

**Zur morphologischen Bedeutung des Kammeises
in der subnivalen Zone randtropischer semihumider Hochgebirge**
Beobachtungen aus Mexiko in den Jahren 1971–1975*

von

KLAUS HEINE, Bonn

mit 15 Photos und 3 Figuren

In memoriam Professor Dr. Drs. h. c. CARL TROLL

Zusammenfassung. Kammeisvorkommen wurden während der Jahre 1971–1975 zu allen Jahreszeiten an den hohen mexikanischen Vulkanen (ca. 19° N) beobachtet. Die Kammeisbildungen entwickeln sich vorwiegend auf Andosolen und feinsandigen vulkanischen Aschen. Eine Vielzahl bestimmter Strukturböden und Abtragungsarten ist genetisch mit der Bildung von Kammeis verknüpft. Folgende Phänomene werden beschrieben: *Kammeisbedingte Bodenmuster*; dazu gehören unsortierte Erdstreifen und Erdknospen und sortierte Erdstreifen; es kann hier zwischen Ausrichtungen der Formen unterschieden werden, die (a) vom Einfallen der Sonnenstrahlen abhängig sind und (b) von der Hangneigung bestimmt werden. Kammeisbedingt sind auch *Rasenabschälung*, Rasengirlanden und -terrassen sowie Vegetationsringe. Die *Glatthangbildung* ist eng mit der Kammeisbildung verknüpft. *Textur-* und *Zellenböden* haben ihre erste Anlage durch Trockenrisse erfahren. *Steinstreifen*, Steinpolygone und Steinnetze mit Ausmaßen über 1 m sind an tief in den Boden eindringenden Frost gebunden; diese zuletzt genannten Formen treten nur in Höhen über 4750 m auf. Kammeisbedingte Strukturböden kommen bis in Höhen unter 2750 m vor. Daher wird eine *frostbodenbedingte Strukturbodengrenze* von einer *kammeisbedingten Strukturbodengrenze* unterschieden. Durch diese Unterscheidung wird ein Weg aufgezeigt, der das Problem der in den Subtropen und Randtropen divergierenden (HÖVERMANN 1954) bzw. konvergierenden (TROLL 1944) Schnee- und Strukturbodengrenzen zu lösen verspricht.

Summary. The existence of needle ice was observed in all seasons at the high Mexican volcanoes during the years 1971–1975 (ca. 19° N). Needle ice features develop especially upon andosols and fine sandy volcanic ashes. A great number of certain structured soils and kinds of denudation are associated genetically with the development of needle ice. The following phenomena are

* Für eine großzügige finanzielle Unterstützung im Rahmen des Mexiko-Projektes danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft recht herzlich.

described: *soil patterns due to needle ice*; to this belong unsorted soil stripes and soil buds and sorted soil stripes; there we can discern between aspects of features which are controlled (a) by the angle of incidence of the sun rays and (b) by the dip of the slope. Also controlled by needle ice are *peeling off of turf*, turf festoons and terraces as well as vegetation rings. The development of needle ice is closely related to the *forming of smooth slopes*. *Structured and cellular soils* have been initiated by mud cracks. *Stone stripes*, stone polygons and stone nets with a size of more than 1 m are caused by frost which penetrated deeply into the soil; these features mentioned last occur only at levels above 4750 m. Structured soils due to needle ice occur at levels below 2750 m. Therefore a *structured soil limit due to frost ground* is differentiated from a *structured soil limit caused by needle ice*. By this criterion a means is offered, which is expected to solve the problem of subtropical and marginal tropical diverging (HÖVERMANN 1954) and converging (TROLL 1944) snow and structured soil limits respectively.

Résumé. Des pipkrakes furent observés pendant les années 1971–75 en toutes saisons sur les grands volcans du Mexique (environ vers 19° N). Ces pipkrakes se sont surtout développées sur des « andosols » et sur des cendres volcaniques finement sableuses. Un grand nombre de sols structurés déterminés et de types de désagrégation est lié génétiquement avec la formation de ces pipkrakes. On a décrit les phénomènes suivants: des échantillons de sol déterminés par la présence de pipkrakes; on y trouve des sols striés non classés des « Erdknospen » (?) et des sols striés classés. On peut aussi distinguer ici les alignements de formes a) qui dépendent de l'incidence des rayons du soleil et b) de celles qui sont déterminées par les pentes. Sont aussi dépendantes des pipkrakes les enlèvements de gazon, les guirlandes de gazon, les terrasses gazonnées de même que les cercles de végétation. La formation de pentes lisses est liée étroitement avec la formation des pipkrakes. Des sols structurés et des sols alvéolés peuvent se former à partir de fissures de dessiccation. Des alignements de pierres, des polygones de pierres et des concentrations pierreuses avec des dimensions dépassant 1 m sont en relation avec la pénétration profonde du gel dans le sol. Ces dernières formes n'apparaissent qu'à des altitudes supérieures à 4750 m. Les sols structurés déterminés par les pipkrakes apparaissent jusqu'à des altitudes inférieures à 2750 m. On doit de ce fait distinguer entre une limite de sols structurés déterminée par le gel, et une limite de sols structurés déterminée par les pipkrakes. Cette distinction montre une voie qui promet de résoudre le problème des limites entre neige et sols structurés, qui sont divergentes dans les régions subtropicales d'après HÖVERMANN (1954) et au contraire convergentes, d'après TROLL (1944).

1 Einleitung

Das Phänomen „Kammeis“ wurde bisher aus Mexiko noch nicht beschrieben. LORENZO (1969 a, b) nennt zwar verschiedene Strukturformen, die auf Kammeisbildungen zurückzuführen sind, doch beschreibt LORENZO diese Formen ganz allgemein als „periglaziale Bildungen“ ohne weitere Differenzierung der sie bildenden Vorgänge.

In jüngerer Zeit sind Kammeisvorkommen sowohl in den venezolanischen Anden (SCHUBERT 1972, 1973) als auch in den White Mountains in Kalifornien (BEATY 1974) beschrieben worden; beide Autoren erklären Bodenstreifen aus dem Zusammenwirken von Kammeis und Wind.

Gleiche Miniaturstrukturböden kommen zeitweise an allen hohen mexikanischen Vulkanen vor. Ihre Bildung ist kammeisabhängig und nicht windbeeinflusst. Verschiedene Strukturböden (Streifen, Erdknospen, Ringe, Polygone) sind hinsichtlich ihrer Ausbildung abhängig von der Bodenart, der Boden- und Luftfeuch-

tigkeit, der Besonnung nach nächtlichem Kammeisauffrieren und der Hangneigung. Der Wind hat keine primäre Bedeutung für die Bildung und Ausrichtung der Formen. Unsortierte Miniaturbodenstreifen sind nach dem Sonnenstand und nicht nach der Windrichtung ausgerichtet; gleiche Verhältnisse beschreiben FURRER & GRAF (1976) aus Ostafrika. Sortierte Erdstreifen zeigen eine Ausrichtung hangabwärts.

Neben der Ausbildung eines sogenannten subnivalen Kleinformenschatzes ist das Kammeis an den hohen mexikanischen Vulkanen auch für den Vorgang der Rasenabschälung (TROLL 1973; LAUER & KLAUS 1975) und die Bildung von Glatthängen mitverantwortlich zu machen.

Abschließend werden die kammeisbedingten Formen mit anderen Phänomenen der subnivalen Höhenstufe verglichen.

