

Mikroklimatische und standortkundliche
Untersuchungen in der alpinen Stufe des Schweizerischen
Nationalparks

Diplomarbeit

von

Markus FLURY
von Deitingen (SO)

Ausgeführt am
Geographischen Institut der Universität Zürich

Unter der Leitung von
PD Dr. M. GAMPER

Begutachtet von
Prof. Dr. G. FURRER und PD Dr. M. GAMPER

Zürich, Januar 1988

Mikroklimatische und standortkundliche
Untersuchungen in der alpinen Stufe des Schweizerischen
Nationalparks

Diplomarbeit

von

Markus FLURY
von Deitingen (SO)

Ausgeführt am
Geographischen Institut der Universität Zürich

Unter der Leitung von
PD Dr. M. GAMPER

Begutachtet von
Prof. Dr. G. FURRER und PD Dr. M. GAMPER

Zürich, Januar 1988

ABSTRACTS

At a central alpine slope site in the Swiss National Parc (Engadin, Graubünden) the micro- and mesoclimatical conditions were investigated. In order to investigate the influence of elevation on the micro- and mesoclimate, several stations were installed on a south-west slope (Munt Chavagl, 2175-2540 meters a.s.l.).

Plant sociological studies and soil analysis gave detailed knowledge of the environmental conditions of each location. The most revealing part of the climatical investigations were registrations of air and soil temperatures. Annual and daily variations of air and soil temperatures of each location were compared. Measurements of wind direction and solar radiation gave additional information about the climatical conditions of the experimental area.

Based on the results of the investigations, the stations can be grouped into different types of location complexes. In the following, the registrations of temperatures are compared with the ecological plant indicators.

As a synthesis, at the end of the report, an integrated interpretation of the results is presented.

VORWORT

Diese Arbeit entstand im Rahmen geomorphologischer und klimatischer Untersuchungen, die das Geographische Institut der Universität Zürich seit vielen Jahren im Schweizerischen Nationalpark und seinen Nachbargebieten durchführt.

Angeregt und geleitet wurde die Arbeit von PD Dr. Martin GAMPER. Seine eigenen mikro-klimatischen Untersuchungen am Munt Chavagl bildeten den Ausgangspunkt dieser Arbeit. Für seine vorbildliche wissenschaftliche und menschliche Betreuung, sowie die tatkräftige Mithilfe bei den Feldarbeiten sei ihm ganz herzlich gedankt. Freundlicherweise durfte ich seine mikro-klimatische Messstation am Munt Chavagl in meine Untersuchungen einbeziehen.

Für die Hilfe bei den Feldarbeiten danke ich auch seiner Frau, Barbara GAMPER-SCHOLLENBERGER und meinen Studienkollegen Felix KELLER und Regula GEHRIG.

Eine unentbehrliche Hilfe beim Umgang mit den Messgeräten war mir PD Dr. Peter FITZE. Seine ständige Hilfsbereitschaft ersparte mir viel Mühe und Zeit.

Herr Prof. Dr. E. LANDOLT hat freundlicherweise den botanischen Teil und die standortskundliche Interpretation durchgesehen.

Von Herrn Prof. Dr. G. FURRER erhielt ich die wohl einmalige Möglichkeit, schon vor Abschluss des Studiums als Assistent am Geographischen Institut arbeiten zu können. Für sein in mich gesetztes Vertrauen und sein ständiges Interesse an meiner Arbeit sei ihm ganz besonders gedankt.

Die Messgeräte wurden freundlicherweise vom Geographischen Institut der Universität Zürich zur Verfügung gestellt.

Schliesslich wurde die Arbeit im Nationalpark durch die wissenschaftliche Nationalparkkommission erst ermöglicht.

INHALTSVERZEICHNIS

abstracts	iii
Vorwort	iv
Kapitel 1: Einleitung	1
Kapitel 2: Zielsetzung und Problemstellung	2
Kapitel 3: Das Untersuchungsgebiet	5
Beschreibung des Gebietes	5
Lage und Beschreibung der einzelnen Messstandorte	9
Der Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum	12
Die Witterung in Buffalora und Bernina-Hospiz	12
Die Witterung bei der Erdstromstation	15
Vergleich der Stationen Buffalora und Bernina-Hospiz mit der Erdstromstation	16
Klimatische Untersuchungen im Nationalpark	16
Kapitel 4: Pflanzensoziologische Untersuchungen	19
Methoden	19
Ergebnisse	19
Vergleich der Vegetationsaufnahmen bei den Messstationen	19
Zur Bedeutung des Reliefs	21

Zur Aussagekraft der Zeigerwerte	23
Kapitel 5: Bodenkundliche Untersuchungen	25
Methoden	25
Ergebnisse	27
Der Waldstandort (2175 m.ü.M)	27
Der Waldgrenzstandort (2270 m.ü.M)	32
Der Erdstromstandort (2410 m.ü.M)	36
Der Gipfelstandort (2542 m.ü.M)	43
Diskussion	47
Kapitel 6: Mikroklimatische Untersuchungen	49
Fragestellung	49
Die Messinstrumente	50
Die klimatischen Verhältnisse im Hochgebirge	51
Die Vegetationsperiode	53
Die Lufttemperaturen	54
Der Jahresgang der Lufttemperaturen	54
Der Tagesgang der Lufttemperaturen	64
Die Bodentemperaturen	69
Der Jahresgang der Bodentemperaturen	69
Der Tagesgang der Bodentemperaturen	83
Zur Bedeutung der Vegetation	85
Die Frostwechselverhältnisse	87
Die Windverhältnisse am Munt Chavagl und auf der Fuorcla da la Fögliä	92
Zusammenhang Vegetation/Temperatur unter Berücksichtigung der ökolog. Zeigerwerte von E. Landolt	93
Diskussion	95
Kapitel 7: Standortkundliche Interpretation	97

23	Kapitel 8: Zusammenfassung	105
25	Anhang A: Vegetationstabelle	107
25		
27	Anhang B: Literaturverzeichnis	111
27		
32		
36		
43		
47		

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

49	1. Übersichtsdarstellung der Messanordnung	4
49		
50	2. Das Untersuchungsgebiet	6
51		
53	3. Klimadiagramm der Station Buffalora nach H. Walter.	7
54		
54	4. Duodezilstatistik der Niederschlagsverteilung in Buffalora	14
64		
69	5. Bodenprofil Waldstandort	28
69		
83	6. Bodenprofil Waldgrenzstandort	33
85		
87	7. Lage der Untersuchungsprofile	36
92		
93	8. Bodenprofil Erdstromstandort I	37
95		
95	9. Bodenprofil Erdstromstandort II	38
97	10. Bodenprofil Gipfelstandort	45
	11. Vereinfachtes Schema zur Wirkungskette der klimatischen Faktoren	52
	12. Jahresgang der täglichen Mittelwerte, Maxima und Minima der	

	Lufttemperatur an den verschiedenen Standorten (I).	55
13.	Jahresgang der täglichen Mittelwerte, Maxima und Minima der Lufttemperatur an den verschiedenen Standorten (II).	56
14.	Mittlere monatliche Tagesgänge der Lufttemperaturen (+150 cm) an den verschiedenen Standorten (I)	61
15.	Mittlere monatliche Tagesgänge der Lufttemperaturen (+150 cm) an den verschiedenen Standorten (II)	62
16.	Mittlere monatliche Tagesgänge der Lufttemperaturen (+150 cm) an den verschiedenen Standorten (III)	63
17.	Tagesgang der Globalstrahlung und der langwelligen Strahlungsbilanz am 23. und 24. September 1986.	64
18.	Tautochronendarstellungen der Temperaturen am 23. und 24. September 1986 (I).	67
19.	Tautochronendarstellungen der Temperaturen am 23. und 24. September 1986 (II).	68
20.	Häufigkeitsverteilung der Tagesmittelwerte der Bodentemperaturen	70
21.	Jahresgang der Luft- und Bodentemperaturen in 5 cm Höhe und 5 cm Tiefe (August 1986-Juli 1987)	70
22.	Monatsmittel der täglichen Maxima und Minima der Bodentemperatur an den verschiedenen Stationen.	71
23.	Isothermendarstellungen der 5-Tagesmittel der Bodentemperaturen.	74
24.	Isothermen der täglichen Maxima an den verschiedenen Standorten.	76
25.	Isothermen der täglichen Minima an den verschiedenen Standorten.	77
26.	Energieflüsse an der Bodenoberfläche.	79

. 55	27.	Klassifikation des Mikroklimas im Hochgebirge (aus TURNER 1980)	82
. 56	28.	Verteilung der Eis-, Frostwechseltage und Tage ohne Frost an den verschiedenen Standorten (Messniveau +150 cm).	89
. 61	29.	Verteilung der Eis-, Frostwechseltage und Tage ohne Frost an den verschiedenen Standorten (Messniveau +5 cm).	90
. 62	30.	Verteilung der Eis-, Frostwechseltage und Tage ohne Frost an den verschiedenen Standorten (Messniveau -5 cm).	91
. 63	31.	Regressionsanalyse zum Zusammenhang Temperatur und ökologischen Zeigerwerten.	94

TABELLENVERZEICHNIS

. 68	1.	Einteilung und Abgrenzung der Klimabegriffe nach YOSHINO 1961 (aus YOSHINO 1975).	3
. 70	2.	Hygrische Kontinentalitätswinkel	8
. 70	3.	Beschreibung der Messstationen	10
. 71	4.	Temperaturverhältnisse in Buffalora und Bernina-Hospiz im Vergleich zum langjährigen Mittel.	13
. 74	5.	Die Witterungsverhältnisse an der Erdstromstation	15
. 76	6.	Mittlere Zeigerwerte der verschiedenen Standorte	20
. 77	7.	Artenzahlen und Deckungsgrade (Gipfelstandort)	22
. 79	8.	Artenzahlen und Deckungsgrade (Erdstromstandort)	23

9.	Chemische Bodeneigenschaften (Waldstandort)	30
10.	Korngrößenverteilung (Waldstandort)	31
11.	Chemische Bodeneigenschaften (Waldgrenzstandort)	35
12.	Korngrößenverteilung (Waldgrenzstandort)	35
13.	Chemische Bodeneigenschaften (Erdstromstandort)	41
14.	Korngrößenverteilung (Erdstromstandort)	42
15.	Chemische Bodeneigenschaften (Gipfelstandort)	46
16.	Korngrößenverteilung (Gipfelstandort)	46
17.	Dauer der Vegetationsperiode	54
18.	Monatsmittel, Extrema und Amplituden der Lufttemperatur in 150 cm Höhe an den verschiedenen Stationen (August 1986-Juli 1987)	58
19.	Monatliche Gradienten der Lufttemperatur zwischen den Standorten (°C/100m)	60
20.	Temperaturleitfähigkeiten	85
21.	Mittelwerte, Extrema und Amplituden unter vegetationsbedecktem und -freiem Boden an der Waldgrenzstation in 5 cm Tiefe	86
22.	Übersicht der Standortseigenschaften der Lokalitäten	103

Kapitel 1

EINLEITUNG

Die klimatischen Bedingungen im Gebirge sind in mancherlei Beziehung extremer als im Flachland. Die Strahlung nimmt infolge der Abnahme der Trübungsfaktoren (Staub, Wasserdampf) in der Atmosphäre mit der Meereshöhe zu. Als Folge davon können im Gebirge mikroklimatische Verhältnisse auftreten, die sonst nur von Wüstengebieten her bekannt sind. TURNER (1958) registrierte auf einer Höhe von 2070 m.ü.M. eine Bodenoberflächentemperatur von 80° C. Dies bedeutet für die Pflanzen, die ja nicht wie Tiere in tiefere Bodenschichten ausweichen können, eine starke Temperaturbeanspruchung.

Da die meisten pflanzlichen und tierischen Lebensvorgänge temperaturabhängig sind, gehören die Temperaturverhältnisse mit zu den Faktoren, die das Vegetationsbild bestimmen. Bei standortkundlichen Untersuchungen im Gebirge wird daher dem Mikroklima eine grosse Bedeutung zugemessen. Aus dem Bereich der Waldgrenze liegen im Zusammenhang mit den Problemen der Hochlagenaufforstungen und Lawinenvorbeugung umfangreiche mikroklimatische Studien vor. Im speziellen erwähnt seien die Forschungsprojekte bei Poschach/ Obergurgl in Österreich (AULITZKY 1961, 1962, AULITZKY und TURNER 1982) und Stillberg bei Davos (TURNER 1966, SCHÖNENBERGER 1975).

Das Mikroklima wirkt natürlich nicht nur auf das biologische Leben, sondern auch auf die abiotische Umwelt. So wird die chemische und physikalische Verwitterung massgeblich von den Temperaturen beeinflusst. GAMPER (1981) konnte Zusammenhänge zwischen Solifluktion und Mikroklima feststellen. Dies ist insofern von Bedeutung, als damit solifluidale Erscheinungen und Prozesse besser klimageschichtlich interpretiert werden können.

Kapitel 2

ZIELSETZUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Angesichts der Bedeutung des Mikroklimas im Gebirge, versucht die vorliegende Arbeit einen Überblick über das Mikro- und Mesoklima der alpinen Stufe zu geben, mit besonderer Berücksichtigung des Klimafaktors Temperatur. Es soll versucht werden, den Einfluss der Höhenlage auf das Mikroklima zu erfassen. Dazu wurden entlang einem Höhenprofil verschiedene Messstationen eingerichtet (vgl. Abb. 1).

In einem ersten Schritt werden die Standortfaktoren Boden und Vegetation erfasst. Dann werden mit Hilfe von Temperaturmessungen die mikroklimatischen Verhältnisse untersucht. Die Synthese dieser Untersuchungen bildet eine standortkundliche Interpretation der gemachten Ergebnisse. In Abb. 1 ist die Versuchsanordnung dargestellt. Die Arbeit wird in die drei Blöcke Mikroklima, Vegetation und Boden gegliedert. Unter diesen Blöcken sind jeweils die verwendeten Methoden aufgeführt.

Die Ziele dieser Arbeit lassen sich wie folgt definieren:

- Erfassung der mesoklimatischen Verhältnisse am Südwest-Hang des Munt Chavagls, von der Waldgrenze an aufwärts
- Kenntniss der mikroklimatischen Unterschiede zwischen den am Hangprofil gewählten Untersuchungslokalitäten
- Erarbeitung der standortkundlichen Grundlagen der ausgewählten Lokalitäten
- näherungsweise Erfassung der Wechselwirkung von Mikroklima, Boden und Vegetation
- Erfassung des Einflusses der Höhenlage auf Mikroklima, Boden und Vegetation
- standortkundliche Gesamtbeurteilung der Untersuchungsstandorte

Bodentemperaturmessungen im Hochgebirge geben auch Hinweise zur Verbreitung von Permafrostvorkommen. Möglicherweise können die gewonnenen Daten dazu verwendet werden. Eine Untersuchung im Rahmen einer Diplomarbeit über die Permafrostverbreitung im schweizerischen Nationalpark von Felix KELLER ist momentan im Gange. Die Kartierung von Solifluktuationsformen und Schneebedeckung von Martine STEURI wird ebenfalls Hinweise auf die räumliche Variation des Mikroklimas im Nationalpark geben.

Definition Mikroklima

Unter dem Begriff Mikroklima versteht man ganz allgemein das "Klima der bodennahen Luftschicht". Über die genaue Abgrenzung des Mikroklimas von den Begriffen Lokal-, Meso- und Makroklima, gibt es unterschiedliche Auffassungen. YOSHINO hat folgende Einteilung vorgeschlagen (Tab. 1):

Tab. 1: Einteilung und Abgrenzung der Klimabegriffe nach YOSHINO 1961 (aus YOSHINO 1975).

Climate	Horizontal distribution	Vertical distribution	Example of climatic phenomena	Life time of corresponding meteorological phenomena
Microclimate	10^{-2} – 10^2 m	10^{-1} – 10^1 m	Climate of greenhouse	10^{-1} – 10^1 sec
Local climate	10^2 – 10^4 m	10^{-1} – 10^3 m	Thermal belt of slope	10^1 – 10^4 sec
Mesoclimate	10^3 – $2 \cdot 10^5$ m	10^0 – $6 \cdot 10^3$ m	Climate of basin	10^4 – 10^8 sec
Macroclimate	$2 \cdot 10^5$ – $5 \cdot 10^7$ m	10^0 – 10^5 m	Climatic zone, Monsoon region	10^5 – 10^8 sec

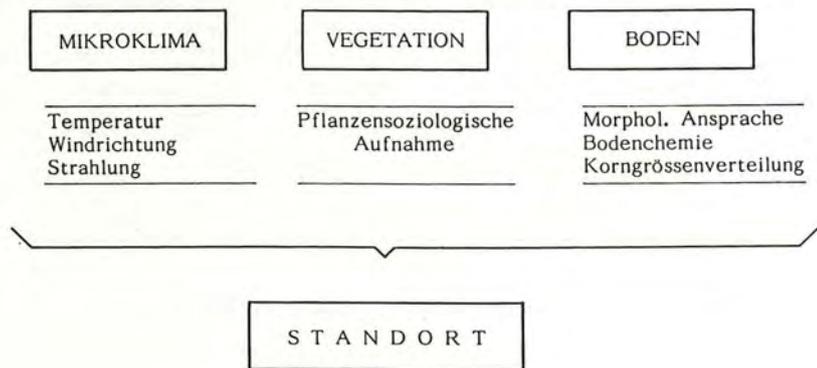
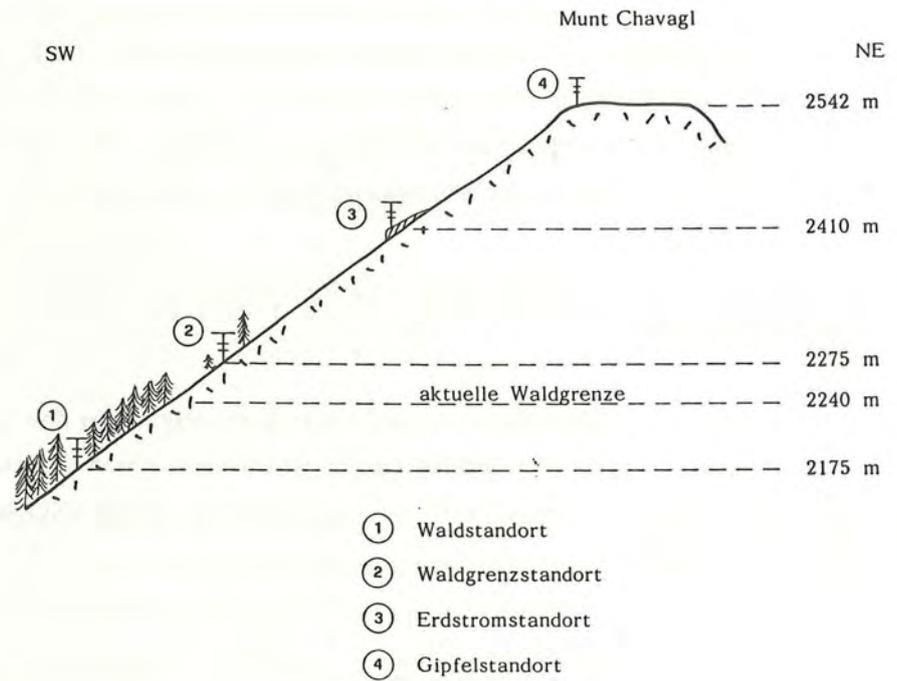


Abb. 1: Übersichtsdarstellung der Messanordnung. Im unteren Teil der Abbildung ist die Struktur der Arbeit dargestellt. Unter den jeweiligen Blöcken sind die verwendeten Methoden aufgeführt.

