

- BUDYKO, M. I.: Atlas der Wärmebilanz, Hauptverwaltung des Hydrometeorologischen Dienstes der UdSSR. Leningrad 1955.
- : The heat balance of the Earth. In: GRIBBIN, J. (Hrsg.): Climatic Change. Cambridge, London, New York, Melbourne 1978, S. 65–113.
- FLOHN, H.: Ein russischer Atlas des Wärmehaushaltes der Erdoberfläche. Erdkunde 12, 1958, S. 233–236.
- HANN, J.: Die äquivalente Temperatur als klimatischer Faktor. Meteorologische Zeitschrift 24, 1907, S. 501–504.
- HARE, K. (Hrsg.): Climate and Desertification. Institute for Environmental Studies, University of Toronto. Toronto 1977.
- HENNING, I. und HENNING, D.: Kontinent-Karten der potentiellen Landverdunstung. Meteorologische Rundschau 33, 1980, S. 18–30.
- KNOCHE, W.: Die äquivalente Temperatur, ein einheitlicher Ausdruck der klimatischen Faktoren ‚Lufttemperatur‘ und ‚Luftfeuchtigkeit‘. Meteorologische Zeitschrift 24, 1907, S. 433–444.
- KRÜGER, E.: Die Verteilung der äquivalenten Temperatur auf der Erde und ihre Bedeutung für die Vegetation. Diss. Berlin 1942.
- LAUER, W. und FRANKENBERG, P.: Untersuchungen zur Humidität und Aridität von Afrika. Das Konzept einer potentiellen Landschaftsverdunstung. Bonner Geographische Abhandlungen 66, Bonn 1981.
- LINKE, F.: Das Prött-Theorem. Meteorologische Zeitschrift 39, 1922, S. 267–271.
- : Bedeutung und Berechnung der Äquivalenttemperatur. Meteorologische Zeitschrift 55, 1938, S. 345–350.
- Meteorologisches Taschenbuch. LINKE, F.: (Hrsg.), Bd 4, Leipzig 1939.
- MÜLLER, M. J.; BALTES, K. und WERLE, D. (Mitarbeiter): Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde. Forschungsstelle Boden-erosion der Universität Trier, 5. Heft. RICHTER, G. (Hrsg.), Trier 1979.
- RASCHKE, E.: Die Strahlungsbilanz des Systems Erde-Atmosphäre. Zeitschrift für Geophysik 38, 1972, S. 967–1000.
- RIJTEMA, P. E.: Transpiration and production of crops in relation to climate and irrigation. Institute for Land and Water Management Research, Bull. 44. Wageningen 1966, S. 45–74.
- TROLL, C.: Karte der Jahreszeitenklimata der Erde. Mit einer farbigen Karte von C. TROLL und KH. PAFFEN, Erdkunde 18, 1964, S. 5–28.

„RIBBON-FOREST“ UND „HECKEN“

Streifenartige Verbreitungsmuster des Baumwuchses an der oberen Waldgrenze in den Rocky Mountains¹⁾

Mit 3 Abbildungen, 12 Photos und 1 Tabelle

FRIEDRICH-KARL HOLTMEIER

Summary: „Ribbon-forest“ and „hedges“. Strip-like distribution patterns of trees at the upper timberline in the Rocky Mountains

Within the forest-tundra-ecotone of the Rocky Mountains ribbon-like structures, which can be attributed to the influence of the wind, can be observed locally. The forest strips run either perpendicular or parallel to the prevailing wind direction (West). Those strips which are oriented approximately normally to the prevailing winds seem to be particular to those ranges of the Rocky Mountains which are rich in snow and dominated by strong and permanent winds from the west. These elongated tree-islands are called „ribbons“ and the intervening wet and treeless meadows „snow glades“. The „ribbons“, measuring up to some hundred metres in length and formed of trees (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) up to 15 m in height, act as natural snow fences with big snow masses accumulating at their leeward side. Within an area characterized by a more pronounced local relief the distribution of snow must be attributed primarily to the influence of the surface on the windflow just above it, while the effect of the „ribbons“ must be considered as a secondary one. The long-lasting snow cover and the resulting ecological consequences are unfavourable to tree-growth and thus keep the „glades“ (up to 50 m wide) treeless. The „ribbon-forest“ occur most frequently on gently sloping surfaces, more or less on the contour, whereas on steep slopes it is less extensive.

The forest-strips running parallel to the prevailing winds are called „hedges“ (measuring up to some ten metres in length). In contrast to the „ribbons“ they are common at wind-exposed sites

at both the alpine timberline of other high mountains and the polar forest limit. They are caused by the direct physiological and mechanical influences of the winds, which hamper tree-growth on the windward side. Thus the trees are strongly wind-shaped. By layering the trees spread leeward and form the „hedges“. The narrow wind-channels between the „hedges“ are characterized by a lack of snow during winter rather than a great accumulation as in the case of „snow glades“. The great abundance of „hedges“ in the Rocky Mountains must be attributed to the permanent influence of westerly winds and to a pronounced ability of the tree-species (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*, *Larix lyallii*) to regenerate and spread by layering. In the Rocky Mountains one also finds „ribbons“ formed of close-standing wind-shaped „hedges“ at sites which are characterized by a marked micro-relief.

The „ribbon-forest“, as well as the „hedges“, should be regarded as typical features of the climax stage of the development of the plant cover at wind-exposed sites near the upper timberline.

¹⁾ Die diesen Ausführungen zugrundeliegenden Feldstudien in den Rocky Mountains wurden vom Verfasser während mehrerer Geländeaufenthalte durchgeführt, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit Reisebeihilfen unterstützt wurden. Dafür sei auch an dieser Stelle gedankt.

In den Hochlagen der winterkalten Gebirge und auch an der polaren Waldgrenze ist der Baumwuchs in starkem Maße den Einflüssen des Windes ausgesetzt. Diese sind teils direkter, physiologischer (z. B. Transpiration, Frostrocknis) oder mechanischer Art (Abrasion, Bruch), teils werden sie indirekt wirksam, z. B. über die Umlagerung der winterlichen Schneedecke und die damit verbundenen ökologischen Folgen (z. B. Länge der Vegetationszeit, Bodenfeuchte u. a. m.). Diese Wirkungen spiegeln sich in der Physiognomie und Verbreitung der Bäume und Baumgruppen wider. Die Baumkronen sind oft fahnenförmig, oder die Bäume können sich nur zu den sogenannten „Tischformen“ entwickeln, deren wie geschoren wirkende Oberfläche der Höhe der (schützenden) winterlichen Schneedecke entspricht. Unter extremer Windeinwirkung und bei geringmächtiger bzw. auch im Winter nur gelegentlich vorhandener Schneedecke bleiben sie vielfach mattenförmig, dicht an den Boden gepreßt und überragen kaum die sie umgebende Zwergstrauch- und Grasvegetation. Derartige Wuchsformen sind allenthalben von der oberen Waldgrenze der ekotropischen Gebirge und auch von der polaren Waldgrenze beschrieben worden (s. HOLTMEIER 1974, 1978, dort entsprechendes Anschauungsmaterial und Literatur).

In der oberen subalpinen Stufe der Rocky Mountains sind in windausgesetzten Lagen neben solchen Wuchsformen streifenförmig angeordnete Baum- und Krüppelholzvorkommen²⁾ weit verbreitet, die sich entweder senkrecht oder parallel zur vorherrschenden Windrichtung erstrecken. Bei der Entstehung beider Verbreitungsmuster haben die dort vorwiegend aus westlicher Richtung wehenden und meist starken Winde (Abb. 1) die entscheidende Rolle gespielt. BILLINGS (1969), der sich erstmals eingehender mit den senkrecht zur Hauptwindrichtung verlaufenden Baumstreifen befaßte, nannte diese „ribbons“ und sprach vom „ribbon-forest“, wenn sie das Waldbild bestimmten. Die sich parallel zur Windrichtung erstreckenden schmalen Baum- und Krüppelholzgruppen bezeichne ich zur Unterscheidung von den „ribbons“ als „Hecken“ (s. auch HOLTMEIER 1978).

Die Entwicklung der „ribbons“ und „Hecken“ hat trotz des ausschlaggebenden Einflusses des Windes im einzelnen doch recht verschiedene Verläufe genommen und verdient daher eine differenzierende Betrachtung.

I. „Ribbon-forest“

1. Verbreitung, Physiognomie

Beschreibungen und Untersuchungen des „ribbon-forest“ liegen aus der Park Range, der Sawatch Range, der Front Range (alle Colorado), aus den Medicine Bow Mountains

und dem Glacier National Park (Wyoming) sowie aus der Bitterroot Range (Idaho/Montana) vor (BRANDEGEE 1880, OOSTING & REED 1952, ARNO 1966, BILLINGS 1969, BUCKNER 1977, HOLTMEIER 1978, s. auch Abb. 2). In diesen annähernd meridional streichenden Gebirgen liegen die „ribbon-forests“ meist dicht unter der Baumgrenze, d. h. durchweg über 3000 bis 3400 m hoch. Sie setzen sich aus *Picea engelmannii* und *Abies lasiocarpa* zusammen, denen nur vereinzelt andere Holzarten (*Pinus contorta*, *Pinus flexilis*) beige-mischt sind. Die von bis zu 15 m hohen Bäumen gebildeten „ribbons“ sind 10 bis 50 m breit und erreichen bis zu mehreren hundert Metern Länge (Photos 1, 2). Mit zunehmender Windexposition des Geländes weisen die luvseitigen Bäume zum Teil Krüppelwuchs und fahnenförmige Kronen auf (vgl. Photo 3).