2.1 Kammeis und Miniaturstrukturböden

2.1.1 Allgemeines

Nach OUTCALT (1971, zit. nach WASHBURN 1973) müssen drei Bedingungen erfüllt werden, damit Kammeisbildung möglich ist: (1) eine Oberflächen-Gleichgewicht-Temperatur von mindestens $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Eisbildung, wobei die Unterkühlung nicht eine Lufttemperatur von $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ impliziert, denn diese kann auch aus der Evaporation und der thermischen Strahlung resultieren, (2) eine Bodenwasserspannung innerhalb bestimmter Werte, und (3) der Wärmefluß von der Gefrierfront wird durch die latente Kristallisationswärme des Bodenwassers kompensiert, das die wachsenden Eiskristalle nährt.

Die Voraussetzungen für Kammeisbildung sind an den mexikanischen Vulkanen oberhalb ca. 3600 m Höhe oft gegeben. Neben den klimatischen Besonderheiten (Fig. 1) sind es vor allem die spezifischen Böden, die die Nadeleisbildung begünstigen. Die jungen vulkanischen Aschenböden, sogenannte Andosole, zeigen einen dunkelgrauen bis schwarzen A_h -Horizont von unterschiedlicher Mächtigkeit (10 bis über 60 cm). Die Bodenart ist sandig bis sandig-schluffig-lehmig. Die Tonsubstanz besteht zum größten Teil aus Allophan. Humus, meistens aus Mull bestehend, liegt in relativ stabiler Form vor. Der A_h -Horizont zeigt krümeliges oder bröckeliges Gefüge mit instabilen, sehr porösen Gefügeelementen. Die untere Grenze des A_h -Horizontes ist oft abrupt, zum Teil mit Humuszungen ausgebildet. Zu den besonderen physikalischen Eigenschaften der Andosole gehört ein spezifisches Gewicht von ca. 2,2 bis 2,8 g/cm^3 bei einem außerordentlich niedrigen und schwankenden Volumengewicht (Werte unter 1,0 g/cm^3). Die meisten Andosole besitzen nach der Fingerprobe den Bodenartcharakter sandiger Lehme bis Lehme; die Laborbestimmungen der Korngrößenzusammensetzung sind wegen des Mangels an Dispergierung infolge isoelektrischer Eigenschaften der Allophane sehr problematisch. Die Porosität (Makro- und Mikroporen) der Andosole ist sehr hoch und kann die Werte bis 75 % erreichen. Die Andosole besitzen ein hohes Wasserspeichervermögen von über 100 % des Bodengewichtes bei Feldkapazität. Veränderungen in der Wasserspeicherung scheinen vom pF abhängig zu sein. Die Wasserdurchlässigkeit der Andosole ist hoch. (Weitere Einzelheiten zu den Andosolen finden sich bei BESOAIN MONASTERIO 1969; AVECES GARCIA & AGUILERA HERRERA 1969; MIEHLICH 1974; LAUER & KLAUS 1975.)

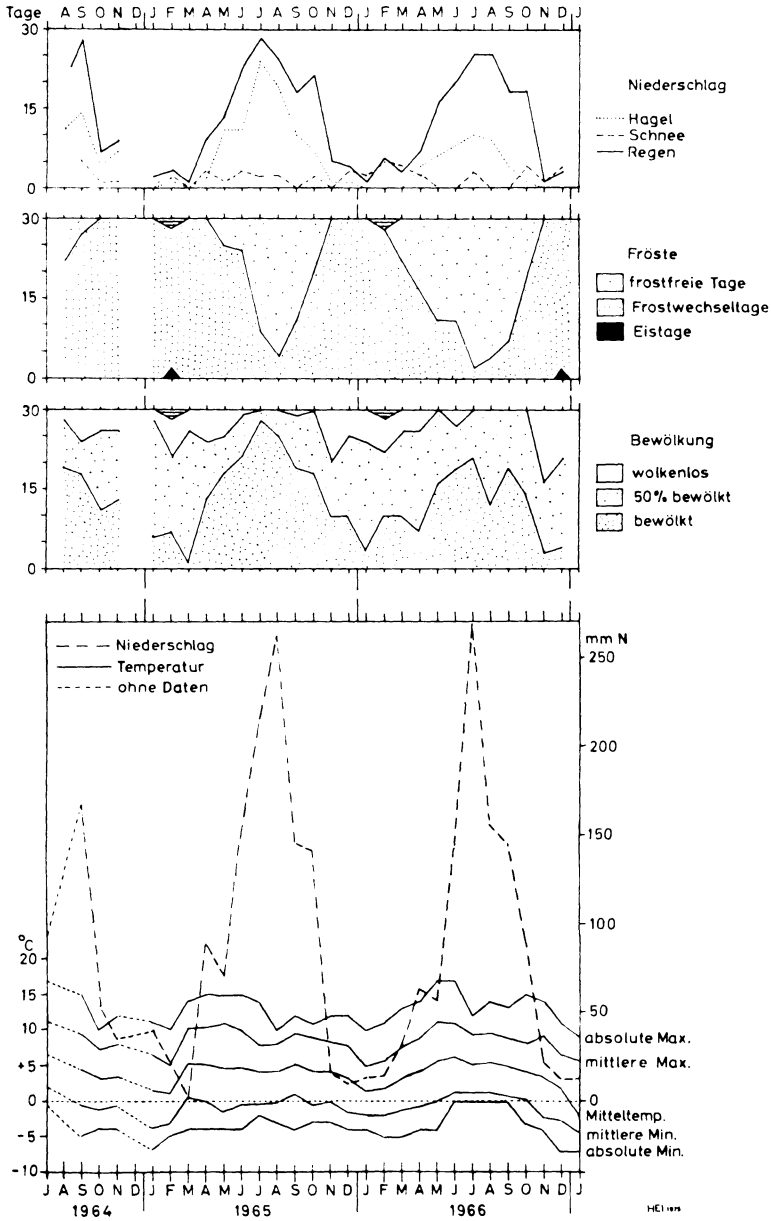


Fig. 1. Klimadaten des Nevado de Toluca. Die Beobachtungsstation liegt in 4120 m Höhe am Nordhang des Vulkangebirges. Zusammengestellt nach LORENZO (1969 a).

Fast alle genannten morphologischen und physikalischen Eigenschaften der Andosole begünstigen bei entsprechenden klimatischen Bedingungen, wozu neben den Temperaturen, der Luftfeuchtigkeit und den Winden auch die Niederschläge — und damit die Bodenfeuchte — gehören, die Kammeisbildung. Entsprechend der höhenbedingten Temperaturabnahme bei gleichzeitiger Zunahme der Frostwechseltage an den hohen Vulkanen Mexikos nimmt die Auftretshäufigkeit von Kammeisbildungen mit der Höhe zu. Oberhalb ca. 4200 m Höhe ist die Entwicklung der Andosole oft sehr schwach, so daß in größeren Höhen vom Substrat her ungünstigere Voraussetzungen für Kammeisbildung vorliegen. Dort beschränkt sich die Kammeisbildung auf lockere, feinkörnige Ablagerungen (z. B. vulkanische Aschen).

2.1.2 *Kammeisvorkommen in Mexiko*

Im Norden der Iztaccíhuatl (Rio Frio-Paß) wurde Kammeis in 3200 m Höhe wiederholt beobachtet. Am Malinche-Vulkan und am Popocatepetl wie auch am Pico de Orizaba konnten Kammeisbildungen an verschiedenen Tagen vorwiegend im Winter (November—März) nach vorangegangenen Niederschlägen (auch nach Nebelniederschlägen) regelmäßig in Höhen über 3600 m angetroffen werden. Oberhalb der oberen Waldgrenze in rund 4000 m Höhe kann Kammeis während aller Monate gebildet werden, sofern die Böden genügend Feuchtigkeit enthalten, was im strahlungsreichen Winter nur nach Niederschlägen der Fall ist (Fig. 1). Kammeis kann im Bereich der mexikanischen Vulkane auch noch weit unterhalb 3200 m Höhe entstehen. Miniaturstrukturformen konnten in 2800 m Höhe am Malinche-Vulkan beobachtet werden, deren Bildung kammeisbedingt war. Eine Obergrenze der Kammeisvorkommen existiert nicht.

