungskriterium hin: Für jedes Untersuchungsgebiet wird das arithmetische Mittel der Kernzonenuntergrenze (mittlere Höhenlage – Streuung) von Girlanden und Wanderblöcken als Solifluktsgrenze definiert.

In Abb. 2 ist die Gliederung der Hochgebirgsstufe von Graubünden wiedergegeben, Tabelle 1 enthält die Grundlagen. Die Fundstellen wurden nach der Größe ihrer Ausdehnung gewichtet (große gemusterte Flächen sind dreifach gewertet, bei großer Höherestrek-

kung ein und desselben Formtyps erfolgte dessen Kartierung in Vertikalabständen von 30 m). Die 60 von FURRER kartierten Routen (Abb. 2: rechte Seite) sind über den gesamten Raum der Bündner Alpen – allerdings nicht gleichmäßig – verteilt. Verdichtet man die Kartierungen (Abb. 2: linke Seite) und stellt die Ergebnisse von zusätzlich weit über 60 Routenkartierungen der Schüler von FURRER zum selben Modell der Hochgebirgsstufe zusammen, erhält man ein gleiches Bild, allerdings mit geringfügigen Verschiebungen einzelner Kernzonen bei praktisch gleichbleibender Höhenlage der Solifluktsgrenze. Daraus ergibt sich, daß das subjektive Moment beim Kartieren im Feld bezüglich der Abgrenzung der Hochgebirgsstufe nicht ins Gewicht fällt.

In Abb. 3 werden zwei Regionen mit großer Massenerhebung aus dem W und dem E der Alpen miteinander verglichen (Raum um Zermatt, Raum Bernina – oberes Bergell). Wir pflegen die orographische Schneegrenze (FURRER und FITZE, im Druck) an der oberen Grenze der Kernzone der Großformen der Strukturböden anzusetzen. Es zeigt sich nun, daß in beiden Fällen die klimatische Schneegrenze (Niveau 365, ESCHER 1970) rund 200 m höher liegt als die orographische und daß der Abstand klimatische Schneegrenze – Solifluktsgrenze in verschiedenen Regionen nicht gleich groß ist.

Im schweizerischen Alpenbereich wurden 48 Regionen in gleicher Weise wie die beiden Räume „Zermatt“ und „Bergell/Bernina“ bearbeitet. Als Resultat erhält man 48 Punkte der Solifluktsgrenze, die in Lage und Höhe bestimmt sind. Mit Hilfe dieser Kontrollpunkte soll die Solifluktsgrenze – eine Fläche durch die Alpen – bestimmt werden. Da nicht alle dieser 48 Werte dieselbe Genauigkeit aufweisen, suchten wir diese von ihnen aufgespannte Oberfläche zu generalisieren und aus den 48 Regionalwerten ein Modell der Solifluktsgrenze in den Alpen mit einem meßbaren Abstraktionsgrad zu erstellen. Im allgemeinen beinhaltet eine derartige statistische Generalisation die Anpassung einer einfachen, multiplen oder dreidimensionalen Regression an die Kontrollwerte. Es wird dazu ein mathematisches Modell erstellt, eine Abstraktion, in welcher das darzustellende Thema durch einen