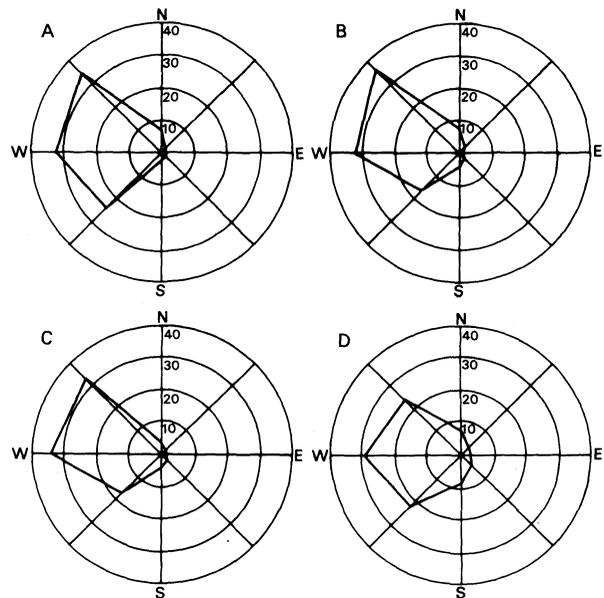


Abb. 1: Mittlere Windrichtungsverteilung im 500 mb-Niveau über den Rocky Mountains bei 40° (A), 50° (B), 55° (C) und 60° N (D). Windrichtungshäufigkeit in % der Winddaten

Quelle: Höhenwetterkarte für den Zeitraum 1971–1977 (für 40° 1958–1974)

Distribution of wind directions at the 500 mb-level over the Rocky Mountains at 40° (A), 50° (B), 55° (C) and 60° (D) of northern latitude (from daily weather map 1971–1977 (40°, 1958–1974)

Zwischen den „ribbons“ erstrecken sich feuchte bis nasse und baumlose Wiesen von 25 bis 75 m Breite (s. Photos 1, 2, 3). BILLINGS (1969) nannte sie in Anlehnung an OOSTING & REED (1952) „snow glades“ (= Schnee-Lichtung). Bei den von mir in der Colorado Front Range beobachteten „ribbon-forests“ werden die baumlosen Flächen zwischen den einzelnen „ribbons“ teils von solchen Wiesen (s. Photo 1), teils von Weiden- und Zwergbirkengebüsch (*Salix* spp., *Betula glandulosa*) eingenommen, teils sind sie aber auch von relativ gro-

²⁾ Da es sich um klimatisch bedingte Zwangswuchsformen derselben Holzarten handelt, die auch den oberen montanen Nadelwald bilden, wird hier bewusst von der Verwendung des Begriffes „Krummholz“ abgesehen. Unter „Krummholz“ im ursprünglichen Sinne sind erblich krummwüchsige Holzarten wie *Pinus mugo* oder *Alnus viridis* zu verstehen (HOLTMEIER 1973, 1982)

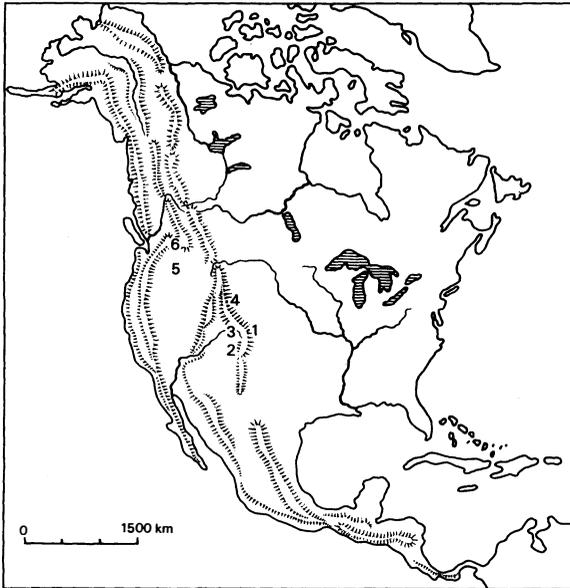


Abb. 2: Lage der im Text erwähnten „ribbon-forest“-Verbreitungsgebiete: 1 Front Range, 2 Sawatch Range, 3 Park Range, 4 Medicine Bow Mtns., 5 Bitterroot Range, 6 Glacier National Park
Location of the distribution areas of „ribbon-forest“ referred to in the text

bem und nur spärlich bewachsenem Blockschutt bedeckt, der hier als Verwitterungsmaterial der die „ribbons“ tragenden felsigen Geländerippen (Photos 7, 8) abgelagert wurde. Auch diese Areale bezeichne ich als „snow-glades“, da sie als Standort trotz ihrer zum Teil auf engem Raum wechselnden edaphischen und hygrischen Unterschiede doch wesentlich durch die lange Schneedeckendauer geprägt sind.

In relativ ebenem oder schwach geneigtem Gelände wiederholt sich die Abfolge von „ribbons“ und „snow glades“ über weite Flächen hinweg (vgl. Photo 2), während sie auf steileren Hängen auf einen ziemlich schmalen Raum oberhalb des geschlossenen Waldes begrenzt ist (vgl. Photo 1). Über den ersten Typ ist aus der Park Range (Buffalo Pass), den Medicine Bow Mountains (Libby Flats) und dem Glacier National Park berichtet worden (BILLINGS 1969, BUCKNER 1977). In der Colorado Front Range scheint nur der zweite Typ vorzukommen.

Das Streifenmuster der „ribbon-forests“ ist nicht streng regelmäßig. Die einzelnen „ribbons“ weisen Schwünge und Böden auf und laufen nicht selten auch schräg aufeinander zu, so daß die „snow glades“ ziemlich unregelmäßige Umrisse besitzen (s. Photo 2).

Die Verbreitung der „ribbon-forests“ scheint auf Gebiete mit großen Schneemengen, hohen mittleren Windgeschwindigkeiten und einer vorherrschenden Windrichtung beschränkt zu sein. Die großen Schneemengen können dabei das Ergebnis hoher Gebietsniederschläge sein, wie es zum Beispiel in den zentralen Rocky Mountains der Fall ist (s. BUCKNER 1977), oder aber Folge der Umlagerung von

Schnee von hochgelegenen baumlosen Flächen in den Waldbereich hinab. Eine solche Situation treffen wir zum Beispiel auf der Ostabdachung der Colorado Front Range an. Dort werden die Gebiete über der Baumgrenze selbst mitten im Winter durch die vorherrschenden westlichen Winde nahezu schneefrei geblasen (vgl. auch WILLARD 1963, WARDLE 1968, MARTINELLI 1975, MARR 1977), während sich im Wald eine zum Teil mehrere Meter mächtige Schneedecke bildet, die bis in den Sommer (bis Mitte Juli) hinein liegen bleiben kann.

2. Entstehung

Die Entstehung der heutigen „ribbon-forests“ liegt mehrere hundert, vielleicht sogar mehrere tausend Jahre (BUCKNER 1977) zurück, so daß wir ihre Entwicklung nur von den aktuellen Beobachtungen der Standortbedingungen und des Baumwachstums im Waldgrenzbereich ausgehend rekonstruieren können.

In diesem nur locker bestockten und windoffenen Gelände bilden schon sehr kleine Bäume und Baumgruppen von vielleicht einem Meter Höhe und wenigen Quadratmetern Grundfläche wirksame Hindernisse für die bodennahen Windströmungen. Sie verursachen Wirbel und Turbulenzen, so daß auf ihrer windabgewandten Seite während des Winters in erhöhtem Maße Schnee abgelagert wird. Je größer diese „Hindernisse“ nun sind, desto mehr Schnee sammelt sich auf ihrer Leeseite an, und umso länger bleibt er liegen. Immer wieder können wir beobachten, daß die mit dem Heranwachsen der Bäume zunehmende Schneedeckendauer deren weitere Entwicklung durch (die in den Hochlagen vorherrschende) Ablegerbildung und auch Sämlinge nach Lee sehr stark hemmt und sogar unmöglich macht, weil die zu lange vom Schnee begrabenen Nadeln durch parasitische Pilze vernichtet werden (s. u.).