Die Größe der beobachteten Kammeisnadeln schwankt zwischen wenigen Millimetern und 5 cm. Neben gerade emporragenden Eisnadeln (Photo 1) kommen auch gekrümmte Formen vor. Mehrtägige, übereinanderliegende Kammeis-schichten wurden während aller Beobachtungsjahre an den mexikanischen Vulkanen nicht gefunden. Sämtliche Kammeisnadeln waren eintägige Bildungen.

2.1.3 *Kammeisbedingte Bodenmuster*

Zwei Gruppen unterschiedlicher kammeisbedingter Miniaturstrukturböden lassen sich unterscheiden: (1) Strukturböden auf Andosolen und (2) Strukturböden auf \pm unverwitterten vulkanischen Aschen und Lapilli.

Zu 1: Sofern sich Kammeisnadeln unmittelbar unterhalb der Oberfläche der Andosole ausbilden, wird ein ca. 0,5—3,0 cm mächtiger Teil des obersten Andosols durch das Kammeis emporgehoben. Die Dicke der gehobenen Bodenschicht hängt von der Eindringtiefe des Frostes in den Boden ab. Durch das Aufrieren allein werden keine regelmäßigen Miniaturformen im Boden ausgebildet; die gehobene Bodenschicht zeigt — solange die Kammeisnadeln aufrecht stehen (Photo 2) — keinerlei Muster. Erst durch das Zusammenbrechen der Kammeisnadeln können regelmäßige Muster gebildet werden.

Am auffälligsten sind gestreifte Böden (Photo 3), gekrümelte Böden (Photo 4) und Böden, bei denen gröbere Steine von Lücken umgeben werden. Gestreifte Bodenmuster entstehen, wenn die Kammeisnadeln in Richtung der

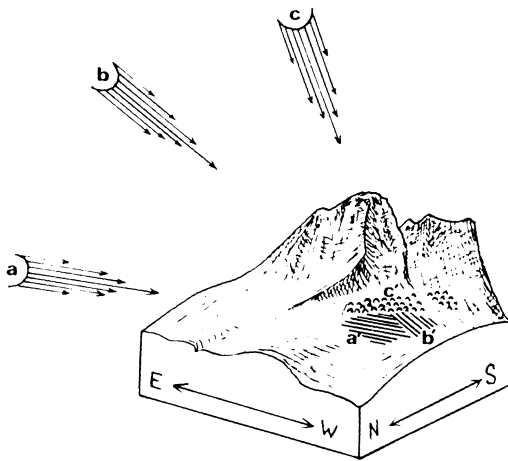


Fig. 2. Blockbild zur Veranschaulichung der sonnenabhängigen Anordnung der Miniaturbodenstreifen. Verschiedene Hangteile werden am Morgen nach und nach von den Sonnenstrahlen erfaßt; entsprechend dem Sonnenstand (a – b – c) sind die Streifen (a' – b') angeordnet. Liegt die Oberfläche im Schatten, so daß mit steigender Lufttemperatur das Kammeis abschmilzt, so entstehen krümelige Muster (c').

einfallenden Sonnenstrahlen zusammenbrechen (Fig. 2); die Vorgänge entsprechen den von FURRER & GRAF (1976) aus Ostafrika beschriebenen.

Während der verschiedenen Jahre konnte wiederholt bei Sonnenaufgang das Zusammenfallen der Kammeisnadeln in Richtung der einfallenden Sonnenstrahlen beobachtet werden; der Vorgang dauert oft nur wenige Minuten. Windmessungen ergaben keinerlei Zusammenhänge zwischen den oft nur sehr schwachen bodennahen Luftströmungen und den innerhalb weniger Minuten entstandenen ausgerichteten Bodenstreifen (Photo 3).

Die Streifen sind in ihrer Ausrichtung unabhängig vom Relief, sie können also schräg zur Hangneigung verlaufen. Lokale Winde beeinflussten die Streifenbildung an keiner Stelle an den mexikanischen Vulkanen. Hinsichtlich der Orientierung der Erdstreifen können geringe Abweichungen festgestellt werden, die mit dem unterschiedlichen Sonnenstand zur Zeit des Kammeisabschmelzens übereinstimmen (Fig. 2). Krümelmuster werden gebildet, wenn das Kammeis im Schatten allein durch die Erwärmung der Luft (ohne das direkte Auffallen der Sonnenstrahlen) abschmilzt.

Texturböden (Photo 5) und Zellenböden (Photo 6) entstehen häufig dort, wo die Porosität der Andosole weniger hoch und das Wasserspeichungsvermögen etwas geringer sind. Bei den Texturböden wird die Oberfläche durch millimeter- bis zentimeterbreite Risse aufgeteilt; eine Materialsortierung findet nicht statt (vgl. FURRER & FREUND 1973). Kammeis hat bei diesen Vorgängen nach den Beobachtungen in Mexiko keine Bedeutung. Die Risse sind Trockenrisse in dem schluffig-lehmigen Boden. Allerdings sind Übergangsformen zwischen krümelartigen kammeisbedingten Bodenmustern und Trockenrißmustern beobachtet worden. Beide Vorgänge können sich demnach ergänzen. Die Zellenböden sind durch eine Steinfüllung der Risse und der schmalen Spalten gekennzeichnet (vgl. FURRER & FREUND 1973). Diese Sortierung (Photo 6) des Materials erfolgt an den mexikanischen Vulkanen nicht durch frostbedingte Vorgänge, sondern durch den Wind, der die relativ leichten Bimslapilli über die vegetationslose Oberfläche



Photo 1

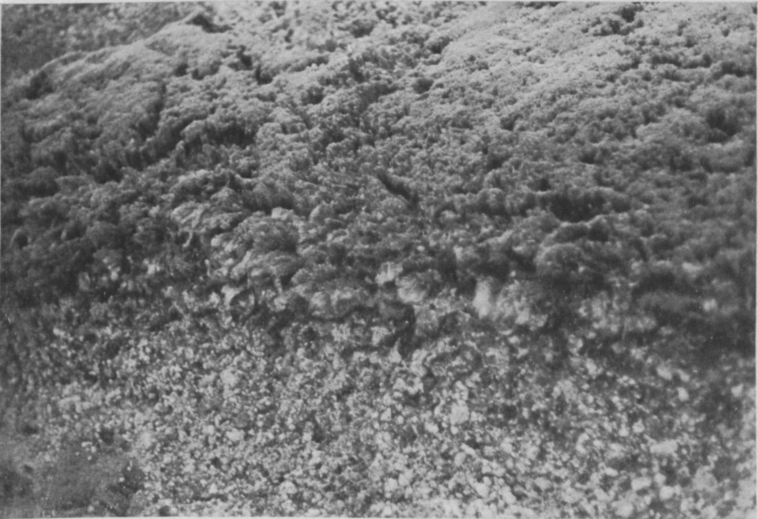


Photo 2

Photo 1. Kammeisnadeln von ca. 4,5 cm Länge haben die oberste Bodenschicht emporgehoben. Im Vordergrund (Bildmitte) wurden die Kammeisnadeln entfernt. Nevado de Toluca, 4030 m Höhe. Photo: K. HEINE, 19. 2. 75, 7.30 Uhr.

Photo 2. In der oberen Bildhälfte erkennt man vom Kammeis gehobenes Bodenmaterial; an der Oberfläche ist kein Muster zu erkennen. Im unteren Bildteil bildete sich in grobkörnigen Bimsen kein Kammeis aus. Nevado de Toluca, 3850 m Höhe, 19. 2. 75, 7.10 Uhr. Photo: K. HEINE.