Kapitel 3

DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

3.1 Beschreibung des Gebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt in den Zentralalpen, am SW-Hang des Munt Chavagl im Schweizerischen Nationalpark, auf einer Höhe von 2175 m.ü.M bis 2542 m.ü.M. Die Abb. 2 zeigt die Lage des Untersuchungsgebietes.

GAMPER (1981) führte in diesem Gebiet mehrjährige mikroklimatische Messungen durch.

Die *geologischen Verhältnisse* im Nationalpark sind charakterisiert durch das Vorherrschen der ostalpinen Sedimente, vorwiegend aus Trias und Kreide. Der grösste Teil des Nationalparkes wird zu den Engadiner Dolomiten gezählt. Das Untersuchungsgebiet besteht hauptsächlich aus dem Vallatscha-Dolomit, auch Arlberg- oder Wettersteindolomit genannt, aus dem unteren Ladinien (Trias). Stellenweise ist das Gebiet mit Gehängeschutt und Moränen bedeckt.

Ab etwa 2300 m.ü.M. an hangaufwärts erscheinen am SW-Hang des Munt Chavagl Zellenkalke und Dolomite aus dem oberen Ladinien. Ab 2440 m.ü.M. treten die Raibler Rauhacken aus dem unteren Ladinien auf. Der Gipfel des Munt Chavagl schliesslich besteht wieder aus Vallatscha-Dolomit, der hier als Schuppe den oberladinischen Dolomiten und den Rauhacken aufgeschoben wurde (KARAGOUNIS 1962, S.433).

Grossklimatisch betrachtet liegt der Nationalpark inmitten der kontinentalen, inneralpinen Trockenzone. Die Luftmassen werden bei den Aussenketten der Alpen zum Aufsteigen gezwungen und verlieren dabei durch Kondensation und Niederschläge an Feuchtigkeit. Im Innern des Gebirges sind die Luftmassen schon bedeutend trockener. Man kann daher klar zwischen niederschlagsreichen Aussenketten (Luvseite) und niederschlagsärmeren Innenketten (Leeseite) unterscheiden (AULITZKY und TURNER, 1982).

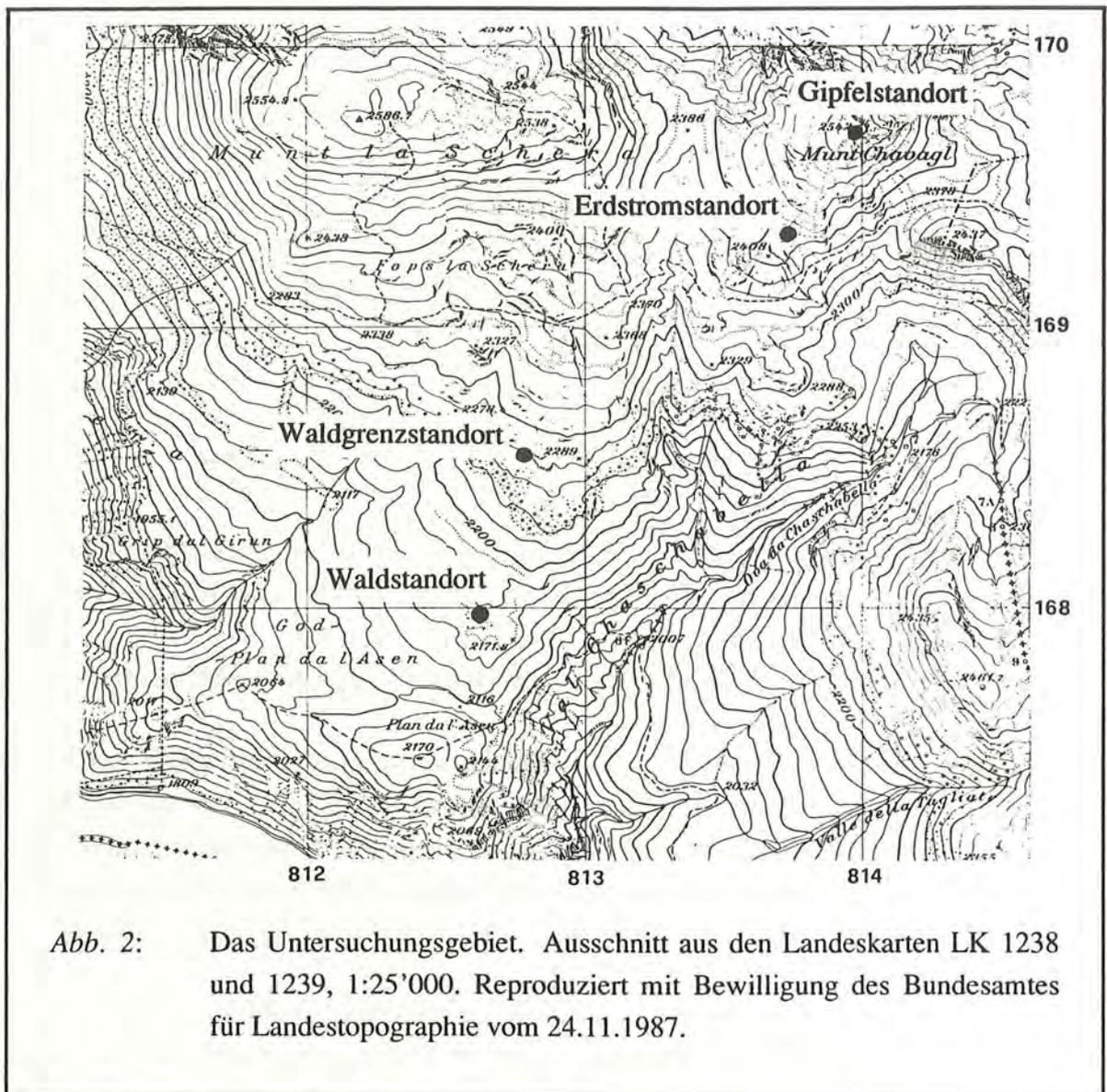


Abb. 2: Das Untersuchungsgebiet. Ausschnitt aus den Landeskarten LK 1238 und 1239, 1:25'000. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 24.11.1987.

Der jährliche Niederschlag im Parkgebiet wird von UTTINGER (1966) auf 1142 mm geschätzt. Es dürfte aber je nach Region mit beträchtlichen Abweichungen zu rechnen sein.

Die Temperatur und Niederschlagsverhältnisse der etwa 3 km nordöstlich des Untersuchungsgebietes gelegenen Station Buffalora sind im Klimadiagramm nach H. Walter (Abb. 3) dargestellt.

Der Jahresniederschlag beträgt 974 mm. Das Niederschlagsmaximum liegt im Juli/August, das Minimum im Januar/Februar. Die Station Bernina-Hospiz vertritt dagegen bereits eher

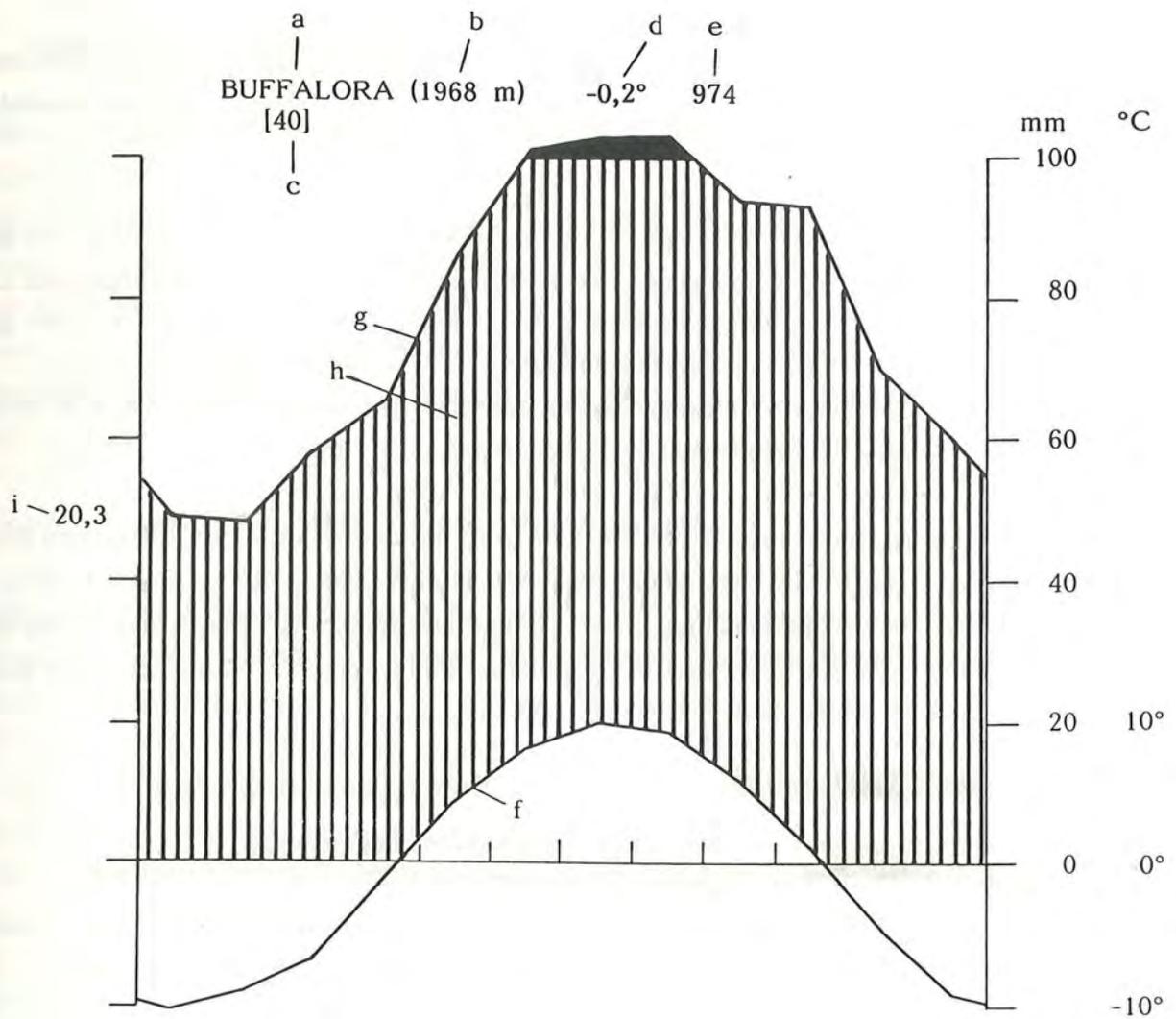


Abb. 3: Klimadiagramm der Station Buffalora nach H. Walter. Zusammengestellt nach Daten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt.

- a= Name der Station
- b= m.ü.M.
- c= Messzeitraum in Jahren
- d= mittlere Jahrestemperatur in °C
- e= mittlerer Jahresniederschlag in mm
- f= Monatsmittel der Lufttemperatur in °C
- g= Monatsmittel des Niederschlags in mm
- h= humider Zeitraum
- i= mittlere jährliche Lufttemperatur-Tagesschwankung in °C

den Verteilungstypus der Alpensüdseite: Maximum im Frühling und Herbst, Minimum im Januar. Das Jahresmittel der Tage mit einem Niederschlag > 0.3 mm beträgt in Buffalora 128 Tage.

Die Bewölkung des Gebietes ist mit 60% (Station Buffalora) sehr gering, und aufgrund der Höhenlage resultiert daraus eine starke Insolation und starke Schwankungen der Lufttemperatur. Die mittlere Jahresschwankung der Lufttemperatur beträgt 20.3° C. Der jährliche Gang der Temperatur in 2m Höhe ist aus dem Klimadiagramm ersichtlich.

Die Windverhältnisse in Buffalora sind im Sommer hauptsächlich durch SW-NW-Winde und im Herbst durch N-E-Winde gekennzeichnet (nach UTTINGER 1966).

Die starke Kontinentalität des Gebietes wird mit dem Begriff der "hygrischen Kontinentalität" nach H. GAMS verdeutlicht (vgl. AULITZKY und TURNER 1982, S. 397). Unter der "Hygrischen Kontinentalität" versteht man den Winkel $\text{tg } H/N$, wobei H die Höhe in m.ü.M. und N die jährliche Niederschlagsmenge in mm bedeutet. Tab. 2 zeigt den Kontinentalitätswinkel für verschiedene Stationen und Versuchsfelder.

Tab. 2: Hygrische Kontinentalitätswinkel

	Höhe ü. Meer	Jahresniederschlag in mm	Hygrische Kontinentalität
Obergurgl-Waldgrenze	2072	944	65.5
Buffalora	1968	974	63.7
Sta. Maria	1411	770	61.4
Scuol/Schuls	1253	707	60.6
Davos (Dischma)	1561	1003	57
Zürich	493	1149	23.2

3.2 Lage und Beschreibung der einzelnen Messstandorte

Die mikroklimatischen Verhältnisse können auf kleinstem Raum stark schwanken. Dies gilt nicht nur im Hochgebirge, sondern ganz allgemein. Doch sind mikroklimatische Unterschiede in grossen Höhenlagen ausgeprägter als im Tiefland. Daher ist der Wahl der Messstandorte grösste Beachtung zu schenken.

Um zu repräsentativen Aussagen über den Einfluss der Höhenlage auf das Mikroklima zu kommen, mussten störende Einflüsse wenn möglich ausgeschaltet werden. Solche Einflüsse ergeben sich unter anderem durch die Exposition, das Relief, die Hangneigung und die geologische Unterlage.

Die Untersuchungstationen wurden daher wie folgt ausgewählt:

Alle Stationen sind SW-exponiert und haben in etwa die gleiche Neigung, mit Ausnahme der Gipfelstation. Die geologischen Unterlage besteht überall aus triadischem Dolomit, hauptsächlich Vallatscha-Dolomit. Um die grossen reliefbedingten Einflüsse zu vermindern (AULITZKY spricht von der Primärwirkung des Reliefs, AULITZKY 1961b, S. 445), hat jede Station ein ähnliches Mikrorelief (konvexe Geländeform). Eine völlige Übereinstimmung all dieser Faktoren ist aber in der Natur nur selten gegeben.

Die Messstellen erstrecken sich von einem Waldstandort in 2175 m.ü.M., einen Waldgrenzstandort in 2275 m.ü.M., einen Standort in 2410 m.ü.M., bis zum Gipfelstandort auf dem Munt Chavagl mit 2542 m.ü.M. Eine weitere Station befindet sich auf der Sattelage Fuorcla da la Fögliä (2678 m.ü.M.), 6 km westlich des Untersuchungsgebietes.

An all diesen Stationen wurden während eines Jahres Luft- und Bodentemperaturmessungen durchgeführt. Zusätzlich wurde beim Standort in 2410 m.ü.M., beim Gipfelstandort und auf der Fuorcla da la Fögliä die Windrichtung registriert. Strahlungsmessungen wurden nur am Gipfelstandort durchgeführt (vgl. Abb. 1 auf Seite 4). In Tab. 3 sind die Stationen kurz beschrieben. Die Daten der Station bei den Erdströmen, Bestandteil eines seit 1978 laufenden Projektes zur Erfassung des Zusammenhangs Mikroklima und Solifluktion, wurde von Dr. Martin GAMPER in verdankenswerter Weise zur Verfügung gestellt.

Messstation	Höhe über Meer	Koordinaten	Hangneigung	Lage im Gelände	Vegetation	Boden	Messvorrichtung
Waldstandort 1	2175	812 650/167 975	14	Innerhalb des lichten Waldes, leichte Kuppenlage. Exposition: SW	Schneeheide-Bergföhrenwald Kronenschluss 40% Deckungsgrad der Krautschicht 77%	basenreiche Braunerde	Luft- u. Bodentemp. in: +150 cm +60 cm +5 cm -5 cm -30 cm -60 cm
Waldgrenzstandort 2	2275	812 150/168 530	17	im Bereich der Kampfzone oberhalb der Waldgrenze. Wenige Bäume umgeben die Messstelle. Ebene Hanglage Exposition: SW	Unterwuchs wie beim Waldstandort stark aufgelöster Schneeheide-Bergföhrenbestand Deckungsgrad der Krautschicht 60%	leicht verbraunter Pseudogley	Luft- u. Bodentemp. in: +150 cm +60 cm +5 cm -5 cm -30 cm
Erdstromstandort 3	2410	813 700/169 375	10	freie Lage auf Erdstrom Kuppenlage Exposition: SW	typischer Polsterseggenrasen Deckungsgrad 10%	Gesteinsrohboden	Luft- u. Bodentemp. in: +150 cm +60 cm +5 cm -5 cm -10 cm -20 cm -40 cm -60 cm -100 cm Windrichtung +200 cm

Tab. 3: Beschreibung der Messstationen

Gipfelstandort 4	2542	813 975/169 725	0	freie Lage auf ebenem Gipfelplateau	typischer Polsterseggenrasen	Gesteinsrohboden	Luft- u. Bodentemp. in:
---------------------	------	-----------------	---	-------------------------------------	------------------------------	------------------	----------------------------

Tab. 3: Beschreibung der Messstationen

Gipfelstandort 4	2542	813 975/169 725	0	freie Lage auf ebenem Gipfelplateau stark windexponiert Exposition: -	typischer Polster- seggenrasen hauptsächlich mit Carex firma-Polstern Deckungsgrad 2%	Gesteinsrohboden	Luft- u. Bodentemp. in: +150 cm +60 cm +5 cm -5 cm -30 cm Windrichtung und Strahlung in: +200 cm
Fuorcla da la Fögli 5	2678	807 050/168 725	8	Sattelage zwischen Piz Murter und Piz Diavel Exposition: W	Blaukressen- Schneeboden Deckungsgrad 5% Sehr schöne Stein- streifen	Gesteinsrohboden, dunkel gefärbt	Boden- u. Lufttemp. in: +150 cm +5 cm -5 cm -50 cm Windrichtung in: +200 cm

Beschreibung der Messstationen

3.3 Der Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum

3.3.1 Die Witterung in Buffalora und Bernina-Hospiz

Alle mikroklimatischen Messungen wurden während der Periode August 1986 bis Juli 1987 durchgeführt. Zur Charakterisierung dieser Messperiode standen die Daten der Stationen Buffalora und Bernina-Hospiz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt zur Verfügung.