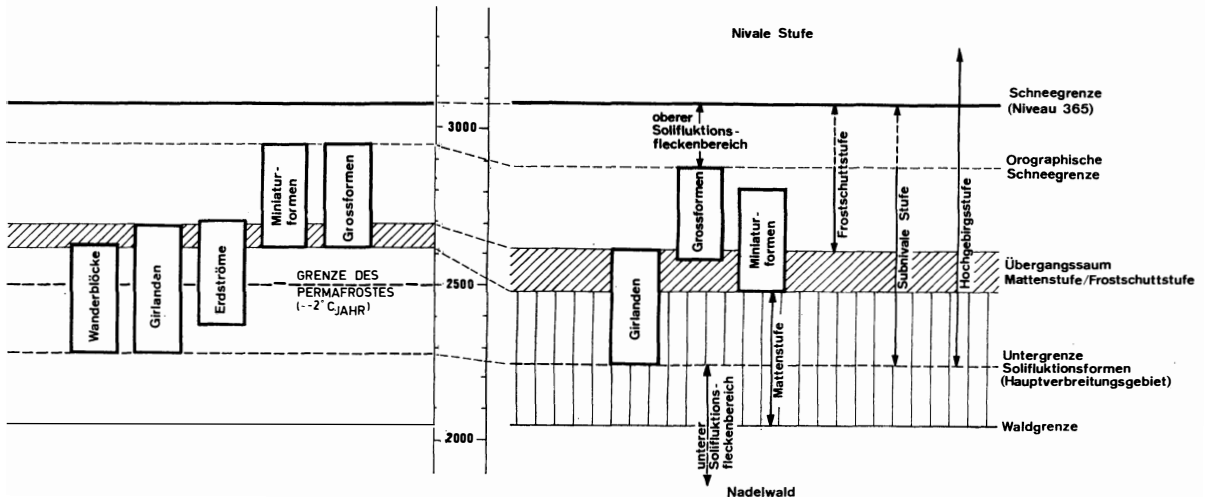


Abb. 2: Gliederung der Hochgebirgsstufe Graubündens

Die Darstellung der Kernzonen rechts beruht auf den Ergebnissen von 60 ungleichmäßig über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilten Routenkartierungen, aufgenommen von G. FURRER. Die Gliederung links basiert auf einem verdichteten Beobachtungsnetz, wobei zusätzlich weit über 60 Routen von andern Bearbeitern aufgenommen worden sind. Bei durchgehender Musterung ein- und derselben Fläche durch einen Formtyp wurde bis 30 m Vertikalabstand nur die mittlere Höhenlage kartiert, bei 30–60 m Vertikalabstand die Höhenlage der obersten und untersten Formen. Aus der Gegenüberstellung geht hervor, daß die Soliflukationsgrenze in beiden Fällen praktisch auf derselben Höhe verläuft.

Divisions of the high mountain area of the Grisons

The representation of the core zones to the right is based on the results of 60 route mappings distributed unevenly over the whole area of investigation, taken by G. FURRER. The division on the left is based on a denser network of observations in which well over 60 routes were recorded by other workers. In a thorough patterning of one and the same area through one form type, up to 30 m vertical distance only the average altitude was mapped, between 30–60 metres vertical distance the altitude of the uppermost and lowest forms. From the juxtaposition it can be seen that the solifluction boundary runs in both cases at the same height.

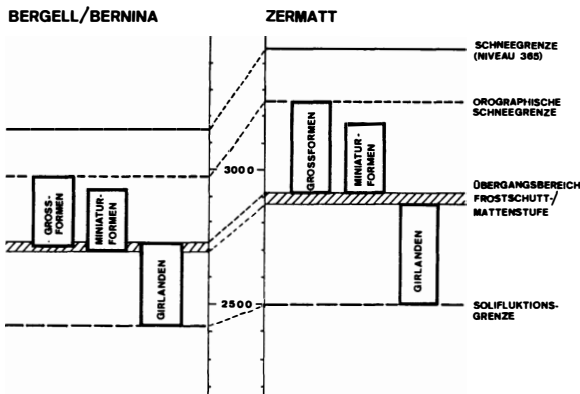


Abb. 3: Vergleich der Ausdehnung und Höhenlage verschiedener Kernzonen von zwei Regionen mit großer Massenerhebung

Die Fundstellen sind gewichtet (große Flächen bis dreimal), die Kartierung erfolgte in Vertikalabständen von 10 m

Comparison of the spread and altitudinal position of different core zones of two regions with large mass movement –

The sites are weighted (large areas up to three times), the mapping is done in vertical intervals of 10 m

Ausdruck ersetzt wird, der mathematische Variablen, Parameter und Konstanten enthält. Diese Methode der statistischen Generalisation mit einer „Trend Surface“ als Resultat ist nicht speziell auf die Geomorphologie zugeschnitten, eignet sich aber für unsere Fragestellung besonders deshalb, weil die derart gewonnene Fläche der Soliflukationsgrenze mit anderen, gleichartig erarbeiteten Oberflächen – Wald-, Schneegrenze – nicht nur graphisch, sondern auch quantitativ verglichen werden kann.