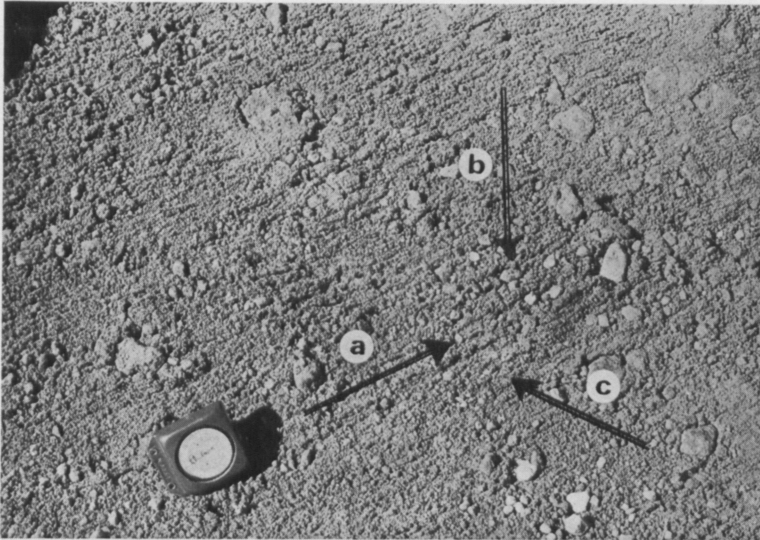


Photo 3

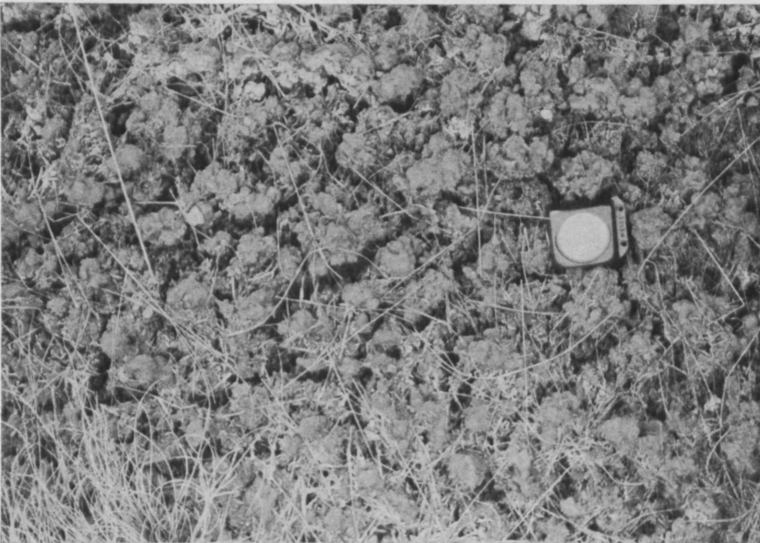


Photo 4

Photo 3. Unsortierte Bodenstreifen. Auf dem Bild sind die Richtung (a) der einfallenden Sonnenstrahlen, (b) der Hangneigung und (c) des bodennahen Windes eingetragen. Die Streifen bildeten sich zwischen 7.35 und 7.45 Uhr in 4030 m Höhe am Nevado de Toluca. Größere Steine sind von Lücken umgeben. Photo: K. HEINE, 19. 2. 75.

Photo 4. Gekrümelter Boden am Paso de Cortés in ca. 4100 m Höhe. Das Bodenmuster entstand nach nächtlichem Kammeisauffrieren und Abtauen der Eisnadeln im Schatten der Horstgräser. Ausgangsmaterial ist ein typischer Andosol. Photo: K. HEINE, 20. 2. 75, 8.15 Uhr.



Photo 5



Photo 6

Photo 5. Texturboden am Paso de Cortés in ca. 4000 m Höhe. Ausgangsmaterial ist ein von größeren Bimslapilli durchsetzter sandiger Andosol. Photo: K. HEINE, 20. 2. 75, 8.30 Uhr.

Photo 6. Zellenboden am Paso de Cortés in ca. 4000 m Höhe. Die vom Wind fortbewegten Bimslapilli setzen sich zum Teil in den Trockenrissen fest, so daß eine Materialsortierung entsteht. Die Streifung von links oben nach rechts unten ist windbedingt. Photo: K. HEINE, 20. 2. 75, 8.30 Uhr.



Photo 7. Miniaturstreifenboden ohne Materialsortierung am Pico de Orizaba in ca. 4850 m Höhe. Der Bildrand vorn unten umfaßt ca. 2 m. Photo: K. HEINE, 1. 3. 75, ca. 11.00 Uhr.

Photo 8. Sortierte Erdstreifen am Pico de Orizaba in ca. 4850 m Höhe. Die Streifen weisen hangabwärts; größere Steine werden teilweise von den Erdstreifen „umflossen“. Der Abstand der Streifen beträgt 12–15 cm. Photo: K. HEINE, 1. 3. 75, ca. 11.00 Uhr.

Photo 9. Rasenabschälung am Paso de Cortés in ca. 3850 m Höhe. Durch den Straßenanschnitt wurde die ursprünglich geschlossene Vegetationsdecke („Zacatonales“) angeschnitten; infolge Kammeisauffrierens wird der lockere Aschenboden unter den Grasbüscheln gelockert und durch ‚Kammeissolifluktion‘ hangabwärts transportiert. Die Büschel verlieren ihren Halt und brechen herab. Rechts neben der *Pinus hartwegii* blickt man auf den vergletscherten Nordhang des Popocatepetl-Gipfels (5452 m). Photo: K. HEINE, 20. 2. 75.



Photo 8



Photo 9



Photo 10



Photo 11

Photo 10. Rasenabschälung am Vulkan La Malinche in ca. 4100 m Höhe. Der Ansol ist bis auf wenige Reste, die durch Büschelgräser festgehalten werden, abgetragen worden. Kammeis und Windabtrag schufen die von Steinen bedeckte Fläche in der Bildmitte. Photo: K. HEINE, 26. 2. 75.

Photo 11. Inselartige Auflösung der Moos- und Grasvegetation im Krater des Nevado de Toluca in 4125 m Höhe. Der Ando-Boden zwischen der Vegetation zeigt ein gekrümeltes Muster rechts und im Hintergrund, das in ein schwach gestreiftes Muster (links) überleitet. Nur links, wo die Streifen andeutungsweise zu erkennen sind, tauten die einfallenden Sonnenstrahlen (von rechts kommend) die Kammeisnadeln ab und schufen die Streifen. Im Schatten der Blöcke und der Vegetation (rechts) entstanden die Krümelmuster, nachdem durch die Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt die dünnen Kammeisnadeln zusammenbrachen. Photo: K. HEINE, 16. 3. 75, 12.15 Uhr.



Photo 12



Photo 13

Photo 12. Aus Büschelgräser hervorgegangene Vegetationsringe am Pico de Orizaba in ca. 4100 m Höhe. Im Bereich der Grashorste ist relativ viel Feinmaterial (vulkanische Asche) angereichert; diese Aschen können die Feuchtigkeit länger speichern, so daß die Frostwechsel sich hier durch die Kammeisbildung vegetationszerstörend auswirken können. Die Ringe wachsen von innen nach außen weiter. Photo: K. HEINE, 1. 3. 75.

Photo 13. Streifenartige Anordnung der Horstgräser am Nordhang des Nevado de Toluca in ca. 4150 m Höhe. Der Pfeil kennzeichnet die Richtung der am Morgen einfallenden ersten Sonnenstrahlen (etwa E-W-Richtung). Es wird vermutet, daß die Vegetationsstreifen sonnenabhängige kammeisbedingte Bildungen sind, da sie sich weder an das Relief anlehnen noch in Richtung möglicher bodennaher Winde (kalte Fallwinde) verlaufen. Auch sind die Streifen nur dort ausgebildet, wo die morgendlichen Sonnenstrahlen eine größere Hangfläche schräg erfassen und wo häufig Kammeisbildungen beobachtet wurden (Nordhang). Photo: K. HEINE, 22. 2. 75.