Hinsichtlich der Temperaturverhältnisse zeigen diese beide Stationen den gleichen Witterungsverlauf (Tab. 4). Von August bis September 1986 war es ständig etwas zu warm. Die Monatsmitteltemperaturen liegen zum Teil deutlich über den langjährigen Mittelwerten. Januar und April können als normal bezeichnet werden, März und Mai 1987 hingegen waren ausgesprochen kalt. Auch der Juni war noch deutlich kälter als im langjährigen Mittel, der Juli allerdings wieder leicht wärmer. Im Jahresmittel kann die Messperiode als normal bezeichnet werden. In Buffalora war es um 0.3°C wärmer als in der 40-jährigen Messperiode, Bernina-Hospiz sogar genau gleich warm.

Die Niederschlagsverteilung von Buffalora ist aus der Duodezilstatistik (Abb. 4) ersichtlich. Diese Graphik wurde konstruiert aus den monatlichen Niederschlagssummen der Jahre 1917-1976. Die Niederschläge zeigen recht grosse Abweichungen zu den langjährigen Werten. Auf einen nassen August 1986 folgte eine trockene Phase, deren Höhepunkt im November erreicht wurde. Dieser Monat kann beinahe als sehr trocken bezeichnet werden. Dezember und Februar brachten wieder mehr Niederschläge und sind als nass einzustufen. Januar und März hatten normal viele Niederschläge. April und Mai sind als etwas zu nass zu bezeichnen. Im Juni und Juli 1987 gab es wieder zuviel Niederschlag, Juni kann gar als sehr nass, Juli als nass bezeichnet werden.

Tab. 4: Temperaturverhältnisse in Buffalora und Bernina-Hospiz im Vergleich zum langjährigen Mittel.

Station	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	JAHR
BUFFALORA (1968 m)													
a.) 1901-1940	9.2	5.9	1.0	-4.9	-9.3	-10.5	-9.4	-5.7	-1.1	4.4	8.0	9.8	-0.2
b.) 1986/1987	9.8	7.6	2.6	-3.4	-8.1	-10.4	-6.5	-8.9	-0.9	1.7	6.5	10.6	0.1
Abweichung (b-a)	0.6	1.7	1.6	1.5	1.2	0.1	2.9	-3.2	0.2	-2.7	-1.5	0.8	0.3
BERNINA-HOSPIZ (2258 m)													
a.) 1901-1940	9.0	6.1	1.7	-3.5	-7.0	-7.9	-7.6	-4.9	-1.6	2.9	6.6	9.2	0.2
b.) 1986/1987	9.6	7.6	4.1	-2.2	-6.9	-8.9	-6.3	-8.9	-1.3	0.6	5.4	10.1	0.2
Abweichung (b-a)	0.6	1.5	2.4	1.3	0.1	-1.0	1.3	-4.0	0.3	-2.3	-1.2	0.9	0.0

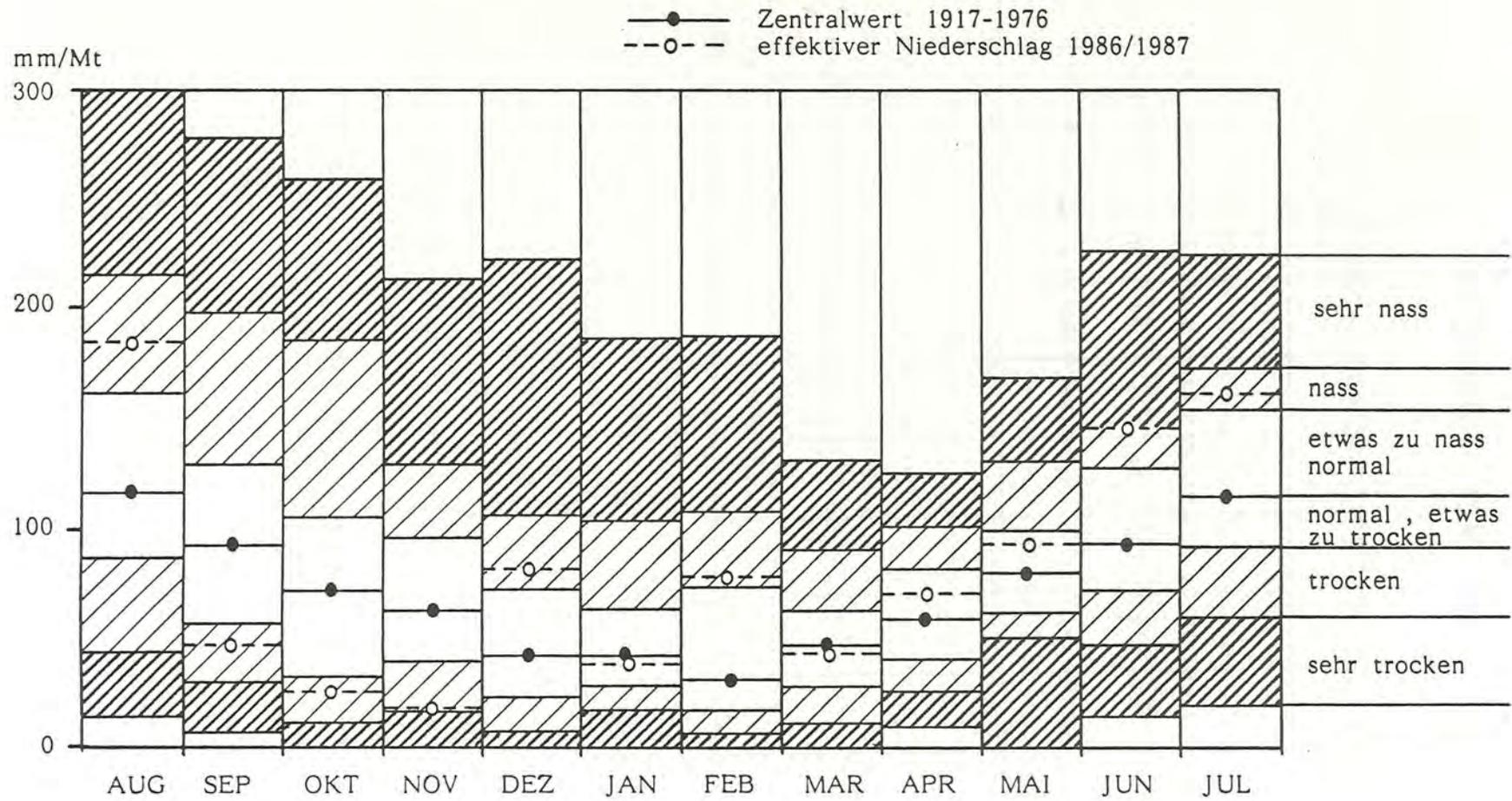


Abb. 4: Duodezilstatistik der Niederschlagsverteilung in Buffalora

3.3.2 Die Witterung bei der Erdstromstation

Da die Station bei den Erdströmen schon seit 1978 von Martin GAMPER betrieben wird, können hier direkt die Temperaturverhältnisse des Untersuchungszeitraumes anhand einer 6-jährigen Messperiode charakterisiert werden (Tab. 5).

Erwartungsgemäss verläuft die Witterung an der Erdstromstation gleich wie bei den Vergleichsstationen Buffalora und Bernina-Hospiz. Deutlich erkennt man die gegenüber dem sechsjährigen Mittel zu warmen Monate Februar und April und den ausgesprochen kalten März. Insgesamt war das Versuchsjahr (August 1986 - Juli 1987) im Jahresmittel 0.3° C wärmer als die Periode 1978-1984.

Bezüglich der Frostwechselaktivität lag das Versuchsjahr deutlich über dem Durchschnitt. Vor allem im November und Juni wurden überdurchschnittlich viele Frostwechsel registriert. Die vorherrschende Windrichtung war Nordwest-Nord und Südost-Süd. Die Winde wehen dabei tage- und manchmal sogar wochenlang aus dem selben Sektor (vgl. Kapitel Wind).

Tab. 5: Die Witterungsverhältnisse an der Erdstromstation

	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	JAHR
Lufttemperatur													
a (August 1978- Juli 1984)	7.7	5.6	1.0	-3.0	-7.0	-8.4	-8.4	-6.0	-4.0	0.4	5.1	8.2	-0.7
b (August 1986- Juli 1987)	8.0	6.4	3.4	-1.8	-6.4	-8.9	-6.1	-9.6	-1.5	-0.6	3.9	8.5	-0.4
Abweichung (b-a)	0.3	0.8	2.4	1.2	0.6	-0.4	2.3	-3.6	2.5	-1.0	-1.2	0.3	0.3
Frostwechsel													
a (August 1978- Juli 1984)	4	11	28	23	12	12	5	18	27	42	12	7	201
b (August 1986- Juli 1987)	10	7	22	36	20	10	13	10	36	41	26	2	233
Abweichung (b-a)	6	-4	-6	13	8	-2	8	-8	9	-1	14	-5	32

3.3.3 Vergleich der Stationen Buffalora und Bernina-Hospiz mit der Erdstromstation

Legt man einen mittleren Temperaturgradienten von 0.6°C pro 100 m Höhenunterschied zu Grunde, so müsste Buffalora verglichen mit der Erdstromstation eine um 2.7°C wärmere Jahresmitteltemperatur aufweisen. Die Differenz beträgt aber nur 0.5°C , Buffalora ist also zu kalt. Dies erklärt sich aus der Muldenlage von Buffalora, wo des öftern nächtliche Kaltluftansammlungen zu erwarten sind, und die mögliche Sonnenscheindauer durch den überhöhten Horizont stark eingeschränkt wird. Zudem hat der Jahrgang der Temperatur eine stärkere kontinentale Prägung als bei der Erdstromstation.

Bernina-Hospiz weist die wärmere Jahresmitteltemperatur auf als Buffalora, obwohl erstere Station 300 m höher liegt! Im Vergleich zur Erdstromstation ist Bernina-Hospiz etwa gleich warm. Auch der Jahrgang der Temperatur entspricht eher den Verhältnissen bei den Erdströmen.

Es zeigt sich also, dass zur Charakterisierung der Temperaturverhältnisse im Nationalpark die Station Buffalora nicht unbedingt als geeignet betrachtet werden darf. Dies gilt insbesondere für Hang- und Gipfellagen, während Muldenlagen eher wieder mit Buffalora vergleichbar sein dürften.

3.4 Klimatische Untersuchungen im Nationalpark

Im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks befindet sich keine klimatische Dauer-messstation. Die Station Buffalora befindet sich knapp an der Parkgrenze, liegt aber in einer Muldenlage und ist daher, wie bereits erwähnt, zur Charakterisierung des Klimas im Park nur bedingt geeignet.

Untersuchungen, die sich mit den klimatischen Verhältnissen im Nationalpark befassen, wurden zahlreich durchgeführt, allerdings fanden Messungen immer nur über eine kurze Messperiode hinweg statt. Zu erwähnen sind dabei die Arbeiten von PALLMANN und FREI (1943), Braun-Blanquet (1954), FURRER (1954), ZUBER (1968), GALLAND (1979), und FRIES (1985). Erstmals führte LÜDI (1966) eingehendere lokalklimatische Untersuchungen durch. Seit 1978 besteht nun am Munt Chavagl eine mikroklimatische Messstation. Bisherige Resultate sind publiziert in GAMPER (1981 und 1983). Dies ist die bisher längste Messperiode im Nationalpark und daher für die wissenschaftliche Erforschung des Nationalparks von grosser Bedeutung.

Ausserhalb des Parkes existieren im Alpenraum zwei eingangs schon erwähnte Grossprojekte im Bereich der alpinen Waldgrenze: In Österreich bei Poschach (Obergurgl/Gurgltal) und in der Schweiz im Dischmatal (Davos) (AULITZKY 1961, 1962a, 1962b, AULITZKY und TURNER 1982, TURNER 1975). Beim geologischen Untergrund handelt es sich bei diesen Untersuchungen aber um Silikatgestein.

Temperaturmessungen oberhalb der Waldgrenze führten im benachbarten Silvretta-Gebiet E. VORNDRAN (1969) und G. VORNDRAN (1972) durch.

Im Rahmen des österreichischen MaB-Hochgebirgsprogrammes wurden an verschiedenen Stellen in den Ostalpen umfangreiche Studien über naturnahe und anthropogen veränderte Ökosysteme durchgeführt (im Bereich der mittleren Hohen Tauern, im Raume Badgastein, in Obergurgl und auf dem Patscherkofel bei Innsbruck). In diesem Zusammenhang wurden eingehende standortkundliche, insbesondere auch makro-, meso- und mikroklimatische Untersuchungen durchgeführt (CERNUSCA 1977).

Kapitel 4

PFLANZENSOZIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Methoden

An allen Standorten wurden pflanzensoziologische Aufnahmen nach der Methode von BRAUN-BLANQUET durchgeführt. Beim Erdstrom- und beim Gipfelstandort wurden mehrere Aufnahmen gemacht. Diese zusätzlichen Aufnahmen werden im folgenden mit einem Index gekennzeichnet (vgl. Kap. 4.2.2). Die einzelnen Aufnahmen sind in einer Arten- und Gruppentabelle zusammengefasst (Anhang A).

An jedem Standort wurden die mittleren ökologischen Zeigerwerte bestimmt. Diese ergeben sich durch Mittelwertbildung der Zeigerwerte der einzelnen Pflanzen. Die Häufigkeiten der Pflanzen ist dabei berücksichtigt worden. Diese Methode ist im einzelnen beschrieben bei LANDOLT (1977). Die Zahlen charakterisieren nur den unmittelbaren Lebensraum der Pflanzen, im Falle der alpinen Rasen eine Luftschicht bis zu ca. 20 cm und eine Bodentiefe bis ca. 25 cm.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Vergleich der Vegetationsaufnahmen bei den Messstationen

In diesem Abschnitt werden die Standorte bei den Messstationen (Aufnahmenummern 1,2,3,4) miteinander verglichen. Alle diese Standorte sind Kuppenlagen.

Nr. 1: *Erico-Mugetum caricetosum humilis* (ELLENBERG und KLÖTZLI 1972, Nr.67).

Deckung : Baumschicht 40%, Krautschicht 75%, Moosschicht 2%.

Nr. 2: *Erico-Mugetum caricetosum humilis* (aufgelöster Bestand in der Kampfzone).

Deckung : Baumschicht 4%, Krautschicht 55%.

Nr. 3: *Caricetum firmae typicum*. Deckung : Krautschicht 10%. Auf aktivem Erdstrom.

Nr. 4: *Caricetum firmae typicum*. Deckung : Krautschicht 3%.

Tab. 6: Mittlere Zeigerwerte der verschiedenen Standorte

AUFNAHME	F	R	N	H	D	L	T	K
1 Waldstandort	2.1	3.7	2.1	3.2	3.0	3.7	2.3	3.5
2 Waldgrenzstandort	2.1	3.9	1.9	2.9	2.7	3.7	1.9	3.3
3 Erdstromstandort (aktiver Erdstrom)	2.2	4.3	1.8	3.1	2.8	4.3	1.9	3.5
3 a Erdstromstandort (inaktiver Erdstrom)	2.2	4.2	1.9	3.1	2.8	4.2	1.8	3.4
3b Erdstromstandort (vor den Erdströmen)	2.8	3.8	2.0	3.1	3.2	4.3	1.6	3.1
4 Gipfelstandort	2.1	4.2	1.4	3.1	2.5	4.9	1.7	3.7
4 a Gipfelstandort (Mulde)	2.5	3.9	2.0	3.0	3.0	4.4	1.7	3.4

Interpretation der Zeigerwertanalyse (Tab. 6)

Bezüglich der Feuchtigkeitsverhältnisse im Oberboden sind alle Standorte gleich trocken (F 2,1-2,2). Der Waldgrenzstandort zeigt eine leichte Wechselfeuchtigkeit an (5 Wechselfeuchtezeiger), die auch aus den bodenkundlichen Untersuchungen ersichtlich ist. Alle Standorte sind kalkreich (R 3,7-4,3), im Bereich des Waldes ist eine Tendenz zu einer Abnahme

lr.67).
zone).

des Kalkgehaltes festzustellen. Beim Waldstandort bewirkt die schlecht abbaubare Nadelstreu eine Versauerung. Es treten daher auch säurezeigende Arten (7 Säurezeiger) auf (vgl. Arten- und Gruppentabelle). Die Nährstoffverhältnisse werden mit Zunahme der Höhe schlechter (von N 2,1 zu 1,4). Erwartungsgemäss hat der Wald die relativ beste Nährstoffversorgung, während der Gipfelstandort die geringste aufweist (nur eine geringe Vegetationsbedeckung). Alle Böden haben einen mittleren Humusgehalt (um H 3). Dieser Wert erklärt sich daraus, dass aufgrund der kurzen Vegetationszeit, den kühlen Temperaturen und der grossen Trockenheit die anfallende Streu nur langsam abgebaut werden kann. Der Waldstandort hat im Wurzelraum einen gut durchlässigen, sandigen Boden (D 3), wie auch die Korngrössenverteilung bestätigt. Der Waldgrenz- und der Erdstromstandort haben schon einen höheren Skelettgehalt (D 2,7-2,8) und der Gipfel ist bezüglich der Dispersitätszahl am ungünstigsten (D 2,5).

Grosse Unterschiede ergeben sich erwartungsgemäss bei der Lichtzahl. Im Waldbereich gibt es Beschattung (L 3,7), über der Waldgrenze steigen die Werte auf L 4,3 bzw. L 4,9. Die Temperaturzahl nimmt mit der Höhe ab (von T 2,3 bis 1,7). Bemerkenswert ist, dass sich Waldgrenz- und Erdstromstandort nicht unterscheiden (T 1,9).

Der Gipfelstandort hat ein relativ kontinentales Klima mit grossen Temperaturunterschieden und geringer Schneebedeckung (K 3,7). Der Wald- und Erdstromstandort sind schon weniger kontinental (K 3,5). Bei der Waldgrenze ergibt sich der niedrigste Wert (K 3,3), was möglicherweise auf eine längere Schneebedeckung schliessen lässt. Diese Vermutung ergibt sich auch daraus, dass bei den vorkommenden Bäumen (*Pinus montana*) ein starker Befall des Schwarzen Schneeschimmels (*Herpotrichia* sp.) auftritt.

4.2.2 Zur Bedeutung des Reliefs

Im Hochgebirge kommt dem Relief eine ganz besondere Bedeutung zu. Das Relief bestimmt weitgehend die Verteilung der Niederschläge und, was noch wichtiger ist, die Mächtigkeit der winterlichen Schneedecke. Über Kuppenlagen verdichtet sich das Stromlinienfeld des Windes, Schnee wird verfrachtet und in Mulden wieder abgelagert. Windexponierte Lagen zeigen starke Bodenfröste, windgeschützte Lagen sind durch eine Schneedecke thermisch besser isoliert. Das Kleinrelief bewirkt eine mosaikartige Auflösung des Mikroklimas und damit auch der Vegetation (AULITZKY 1961b). TURNER 1970 spricht von klimatischen "Relieffekten" im Hochgebirge.

rocken
echsel-
Stand-
nahme

Die folgenden Ausführungen bringen den Einfluss des Kleinreliefs auf die Vegetation deutlich zum Ausdruck.