Die nachstehenden Computerkärtchen zeigen den Alpenraum der Schweiz südlich des Zürichsees vom Genfersee bis zur österreichischen Grenze. Es bedeuten:

*****: Landesgrenze der Schweiz

liegende „S“: Seen

-- Zentrale Achsen des km-Koordinatensystems in den Kärtchen:

x-Achse für y = 700 (Richtung N-S) ca. 8°45' E

y-Achse für x = 155 (Richtung W-E) ca. 46°30' N

— 100 m – Isohypsen der thematischen Oberfläche
liegende Zahlen: Dekameterwert zwischen den Isohypsen

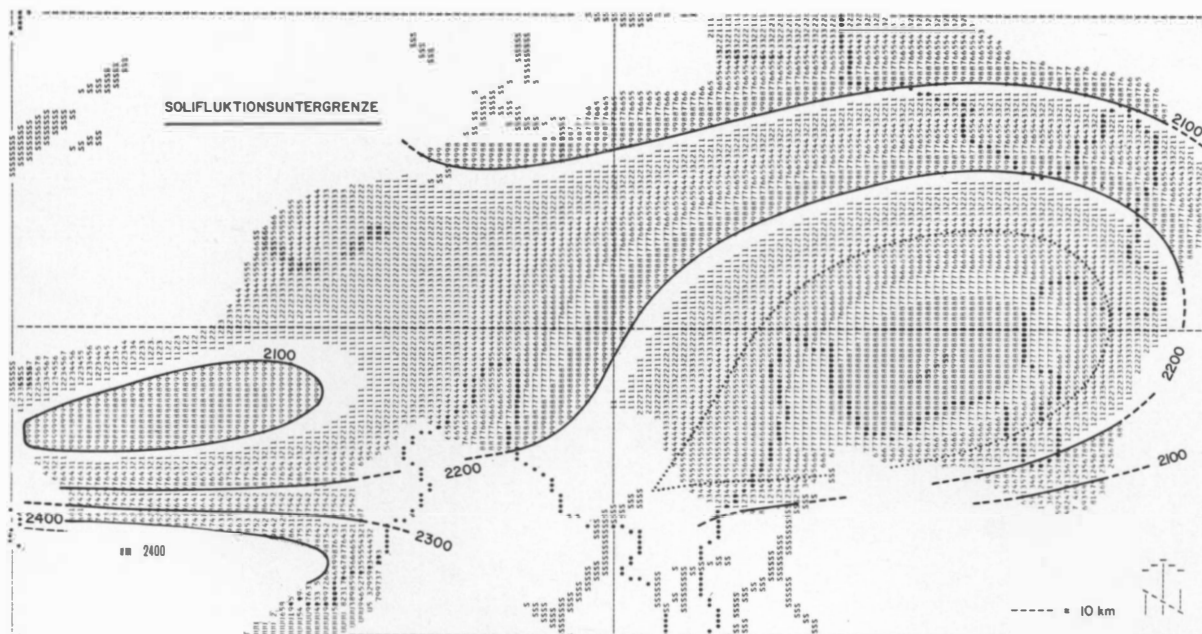


Abb. 4: Höhenlage der Solifluktionsgrenze / altitudinal position of the solifluction boundary

Regressionsgleichung:

$$z = 2994.9 - 59.88 x + 0.06493 xy + 0.92147 \cdot 10^{-14} y^6 + 0.46665 \cdot 10^{-13} x^7 - 0.20535 \cdot 10^{15} / xy^3 - 0.16805 \cdot 10^{-13} x^6 y - 0.81282 \cdot 10^{18} / x^7 + 0.66989 \cdot 10^{19} / x^6 y + 0.17450 \cdot 10^{13} / y^3 - 0.13639 \cdot 10^{-16} y^7$$

Abb. 4 ist die Darstellung einer (vorher bestimmten) mathematischen Funktion. Als Maß der Abstraktion kann der Korrelationskoeffizient zwischen den beobachteten und den im vorliegenden Modell geschätzten Werten verwendet werden (er beträgt in diesem Falle 0.79, d. h. rund 65% der Abweichungen von der mittleren Höhenlage der Solifluktionsgrenze können durch das Modell erklärt werden).

Zu Vergleichszwecken seien im folgenden noch weitere Modelle vorgestellt. Grundlage für die Analyse der Waldgrenze (Abb. 5) war die Landeskarte 1:100 000. Das ganze Gebiet wurde in Teilflächen von 100 km² unterteilt, deren höchstes Vorkommen geschlossenen Waldes als regionale Waldgrenze definiert wurde. Auf diese Weise konnten 316 (in Lage und Höhe bestimmte) Punkte der Waldgrenze ermittelt werden, die in der Trend-Surface Analyse das in Abb. 5 dargestellte Resultat ergaben (Korrelationskoeffizient : 0.81).