Photo 14



Photo 15

Photo 14. Glatthang am Nevado de Toluca in ca. 4450 m Höhe. Die Streifung des Hanges ist eine Folge der flächenhaften Abtragung durch kammeisbedingte Prozesse. Im Hintergrund erkennt man am Horizont die Sierra Nevada mit den Vulkanen Popocatepetl (rechts) und Iztaccíhuatl (links). Photo: K. Heine, 22. 2. 75.

Photo 15. Durch Murgänge gebildete Rinnen (R) und kleine Wälle (W) am Nordhang des Pico de Orizaba in ca. 4280 m Höhe. Die bis über 10 m tiefen Furchen wurden innerhalb von wenigen Tagen bei außergewöhnlich heftigen Niederschlägen gebildet. Die Bildung selbst konnte nicht beobachtet werden. Photo: K. HEINE, 1. 3. 75.

treibt, wo diese dann in den Rissen liegen bleiben können. Eine Weiterentwicklung dieser Zellenböden zu Steinpolygonböden, wie sie FURRER & FREUND (1973) beschreiben, wurde an den mexikanischen Vulkanen nicht beobachtet.

Zu 2: Auf unverwitterten vulkanischen Aschen und Lapilli können durch Kammeisbildungen nur folgende der zuvor beschriebenen Miniaturstrukturböden entstehen: gestreifte Böden (ohne Materialsortierung) und gekrümelte Böden (die Krümel neigen weniger zu polygonaler Abgrenzung, sondern mehr zu gerundeten Formen); beide Miniaturstrukturbodenformen kommen vor, wenn das Material feinsandig bis sandig ist und *keine* gröberen Lapilli enthält (Photo 7). Enthält das Material, in dem sich die Formen bilden, jedoch neben Sanden auch Lapilli (Kiesfraktion), so werden häufig in den Höhen über rund 4400 m sortierte Miniaturstreifenböden angetroffen (Photo 8). Die Anordnung der Streifen richtet sich nach der Richtung des stärksten Gefälles; die Anordnung ist weder von den einfallenden Sonnenstrahlen noch vom Wind abhängig. Diese Miniaturstrukturböden („Erdstreifen“ nach FREUND 1972) sind das Ergebnis wiederholter Kammeisaufrierungen; sie finden sich in kleineren Mustern und schwächerer Entwicklung auch noch in tieferen Lagen, wo bereits infolge der Verwitterung das Ausgangsmaterial einen höheren Schluff- und Tonanteil (vorwiegend Allophane und Humusbestandteile) aufweist. Auch dort ist dann die Ausrichtung der Streifen abhängig vom Gefälle. Bei zunehmender Verwitterungsintensität des Materials, d. h. weiter hangabwärts, ist ein Übergang von Streifenböden, die hangabwärts weisen, zu Streifenböden festzustellen, deren Linienverlauf sonnenabhängig ist.

Die Richtung der Miniaturstreifen scheint demnach einerseits durch die Neigungsrichtung und andererseits durch die Richtung der ersten täglichen Sonnenstrahlen bestimmt zu werden. Ist das Material ein Andosol mit den oben beschriebenen Eigenschaften, so entstehen Muster in Abhängigkeit von der Sonne; ist das Material locker und sandig, so sind die Streifen hangabwärts ausgerichtet. Die Bodenart bestimmt, ob der Faktor Sonne oder der Faktor Hangneigung die Anordnung bedingt. Da die Bodenbildung mit der Höhe an den mexikanischen Vulkanen im allgemeinen abnimmt, finden sich die sonnenabhängigen Kammeismuster in den tieferen Lagen (in der Regel unterhalb 4400 m Höhe), während die reliefabhängigen Kammeisstreifenböden in Höhen über rund 4400 m vorkommen.

Nicht zu den kammeisbedingten Bodenmustern sind Formen zu rechnen, die in Höhen über 4750 m anzutreffen sind. Steinstreifen von vielen Zehnermetern Länge und ≥ 1 m Abstand sind häufig unterhalb der rezenten Gletscher ausgebildet. Steinnetze sind seltener aufgefunden worden. Zumindest bei den letztgenannten handelt es sich um Formen, die zu ihrer Bildung eine tiefgründige Bodengefrorenis verlangen. Da alle diesen großen Formen in Gebieten auftreten, die erst seit der Mitte des vergangenen Jahrhunderts nach und nach gletscherfrei geworden sind, muß mit einem recht jungen Alter der Steinstreifen und Steinnetze gerechnet werden.

2.2 *Rasenabschälung*

TROLL (1973) hat Rasenabschälung als periglaziale Phänomen der polaren Zonen und der Hochgebirge ausführlich beschrieben. Bei diesem Vorgang erscheint

die Frostwirkung, nämlich die Frosthebung des kahlen Mineralbodens durch Kammeis, als das Primäre, die Windausblasung als das Sekundäre (TROLL 1973). Probleme der Rasenabschälung in Mexiko behandeln LAUER & KLAUS (1975); dieser Vorgang kommt an allen großen Vulkanen in Höhen über rund 3600 m sehr häufig vor und wurde auch in Höhen bis 3500 m an künstlich geschaffenen Einschnitten beobachtet (Photo 9). Der Vorgang der Rasenabschälung läuft so ab, wie TROLL (1973) ihn beschreibt. Es können große Flächen von der Vegetation und von dem feinen, schluffigen Ando-Boden befreit werden (Photo 10).

Neben der Rasenabschälung hat das Kammeis auch zur Ausbildung einer Anzahl charakteristischer Vegetationsmuster geführt. Diese reichen von einer inselartigen Auflösung der Vegetation (Photo 11) über „Zacatonales“-Grasringe (Photo 12), die – wenn sie dichter beieinanderliegen – zu Rasengirlanden an Hängen zusammenwachsen können, bis hin zu einer streifenartigen Anordnung der Horstgräser (Photo 13). Sämtliche Rasengirlanden und Rasenterrassetten der subnivalen Stufe der mexikanischen Vulkane sind kammeisbedingte Formen (vgl. auch LAUER & KLAUS 1975). Bodenfrost, der tiefer in den Andosol eindringt, ist zur Ausbildung dieser – allgemein der gebundenen (bzw. halbgebundenen) Solifluktion zugeschriebenen Formen nicht erforderlich. Bei vielen terrassettenartigen Formen werden auch Materialsortierungen beobachtet, die ebenfalls kammeisbedingt sind. Infolge der geringen Neigung werden gröbere Steinchen vom Kammeis hangabwärts verlagert; gleiche Vorgänge beschreibt TROLL (1944).

2.3 Glatthangbildung

Der Terminus „Glatthang“ bezeichnet einen ungegliederten Hang mit geradem Querprofil und einer Neigung von etwa 27–35°. Glatthangbildung erfolgt an einigen hohen Vulkanen Mexikos im Bereich der subnivalen Stufe (Photo 14). Voraussetzung für die Glatthangbildung ist ein Gestein, das durch die Frostverwitterung in kleine, zentimetergroße Stückchen zerlegt wird. Durch Kammeisbildung werden die oberflächennahen Steinchen emporgehoben. Beim Zusammenbrechen der Eisnadeln fallen die Steinchen zu Boden und rollen infolge der Hangneigung von ca. 32° oft weit abwärts. Sofern Kammeis während der Nacht gebildet wurde, kann man am darauffolgenden Morgen, wenn die ersten Sonnenstrahlen die Hänge erreichen, zusehen, wie die Steinchen in Bewegung geraten. Während einiger Minuten, in denen das Kammeis zusammenfällt, scheint der Hang in Bewegung zu sein. Die Stille des Hochgebirges wird plötzlich von den Geräuschen der herabrollenden und -springenden Steinchen unterbrochen. Nach wenigen Minuten ist der Vorgang vorbei.