Der Gipfel des Munt Chavagl besitzt auf kleinem Raum zwei verschiedene Standortkomplexe: eine windexponierte und eine eher windgeschützte Lage (Muldenlage), Aufnahmeummern 4 resp. 4a. Tab. 7 verdeutlicht die grossen Unterschiede, die an den beiden Standorten festzustellen sind.

Tab. 7: Artenzahlen und Deckungsgrade (Gipfelstandort)

	windgeschützt	windexponiert
Boden	Rendzina	Gesteinsrohboden
Deckungsgrad der Krautschicht	80 %	3 %
Artenzahl	28	5

Die Standortsgunst der windgeschützten Fläche ist klar ersichtlich. Bezüglich der Zeigerwerte lässt sich folgendes festhalten:

Die Feuchtigkeitsverhältnisse sind in der geschützten Muldenlage deutlich verbessert. Durch den höheren Feinerdeanteil kann die Rendzina mehr Wasser speichern als der Gesteinsrohboden. Andererseits wird bei der windexponierten Fläche die Verdunstung durch Bewindung gefördert. Zudem weist der windgeschützte Standort eine mächtigere und länger andauernde Schneebedeckung auf. Die Reaktions- und Nährstoffzahlen bestätigen die bessere Bodenbildung in der Muldenlage. Unerklärlich ist aber die zu hohe Humuszahl beim windexponierten Standort. Die chemische Analyse des Bodens ergibt hier einen deutlichen Unterschied.

Kontinentalitätszahl und Temperaturzahl sind eng gekoppelt. So haben beide Standorte die gleiche Temperaturzahl, unterscheiden sich aber bezüglich der Kontinentalität. Dabei steigen Pflanzen mit der höheren Kontinentalitätszahl im Alpeninnern in der Regel höher (LANDOLT 1977).

Die reliefbedingte Standortsgunst der windgeschützten Lage entspräche also relativ zur windexponierten Lage einem topographisch tiefer gelegenen Ort.

Nach der Typologie des Mikroklimas im Hochgebirge von TURNER 1980 können die beiden Standorte grob in einen sunny windward und einen sunny lee Typ klassiert werden.

Ähnliche Verhältnisse sind am Erdstromstandort anzutreffen. Auch hier bewirkt das Relief eine deutliche Vegetationsdifferenzierung (Kuppen- und Muldenlagen). Hinzukommen die morphologisch wirksamen Prozesse der Solifluktion, welche die Erdströme zu einem ganz besonderen Standort machen. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Verteilung der Artenzahlen und Deckungsgrade.

Tab. 8: Artenzahlen und Deckungsgrade (Erdstromstandort)

	Artenzahl	Deckungsgrad
aktiver Erdstrom	10	10 %
inaktiver Erdstrom	23	75 %
Gebiet vor den Erdströmen	31	90 %

Deutlich treten die Unterschiede zwischen aktivem und inaktivem Erdstrom hervor. Der aktive Erdstrom ist für die Pflanzen verständlicherweise am ungünstigsten. Beim inaktiven Erdstrom, wo sich die Erdbewegung also stabilisiert hat, konnte sich schon ein gut geschlossener alpiner Rasen entwickeln.

Am Fuss der Erdströme tritt häufig Wasser aus. Dadurch ist auch die relativ hohe Feuchtigkeitszahl im Gebiet vor den Erdströmen zu erklären (vgl. Tab. 6 auf Seite 20). Diese Feststellung wurde auch von ZUBER (1968, S. 118) gemacht.

4.2.3 Zur Aussagekraft der Zeigerwerte

Ein Vergleich der bodenkundlich relevanten Zeigerwerte (F,R,N,H,D) mit den gemachten Laboranalysen ergab eine sehr gute Übereinstimmung. Die Methode der gemittelten Zeigerwerte erwies sich also als äusserst brauchbar. Man muss sich allerdings gerade im Hochgebirge folgenden Schwierigkeiten bewusst sein:

- mit abnehmendem Deckungsgrad und Artenzahlen nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass statistische Fehler auftreten zu. Ausreisser fallen dann stärker ins Gewicht.

- beim Vergleich ähnlicher Standorte liegen die Zeigerwerte oft recht nahe beisammen. Als Grenzdifferenz für die Interpretation kann 0,2 angenommen werden (mündl. Mitteilung E. LANDOLT).

Auf die klimatischen Zeigerwerte T und K wird in Kapitel 6.9. eingegangen.

Kapitel 5

BODENKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN

5.1 Methoden

Profilansprache

An allen Standorten wurden Bodenprofile geöffnet. Bei jedem Profil erfolgte eine Feldaufnahme nach dem schematischen Feldprotokoll der Professur für Bodenphysik, ETHZ (1977). Die verwendeten Signaturen bei den Profilen entstammen ebenfalls der Professur für Bodenphysik (vgl. LÜSCHER et al., 1978, S. 16-33). Die Bestimmung der Bodenfarbe erfolgte mit den Munsell Soil Color Charts.

Probeentnahme

Für die Laboranalysen wurden horizontspezifische Mischproben entnommen. Die Tiefe der Probenahme richtete sich nach den morphologischen Horizonten. Mehrere kleine Proben aus einem Horizont bildeten die Gesamtprobe. Es handelt sich dabei nicht um Volumenproben, die Resultate sind daher in Gewichtsprozent der Feinerde angegeben (%g).

pH-Bestimmung

Die Messung des pH-Wertes erfolgte in einer 1-n KCl-Lösung mit einer pH-Elektrode (Orion). Zu Vergleichszwecken mit den Arbeiten von FRIES (1985) und GAMPER (1981) wurde mit KCl-Lösung und nicht mit der heute allgemeinüblichen CaCl₂-Lösung gearbeitet. Die Bezeichnung der pH-Bereiche erfolgte nach SCHRÖDER (1983).

Bestimmung des organischen Kohlenstoffes

Nach der Methode von Walkley und Black (in Jackson 1962) wird der organische Kohlenstoff mit Kaliumbichromat ($K_2Cr_2O_7$) oxydiert, das Chrom (Cr^{6+}) zu Cr^{3+} reduziert. Durch Titration mit Ammoniumeisen-II-Sulfat kann das nicht reduzierte Cr^{6+} bestimmt werden. Der Humusgehalt ergibt sich als Annäherung durch Multiplikation des Gehaltes an organischem Kohlenstoff mit 1,72.

Bestimmung des Karbonatgehaltes

Da die Proben hauptsächlich aus dolomitischem Material bestanden, wurde folgendermassen vorgegangen:

Die Bodenprobe wurde mit 10% H_2SO_4 versetzt und erhitzt. Das sich dabei entwickelnde CO_2 wird durch H_2SO_4 geleitet. Dadurch wird der mitgeführte Wasserdampf absorbiert. Das CO_2 wird schliesslich durch NaOH aufgefangen. Dadurch lässt sich das freigewordene CO_2 gewichtsmässig bestimmen. Für die Umrechnung auf $(Ca,Mg)(CO_3)_2$ kann gemäss Untersuchungen von FRIES (1985, S.19) auf dem gleichen Ausgangsgestein davon ausgegangen werden, dass Ca und Mg in etwa gleichen Teilen im Dolomit enthalten sind.

Bestimmung der Korngrössenverteilung

Aufgrund der stark skellethaltigen Böden wurde auch der Anteil des Skelettes (> 2 mm) bestimmt. Diese Werte sind aber mit Vorsicht zu geniessen, da mit einer sehr grossen Variation im Boden zu rechnen ist. Die Feinerde wurde mit H_2O_2 behandelt und mittels Prüfsieben DIN 4188 mit Wasser gesiebt. Die Siebung erfolgte solange, bis keine Trübung im Auslaufwasser mehr sichtbar war.

Zur Bestimmung der Kornfraktionen kleiner $63 \mu m$ kam die Aräometeranalyse zur Anwendung. Dabei werden 20g des bei $105^\circ C$ getrockneten Bodenmaterials kleiner als $63 \mu m$ mit 0.2 % Natriumhexametaphosphat-Lösung versetzt und mit Ultraschall beschallt. Die Aräometeranalyse erfolgte in einem Wasserbad von $20^\circ C$.

Die gewählten Fraktionsklassen sind:

2000 - $63 \mu m$	Sand
63 - $2 \mu m$	Silt, Staub
kleiner $2 \mu m$	Ton

5.2 Ergebnisse

Das folgende Kapitel zeigt die Resultate der bodenkundlichen Untersuchungen, wobei jeder Standort nach folgendem Schema beschrieben wird:

- a.) Morphologische Beschreibung des Bodenprofils
- b.) Bodenchemische Eigenschaften
- c.) Korngrößenverteilung
- d.) Benennung des Bodenprofils
- e.) Standortskundliche Interpretation

Die morphologische Beschreibung bezieht sich immer auf den Zustand des Bodens am Aufnahme datum.

5.2.1 Der Waldstandort (2175 m.ü.M)

a.) Morphologische Beschreibung

Das Bodenprofil ist in Abb. 5 als schematische Feldaufnahme dargestellt. Der Standort zeigt deutlich zwei verschiedene Humusformen. Unter den Stämmen der Bäume (*Pinus montana*) hat sich eine Rohhumusauflage von bis zu 15 cm Mächtigkeit entwickelt, die Streuauflage hingegen ist nicht durchgehend ausgebildet. Der pH-Wert schwankt zwischen 4,4 im Rohhumus und 6,5 bei der nicht geschlossenen Streuauflage. Es können folgende Horizonte ausgetrennt werden:

L-(F)-(H)-Horizont (0-15 cm)

Der Streuhorizont L besteht praktisch nur aus *Pinus*-Nadeln und wenigen Blättern von *Dryas octopetala*. Man kann einen Ln (neue Streu) und einen Lv (zersetzte Streu) unterscheiden. Der Lv-Horizont enthält bereits zersetzte und dunkel gefärbte Nadeln.

Der Vermoderungshorizont F und der Humusstoffhorizont treten nur vereinzelt, dann aber deutlich, auf. Der H-Horizont hebt sich farblich (5 YR 2.5/2) stark vom Ah-Horizont ab.

Schematische Feldaufnahme

Datum 1.8.87

Ort Zernez

Lokalform Waldstandort

Koordinaten 812 650 / 167 975

Aufnahme Nr.

Landeskarte Nr. 1239

Höhe ü. M. 2175

Klimadaten

mittlere jährliche Niederschlagsmenge (N) 974 mm

Jahresmitteltemperatur (T)

Meteorologische Station Buffalora

Vegetation Schneeheide - Föhrenwald

Geologie Vallatscha - Dolomit

Profilskizze	Horizontbezeichnung	Blöcke > 0,2 cm	Feinerde	organische Substanz	Kalk	Gefüge	Feuchtigkeit	Rostflecken	grau-blau-grüne Reduktionsfarben	Fahl-Rot-Färbung	Fahlfärbung bei Wassersättigung	Bleichung, ohne Wassersättigung	Durchlässigkeit	Verdichtung	Wurzeln	Horizontgrenzen	Wurmattività	pH Wert, Hellige	Farbe, Standard Soil Color Charts	Topographie		
																				NE	SW	
	L																	5,5	5 YR 2.5/2	Exposition SW		
	F																		7	5 YR 3/3	Neigung	
	Ah		X	X	X	X	X														Zuordnung der Lokalform zu einem Bodentyp	
	BC														X	X	X		7	5 YR 4/4	Gesteinsrohboden Humussilikatboden	
	(B)C		X																7,5	5 YR 4/2	Rendzina Pararendzina Kalkbraunerde saure Braunerde basenreiche Braunerde Parabraunerde	
C															X	X			8		Eisenpodsol Humuspodsol Pseudogley Stagnogley Hochmoor Auenboden Gley Hang Ebene Flachmoor	
																			8	5 YR 4/1	Zuordnung zu einer Humusform	
																					Mull	Hydro-Mull
																					Moder	Hydro-Moder
																					X Rohhumus	Hydro-Rohhumus
																					Anmoor	
																					Torf	
																					Besondere Eigenschaften der Lokalform	
																					- zT. Verrucano-Einschlüsse - unter den Pinusstämmen mächtige Rohhumusauflagen	

Abb. 5: Bodenprofil Waldstandort

Ah-Horizont (0-10 cm)

Der Ah-Horizont zeigt eine schwache Wurmtätigkeit, aber ein gutes Krümelgefüge. Die skelettfreie Mineralerde besteht hauptsächlich aus Sand und Staub. Der Tonanteil beträgt 10,9 %(g). Die Feinerde ist ziemlich karbonatarm. Die Durchwurzelung ist intensiv.

BC-Horizont (10-30 cm)

Der BC-Horizont (10-20 cm) zeigt eine deutliche Verbraunung (5 YR 4/4) und ist auch gut durchwurzelt. Der Hauptwurzelraum reicht bis in 30 cm Tiefe, wobei der Boden aber noch tiefer durchwurzelt wird. Der Tongehalt beträgt noch 6,7 %(g) und ist auf die Verwitterung zurückzuführen.

Der (B)C-Horizont (20-30 cm) bildet den Übergang zum Muttergestein. Es treten hier vereinzelt auch silikatische Skelettstücke auf.

C-Horizont (ab 30 cm)

Beim Muttergestein handelt es sich um eine allochthone Dolomitschuttdecke. FRIES (1985, S.47) vermutet, dass im Gebiet des Munt la Schera das anstehende Gestein nicht an der Bodenbildung beteiligt ist, sondern dass der dolomitische Hangschutt als Muttergestein zu betrachten ist.

b.) Bodenchemische Eigenschaften

Tab. 9 gibt eine Übersicht über die chemischen Bodeneigenschaften.

Acidität und Karbonatgehalt

Der pH-Wert liegt im obersten Profilverteil im schwach sauren Bereich. Schon nach 2 cm Tiefe ist der pH-Wert neutral. Im unteren Profilverteil steigt er der pH auf 8,0 und 8,1, liegt somit im stark alkalischen Bereich.

Der Karbonatgehalt nimmt nach 2 cm von 6,9 %(g) sprunghaft auf 31,7 %(g) zu. In 10 cm Tiefe liegt die Karbonatgrenze. Der Gehalt an Karbonat steigt danach auf 68,4 %(g) und 85 %(g) an.

Tab. 9: Chemische Bodeneigenschaften (Waldstandort)

Tiefe (cm)	Säuregrad pH -log cH ⁺	Organische Substanz (g/100g)	Kalkgehalt (g/100g)
0- 2	6,5	14,1	6,9
2- 10	7,3	9,9	31,8
10- 20	7,6	3,6	68,4
20- 30	8,0	0,8	85,3
30- 50	8,1	0,4	84,6

Humusgehalt

Im Ah-Horizont beträgt der Gehalt an organischer Substanz 14,1 %(g), bzw. 9,8 %(g). Der BC-Horizont zeigt mit 3,6 %(g) auch noch einen hohen Humusgehalt an. Weiter unten im Profil sind noch Spuren von Humus vorhanden, der entlang von Wurzelkanälen oder Spalten verlagert wurde oder von abgestorbenen Wurzeln stammt. Der höhere Humusgehalt in 30-50 cm Tiefe im Vergleich zu den anderen Profilen ist auf die tiefere Durchwurzelung beim Wald zurückzuführen.

c.) Korngrößenverteilung

Die Resultate sind in Tab. 10 zusammengestellt.

Der Skelettanteil beträgt im Ah-Horizont 4-30 %(g) und steigt ab 10 cm Tiefe auf 55 %(g) an. In der Feinerde dominiert im Ah-Horizont die Sandfraktion. Der Anteil der Tonfraktion erreicht 10,9 %(g) und nimmt gegen unten kontinuierlich ab.

Im mittleren Profilteil dominiert die Staubfraktion und die Bodenart kann als Schluffboden bezeichnet werden. Ab 30 cm überwiegt wieder der Sandanteil, die Bodenart ist ein Sandboden.

Tab. 10: Korngrößenverteilung (Waldstandort)

Tiefe (cm)	Skelett (%g)	Feinerde (%g)	Korngrößenverteilung der Feinerde			
			Ton (%g)	Staub (%g)	Sand (%g)	Prädikat
0- 2	4,4	95,6	-	-	-	-
2- 10	29,4	70,6	10,9	36,6	52,5	sandiger Lehm
10- 20	55,1	44,9	6,7	61,4	31,9	Schluffboden
20- 30	60,8	39,2	4,5	54,3	41,2	Schluffboden
30- 50	64,1	35,9	3,8	44,1	52,1	Sandboden

d.) Benennung des Profils

Der Boden weist folgende Horizonte auf:

L-[F]-[H]-Ah-BC-(B)C-C

Bodentyp: Rendzina mit beginnender Verbraunung.

Humusform: stellenweise ein Rohhumus

e.) Standortkundliche Interpretation

Die Definition der Bodeneigenschaften richtet sich im wesentlichen nach den Angaben in FREI et al. (1980). Zur Beurteilung der nicht untersuchten Bodeneigenschaften, wie etwa des Nährstoffspeichervermögens, wurde zum Teil auf die Ergebnisse von FRIES (1985) zurückgegriffen.

Der Boden ist flachgründig und skelettreich. Aufgrund der Korngrößenverteilung kann die Wasserdurchlässigkeit als normal bezeichnet werden. Überschlagsmässig entspricht das Wasserspeichervermögen (in mm) der physiologischen Gründigkeit (in cm). Dies entspricht dem leicht verfügbaren Wasser (0,1-1 atm. Saugspannung). Bei der physiologischen Gründigkeit wird vom gesamten durchwurzelten Boden das Bodenskelett, sowie der Anteil sauerstoffarmer Horizonte abgezogen (vgl. FREI et al. 1980).

Aufgrund dieser Schätzung ist das Wasserspeichervermögen als gering zu bezeichnen (30-45 mm). Dieses an sich schlechte Wasserspeichervermögen wird zum Teil durch den relativ hohen Gehalt an organischer Substanz verbessert. Nach langen Trockenperioden kann die

Wasserversorgung aber kritisch werden.

Das Nährstoffspeichervermögen ist mässig bis gering, die Produktivität des Waldes darf daher als beschränkt eingestuft werden. Auch die zum Teil krüppelhaften Bäume verdeutlichen die sehr ungünstigen Verhältnisse.

5.2.2 Der Waldgrenzstandort (2270 m.ü.M)

a.) *Morphologische Profilbeschreibung (vgl. Abb. 6).*

L-Horizont (0-1 cm)

Der L-Horizont ist nur lückig ausgeprägt und oft nur in den Vegetationspolstern vorhanden. Die Bodenoberfläche ist mit zentimetergrossen Steinen bedeckt, so dass man von einem Ask-Horizont sprechen kann. Diese Steine dürften grösstenteils ausgefroren und durch Ausblasen des Feinmaterials freigelegt worden sein.

