

Zeitschrift: Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der Eidg. Tech. Hochschule, Stiftung Rübel, in Zürich

Herausgeber: Geobotanisches Institut, Stiftung Rübel (Zürich)

Band: 48 (1971)

Artikel: Vergleich alpiner Rasen auf Silikat- und auf Karbonatboden : Konkurrenz- und Stickstoffformenversuche sowie standortkundliche Untersuchungen im Nardetum und im Seslerietum bei Davos

Autor: Gigon, Andreas

Kapitel: E: Spezielle Charakterisierung der untersuchten Standorte auf Silikat und auf Karbonat

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308376>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

E. Spezielle Charakterisierung der untersuchten Standorte auf Silikat und auf Karbonat

I. Standortkundliche Kriterien der Vergleichbarkeit der untersuchten Probeflächen

Da die spezielle Charakterisierung der Standorte sich im wesentlichen auf den Vergleich einander möglichst genau entsprechender Probeflächen auf Silikat und auf Karbonat stützt, seien hier als erstes die Kriterien beschrieben, nach denen auf die Vergleichbarkeit solcher Parallelfächen geachtet wurde:

- Entfernung voneinander weniger als 200 m Luftlinie (meist weniger als 100 m)
- gleiche oder ähnliche geomorphologische Lage, z. B. beide Flächen am Hangfuß oder beide auf Spornen usw.
- Unterschied in der Exposition weniger als 20° Azimut
- Unterschied in der Neigung weniger als 10° (\triangleq 18%)
- Höhenunterschied weniger als 50 m (meist weniger als 20 m)
- mehr oder weniger gleiche Bewirtschaftung. Diese ist in allen Flächen extensiv
- es wurde versucht, anhand der geomorphologischen Lage und der Geologie die Lage der Probeflächen bezüglich ehemaliger Gletscher festzustellen. Dies, um zu prüfen, ob an den einander entsprechenden Probeflächen vergleichbare Zeiten seit dem Beginn der Bodenbildung verstrichen waren.

Sind all diese Bedingungen erfüllt, so kann man annehmen, daß sich die einander entsprechenden Probeflächen nur im Boden und allem, was damit zusammenhängt, wesentlich unterscheiden.

Die Probeflächen lagen alle zwischen 2100 m (obere Grenze der subalpinen Stufe) und 2600 m und waren nach Südost bis Südwest geneigt. Nur bei dieser Exposition können überhaupt wesentliche Unterschiede im Mikroklima zwischen Silikat und Karbonat erwartet werden.

II. Mikroklima, insbesondere Bodentemperaturen

1. Mikroklimatischer Vergleich von einander entsprechenden Silikat- und Karbonatstandorten

In der Literatur, z. B. in BRAUN-BLANQUET 1964 (S. 349), wird immer wieder angedeutet, daß Karbonatboden allgemein wärmer sei als Silikatboden. Diese Hypothese wird dann oft zur Erklärung dafür herangezogen, daß gewisse Arten an der kühlen Nordgrenze ihres Verbreitungsgebietes nur noch auf dem wärmeren Karbonatboden vorkommen, wogegen sie im Süden auch auf Silikat gedeihen. BRAUN-BLANQUET gibt hierfür als wichtigste Beispiele *Fagus silvatica*, *Quercus pubescens* und *Bromus erectus* an. Könnte es nun nicht sein, daß ähnliche Phänomene auch die Erklärung für die Kalkstetigkeit einiger Arten in den Alpen gäben? In der alpinen Höhenstufe verläuft die ökologische Kältengrenze

vieler Arten. Wenn nun der Karbonatboden tatsächlich wärmer ist als der Silikatboden, dann könnten auf ihm gewisse Arten noch weiter oben gedeihen als auf Silikat. In einer bestimmten Höhenstufe wären die betreffenden Arten dann als «kalkstet» zu bezeichnen. Bei den vorliegenden Messungen geht es also nicht darum, das Mikroklima einiger alpiner Pflanzengesellschaften kennenzulernen; dieses wurde ja schon von LÜDI (1948), REHDER (1970) und anderen untersucht. Unser Ziel ist, zu prüfen, ob an genau vergleichbaren Stellen der Karbonatboden tatsächlich wärmer ist als der Silikatboden, und somit einige Anhaltspunkte für die obige Hypothese zu gewinnen.

An bedeckten Tagen ergaben sich, wie erwartet, keine wesentlichen Unterschiede.

An Strahlungstagen zeigte sich, daß an den vegetationsfreien Stellen der Karbonatboden tatsächlich wärmer ist als entsprechender Silikatboden; an vegetationsbedeckten Stellen war jedoch gerade das Gegenteil der Fall (Abb. 6). Bevor näher hierauf eingetreten wird, soll kurz die Abbildung 5 diskutiert werden. In ihr sind die Ergebnisse von Messungen zusammengestellt, mit denen geprüft wurde, ob die 200 m voneinander entfernten, ungefähr 35–38° nach Süden geneigten Parallelfächen «Strela Silikat 1» und «Strela Karbonat 1» einander auch wirklich gut entsprechen.

Die Temperatur in 2 m über dem Boden zeigte auf beiden Flächen denselben Verlauf. Im Windweg ergaben sich einige Unterschiede, die jedoch, da die Werte sehr gering sind, für das Mikroklima an den beiden Meßstellen bedeutungslos sind. Auch die Unterschiede in der kurzwelligen Einstrahlung sind nicht von großer Bedeutung. Die zeitliche Verschiebung der Kurven rührt davon her, daß die Probefläche auf Silikat nach SSE exponiert ist, die Sonnenstrahlen auf sie am Vormittag also früher steil einfallen als auf die Karbonatfläche, die nach S exponiert ist. In der Piche-Evaporation unterscheiden sich die beiden Probeflächen so gut wie gar nicht, was darauf hindeutet, daß der Unterschied im Windweg bedeutungslos ist. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich die beiden Probeflächen in den von außen auf sie einwirkenden Klimafaktoren nicht wesentlich unterscheiden.

Die Strahlungsbilanz (Abb. 5) wurde in 5 cm über der Vegetation gemessen. Auch hier rührt die zeitliche Verschiebung der Kurven vom Expositionsunterschied der beiden Flächen her. Die Kurven unterscheiden sich aber auch dadurch, daß, bei gleicher Einstrahlung, die Strahlungsbilanz über Karbonatvegetation größer ist als über Silikatvegetation. Der Maximalwert über Silikat beträgt 84% des Maximalwertes über Karbonat. Der Grund hiefür liegt darin, daß die Karbonatpflanzen unter dem Strahlungsbilanzmesser, *Dryas* und *Sesleria*, dunkler waren als die entsprechenden Silikatpflanzen *Nardus*, *Carex sempervirens* und *Trifolium alpinum*. Die Karbonatvegetation reflektierte also weniger Licht, was eine größere Strahlungsbilanz ergab.

Im Tagesgang der Bodentemperaturen (Abb. 6) unterscheiden sich die beiden Substrate, wie gesagt, stark voneinander. Auch hier rührt die zeitliche Verschiebung der Kurven vom Expositionsunterschied der beiden Probeflächen her.

An Stellen ohne Vegetation sind bei starker Einstrahlung die Bodentemperaturen (immer Mittelwerte aus 3–6 Messungen) im Karbonatboden in 2 und in 5 cm Tiefe etwa 3–5 °C höher als im Silikatboden. In 10 cm bestehen keine Unterschiede mehr zwischen den beiden Substraten. Ganz extreme Verhältnisse

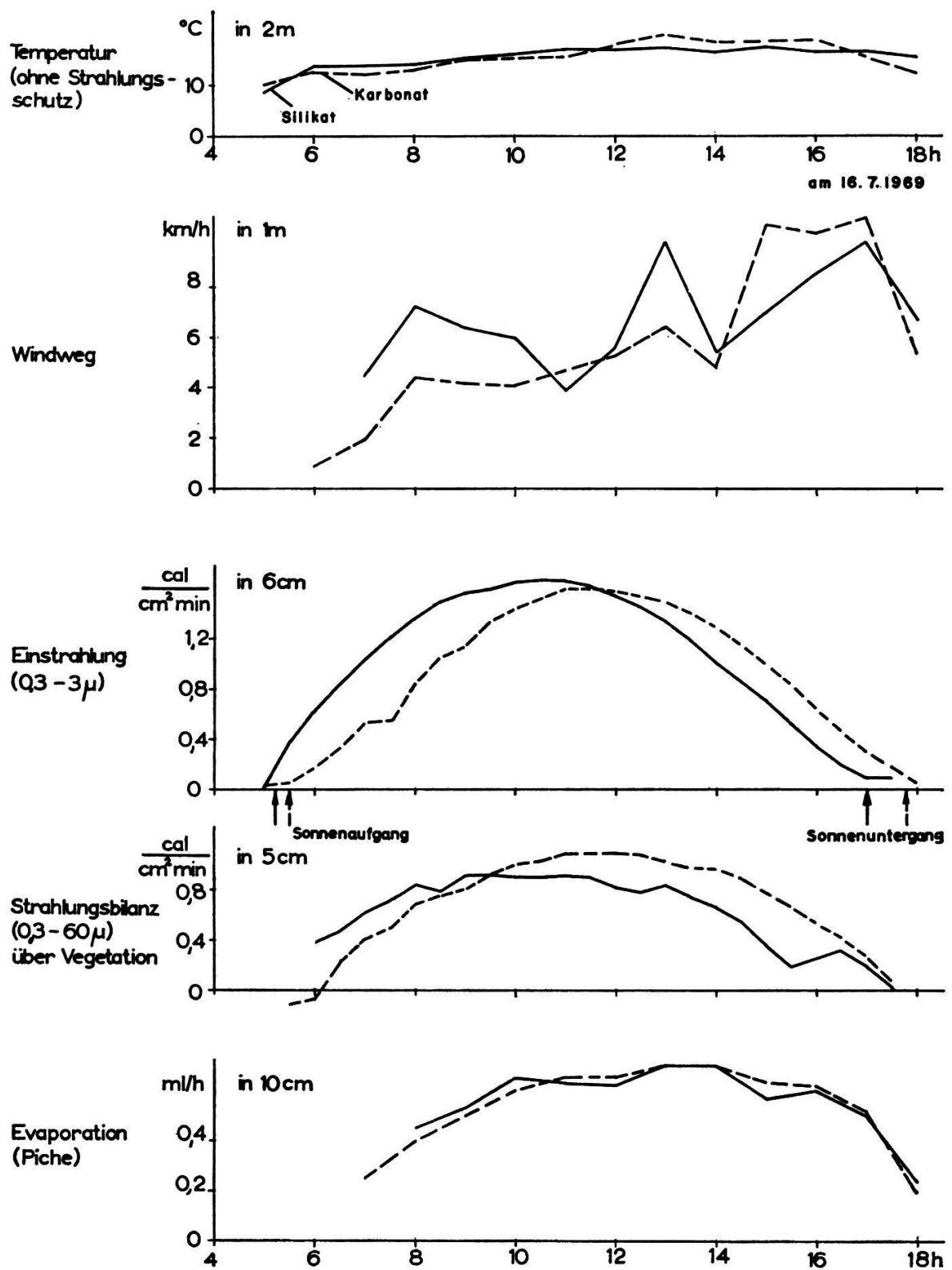


Abb. 5 Lokalklimatische Vergleichsmessungen an den einander entsprechenden Probeflächen «Strela Silikat 1» und «Karbonat 1» am 16. 7. 1969, einem Strahlungstag