Dichter beieinander stehende Bäume und Baumgruppen, wie sie z. B. oftmals entlang quer zur Hauptwindrichtung verlaufender und als Standort relativ günstiger Geländewellen haben aufkommen können, wirken mit zunehmender Höhe und Dichte wie ein natürlicher Schneezaun, hinter dem sich dann auf breiter Front große und sehr dicht gepackte Schneemassen ansammeln (Dichte ca. 30%, $\frac{\text{Wasseräquivalent}}{\text{Schneehöhe}} \times 100$). Diese bleiben dann bis in den Sommer hinein liegen und setzen der weiteren Ausbreitung des „ribbons“ ein Ende. Es entsteht eine „snow glade“. Erst dort, wo in größerer Entfernung vom „ribbon“ (abhängig von seiner Höhe, Breite und Dichte), die Schneeeakkumulation nachläßt und die Schneedeckendauer kürzer wird, kann ein weiterer „ribbon“ entstehen, dem dann wieder eine „snow glade“ folgt, usw. So ist die Entwicklung des „ribbon-forest“ wohl weitgehend von den sich mit zunehmender Beeinflussung des bodennahen Windfeldes durch die heranwachsenden Bäume und die Geländegestalt allmählich verändernden Schneedeckenverhältnisse im Gelände „gesteuert“ worden. Die „snow glades“ apert bis zu zwei Wochen später aus als die „ribbons“, abgesehen von einigen Stellen, an denen beim Um- und Durchströmen der „ribbons“ lokale Düseneffekte

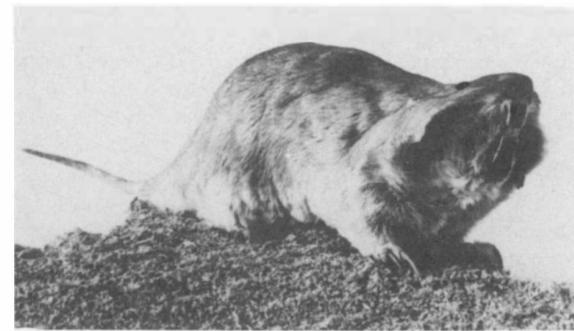
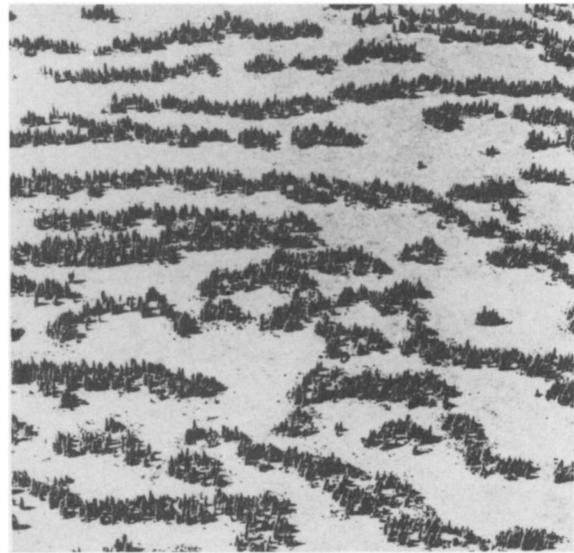


Photo 1: "Ribbon-forest" (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) am Jenny Lake (Ostseite Rollins Pass, Colorado Front Range) bei ca. 3350 m Seehöhe. Blickrichtung West. Die "ribbons" werden von bis zu 8 m hohen Bäumen gebildet. Zwischen ihnen erstrecken sich feuchte Wiesen, die "snow glades". Im Vergleich zu den oftmals ausgedehnten "ribbon-forests" in ebenem oder nur schwach reliefiertem Gelände (vgl. Photo 2) sind sie auf steileren Hängen meist auf einen relativ schmalen Saum oberhalb der geschlossenen Bestände beschränkt. Photo: F. K. HOLTMEIER, 30. 9. 1974

"Ribbon-forest" (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) near Jenny Lake (eastern slope, Colorado Front Range) at about 3,350 m a.s.l. View to the west. The "ribbons" are formed of trees up to 8 m high. Between the forest-strips wet treeless meadows are interspersed ("snow glades"). On steeper slopes "ribbon-forest"-occurrences are usually limited to a relatively narrow belt above the closed forest, in contrast to the situation on even or only gently sloping surfaces (cf. photo 2).

Photo 2: "Ribbon-forest" (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) auf dem West Flat Top Mtn. (1950 m) im Glacier National Park, Montana. Blickrichtung West. In solch ebenem und kaum reliefiertem Gelände kann der "ribbon-forest" große Areale bedecken. Photo: E. HARTLEY (aus BILLINGS 1969)

"Ribbon-forest" (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) on West Flat Top Mtn. (1,950 m) in Glacier National Park, Montana. View to the west. On even or gently sloping surfaces like this the "ribbon-forest" may cover large areas.

Photo 3: "Ribbon" (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) auf der Ostflanke des Mt. Audubon (Ostseite Colorado Front Range) bei ca. 3350 m. Blickrichtung Norden. Hinter einer nur schwach ausgeprägten Geländekante haben sich hier Sämlinge zu Krüppelholzgruppen entwickeln können, die schließlich seitlich zu einem "ribbon" zusammenwuchsen, während die durch sie selbst gesteigerte Schneeakkumulation auf ihrer Leeseite ihrer Ausbreitung dorthin eine scharfe Grenze setzte. Den stark windgeprägten keilförmigen Luvseiten der noch klar erkennbaren einzelnen Fichten- und Tannengruppen nach zu urteilen, dürften diese während des Winters einen nur unzureichenden Schneeschutz genießen. Photo: F. K. HOLTMEIER, 10. 8. 1977

"Ribbon" (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) on eastern slope of Mt. Audubon (eastern slope, Colorado Front Range) at about 3,350 m a.s.l. View to the north. Protected from strong wind behind a low edge, a few seedlings could grow up and spread laterally, whereas leeward spreading was prevented by the big accumulation of snow behind the "ribbon". The windward parts of the spruces and firs frequently lack snow cover in the winter, as can be seen from the wind-shaped wedge-like growth-forms.

Photo 4: Pocket gopher (*Geomys arenarius*, Gebirgsspezies) aus Mesilla, Neu Mexico. Photo: U. S. Fish and Wildlife Service
Pocket gopher. Mountain specimen (*Geomys arenarius*) from Mesilla, New Mexico.

zu Ausblasungen führen. Das ist z. B. regelmäßig an den seitlichen Enden der „ribbons“ der Fall (höhere Windgeschwindigkeiten beim Umströmen des Hindernisses). Spätestens Ende Juli apert auch die am längsten schneebedeckten Abschnitte der „snow glades“ aus. In unmittelbarer Nähe des luvseitigen Randes hoher und annähernd N-S-verlaufender „ribbons“ verschwindet der Schnee mitunter noch später (bis zu 10 Tagen später als in den „snow glades“), obwohl die Schneedecke dort kaum höher als einen Meter ist (Kolk vor dem Hindernis). BUCKNER (1977) erklärt diese zunächst nicht ganz ins Bild passende Tatsache damit, daß am Vormittag dieser schmale Saum durch die „ribbons“ beschattet wird und später die für die Rocky Mountains charakteristische mittägliche Bewölkung die Einstrahlung so sehr mindert, daß nur wenig Schnee abschmilzt. Bei niedrigen „ribbons“, deren luvseitiger Rand von starke Windeinwirkungen widerspiegelnden keilförmigen Wuchformen gebildet wird, habe ich dergleichen nicht beobachten können. Ihre windexponierte Seite scheint selbst mitten im Winter nicht durchgehend von Schnee bedeckt zu sein (s. Photo 3).

Die sehr lange Schneedeckendauer ist wohl die primäre Ursache der Baumlosigkeit der „snow glades“, aber nicht die einzige. Außer der Verkürzung der Vegetationszeit bringt sie weitere für den Baumwuchs ungünstige Veränderungen der Standortverhältnisse mit sich, die der Ausdehnung der „ribbons“ nach Lee irgendwann eine scharfe Grenze gesetzt haben.

So vermag sich der während der Schneeschmelze und noch einige Zeit danach wassergesättigte Boden der „snow glades“ nur sehr zögernd zu erwärmen (Abb. 3). Dadurch werden die Keimung der Koniferensamen sowie auch der Wachs-

tumsbeginn unter Umständen erheblich verzögert (vgl. PATTEN 1963, WARDLE 1968, HAVRANEK 1972). Die Jungpflanzen sind dann kaum mehr in der Lage, eine ausreichende Resistenz zu entwickeln und fallen den ersten stärkeren Frösten zum Opfer (Tab. 1). Gegen Ende des Sommers kann der Boden dann derart austrocknen, daß die nur wenige Zentimeter tief wurzelnden Keimlinge nicht mehr ausreichend mit Wasser versorgt werden.

