

DIE ENTWICKLUNG VON KLEINRELIEFSTRUKTUREN
IM WALDGRENZÖKOTON DER FRONT RANGE (COLORADO, USA)
UNTER DEM EINFLUSS LEEWÄRTS WANDERNDER ABLEGERGRUPPEN
(*PICEA ENGELMANNII* UND *ABIES LASIOCARPA*)¹⁾

Mit 4 Abbildungen und 4 Photos

GABRIELE BROLL UND FRIEDRICH-KARL HOLTMEIER

Summary: Development of microtopographical structures in the forest-alpine tundra ecotone of the Front Range (Colorado, U.S.A.) under the influence of tree islands (*Picea engelmannii* and *Abies lasiocarpa*)

Tree islands that originate from layering are typical of the forest-alpine tundra ecotone on Niwot Ridge and other similar wind-exposed ranges in the Rocky Mountains. Dying off at their windward front and elongating by layering at their leeward end, the tree islands slowly move downwind. They strongly influence site conditions (snow cover pattern, thereby distribution of soil moisture and temperature, root growth, nutrient uptake, decomposition etc.) and also the microtopography. As the tree islands grow taller, wind scouring causes windscarps at the windward and lateral sides of the islands. After the windward portions of the islands die, the litter layer and O_f horizon erode, but at least a part of the O_h horizon is left. Almost simultaneously alpine vegetation invades. Together with the remaining dead wood, invading grasses and herbs not only prevent further deflation but also enhance deposition of fine eolian calcium-rich material ("alpine loess"). In the long-term the former tree island site may be separated by lateral erosion into small 10-20 cm high "plateaus". Thus microtopography changes conspicuously. Between the scarps still connected with the tree islands and the isolated "plateaus" differences in soil physical and chemical properties are particularly apparent in the upper part of the soil profile. The profiles of the scarps at the windward side of the former tree islands can be explained by the interaction of soil erosion and accumulation of alpine loess. The other scarps are mostly formed by erosion. Some scarps are likely to be eroded soil profiles of former tree island sites. Close to the windward sides of the tree islands, windscarps which cannot be directly attributed to the downwind migration of the tree islands, probably developed because of erosion that resulted from the disintegration of the cover that had been provided by the alpine vegetation.

1 Einleitung

Die klimatischen Waldgrenzen im Gebirge und gegen das Polargebiet sind dynamische Grenzen. Veränderungen der klimatischen Rahmenbedingungen (Erwärmung, Abkühlung) können zu Verlagerungen der Waldgrenzen führen. Solche Waldgrenz-

schwankungen haben sich während der holozänen Klima- und Vegetationsgeschichte mehrfach und in unterschiedlichem Ausmaß ereignet. Während der Baumwuchs bei einer Verbesserung der Wachstums- und Reproduktionsbedingungen relativ rasch über seine vorherige Verbreitungsgrenze vordringt, erfolgt ein Rückzug der Wald- und Baumgrenze sehr langsam. Baumbestände können Jahrhunderte überdauern, bevor sie endgültig zerfallen. So ist die Lage der Wald- und Baumgrenzen keineswegs immer der Ausdruck der jeweiligen aktuellen Klimabedingungen, sondern unter Umständen als „Relikt“ einer für den Baumwuchs günstigeren Klimaphase zu betrachten (u. a. IVES 1978; IVES a. HANSEN-BRISTOW 1983; HANSEN-BRISTOW a. IVES 1985; HOLTMEIER 1985, 1993 a, 1993 b; LARSEN 1988). Besonders groß ist dieses Beharrungsvermögen bei Baumarten, die sich durch Ablegerbildung vermehren können, wie das zum Beispiel bei vielen Fichten- und Tannenarten der Fall ist, denn Ableger werden auch noch unter Temperaturverhältnissen gebildet, unter denen eine generative Verjüngung längst nicht mehr möglich ist.

Im Laufe der Zeit entstehen auf diese Weise mehr oder weniger breite Ökotope (Übergangsräume) zwischen den geschlossenen Waldbeständen und den an relativ günstigen Standorten überdauernden vorgeschobenen Baumgruppen. Diese Ökotope sind gekennzeichnet durch ein kleinflächiges Mosaik von meist scharf umrissenen Baumgruppen und subalpinen/alpinen Pflanzengemeinschaften (vgl. KOMAR-KOVA 1978, 1979).

Das Standortsmosaik hat seine Ursachen in den Wirkungen des Reliefs sowie auch der Baumgruppen auf Strahlung, Wind, Schneedeckenhöhe und -dauer und damit auf die Bodentemperatur, das Bodenfeuchteregime, die Mineralisierung und die Bodenbildung usw. (s. dazu HOLTMEIER 1986, 1987). Auf

¹⁾ Die Untersuchungen wurden mit Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft durchgeführt. Ihr sei dafür auch an dieser Stelle gedankt. Dank gilt auch Herrn Dipl.-Geographen H.-U. SCHÜTZ für seine Hilfe bei der Gelände- und Laborarbeit.

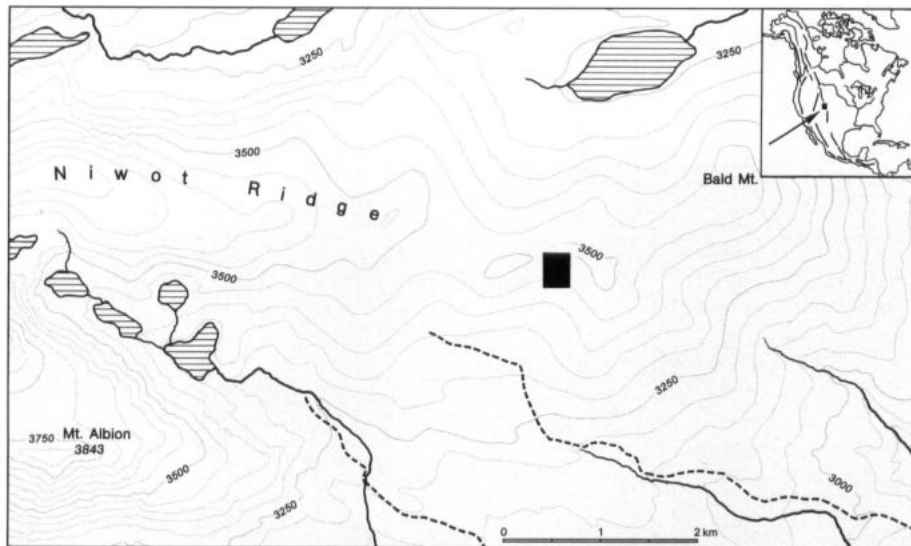


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes auf dem Niwot Ridge
Location of the study site on Niwot Ridge

steilen bzw. intensiv zerschnittenen Hängen ist das Standortmuster eindeutig „relieforientiert“. Erstreckt sich dagegen der Waldgrenzökoton auf weniger stark zerschnittenen Flächen, wie das beispielsweise in den Rocky Mountains mit ihren z. T. ausgedehnten hochgelegenen Rumpfflächenresten vielfach der Fall ist, wird das Standort- und Vegetationsmosaik in viel stärkerem Maße von den Wirkungen der Baumgruppen auf ihr unmittelbares Umfeld bestimmt.