Mit Vegetation

Ohne Vegetation

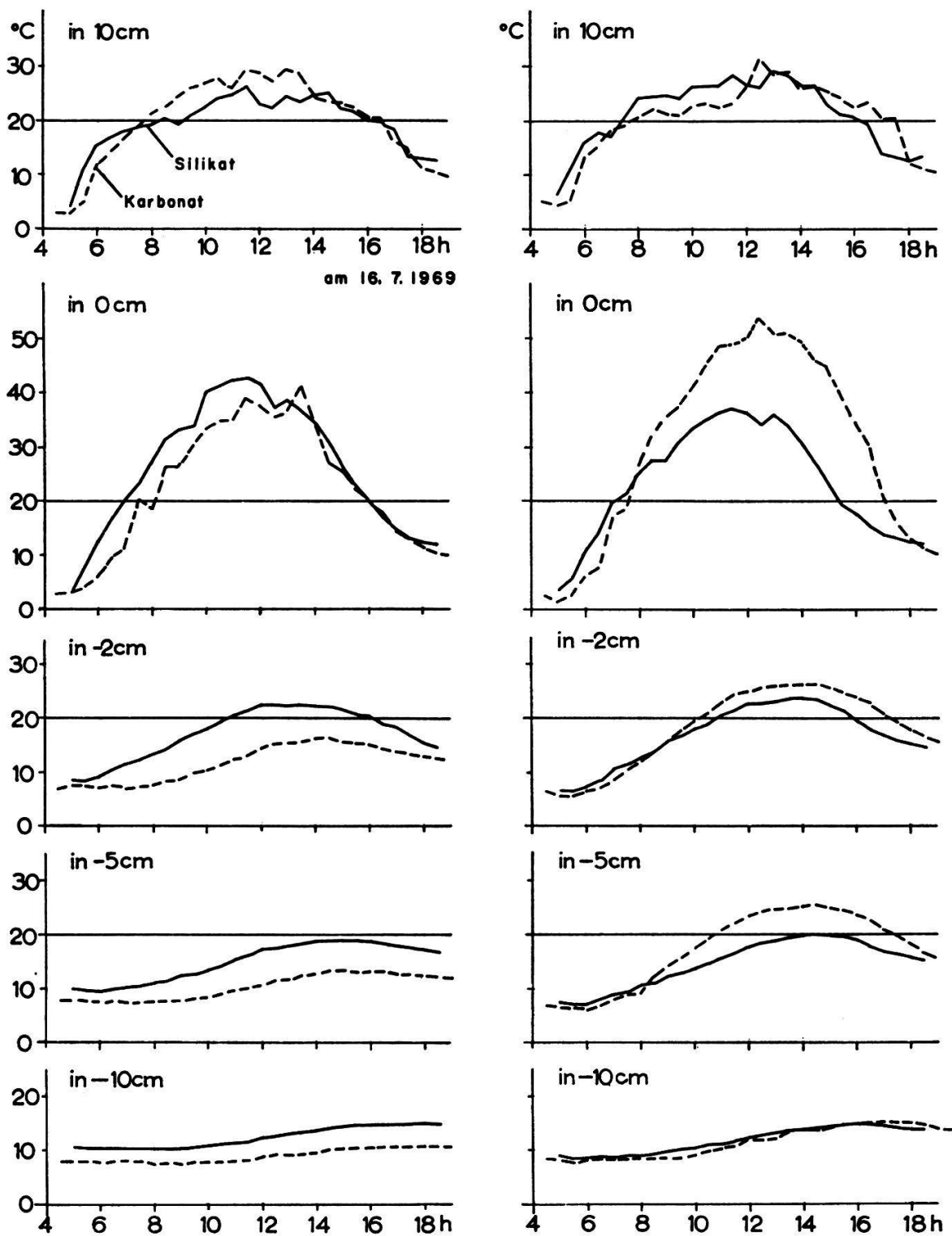


Abb. 6 Temperaturen in 10 cm, 0 cm (ohne Strahlungsschutz) und in verschiedenen Bodentiefen an den einander entsprechenden Probestellen «Strela Silikat 1» und «Karbonat 1» an vegetationsbedeckten und vegetationsfreien Stellen am 16.7.1969, einem Strahlungstag, der auf zwei niederschlagsfreie Tage folgte

liegen jedoch an der Bodenoberfläche vor, wo auf Karbonat ein Maximum von 54 °C gemessen wurde; auf Silikat stieg die Temperatur nur bis 38 °C. Die entsprechenden Werte unter Vegetationsbedeckung betragen 41 bzw. 43 °C. Dies deutet auf den zum Teil starken Einfluß der Pflanzendecke auf die Bodentemperaturen hin, der im folgenden beschrieben werden soll. Unter der dichten, dunklen, die Strahlung zurückhaltenden Karbonatvegetation sind in 0, 2, 5, ja sogar bis in 10 cm Bodentiefe die Bodentemperaturen bei starker Einstrahlung etwa 5 °C tiefer als unter der lockeren Silikatvegetation. Überhaupt ist der Einfluß der Silikatvegetation auf die Bodentemperaturen gering. Dies geht aus dem Vergleich der Bodentemperaturen an vegetationsfreien Stellen mit vegetationsbedeckten deutlich hervor. Ganz anders liegen die Verhältnisse beim Karbonatboden: hier spielt die Vegetationsbedeckung, wie Abbildung 6 zeigt, eine bedeutende Rolle. Noch in 2 und sogar in 5 cm Tiefe ist bei starker Einstrahlung die Temperatur unter vegetationsfreien Stellen etwa 10 °C höher als unter Vegetationsbedeckung.

Die in 10 cm über unbewachsenem Boden gemessenen Tagesgänge unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Die schlechte Übereinstimmung der Kurven liegt vor allem an der zeitlichen Verschiebung der Temperaturgänge infolge der verschiedenen Exposition der Flächen. Wesentlich dürften jedoch die Unterschiede zwischen den in 10 cm in der Vegetation gemessenen Tagesgänge sein. Wie schon aus der Strahlungsbilanz (siehe oben) hervorging, absorbiert die dunkle und dichte Karbonatvegetation mehr Wärme als die helle und lückige Silikatvegetation. Die Karbonatvegetation erwärmt sich also stärker und kann deshalb mehr Wärme an die umgebende Luft abgeben. Diese Luft wird außerdem wegen der größeren Dichte der Vegetation auch weniger stark vom Wind bewegt. Dies alles ergibt eine höhere Temperatur in der Karbonatvegetation.

Im Zusammenhang mit dem Einfluß der Vegetation auf die Bodentemperaturen seien noch kurz die Ergebnisse erwähnt, die ZUBER (1968) in Girlandenrasen auf Dolomit im Schweizerischen Nationalpark erhielt. In einer Relegationsperiode Ende Oktober 1965 konnte er in Strahlungsnächten sehr wesentliche Temperaturunterschiede zwischen dem unbewachsenen Girlandenrücken (Trittflächen der Treppen) und der bewachsenen Girlandenstirn messen. So sank die Temperatur an der unbewachsenen Stelle bei Nacht in 2 cm Tiefe schon 2 °C unter den Nullpunkt, wogegen sie in derselben Bodentiefe aber unter dem Schutz der Vegetation nur auf etwa +5 °C absank.

Auch in den Blumentöpfen auf dem Strelaberg wurden Temperatur- und Strahlungsmessungen durchgeführt. Ihre Ergebnisse stimmen mit denen in den Probeflächen gut überein, nur daß wegen des schiefen Einfallswinkels der Sonnenstrahlen auf die horizontale Bodenoberfläche in den Töpfen die Temperaturen allgemein weniger hoch waren.

Auf die Ursachen der Unterschiede in der Bodentemperatur zwischen Karbonat- und Silikatstandorten sowie auf die Bedeutung dieser Unterschiede für die Pflanzen wird am Ende des nächsten Kapitels eingegangen.

2. Exponentielle Temperaturmittel im Oberboden

Die ungefähr 300 Zuckerampullen für die Bestimmung der (physiologisch wirksamen) exponentiellen Temperaturmittel (PALLMANN et al. 1940) wurden im Oberboden einander entsprechender Probeflächen auf Silikat und auf Karbonat sowie in den Blumentöpfen auf dem Strelaberg und in Birmensdorf von Anfang Juli bis Anfang September 1969 exponiert. Dies war eine zum Teil recht niederschlagsreiche Zeit, weswegen die Böden allgemein feucht waren, was eine hohe spezifische Wärme, also geringe Temperaturextrema und niedrige Mittelwerte bedeutet (siehe Ende des Kapitels). Demgemäß waren zwischen Silikat- und Karbonatboden vor allem in tieferen Bodenschichten keine großen Temperaturunterschiede zu erwarten.

Die Tabelle 7 zeigt eindeutig die schon bei den Tagesgängen beobachtete Tatsache, daß an den vegetationsfreien Stellen der Karbonatboden im allgemeinen wärmer ist als der Silikatboden. Die Unterschiede bewegen sich an der Bodenoberfläche zwischen 0,4 und 3,8 °C. In 2 cm Bodentiefe ergaben sich Unterschiede von 0,8 bis 4,1 °C (Durchschnitt, ohne Messungen von Birmensdorf: 2,2 °C). Die in 2 cm Tiefe gemessenen Werte sind für die Charakterisierung der Standorte am besten geeignet, da die Ampullen hier nicht so sehr wie an der Oberfläche zufällig verschieden beschattet, verschüttet oder bloßgelegt wurden, aber doch größere Unterschiede zwischen den beiden Substraten zu erwarten sind als tiefer. Deshalb wurden die Meßwerte für diese Tiefe statistisch untersucht. Der *t*-Test ergab, daß die Unterschiede zwischen den beiden Substraten mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von ~ 5% von Null verschieden, also gesichert sind (*t* Tabelle, 5% = 3,18; *t* berechnet = 3,17).

Bei Vegetationsbedeckung sind die Silikatböden im allgemeinen wärmer als die Karbonatböden. Auch dies stimmt mit den Tagesgängen der Bodentemperatur gut überein. Die Unterschiede bewegen sich zwischen 1,1 und 7,0 °C an der Bodenoberfläche und zwischen 0,5 und 1,6 °C in 10 cm Tiefe. Für die in 2 cm Tiefe gemessenen Unterschiede, die im Durchschnitt 1,36 °C betragen, ergab ein *t*-Test, daß sie mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 5% von Null verschieden, also gesichert sind (*t* Tabelle 5% = 2,776; *t* berechnet = 3,12).