Ah-Horizont (0-10 cm)

Eine deutliche Braunfärbung (7,5 YR 3/2) hebt diesen Horizont vom unteren Bodenteil ab. Die Wurmtätigkeit ist schwach, man konnte keine Losungen entdecken. Das Gefüge besteht aus Einzelkörnern. Ein intensives Wurzelgeflecht durchzieht die Mineralerde. Skelett und Feinerde sind bis an die Bodenoberfläche karbonathaltig.

Sw-(Bv)-Horizont (10-20 cm)

In diesem Horizont wechselt eine leichte Braunfärbung (7,5 YR 4/4) mit einer Fahlrotfärbung (7,5 YR 5/2) ab, was auf zeitweise Anärobie schliessen lässt. Die Durchwurzelung ist immer noch intensiv und bis 20 cm Tiefe kann vom Hauptwurzelraum gesprochen werden. Das Gefüge ist kantig, polyedrisch. Nach der Einstichprobe ist eine leichte Verdichtung ab 15 cm festzustellen. Diffus erfolgt der Übergang zum

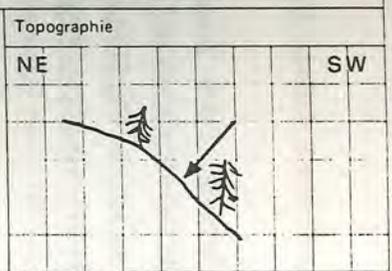
Ort **Zerne**
 Lokalform **Waldgrenzstandort**
 Koordinaten **812 150 / 168 530**

Aufnahme Nr. _____
 Landeskarte Nr. **1239**
 Höhe ü. M. **2270**

mittlere jährliche Niederschlagsmenge (N) **974 mm**
 Jahresmitteltemperatur (T) _____
 Meteorologische Station **Buffalora**

Föhrenwald
 Geologie **Vallatscha - Dolomit**

Profilskizze	Horizontbezeichnung	Skelett > 0,2 cm		organische Substanz	Kalk	Gefüge	Feuchtigkeit	Rostflecken	grau-blau-grüne Reduktionstriben	Fahl-Rot-Färbung	Fahlfärbung bei Wassersättigung	Bleichung, ohne Wassersättigung	Durchlässigkeit	Verdichtung	Wurzeln	Horizontengrenzen	Wurm-tätigkeit	pH Wert, Hellgelb	Farbe, Standard Soil Color Charts
		> 5 cm	< 5 cm																
	L																		
	Ah	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7	7,5 YR 3/2
	(Bv)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7,5	
	Sw	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7,5	7,5 YR 4/4
	Sd	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7,5	7,5 YR 5/2
C																		8	7,5 YR 5/2



Exposition	SW
Neigung	
Zuordnung der Lokalform zu einem Bodentyp	
Gesteinsrohboden	
Humussilikatboden	X
Rendzina	
Pararendzina	
Kalkbraunerde	
saure Braunerde	
basenreiche Braunerde	
Parabraunerde	
Eisenpodsol	
Humuspodsol	
Pseudogley	
Stagnogley	
Hochmoor	
Auenboden	
Gley	Hang
Flachmoor	Ebene
Zuordnung zu einer Humusform	
X Mull	Hydro-Mull
Moder	Hydro-Moder
Rohhumus	Hydro-Rohhumus
Anmoor	
Torf	
Besondere Eigenschaften der Lokalform	
<ul style="list-style-type: none"> - im Bereich der Kampfzone - aufgelockerter Wald 	

Abb. 6: Bodenprofil Waldgrenzstandort

Sd-Horizont (20-50 cm)

Prägendes Merkmal der Stauwassersohle ist seine Fahl-Rot-Färbung. Fahle Zonen (7,5 YR 5/0) wechseln mit roten Bändern (7,5 YR 5/2) und verleihen dem Horizont seine marmorähnliche Fleckigkeit (Marmorisierung). Die Einstichprobe ergab eine Verdichtung, die Durchwurzelung ist deutlich vermindert gegenüber den oberen Horizonten. Das Gefüge ist kantig, polyedrisch.

C-Horizont (ab 50 cm)

Das Muttergestein besteht, wie beim Waldstandort, aus dolomitischem Hangschutt.

b.) Bodenchemische Eigenschaften

Acidität und Karbonatgehalt

Im Ah- und Sw-Horizont liegt der pH-Wert mit 7,6 bzw. 7,8 im schwach alkalischen Bereich, steigt im Sd-Horizont auf 8,0 leicht an. Das Profil zeigt also nirgends eine Tendenz zu einer Versauerung, wie das beim Waldstandort festzustellen war. Der Karbonatgehalt beträgt profilumfassend mehr als 50 %(g) (vgl. Tab. 11).

Humusgehalt

Erwartungsgemäss ist der Gehalt an organischer Substanz mit 9,2 %(g) im Ah-Horizont am höchsten. In 20-40 cm Tiefe ist mit 0,9 %(g) noch beachtlich viel organische Substanz vorhanden.

c.) Korngrößenverteilung

Der Anteil der Tonfraktion ist mit maximal 3,8 % (g) im ganzen Profil sehr bescheiden. Auffallend ist der hohe Staubgehalt. Im Ah-Horizont beträgt er 50,4 % (g), im Sw- und Sd-Horizont steigt der Anteil auf über 80 % (g) an. Diese Anreicherung von Staub ab 10 - 20 cm dürfte wohl auch für die Verdichtung des Bodens ab dieser Tiefe verantwortlich sein. Der Boden ist über das ganze Profil als Schluffboden anzusprechen.

Der Skelettgehalt beträgt in allen Messtiefen über 50 % (g).

Tab. 11: Chemische Bodeneigenschaften (Waldgrenzstandort)

Tiefe (cm)	Säuregrad pH -log cH ⁺	Organische Substanz (g/100g)	Kalkgehalt (g/100g)
0- 10	7,6	9,2	52,1
10- 20	7,8	1,3	88,0
20- 40	8,0	0,9	92,0

Tab. 12: Korngrößenverteilung (Waldgrenzstandort)

Tiefe (cm)	Skelett (%g)	Feinerde (%g)	Korngrößenverteilung der Feinerde			
			Ton (%g)	Staub (%g)	Sand (%g)	Prädikat
0- 10	54,8	45,2	3,8	50,4	45,8	Schluffboden
10- 20	55,2	44,8	3,4	82,7	13,9	Schluffboden
20- 40	61,3	38,7	2,5	89,1	8,4	Schluffboden

d.) Benennung des Profils

Es ergibt sich folgende Horizontierung:

(L)-Ah-(Bv)Sw-Sd-C

Bodentyp: Kalksteinrendzina, leicht pseudovergleyt
Humusform: Mull

e.) Standortkundliche Interpretation

In mancherlei Beziehung ist der Boden für das Pflanzenwachstum recht ungünstig. Die Gründigkeit ist sehr flach und der Boden ist sehr skelettreich. Die Feinerde weist eine einseitige Korngrößenverteilung auf, die Staubfraktion ist dominierend. Diese einseitige Verteilung bewirkt zusammen mit der ungünstigen Struktur des Bodens im unteren Profilteil eine Verdichtung und damit verbunden einen zeitweiligen Wasserstau. Die Wasserdurchlässigkeit ist gehemmt, es treten zeitweise anärobe Bedingungen auf. Das Wurzelwachstum ist daher auf die obersten 20 cm beschränkt. Aufgrund der Flachgründigkeit, der Korngrößenverteilung und des polyedrischen Gefüges, ist das Wasserspeichervermögen sehr gering (15-25 mm). Der Boden neigt bei langer Trockenheit zur Austrocknung, ist bei Niederschlägen aufgrund der schlechten Wasserdurchlässigkeit zu nass, also in beiderlei Hinsicht ungünstig für das Pflanzenwachstum.

Die Nährstoffspeicherung ist sehr gering, die forstwirtschaftliche Produktion mässig.

5.2.3 Der Erdstromstandort (2410 m.ü.M)

Bei diesem Standort wurden 2 Profile aufgenommen. Das Profil I entstammt einem aktiven Erdstrom, Profil II aus dem Gebiet vor den Erdströmen am Munt Chavagl (vgl. Abb. 7).

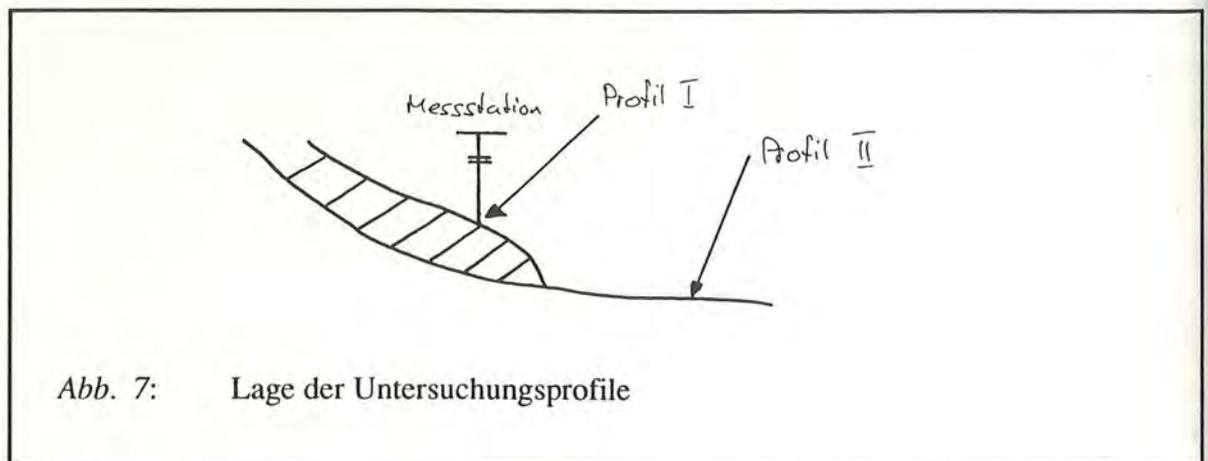


Abb. 7: Lage der Untersuchungsprofile

Datum 4.8.87

Ort Zernez

Lokalform Erdstromstandort

Koordinaten 813 700 / 169 375

Aufnahme Nr.

Landeskarte Nr. 1239

Hohe u. M. 2412

Klimadaten

mittlere jährliche Niederschlagsmenge (N) 974 mm

Jahresmitteltemperatur (T)

Meteorologische Station Buffalora

Vegetation typischer

Polsterseggenrasen

Geologie Zellenkalke u.

Dolomite

Profilskizze	Horizontbezeichnung	Blöcke Skelett > 0,2 cm	Feinerde	organische Substanz		Kalk		Gefuge		Feuchtigkeit	Rostflecken	graublau-große Reduktionsfarben	Fahl-Rot-Färbung	Fahl-Färbung bei Wasserfüllung	Bleichung, ohne Wasserfüllung	Durchlässigkeit	Verdichtung	Wurzeln	Horizontgrenzen	Wurmstätigkeit	pH Wert, Hellige	Farbe, Standard Soil Color Charts	Topographie						
				unzersetzte Streu	teilweise abgebaute Streu	Skelett	Feinerde	Einzelorn dicht gepackt, verkittet	Krumel (1-10 mm) kernig, polyedrisch														trocken	feucht	in Spuren	kleinflächig	in Bandern	in Spuren	kleinflächig
	L Ah	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7	10	YR 4/2	Exposition SW					
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10	YR 4/2	Neigung					
	C																					7,5			Zuordnung der Lokalform zu einem Bodentyp				
																							10	YR 6/2	Gesteinsrohboden	X			
																							7,5			Humussilikatboden			
																											Rendzina		
																												Pararendzina	
																												Kalkbraunerde	
																												säure Braunerde	
																												basenreiche Braunerde	
																										Parabraunerde			
																										Eisenpodsol			
																											Humuspodsol		
																											Pseudogley		
																											Stagnogley		
																											Hochmoor		
																											Auenboden		
																											Gley	Hang	Ebene
																											Flachmoor		
																						Zuordnung zu einer Humusform							
																						X Mull	Hydro-Mull						
																						Moder	Hydro-Moder						
																						Rohhumus	Hydro-Rohhumus						
																						Anmoor							
																						Torf							
																						Besondere Eigenschaften der Lokalform							
																						- auf aktivem Erdstrom							

Abb. 8: Bodenprofil Erdstromstandort I

em akti-
Abb. 7).
nt ungün-
derschlä-
ar gering
ngtossen-
hstum ist
durchläs-
Profileil
einseitige
weist eine
g-

Datum 4.8.87

Ort Zernez

Lokalform Erdstromstandort

Koordinaten 813 700 / 169 375

Aufnahme Nr.

Landeskarte Nr. 1239

Höhe ü. M. 2410

Klimadaten

mittlere jährliche Niederschlagsmenge (N) 974 mm

Jahresmitteltemperatur (T)

Meteorologische Station Buffalora

Vegetation

typischer
Polsterseggenrasen

Geologie

Zellenkalke u.
Dolomite

Profilskizze	Horizontzeichnung	Bödenprofile		organische Substanz	Kalk	Gefüge	Feuchtigkeit	Rostflecken	graublau-grüne Reduktionsfarben	Fahl-Rot-Färbung	Fahlfärbung, bei Wassersättigung	Bleichung, ohne Wassersättigung	Durchlässigkeit	Verdichtung	Wurzeln	Horizontgrenzen	Wurmattività	pH Wert, Hellige	Farbe, Standard Soil Color Charts	Topographie							
		Blöcke > 0,2 cm	Feinerde																	NE	SW						
		> 5 cm	< 5 cm																	Sandig	Tonig	unersetzte Streu	teilweise abgebaute Streu	Feinsthumus, speckig	in Mineralerde inkorporiert	Ausblühungen	Einzelkörn
	L Ah Bv C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	6,5	10 YR 3/2	Exposition SW						
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	6,5	10 YR 3/2	Neigung						
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7	10 YR 4/4	Zuordnung der Lokalform zu einem Bodentyp						
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	8	10 YR 7/1	Gesteinsrohoden						
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	8	10 YR 7/1	Humussilikatboden					
																		8		Rendzina							
																		8		Pararendzina							
																		8		Kalkbraunerde							
																		8		saure Braunerde							
																		8		basenreiche Braunerde							
																		8		Parabraunerde							
																		8		Eisenpodsol							
																		8		Humuspodsol							
																		8		Pseudogley							
																		8		Stagnogley							
																		8		Hochmoor							
																		8		Auenboden							
																		8		Gley Hang Ebene							
																		8		Flachmoor							
Zuordnung zu einer Humusform																											
X																				X Mull Hydro-Mull							
																				Moder Hydro-Moder							
																				Rohhumus Hydro-Rohhumus							
																				Anmoor							
																				Torf							
Besondere Eigenschaften der Lokalform																											
<ul style="list-style-type: none"> - sehr scharfe Horizontgrenzen - deutliche Karbonatgrenze - stellenweise bis 10 cm mächtige Karbonatstauberfüllung - Schwundrisse sichtbar 																											

a.) Morphologische Profilbeschreibung

Profil I: (Abb. 8 auf Seite 37)

Es handelt sich um einen Gesteinsrohboden mit dem Profilaufbau (Ah)-C. Im C-Horizont ist eine schwache Verdichtung feststellbar. Das Gefüge desselben Horizontes ist kantig, polyedrisch. Der Hauptwurzelraum ist auf den Ah-Horizont beschränkt. Dieser ist infolge des höheren Anteils an organischer Substanz dunkel gefärbt (10 YR 4/2).

Profil II: (Abb. 9 auf Seite 38)

Hier zeigt sich eine stärkere Bodenbildung als auf dem Erdstrom. Auffällig an diesem Profil sind die scharfen Horizontgrenzen und die deutliche Karbonatgrenze in ca. 20 cm Tiefe. Stellenweise war der Boden zum Aufnahmezeitpunkt mit karbonathaltigen Sedimenten bis zu 10 cm mächtig überschüttet. Dieses Material wird aus den Erdströmen ausgeschwemmt. Am Fusse der Erdströme trat an verschiedenen Stellen Wasser aus. Der Boden weist folgende Horizonte auf:

Ah-Horizont (0-20 cm)

Ein L-Horizont tritt nur stellenweise auf. Der Ah-Horizont tritt durch seine dunkle Farbe (10 YR 3/2) deutlich hervor. In den obersten 10 cm ist eine schwache Wurmtätigkeit festzustellen, und das Gefüge zeigt eine für das Pflanzenwachstum gute Krümelstruktur. Feinerde und Skelett sind karbonatfrei. Die Wurmtätigkeit ist auf eine oberflächennahe Schicht begrenzt, da der Übergang zum Bv-Horizont sehr scharf erfolgt. In der Feinerde sind einzelne silikatische Blöcke (> 5 cm) eingebettet.

Bv-Horizont (20-30 cm)

Unter dem Ah-Horizont ist eine Verbraunung (10 YR 4/4) festzustellen. Allerdings schwankt die Mächtigkeit des Bv-Horizontes beträchtlich. Auch hier zeigt sich noch eine Krümelstruktur. Die Durchwurzelung ist intensiv. Skelett und Feinerde sind karbonatfrei, die Karbonatgrenze liegt beim Übergang zum

C-Horizont (ab 30 cm)

Der C-Horizont steht in wunderschönem Kontrast zum darüberliegenden Boden. Er ist viel heller gefärbt (10 YR 7/1) und praktisch nicht mehr durchwurzelt. Der Skelettanteil an grossen Blöcken (> 5 cm Durchmesser) nimmt stark zu. Wie im Profil I ist eine schwache Verdichtung festzustellen. Skelett und Feinerde sind nun karbonathaltig.

b.) Bodenchemische Eigenschaften

Acidität und Karbonatgehalt

Profil I: Der pH-Wert im Ah-Horizont liegt im schwach alkalischen Bereich, steigt dann ab 10 cm auf Werte von 8,2 bis 8,5. Entsprechend verhält sich der Karbonatgehalt, der ab 10 cm über 80 %(g) beträgt.

Profil II: Im Ah-Horizont ist der pH-Wert 6,9, liegt somit im Neutralbereich. Hier ist schon viel Karbonat ausgewaschen worden, der Anteil beträgt noch 6,5-6,8 %(g). Mit dem Übergang zum C-Horizont springt der pH-Wert sofort auf 8,2 und 8,5, was den Werten in Profil I entspricht.

Humusgehalt

Profil I zeigt sehr geringe Gehalte an Humus. Zuoberst sind 4,7 %(g) vorhanden, ab 20 cm Tiefe ist praktisch keine organische Substanz mehr nachweisbar.

Profil II zeigt einen höheren Humusgehalt von 8,7 %(g) im obersten Horizont. Im Bv-Horizont beträgt der Gehalt noch 3,8 %(g), im C-Horizont noch 0,2 %(g). Dieser höhere Anteil im C-Horizont dürfte wohl auf Humusverlagerung entlang von Schwundrissen zurückzuführen sein (vgl. Tab. 13).