Tabelle 1: Mittlere Extreme der Temperatur für zwei Stationen¹⁾ auf der Ostabdachung der Front Range (aus BARRY 1973)

Mean temperature extremes of two stations on the eastern slope of the Front Range (from BARRY 1973)

	Como 3048 m		Niwt Ridge 3750 m	
	max.	min.	max.	min.
Januar	12	-37	4	-37
Februar	13	-32	5	-32
März	12	-29	5	-30
April	17	-22	11	-22
Mai	21	-16	14	-22
Juni	25	-7	19	-12
Juli	25	-2	18	-3
August	25	-7	18	-7
September	25	-14	16	-14
Oktober	18	-18	11	-22
November	13	-27	7	-29
Dezember	13	-27	4	-32

¹⁾ Die Station Como liegt in einer Waldlichtung, die Station Niwt Ridge in der oberen alpinen Stufe

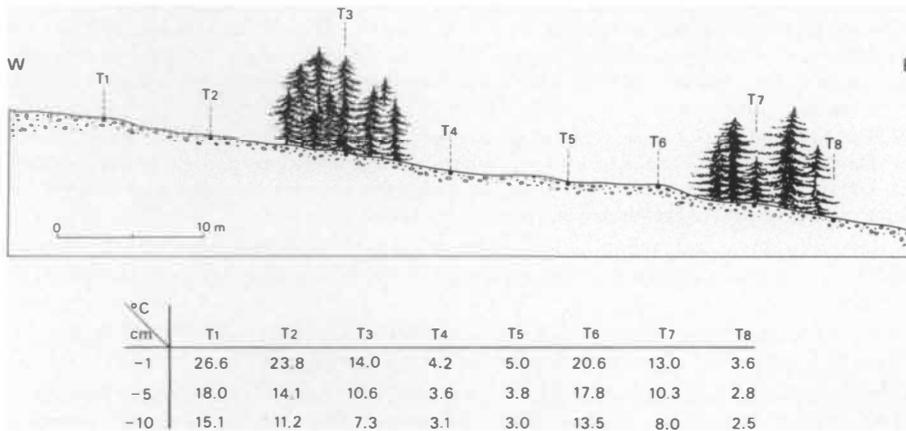


Abb. 3: Bodentemperaturen im „ribbon-forest“ am Jenny Lake (vgl. Photo 1) bei ca. 3350 m. Datum der Messungen 8. 7. 1979, 13.20 Uhr, Lufttemperatur in 2 m Höhe 12,2 °C, klarer Himmel

An den nach der unmittelbar vorausgegangenen Schneeschmelze noch stark durchfeuchteten Stellen liegen die Bodentemperaturen deutlich tiefer als an den anderen Meßpunkten. Durch die nur zögernde Erwärmung des Bodens können die Keimung von Koniferensamen und das Wachstum eventuell vorhandener Sämlinge erheblich verzögert werden.

Soil temperatures within the „ribbon-forest“ near Jenny Lake (cf. photo 1) at about 3,350 m a.s.l.

The measurements were taken on July 8, 1979, at 13.20 h. Air temperature at 2 m above the ground was 12.2 °C, the sky was clear. Lee-ward of the „ribbons“ the soil is still very wet, due to the late melting of the snow. Thus the soil temperatures could not rise as high as at the drier places. Low soil temperatures will hamper the germination of conifer seeds and the growth of seedlings which might have come up here.

Der Austrocknung des Bodens wird durch die Wühlarbeit der pocket gophers (Taschenratten, *Thomomys* spp. Photo 4)³⁾ Vorschub geleistet. Diese Tiere sind im Waldbereich in halbfeuchten Biotopen, wie Quellmulden, Flußufer, Wiesen und Lichtungen, wo ihnen die üppige Bodenvegetation reichlich Nahrung bietet, weit verbreitet (BARNES 1973). Auch in den „snow glades“ sind sie sehr häufig anzutreffen, sofern das Gelände nicht zu stark vernäßt ist oder von Weiden-Zwergbirkengebüsch und/oder blockigem Verwitterungsschutt bedeckt wird (s. Photo 7).

Wenn diese Nager ihre unterirdischen Gangsysteme erweitern oder ausbessern, häufen sie die überflüssige Erde zu kleinen Hügeln („mounds“) an. Das geschieht gewöhnlich während des Sommers. Im Winter verlegen sie ihre Gänge auch in die Schneedecke hinein, wohl um die Nahrungssuche zu erleichtern (HANSEN & REID 1973, BARNES 1973). Die bei den Grabungsarbeiten anfallende Erde stopfen sie dann in diese Gangröhren hinein. Wenn der Schneeschmilzt, sammelt sie sich in Form oft mehrerer Meter langer und vielfach verzweigter Wülste („pocket gopher eskers“, „wintercasts“) auf der Bodenoberfläche an (Photo 5). Nach der Schneeschmelze können dann große Teile der „snow glades“ von diesem frischen Mineralboden bedeckt sein (nach BUCKNER 1977 bis zur Hälfte der Fläche), der nun sehr leicht austrocknet.

Durch Ringeln und Verbeißen der Stämme, Triebe und Wurzeln schädigen die pocket gophers den Baumwuchs auch direkt. Zudem legen sie bei ihrer Wühlarbeit Wurzeln bloß, graben Sämlinge ganz aus oder bedecken sie mit der ausgeworfenen Erde (TEVIS 1956, KUCK 1969, BARNES 1973). Im Vergleich zu den Verbiß- und Ringelschäden fallen die letztgenannten Schäden nicht so sehr ins Gewicht. Insgesamt hemmen die Aktivitäten der pocket gophers das Aufkommen von Jungwuchs in den von halbfeuchten Wiesen eingenommenen „snow glades“ sehr. Auf Probestellen fielen pro Jahr bis zu mehr als die Hälfte der vorhandenen Fichtensämlinge diesen Nagern zum Opfer (RONCO 1970). Die höchsten Ausfälle sind in Jahren mit sehr später Schneeschmelze und hoher pocket gopher Population zu verzeichnen (BARNES 1973).

Verschärft wird die baumwuchsfeindliche Situation in allen „snow glades“, durch den Schwarzen Schneeschimmel (*Herpotrichia juniperi*). Diesem parasitischen Pilz bieten sich vor allem während der Ausaperungsperiode bei Schneedeckentemperaturen nahe dem Gefrierpunkt und 100%iger Wassersättigung innerhalb der Schneedecke optimale Entwicklungsmöglichkeiten (GÄUMANN et al. 1934, BAZZIGHER 1976). Das Mycel, ein schwarz-graues in feuchtem Zustand schleimiges, im trockenen filzartiges Fadengeflecht, überzieht die vom Schnee eingeschlossenen Nadeln und Triebe, die dann absterben. In den „snow glades“ fallen Sämlinge und eventuell vorhandener älterer Jungwuchs diesem Pilz zum Opfer, weil bei diesen kleinen Pflanzen schon der Verlust weniger Triebe die Assimilationsleistung erheblich mindert und dadurch Wachstum und Ausreifung hemmt. Nur

selten vermögen infizierte Jungpflanzen in den „snow glades“ mehrere Jahre zu überleben. Die Pilzinfektionen treten aber auch in den „ribbons“ auf. Für den Jungwuchs kann auch hier an manchen Stellen die Situation durchaus kritisch werden. Die älteren und höheren Bäume werden hingegen nicht ernsthaft geschädigt, da sie oberhalb der Schneedecke über ausreichend viele Assimilationsorgane verfügen⁴⁾.

Viele der vorliegenden Beobachtungen lassen erkennen, daß bestimmte mikrotopographische Verhältnisse – zum Beispiel annähernd parallel zueinander und senkrecht zur Hauptwindrichtung verlaufende Geländerippen – die Entstehung der „ribbon-forests“ begünstigt haben. Auf den zeitig schneefreien und – weil meistens arm an Feinerde, Gräsern und Kräutern – auch kaum von pocket gophern bewohnten Erhöhungen konnte der Baumwuchs zuerst Fuß fassen (vgl. BUCKNER 1977) und sich dann soweit leewärts ausbreiten, bis ihm die zunehmende Schneeakkumulation und Schneedeckendauer mit den beschriebenen baumwuchsfeindlichen Folgeerscheinungen eine Grenze setzte. In entsprechend gegliedertem Gelände ist so der „ribbon-forest“ vorgezeichnet.

Die Verbreitung der von mir in der Colorado Front Range angetroffenen „ribbon-forests“ steht durchweg in enger Beziehung zur Reliefgestaltung. Zum Teil sind relativ schwach ausgeprägte, wohl durch Solifluktion entstandene Geländekanten Ansatzpunkte der ribbon-Bildung (vgl. Photo 3), zum Teil deutlich hervortretende Geländerippen (Photos 6, 7). Auf der Luvseite dieser „ribbons“ sind windgeprägte Wuchsformen (matten-, keil- und fahnenartig) weit verbreitet. Vielfach setzen sich die „ribbons“ auch aus dicht gereihten, parallel zur Hauptwindrichtung verlaufenden „Hecken“ und keilförmigen Krüppelholzgruppen zusammen (vgl. Photos 3, 8), so daß man von einer Mischform zwischen „ribbons“ und „Hecken“ sprechen kann.

Die Entwicklung der „ribbons“ und der sich mit ihr mehr oder weniger stark ändernden Standortverhältnisse ist je nach der Geländegestaltung unterschiedlich verlaufen. In schwach reliefiertem Gelände haben wohl erst die heranwachsenden Bäume durch ihren Einfluß auf das bodennahe Windfeld und die Schneeumlagerung allmählich auf ihrer Leeseite die baumwuchsfeindliche Situation entstehen lassen, die der weiteren Ausbreitung der „ribbons“ in diese Richtung eine scharfe Grenze setzt. Das ist zum Beispiel auf dem Osthang des Mt. Audubon (Photo 3) oder auch am Jenny Lake (Photo 1) der Fall. Demgegenüber dürften die Schneeverteilung und der Ausaperungsverlauf in dem stark glazial überformten Gelände am Mitchell Lake (Photos 6, 7) oder auch auf dem stufig gegliederten Hang westlich des Scyscraper Reservoirs (Photo 8) schon vor dem Aufkommen der „ribbons“ auf den Rippen und Rücken im Prinzip dieselben gewesen sein wie heute und das Vordringen des Baumwuchses in die lange schneebedeckten Mulden und Rinnen von jeher ausgeschlossen haben. Die „ribbons“ haben die schon vorhandenen lokalen Gegensätze zwischen den Rip-

³⁾ Zur Taxonomy und Verbreitung s. INGLES 1965, HANSEN u. REID 1973

⁴⁾ In den Alpen gehören der Schwarze Schneeschimmel und einige andere Schneepilze zu den die Wiederaufforstung der Hochlagen besonders nachteilig beeinflussenden Standortfaktoren.