Ein weiteres Modell zur Bestimmung der rezenten klimatischen Schneegrenze beruht auf der Berechnung des Niveaus für 365 Schneetage/Jahr. ESCHER (1970) hat gezeigt, daß diese Höhe mit Hilfe der Jahresisotherme von -5,5° Celsius genügend genau bestimmt werden kann. Werden weitere klimatische Kriterien, z. B. die Niederschlagsmenge, berücksichtigt, kann keine signifikante Verbesserung des Resultates erzielt werden. (NB: Man beachte, daß der Verlauf der Ober-

fläche für jede Isothermenfläche verbindlich ist. Eine Isothermenfläche von -2° Celsius würde lediglich rund 600 m tiefer liegen.) Mit Hilfe von 17 Gipfelstationen (schwarze Quadrate) konnte bei einem Korrelationskoeffizienten von 0.87 das in Abb. 6 dargestellte Modell erstellt werden.

Wenn die verschiedenen Modelle, also die verschiedenen Grenzflächen, auch nicht parallel verlaufen, so kann dennoch für jede eine mittlere Höhe berechnet werden, um eine Unterteilung der subnivalen Höhenstufe in den Schweizer Alpen vorzunehmen.

Mittelwert $z = \iint f(x,y) dx dy / \text{Grundfläche}$

Klimatische Schneegrenze	3100 m ($\approx -5,5^\circ \text{C}$)
Mittlere Höhenlage der Girlanden	2400 m ($\approx -1,3^\circ \text{C}$)
Mittlere Höhenlage der Wanderblöcke	2250 m ($\approx -0,4^\circ \text{C}$)
Solifluktionsgrenze	2200 m ($\approx -0,1^\circ \text{C}$)
Waldgrenze	2050 m ($\approx +0,8^\circ \text{C}$)

(vertikaler Temperaturgradient zur Berechnung des Jahresmittels 0,6)

Zusammenfassung

1. Die untere Begrenzung der Hochgebirgslandschaft im Gebiete der Schweizer Alpen ist durch die Soli-

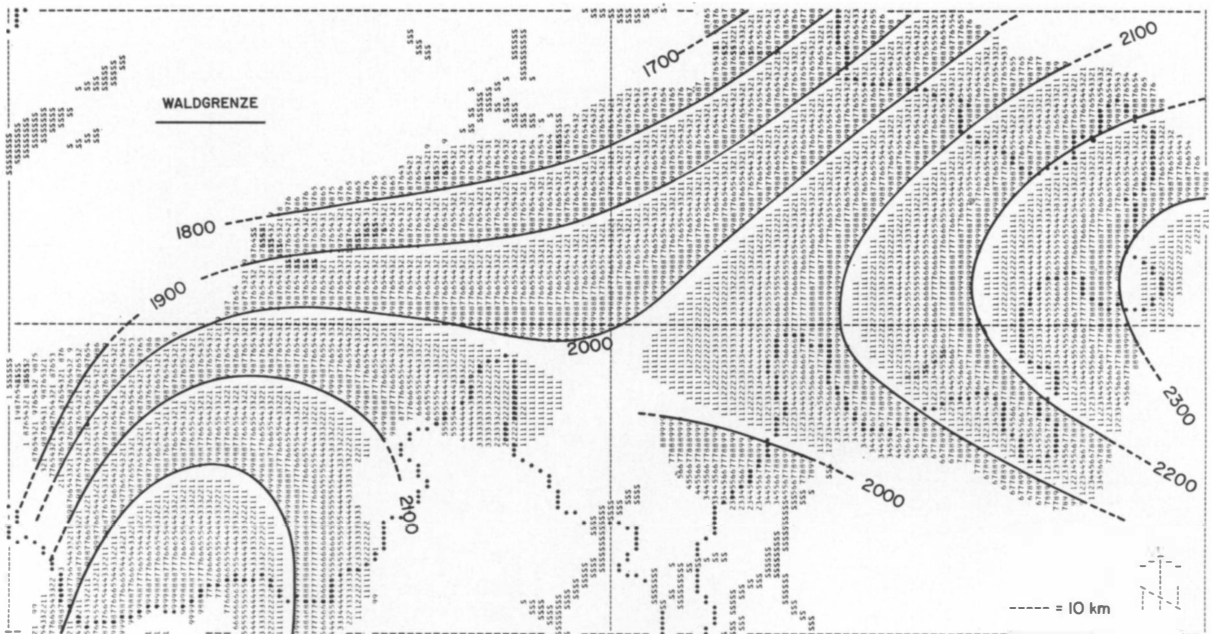


Abb. 5: Höhenlage der Waldgrenze / altitudinal position of the timber line

Regressionsgleichung:

$$z = -6274.5 - 58.449x - 0.49129 \cdot 10^{-16}xy^6 + 0.008428y^2 - 0.61758 \cdot 10^{-8}x^5 - 0.62143 \cdot 10^{24}/y^7 + 0.12962 \cdot 10^{22}/y^6 + 0.10064xy + 0.18716 \cdot 10^{-10}x^6$$