Vergleicht man die vegetationsbedeckten mit den vegetationsfreien Stellen, so sieht man, daß vor allem auf Karbonat die vegetationsfreien Stellen an der Bodenoberfläche viel wärmer sind als die bewachsenen. Hier treten 3,8–11 °C höhere exponentielle Temperaturmittel auf. Beim Silikat sind die entsprechenden Werte nur 0,6–4,3 °C höher. Die Ursachen für diesen unterschiedlichen Effekt der Pflanzendecke wurden bereits erwähnt.

Die in den Blumentöpfen auf dem Strelaberg gemessenen *eT*-Werte sind tiefer als die in Probeflächen auf entsprechender Meereshöhe, da die Bodenoberfläche in den Blumentöpfen nicht nach Süden exponiert, sondern waagrecht war und in ihnen der Boden allgemein feuchter war als am Standort.

Der Vergleich der verschiedenen Probeflächen auf demselben Substrat miteinander zeigt, wie die *eT*-Werte mit zunehmender Meereshöhe abnehmen. Bei

Tabelle 7 Exponentielle Temperaturmittel in verschiedenen Bodentiefen an einander entsprechenden Probeflächen auf Silikat (S) und auf Karbonat (K) bzw. in den Blumentöpfen. Exposition von Anfang Juli bis Anfang September 1969

Probeflächenpaar oder Versuchsort Meereshöhe Exposition/Neigung	Expo- sitions- dauer Tage	Exponentielle Temperaturmittel*							
		Hori- zont cm	unter Vegetation			Hori- zont cm	ohne Vegetation		
			Si- likat °C	Kar- bonat °C	Δ (K-S) °C		Si- likat °C	Kar- bonat °C	Δ (K-S) °C
Gotschna 1 2130 m S: 150°/30° K: 170°/35°	64	0	22,5	21,4	—1,1	0	23,1	25,2	+2,1
		—2	16,5	15,1	—1,4	—2	15,1	19,2	+4,1
		—5	14,5	13,8	—0,7	—5	14,0	16,5	+2,5
		—10	13,5	13,1	—0,4	—10	13,3	13,9	+0,6
		—20	13,1	12,2	—0,9	—20	12,5	12,6	+0,1
Gotschna 2 2290 m S: 160°/35° K: 140°/40°	64	0	18,8	13,9	—4,9	0	23,1	23,5	+0,4
		—2	14,8	13,2	—1,6	—2,5		16,6	
		—5	13,5	13,8 ?	+0,3	—5	16,2	14,6	—1,6
		—10	12,7	11,8	—0,9	—10	15,6	13,3	—2,3
Strela 1 2330 m S: 160°/35° K: 180°/38°	65	0	22,3	15,5	—6,8	0		26,5	
		—2,5	13,3	13,9	+0,6	—3,5		15,6	
		—5	12,8	12,4	—0,4	—5		15,1	
		—10	12,1	11,6	—0,5	—10		12,9	
Strela 3 2455 m S: 130°/38° K: 160°/35°	63	0	20,0	13,0	—7,0	0	19,1	22,9	+3,8
		—2	14,4	13,0	—1,4	—2	14,4	16,2	+1,8
		—5,5	13,6	12,3	—1,3	—5	13,7	13,8	+0,1
		—10	12,9	11,4	—1,5	—10	12,6	10,2	—2,4
Strela 4 2500 m S: 180°/33° K: 160°/35°	64	0	18,8	13,7	—5,1	0	18,0	18,4	+0,4
		—2,5	13,8	12,0	—1,8	—2,7	13,4	14,2	+0,8
		—5	13,0	11,4	—1,6	—5	12,8	12,8	0
		—10	12,5	10,9	—1,6	—10	10,9	11,6	+0,7
Versuchsort Strelaberg 2355 m	64					0	15,0	15,7	+0,7
						—2	12,4	14,5	+2,1
						—5	11,5	11,6	+0,1
						—10	11,2	10,9	—0,3
Versuchsort Birmensdorf 555 m	67					0	22,6	23,9	+1,3
						—2	22,4	22,9	+0,5
						—5	21,6	22,1	+0,5
						—10	21,0	21,1	+0,1
						—20	20,5	20,6	+0,1

* Bei den Horizonten 0 und 2 cm Durchschnittswerte aus 2–4, bei den übrigen Horizonten aus 1–2 Messungen

den in unbepflanzten Blumentöpfen auf dem Strelaberg und in Birmensdorf ausgelegten Ampullen zeigen sich bezüglich der Temperaturdifferenzen ähnliche Ergebnisse wie bei vegetationsfreien Stellen. Der große klimatische Unterschied zwischen den beiden Versuchsorten tritt sehr deutlich hervor. Alle exponentiellen Temperaturmittel sind in Birmensdorf 8–10 °C höher als auf dem 1800 m höher liegenden Strelaberg. Die durchschnittliche Abnahme der exponentiellen Temperaturmittel mit steigender Meereshöhe beträgt somit ungefähr 0,5 °C/100 m.

Tabelle 8 Wärmehaushaltsgrößen verschiedener Materialien und Böden (nach GEIGER 1961, SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL^Δ 1966, S. 221 und 256, und Handbook of Chemistry and Physics^Δ 1957)

Material bzw. Boden	Spezifische Wärme cal grad · g	Spezifische Wärme (pro Volumen) cal grad cm ³	Wärme- leitfähigkeit cal grad cm sec	Temperatur- leitfähigkeit cm ² sec
Wasser	1,0	1,0	1,5 · 10 ⁻³	1,5 · 10 ⁻³
Luft	0,24	0,0003	5 · 10 ⁻⁵	0,161
^Δ Bodenbestandteile				
mineralische	0,2	0,53	1–6 · 10 ⁻³	
organische	0,3–0,4	0,49		
Granit (△ Gneis)	0,2	0,52	1,1 · 10 ⁻²	0,021
^Δ Marmor (△ Kalk)	0,21	0,55		
Trockener Sand	0,3	0,42	4 · 10 ⁻⁴	0,0013
Nasser Sand	0,4	0,64	4 · 10 ⁻³	0,01

Im folgenden sei noch kurz auf die Ursachen der Temperaturunterschiede zwischen vegetationsfreiem Silikat- und Karbonatboden eingegangen. Diese liegen wohl weniger in den verschiedenen Wärmehaushaltsgrößen der beiden Muttergesteine (Tab. 8) als in der Verschiedenheit der Struktur der Böden, die aus diesen Muttergesteinen entstehen. Die Tabelle 9 gibt hierfür einige Anhaltspunkte. In ihr werden die an der Bodenoberfläche an einander sehr genau entsprechenden Meßstellen gemessenen Temperaturen zu den Wassergehalten und der scheinbaren Dichte in 0–4 cm Tiefe in Beziehung gebracht. Aus diesen Daten und den Konstanten der Tabelle 8 kann die durchschnittliche Wärmekapazität der Böden berechnet werden (vgl. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1966). Es ergaben sich für die obersten 4 cm des Silikatbodens Werte zwischen 0,64 und 0,68, für den Karbonatboden solche zwischen 0,37 und 0,49 cal/grad cm³. Je größer die Wärmekapazität ist, desto geringer ist die Temperaturerhöhung, die eine bestimmte Wärmemenge (Einstrahlung) zur Folge hat. Diese Werte sowie die Tatsache, daß die Wärme- und die Temperaturleitfähigkeit mit abnehmendem Wassergehalt abnehmen⁸, erklären die hohen Ober-

⁸ Sehr nasse Böden haben infolge der großen spezifischen Wärme des Wassers wieder eine relativ geringe Wärme- und Temperaturleitfähigkeit.

flächentemperaturen des Karbonatbodens gut. Die Ursachen für den Unterschied im Wassergehalt werden in E. III beschrieben.




Unterschieden in der Bodenfarbe kommt, wie mehrere Meßreihen zeigten, nur eine geringe Bedeutung zu. Am 7.7.1970, 15 h 10, wurde bei einer Globalstrahlung ($0,3-3 \mu$) von $1,14 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ in 80 cm über eben gelagertem, trockenem Silikatboden (der Kulturversuche) eine Reflexstrahlung von $0,19 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ gemessen, über Karbonatboden eine solche von 0,22. In 13 cm über den Böden betrugen die betreffenden Werte 0,15 bzw. $0,19 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$. Somit hält der dunklere Karbonatboden von der kurzwelligen, also energiereicheren Strahlung nur etwa 3–4% mehr zurück als der Silikatboden.

Abschließend sei nun auf die mögliche Bedeutung der Temperaturunterschiede eingetreten. Es ist interessant, nochmals festzustellen, daß an den Karbonatstandorten, die ohne Vegetation ja wärmer sind als entsprechende Silikatstandorte, die Vegetation sich selbst ein im Durchschnitt kühleres Bodenmikroklima schafft. Ob aber die niedrigen exponentiellen Temperaturmittel unter Karbonatvegetation sich auf das Pflanzenwachstum ungünstig auswirken, kann nur experimentell ermittelt werden. Es könnte durchaus sein, daß die im vegetationsbedeckten Karbonatboden zweifellos weniger stark schwankenden Temperaturen sich auf das Pflanzenwachstum günstiger auswirken als die stärker schwankenden, durch höhere Maxima, also durch höhere exponentielle Temperaturmittel gekennzeichneten Temperaturverhältnisse im Silikatboden. Auch wurzeln die Pflanzen auf Karbonat ja auch intensiv unter den vegetationsfreien Stellen (vgl. auch ZUBER 1968), wobei sich die dort hohen Bodentemperaturen günstig auf das Wurzelwachstum und somit auf die Stoffaufnahme auswirken könnten.

Vergleicht man den zwischen Silikat und Karbonat in den unbepflanzten Blumentöpfen in 2 cm Tiefe gemessenen Unterschied im exponentiellen Temperaturmittel mit der durchschnittlichen Abnahme dieses Mittels mit steigender Meereshöhe, so ergibt sich, daß ein unbedeckter Karbonatboden etwa dasselbe exponentielle Temperaturmittel besitzt wie ein mehrere hundert Meter weiter unten liegender Silikatboden. Der Vergleich der Messungen in den einzelnen Probeflächen miteinander ergibt größenordnungsmäßig denselben Wert. So beträgt die in 2330 m auf Karbonat in 2 cm Tiefe gemessene Temperatur immer noch mehr als die in 2130 m, also 200 m tiefer gemessene entsprechende Bodentemperatur auf Silikat. Die große Bedeutung von Unterschieden in der Bodentemperatur für die Pflanzen in der alpinen Stufe geht zum Beispiel aus den Untersuchungen von MOONEY (1966) hervor.


MOONEY verglich einen dunklen Kalksandstein- mit einem fast weißen Dolomitrohboden in den White Mountains (3000–3600 m) in Kalifornien. Wegen der verschiedenen Bodenfarbe und wohl auch wegen Unterschieden im Bodenwassergehalt erwies sich der Kalksandsteinboden als beträchtlich wärmer als der Dolomitrohboden. Deshalb blühte und fruchtete die auf beiden Substraten vorkommende Art *Erigeron clokeyi* in 3300 m auf Kalksandstein 2–3 Wochen früher als auf Dolomit. MOONEY führt weiter aus, daß ein solches Zurückbleiben auf einem Substrat in Höhen mit kürzerer Vegetationsperiode kritisch werden und für das Fehlen der Art auf dem betreffenden Substrat verantwortlich sein könnte.