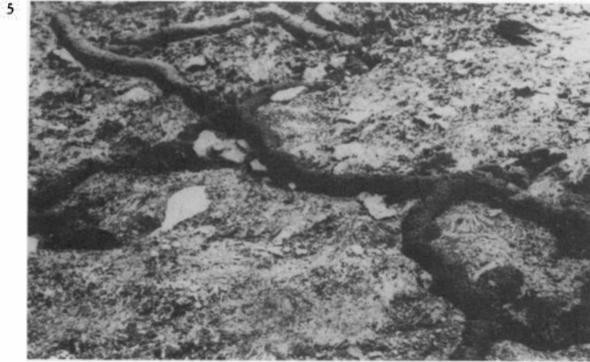


Photo 5: Pocket gopher "Esker" als Zeichen der winterlichen Aktivität des pocket gophers. Die in die Schneedecke durchziehenden Gangröhren gestopfte Erde sammelt sich während der Schneeschmelze in Form solcher weitverzweigter Erdstreifen an, eine in den "snow glades" besonders auffällige Erscheinung. Der frische Mineralboden trocknet sehr rasch aus.

Photo: F. K. HOLTMEIER, 27. 6. 1979

Pocket gopher- "eskers" indicating winter activity of the pocket gophers. The soil pushed into the snowburrows creates these multi-branched soil-strips which become evident as the snow melts. They are characteristic features of the "snow glades". The fresh mineral soil will rapidly dry out.

Photo 6: "Ribbon-forest" am Mitchell Lake (3276 m, Ostseite Colorado Front Range), Blickrichtung West.

Die "ribbons" verlaufen in diesem glazial überformten Tal auf stufenförmig angeordneten und quer zur Tal- und Hauptwindrichtung (West) streichenden felsigen Geländerippen. Die zwischen diesen liegenden Rinnen, Mulden und Verebnungen sind weitgehend baumlos (s. auch Detailphoto 7). Photo: F. K. HOLTMEIER, 30. 9. 1977

"Ribbon-forest" at Mitchell Lake (eastern slope, Colorado Front Range). View to the west.

In this glacially sculptured valley the "ribbons" occur on the steplike bedrock ridges, which run perpendicular to the direction of the valley and the prevailing winds. The intervening gullies, holes and alluvial plains are treeless (cf. detailed photo 7).

Photo 7: Detailphoto zu Photo 6. "Ribbon-forest" oberhalb des Mitchell Lake bei 3320 m Seehöhe. Blickrichtung talauswärts nach Südost.

Die "snow-glades" fallen hier mit den Hohlformen und Verebnungen zwischen den die "ribbons" tragenden Geländerippen zusammen. Zum Teil sind sie stark vernäßt und werden von feuchten bis nassen Wiesen und Strauchweiden-Zwergbirkengebüsch (*Salix* spp., *Betula glandulosa*) eingenommen, teils sind sie auch von blockigem Verwitterungsschutt bedeckt. Photo: R. HAASE, Ende Juli 1981

"Ribbon-forest" above Mitchell Lake at 3,320 m a.s.l. (Detail to photo 6). View downwards the valley to the southeast.

Here the "snow glades" are confined to the concave and alluvial surface which extend between the ribbon-topped bedrock ridges. In part they are very wet and thus covered by wet or marshy meadows and scrub of willows (*Salix* spp.) and dwarf-birches (*Betula glandulosa*), in part they are covered with weathered rocky material.

Photo 8: "Ribbon"artig angeordnete „Hecken“ (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) auf einem durch quer zur Tal- und Hauptwindrichtung verlaufende Stufen gegliederten Hang westlich des Scyscraper Reservoirs (Ostseite Colorado Front Range) in ca. 3450 m Seehöhe. Blickrichtung Süd, im Hintergrund der Rollins Pass. Die "ribbons" nehmen die windexponierten und zeitig schneefreien Standorte ein, während die unmittelbar benachbarten Leelagen baumlos sind. Im Prinzip liegt hier dasselbe Verbreitungsmuster vor wie es am Mitchell Lake beobachtet wurde (vgl. Photos 6 und 7). Photo: F. K. HOLTMEIER, 7. 8. 1977

"Hedges" (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) arranged like ribbons on a step-like slope west of Scyscraper Reservoir (eastern slope, Colorado Front Range) at about 3,450 m a.s.l. View to the south, Rollins Pass in the background.

The "ribbons" cover the wind-exposed bedrock ridges which run perpendicular to the prevailing winds, while the leeward sites are treeless. This distribution pattern is very similar to that observed at Mitchell Lake (cf. photos 6 and 7).

pen und den baumlosen Rinnen und Mulden nur noch verstärkt. Je ausgeprägter die Oberflächenformen sind, desto geringer ist, relativ gesehen, der Einfluß der „ribbons“ auf das heutige Verbreitungsmuster und die ökologischen Verhältnisse.

Besonders in stark bewegtem Gelände, in dem die Lage der „ribbons“ und der „snow glades“ durch das Relief vorgezeichnet ist, dürfte es sich daher beim „ribbon-forest“ um ein für lange Zeiten stabiles Verbreitungsmuster handeln. So vertritt BRUCKNER (1977) aufgrund seiner eingehenden Studien am Buffalo Pass (Park Range) die Auffassung, daß sich dort die Lage der „ribbons“ und „snow glades“ möglicherweise seit einigen Jahrtausenden nicht geändert hat.

II. „Hecken“

1. Verbreitung, Physiognomie

Im Krüppelholzgürtel sind an extrem exponierten Standorten, auf Kuppen und Luvhängen von Geländewellen und -rippen, aber auch in relativ ebenem Gelände, neben den typischen matten-, keil- oder auch tischartigen Wuchsformen der Waldgrenzholzarten die sich parallel zur Hauptwindrichtung erstreckenden „Hecken“ weit verbreitet. Zumindest in der Colorado Front Range sind sie weitaus häufiger als die „ribbons“. Dabei handelt es sich keineswegs immer um nahe an der Baumgrenze gelegene Standorte, sondern zum Teil um Geländepartien im eigentlichen Waldbereich, die infolge ihrer besonderen orographischen Situation unter ständiger, einseitiger Windeinwirkung stehen. Kleinräumig wechseln hier mit dem Übergang von Luv- zu Leehängen die langgestreckten Krüppelholzgruppen mit aufrechten, völlig normal gewachsenen Bäumen ab (s. HOLTMEIER 1978, vgl. Photos 10, 12). In weniger reliefiertem Gelände, wie zum Beispiel auf hochgelegenen Rumpfflächenresten, nehmen die vorwiegend aus solchen „Hecken“ gebildeten Krüppelholzbestände mitunter Flächen bis zu mehreren Hektar ein (Photo 9).

Die „Hecken“ sind je nach Standort zwischen einem und sechs Meter hoch und können eine Länge von mehreren Zehner von Metern erreichen. Sie sind aber nur wenige Meter breit. Durch diese langgestreckte Form unterscheiden sie sich von den viel kürzeren Bauminseln („tree-islands“), aus denen sie sich entwickelt haben. Die Abstände zwischen den „Hecken“ betragen meist nur einige Meter (Photos 10, 11). Zum Teil gehen sie an ihren leeseitigen Enden ineinander über und bilden dort ein nahezu undurchdringliches Dickicht, das manchmal in höhere und schließlich auch lockerere Bestände übergehen kann. In intensiv durch quer zur Hauptwindrichtung streichende Rippen und Rinnen gegliedertem Gelände mit kleinräumig abwechselnden Luv- und Leelagen bilden die dichtgereiht stehenden „Hecken“ auch regelrechte „ribbons“ (vgl. Photo 8, s. auch Kapitel I).

Die luvseitigen Spitzen der „Hecken“ sind meist niedrig, matten- oder keilförmig, Verzweigung und Benadelung so dicht, daß man die Oberfläche betreten kann ohne einzusinken. Nur hier und da ragen vereinzelt Triebe aus der wie ge-

schoren wirkenden Oberfläche heraus (vgl. Photo 10). An ihnen wie an der Oberfläche und an den Seiten sind Abrasionsspuren und Frostrocknisschäden festzustellen. Mitunter ist der windwärtige Teil der „Hecken“ längst abgestorben, während das Wachstum im Lee andauert. Gegen Lee werden Zweigwerk und Nadelkleid lockerer, Triebe und Nadeln länger, und in manchen Fällen konnten einzelne fahnenförmige Baumkronen emporwachsen. Im Windschutz einer „Hecke“ haben oft weitere „Hecken“ ihren Ursprung genommen, die dann auch höher und weniger stark durch den Wind geprägt wurden. Fahnenförmige Baumkronen sind aber auch bei ihnen die Regel. In Extremfällen aber werden die „Hecken“ kaum höher als einen Meter (Photo 10). Zwischen ihnen tritt vielfach der nackte Mineralboden zutage, aus dem das Feinmaterial ausgeblasen wurde. Wind- und Frostwechselwirkungen (=Geliflation i. S. TROLL 1973) ließen hier auch Rasenkliffs und Windsichelrasen entstehen.