In Abhängigkeit von der Entwicklung dieser Baumgruppen und ihren Wirkungen unterliegt dort das gesamte Mosaik zeitlichen und räumlichen Veränderungen, die unter anderem in der Bodenentwicklung (HOLTMEIER a. BROLL 1992) und in der Entstehung von nur 10–20 cm hohen Bodenkliffs auch direkt sichtbar zum Ausdruck kommen. Sie sind den in der Literatur vielfach beschriebenen (u. a. TROLL 1944, 1947, 1948, 1973; FURRER 1954; HÖLLERMANN 1967; KIM 1967; HOLTMEIER 1968; STINGL 1969; BENEDICT 1970; SCHUNKE 1977; MIEHE 1990, 1991) und auch im Untersuchungsgebiet verbreiteten Rasenkliffs physiognomisch zwar sehr ähnlich, unterscheiden sich aber zum Teil in ihrer Entstehung von diesen. Während bei der Entwicklung der Rasenkliffs die Zerstörung der Vegetationsdecke durch Vertritt und/oder Frostwirkung und nachfolgende Gelideflation (i. S. TROLL 1947, 1948) die entscheidenden Faktoren sind, ist bei der Genese der meisten Kliffs die anwindexponierten Standorten im Waldgrenzökoton typische Leewärtswanderung der Ablegergruppen

von *Picea engelmannii* und *Abies lasiocarpa* (HOLTMEIER 1978, 1986, 1987; MARR 1977; BENEDICT 1984) von ausschlaggebender Bedeutung. Dies wird im folgenden anhand einer Bodenkartierung und der Ergebnisse bodenphysikalischer sowie bodenchemischer Untersuchungen im Waldgrenzökoton auf dem Niwot Ridge (Colorado Front Range) nachgewiesen.

2 Das Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden auf dem Niwot Ridge durchgeführt. Der Niwot Ridge ist einer von mehreren vom meridional verlaufenden Gebirgshauptkamm der Colorado Front Range ostwärts streichenden Höhenrücken (Abb. 1). Sein Relief ist durch zugerundete Kuppen, Verebnungen sowie Einsattelungen und davon ausgehende relativ flache nach Süden bzw. Norden orientierte Talmulden geprägt (vgl. auch Photo 1). Mit einer Höhe von 3500 bis über 3700 m ragt er deutlich über die obere Waldgrenze empor. Die obere Grenze geschlossener Bestände liegt etwa bei 3350 m. Darüber folgt ein je nach der Geländegestalt mehr oder weniger breiter Übergangssaum bis zur Baumgrenze, die von gewöhnlich nur mehr krüppelwüchsigen Exemplaren der auch die hochstämmigen Bestände aufbauenden Baumarten – *Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*, stellenweise auch *Pinus flexilis* – gebildet wird. Vereinzelt Vorposten des Baumwuchses sind bis in Höhen von 3650 m zu finden.



Photo 1: Blick von Südwesten auf den östlichen Niwot Ridge mit dem Untersuchungsgebiet (Pfeil)
Photo: F.-K. HOLTMEIER 4. 8. 1977

View from the south-west to the eastern part of Niwot Ridge with the study site (arrow)



Photo 2: Umlagerung des Schnees durch den Wind auf Niwot Ridge im Winter. Hinter den Ablegergruppen im extrem windexponierten Gelände (Bildhintergrund) haben sich lange Schneeschleppen gebildet. Blickrichtung Nordosten
Photo: F.-K. HOLTMEIER 7. 4. 1990

Translocation of the snow by wind on Niwot Ridge in winter. Big snowdrifts piled up behind the tree islands in the extremely wind-swept area (background). View north-east



Photo 3: Keilförmige Ablegergruppe (*Picea engelmannii*) im oberen Waldgrenzökoton bei ca. 3500 m
Photo: F.-K. HOLTMEIER 30. 7. 1991

Wedge-like tree island in the upper forest-alpine tundra ecotone at about 3500 m

Das Klima in diesem meeresfernsten Teil des gesamten nordamerikanischen Kordillerensystems ist kontinental (BARRY 1973). Die geländeklimatischen Verhältnisse werden vor allem durch die starken und ganzjährig aus westlichen Richtungen wehenden Winde geprägt (HOLTMEIER 1978). Dabei kommt der Umlagerung des Schnees und seiner ungleichmäßigen Verteilung im Gelände die wohl größte Bedeutung zu (Photo 2). Wie der Schnee, so wird auch feines mineralisches Lockermaterial durch den Wind umgelagert (vgl. auch WARDLE 1968). Hinsichtlich der Standortbedingungen, und hier insbesondere der bodenchemischen Eigenschaften, kommt dabei dem sogenannten „alpine loess“ eine besondere Bedeutung zu (OSBURN 1967; BIRKELAND 1973; MAHANEY 1973; LITAOR 1987, 1988). Es handelt sich um calciumreiches äolisches Material, das sehr wahrscheinlich über große Entfernung aus den Beckenlandschaften westlich der Rocky Mountains herant transportiert worden ist (CAINE 1974; BURNS 1980; THORN a. DARMODY 1980; LITAOR 1987; vgl. auch GRUBER 1980 für die Zentralalpen).

Das autochthone Ausgangsmaterial der Bodenbildung ist Solifluktionsschutt aus silikatischem Verwitterungsmaterial des präkambrischen Untergrundes (Cordierit und Magnetit führende Sillimanit-Biotit-Gneise; GABLE a. MADOLE 1976). Dieses Lockermaterial besteht größtenteils aus groben Blöcken und

feinerem Schutt, eingebettet in eine lehmig-sandige Matrix. Das Verbreitungsmuster der Bodentypen läßt eine enge Abhängigkeit von der Meereshöhe, den Reliefverhältnissen, der Windexposition und – davon gesteuert – der Schneedeckenhöhe und Schneedeckendauer sowie der damit korrelierten Vegetationsbedeckung erkennen (KOMARKOVA 1978, 1979; BURNS 1980; BURNS a. TONKIN 1982).

3 Die Ablegergruppen und ihre Standorte

Die Standorte der untersuchten Ablegergruppen – zehn wurden detailliert untersucht – liegen auf dem westexponierten (Luv) Hang eines kleinen, flachen, die Südflanke des Niwot Ridge herabziehenden Tales (Photo 1) zwischen 3400 m und 3500 m. Der starke Einfluß der über den Gebirgskamm herabwehenden westlichen Winde (Photo 2) auf den Baumwuchs und die Standortbedingungen kommt u. a. in den Wuchsformen der Bäume und der Ablegergruppen sowie in der Schnee Verteilung und -dauer deutlich zum Ausdruck. Während im unteren Tal- und Hangabschnitt noch bis zu 6 m hohe aufrechte Baumstämme mit fahnenförmigen Kronen vorherrschen, kommen im oberen Tal- und Hangbereich nur mehr niedrige und kompakte Ablegergruppen vor. Ihre Luvseite weist keilförmig gegen die vorherrschende Windrichtung

(Photo 3). In sehr vielen Fällen ist der unmittelbare luvseitige Teil auch schon abgestorben, während der leeseitige Teil sich weiter durch Ableger ausbreitet – gegenwärtig etwa 2 cm pro Jahr (BENEDICT 1984). Nahezu im gesamten Hangbereich sind die Ablegergruppen annähernd parallel zur vorherrschenden Windrichtung angeordnet (vgl. auch Photo 2, Hintergrund).