Tabelle 9 Temperaturen an der Bodenoberfläche sowie Wassergehalt, scheinbare Dichte und daraus berechnete Wärmekapazität des Bodens an kleinen, vegetationsfreien, einander entsprechenden Meßstellen ($\varnothing \sim 25$ cm) auf Silikat- und auf Karbonatboden am 5.8.1969

Beschreibung der Meßstellen		Farbe der Bodenoberfläche		cm ³ H ₂ O/100 cm ³ Boden aus 0-4 cm		Scheinbare Dichte ^Δ : $\rho_a \cdot \text{g/cm}^3$ Boden aus 0-4 cm		Wärmekapazität berechnet $\frac{\text{cal}}{\text{grad cm}^3}$		Meßtiefe [□]	Temperatur °C [▲] ohne Strahlungsschutz					
S = Silikat	K = Karbonat	S	K	S	K	S	K	S	K	S	K	S	K	S	K	K
Exposition 90°, humoser, Boden	Exposition 90°, humoser, ± luft-trockener Boden	dunkel-braun	schwarz	58	24	0,48	0,65	0,68	0,37		36,0	45,8	39,8	47,3	17,5	19,8
Exposition 130°, toniger und kies-haltiger Boden	Exposition 110°, Humus, Sand und Kies vermengt	braun	dunkel-grau	50	24	0,75	0,71	0,65	0,38		31,9	40,6	31,3	41,3	16,2	18,9
Exposition 120°, toniger und kies-haltiger, sehr feuchter Boden	Exposition 110°, sandig-kiesiger Boden, feucht	braun	grau	48	29	0,78	0,99	0,64	0,49		27,8	32,6	25,2	33,1	15,0	16,5
Einstrahlung (0,3-3 μ) cal/cm ² min											26,0	31,3	27,4	32,0	14,9	16,6
Beginn der Meßreihe (Dauer: 2 min)											1,485	Besonnt	1,353	Besonnt	0,290	Schatten
											11.27	11.30	12.48	12.45	16.17	16.20

Δ Mittel aus 2 Bestimmungen

▲ Mittel aus 3 Messungen

□  = Köpfchen des Thermistors halb in Boden

 = Köpfchen des Thermistors mit 1 mm Erde bedeckt (Strahlungsschutz)

Untersuchungsorte: Probeflächen Strela S7 und K7, also 30 m voneinander entfernte Hänge mit Exposition 120° und Neigung 35° in 2200 m. Wetter: Wechselnd bewölkt, am Morgen viel Tau. In der Nacht vom 3. zum 4.8. hatte es stark geregnet. 5 min Regen am 4.8. abends.

Bei der Berechnung der Wärmekapazität wurde die scheinbare Dichte des Bodens gleich dem Anteil mineralischer Bodenbestandteile gesetzt trotz des Humusgehaltes von ~17%.

Ähnliche Beobachtungen können im Untersuchungsgebiet bei Davos wohl nur unter ganz besonderen Umständen gemacht werden, wie zum Beispiel an standörtlich vollständig übereinstimmenden Flächen. Auf den Aufnahme­flächen «Strela Silikat 8» und «Karbonat 8», die ja nur 10 m voneinander entfernt liegen, wurde am 28.8.1970 beobachtet, daß *Salix serpyllifolia* auf Karbonat schon blühte, wogegen dieser eng am Boden dahinkriechende Zwergstrauch auf Silikat kaum Blütenknospen entwickelt hatte. *Galium anisophyllum* war auf Karbonat gerade am Aufblühen; auf Silikat waren die Knospen noch ganz geschlossen, und die Pflanzen waren anderthalbmal kleiner. Auch *Ligusticum mutellina* war auf Silikat viel weniger weit entwickelt als auf Karbonat. Ein ähnliches Verhalten der beiden letztgenannten Arten wurde am 31.7.1970 auch auf den Probeflächen «Strela Silikat 5» und «Karbonat 5» beobachtet. Man kann einwenden, daß der verschiedene phänologische Entwicklungszustand der drei Arten weniger mit Unterschieden in den Bodentemperaturen als mit solchen in den Nährstoff- und Konkurrenzbedingungen zusammenhängt. Dem spricht jedoch entgegen, daß die drei Arten im *Nardetum* und im *Seslerietum* vegetationskundlich ein sehr ähnliches Verhalten zeigen (vgl. Vegetationstabelle). Auf jeden Fall muß dieses Problem noch weiter bearbeitet werden.

Auch besitzen die Silikat- wie die Karbonatvegetation bezüglich der Temperaturverhältnisse eine «bedeutende Variabilität» (LÜDI 1948, S. 386, vgl. auch REHDER 1970). Somit spielen kleine Temperaturunterschiede für die Treue der Arten zum Substrat im allgemeinen keine Rolle. Im übrigen bestehen große Unterschiede zwischen den beiden Substraten ja nur zwischen sogenannt vegetationsfreien Stellen. Diese sind meist von den umgebenden Arten durchwurzelt, so daß eventuell dort aufkommende Pflanzen sehr bald in Konkurrenz mit den umgebenden Arten treten müssen. Die Wirkung der Konkurrenz ist aber im allgemeinen sicher stärker als diejenige geringer Temperaturunterschiede.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß im Untersuchungsgebiet der vegetationsfreie Karbonatboden wärmer ist als der entsprechende Silikatboden, daß aber diesem Unterschied im allgemeinen keine große Bedeutung für die Artengarnitur der beiden Standorte zukommt. Es kann jedoch sein, daß sich die erwähnten Unterschiede bei der Keimung entscheidend auswirken und daß sie an den ökologischen Grenzen der Arten, etwa den vertikalen Verbreitungsgrenzen, von Bedeutung sind. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Frage, ob die Temperaturunterschiede zwischen Silikat und Karbonat bei der Erstbesiedlung der Standorte wesentlich sind.

III. Wasserfaktor und bodenphysikalische Untersuchungen

1. Wassergehalte, Desorptionskurven und Wasserversorgung

Bei allen Probeentnahmen zeigte sich, daß der Wassergehalt im Oberboden des *Nardetum* größer war als unter standörtlich entsprechenden Beständen des

Seslerietum (vgl. Tab. 10). Dies hat auch LÜDI (1948) auf der Schynigen Platte bei Interlaken festgestellt. Durch die Bestimmung von Desorptionskurven an einigen Proben wurde versucht abzuklären, ob dieser Unterschied für die Pflanzen wesentlich ist. Aber, obwohl die Böden unter dem *Nardetum* so verschieden von denen unter dem *Seslerietum* sind, bestehen in den in Gewichtsprozenten ausgedrückten Desorptionskurven von Oberflächenproben dieser Pflanzengesellschaften keine grundlegenden Unterschiede (vgl. Tab. 11 und Abb. 7).

Tabelle 10 Wassergehalte an vegetationsbedeckten, skelettarmen Stellen im Oberboden einander entsprechender Probeflächen auf Silikat (S) und auf Karbonat (K) bei Davos an verschiedenen Daten. Durchschnitte von 2–8 Proben

Datum		24.–26.9.1969		23.10.1969*		30.6.–3.7.1970	
Horizont		—1 bis —6 cm		—1 bis —6 cm		—1 bis —11 cm	
Meßgröße		$\frac{\text{cm}^3 \text{ H}_2\text{O}}{\text{dm}^3 \text{ Bo.}}$	H ₂ O in % des TrG. der 4-mm- Feinerde	$\frac{\text{cm}^3 \text{ H}_2\text{O}}{\text{dm}^3 \text{ Bo.}}$	H ₂ O in % des TrG.	$\frac{\text{cm}^3 \text{ H}_2\text{O}}{\text{dm}^3 \text{ Bo.}}$	H ₂ O in % des TrG.
Probefläche							
Strela	S1	460	73	210	45	450	61
	K1	260	56	100	32	200	24
	S3	420	76			450	66
	K3	300	39			380	40
	S4	420	76			450	66
	K4	300	39			380	40
	S5	510	70	130	26	420	47
	K5	240	38	160	29	210	23
Gotschna	S1	430	60			500	60
	K1	310	51			360	48
	S2	330	44			400	42
	K2	270	45			400	53
Durchschnitt	S	430	65	170	36	440	55
Durchschnitt	K	280	46	130	31	310	38

* Während einer Trockenperiode

Auch im Anteil pflanzenverwertbaren Wassers (in % g) ergibt sich keine Verschiedenheit. Eine Ursache hierfür liegt darin, daß die Proben unter dem *Seslerietum* unter den Stirnflächen und «Kanten» gestochen wurden, also an den Stellen, wo der Boden dem des *Nardetum* am ähnlichsten ist (vgl. Abb. 4). Auch können die Messungen aus methodischen Gründen ja nur an skelettfreien, also für das *Seslerietum* untypischen Bodenproben durchgeführt werden. Rechnet man die in Gewichtsprozenten ausgedrückten Werte mit Hilfe des Feinerdeanteils (< 4 mm) im Boden auf das Volumen um, so ergeben sich beim

Nardetum durchschnittlich 104 (63–145) mm pflanzenverwertbares Wasser (siehe S. 28) im Horizont 0–10 cm, beim *Seslerietum* 63 (42–84) mm. Diese Werte bedeuten, daß zwischen den beiden Pflanzengesellschaften Unterschiede in der Wasserversorgung bestehen. Berücksichtigt man auch die durchwurzelter Horizonte, die tiefer als 10 cm liegen, so werden diese Unterschiede noch deutlicher, denn beim *Seslerietum* enthalten diese Horizonte im allgemeinen doppelt so viel Skelett wie beim *Nardetum*, also maximal halb so viel pflanzenverwertbares Wasser.