Während bei der Genese der „ribbons“ die durch die Umlagerung der Schneedecke auf relativ breiter Front quer zur Hauptwindrichtung veränderten Standortbedingungen den entscheidenden Einfluß ausüben, ist die Entstehung der „Hecken“ in erster Linie den direkten physiologischen und mechanischen Wirkungen der vorherrschenden Winde sowie der Fähigkeit von *Abies lasiocarpa*, *Picea engelmannii* und (in den nördlichen Rocky Mountains) auch *Larix lyallii* (s. Photo 11) zur Ausbreitung durch Adventivwurzelbildung („Layering“) zuzuschreiben. Bei den Windwirkungen ist nicht allein ihr Einfluß während des Winters (vor allem Austrocknung, Eisgebläse) zu sehen, sondern auch während der Vegetationsperiode. In dieser Zeit vermögen sie die Entwicklung der neugebildeten Nadeln und Triebe zu verzögern und setzen auf diese Weise deren Widerstandskraft gegen die winterlichen Windeinwirkungen und anderen Klimaeinflüsse herab. Verbreitung und Ausmaß der winterlichen Schäden werden durch die Wirkungen der auch während der Vegetationszeit nahezu ständig aus westlichen Richtungen wehenden Winde „vorprogrammiert“ (HOLTMEIER 1979, 1981). Die unzureichende Resistenz hat sich als einer der wichtigsten baumwuchshemmenden Faktoren an der oberen Waldgrenze der winterkalten Gebirge erwiesen (TRANQUILLINI 1963, 1974, 1976, 1979/WARDLE 1965, 1968, 1971/HOLTMEIER 1971/LINDSAY 1971/BAIG et al. 1976, BAIG & TRANQUILLINI 1976).

Voraussetzung für das Überleben der Sämlinge in der Kampfzone scheint allen vorliegenden Beobachtungen nach ein ausreichender Schutz der Pflanze durch die Schneedecke im Winter zu sein; die von der alpinen und polaren Waldgrenze vielfach beschriebenen Tisch- und Wipfeltischformen der Bäume spiegeln diese Bedeutung der Schneedecke deutlich wider (s. HOLTMEIER 1974). Im windausgesetzten Gelände der Hochlagen der Front-Range ist infolge der starken Verblasung aber selbst mitten im Winter nur gelegentlich eine geschlossene Schneedecke vorhanden. Deshalb können Sämlinge sich nur dort weiter entwickeln, wo ihnen eine flache Geländewelle oder auch ein nur wenige Dezimeter hoher Felsblock etwas Windschutz bietet und eventuell auch die Ansammlung von Schnee ermöglicht.

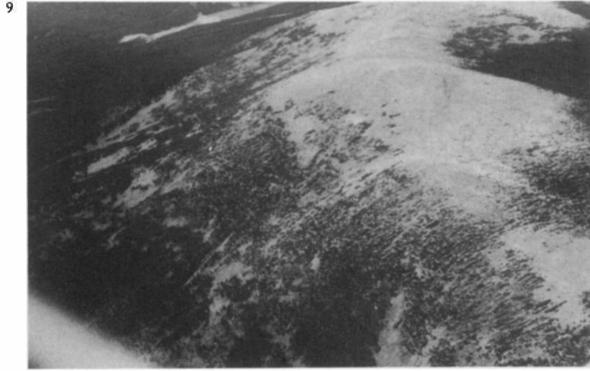


Photo 9: „Hecken“ (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) an der oberen Waldgrenze auf dem Niwot Ridge (hier ca. 3500 m) Colorado Front Range. Blickrichtung WSW, im Hintergrund der Silver Lake. Bei dem im mittleren und rechten Teil des Bildesichtbaren von „Hecken“ bedeckten Areal handelt es sich um eine Fläche von ca. 3,5 ha. Photo: F. K. HOLTMEIER, 30. 9. 1974

„Hedges“ (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*) at the upper timberline on Niwot Ridge (eastern slope, Colorado Front Range). View to the WSW, Silver Lake in the background.

The area covered with „hedges“, which is to be seen in the middle and right part of the photograph, measures about 3.5 hectares.

Photo 10: „Hecken“ (*Picea engelmannii*) an einem extrem windexponierten Standort auf der Ostseite des Arapaho Passes (Ostseite Colorado Front Range) bei 3416 m Seehöhe. Blickrichtung SW.

Unter starkem Windeinfluß bleiben die „Hecken“ niedrig, können aber mehrere Zehner von Metern lang werden. Der Abstand zwischen ihnen beträgt dagegen meist nur wenige Meter. Hier ist auch deutlich zu sehen, daß die „Hecken“ ihren Ursprung im Windschutz von ca. 1 m hohen Felsblöcken genommen haben und sich dann leewärts durch Adventivwurzelbildung ausbreiten konnten.

Photo: F. K. HOLTMEIER, 27. 7. 1977

„Hedges“ at an extremely wind-exposed site on the eastern slope of Arapaho Pass (eastern slope, Colorado Front Range) at 3,416 m a.s.l. View to the SW.

Strongly affected by wind, the „hedges“ continue to grow low whilst attaining a length up to some tens of metres. As can be clearly seen from the photograph, the „hedges“ originated immediately behind a big stone (c. 1 m high) and then spread leeward by layering.

Photo 11: „Hecken“ von *Larix lyallii* an der Waldgrenze bei Marmot Creek (Alberta) in ca. 2250 m Seehöhe. Blickrichtung Osten.

Wie *Picea engelmannii* und *Abies lasiocarpa* verfügt auch *Larix lyallii* über die Fähigkeit zur vegetativen Ausbreitung durch Adventivwurzelbildung und kann an solchen windexponierten Standorten langgezogene „Hecken“ bilden. Photo: F. K. HOLTMEIER, 2. 8. 1972

„Hedges“ formed of larch (*Larix lyallii*) at the upper timberline near Marmot Creek (Alberta) at about 2,250 m a.s.l. View to the east. Like *Picea engelmannii* and *Abies lasiocarpa*, larch as well is able to regenerate and spread by layering and to grow hedge-like at habitats strongly affected by wind.

Photo 12: Keilförmige, ca. 1 m hohe *Picea engelmannii* auf dem Niwot Ridge (Ostseite Colorado Front Range) in 3477 m Seehöhe. Blickrichtung Nord. Im Schutze seines längst abgestorbenen luvseitigen Teils breitet sich dieser Baum noch weiter leewärts aus. Auf diese Weise kann eine „Hecke“ entstehen. Photo: F. K. HOLTMEIER, 30. 7. 1977

Wedge-like spruce (*Picea engelmannii*, 1 m high) on Niwot Ridge (eastern slope of Colorado Front Range) at 3,477 m a.s.l. View to the north.

Sheltered from the wind by its dead branches, the tree still keeps growing to the leeward and thus may provide the origin for a „hedge“.

So ist immer wieder zu beobachten, daß die Entwicklung der Bauminseln und der langgestreckten „Hecken“ an einem solchen Standort begonnen hat (s. Photo 10). Während der ersten Jahre bzw. Jahrzehnte (sehr langsames Wachstum) konnte dort der Sämling relativ geschützt heranwachsen, bis er schließlich über den Windschatten der vorgelagerten Geländewelle oder des Steines hinauszuragen begann und der unmittelbaren Einwirkungen der starken Winde ausgesetzt wurde: schon in 50 bis 60 cm über dem Boden (das könnte z. B. der Höhe eines Felsblocks entsprechen) sind die Windgeschwindigkeiten oft schon genauso hoch wie in 4 m Höhe (s. HOLTMEIER 1981). Von da an war der Baum nicht mehr in der Lage, weiter in die Höhe zu wachsen, und auch seitlich konnte er sich nicht über den Windschutz des vorgelagerten Felsblocks ausbreiten (erhöhte Windgeschwindigkeit beim Umströmen des Hindernisses, oftmals fehlender Schneeschutz). Dieser „Eckeneffekt“, der in der schneereichen Umgebung der „ribbons“ deren Ausbreitung quer zur Hauptwindrichtung begünstigt, weil er die Vegetationszeit verlängert, wirkt sich in dem schneearmen Milieu extrem windausgesetzter Geländeabschnitte auf den Baumwuchs ökologisch nachteilig aus und ist wohl auch die Ursache der meist nur wenige Meter breiten baumlosen Korridore zwischen den „Hecken“. Unter diesen Bedingungen können sich die Bäume nur in leewärtige Richtung ausbreiten. Dabei spielt die Adventivwurzelbildung an den dem Boden anliegenden bzw. durch den Schnee an den Boden gepreßten Zweige die entscheidende Rolle. Es können aber durchaus auch Sämlinge beteiligt sein, die im Windschutz und Schatten der anderen Koniferen ein günstiges Keimbett gefunden haben. So kommen in den Tannen- und Fichten-„Hecken“ auch immer wieder vereinzelte Limberpines (*Pinus flexilis*) vor.