Die Oberflächengestalt ist durch heute allem Anschein nach nicht mehr aktive Solifluktion geprägt worden, die zu einem unregelmäßigen Wechsel leichter Versteilungen, Verflachungen und auch seichter Mulden im Hang geführt hat. Die Böden lassen sich nach der US Soil Taxonomy den Inceptisols zuordnen (Soil Survey Staff 1992). Dabei handelt es sich um flachgründige (30–40 cm) braunerdeähnliche Böden. Noch feiner differenzierend sprechen BURNS (1980) und KOMARKOVA (1979) hier von Cryochrepts. HOLTMEIER und BROLL (1992) ordnen die von ihnen im oberen Waldgrenzökoton untersuchten Böden nicht nur den Cryochrepts sondern zum Teil auch den Cryumbrepts zu (vgl. auch LITAOR 1987), die zwar auch einen verbräunten B-Horizont aufweisen, deren Oberboden aber einen höheren Anteil organischer Substanz enthält als es bei Cryochrepts der Fall ist (Soil Survey Staff 1992). Unter den Ablegergruppen kann es in einigen Fällen zur Ausbildung eines Cryoboralf kommen (HOLTMEIER a. BROLL 1992).

Die untersuchten Ablegergruppen haben zumeist an einer Stelle ihren Ursprung genommen, an der die Oberflächenstruktur die Ansammlung von Schnee begünstigte und dem Sämling Schutz vor dem Wind bot, zum Beispiel in einer flachen Hangmulde, hinter einem Pflanzenpolster, Grasbüschel oder einer Strauchweide. Möglicherweise hat sich auch die damit verbundene leichte Erhöhung der Bodenfeuchte durch Schmelzwasser positiv auf Keimung und Sämlingswachstum ausgewirkt. Die heranwachsenden und sich allmählich leewärts ausbreitenden Ablegergruppen begannen, in zunehmendem Maße das bodennahe Windfeld, die Schneeverteilung, die Schneedeckendauer, die Bodentemperatur- und Feuchteverteilung, die Vegetation, die Akkumulation von alpinem Löß und damit die Böden dergestalt zu beeinflussen, daß heute starke Unterschiede zwischen den Bereichen luvseits der Ablegergruppen, in ihrem Innern und auf ihrer Leeseite bestehen. Diese Unterschiede kommen u. a. in der Vegetationsbedeckung, im Korngrößenspektrum des Feinbodens, in der Menge der organischen Substanz, im Nährstoffgehalt (N, P, K), im C/N-Verhältnis, in der Kationenaustauschkapazität und im pH-Wert deutlich zum Ausdruck (HOLTMEIER a. BROLL 1992).

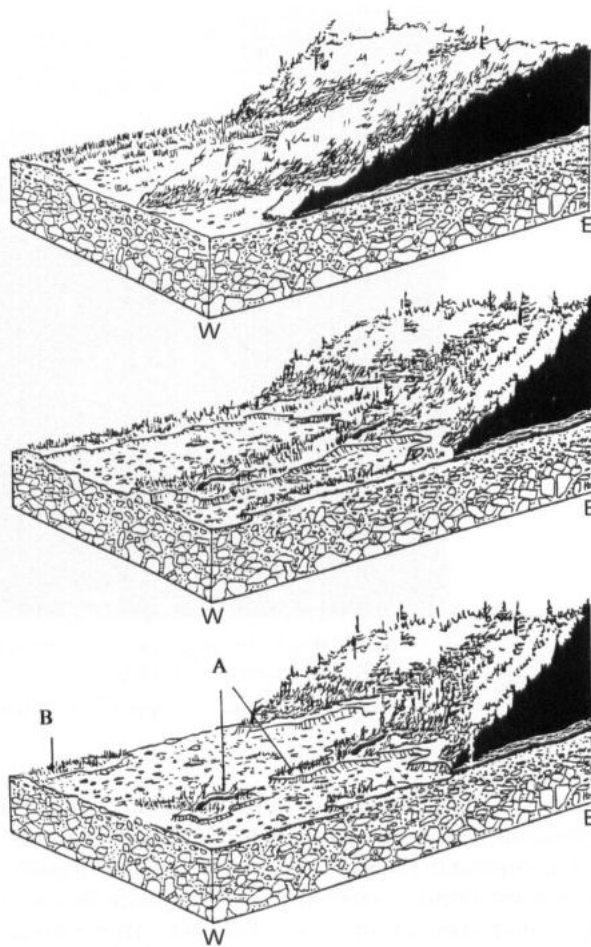


Abb. 2: Entwicklung von Bodenkliffs (A- und B-Typen) unter dem Einfluß leewärts „wandernder“ Ablegergruppen

Development of soil scarps under the influence of down-wind migration of tree islands

Während an den luvseitigen Standorten die Vegetationsbedeckung lückenhaft ist, und der nackte Mineralboden zwischen den polsterwüchsigen Pflanzen (z. B. *Selaginella densa*, *Silene acaulis*, *Trifolium dasyphyllum*, *Arenaria obtusiloba*), niedrigwüchsigen Weiden, krautigen Pflanzen und Flechten zutage tritt, ist sie auf der Leeseite – dort handelt es sich im wesentlichen um Gräser, Seggen, Kräuter und Vaccinien – relativ dicht. Im Innern der Ablegergruppen ist vor allem infolge des Lichtmangels keine geschlossene Feldschicht vorhanden. Auf der Luvseite und auch an den seitlichen Rändern der Gruppen verhindert der Wind jegliche Ansammlung von Streu. Im Innern hat sich dagegen ein bis zu 35 cm mächtiges Humusprofil aus der Nadelstreu entwickelt. Auch im Windschat-



Photo 4: Bodenklibfformung an der Luvseite eines ehemals von einer Ablegergruppe bedeckten Standorts bei ca. 3450 m
Photo: F.-K. HOLTMEIER 17. 8. 1989

Windscarp (soil cliff) at the windward side of a former tree island stand

ten der Ablegergruppe sammelt sich Streu an, doch viel weniger als im Innern. Diese Streu der Kraut- und Grasvegetation im Lee ist relativ eiweißreich und wird rasch abgebaut.