Nach PISEK und CARTELLIERI (1941) ist der Wasserverbrauch von Pflanzengesellschaften, die den unseren ähnlich sind, relativ gering. Ein *Rhodoreto-Vaccinietum* und ein *Arctostaphylos-Calluna*-Gesträuch (beide in 1900 m), also Pflanzengesellschaften, die sicher mehr transpirieren als das *Nardetum*, verbrauchen nur 105 bzw. 189 mm Wasser pro Jahr; ein *Dryadeto-Firmetum* (in 2200 m) und eine offene Zwergstrauchheide (in 1900 m), beide auf Kalk, sogar nur 55 bzw. 90 mm. Der Wasserverbrauch an sommerlichen Standardtagen beträgt 1,6; 2,8; 1,1 bzw. 1,8 mm. Diese Werte, die Menge pflanzenverwertbaren Wassers, sowie die Tatsache, daß während der Hauptvegetationszeit durchschnittlich mehr als 100 mm Niederschlag pro Monat fallen (vgl. Abb. 2), besagen, daß die Wasserbilanz während dieser Zeit im allgemeinen ausgeglichen ist. Auf Karbonatboden müssen die Pflanzen aber mehr Energie aufwenden, um sich genügend mit Wasser zu versorgen, als auf Silikatboden. Besonders am Anfang und am Ende der Vegetationsperiode, bei geringer Schneebedeckung auch im Winter, können im Zusammenwirken mit Frosttrocknis sogar Schädigungen der Pflanzen infolge Wassermangels eintreten. Wie sich eine 22tägige niederschlagsfreie Periode auswirkt, die auf 34 Tage mit insgesamt nur 46 mm Niederschlag folgte, konnte am 23.10.1969 im Strelagebiet beobachtet werden. Auf Karbonatboden zeigten die folgenden Arten, trotz ihrer zum Teil tiefreichenden Wurzeln, deutliche Trockenheitsschäden: *Anthyllis alpestris*, *Bellidiastrum michelii*, *Draba aizoides*, *Androsace chamaejasme*, *Primula auricula*. Auf Silikatboden wurden schwache Schädigungen festgestellt bei *Trifolium alpinum*, *Primula integrifolia*, sehr wenig auch bei *Arnica montana*. Die Wassergehalte in 1–6 cm an jenem Datum sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Die oberste Bodenschicht auf Karbonatboden war so trocken, daß sie von Trockenrissen durchquert war und zum Teil vom Wind weggeblasen wurde.

Wenn die Wasserversorgung so schlecht sein kann, daß sogar adulte Pflanzen permanent welken, so ist dies bei Keimlingen und Jungpflanzen noch um so mehr der Fall. LÜDI (1936) beobachtete bei Saatversuchen auf der Schynigen Platte (in 2000 m), daß infolge sommerlicher Trockenheit im *Seslerio-Sempreviretum* ein sehr großer Anteil der Keimlinge, vor allem der Gräser, wieder einging. Nur Graskeimlinge, die zwischen Steinen oder im Schatten von Kräutern gekeimt waren, entwickelten sich. Bei den Saatversuchen im *Nardetum* berichtet LÜDI nichts über Absterben von Keimlingen infolge Trockenheit.

Auch wenn Trockenperioden nur alle paar Jahre eintreten, so wirken sie sich doch sehr entscheidend aus, denn wegen des langsamen Wachstums unter den

Tabelle 11 Wassergehalte von an \pm skelettfreien Stellen unter dem *Nardetum* bzw. unter dem *Seslerietum* gestochenen Bodenproben bei bestimmten Saugspannungen. Probeentnahme in 2–10 cm am 24./25.9.1969

Probestfläche	Bodenwassergehalte bei der Saugspannung												Pflanzenverwertbares Wasser $\frac{g}{dm^3}$	Feinerdeanteil ($< 4 \mu m$) $\frac{g}{dm^3}$	Pflanzenverwertbares $cm^3 \Delta$ Wasser pro 0-10 cm^3
	0,01 at		0,160 at		0,345 at		0,690 at		2 at		15 at				
	Feldkapazität										permanent Welkepunkt				
	% g	s %	% g	s %	% g	s %	% g	s %	% g	s %	% g	s %			
<i>Nardetum</i> Str. S1	91,1 \pm 1,5	4,0	56,7 \pm 0,8	3,5	55,3 \pm 1,1	5,0	53,7 \pm 1,6	7,3	36,5 \pm 1,1	8,1	29,8 \pm 1,0	8,8	25,5	570	145
Got. S1	79,8 \pm 4,8	14,6	54,4 \pm 3,5	15,7	52,9 \pm 3,8	17,6	53,2 \pm 3,8	17,7	53,8 \pm 2,7	12,4	44,4 \pm 1,3	10,4	8,5	740	63
<i>Seslerietum</i> Str. K1	106,3 \pm 10,5	24,1	69,6 \pm 6,9	24,3	52,0 \pm 5,7	26,6	47,4 \pm 5,2	26,7	45,7 \pm 3,9	18,9	37,5 \pm 3,6	21,6	14,5	290	42
Got. K1	106,2 \pm 11,5	24,2	63,6 \pm 7,3	25,9	62,1 \pm 7,4	26,6	63,1 \pm 7,6	27,1	60,8 \pm 3,2	12,8	42,6 \pm 2,9	16,4	19,5	430	84

* Unter der Annahme, daß die Desorptionskurve des Bodens in 0–2 cm ähnlich ist wie die in 2–10 cm

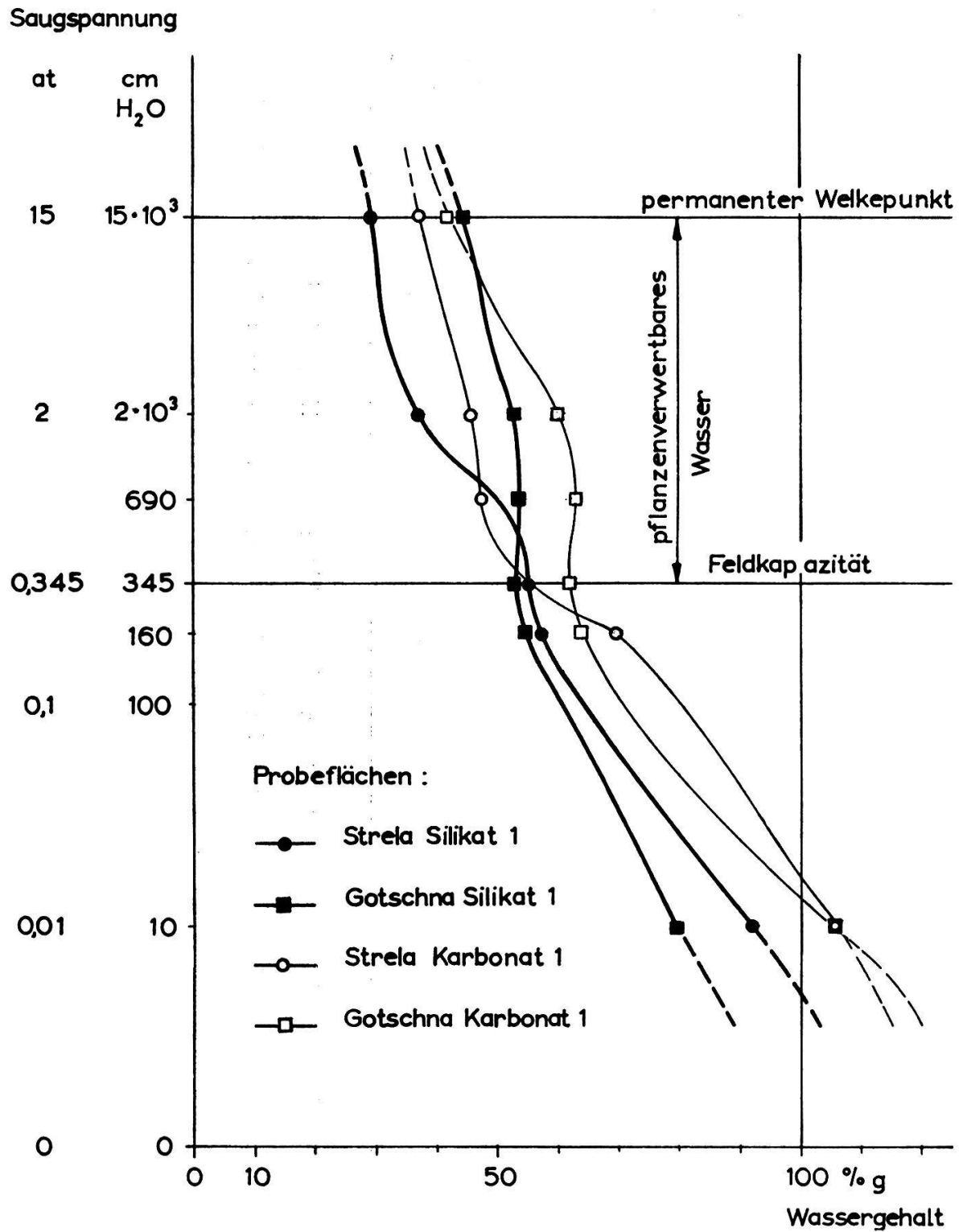


Abb. 7 Desorptionskurven von 2 Silikat- und 2 Karbonatböden, unter dem *Nardetum* bzw. unter dem *Seslerietum*. Probeentnahme in 2–10 cm am 24./25.9.1969

alpinen Bedingungen bleiben die Pflanzen lange im empfindlichen Jugendstadium. Ob zwischen den *Nardetum*-Arten und den *Seslerietum*-Arten bezüglich der Gefahr des Vertrocknens physiologische Unterschiede bestehen, müssen weitere Untersuchungen abklären. Jedenfalls kommen auf Karbonatboden mehr xeromorphe Arten vor als auf Silikatboden.

Im Wasserfaktor bestehen zwischen dem *Nardetum* und dem *Seslerietum* noch viele weitere Unterschiede. So zeigten die Messungen von LÜDI (1948, S. 101), daß die Wasserdurchlässigkeit (nach BURGER) des *Nardetum*-Bodens viel kleiner ist als die des *Seslerietum*-Bodens.

2. Scheinbare Dichte und Untersuchung der größten Kornfraktionen

Kurz soll noch auf die Mittelwerte und die Extremwerte der Bestimmung der scheinbaren Dichte und der Untersuchung der größten Kornfraktionen in den Probeflächen Strela S und K 1 bis 6 und Gotschna S und K 1 und 2 eingegangen werden. Die Proben wurden Anfang Juli 1970 mit 1-Liter-Burger-Zylindern in 2–12 cm unter Vegetation gestochen.

Boden	Scheinbare Dichte g/cm ³ \triangle kg/dm ³	> 4 mm* g/cm ³ \triangle kg/dm ³	> 2 mm* g/cm ³ \triangle kg/dm ³	< 2 mm g/cm ³ \triangle kg/dm ³	< 2 mm lufttrocken g/cm ³ \triangle kg/dm ³
S	0,79 (0,64–0,96)	0,19 (0,09–0,40)	0,31 (0,17–0,55)	0,48 (0,37–0,58)	0,53 (0,39–0,66)
K	0,87 (0,76–1,02)	0,36 (0,13–0,54)	0,47 (0,30–0,62)	0,41 (0,25–0,60)	0,42 (0,26–0,60)

* Der Anteil Wurzeln in diesen Fraktionen betrug beim Silikatboden durchschnittlich 0,011 g/cm³, beim Karbonatboden 0,014 g/cm³.

Beide Böden sind also als sehr locker zu bezeichnen; auch im Silikatboden sind die Wurzeln immer genügend mit Luftsauerstoff versorgt. Der Anteil Feinerde im Oberboden ist beim Silikat durchschnittlich 20% größer als beim Karbonat, in den tiefern Bodenschichten ist er dann sogar mehrere Male größer.