Keineswegs beginnen die „Hecken“ aber immer im Windschutz eines großen Steines, einer Geländewelle oder -kuppe. Viele stehen völlig frei im Gelände und müssen sich aus Sämlingen entwickelt haben, die weitgehend ohne winterliche Schneebedeckung, allein im Schutz der sie umgebenden alpinen Vegetation oder vielleicht einer nur wenige Zentimeter tiefen Delle heranwachsen konnten. Selbst bei starkem Wind in einigen Metern über dem Boden sind die Windgeschwindigkeiten in unmittelbarer Bodennähe sehr gering und nehmen erst über der Feldschicht sehr rasch zu. Der „günstige“ Klimaraum ist hier also viel enger als hinter einem Felsblock, und allenthalben ist hier als Reaktion darauf die Tendenz zu matten- oder spalierförmigen Wuchs zu beobachten. Die windseitigen Triebe sterben zum Teil ab, werden durch neue ersetzt, von denen wiederum viele den Klimaeinflüssen zum Opfer fallen. Nach und nach bieten diese toten und lebenden Zweige den dahinterliegenden etwas Schutz, so daß diese unter Umständen schon etwas höher werden können. Mit der Zeit entstehen keilförmige Wuchsformen (Photo 12), aus denen sich dann im Laufe von Jahrhunderten „Hecken“ entwickeln können, vorausgesetzt, daß die mit der Zeit durch die Baumgruppe selbst verursachte Schneakkumulation auf ihrer Leeseite nicht zu groß wird. Pilzbefall setzt dann ihrer weiteren Ausbreitung nach Lee ein Ende und verhindert dort auch das Aufkommen von Sämlingen.

Diese Baumgruppen können aber auch regelrecht mit dem

Wind „wandern“, sofern der leeseitige Teil rascher wächst als der luvseitige abstirbt. MARR (1977) berichtet von solchen keilförmigen Bauminseln (ca. 1 m hoch, 5 m lang und an der Leeseite ebenso breit) in der oberen Kampfzone (ca. 3400–3500 m), die die heute von ihnen besiedelten extrem baumwuchsfeindlichen Standorte nur im Windschutz ihrer jetzt nur noch als linienhaft aufgereichte Totholzreste vorhandenen und einst an etwas tiefer gelegenen, günstigeren Stellen herangewachsenen luvseitigen Teile erreicht haben dürften. Das bedeutet aber auch, daß diese Bäume, sofern sie nicht widerstandsfähig genug sind, unter den gegenwärtigen Standortbedingungen absterben werden. Bei den von mir in der Front Range und auch in den kanadischen Rocky Mountains innerhalb der noch zusammenhängenden Krüppelholzbestände (vgl. Photos 9, 10, 11) beobachteten „Hecken“ ist das unwahrscheinlich. Die abgestorbenen luvseitigen Teile sind meist nicht länger als 1–2 m, der anschließende weit längere Abschnitt macht einen relativ „gesunden“ Eindruck, wenn man einmal von einzelnen über die „Hecken“ herausragenden Trieben und Wipfeln absieht (vgl. Photos 10, 11). Die „Hecken“ sind meist einige hundert, zum Teil an die tausend Jahre alt, zumindest ihre luvseitigen Abschnitte (s. auch Ives 1973). Man muß sie daher wohl als den schwierigen Standortbedingungen gut angepasste Wuchsformen mit großem Beharrungsvermögen betrachten.

III. Schlußbetrachtung

Die Verbreitung der „ribbon-forests“ scheint auf die schneereichen und ständig von westlichen Winden beherrschten Gebirgsketten der Rocky Mountains beschränkt zu sein. Zumindest ist dieses Phänomen bislang weder aus anderen Hochgebirgen noch aus dem polaren Waldgrenzbereich beschrieben worden. Hier sollen vorerst keine weiteren Überlegungen über die eventuellen Gründe für das Fehlen der „ribbon-forests“ außerhalb ihrer Verbreitungsgebiete in den Rocky Mountains angestellt werden, doch sprechen meine Beobachtungen in vielen anderen Gebirgen und in der Subarktis dafür, daß die „ribbon-forests“ ihre Existenz einer sehr speziellen, raumtypischen Verknüpfung von Faktoren und deren Wirkungen verdankt (große Schneemengen, nahezu ständig westliche Winde und meridionaler Verlauf der Gebirgszüge, pocket-gopher, Pilzbefall, ausgeprägte Fähigkeit der Holzarten zur Adventivwurzelbildung u. a. m.), wie sie in dieser Kombination und Gewichtung außerhalb der bekannten Verbreitungsgebiete nicht zustandekommen.

Die „Hecken“ sind dagegen auch in anderen winterkalten Hochgebirgen und in der Subarktis an windexponierten Standorten im Waldgrenzbereich verbreitet. So wird u. a. aus Norwegen (NORDMANN 1862), Nordschweden (NORDFORS 1921) und von der Kola-Halbinsel (KIHLMAN 1890, RODER 1895) darüber berichtet. Doch auch im Hinblick auf die Häufigkeit dieser „Hecken“ nehmen die im Einflußbereich der Westwinde liegenden Gebirgszüge der Rocky Mountains eine besondere Stellung ein. Wenigstens sind mir weder aus eigener Anschauung (Alpen, Karpaten, Nordeuropa, neuseeländische Alpen) noch aus der Literatur derart ausgedehnte

Vorkommen solcher „Hecken“ bekannt, wie ich sie an der Waldgrenze und auch an daruntergelegenen windausgesetzten Standorten in den Rocky Mountains habe beobachten können.

Wenn auch die dort nahezu permanent aus westlichen Richtungen wehenden Winde unter den Standortsfaktoren an der oberen Waldgrenze eine dominierende Rolle spielen (s. HOLTMEIER 1978, 1980, 1981), so kann man jedoch nicht ihnen allein die im Vergleich zu anderen Waldgrenzgebieten so ausgedehnte Verbreitung der „Hecken“ zuschreiben. Von wohl noch größerem Einfluß ist die bei den hier an der Heckenbildung beteiligten Holzarten (*Picea engelmannii*, *Abies lasiocarpa*, *Larix lyallii*) besonders ausgeprägte Fähigkeit zur Vermehrung und Ausbreitung durch Adventivwurzelsbildung („Layering“) (vgl. auch LÜDI 1961), während die Schneedeckenverhältnisse, bei der Genese der „ribbon-forests“ ein Schlüsselfaktor, hier nur untergeordnete Bedeutung haben.

Wie das über lange Zeiträume hinweg stabile Verbreitungsmuster der „ribbon-forests“, so dürfte auch die durch die zum Teil sehr alten „Hecken“ hervorgerufene streifenartige Strukturierung des Knüppelholzgürtels zu den charakteristischen Zügen des Klimaxstadiums der Vegetationsentwicklung in den windausgesetzten Waldgrenzlagen gehören.