An den luvseitigen Standorten ist der Sandanteil im Feinboden höher als im Innern und leewärts der Ablegergruppen. Der Anteil organischen Kohlenstoffes, der Stickstoff- und Phosphor-, Kalium- und Calciumgehalt im A_h -Horizont nehmen von Luv nach Lee zu. Die Kationenaustauschkapazität steigt von Luv nach Lee ebenfalls an. Aufgrund der schwer zersetzbaren Nadelstreu ist das C/N-Verhältnis im Innern der Gruppen weiter als an den luv- und leeseitigen Standorten. Die Konzentration von Protonen und Al-Ionen ist im Innern der Gruppen am höchsten. Dementsprechend (s. auch Ca-Gehalt) erreicht der pH-Wert im Innern der Ablegergruppen die niedrigsten und auf der Leeseite die höchsten Werte. Für die Bodenentwicklung unter den Ablegergruppen spielt die mächtige Humusaufgabe eine entscheidende Rolle. In einigen Fällen zeichnen sich in den Analyseergebnissen sogar initiale Podsolierungsprozesse ab (HOLTMEIER a. BROLL 1992).

4 Methoden

Bei den Untersuchungen über den Einfluß der Ablegergruppen auf die Entstehung der Kleinrelief-

formen erfolgten neben einer bodenkundlichen Kartierung bodenphysikalische und bodenchemische Analysen. Die Bodenansprache richtet sich nach den Vorschriften der Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 1992). Zur Bestimmung der Bodenfarben diente die Munsell-Farbtafel.

Der Feinboden wurde folgenden Analysen unterzogen:

- Korngrößenanalyse nach Humuszerstörung mittels Siebung und Pipett-Methode (PAGE et al. 1982)
- Bestimmung des organischen Kohlenstoffes und des Gesamtstickstoffes mittels eines Elementaranalysators (NA 1500) der Firma Carlo Erba
- Messung des pH-Wertes sowohl in destilliertem Wasser als auch in einer 0.01 M $CaCl_2$ -Lösung mittels Glaselektrode (PAGE et al. 1982)
- Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität durch Austausch mit Ammoniumchlorid (TRÜBY u. ALDINGER 1989), Messungen von Calcium und Magnesium mit einem AAS (Perkin Elmer 1100), Kalium und Natrium mit dem Flammenphotometer (Jenway PFP 7) sowie der sauer wirkenden Kationen durch Titration.

5 Das Kleinrelief im Bereich der Ablegergruppen

Bei den charakteristischen Kleinformen handelt es sich teils um 10–20 cm hohe, den Ablegergruppen

windwärts vorgelagerte und an ihren Rändern oftmals unterschrittene „Plateaus“ mit unregelmäßigen Umrissen sowie um hohlkehlenartige Ausblasungen, die bogen- oder fingerförmig in den windzugewandten Teil der Ablegergruppen hineingreifen und vielfach auch deren seitliche Flanken säumen (Abb. 2; Photo 4). Im folgenden werden diese Kleinstrukturen Bodenkliffs genannt, um sie gegen die sogenannten Rasenkliffs terminologisch abzugrenzen. Die Bodenkliffs unterscheiden sich von ihrem tieferliegenden Umfeld sowohl in bodenphysikalischer als auch bodenchemischer Sicht. Zudem sind in und auf ihnen oftmals Totholzreste zu finden – zum Teil mehrere Meter von den gegenwärtigen windzugewandten Spitzen der Ablegergruppen entfernt (vgl. Abb. 2). Diese sowie die charakteristischen Bodeneigenschaften der genannten Kleinreliefformen stützen die Hypothese, daß es sich bei ihnen zum Teil um Überreste von Böden handelt, die sich unter den Ablegergruppen entwickelt haben und dann mit dem allmählichen Leewärtswandern der Ablegergruppen freigelegt worden sind (BENEDICT 1984). Bei ihrer weiteren Entwicklung überlagern sich Erosions-, Akkumulations- und Sukzessionsvorgänge in nachfolgend beschriebener komplizierter Weise.

Sobald die meist sowohl im Grund- als auch im Aufriß keilförmig gegen den Wind weisende Spitze der Ablegergruppen einige Dezimeter Höhe erreicht hat, bietet sie dem Wind zunehmend Widerstand und damit Ansatzpunkte für Erosion an ihrer Luvseite (Abb. 2). So kommt es bei vielen dieser Gruppen schon bevor diese luvseitig absterben und nach Lee zurückweichen an deren Stirnseite und seitlichen Flanken zur Ausbildung von einige Zentimeter hohen und leewärts auskeilenden Deflationskanten. Solange die Gruppen aber noch keine Lücken im Kronendach aufweisen, ist dagegen der Boden unter ihnen vor jeglicher Abtragung geschützt.

Das ändert sich aber sofort, wenn die luvseitigen Zweige und Triebe infolge der Einwirkungen des Klimas (Frosttrocknis, Abrasionsschäden usw.; vgl. HOLTMEIER 1974, 1978, 1986) abzusterben beginnen. Zuerst wird die leichte und rasch austrocknende O_F-Lage abgetragen, manchmal auch Teile der tieferen Lagen des Humusprofils. Meist dringt jedoch mit fortschreitender Auflockerung lichtbedürftige alpine Vegetation ein (Gräser, Kräuter, Polsterpflanzen, Flechten) und bildet mit der Zeit einen wirksamen Schutz gegen die weitere Abtragung durch Deflation, aber auch durch die gerade während der Sommermonate Juli und August häufigen und heftigen Gewitterschauer. Auch ohne diese Einflüsse, nur wesentlich langsamer, würde das verbliebene Humusprofil

durch die fortschreitende und vermutlich infolge höherer Bodentemperaturen intensivere Mineralisierung der organischen Substanz abgebaut werden, da kein entsprechender Streunachschub wie vordem unter den Ablegergruppen erfolgt.

Die Ergebnisse der Bodenanalysen (Abb. 3) lassen indessen erkennen, daß mit dem Eindringen alpiner Vegetation in den luvseitigen Teil der Ablegergruppen nicht nur die Abtragung des darunter liegenden Bodens zunehmend gehemmt wird, sondern sogar die Deposition von alpinem Löß zwischen den Halmen und Blättern der Feldschicht und den abgestorbenen Stammresten zunimmt. Dafür spricht unter anderem die in den meisten Fällen festzustellende Erhöhung des Schluffanteils (bis zu 50%) im A-Horizont.

Mit dem Eintrag von alpinem Löß verändern sich im Vergleich zu den Ablegergruppen die bodenchemischen Eigenschaften (Abb. 3). Die Kationenaustauschkapazität im Oberboden steigt aufgrund des höheren Anteils an basisch wirkenden Kationen, vor allem an Calcium, während der Anteil der sauer wirkenden Kationen abnimmt. Im Lee der Ablegergruppen konnte zwar auch eine Zunahme der basisch wirkenden Kationen und eine Abnahme der sauer wirkenden festgestellt werden, die Differenz zwischen beiden ist jedoch wesentlich geringer. Der in CaCl₂ gemessene pH-Wert steigt genau wie im Lee auf 4.5–5.0, der in destilliertem Wasser gemessene auf 5.0–5.5.