IV. Bodenchemismus

1. Allgemeines

Diese Analysen sind vor allem durchgeführt worden, um eine sichere Grundlage für spätere experimentelle Untersuchungen zu erhalten. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2 und 12a,b und in den Abbildungen 8 und 9 zusammengestellt. Mit diesen wird versucht, ein Bild davon zu geben, in welchen bodenchemischen

Eigenschaften sich einander entsprechende Silikat- und Karbonatstandorte unterscheiden, wie der betreffende Faktor innerhalb eines Bodentyps variiert und welche Mengenverhältnisse zwischen den verschiedenen Ionen bestehen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muß berücksichtigt werden, daß nur die obersten Bodenschichten untersucht wurden. Darunter folgen auf Silikat Bodenschichten, die der untersuchten recht ähnlich sind. Auf Karbonat hingegen folgt im allgemeinen ein sehr skelettreicher, nährstoffarmer A/C-Horizont (Bodenprofile vgl. Abb. 4). Die Proben wurden an nicht ausgesprochen skelettreichen und vegetationsarmen Stellen gestochen. Die Analysen können also kein genaues Bild von der auf das Volumen bzw. auf die Fläche bezogenen Nährstoffversorgung der Pflanzengesellschaften geben. Die durchschnittlichen Gehalte (\bar{x}) wurden auf das Volumen, also auf den Wurzelraum bezogen durch Multiplikation mit dem durchschnittlichen Feinerdeanteil der Volumeneinheit (aus E. III. 2).

Auf die physiologische und ökologische Bedeutung der Ergebnisse der chemischen Bodenanalysen soll, außer beim Stickstofffaktor, der auch experimentell näher untersucht wurde, nicht näher eingegangen werden. Ganz allgemein beeinflussen der Gehalt an Ionen und physiologische Vorgänge bei der Ionenaufnahme («Ionenkonkurrenz») das Wachstum der Pflanzen. Ob diese Beeinflussungen für das Vorkommen oder Fehlen einer bestimmten Art auf Silikat oder Karbonat wesentlich ist, hängt oft von den Konkurrenzbedingungen zwischen den höheren Pflanzen ab. Es ist also beides wesentlich, die rein physiologische Wirkung der Ionen und der Konkurrenzfaktor. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß, außer wenn Absterben, Sterilität oder sehr schlechtes Wachstum eintritt, Nährstoffexperimente keinen direkten Einblick in die ökologischen Verhältnisse vermitteln können. Dazu sind noch Konkurrenzexperimente nötig. Diese hingegen liefern auch schon für sich allein Einblicke in die Ökologie.

2. Karbonatgehalt

Nach dem Karbonatgehalt des Oberbodens wurden die beiden untersuchten Standorte benannt, und sie unterscheiden sich darin auch grundlegend (vgl. Tab. 2 und 12a, b). Die sogenannten Silikatböden enthalten bis in 15 cm Tiefe kein Karbonat, außer bei den Flächen Strela S5 und Gotschna S1, die jeweils 0,1 g Karbonat (als CaCO_3) pro 100 g Feinerde enthalten. Auch das Skelett der Silikatböden ist karbonatfrei, außer bei den genannten Flächen. Dies und auch die in einigen anderen Probeflächen vorhandenen Kalk- oder Dolomitsteine sind aber für die Artengarnitur unwesentlich. Die Karbonatböden enthalten in 1–6 cm in der Feinerde zwischen 2 und 70% Karbonat; in den tieferen Bodenhorizonten ist der Gehalt noch wesentlich höher. Das Skelett besteht je nach Fläche aus Kalk oder Dolomit.

Oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes spielt die Karbonatmenge für das Pflanzenwachstum anscheinend keine Rolle mehr. Dies geht daraus hervor, daß im Bereich 2–70% Karbonat (als CaCO_3 , in der Feinerde), also im Ver-

hältnis 1 : 35, kein wesentlicher Unterschied in der Artengarnitur eintritt. Die Tatsache, daß viele *Seslerietum*-Arten auch auf Böden mit pH ~ 5,5 vorkommen, wo aus chemischen Gründen praktisch kein Karbonat mehr vorhanden sein kann, spricht dafür, daß viele Arten durch das Karbonat überhaupt nicht direkt beeinflußt werden. Indirekt ist das Vorhandensein oder Fehlen von Karbonat für die untersuchten Standorte aber von entscheidender Bedeutung. Möglichkeiten des indirekten Einflusses des Karbonats im Boden auf die Pflanzen sind zum Beispiel von ELLENBERG (1958) eingehend beschrieben und diskutiert worden.

3. Bodenreaktion und austauschbare Wasserstoffionen

Die Bodenreaktion (pH-Wert) ist der am leichtesten zu messende chemische Unterschied zwischen Silikat- und Karbonatboden. Eine direkte Wirkung auf das Pflanzenwachstum hat die Wasserstoffionenkonzentration «innerhalb der Grenzen der in natürlichen Böden auftretenden pH-Werte» nach TRÉNEL (1946, zit. nach ELLENBERG 1958) jedoch nicht. Die Kenntnis des pH-Wertes des Bodens erlaubt es jedoch, sich ein Bild zu machen vom maximalen Gehalt des Bodens an verfügbaren Spurenelementen (HODGSON 1963), vom Maximalgehalt des Bodenwassers an freien Aluminiumionen (MAGISTAD 1925), von der Form, in der der Stickstoff voraussichtlich im Boden vorliegt, von der Aufnehmbarkeit verschiedener Ionen, von kolloidchemischen Bodeneigenschaften, von der Freisetzung von Nährstoffen durch Auflösung der Minerale usw. Unter sonst vergleichbaren Bedingungen und im mittleren Bereich (pH 4,5–7) darf man den pH-Wert direkt als «ein Symptom für den Fruchtbarkeitszustand natürlicher Böden ansehen» (ELLENBERG 1958, S. 688).

Zwischen Silikat- und Karbonatboden herrscht sowohl an der Oberfläche wie auch in tieferen Horizonten (bei Karbonatböden ist dort der pH-Wert meist noch höher als an der Oberfläche) ein sehr großer Unterschied im pH-Wert. Der pH-Wert aller untersuchten Böden unter Karbonatvegetation liegt oberhalb pH 6,85 (in H₂O-Brei aus frischem, 4-mm-gesiebttem Boden), derjenige der Silikatböden liegt zwischen 4,7 und 5,6. Einige der chemischen, physikalischen und biologischen Folgen dieses Unterschiedes, der letzten Endes natürlich im Muttergestein der beiden Böden begründet liegt, gehen aus Tabelle 12 hervor oder werden in den folgenden Kapiteln besprochen.

Der pH-Wert fast aller untersuchter *Nardetum*-Böden liegt oberhalb der von PEARSALL (1952) festgestellten Grenze bei pH 4,5–4,8, wo eine grundlegende Veränderung der Artengarnitur eintritt. In vielen, vor allem englischen Untersuchungen zur Kalkfrage werden gerade Standorte mit pH-Werten unterhalb dieser Grenze mit Karbonatstandorten verglichen. Deswegen führten viele jener Arbeiten zu anderen Ergebnissen als die vorliegende.

Einigermaßen parallel mit den Unterschieden zwischen Silikat und Karbonat im pH-Wert gehen auch die Unterschiede in der Menge austauschbarer Wasserstoffionen. Erstaunlich ist, daß auch in den Karbonatböden, also auch oberhalb pH 7, noch geringe Mengen austauschbarer Wasserstoffionen gemessen werden

Tabelle 12a Chemische Eigenschaften von Silikatböden in der alpinen Stufe bei Davos. Analysen lufttrockener 2-mm-gesiebter Mischproben aus 1–6 und aus 10–15 cm. Probeentnahme: 22./23.9.1969

Probefläche Analyse	Hori- zont cm	Strela						Gotschna		Durch- schnitte \pm Standard- abweichung $\bar{x} \pm s\bar{x}$	Streu- ung in % von \bar{x} $s\%$	Durch- schnittl. Gehalte pro dm ³ Boden
		S0	S1	S3	S4	S5	S6	S1	S2			
pH (H ₂ O-Brei) frisch ^Δ	1–6	4,9	4,7	5,15	4,75	5,6	4,75	5,6	5,2	5,08		
pH (H ₂ O-Brei) trocken	1–6	4,7	4,55	4,85	4,65	5,3	4,1	4,95	5,0	4,76		
pH (H ₂ O-Brei) trocken	10–15	4,8	4,7	5,0	4,9	5,4	4,6	4,9	5,0	4,91		
pH (0,1n KCl)	1–6	3,6	3,6	3,95	3,65	4,4	3,6	3,8	4,05	3,83		
pH (0,1n KCl)	10–15	3,85	3,8	3,85	3,85	4,1	3,8	3,65	3,75	3,83		
CO ₃ als CaCO ₃	1–6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0		
CO ₃ als CaCO ₃	10–15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0		
NH ₄ –N-Akkumulation mg/100 g ^Δ	1–6	1,2	2,0	0,1	0,4	0,9	1,0	0,2	1,0	0,9 \pm 0,2	73	5,4
NO ₃ –N-Akkumulation mg/100 g ^Δ	1–6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	–	0,0	0,2	0,04		0,24
PO ₄ –P (CO ₂ -Extrakt) mg/100 g	1–6	0,109	0,062	0,058	0,054	0,054	0,050	0,078	0,100	0,071 \pm 0,008	32	0,38
K (CO ₂ -Extrakt) mg/100 g	1–6	1,0	1,6	1,7	1,6	1,0	2,4	0,9	0,9	1,4 \pm 0,2	39	7,4
Al _a (KCl-Austausch) mval/100 g	1–6	10,3	10,8	6,3	10,4	1,7	9,2	6,1	4,0	7,4 \pm 1,2	47	39,2
H _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	1–6	29,3	32,2	31,0	27,1	21,4	29,3	31,5	26,4	28,5 \pm 3,9	12	151,1
Ca _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	1–6	0,7	0,4	2,1	1,2	3,1	0,0	2,9	1,9	1,5 \pm 0,4	75	7,9
Mg _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	1–6	1,2	0,8	1,7	0,9	2,4	0,7	3,0	1,5	1,5 \pm 0,3	54	7,9
K _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	1–6	0,16	0,12	0,20	0,18	0,15	0,19	0,21	0,11	0,16 \pm 0,04	23	0,85
Na _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	1–6	0,12	0,11	0,12	0,12	0,07	0,14	0,10	0,12	0,11 \pm 0,01	19	0,58
KUK (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	1–6	26,7	27,3	30,3	23,8	31,7	24,3	40,5	23,8	28,6 \pm 2,0	20	151,6
Basensättigungsgrad S%	1–6	8	5	14	10	18	4	2	15	9,5		
Humus/organische Substanz g/100 g	1–6	15,5	19,6	16,5	18,6	12,6	18,9	18,6	13,1	16,7 \pm 3,0	52	88,5

^Δ 4-mm-Feinerte

[▲] Nettoakkumulation in 6wöchiger Laborinkubation (20 °C, 95% r.F.) 4-mm-gesiebter Mischproben