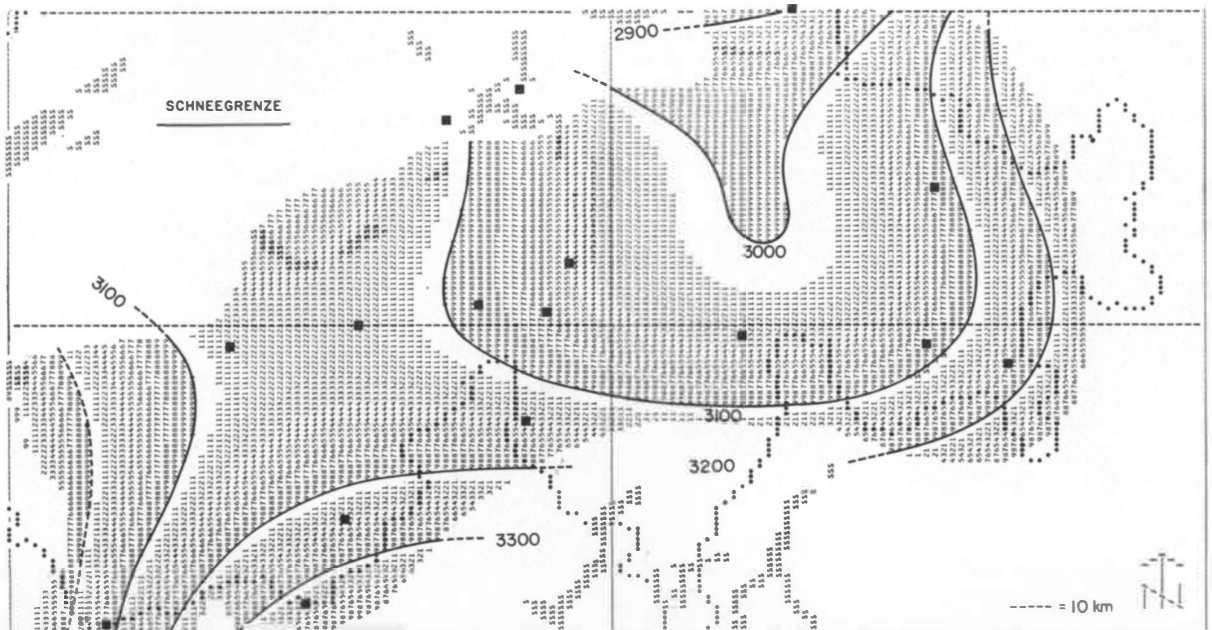


Abb. 6: Höhenlage der klimatischen Schneegrenzen (Niveau 365) / altitudinal position of the climatic snow line

Regressionsgleichung:

$$z = 7346.4 + 0.1151x^2 - 0.06175xy - 0.29707 \cdot 10^{-13}x^7 - 0.31695 \cdot 10^{14}/xy^3 + 0.87009 \cdot 10^{16}/x^7 - 0.12358 \cdot 10^{23}/y^7 + 0.08817 \cdot \exp((x+y)/100) - 0.29372 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(2y/100)$$