Das häufig gebildete Kammeis besorgt hier also die Abtragung. Nur in Verbindung mit diesen flächenhaft wirkenden Vorgängen ist eine Denudation auf der gesamten Breite der Hänge möglich, die zu der Form der Glatthänge führt. Dort, wo größere Steine oder Felsblöcke am Hang liegen und wo Anstehendes aus dem Schuttmantel, der oft nur wenige Dezimeter mächtig ist, emporragt, findet man unterhalb dieser Objekte Feinerdefahren. Diese entstehen durch die relative Anreicherung des feinen Materials unterhalb der Steine, die das Kammeis nicht mehr wegen ihres Gewichtes emporzuheben vermag und die deshalb keine Bewegung mitmachen: diese „Bremssteine“ (vgl. HASTENRATH 1973) sind charakteristisch

für alle Hänge, an denen die wesentlichen Abtragungsvorgänge durch das Kammeis bedingt werden. Die typische Streifung der Glatthänge weist sehr deutlich auf diese Vorgänge hin.

Selbst nach außergewöhnlich starken Niederschlägen wurden im Bereich der Glatthänge keine fluvialen Abtragungsspuren beobachtet, während an anderen Hängen Rutschungen und Murgänge stattfanden (Photo 15) (vgl. RAPP 1974).

3 Diskussion der Ergebnisse

Über die höhenwärtige Verbreitung sogenannter subnivaler Bodenformen (Fig. 3) ist seit der Arbeit von TROLL (1944) viel diskutiert worden (HÖLLERMANN 1972; FURRER & FREUND 1973; GRAF 1973; HASTENRATH 1973 u. a.). Im folgenden soll diese Diskussion nicht erneut aufgenommen werden; es wird jedoch versucht, die Ergebnisse aus Mexiko vergleichend zu betrachten.

(1) Miniaturstrukturböden haben in Mexiko verschiedene Ursachen. Unsortierte Erdknospen und Erdstreifen sind kammeisbedingte Formen, die beim Zusammenbrechen der Kammeisnadeln entstehen. Knospen werden in schattigen Lagen, Streifen in Abhängigkeit der einfallenden Sonnenstrahlen gebildet. Sortierte Miniaturerdstreifen entstehen in \pm unverwitterten Aschen und Lapilli mit einer hangabwärts gerichteten Anordnung der Streifen. Die Beobachtungen von SCHUBERT (1973) aus den venezolanischen Anden wie auch die Befunde von LIBOUTRY (1974) aus den Anden und von BEATY (1974) aus den White Mountains in Kalifornien, daß nämlich die kammeisbedingten Erdstreifen windabhängige Ausrichtung zeigen, kann für Mexiko nicht bestätigt werden. Dagegen stimmen die eigenen Beobachtungen mit den Befunden FURRERS aus Ostafrika überein (FURRER & GRAF 1976). Miniaturzellen- und Miniaturtexturböden sind keine frostbedingten Formen, sondern entstehen in ihrer primären Anlage durch Trockenrisse, die später durch eingewehte gröbere, vom Wind an der Bodenoberfläche bewegte Steinchen (meistens leichte Bimslapilli) zu einem sortierten Miniaturpolygonboden weiterentwickelt werden können. Es liegen keine Beobachtungen aus Mexiko vor, daß Bodenfrost zur Ausbildung dieser Formen führt.

(2) Rasenabschälung erfolgt — wie von TROLL (1973) beschrieben — infolge Kammeisauffrierens des Materials und Windausblasung. Aus Büschelgräsern können Vegetationsringe und schließlich Vegetationsgirlanden und -terrassen entstehen. Die Rasengirlanden, die die Hänge in unzählige kleine Stufen gliedern, sind nicht das Ergebnis gelisolifluidaler Prozesse, denn weder ein gefrorener Boden noch eine starke Wasserdurchtränkung des Bodens führen zu ihrer Bildung, sondern allein Kammeis im Zusammenhang mit einer vom Mikrorelief bedingten differenzierten Temperaturverteilung ruft die beschriebenen Formen hervor. Sehr wahrscheinlich sind neben Kammeis verschiedene Faktoren von Fall zu Fall in unterschiedlichem Ausmaß an der Ausbildung der Vegetationsmuster verantwortlich. LAUER & KLAUS (1975) beschreiben eine Möglichkeit; darüber hinaus kann aber auch Kammeis die Horstgräser zu Ringen auflösen, dadurch daß die Horste mehr Feuchtigkeit speichern können, wodurch bei extremeren Temperaturschwankungen durch den Gefrierpunkt (d. h. in größeren Höhen) im Grasbüschel häufiger Kammeis auftritt als in der oft steinigere unmittelbaren Umgebung der Pflanzen. Auch wurde am Pico de Orizaba beobachtet, daß die Vegetationsgir-

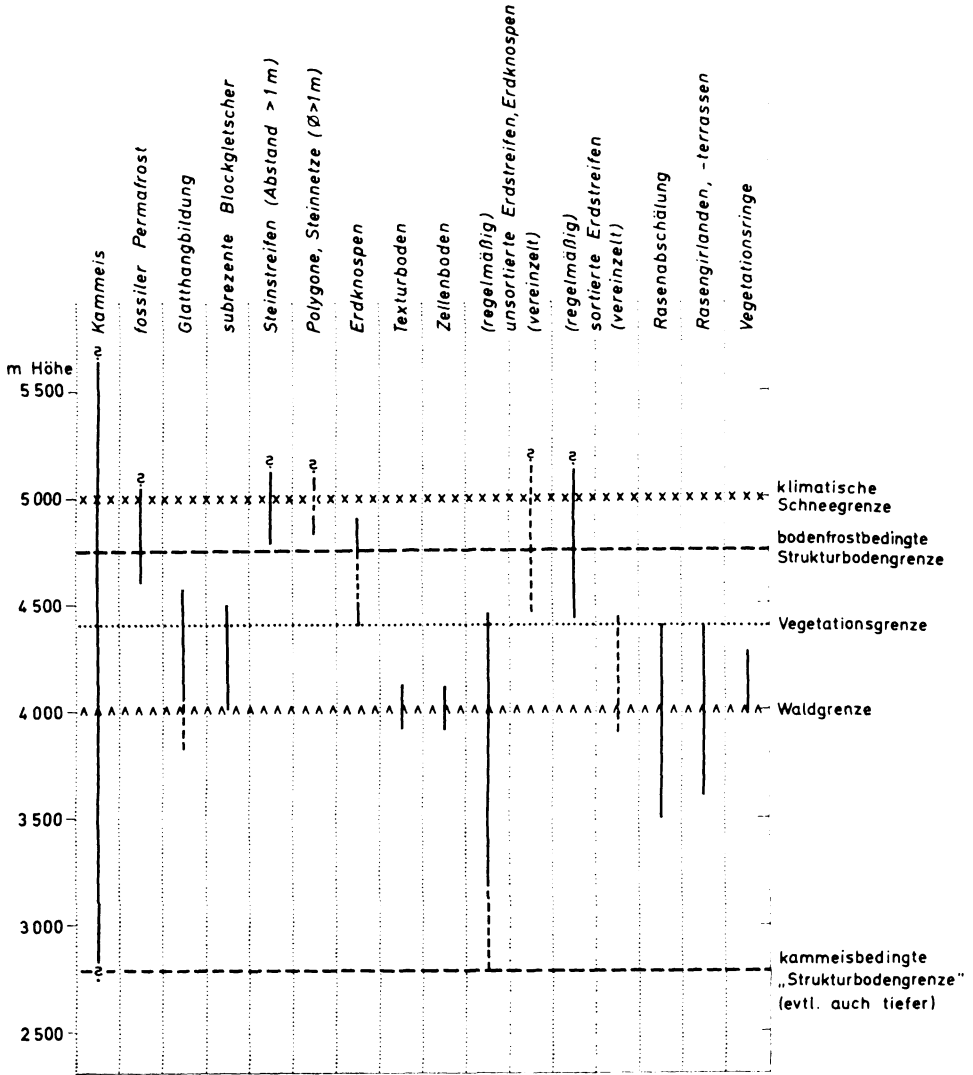


Fig. 3. Höhenwärtige Verbreitung der subnivalen Formen. Die Höhenangaben fußen auf Beobachtungen an den Vulkanen der Cordillera Neovolcánica Mexikos (etwa 19° N). Die Soliflukationsgrenze wird nicht erfaßt, da die „Kammeissolifluktion“ bis unter 3000 m Höhe hinabreichen kann.