Tab. 13: Chemische Bodeneigenschaften (Erdstromstandort)

Tiefe (cm)	Säuregrad pH -log cH ⁺	Organische Substanz (g/100g)	Kalkgehalt (g/100g)
a) Profil I			
0- 10	7,4	4,7	32,5
10- 20	8,2	0,2	84,7
20- 35	8,4	0,1	85,6
35- 60	8,5	0,1	85,6
b) Profil II			
0- 20	6,9	8,7	6,5
20- 25	6,9	3,8	6,8
25- 35	8,2	0,2	86,0
35- 50	8,5	0,2	87,4

c.) Korngrößenverteilung

Profil I hat in den obersten 10 cm einen relativ hohen Tongehalt von 8,9 %(g) und einen Sandanteil von über 50 %(g). Ab 10 cm dominiert deutlich die Staubbfraktion mit über 50 %(g), der Tonanteil nimmt auf weniger als 5 %(g) ab. Der Skelettanteil steigt von oben nach unten kontinuierlich an. Der C-Horizont kann als Schluffboden bezeichnet werden.

Das zweite Profil zeigt im wesentlichen eine ähnliche Textur. Der Anteil der Tonfraktion liegt allerdings erwartungsgemäss höher: 10,1 %(g) bis 20 cm, 9,2 %(g) bis in 35 cm Tiefe. Der Sandanteil nimmt mit der Tiefe kontinuierlich ab. Auffallend ist der kleine Skelettgehalt in 0-20 cm Tiefe (vgl. Tab. 14).

Tab. 14: Korngrößenverteilung (Erdstromstandort)

Tiefe (cm)	Skelett (%g)	Feinerde (%g)	Korngrößenverteilung der Feinerde			
			Ton (%g)	Staub (%g)	Sand (%g)	Prädikat
a) Profil I						
0- 10	36,2	63,8	8,9	34,4	56,7	lehmiger Sand
10- 20	39,9	60,1	4,2	68,1	27,7	Schluffboden
20- 35	47,8	52,2	4,2	51,3	44,5	Schluffboden
35- 60	52,8	47,2	3,4	59,6	37,0	Schluffboden
b) Profil II						
0- 20	2,2	97,8	10,1	34,0	55,9	sandiger Lehm
20- 25	20,7	79,3	-	-	-	-
25- 35	36,6	63,4	9,2	49,2	41,6	lehmiger Sand
35- 50	40,4	59,6	3,4	68,0	28,6	Schluffboden

d.) Benennung der Profile

Profil I: Horizontfolge:

(Ah)-C

Bodentyp: Gesteinsrohboden (Lithosol)

Profil II: Horizontfolge:

(L)-Ah-Bv-C

Bodentyp: basische Braunerde (Cambisol)

e.) Standortkundliche Interpretation

Das Profil I ist in jederlei Beziehung ein Extremstandort. Der Boden ist sehr flachgründig und skelettreich. Das Nährstoffspeichervermögen ist extrem gering, der Anteil der organischen Substanz mit weniger als 5 % (g) sehr klein.

Der hohe Staubgehalt der Feinerde ab 10 cm Tiefe verursacht eine leichte Verdichtung, sodass die Wasserdurchlässigkeit leicht gehemmt ist. Das Wasserspeichervermögen ist extrem gering (< 15 mm), eine längere Trockenperiode kann für die Pflanzen kritisch werden.

Demgegenüber zeigt Profil II deutlich verbesserte Bedingungen. Der Boden ist flachgründig und in den obersten 20 cm gar als skelettfrei, im untern Profiltail als skelettreich zu bezeichnen. Die Korngrößen der Feinerde sind ausgeglichen verteilt, was eine gute Wasserversorgung gewährleistet. Die obersten 20 cm haben ein Krümelgefüge. Diese Aggregation bewirkt eine gute Porenverteilung von Grob-, Mittel-, und Feinporen, was wiederum den Wasserhaushalt positiv beeinflusst. Ab 20 (35) cm Tiefe ändern sich diese Bedingungen abrupt. Der erhöhte Staubanteil bewirkt eine leichte Verdichtung. Das Wurzelwachstum wird plötzlich gestoppt. Insgesamt muss das Wasserspeichervermögen als gering bezeichnet werden (30-40 mm), die Wasserversorgung ist aber ständig gewährleistet, da von den Erdströmen Hangwasser anfällt. Es treten daher in der Vegetation auch Feuchtezeiger auf (vgl. Kapitel 4.2.2).

Im Vergleich zu den anderen Profilen besitzt dieser Boden die beste Wasserversorgung.

5.2.4 Der Gipfelstandort (2542 m.ü.M)

Das Gipfelplateau des Munt Chavagl zeigt zwei verschiedene Standortkomplexe. Der eine Standort ist stark windexponiert und nur spärlich bewachsen. Es hat sich nur ein Gesteinsrohboden entwickelt, die Vegetation besteht aus *Carex firma* Pölsterchen. Der zweite Standort liegt in einer eher windgeschützten Mulde, wo sich ein alpiner Rasen entwickelte. Das nachfolgend beschriebene Bodenprofil entstammt diesem letzteren Bereich.

a.) Morphologische Profilbeschreibung (vgl. Abb. 10)

Ähnlich dem Profil II des Erdstromstandorts zeigen sich hier scharfe Horizontgrenzen und eine deutliche Karbonatgrenze.

Ah-Horizont (0-10 cm)

Die oberste Schicht bildet ein L-[F]-Horizont. Der Streuhorizont besteht aus unzersetzten und teilweise zersetzten Pflanzenresten. Der Vermoderungshorizont ist nur stellenweise ausgebildet. Der Ah-Horizont zeigt ein gutes Krümelgefüge. Seine dunkle Farbe deutet auf einen hohen Gehalt organischer Substanz hin (5 YR 3/1).

C-Horizont (ab 10 cm)

Aufgrund der Färbung und des Skelettgehaltes kann dieser Horizont noch untergliedert werden:

(B)C-Horizont: Dieser Horizont setzt sich scharf gegen den Ah-Horizont ab. Er zeigt einen höheren Skelettgehalt, ist aber auch noch intensiv durchwurzelt. Vereinzelt treten verbraunte Stellen auf (5 YR 5/4), was auf einen sich entwickelnden B-Horizont hindeutet. Der Hauptwurzelraum reicht bis etwa 25 cm Tiefe.

C-Horizont: Hier steigt der Skelettanteil an und die Farbe wird grauer (5 YR 4/2).

b.) Bodenchemische Eigenschaften

Acidität und Karbonatgehalt

Mit einem pH-Wert von 6,4 liegen die obersten 10 cm im schwach sauren Bereich. Nach der Karbonatgrenze steigt der pH auf 7,1, im untern Profilteil auf 8,0. Entsprechend verhält sich der Karbonatgehalt gleichläufig zum pH. Mit 92,5 %(g) zeigt der C-Horizont einen sehr hohen Karbonatgehalt.

Humusgehalt

Organische Substanz ist in den obersten 10 cm mit 11,1 %(g) vorhanden. Auch in 40 cm Tiefe sind noch Spuren von Humus nachweisbar (vgl. Tab. 15).

c.) Korngrößenverteilung

Der Tongehalt von 6,7 %(g) im Ah-Horizont nimmt gegen unten zu ab und beträgt in 25-40 cm Tiefe nur noch 0,8 %(g). Im obersten Teil dominiert noch die Sandfraktion, im untern Teil die Staubfraktion.

Der Skelettgehalt ist bis 25 cm Tiefe relativ gering mit 3-8 %(g), steigt dann aber auf über 50 %(g) an (vgl. Tab. 16).

Tab. 15: Chemische Bodeneigenschaften (Gipfelstandort)

Tiefe (cm)	Säuregrad pH -log cH ⁺	Organische Substanz (g/100g)	Kalkgehalt (g/100g)
a) Profil I			
0- 10	7,8	0,9	90,9
b) Profil II			
0- 10	6,4	11,1	10,4
10- 12	6,7	10,8	28,7
12- 25	7,1	4,2	54,3
25- 40	8,0	0,6	92,5

Tab. 16: Korngrößenverteilung (Gipfelstandort)

Tiefe (cm)	Skelett (%g)	Feinerde (%g)	Korngrößenverteilung der Feinerde			
			Ton (%g)	Staub (%g)	Sand (%g)	Prädikat
a) Profil I						
0- 10	62,4	37,6	3,7	66,9	29,4	Schluffboden
b) Profil II						
0- 10	3,4	96,6	6,7	34,9	58,4	lehmiger Sand
10- 25	8,4	91,6	-	-	-	-
25- 40	55,4	44,6	0,8	58,8	40,4	Schluffboden

d.) Benennung des Profils

Es ergibt sich folgende Horizontierung:

L-[F]-Ah-(B)C-C

Bodentyp: Rendzina, mit stellenweise angedeuteter Verbraunung.

e.) Standortkundliche Interpretation

Der Gesteinsrohboden ist vergleichbar mit Profil I des Erdstromstandorts. Das dort gesagte trifft auch hier zu.

Die Rendzina ist flachgründig und zumindest im Ah-Horizont skelettarm. Hier ist die Körnung der Feinerde recht ausgeglichen. Insgesamt ist der Boden normal durchlässig. Das Wasserspeichervermögen ist aufgrund der Flachgründigkeit sehr gering (10-25 mm), längere Trockenzeiten führen zu Problemen mit der Wasserversorgung. Allerdings ist der Standort aufgrund der Muldenlage etwas gegen allzugrosse Verdunstung geschützt (Windschutz).

5.3 Diskussion

Die untersuchten Böden sind alle flachgründig und skelettreich. Der grösste Mangel ist aber das geringe Wasserspeichervermögen. FRIES (1985, S. 109) stellte bei seinen Untersuchungen an ähnlichen Standorten einen steilen Anstieg der Desorptionskurven im ökologisch wichtigen Bereich des leicht verfügbaren Wassers fest. Die Wasserversorgung kann zeitweise ungenügend werden, wenn nicht durch Hangwasserzufuhr speziell günstige Bedingungen herrschen. Aufgrund einer täglichen Evapotranspirationsrate von 1,1 mm (GALLAND 1982) reicht das im Boden gespeicherte Wasser 10-27 Tage aus. Dies bestätigt auch FRIES (1985, S. 109). Die im allgemeinen regelmässig fallenden Niederschläge während der Vegetationsperiode lassen Wassermangel aber nur nach längeren Trockenperioden auftreten. Der hohe Skelettanteil der Böden bewirkt, dass die Feinerde inhomogen und anisotrop vorhanden ist. Dies stört den Wasserfluss und örtlich ist sogar mit einem Unterbruch des kapillaren Leitsystems zu rechnen (FREI et al. 1980). Bei den windexponierten Standorten tritt im Winter der Effekt der Frostrocknis auf.

Die Feststellung, dass Wasser ein Minimumfaktor ist, steht in gewissem Widerspruch zu bisherigen Angaben zu diesem Problemkreis. Verschiedene Autoren haben darauf hingewiesen, dass Gebirgsstandorte der Alpen in der Regel nicht durch Wassermangel eingeschränkt werden (nähere Angaben in KÖRNER 1977). Das Verhältnis Niederschlag zu Verdunstung nimmt mit der Höhe zu. Allerdings können an gewissen Standorten aufgrund spezieller Standortbedingungen Störungen in der Wasserversorgung auftreten.

Generell nimmt die Bodenqualität an den höher gelegenen Standorten ab. Erdstrom- und Gipfelstation haben nur noch Gesteinsrohböden. Der Gehalt an organisch C ist gering, der Karbonatgehalt sehr hoch.

Deutlich tritt der Einfluss des Reliefs in Erscheinung. Auf der topographisch gleichen Höhe wie die Gesteinsrohböden bilden sich in konkaven Lagen schon recht gut ausgebildete Rendzinen, die den Pflanzen bedeutend bessere Lebensbedingungen schaffen.

Kapitel 6

MIKROKLIMATISCHE UNTERSUCHUNGEN

6.1 Fragestellung

Es soll die Frage geklärt werden, wie stark die mikroklimatischen Verhältnisse von der Höhenlage beeinflusst werden. Es stehen dabei folgende Ziele im Vordergrund:

- Vergleich des Jahresgangs der Luft- und Bodentemperaturen in verschiedenen Höhenlagen.
- Vergleich des Tagesgangs der Luft- und Bodentemperaturen in verschiedenen Höhenlagen.
- Einfluss der Höhenlage auf die Zahl der Eis-, Frostwechsel- und frostfreien Tage.
- Untersuchung eines typischen Witterungsverlaufes zur Erfassung der kurzfristigen Unterschiede.
- Erfassung der Windverhältnisse im Untersuchungsgebiet.

Klimatische Untersuchungen bedürfen in der Regel Zeiträumen von mehreren Jahren, um den grossen jährlichen Schwankungen Rechnung tragen zu können. Die Untersuchungsperiode dieser Arbeit beträgt aber nur ein Jahr. Zum einen handelt es sich um eine Diplomarbeit, die zeitlich begrenzt ist, zum andern soll diese Arbeit mikroklimatische Unterschiede verschiedener Standorte aufzeigen. Ein klimatisches Extremjahr wird sich bei allen Standorten in der gleichen Weise bemerkbar machen, die mikroklimatischen Unterschiede bleiben demzufolge bestehen. Beim Vergleich ist also den Temperaturdifferenzen mehr Bedeutung beizumessen als den absoluten Werten.

6.2 Die Messinstrumente

Bei den Messgeräten handelt es sich bei allen Messstationen um Data Collecting Instruments der Firma Anderaa Instruments in Norwegen. Die einzelnen Ablesungen werden automatisch in einem wählbaren Zeitintervall durchgeführt.

Das Kernstück jeder Station bildet das Registriergerät (ein Sensor Plug-in Board 3010), an welches bis zu 12 Messfühler angeschlossen werden können. Die elektrischen Signale der einzelnen Messfühler werden vom Sensor Plug-in Board in bestimmten Zeitintervallen abgerufen und in einer Data Storing Unit 2990 auf einen Festkörper abgespeichert. Diese kann über 65 000 Einzelmessungen speichern und wird bei Bedarf ausgewechselt. Die Daten können über den Computer herausgelesen werden. Bei der Waldstation kam ein ein Datalogger DL-1 zur Anwendung. Dieses Gerät funktioniert ähnlich wie das Sensor Plug-in Board, nur werden die Daten diesmal auf Magnetband abgespeichert.

Bei den Luft- und Bodentemperaturfühlern handelt es sich um elektrische Widerstandsthermometer (500 Ohm Platin Widerstand), die Lufttemperaturfühler sind mit weissen Strahlungsschutzhülsen versehen. Die Messgenauigkeit beträgt $\pm 0,1^{\circ} \text{C}$.

Der Windrichtungsmesser (Wind Direction Sensor 2750) gibt je nach Position der Windfahne eine unterschiedliche Spannung an das Registriergerät weiter.

Zur Messung der Strahlung wurden ein Pyranometer (Moll-Gorczynski Solarimeter) und ein Pyrriometer (Davos-type pyrriometer) verwendet. Der Pyranometer misst die Globalstrahlung, also die Summe der direkten und diffusen kurzwelligen Sonnenstrahlung. Der Pyrriometer misst die kurz- und langwellige Strahlung im Bereich von $0,3 - 60 \mu\text{m}$. Durch Abzug der kurzwelligen Globalstrahlung erhält man die langwellige Strahlungsbilanz.

Die einzelnen Messwerte der beiden Strahlungsmessgeräte entsprechen einer mittleren Strahlung im Messintervall, da alle 10 Minuten gemessen wird und diese Werte dann automatisch gemittelt werden. Die Stationen sind batteriebetrieben, die Erdstromstation war mit einer Solarzelle ausgerüstet.

Die Kalibrierung aller Messgeräte erfolgte von der Herstellerfirma. Das Messintervall betrug während der Vegetationszeit 1 Stunde und in der übrigen Zeit 3 Stunden.

6.3 Die klimatischen Verhältnisse im Hochgebirge

Mit der Höhe nimmt die direkte Sonnenstrahlung zu. Dagegen wird die diffuse Himmelsstrahlung bei wolkenlosem Himmel schwächer, da die Dichte der streuenden Luft abnimmt. Bei bedecktem Himmel nimmt der Anteil der diffusen Strahlung allerdings wieder zu. Die Globalstrahlung kann an Tagen mit wechselnder Bewölkung infolge der hohen Reflexion der Strahlung an weissen Wolken sogar die Solarkonstante übertreffen (TURNER und TRANQUILLINI, 1961).

Diese starke Einstrahlung bedingt hohe Oberflächentemperaturen. Es kommt zu einem Überschuss der Bodentemperaturen gegenüber der Lufttemperatur (GEIGER 1961). Die Lufttemperaturen nehmen ja bekanntlich mit der Höhe ab und werden im Jahresgang ozeanischer. Demgegenüber wird die bodennahe Luftschicht immer extremer (GEIGER 1961).

Die Windgeschwindigkeiten nehmen mit der Höhe zu und der Wind wird oberhalb der Waldgrenze zu einem der wichtigsten biologisch lebensbestimmenden Faktoren. Das Kleinrelief, wie Mulden, Rippen oder Hügel, bewirkt oft extreme Unterschiede im Mikroklima, was zu einer mosaikartigen Auflösung der Vegetation führt (AULITZKY 1961b). Die pflanzlichen Organismen haben sich an diese klimatischen Extrembedingungen angepasst und oft erstaunliche morphologische und physiologische Anpassungsmechanismen entwickelt (LANDOLT 1984, TRANQUILLINI 1979).

Das nachfolgende Schema gibt die komplexe Wirkungskette der klimatischen Faktoren auf einen Pflanzenstandort oberhalb der Waldgrenze in vereinfachter Weise wieder. Das Schema zeigt, auf welche Art die Klimafaktoren auf einen Pflanzenstandort einwirken können. Wind und Strahlung nehmen dabei eine entscheidende Rolle ein. Sie beeinflussen massgeblich die Parameter Wasserhaushalt, Schneedecke und Niederschlag und die Temperaturverhältnisse. Diese bestimmen ihrerseits die Länge und die Art der Vegetationsperiode und schliesslich auch die Zusammensetzung der Pflanzengesellschaft und die Bodenentwicklung. Durch mechanische Wirkung und die Veränderung der Strahlungsverhältnisse mit der Höhe haben Wind und Strahlung direkt Einfluss auf die Vegetation.