Die in den vormals von den Ablegergruppen bedeckten Bereich eindringenden Gräser und Kräuter produzieren – ähnlich wie auf den Leeseiten der Ablegergruppen – eine stickstoffreiche Streu. Zusammen mit den durch die Akkumulation äolischen Feinmaterials veränderten bodenchemischen Bedingungen und relativ günstigen Bodenfeuchteverhältnissen führt dieses zu einer Beschleunigung der Humifizierungsprozesse. Sie kommen im Gehalt des organischen Kohlenstoffs von etwa 15% und dem Gesamtstickstoffgehalt von ca. 1.0% im Oberboden deutlich zum Ausdruck. Angesichts eines Humusgehaltes bis zu 30% sind die Verhältnisse als extrem humos zu bezeichnen. Bei der Kartierung waren eindeutig keine Reste der O_F-Lage mehr zu erkennen, wohl aber der O_H-Lage, die sich nun intensiv mit dem A-Horizont vermischen kann. Mit der Erhöhung des Humusgehaltes verändert sich auch die Bodenfarbe nach Munsell von 7.5YR 2/2 nach 10YR 2/1.

Das enge C/N-Verhältnis von 15 spiegelt die guten Humifizierungs- und Mineralisierungsbedingungen im Oberboden der Kliffs wider. Im Luv der Ablegergruppen ist das C/N-Verhältnis zwar ähnlich, jedoch sind die absoluten Gehalte an organischem Kohlen-

stoff und Stickstoff geringer, und mangelnde Bodenfeuchte schränkt dort die biologische Aktivität ein. Im A-Horizont direkt unter den Baumgruppen ist das C/N-Verhältnis auch relativ gut, dort behindern aber vor allem die niedrigen Temperaturen und die schwer zersetzbare Nadelstreu die Bildung von Huminsäuren. Wahrscheinlicher ist dort die vermehrte Entstehung von Fulvosäuren. Auch das C/N-Verhältnis der dort akkumulierten Rohhumusauflage (L: 35, O_f: 23, O_h: 19) und die hohe Bodenacidität lassen dieses vermuten. Das gegenüber den O-Lagen unter den Baumgruppen engere C/N-Verhältnis auf den Kliffs zeigt, daß dort ein Teil der Rohhumusauflage (L und O_f) nicht bloß vom Wind abgetragen wurde, sondern daß durch die Akkumulation von alpinem Löß die Humifizierung in der zumindest zum Teil zurückgebliebenen O_h-Lage und dem A-Horizont verbessert wurde. Die hohen Gehalte von Kohlenstoff und Stickstoff auf den Bodenkliffs sind daher nur zum Teil durch die sich dort ansiedelnden Gräser und Kräuter bedingt, die ja auch im Lee der Ablegergruppen zu finden sind. In erster Linie sind die Reste der unter den Ablegergruppen entstandenen Humusauflage dafür verantwortlich. Die offensichtlich besseren Humifizierungsbedingungen auf den Kliffs sind weiterhin wahrscheinlich nicht nur auf die Deposition von alpinem Löß und einen damit einhergehenden Anstieg des pH-Wertes zurückzuführen, sondern auch auf die im Vergleich zu den Lee-Standorten kürzere Schneedeckendauer, so daß sich der Boden auf den Kliffs eher und stärker erwärmt.

Mit der Zeit werden die gegenüber ihrem Umfeld um bis zu 10 cm höhergelegenen ehemaligen luvseitigen Teile der Ablegergruppen vermutlich primär durch Winderosion und den bei Starkregen kräftigen Oberflächenabfluß seitlich unterschritten und in kleine Plateaus mit unregelmäßigen Umrissen aufgelöst (vgl. auch Abb. 2). Bei der weiteren von den Seiten - und zwar nicht nur von den Luvseiten (West) her - in diese Plateaus vorgreifenden Erosion dürfte wieder der Wind - es kommt zu zahllosen kleinst-räumigen Kanalisierungseffekten und Wirbelbildungen - eine Rolle spielen, da die Steilkanten meist vegetationslos sind, während die Oberflächen durch die Pflanzendecke nicht nur einigermaßen geschützt sind, sondern zum Teil sogar durch die Akkumulation äolischen Feinmaterials weiter aufgehöhht werden. Eine Mitwirkung von Kammeis an der seitlichen Abtragung der Bodenkliffs wurde von den Verfassern nicht beobachtet, obwohl es angesichts der thermischen und edaphischen Verhältnisse durchaus zu erwarten wäre. Auch BENEDICT (briefl. Mitt.) hat während seiner jahrzehntelangen Feldarbeiten in die-

sem Gebiet kein Kammeis an den Kliffs beobachten können. Dabei ist Kammeisbildung in der alpinen und subalpinen Stufe des Niwot Ridge eine weit verbreitete und geomorphologisch sehr wirksame Erscheinung (FAHEY 1973). Nach HANSEN-BRISTOW (1981) soll es dort auch die Ansamung erschweren, indem es Sämlinge aus dem Boden herausdrückt und deren Haarwurzeln zerreißt. Eine gelegentliche Beteiligung von Kammeis an der Rückverlagerung der Kliffs ist nicht generell auszuschließen. So berichtet HÖLLERMANN (briefl.) über Beobachtungen von Kammeis an einem „Vegetationskliff“ (Rasenkliff) in Nähe der rund 1,5 km westlich des Untersuchungsgebietes gelegenen Meßstation T-Van (ca. 3460 m). Das Kammeis hatte sich dort allerdings bei nur schwachem Hangaufwind gebildet. Schwache Winde sind im Untersuchungsgebiet jedoch eine Ausnahme, und möglicherweise hemmen meist starke Winde die Entstehung von Kammeis an voll exponierten Kliffs.

Bodenkliffs wurden allenthalben im oberen Waldgrenzökoton bis zu den obersten krüppelwüchsigen Ablegergruppen hinauf gefunden, während sie darüber im sehr stark von periglazialen Blockschutt durchsetzten Gelände deutlich seltener waren.

Im Waldgrenzökoton lassen sich dabei anhand der Untersuchungsergebnisse mindestens zwei Typen von Kliffs unterscheiden. Einerseits handelt es sich um die in der beschriebenen Weise bei der Leewärtswanderung der Ablegergruppen entstandenen Bodenkliffs (vgl. auch Abb. 2, A-Typ), andererseits findet man auch Kliffs, die hinsichtlich ihrer Genese zum Teil eher den in der Literatur beschriebenen Rasenkliffs entsprechen. Letztere liegen zwar auch luvseits der Ablegergruppen, doch sind sie in den meisten Fällen zur Längsachse der Bauminseln seitlich etwas versetzt (vgl. Abb. 2, B-Typ). Zudem sind weder auf noch in ihnen Totholzreste zu finden, wie es bei den Bodenkliffs an der Luvseite der Ablegergruppe nahezu regelmäßig der Fall ist.