Tabelle 12b Chemische Eigenschaften von Karbonatböden in der alpinen Stufe bei Davos. Analysen lufttrockener 2-mm-gesiebter Mischproben aus 1–6 cm Tiefe. Probeentnahme: 22./23.9.1969

Probefläche	Strela						Gotschna		Durchschnitt \pm Standardabweichung $\bar{x} \pm s\bar{x}$	Streuung in % von \bar{x} $s\%$	Wilcoxon-Test: Vergleich S mit K	Durchschnittl. Gehalte pro dm ³ Boden
	K0	K1	K3	K4	K5	K6	K1	K2				
Analyse												
pH (H ₂ O-Brei) frisch ^Δ	7,55	7,4	7,1	7,4	7,55	7,2	7,3	6,85	7,30		***	
pH (H ₂ O-Brei) trocken	7,6	7,5	7,45	7,7	7,6	7,45	7,6	6,85	7,47		***	
pH (0,1n KCl)	7,2	7,25	6,95	7,35	7,3	7,0	7,1	6,45	7,08		***	
CO ₃ als CaCO ₃ %g	45,8	52,0	3,1	67,2	52,4	20,9	49,8	2,0	36,7 ± 8,7	67	***	
NH ₄ —N-Akkumulation mg/100 g ^Δ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		***	0,0
NO ₃ —N-Akkumulation mg/100 g ^Δ	6,3	3,6	0,1	1,8	1,0	2,5	0,9	0,2	2,1 ± 0,7	102	***	10,7
PO ₄ —P (CO ₂ -Extrakt) mg/100 g	0,109	0,202	0,053	0,082	0,054	0,101	0,078	0,089	0,096 ± 0,015	49	n.s.	0,40
K (CO ₂ -Extrakt) mg/100 g	0,9	1,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	1,3	1,1 ± 0,4	93	n.s.	4,6
Al _a (KCl-Austausch) mval/100 g	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		***	0,0
H _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	7,9	4,4	7,5	8,6	5,5	9,7	6,7	13,7	8,0 ± 1,0	36	***	33,6
Ca _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	31,0	33,5	14,7	16,7	21,7	35,7	32,8	22,5	26,1 ± 2,9	31	***	109,6
Mg _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	14,8	16,2	7,9	7,8	10,3	17,8	16,1	11,9	12,9 ± 4,4	31	***	54,2
K _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	0,11	0,11	0,17	0,07	0,11	0,13	0,09	0,17	0,12 ± 0,04	30	*	0,50
Na _a (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	0,08	0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,09	0,08	0,08 ± 0,01	49	**	0,34
KUK (BaCl ₂ -Austausch) mval/100 g	59,9	63,8	31,6	23,7	38,1	68,6	59,4	48,6	49,2 ± 5,8	33	*	206,6
Basensättigungsgrad S%	77	78	72	100	84	78	82	71	80,3		***	
Humus/organische Substanz g/100 g	19,0	22,3	8,9	9,3	11,2	25,8	20,7	18,7	17,0 ± 2,4	38	n.s.	71,4

^Δ 4-mm-Feinerde

[▲] Nettoakkumulation in 6wöchiger Laborinkubation (20 °C, 95% r.F.) 4-mm-gesiebter Mischproben

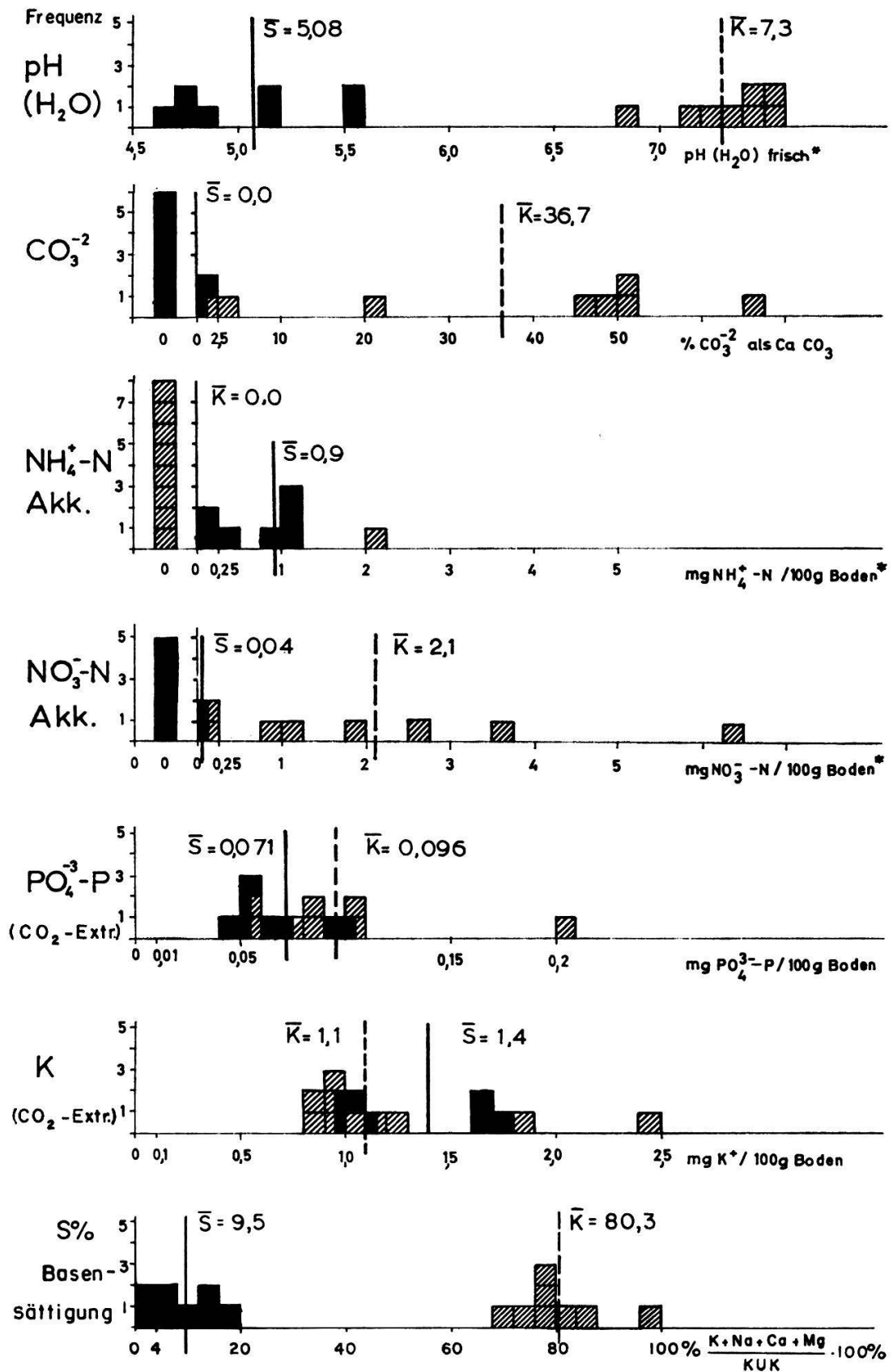


Abb. 8 Chemische Eigenschaften von 8 Silikat- und von 8 Karbonatböden in der alpinen Stufe bei Davos. Ergebnisse bezogen auf 100 g lufttrockene, 2-mm-gesiebte (* = 4-mm-gesiebte) Feinerde aus 1–6 cm Tiefe. Probeentnahme: 22./23.9.1969

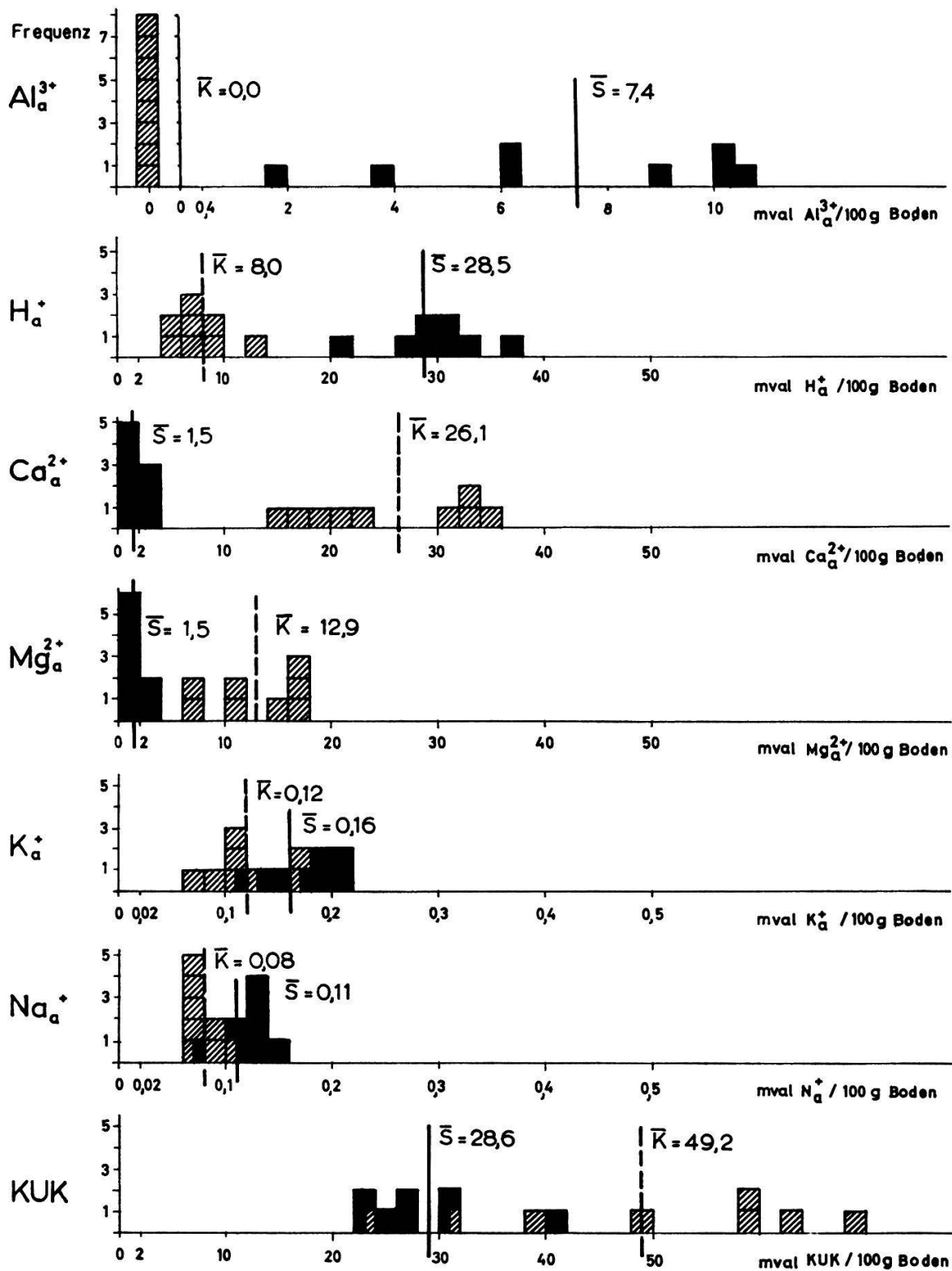


Abb. 9 Chemische Eigenschaften von 8 Silikat- und von 8 Karbonatböden in der alpinen Stufe bei Davos. Ergebnisse bezogen auf 100 g lufttrockene, 2-mm-gesiebte Feinerde aus 1–6 cm Tiefe. Probeentnahme: 22./23.9.1969

konnten. Dies liegt einerseits in der Methode begründet, andererseits hängt es aber auch mit dem relativ hohen Humusgehalt der Böden zusammen.