- fluktions(unter)grenze gegeben. Diese läßt sich anhand der Verbreitung von Girlanden und Wanderblöcken (Formen der Mattenstufe) bestimmen.
2. Für Verbreitungsstudien von Soliflukationsformen hat sich die Routenkartierung als zweckmäßigste Feldmethode erwiesen.
 3. Durch eine Route soll die gesamte potentielle Vertikalerstreckung der zu untersuchenden (Soliflukations-)Formtypen erfaßt werden. Auf die Reliefverhältnisse ist insofern Rücksicht zu nehmen, als möglichst viele Flächen von weniger als 30° Neigung der Beobachtung zugänglich sind, weil bei stärkeren Neigungen keine (reinen) Soliflukationsformen mehr auftreten.
 4. Die Routen sind so auszuwählen, daß möglichst alle petrographischen Provinzen einer Untersuchungsregion angeschnitten werden, weil Wechsel im petrographischen Milieu vertikale Verschiebungen der Soliflukations(unter)grenze bewirken können.
 5. Auf Expositionsunterschiede braucht – sofern die Fixierung der Soliflukationsgrenze im Zentrum der Fragestellung steht – keine Rücksicht genommen zu werden. Allerdings scheinen die gebundenen Soliflukationsformen auf südexponierten Hängen gehäuft aufzutreten als bei andern Auslagen. Somit dürfen bei Südexposition mehr Einzelbeobachtungen erwartet werden.
 6. Aus der Felderfahrung ergab sich, daß beim Kartieren auf qualitative und quantitative Wertung verzichtet werden darf.
 7. Die mathematische Behandlung der kartierten Beobachtungen führt zum Schluß, daß die vertikale Häufigkeitsverteilung der Fundstellen jedes Formtyps einer Normalverteilung entspricht. Daher läßt sich die Kernzone der vertikalen Verbreitung eines Formtyps aus der mittleren Höhenlage (\bar{x}) aller kartierten Fundstellen und der Streuung (S) bestimmen. Die Kernzone umfaßt rund 70% aller beobachteten Funde.
 8. Die Soliflukations(unter)grenze wird als arithmetisches Mittel der Kernzonenuntergrenzen ($\bar{x}-S$) von Girlanden und Wanderblöcken errechnet. Sie liegt in der Mattenstufe durchschnittlich 150 m über der Waldgrenze, verläuft aber nicht parallel zu letzterer.
 9. Da die Soliflukationsgrenze nur das Hauptverbreitungsgebiet der Soliflukationsformen talwärts abschließt, treten unterhalb davon in allerdings geringerer Häufigkeit auch noch Soliflukationsformen auf (unterer Soliflukationsfleckenbereich).
 10. Die mittlere Höhe der Soliflukationsgrenze in den Schweizer Alpen liegt auf 2200 m; dieser Wert entspricht der mittleren Höhenlage der 0°-Jahresisothermenfläche. Sie greift rd. 300 m weiter talwärts als die untere Begrenzung der Permafrostvorkommen.

Literatur

- DORIGO, G.: Untersuchungen zur Soliflukation am Sustenpaß und auf der Melchsee-Frutt. Diplomarbeit Universität Zürich, 1969.
- : Girlanden und Wanderblöcke, eine quantitative Studie. Diss. Univ. Zürich, 1971 (im Druck).
- ESCHER, H.: Die Bestimmung der klimatischen Schneegrenze in den Schweizer Alpen. *Geographica Helvetica*, Heft 1, 35–48, 1970.
- FITZE, P.: Untersuchungen von Soliflukationserscheinungen im Alpenquerprofil zwischen Säntis und Lago di Como. Diss. Univ. Zürich, 1969.
- FURRER, G.: Die Höhenlage von subnivalem Bodenformen. Habilitationsschrift Univ. Zürich, 1965.
- : Vergleichende Beobachtungen am subnivalem Formenschatz in Ostspitzbergen und in den Schweizer Alpen. Franz Steiner Verlag Wiesbaden, 1969.
- FURRER, G. & FITZE, P.: Die Hochgebirgsstufe – ihre Abgrenzung mit Hilfe der Soliflukationsgrenze. *Geographica Helvetica*, Heft 4, 156–161, 1970.
- : Beitrag zum Permafrostproblem in den Alpen. *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, Heft 3, 353–368, 1970.
- : Die Höhenlage von Soliflukationsformen und der Schneegrenze in Graubünden. Im Druck.
- KAISER, K.: Ein Beitrag zur Frage der Soliflukationsgrenze in den Gebirgen Vorderasiens. *Zeitschrift für Geomorphologie*. Band 9, 460–479, 1965.
- : Über Konvergenzen arider und „periglazialer“ Oberflächenformung. *Aktuelle Probleme geographischer Forschung*, Band 13, 147–187, 1970.
- TROLL, C.: Über das Wesen der Hochgebirgsnatur. *Jahrbuch Österreichischer Alpenverein*. 1955. Neudruck in: *Ökologische Landschaftsforschung und vergleichende Hochgebirgsforschung*. *Erdkundl. Wissen*, H. 11. Wiesbaden 1966, S. 127–151.
- : Grenzen und Wesen der Hochgebirgsnatur. *Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz, Jahrbuch*. 140–141, 1970.