Die Oberfläche der weiter entfernt von den Ablegergruppen liegenden Kliffs (B-Typ) liegt gewöhnlich tiefer als die der noch mit den Ablegergruppen zusammenhängenden Bodenkliffs. Zudem ist die Vegetation auf ihnen weniger dicht, und zwischen den alpinen Gräsern, Kräutern und Flechten tritt zum Teil das Bodenskelett zutage. Im Unterboden der untersuchten Standorte (als Beispiel Tiefenfunktionen von drei Profilpaaren, Abb. 4) sind daher auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Kliffotypen hinsichtlich der Bodeneigenschaften feststellbar.

Deutliche Unterschiede lassen dagegen die Analysen der A-Horizonte erkennen. Die durch den Ein-



	Luv	Bodenkluft	Ablegergruppe	Lee
C _{org} [%]	4,8	15,3	5,3	7,5
N [%]	0,35	1,0	0,35	0,55
C/N	14	15	15	14
KAK [cmol _c /kg]	8,5	15	10,3	10,5
Ca [cmol _c /kg]	5,0	12	5,5	7,0
H/Al [cmol _c /kg]	2,5	0,5	4,0	1,5
pH (CaCl ₂) Min-Max	4,0-4,5	4,5-5,0	3,5-4,5	4,5-5,0
pH (H ₂ O) Min-Max	4,5-5,0	5,0-5,5	4,0-5,0	5,0-5,5
Sand [%]	55	30-40	40	40
Schluff [%]	30	40-50	40	40
Ton [%]	15	20	20	20
Bodenart	IS	s'L oder uL	s'L	s'L
Munsell-Farbe	7.5YR 3/2	10YR 2/1	7.5YR 2/2	10YR 2/2

Abb. 3: Ergebnisse der Bodenanalysen der A-Horizonte für die Standorte luvseits, im Innern und leewärts der untersuchten Ablegergruppen (Daten aus HOLTMEIER a. BROLL 1992) im Vergleich zu den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung der Bodenkliffs (n = 10)

Results of soil analyses of the sites windward, leeward and inside the investigated tree islands (data from HOLTMEIER a. BROLL 1992) compared to the results of the present study of the windscarps (n = 10)

fluß der Ablegergruppen auf das bodennahe Windfeld verursachte Akkumulation von „alpinem Löß“ spiegelt sich in den Eigenschaften des sich bildenden neuen A-Horizontes bei den noch mit den Ablegergruppen zusammenhängenden oder dicht bei ihnen liegenden Bodenkliffs wider. Nicht nur der Schluffanteil ist hoch, sondern auch der pH-Wert sowie die Kationenaustauschkapazität und die Calciumgehalte. Entsprechend niedrig sind die Gehalte an sauer wirkenden Kationen (s. Abb. 4, rechte Profile). Bei den Kliffs vom B-Typ (Abb. 4, linke Profile) fehlt ein entsprechender Anstieg der Schluffanteile im A-Horizont. Die anderen Bodeneigenschaften, wie z. B. eine Erhöhung des pH-Wertes, weisen auch hier unter Umständen auf eine allerdings weitaus geringere Akkumulation von „alpinem Löß“ hin. Erosionsvorgänge scheinen zu überwiegen. Beim ersten untersuchten Profilpaar (vgl. Abb. 4, oben) könnte man angesichts aller erhobenen Daten darauf schließen, daß das linke Profil einmal mit der Ablegergruppe verbunden war, denn die C- und N-Werte des weiter entfernt liegenden Kliffs liegen wie

alle anderen Parameter unter denen des noch mit den Ablegergruppen zusammenhängenden Kliffs oder verlaufen parallel dazu. Das könnte die Folge einer Profilkappung sein.

Die Ergebnisse der Kohlenstoff- und Stickstoffanalysen der anderen Profilpaare (Abb. 4, mittleres und unteres Profilpaar) sprechen jedoch für die Annahme, daß es sich bei den linken Profilen um Rasenkliffs handelt. In deren A-Horizonten (vgl. Abb. 4, mittleres und unteres Profilpaar) sind höhere Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff als in entsprechender Tiefe der Kliffs an den Ablegergruppen nachzuweisen. Diese Analysewerte und auch das C/N-Verhältnis, das sich zum Teil bis auf 13 verengt, ähneln sehr denen, die an den ebenfalls von einer Gras- und Krautvegetation bedeckten Leestandorten gemessen wurden (vgl. Abb. 3). Die Entstehung muß daher in diesen Fällen anders verlaufen sein als die der unter Ablegergruppen entstandenen Bodenkliffs, es sei denn, man nimmt eine nach anfänglich starker Erosion eingetretene Phase an, während der sich der humose Oberboden hätte entwickeln können. Dafür