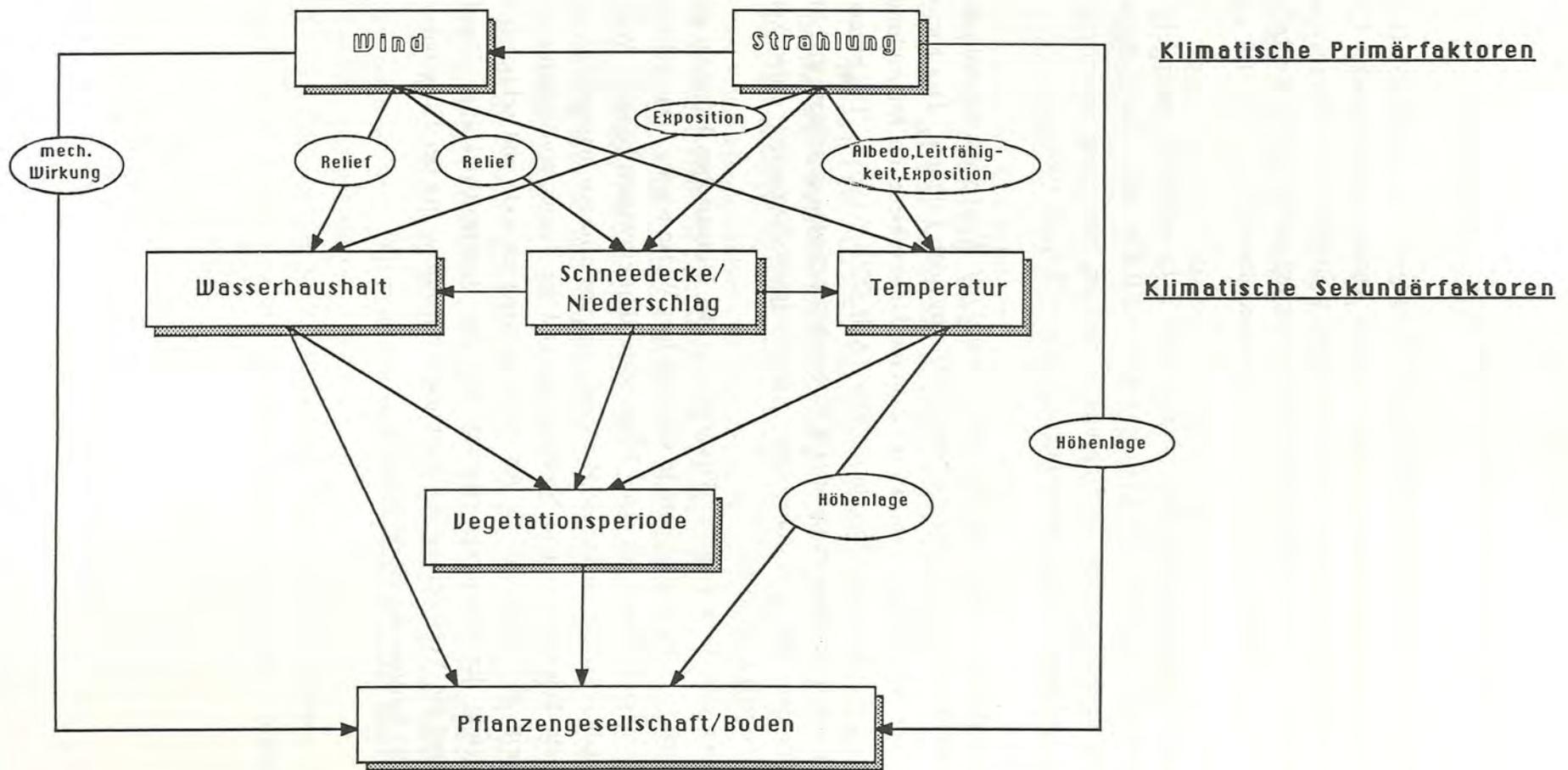


Abb. 11: Vereinfachtes Schema zur Wirkungskette der klimatischen Faktoren auf einen Pflanzenstandort oberhalb der Waldgrenze. Die Darstellung zeigt, über welche Parameter (in den Ellipsen) die klimatischen Faktoren aufeinander einwirken. Zusammengestellt nach Literaturangaben, hauptsächlich nach Arbeiten von AULITZKY und TURNER.

6.4 Die Vegetationsperiode

Im Hochgebirge ist die Länge der Vegetationsperiode von grosser Bedeutung. In der meist kurzen Zeit müssen alle wichtigen Lebensprozesse der Pflanzen ablaufen können. Eine genaue Definition der Vegetationsperiode ist aber nicht einfach. Während in niederen Breiten die vegetationsgünstige Zeit meist durch Wassermangel in der Trockenzeit begrenzt wird, erfolgt in den gemässigten und kalten Breiten die Steuerung der Lebensvorgänge in Pflanzen durch den Photo- und Thermoperiodismus (LARCHER 1984, S.92). Allerdings reagieren die einzelnen Pflanzenarten jeweils unterschiedlich auf die Temperaturen und die Tageslänge. *Pinus cembra* zum Beispiel kann sogar bei Nadeltemperaturen von -4.7°C noch assimilieren, falls sie Wasserzufuhr im Boden nicht unterbrochen ist (TRANQUILLINI 1979, S.43). In Anlehnung an GENSLER (1946) grenze ich die Vegetationsperiode mit dem Erreichen der $+5^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur der Luft im Frühjahr und dem Unterschreiten des entsprechenden $+3^{\circ}\text{C}$ Wertes im Herbst ab, wobei allerdings der Wasserhaushalt im Boden mitberücksichtigt werden muss.

Bei der Erdstromstation endete die Vegetationsperiode am 18. Oktober 1986, begann wieder am 24. Juni 1987. Aus Tab. 17 geht hervor, dass an allen Stationen die Vegetationsperiode zur selben Zeit zu Ende ging. Der anhaltende Bodenfrost setzte bei der Waldgrenzstation erst einen Monat später ein, zu einem Zeitpunkt, als schon Schnee lag. Der Boden gefror hier also erst nach dem Schneefall. Die winterliche Schneedecke baute sich überall zur gleichen Zeit auf. Grosse Unterschiede ergaben sich beim Zeitpunkt der Ausaperung. Der Waldgrenzstandort war 22 Tage früher schneefrei als der Erdstromstandort. Die 135 m Höhenunterschied bewirken also eine recht beträchtliche Veränderung in der Dauer der Schneedecke und des Bodenfrostes.

Wie die Verhältnisse an den anderen Stationen aussehen, kann nicht gesagt werden, da aufgrund technischer Defekte Lücken in den Messreihen auftraten.¹

Betrachtet man zur Abgrenzung der Vegetationsperiode anstelle der Lufttemperaturen die Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe, so ergibt sich ein leicht anderes Bild. Am 18. Oktober existierten recht beträchtliche Unterschiede der Tagesmitteltemperaturen im Boden: Fuorcla da la Fögliä 3.9°C , Gipfelstation 3.5°C , Erdstromstation 4.5°C , Waldgrenzstation 8.5°C , Waldstation 6.8°C . Mit den gleichen Schwellenwerten wie oben, würde sich die Vegetationsperiode im Herbst bei der Waldgrenz- und Waldstation um 5 Tage verlängern. Bei den andern Stationen wäre die vegetationsgünstige Zeit am 18. Oktober zu Ende.

¹ Die in den folgenden Tabellen und Abbildungen ersichtlichen Lücken entsprechen Ausfällen der Messungen.

Tab. 17: Dauer der Vegetationsperiode

Station	Ausaperung	Beginn der Schneedecke	Beginn des Bodenfrostes	Ende und Beginn der Vegetationszeit	Dauer der Aperaturzeit	der Schneedecke
Fuorcla	-	20.11	23.10	18.10/-	-	-
Gipfelstation	-	20.11	23.10	18.10/-	-	-
Erdstromstation	30.5	20.11	23.10	18.10/24.6	174	191
Waldgrenzstation	8.5	20.11	27.11	18.10/-	196	169

6.5 Die Lufttemperaturen

6.5.1 Der Jahresgang der Lufttemperaturen

In Abb. 12 sind die täglichen Mittelwerte, Maxima und Minima der Lufttemperaturen aufgezeichnet.

Alle Standorte zeigen einen ähnlichen Jahresverlauf der Temperatur. Es zeigt sich deutlich, dass alle Standorte in der gleichen Weise auf die Witterung reagierten. Besonders gut sichtbar ist das im Januar, wo überall sehr grosse Schwankungen der Tagesmitteltemperaturen festzustellen sind. Der Januar sticht ohnehin durch seine sehr tiefen Temperaturen ins Auge. Als absolutes Minimum wurde auf dem Gipfel des Munt Chavagl -29.8°C registriert.

Überraschend ist allerdings, dass der Gipfelstandort im August die höchsten Tagesmittelwerte erreichte, und sogar den Waldstandort um einige Grad Celsius übertraf. Der Gipfelstandort hat also die grösste jährliche Amplitude aufzuweisen, obwohl diese in der Regel mit der Höhe abnehmen sollte.

Der Waldstandort zeigt, trotz der langen Messlücke im Winterhalbjahr erwartungsgemäss die grössten täglichen Temperaturschwankungen, die Mittelwerte selbst liegen leicht höher als bei den anderen Standorten. Wie aus den Darstellungen ebenfalls zu entnehmen ist, traten bei allen Stationen in jedem Monat Fröste auf.

Die Kurven zeigen auch, dass das Untersuchungsgebiet vom gleichen Makroklima geprägt ist. Dies zu wissen ist wichtig, um die mikroklimatischen Unterschiede richtig interpretieren zu können.

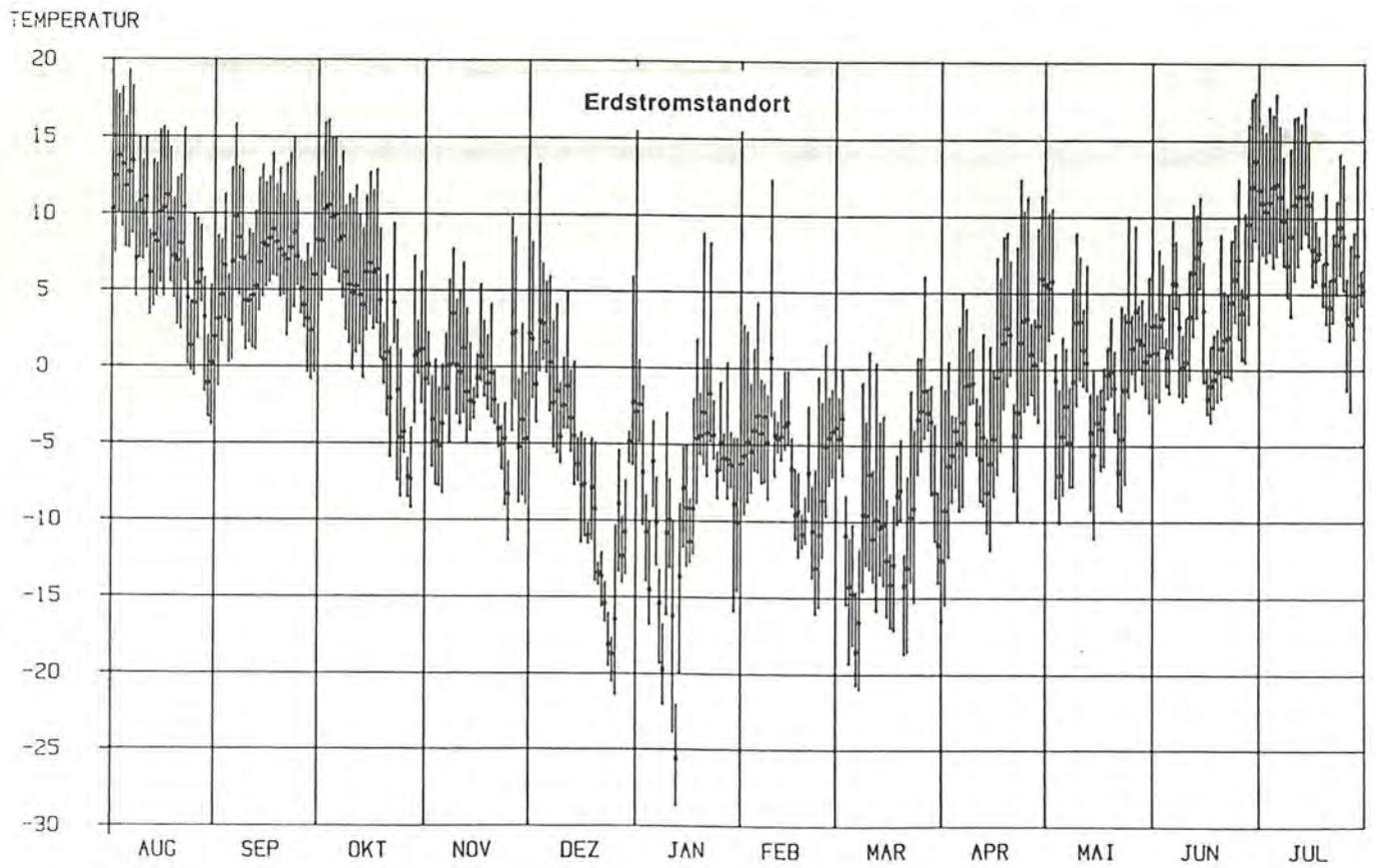
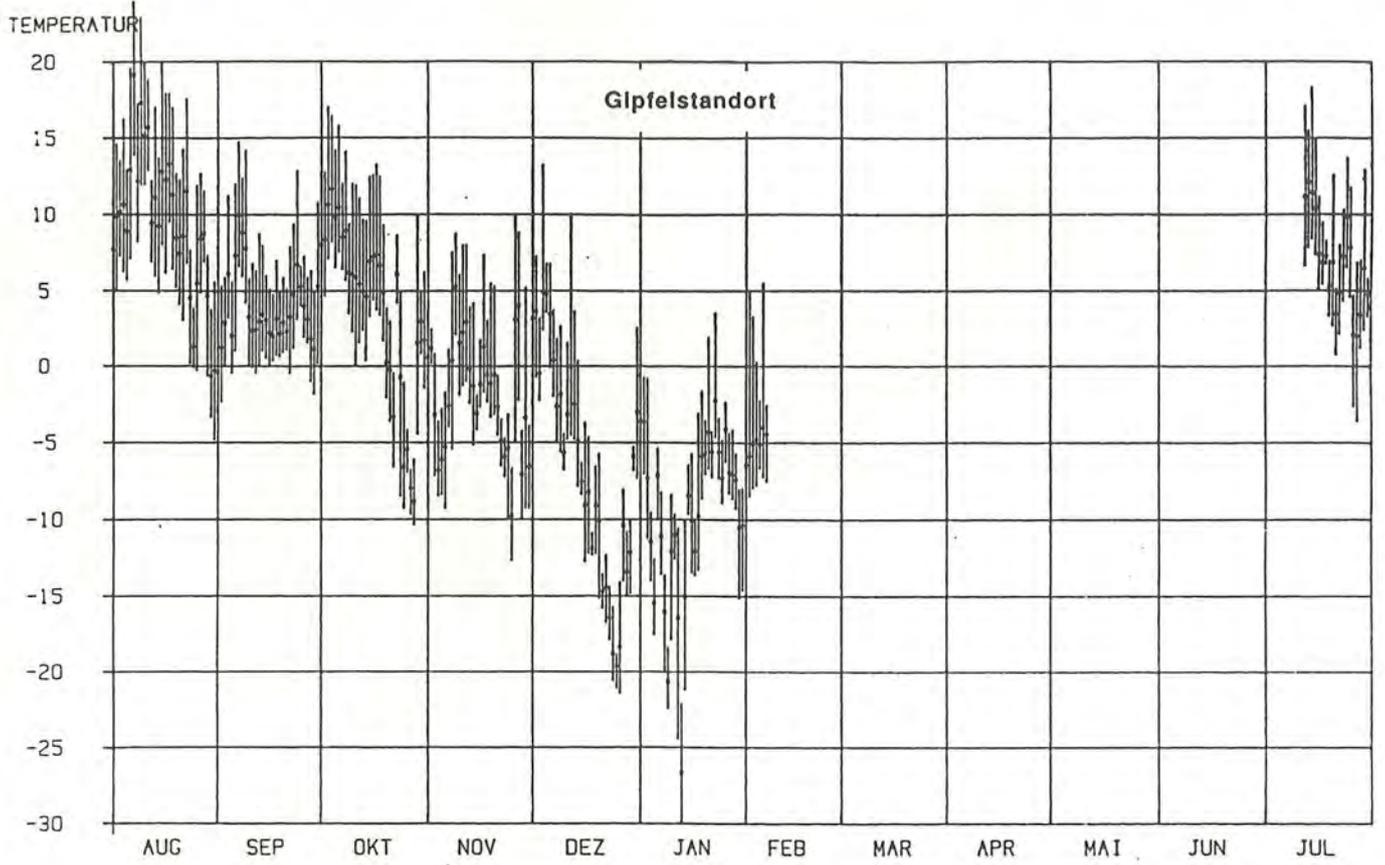
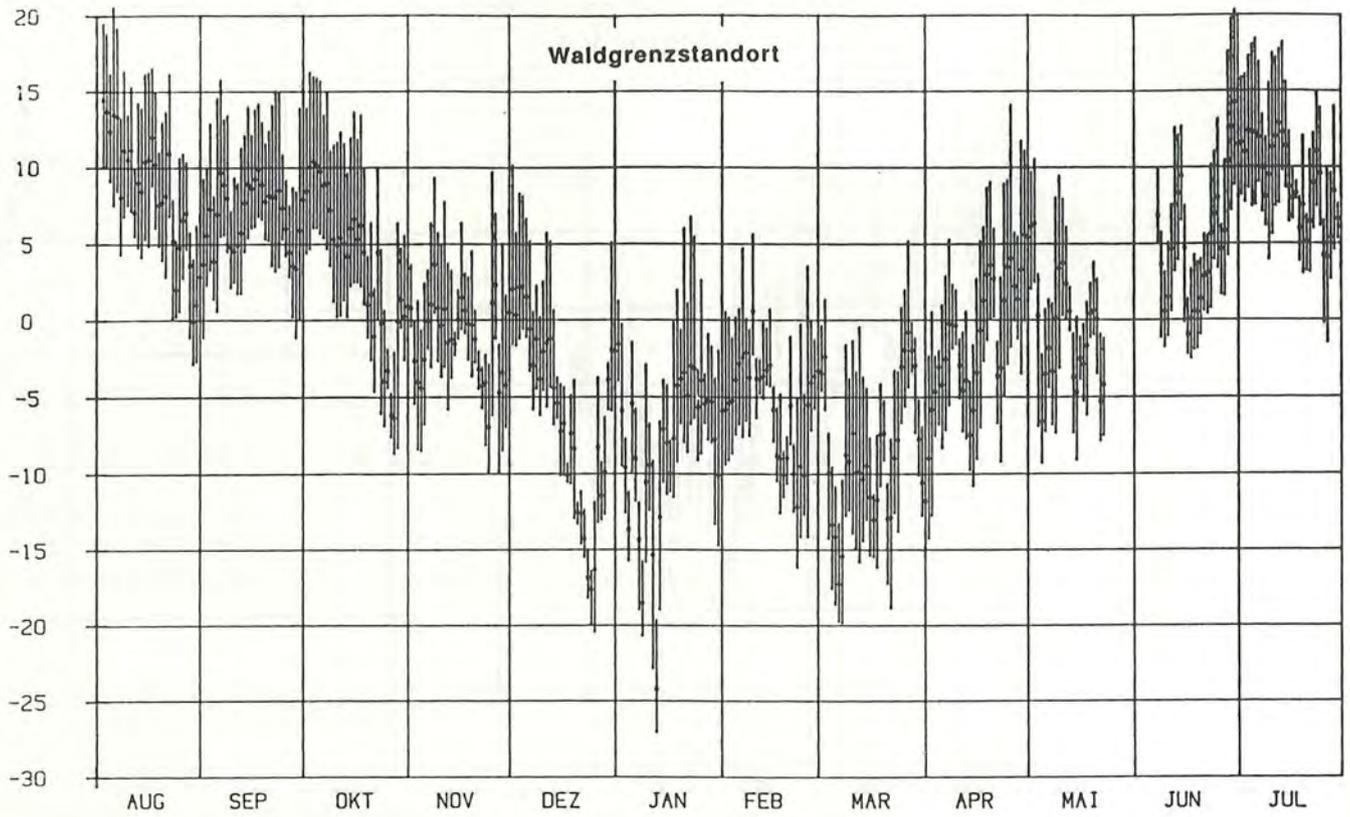


Abb. 12: Jahrgang der täglichen Mittelwerte, Maxima und Minima der Lufttemperatur an den verschiedenen Standorten (I).