landen unter der Wirkung häufiger starker kalter Fallwinde unterhalb der rezenten Gletscher sichelförmig hangabwärts-konkav wachsen. TROLL (1944) berichtet von derartigen „Windsichelrasen“ aus der chilenisch-bolivianischen Grenzkordillere. Während Rasengirlanden und Rasenschalen bis in Höhen von 3600 bzw. 3500 m hinab beobachtet werden können, findet man Vegetationsringe und aus diesen hervorgegangene Girlanden sowie Windsichelrasen nur oberhalb der Waldgrenze über 4000 m Höhe.

Rasengirlanden sind also an den mexikanischen Vulkangebirgen keine Belege für Solifluktionsprozesse. Wenn in der Literatur Rasengirlanden als Strukturbodenvorkommen gedeutet werden, dann trifft das nur für die Formen zu, die nachweislich durch Solifluktion i. e. S. gebildet wurden; Frostkriechen und Gelisolifluktion mögen in den Gebirgen der humiden Mittelbreiten, in hoch-ozeanischen Gebieten und anderswo zur Rasengirlandenbildung führen (HÖLLER-MANN 1972), im Bereich der mexikanischen Vulkane spielen Frostkriechen, das von den kammeisbedingten Abtragungsvorgängen zu unterscheiden ist (WASHBURN 1973), und Gelisolifluktion bzw. Solifluktion keine Rolle.

(3) Die Glatthangbildung ist an den mexikanischen Vulkanen ebenfalls kammeisbedingt. Neben den Abtragungsleistungen durch Kammeis ist zur Glatthangbildung ein Gestein erforderlich, das unter dem Einfluß der Frostverwitterung kleine lapilliartige Steinchen bildet, die der Sand- und Kriesfraktion angehören. Nur so ist die für die häufige Kammeisbildung notwendige Feuchtigkeitsspeicherung in der dünnen Schuttdecke über dem anstehenden Gestein möglich. Die Glatthanggenese kann für die mexikanischen Vulkane (Nevado de Toluca und La Malinche) folgendermaßen erklärt werden: Voraussetzungen sind (a) eine flächenhaft hohe Effektivität der mechanischen Verwitterung, (b) das Fehlen oder die geringe Wirksamkeit der fluvialen Erosion (durchlässiger Untergrund bei gleichzeitiger Möglichkeit der Wasserspeicherung im Material) und (c) der kammeisbedingte, rein gravitative Materialtransport an den typisch geneigten Glatthängen, die häufig eine entsprechende Vorform haben. Damit sind die von HAGEDORN (1970) genannten Voraussetzungen für die Glatthangbildung erfüllt. Die Beobachtungen aus Mexiko ergänzen darüber hinaus die Erörterung von WEISCHET (1969) über Glatthänge in der ariden Subtropenzone Chiles; Glatthänge werden dort als charakteristischer Formentyp der kaltzeitlichen Periglazialzone in den thermisch gemäßigten ariden Subtropen angesehen. Es soll hier aber ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß Glatthangbildung sicherlich auch möglich ist, wenn andere Prozesse den Schutt-Transport übernehmen.

(4) Polygonböden und Steinnetzböden wie auch Steinstreifenböden, die nicht als Miniaturformen vorliegen, befinden sich in Höhen über 4700 m. Ein Teil dieser Formen ist auf frostbedingte Vorgänge im Boden zurückzuführen, wobei jahreszeitliche Temperaturschwankungen eher eine Rolle spielen als tageszeitliche; Steinpolygonböden können möglicherweise auch ohne Bildung eines jahres- oder tageszeitlichen Auftaubodens entstehen, wie Beobachtungen aus der Antarktis zeigen (WASHBURN 1973). Das Vorkommen von Permafrost am Pico de Orizaba in Höhen über 4600 m (HEINE 1975 a) ergänzt die Beobachtungen hierzu. Steinstreifen mit Abständen von ca. 1 m und mehr findet man häufig unterhalb der rezenten Gletscher an den Vulkanen Popocatepetl, Iztaccíhuatl und Pico de Orizaba. Darauf haben bereits WHITE (1962), LORENZO (1969) und

HEINE (1975 b) hingewiesen. Beobachtungen an den Streifen ergaben, daß heute im Bereich der aus größeren Steinen bestehenden Streifen die Drainage erfolgt, so daß nicht entschieden werden kann, ob Ausspülungsprozesse die erste Anlage der Streifen verursachten oder ob diese durch frostbedingte Vorgänge erfolgte. Da auch Steinpolygone anzutreffen sind, für die die Annahme der primären Ausspülung des Feinmaterials nicht zutreffen kann, darf sicherlich auch – zumindest für einen Teil der Streifen – eine Entstehung infolge echter „periglazialer“ Verhältnisse angenommen werden.

Abschließend soll auf die Problematik hingewiesen werden, die sich daraus ergibt, daß Kammeis und nicht Solifluktsprozesse für die Ausbildung vieler sogenannter subnivaler Bodenformen verantwortlich ist. Es ist wichtig, zwischen Prozessen zu unterscheiden, die einerseits *kammeisbedingt* sind, d. h. Temperaturen unter dem Gefrierpunkt erfassen nur die obersten Millimeter (bis Zentimeter) des Bodens, und andererseits durch *frostabhängige Vorgänge im Boden* bedingt werden, d. h. Temperaturen unter dem Gefrierpunkt dringen tiefer in den Untergrund ein. Im ersten Fall wird Material durch Kammeisnadeln gehoben und bewegt, im zweiten Fall erfolgt die Bewegung infolge des Frosthubs, des Frostkriechens, des Frostschubs und möglicherweise auch der Gelisolifluktion. Verschiedene Prozesse können gleiche oder ähnliche Formen ausbilden; aus gleichen Formen – z. B. Strukturböden – darf daher nicht auf gleiche Prozesse bzw. Geofaktoren, die die Prozesse hervorrufen, geschlossen werden. HÖLLERMANN (1972) hat im Zusammenhang mit der Erörterung der rezenten Strukturbodengrenze nachdrücklich darauf verwiesen, daß sich nämlich das geökologische Beziehungsgefüge an der Strukturbodengrenze lokal und regional wandelt und daß es darüber hinaus einer jahreszeitlichen und/oder kurzperiodischen Rhythmik unterliegt.