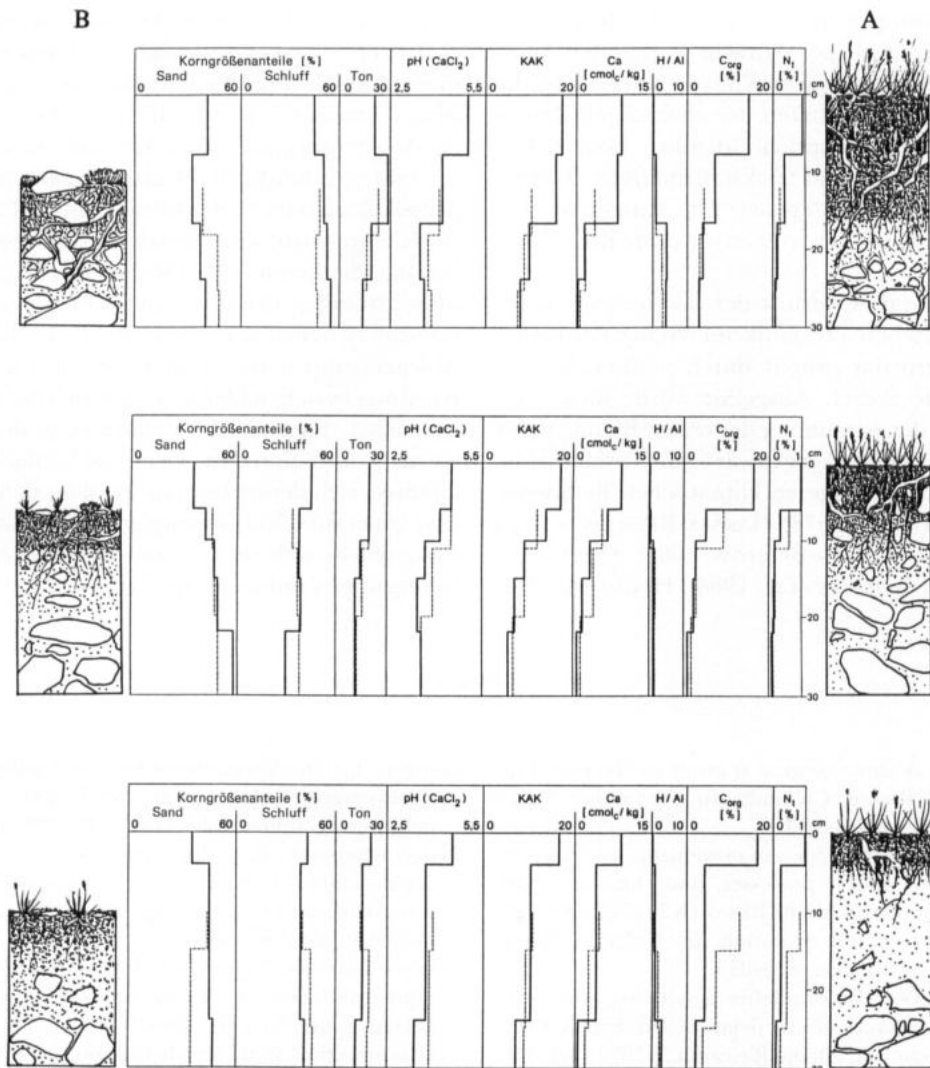


Abb. 4: Tiefenfunktionen wichtigster Bodenparameter an drei ausgewählten Standorten
 Ausgezogene Linie = Bodenklyffs
 Gerissene Linie = isolierte Klyffs luvseits der Ablegergruppen
 Depth function of the most important soil parameters at three selected sites
 Solid line = windscarp still connected with the tree island
 dashed line = windscarp disconnected at the wind-exposed side

gibt es jedoch keinerlei Hinweise, und unter den gegebenen Standortbedingungen ist dieses auch sehr unwahrscheinlich.

Gleichwohl könnte auch die Entstehung dieser Rasenklyffs im Zusammenhang mit dem Einfluß der Ablegergruppen auf das bodennahe Windfeld gesehen werden, denn von den durch die Ablegergruppen verursachten heftigen Verwirbelungen und Kanalisierungseffekten werden auch seitlich breitere Bereiche betroffen.

6 Schlußbemerkung

Die Ergebnisse vermitteln ein differenziertes Bild der Entwicklung der untersuchten Kleinreliefstrukturen. Zwei Typen von Bodenklyffs sind klar zu unterscheiden. Bei den einen (Abb. 4, A) überlagern sich Bodenerosion und Akkumulation von alpinem Löß. Die anderen Klyffs (Abb. 4, B) unterliegen in überwiegendem Maße der Erosion. Bei ihnen kann es sich zum Teil um gekappte Profile ehemaliger Standorte

von Ablegergruppen handeln (Abb. 4, oben links), zumal vereinzelt dicke Wurzeln vorhanden sind. Zum Teil aber weisen diese Kliffs in einer Tiefe, die ungefähr den B-Horizonten der ehemaligen Baumgruppenstandorte entspricht, deutlich höhere Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff auf (Abb. 4, mittleres und unteres Profilpaar). Die Annahme liegt daher nahe, daß es sich bei ihnen um echte Rasenkliffs handelt.

Die Kliffs sind Ausdruck der langfristigen landschaftsökologischen Dynamik im Waldgrenzökoton und überlagern das primär durch solifluidale Prozesse geformte Relief. Ausgelöst wurde diese Entwicklung mit der Ansamung der ersten Bäume unter im Vergleich zu den gegenwärtigen Verhältnissen wahrscheinlich günstigeren klimatischen Bedingungen (vgl. IVES 1973, 1978; HANSEN-BRISTOW a. IVES 1984; IVES a. HANSEN-BRISTOW 1985; HOLTMEIER 1985; HANSEN-BRISTOW et al. 1988). Heute jedenfalls

sind im oberen Waldgrenzökoton nur selten Sämlinge zu finden – und die wenigen vorhandenen haben, ihrem Aussehen nach zu urteilen, keine große Überlebenschance. Die Bäume, die überlebten, haben sich zu Ablegergruppen entwickelt und steuern seither über ihren Einfluß auf die kleinklimatischen und die pedoökologischen Verhältnisse auch die Entwicklung der Kleinreliefstrukturen in der beschriebenen Weise. Solange die klimatischen Rahmenbedingungen sich nicht grundlegend ändern und zumindest ein Gleichgewicht zwischen der Absterberate der Luvseite der Ablegergruppen und ihrer Ausbreitung in leewärtige Richtung bestehen bleibt, ändert sich daran im Prinzip nichts. Eine völlige Veränderung der Situation würde jedoch eintreten, wenn die klimatischen Verhältnisse sich derart bessern würden, daß langfristig eine generative Verjüngung gesichert wäre, und der Baumwuchs sich in die Lücken zwischen den Ablegergruppen hinein ausbreiten würde.

Literatur

- BARRY, R. G.: A climatological transect on the east slope of the Front Range, Colorado. In: *Arctic and Alpine Research* 5 (2), 1973, 89–100.
- BENEDICT, J. B.: Downslope soil movement in a Colorado alpine region: Rates, processes, and climatic significance. In: *Arctic and Alpine Research* 2, 1970, 165–226.
- : Rates of tree-island migration. In: *Colorado Rocky Mountains* 65 (3), 1984, 820–823.
- BIRKELAND, P. W.: Use of relative age-dating in a stratigraphic study of rock glacier deposits, Mt. Sopris, Colorado. In: *Arctic and Alpine Research* 5, 1973, 401–416.
- BURNS, S. F.: Alpine soil distribution and development, Indian Peaks, Colorado Front Range. Diss. University of Colorado at Boulder. 1980.
- BURNS, S. F. a. TONKIN, P. J.: Soil-geomorphic models and the spatial distribution and development of alpine soils. In: THORN, C. E. (Ed.): *Space and time in geomorphology*. London, 1982, 25–43.
- CAINE, N.: The geomorphic processes of the alpine environment. In: IVES, J. D. a. BARRY, R. G. (Eds.): *Arctic and Alpine Environments*. London 1974, 721–748.
- FAHEY, B. D.: An analysis of diurnal freeze-thaw and frost heave cycles in the Indian peaks region of the Colorado Front Range. In: *Arctic and Alpine Research* 5 (3,1), 1973, 269–281.
- FURRER, G.: Solifluktuationsformen im schweizerischen Nationalpark. In: *Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen des schweizerischen Nationalparks 4 (Neue Folge)*, 1954, 203–275.
- GABLE, D. J. a. MADOLE, R. F.: Geological map of the Ward quadrangle, Boulder County, Colorado. Scale 1:24 000. U. S. Geological Survey Map GQ-1277. 1976.
- GRUBER, F.: Die Verstaubung der Hochgebirgsböden im Glocknergebiet. In: *Veröff. des Österr. MaB-Hochgebirgsprogramms Hohe Tauern* 3, 1989, 69–90.
- HANSEN-BRISTOW, K. J.: Environmental controls influencing the altitude and form of the forest alpine tundra ecotone, Colorado Front Range, Ph. D. thesis. Univ. of Colorado, Boulder. 1981.
- HANSEN-BRISTOW, K. J. a. IVES, J. D.: Change in the forest-alpine tundra ecotone: Colorado Front Range. In: *Physical Geography* 5, 1984, 186–197.
- : Composition, form, and distribution of the forest-alpine tundra ecotone, Indian Peaks, Colorado, U. S. A. In: *Erdkunde* 39, 1985, 286–295.
- HANSEN-BRISTOW, K. J., IVES, J. D. a. WILSON, J. P.: Climatic variability and tree response within the forest-alpine tundra ecotone. In: *Annals of the Assoc. of American Geographers* 78, 1988, 505–519.
- HÖLLERMANN, P. W.: Zur Verbreitung rezenter periglazialer Kleinformen in den Pyrenäen und Ostalpen. *Göttinger Geographische Abhandlungen* 40, 1967.
- HOLTMEIER, F.-K.: Ergänzende Beobachtungen in der Steinwildkolonie am Schafberg und Piz Albris bei Pontresina. In: *Bündner Wald* 21 (6), 1968, 244–249.
- : Geoökologische Beobachtungen und Studien an der subarktischen und alpinen Waldgrenze in vergleichender Sicht (nördliches Fennoskandien/Zentralalpen). *Erdwissenschaftliche Forschung* 8, 1974.
- : Die bodennahen Winde in den Hochlagen der Indian Peaks Section (Colorado Front Range). In: *Münstersche Geographische Arbeiten* 3, 1978, 4–47.
- : Die klimatische Waldgrenze – Linie oder Übergangsaum (Ökoton)? – Ein Diskussionsbeitrag unter besonde-