4. Stickstoffversorgung

In der Stickstoffernährung ergaben sich grundlegende Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Pflanzengesellschaften. Wie erwartet, wird in den sauren Mineralböden des *Nardetum* fast ausschließlich Ammonium angeliefert, in den neutralen bis alkalischen Böden des *Seslerietum* Nitrat (vgl. Tab. 4); denn die Ammonifikation findet bei allen in der Natur möglichen pH-Werten statt, die Nitrifikation hingegen besitzt ihr Optimum bei schwach saurer bis neutraler Reaktion (ELLENBERG 1958). Zum selben Ergebnis kam auch REHDER (1970) bei seiner Untersuchung subalpiner und alpiner Pflanzengesellschaften in den bayerischen Alpen. Da diese Arbeit die Stickstoffversorgung des *Nardetum* und des *Seslerietum* sehr ausführlich behandelt, wurden die Stickstoffverhältnisse im Untersuchungsgebiet nur an einigen Stichproben untersucht. Der Mineralisationstest im Labor zeigt ein Ergebnis, das mit REHDERs übereinstimmt: die Stickstoffakkumulation in der Feinerde (< 4 mm) des *Nardetum* war nur etwa halb so groß wie die des *Seslerietum*. Einzelne Messungen der Stickstoffakkumulation in den Probeflächen auf dem Strelaberg in den Sommern 1969 und 1970 erlauben eine grobe Schätzung des Mineralstickstoffangebotes aus dem Boden. Es ergaben sich Werte von rund 10 kg N/ha und Vegetationsperiode beim *Nardetum* und rund 20 kg beim *Seslerietum*. Wieder tritt der Unterschied zwischen den beiden Gesellschaften deutlich hervor. Die Werte liegen aber viel tiefer als die, die REHDER errechnet hat. Dies rührt davon her, daß seine Pflanzengemeinschaften zum Teil reich an Leguminosen sind und daß seine Probeflächen 400 m tiefer, also noch in der subalpinen Höhenstufe liegen, was eine viel größere biologische Aktivität bedeutet. Im übrigen sind die erhaltenen Ergebnisse gut mit den gemessenen Trockengewichten der oberirdischen, nicht verholzten Pflanzenmasse korreliert, beträgt diese doch 0,8 t/ha beim *Nardetum* und 1,9 beim *Seslerietum* (vgl. S. 47). REHDER bestimmte bei seinen Messungen, trotz des bedeutenden Unterschiedes in der Stickstoffversorgung, in beiden Pflanzengemeinschaften erstaunlicherweise dieselbe Produktivität, nämlich 3 t/ha.

5. Gehalt an pflanzenaufnehmbarem Phosphat und Kalium

Durch die milde Extraktion mit an Kohlendioxid gesättigtem Wasser werden nur das Phosphat und das Kalium extrahiert, die auf jeden Fall von den Pflanzen aufnehmbar sind.

Sowohl der Silikat- als auch der Karbonatboden sind als mit Phosphat schlecht bis mäßig versorgt zu bezeichnen. Der WILCOXON-Test ergab, daß sich die beiden Substrate in diesem Faktor nicht statistisch gesichert unterscheiden. Der etwa doppelt so hohe Durchschnittswert beim Karbonat ist einzig auf den hohen

Gehalt des Bodens Strela K1 zurückzuführen. Auch bei den nach der Laktamethode durchgeführten Analysen der Versuchsböden (Tab. 2) ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen Silikat und Karbonat.

Die Silikatböden sind mäßig bis genügend mit Kalium versorgt; beim Karbonat ist nur der Boden Strela K1 genügend mit Kalium versorgt, alle anderen sind es nur mäßig. Es bestehen in den Gehalten der Feinerde keine nach dem WILCOXON-Test gesicherten Unterschiede zwischen den beiden Substraten. Werden die Gehalte auf den Liter Boden bezogen, so zeigt sich, daß der Silikatboden durchschnittlich anderthalbmal mehr Kalium enthält als der Karbonatboden. Mit der Laktatextraktion, durch die auch die nicht unmittelbar aufnehmbaren, fester gebundenen Anteile des Kaliums im Boden erfaßt werden, zeigt sich bei den Versuchsböden (Tab. 2), daß der Silikatboden eine 2mal größere Kaliumreserve enthält als der Karbonatboden. Ob diese Unterschiede für die Substratspezifität gewisser Arten verantwortlich sind, kann erst durch weitere Untersuchungen abgeklärt werden.

6. Gehalt an austauschbarem Kalium, Natrium, Kalzium und Magnesium

Im Gehalt an austauschbarem Kalium und Natrium bestehen zwischen den beiden Böden geringe, aber nach dem WILCOXON-Test statistisch gesicherte Unterschiede. Natrium ist für die Substratspezifität gewisser Sippen jedoch sicher nicht verantwortlich, da es kein Pflanzennährstoff ist und auch nicht in so großer Konzentration vorliegt, daß es das Pflanzenwachstum beeinflussen könnte. Der Unterschied im Kaliumgehalt bestätigt das Ergebnis des vorhergehenden Kapitels.

Beim austauschbaren Kalzium und Magnesium ergaben sich sehr große Unterschiede zwischen Silikat- und Karbonatboden. Dies wurde natürlich erwartet, denn beim Karbonat handelt es sich ja um Kalzium- und Magnesiumkarbonat. Der Karbonatboden enthält in der 2-mm-Fraktion 10–20mal mehr Kalzium und 5–10mal mehr Magnesium als der Silikatboden. Trotz der geringen Gehalte der letzteren kann dieser noch als genügend mit Kalzium und Magnesium versorgt betrachtet werden. Ob diesem großen Unterschied eine direkte ökologische Bedeutung zukommt, ist unklar.

Das Verhältnis von Kalzium und Magnesium zu Kalium beträgt beim Silikatboden durchschnittlich 11:1, beim Karbonatboden 200:1. Inwieweit dies direkt oder indirekt das Vorkommen gewisser Sippen auf nur einem der Böden beeinflußt, ist nicht eindeutig geklärt. BRADSHAW (1961), der auch weitere Literatur zitiert, sieht in der sogenannten «Ionenkonkurrenz» zwischen Kalzium und Kalium eine der möglichen Ursachen für das schlechte Wachstum eines von saurem Boden stammenden Ökotypen von *Festuca ovina*. Nach ELLENBERG (1958) bleibt es aber fraglich, ob der verschiedenen Aufnehmbarkeit der Ionen in Abhängigkeit von den Mengenverhältnissen der Ionen (auch der Wasserstoffionen) im Boden überhaupt eine wesentliche Bedeutung für die Kalkfrage zukommt. Auch wenn die meisten Standortseigenschaften sich erst zusammen mit

der Konkurrenz entscheidend auswirken, so müssen sie doch, so scheint mir, auch schon für sich allein als wesentlich angesehen werden, denn sie prägen ja das Konkurrenzgeschehen mit (vgl. S. 16–24).

7. Kationenumtauschkapazität und Basensättigung

Beim Karbonatboden beträgt die Kationenumtauschkapazität durchschnittlich 50 mval/100 g lufttrockene Feinerde, die Basensättigung 80%, beim Silikatboden 29 mval bzw. 10%. Es sind also große (und gesicherte) Unterschiede vorhanden. Die Kationenumtauschkapazität des Silikatbodens ist im Vergleich zu der von Braunerden des Mittellandes (KÜNZLI 1967) relativ groß, die Basensättigung ist als ausgesprochen gering zu betrachten.

8. Gehalt an austauschbarem Aluminium

Die Toxizität des Aluminiumions ist einer der wenigen Faktoren, «denen mit Sicherheit eine Bedeutung für das verschiedene Verhalten der Arten und ihre ungleiche Verbreitung in der Natur zukommt» (ELLENBERG 1958). Aluminium ist bei tiefen pH-Werten als hydratisiertes Ion in Lösung, bei schwach saurer und neutraler Reaktion fällt es als Hydroxid aus, und in sehr basischem Milieu liegt es wieder gelöst als Aluminat vor. Die Werte der Tabellen 12a und b stimmen mit diesem Sachverhalt gut überein, indem die Silikatböden je nach Säuregrad mehr oder weniger, die Karbonatböden so gut wie kein austauschbares Aluminium enthalten.

Gemäß den Untersuchungen von MAGISTAD (1925) kann gesagt werden, daß die Silikatböden mit ihren pH-Werten (H_2O -Brei mit frischem, 4-mm-gesiebttem Boden) zwischen 4,7 und 5,6 gerade an der Grenze liegen, wo die Aluminiumkonzentration im Bodenwasser so groß wird, daß sie auf empfindliche Arten toxisch wirkt. Nach MAGISTAD bestehen nämlich zwischen pH 7,0 und 5,22 keine großen Unterschiede in der Löslichkeit des Aluminiums (0,2–0,8 ppm), also kann in diesem Bereich voraussichtlich kein Schwellenwert für die Toxizität dieses Ions liegen. Erst unterhalb pH 4,7 steigt die Löslichkeit rasch an: bei pH 4,66 etwa 1,2 ppm; bei pH 4,51 etwa 3,4 ppm; bei pH 4,27 schon 23 ppm. In diesem Bereich müssen also bei den verschiedenen Arten die Schwellenwerte für die Aluminiumtoxizität liegen. Dies zeigen zum Beispiel die Ergebnisse der Untersuchungen von RORISON (1960) an *Scabiosa columbaria*, die wohl auch für *S. lucida* und andere Arten zutreffen dürften.

9. Humusgehalt

Im durchschnittlichen Humusgehalt bestehen keine statistisch gesicherten Unterschiede zwischen Silikat- und Karbonatboden. Außer den Böden der Flächen «Strela K 3» und «K 4» sind alle humusreich. In der Verteilung des Humus im Boden unterscheiden sich die Böden. Beim Silikatboden ist der Humus im Boden der ganzen Probestfläche vorhanden, und der Gehalt nimmt im Profil von

oben nach unten rasch ab. Auf Karbonat hat es die schon auf Seite 52 beschriebenen, an der Oberfläche praktisch humusfreien und vegetationsarmen Tritflächen und die Stirnflächen der Stufen mit zum Teil sehr humusreichem Boden. Es kann angenommen werden, daß dieser Unterschied zwischen Silikat und Karbonat sich vor allem beim Aufkommen von Keimlingen entscheidend auswirkt.