Die Diskussion über ein Konvergieren (TROLL 1944) oder ein Divergieren (HÖVERMANN 1954) der Schneegrenze und Strukturbodengrenze in den Subtropen erscheint mir aufgrund meiner Beobachtungen in Mexiko und Teneriffa (vgl. auch HÖLLERMANN 1972, 1974; BARTELS 1973) einer Lösung nahe, wenn man die Prozesse und nicht die Formen betrachtet, denn die Diskussion ist eine Folge des Umstandes, daß gleiche Formen durch verschiedene Prozesse gebildet werden: in den Subtropen kann infolge Kammeisbildung ein „periglazialer“ Formenschatz weit unterhalb der Schneegrenze entstehen, was in den gemäßigten Breiten und innertropischen Gebieten selten oder nicht möglich ist, da schneefreie Frostwechseltage, d. h. morphologisch wirksame Frostwechsel an der Bodenoberfläche, weit unterhalb der Schneegrenze nur selten auftreten (vgl. HASTENRATH 1960; TROLL 1943). Werden die kammeisbedingten Formen als rezente periglaziale Kleinformen angesehen, dann müssen wir mit HÖVERMANN (1954) von einem starken Divergieren der Schneegrenze und Strukturbodengrenze in den (trockenen) Subtropen sprechen; werden aber die kammeisbedingten Formen nicht den Frostbodenformen gleichgesetzt, d. h. wird also eine Unterscheidung in Formen vorgenommen, die einerseits Bodenfrost (= der Frost dringt mehrere Dezimeter in den Boden ein) und andererseits Kammeis (= der Frost dringt nur einige Millimeter bis maximal wenige Zentimeter in den Boden ein) als Ursache haben, so zeigt sich, daß in den Subtropen und Randtropen Schneegrenze und Strukturbodengrenze konvergieren, wie TROLL (1944) es beschrieb.

Literatur

- AVECES GARCÍA, R. M. & N. AGUILERA HERRERA (1969): Características pedológicas de suelos de ceniza volcánica en la región del Popocatépetl, México. — *Anu. de Geogr.* IX: 143–148, Mexiko.
- BARTELS, G. (1973): Jahreszeitlich bedingte Strukturböden auf den Kanaren. — *Die Erde* 104: 314–319, Berlin.
- BEATY, C. B. (1974): Needle Ice and Wind in the White Mountains of California. — *Geol.* 2: 565–567, Boulder.
- BESOAIN MONASTERIO, E. (1969): Untersuchungen von Böden aus Pyroklastiten (Asche und Tuffe) Chiles, Japans, Deutschlands und Italiens. — *Diss. d. landwirtsch. Fak. d. Univ. Bonn*, 344 S., Bonn.
- FREUND, R. (1972): Vergleichende Betrachtung von Kleinformen der Solifluktion im Raume Mittelbünden (Schweiz), auf West-Spitzbergen und am Kilimandjaro. — *Diss. d. philos. Fak. II d. Univ. Zürich*, 111 S., Zürich.
- FURRER, G. & R. FREUND (1973): Beobachtungen zum subnivalen Formenschatz am Kilimandjaro. — *Z. Geomorph. N. F., Suppl.* 16: 180–203, Berlin – Stuttgart.
- FURRER, G. & K. GRAF (1976): Die subnivale Höhenstufe am Kilimandjaro und in den Anden Boliwijs und Ecuadors. — *Erdwiss. Forsch., Wiesbaden* (im Druck).
- GRAF, K. (1973): Vergleichende Betrachtungen zur Solifluktion in verschiedenen Breitenlagen. — *Z. Geomorph. N. F. Suppl.* 16: 104–154, Berlin – Stuttgart.
- HAGEDORN, J. (1970): Zum Problem der Glatthänge. — *Z. Geomorph. N. F.* 14: 103–113, Berlin – Stuttgart.
- HASTENRATH, S. (1960): Zur Verteilung der Frostwechsel- und Schneedeckenverhältnisse in den Alpen. — *Diss. d. math.-naturw. Fak. d. Univ. Bonn*, 104 S., Bonn.
- (1973): Observations on the periglacial morphology of Mts. Kenya and Kilimanjaro, East Africa. — *Z. Geomorph. N. F., Suppl.* 16: 161–179, Berlin – Stuttgart.
- HEINE, K. (1975 a): Permafrost am Pico de Orizaba, Mexiko. — *Eiszeitalter u. Gegenwart* 26: 212–217, Öhringen.
- (1975 b): Studien zur jungquartären Glazialmorphologie mexikanischer Vulkane – mit einem Ausblick auf die Klimaentwicklung. — *Das Mexiko-Projekt der DFG, VII*: 178 S., Wiesbaden.
- HÖLLERMANN, P.: Beiträge zur Problematik der rezenten Strukturbodengrenze. — *Göttinger geogr. Abh.* 60 (HANS-POSER-Festschrift): 235–260, Göttingen.
- (1974): Aride und periglaziale Prozesse in der subtropischen Gebirgs-Halbwüste von Hoch-Teneriffa. — *Abh. Akad. Wiss. in Göttingen, math.-phys. Kl. III*, 29: 333–353, Göttingen.
- HÖVERMANN, J. (1954): Über glaziale und „periglaziale“ Erscheinungen in Erithrea und Nord-abessinien. — *Veröff. d. Akad. f. Raumforsch. u. Landesplanung, Abh.* 28: 87–112, Bremen-Horn.
- LAUER, W. & D. KLAUS (1975): Geocological investigations on the timberline of Pico de Orizaba, Mexico. — *Arctic and Alpine Res.* 7: 315–330, Boulder.
- LLIBOUTRY, L. (1974): Microstriated ground on the Andes. — *J. Glaciology* 13: 322, London.
- LORENZO, J. L. (1969 a): Condiciones periglaciares de las altas montañas de México. — *Paleoecología* 4, Dept. de Prehistoria, INAH, 45 S., Mexiko.
- (1969 b): Minor periglacial phenomena among the high volcanoes of Mexico. — “The periglacial environment: past and present”, ed. T. L. PÉWÉ: 161–175, Montreal.
- MIELICH, G. (1974): Klima- und altersabhängige Bodenentwicklung von Vulkanascheböden der Sierra Nevada de México. — *Mitt. dt. bodenkdl. Ges.* 18: 360–369, Göttingen.
- OUTCALT, S. I. (1971): An algorithm for needle ice growth. — *Water Resources Res.* 7: 394–400.
- RAPP, A. (1974): Slope Erosion Due to Extreme Rainfall, with Examples from Tropical and Arctic Mountains. — *Abh. Akad. Wiss. in Göttingen, math.-phys. Kl. III*, 29: 118–136, Göttingen.
- SCHUBERT, C. (1972): Suelos Estriados, un Tipo de Suelo Pautado en la Zona Periglacial de los Andes Venezolanos. — *Acta Cient. Venezolana* 23: 108–114, Caracas.
- (1973): Striated ground in the Venezuelan Andes. — *J. Glaciology* 12: 461–468, London.
- TROLL, C. (1943): Die Stellung der Indianer-Hochkulturen im Landschaftsaufbau der tropischen Anden. — *Z. Ges. Erdkunde Berlin, Jg.* 1943, 3/4: 93–128, Berlin.

- (1944): Strukturböden, Solifluktion und Frostklimate der Erde. — Geol. Rdsch. 34: 545–694, Stuttgart.
 - (1973): Rasenabschälung (Turf Exfoliation) als periglaziales Phänomen der subpolaren Zonen und der Hochgebirge. — Z. Geomorph. N.F., Suppl. 17: 1–32, Berlin – Stuttgart.
- WASHBURN, A. L. (1973): Periglacial processes and environments. — 320 S., London.
- WEISCHET, W. (1969): Zur Geomorphologie des Glatthang-Reliefs in der ariden Subtropenzone des Kleinen Nordens von Chile. — Z. Geomorph. N.F. 13: 1–21, Berlin – Stuttgart.
- WHITE, S. E. (1962): Late Pleistocene Glacial Sequence for the West Side of Iztaccihuatl, Mexico. — Geol. Soc. Amer. Bull. 73: 935–958, Washington.

Anschrift des Autors: Prof. Dr. K. HEINE,
Geographisches Institut der Universität, Franziskanerstraße 2, D-5300 Bonn, Deutschland