- rer Berücksichtigung der Waldgrenzen in den mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel. In: *Erdkunde* 39/4, 1985, 271-285.
- : Über Bauminseln (Kollektive) an der klimatischen Waldgrenze - unter besonderer Berücksichtigung von Beobachtungen in verschiedenen Hochgebirgen Nordamerikas. In: *Wetter und Leben* 38, 1986, 121-139.
 - : Der Baumwuchs als klimaökologischer Faktor an der oberen Waldgrenze. In: *Münstersche Geographische Arbeiten* 27, 1987, 145-151.
 - : Timberlines as indicators of climatic changes: problems and research needs. In: FRENZEL, B. (Ed.): *Oscillations of the alpine and polar tree limit in the Holocene*. *Paläoklimaforschung* 9, Special Issue: ESF Project European Paleoclimate and Man 4, 1993(a), 211-222.
 - : Ecological aspects of climatically-caused timberline fluctuations - review and outlook. *ProClim Davos Conference Proceedings*, 1993 (im Druck).
- HOLTMEIER, F.-K. a. BROLL, G.: The influence of tree islands and microtopography on pedoecological conditions in the forest-alpine tundra ecotone on Niwot Ridge, Colorado Front Range, U. S. A. In: *Arctic and Alpine Research* 24 (3), 1992, 216-228.
- Ives, J. D.: Remarks on the stability of timberline. In: *Erdwiss. Forschung* 18, 1978, 313-317.
- : Studies on high altitude geoecology of the Colorado Front Range; a review of the research program of the Institute of Arctic and Alpine Research. In: *Arctic and Alpine Research* 5 (3), 1973, 67-75.
- IVES, J. D. a. HANSEN-BRISTOW, K. J.: Stability and instability of natural and modified upper timberline landscapes in the Colorado Rocky Mountains, U. S. A. In: *Mountain Research and Development* 3, 1985, 149-155.
- KIM, D.-J.: Die dreidimensionale Verteilung der Strukturböden auf Island in ihrer klimatischen Abhängigkeit. Diss. Bonn, 1967.
- KOMARKOVA, V.: Alpine vegetation of the Indian Peaks Area, Front Range, Colorado Rocky Mountains. *Flora et Vegetatio Mundi* 7, Vaduz 1978.
- KOMARKOVA, V. a. WEBBER, P. J.: An alpine vegetation map of Niwot Ridge, Colorado. In: *Arctic and Alpine Research* 10, 1978, 1-29.
- Larsen, J. A.: The northern forest border in Canada and Alaska. *Ecological Studies* 70, 1988.
- LITAOR, M. I.: The influence of eolian dust on the genesis of alpine soils in the Front Range, Colorado. In: *Soil Science Society of America Journal* 51, 1987, 142-147.
- : Reply to „Comments on the influence of eolian dust on alpine soils“. In: *Soil Society of America Journal* 52, 1988, 301-302.
- MAHANEY, W. C.: Neoglacial chronology in the Fourth of July Cirque, Central Colorado Front Range. In: *Geological Society of America Bulletin* 84, 1973, 161-170.
- MARR, J. W.: The development and movement of the tree islands near the upper limit of tree growth in the southern Rocky Mountains. In: *Ecology*, 1977, 1159-1164.
- MIEHE, G.: Langtang Himal. Flora und Vegetation als Klimazeiger und -zeugen im Himalaya. A prodromus of the vegetation ecology of the Himalayas. *Dissertationes Botanicae* 158. Berlin-Stuttgart 1990.
- : Der Himalaya, eine multizonale Gebirgsregion. In: WALTER, H. u. BRECKLE, S. W.: *Ökologie der Erde*, Bd. 4, Gemäßigte und Arktische Zone außerhalb Euro-Nordasiens. Stuttgart 1991, 180-230.
- OSTBURN, W. S.: Ecological concentration of nuclear fallout in a Colorado mountain watershed. In: ABERG, B. a. HUNGATE, F. P. (Eds.): *Radioecological Concentration Processes*. *Proceedings International Symposium*, Stockholm 1966. New York 1967, 675-709.
- PAGE, A. L., MILLER, R. N. a. KENNEY, D. R.: *Methods of soil analysis*. *Agronomy* 9. Madison, Wisc. 1982.
- SCHUNKE, E.: Geoökologie der Frostböden auf Island und ihre Bedeutung für die Bodennutzung. In: *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft* 28, 1977, 23-51.
- Soil Survey Staff: *Keys to Soil Taxonomy*. SMSS Technical Monograph 19, 5th Edition. Pocahontas Press, Blacksburg 1992.
- STINGL, H.: Ein periglazialmorphologisches Nord-Süd-Profil durch die Ostalpen. Diss. Math.-Nat. Fakultät der Universität Göttingen. Göttingen 1969.
- THORN, C. E. a. DARMODY, R. G.: Contemporary eolian sediments in the alpine zone, Colorado Front Range. In: *Physical Geography* 1, 1980, 162-171.
- TROLL, C.: Strukturböden. Solifluktion und Frostklimate der Erde. In: *Geologische Rundschau* 34 (7/8), 1944, 543-694.
- : Die Formen der Solifluktion und der periglazialen Bodenabtragung. In: *Erdkunde* 1, 1947, 162-175.
 - : Der subnivale oder periglaziale Zyklus der Denudation. In: *Erdkunde* 2, 1948, 1-21.
 - : Rasenabschälung (Turf Exfoliation) als periglaziales Phänomen der subpolaren Zonen und der Hochgebirge. In: *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge, Supplementband* 17, 1973, 1-32.
- TRÜBY, P. u. ALDINGER, E.: Eine Methode zur Bestimmung austauschbarer Kationen in Waldböden. In: *Zeitschr. für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 152, 1989, 301-306.
- WARDLE, P.: Engelmann spruce (*Picea engelmannii*) at its upper limits in the Front Range, Colorado. In: *Ecology* 49, 1968, 483-495.