Literatur

- ARNO, S. F.: Interpreting the timberline. M. F. thesis Univ. Montana, Missoula, 1966
- BAIG, M. N. and W. TRANQUILLINI: Studies on upper timberline: morphology and anatomy of Norway spruce (*Picea abies*) and stone pine (*Pinus cembra*) needles from various habitat conditions. *Canad. J. of Bot.* 54, 14, 1976, 1622–1632
- BAIG, M. N., TRANQUILLINI, W. and W. HAVRANEK: Cutikuläre Transpiration von *Picea abies*- und *Pinus cembra*-Zweigen aus verschiedener Seehöhe und ihre Bedeutung für die winterliche Austrocknung der Bäume an der alpinen Waldgrenze. *Zentralbl. f. d. ges. Forstwesen* 91, 1976, 195–211
- BARNES, V. G.: Pocket gophers and reforestation in the Pacific Northwest: A problem analysis. U. S. D. I. Fish and Wildlife Service, Bureau of sport fisheries and wildlife, Special Scientific Rep.-Wildlife No. 155, 1971
- BARRY, R. G.: A climatological transect on the east slope of the Front Range, Colorado. *Arctic & Alpine Res.* 5, 2, 1973, 89–110
- BAZZIGHER, G.: Der schwarze Schneeschimmel der Koniferen (*Herpotrichia juniperi* (Duby) Petrak und *Herpotrichia Coulteri* (Peck) Bose). *European Journal of Forest Pathol.* 6, 2, 1976, 109–122
- BILLINGS, W. D.: Vegetational pattern near alpine timberline as affected by fire-snow drift interactions. *Vegetatio* 19, 1969, 192–207
- BRANDGEE, T. S.: Timberline in the Sawatch Range. *Bot. Gaz.* 5, 1880, 125–126
- BUCKNER, D. L.: Ribbon forest development and maintenance in the Central Rocky Mountains of Colorado. Univ. of Colorado at Boulder, Ph.D. thesis, 1977
- GÄUMANN, E., ROTH, C. und J. ANLIKER: Über die Biologie von *Herpotrichia nigra* Hartig. *Zschr. f. Pflanzenkrankheiten (Pflanzenpathologie) und Pflanzenschutz* 44, 3, 1934, 94–116
- HANSEN, R. M. and V. H. REID: Distribution and adaptations of pocket gophers. in: *Pocket gophers and Colorado Mountain Rangeland*, Colorado State Univ. Exp. Stat. Fort Collins, Bull. 554, 1973, 1–19
- HAVRANEK, W.: Über die Bedeutung der Bodentemperatur für die Photosynthese und Transpiration junger Forstpflanzen und für die Stoffproduktion an der Waldgrenze. *Angew. Bot.* 46, 1972, 101–116
- HOLTMEIER, F. K.: Waldgrenzstudien im nördlichen Finnisch-Lappland und angrenzenden Nordnorwegen. *Rep. Kevo Subarctic Res. Stat.* 8, 1971, 53–62
- : Geoeological aspects of timberlines in Northern and Central Europe. *Arctic and Alpine Res.*, Vol. 5, No. 3, Pt. 2, 1973, 45–54
- : Geoökologische Beobachtungen und Studien an der subarktischen und alpinen Waldgrenze in vergleichender Sicht (nördliches Fennoskandien/Zentralalpen). *Erdwiss. Forschung* VIII, 1974
- : Die bodennahen Winde in den Hochlagen der Indian Peaks Section (Colorado Front Range). *Münstersche Geogr. Arbeiten* 3, 1978, 5–47
- : The influence of wind on tree physiognomy at the upper timberline in the Colorado Front Range. in: *Mountain Environment and subalpine tree growth*, Proc. IUFRO workshop Nov. 1979, Christchurch, New Zealand, New Zeal. Forest Service Techn. paper 70, 1980, 247–261
- : Einige Besonderheiten des Krummholzgürtels in der Colorado Front Range. *Wetter und Leben*, 1981
- : What does the term „Krummholz“ really mean? *Mountain Res. and Development*, Vol. 1, Nos. 3/4, 1981, 253–260
- INGLES, L.: Groundwater and snow as factors affecting the seasonal distribution of Pocket Gophers (*Thomomys monticola*). *Journal of Mammal.* 30, 4, 1949, 343–350
- : *Mammals of the Pacific States*. Stanford University Press, 1965
- IVES, J. D.: Studies in high altitude geoeology of the Colorado Front Range: A review of the research program of the Institute of Arctic and Alpine res., Vol. 5, No. 3, Pt. 2, 1973, 67–75
- KUCK, L. E.: The effects of the northern pocket gopher on reforestation: activity and movement. M. S. thesis, University of Idaho, Moscow, 1969
- LINDSAY, J. H.: Annual cycle of leaf water potential in *Picea engelmannii* and *Abies lasiocarpa* at timberline in Wyoming. *Arctic and Alpine Res.*, Vol. 3, No. 2, 1971, 131–138
- LÜDI, W.: Botanische Streifzüge durch die Rocky Mountains Nordamerikas. *Ber. Geobot. Inst. ETH*, 1961
- MARR, J. W.: The development and movement of tree islands near the upper limit of tree growth in the Southern Rocky Mountains. *Ecology* 58, 1977, 1159–1164
- MARTINELLI, M.: Water-yield improvement from alpine areas: The status of our knowledge. U. S. D. A. Forest Service, Res. paper RM 138, 1975
- OOSTING, H. J. and J. F. REED: Virgin spruce-fir forest in the Medicine Bow Mountains, Wyoming. *Ecol. Monogr.* 22, 1952, 69–91
- NORDFORS, G. A.: Något om den vegetativa förnyringen i våra skogar med särskild hänsyn till granens förnyring i fjällskog. *Norlands Skogvårdsförbunds Tidskrift* 1, 1921
- NORDMANN, J. M.: Småtraek af Naturens Vaexhusholding fornemmelig inden den norske Floras Gebet I. *Forhandlinger i. Vid. Selskag*, 1982
- PATTEN, D. T.: Light and temperature influence on Engelmann spruce seed germination and subalpine forest advance. *Ecology* 44, 1963, 817–818

- REID, V. H., HANSEN, R. M. and A. L. WARD: Counting mounds and earth plugs to census mountain gophers. *J. Wildlife Management* 30, 1966, 327–334
- RODER, K.: Die polare Waldgrenze. Dresden, 1895
- RONCO, F.: Shading and other factors affect survival of planted Engelmann spruce seedlings in central Rocky Mountains. U. S. Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Exp. Stat., Res. Note RM 163, 1970
- TEVIS, L., Pocket gophers and seedlings of red fir. *Ecology* 37, 2, 1956, 379–381
- TRANQUILLINI, W.: Climate and water relations of plants in the subalpine region. in: RUTTER, A. J. and F. H. WHITEHEAD (Eds.) *The water relations of plants*. Blackwell Scientific Publ. Oxford, 1963, 153–167
- : Der Einfluß von Seehöhe und Länge der Vegetationszeit auf das cutikuläre Transpirationsvermögen von Fichtensämlingen im Winter. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 87, 1974, 175–184
- : Water relations and alpine timberline. *Ecological Studies* 19, 1976, 473–491
- : Physiological Ecology of the Alpine Timberline, *Ecological Studies* 31, 1979
- TROLL, C.: Rasenabschälung (Turf Exfoliation) als periglaziales Phänomen der subpolaren Zonen und der Hochgebirge. *Z. f. Geomorphol., N.F., Suppl. Bd. 17*, 1973, 1–32
- WARDLE, P.: A comparison of alpine timberlines in New Zealand and North America. *New Zealand J. of Bot.* 3, 2, 1965, 113–135
- : Engelmann Spruce (*Picea engelmannii* Engelgl.) at its upper limits on the Front Range, Colorado, *Ecology* 49, 3, 1968, 483–495
- : An explanation for Alpine Timberline. *New Zeal. J. of Bot.*, 9, 3, 1971, 371–402
- WILLARD, B.: Phytosociology of the Alpine Tundra of Trail Ridge, Rocky Mountain National Park. Ph. D. thesis, Univ. of Colorado at Boulder, 1963

ÜBER DIE BEDEUTUNG DES HUMUS FÜR BODENEROSION UND HANGSTABILITÄT IN DEN FEUCHTEN UND WECHSELFEUCHTEN TROPEN VON PAPUA NEUGUINEA

Mit 3 Abbildungen und 6 Photos

WENDELIN KLAER und MANFRED KRIETER

Summary: Concerning the significance of humus for soil erosion and slope stability in the humid and periodically humid tropics of Papua-New Guinea

When assessing the risk of erosion in a given area, the factor of slope inclination, intensity of precipitation and soil utilization are generally held to be of great importance. This would permit the conclusion that the effect of erosion must assume catastrophic proportions in those places where these factors themselves that contribute to the process have extremely negative dimensions.

But, surprisingly enough, the steeply inclined slopes in the highlands of Papua-New Guinea, though exposed to the most violent tropical thunder showers, do not show any soil erosion worth mentioning in their exposed agricultural areas. Even the cultivation savannas with but few species are not prone to erosion. The decisive factor in this totally unexpected, extraordinary stability of slopes against erosion in the humid tropics of Papua-New Guinea, is the regulatory role played by the top-soil, which – against all normal expectation – quite untypically owes its high degree of permeability and structural stability to its high humus content. When the organic substance is missing, as is the case in the sub-soils or in the overall soil profile of the marginally tropical and periodically humid zone of Papua-New Guinea, devastating soil erosion is part of the normal inventory of morphodynamics. Together with the frequency of humus layers on the island, slope stability and erosion decrease sharply from the zone of the periodically humid tropics as a result of increased oxidation processes during the dry season, which extends over several months. In future considerations of the improvement of soil fertility control importance will also have

definitely to be accorded to the outstanding position of humus in soil stability.

Papua Neuguinea liegt im Norden Australiens zwischen Äquator und 10° südlicher Breite. Es trägt in seiner Insellage ein ausgeprägt ozeanisches feuchttropisches Klima. Die jährlichen Niederschläge erreichen in besonders exponierten Lagen bis zu 8000 mm, unterschreiten andererseits nur in wenigen Landschaftsarealen die 1000-mm-Grenze. Das hat zur Folge, daß Papua Neuguinea überwiegend von tropischen Regenwäldern eingenommen wird. Savanne und Monsunwälder breiten sich nur dort aus, wo der jährliche Niederschlagsgang von einer 3–4 Monate währenden Trockenzeit unterbrochen wird. Dies trifft lediglich für Bereiche an der Südküste zu, in besonderem Maße für einen schmalen küstennahen Saum um Port Moresby.

Papua Neuguinea ist auch heute noch relativ dünn besiedelt. Die Bevölkerung konzentriert sich besonders auf einzelne Küstenhöfe und auf das klimatisch begünstigte, verkehrsabgelegene Hochland über 1500 m Höhe. Dagegen erstrecken sich weite unberührte Areale von echten primären Regenwäldern über die anderen Regionen. Sie bedecken fast 70% der Insel. Die Hochlandbevölkerung, die überwiegend erst zwischen 1930 und 1940 in einer absoluten Steinzeitkultur entdeckt worden ist, konzentriert sich heute im Hochland z. T. in Bevölkerungsdichten von mehr als 200 E/qkm.