TEMPERATUR



TEMPERATUR

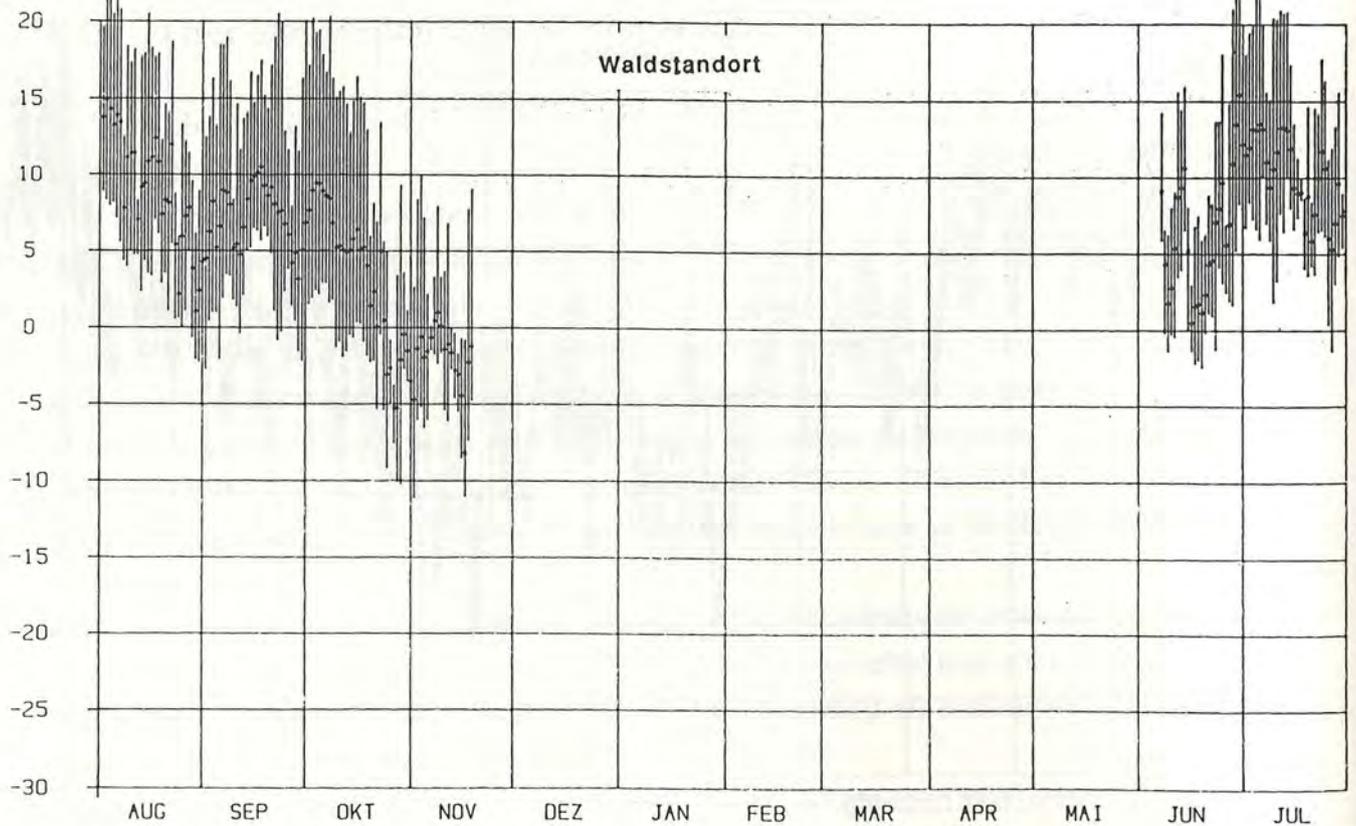


Abb. 13: Jahresgang der täglichen Mittelwerte, Maxima und Minima der Lufttemperatur an den verschiedenen Standorten (II).

In der Tab. 18 sind die Monatswerte der Temperaturen in 150 cm Höhe aufgeführt. Betrachtet man die Monatsmittelwerte der Standorte am SW-Hang des Munt Chavagl erkennt man die Abnahme der Temperaturen mit der Höhe. Unerwartet sind aber die hohen Temperaturwerte am Gipfelstandort in den Monaten August und Oktober. Im August war der Gipfel sogar der wärmste Standort, im Oktober ebenso warm wie der 167 m tiefer gelegene Waldgrenzstandort. Diese Wärmegunst erklärt sich möglicherweise aus der längeren möglichen Sonnenscheindauer auf dem Gipfel.

Der Waldstandort ist in den Sommermonaten Juli und August $0.7-0.9^{\circ}\text{C}$ wärmer als der Waldgrenzstandort; der Höhenunterschied zwischen diesen beiden Standorten entspräche wuchsklimatisch nicht den tatsächlichen 100 m, sondern 133 m. Auf die besonderen Temperaturverhältnisse im Wald wird an anderer Stelle noch eingegangen. Der Waldgrenzstandort ist in den Sommermonaten $0.4-0.7^{\circ}\text{C}$ wärmer als der Erdstromstandort, woraus ein zu flacher Gradient resultiert (Tab. 19). Im Jahresmittel differieren diese beiden Standorte um 0.5°C , was einem Höhenunterschied von 83 m, statt den effektiven 135 m, entspräche.

Die Station auf der Fuorcla da la Fögliä zeigt eine deutliche Wärmegunst gegenüber dem SW-Hang des Munt Chavagl. Die Sommertemperaturen entsprechen etwa denen des 270 m tiefer gelegenen Erdstromstandorts, die Wintertemperaturen sind selbst noch wärmer als beim Waldgrenzstandort.

Die Interpretation der absoluten Extrema ist schwierig, da mit einem 1 resp. 3 Stunden Rhythmus gemessen wurde. Die tatsächlichen absoluten Extremwerte, deren Eintrittszeit ja wohl kaum mit dem Zeitpunkt der Messung übereinstimmt, dürften die gemessenen Werte z.T. erheblich übertreffen. Man kann daher meine absoluten Extrema auch nicht mit anderen Messungen aus der Literatur vergleichen. Auch können die genauen Eintrittszeiten der Extremwerte von Standort zu Standort verschieden sein, wodurch ein direkter Vergleich erschwert wird. Zur Interpretation wurden daher nur die mittleren Extrema verwendet, die absoluten Extrema sind der Vollständigkeit halber auch tabelliert.

Erwähnenswert ist aber doch das hohe Maximum am Gipfelstandort von 25.6°C .

Der Waldstandort zeigt deutlich die höchsten mittleren Maxima, während die Unterschiede zwischen den anderen Stationen eher gering sind. Im Wald ist aber nicht nur die tägliche Erwärmung gross, sondern auch die nächtliche Abkühlung; es wurden die tiefsten mittleren Minima registriert.

Im Vergleich zur Waldgrenze hat der Waldstandort eine um mindestens 3.5°C grössere mittlere Amplitude, oberhalb der Waldgrenze werden die Unterschiede dann aber deutlich geringer. Die mittleren täglichen Amplituden nehmen in der Regel mit der Höhe ab. Dies trifft auch für die Fuorcla da la Fögliä zu.

Interessanterweise zeigt der Verlauf der grössten täglichen Amplitude einen Jahresgang, mit dem Maximum im Winter und dem Minimum im Sommer. Gerade umgekehrt verläuft der Gang der mittleren Amplituden.

Tab. 18: Monatsmittel, Extrema und Amplituden der Lufttemperatur in 150 cm Höhe an den verschiedenen Stationen (August 1986-Juli 1987)

		A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	JAHR
Monatsmittel	Waldstation	9.1	7.1	3.4								6.3	10.1	
	Waldgrenzstation	8.4	6.9	3.7	-1.3	-6.0	-8.2	-5.5	-8.9	-1.0	-0.8	5.1	9.2	0.1
	Erdstromstation	8.0	6.4	3.4	-1.8	-6.4	-8.9	-6.1	-9.6	-1.5	-0.6	3.9	8.5	-0.4
	Gipfelstation	9.3	4.1	3.7	-1.8	-6.8	-9.8						6.7	
	Fuorcla	7.9	6.3	3.9	-0.7	-5.0	-7.5	-4.8						
abs. Maxima	Waldstation	23.7	20.5	20.3								23.8	23.9	23.9
	Waldgrenzstation	20.6	15.8	16.3	9.7	10.2	6.8	5.7	5.2	14.1	10.6	20.3	18.4	20.6
	Erdstromstation	19.3	15.8	16.1	12.3	13.3	8.9	12.3	6.1	12.4	10.5	18.1	18.0	19.3
	Gipfelstation	25.6	14.8	17.0	12.9	13.2	3.6						18.4	25.6
	Fuorcla	18.4	16.0	16.4	11.3	14.7	3.7	7.1						18.4
mittl. Maxima	Waldstation	15.3	15.1	11.5								11.6	16.0	
	Waldgrenzstation	13.0	11.8	8.9	3.0	-2.1	-3.4	-1.6	-4.5	3.9	2.9	8.9	13.3	4.5
	Erdstromstation	12.4	11.1	8.2	2.3	-2.7	-4.5	-1.7	-4.9	4.0	3.7	7.5	12.6	4.0
	Gipfelstation	13.9	8.0	8.1	2.4	-3.3	-6.6						10.4	
	Fuorcla	12.0	10.3	8.4	2.6	-1.6	-4.2	-0.9						
mittl. Minima	Waldstation	3.8	2.0	-2.0								1.5	5.7	
	Waldgrenzstation	4.5	3.3	-0.1	-4.4	-8.6	-11.9	-8.5	-12.7	-5.2	-4.3	1.6	5.8	-3.4
	Erdstromstation	4.2	2.8	-0.2	-4.8	-9.1	-12.2	-8.9	-13.3	-6.0	-3.6	0.5	5.2	-3.8
	Gipfelstation	5.2	1.2	0.4	-5.0	-9.3	-12.7						3.7	
	Fuorcla	4.4	3.6	0.9	-3.6	-7.5	-10.3	-7.3						
abs. Minima	Waldstation	-2.3	-2.7	-10.3								-2.5	-1.4	
	Waldgrenzstation	-2.9	-1.2	-8.7	-9.9	-20.5	-27.1	-16.2	-19.9	-14.3	-9.3	-2.5	-1.5	-27.1
	Erdstromstation	-3.8	-1.3	-9.2	-11.4	-21.4	-28.6	-16.1	-21.0	-15.5	-11.1	-3.5	-2.7	-28.6
	Gipfelstation	-4.8	-2.4	-10.4	-12.7	-21.4	-29.8						-3.6	-29.8
	Fuorcla	-3.3	-0.7	-8.9	-10.9	-19.2	-24.9	-14.8						-24.9

mitl. Amplituden	Waldstation	11.4	13.0	13.5								10.1	10.4	
	Waldgrenzstation	8.5	8.5	8.9	7.4	6.5	8.6	7.0	8.1	9.1	7.2	7.3	7.5	7.9
	Erdstromstation	8.1	8.3	8.2	7.1	6.3	7.7	7.2	8.5	9.9	7.4	7.0	7.4	7.8
	Gipfelstation	8.8	6.8	7.7	7.4	6.0	6.1						6.7	
	Fuorcla	7.6	6.7	7.5	6.2	5.9	6.1	6.3						
grösste Amplituden	Waldstation	16.9	21.3	19.5								19.3	18.6	
	Waldgrenzstation	13.1	14.0	14.8	16.0	11.8	14.0	17.8	15.4	15.9	15.4	13.4	11.9	15.9
	Erdstromstation	11.6	12.8	11.2	14.9	13.6	15.1	15.4	16.3	17.9	13.3	13.0	11.0	17.9
	Gipfelstation	12.5	11.0	14.4	15.4	14.6	13.8						10.6	
	Fuorcla	10.2	10.3	13.0	10.6	13.9	13.8	14.8						

Die aus den Messungen berechneten mittleren monatlichen Temperaturgradienten ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) sind in Tab. 19 zusammengestellt. Negative Werte bedeuten eine Temperaturzunahme mit der Höhe. Nimmt man einen mittleren Gradienten von $0.6^{\circ}\text{ C}/100\text{ m}$ an (FRANZ 1979), so liegen die berechneten Werte generell zu tief, mit Ausnahme zwischen Wald- und Waldgrenzstation im August und Juli.

Tab. 19: Monatliche Gradienten der Lufttemperatur zwischen den Standorten ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)

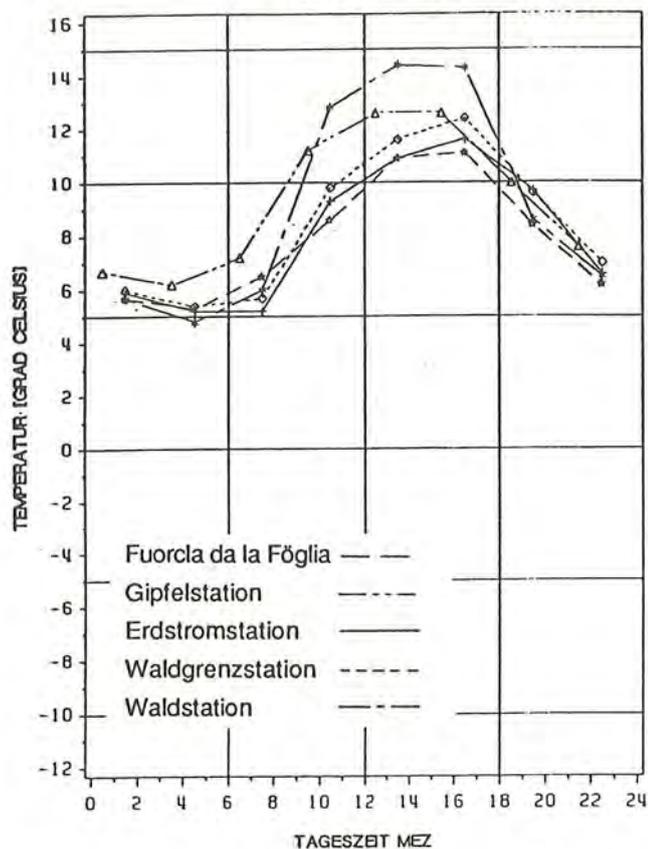
	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J
Wald/Waldgrenze	0.7	0.2	0.3									0.9
Waldgrenze/Erdströme	0.3	0.4	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4			0.5
Erdströme/Gipfel	-1.0	1.7	-0.2	0.0	0.3	0.7						
Gipfel/Fuorcla	1.0	-1.6	-0.1	-0.8	-1.3	-1.7						

Mittlere monatliche Tagesgänge

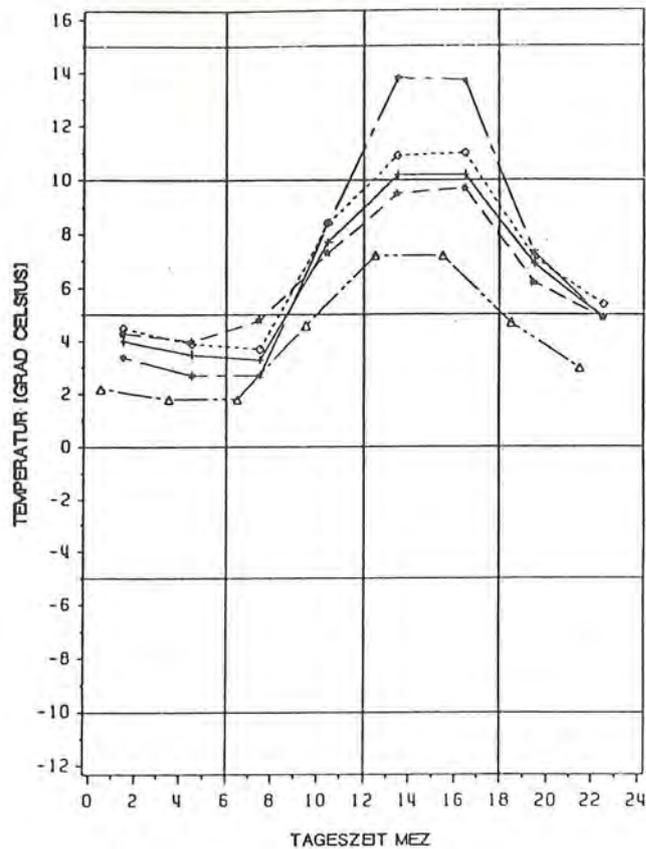
Die Abb. 14 gibt einen Einblick in die mittleren monatlichen Tagesgänge und verdeutlichen nochmals die Lufttemperaturunterschiede an den einzelnen Standorten. Es zeigt sich, was schon von AULITZKY und TURNER (1982) im Gurgltal festgestellt wurde, dass die Temperaturgänge mit der Höhe ausgeglichener werden. Besonders ausgeprägt ist dieses Phänomen in den Monaten November bis Januar. An allen Standorten sind die Temperaturgänge im Winter ausgeglichener als im Sommer, da über einer Schneedecke ein grosser Teil der Strahlung reflektiert wird und die Luft dadurch weniger stark erwärmt wird.

Bemerkenswert ist, dass die Lufttemperaturunterschiede zwischen den Standorten je nach Monat ganz anders ausfallen können. So sind zum Beispiel im September recht grosse Unterschiede feststellbar, während im Oktober und November die Kurven nahe beisammen liegen. Einzig der Waldstandort erhitzt sich am Tag immer stärker als die anderen Standorte. Vermutlich dürfte sich das aber im Winter ändern, wenn die Unterschiede der Albedo zwischen den Standorten geringer werden (Schneebedeckung), doch fehlen hier leider die Daten aus dem Wald.

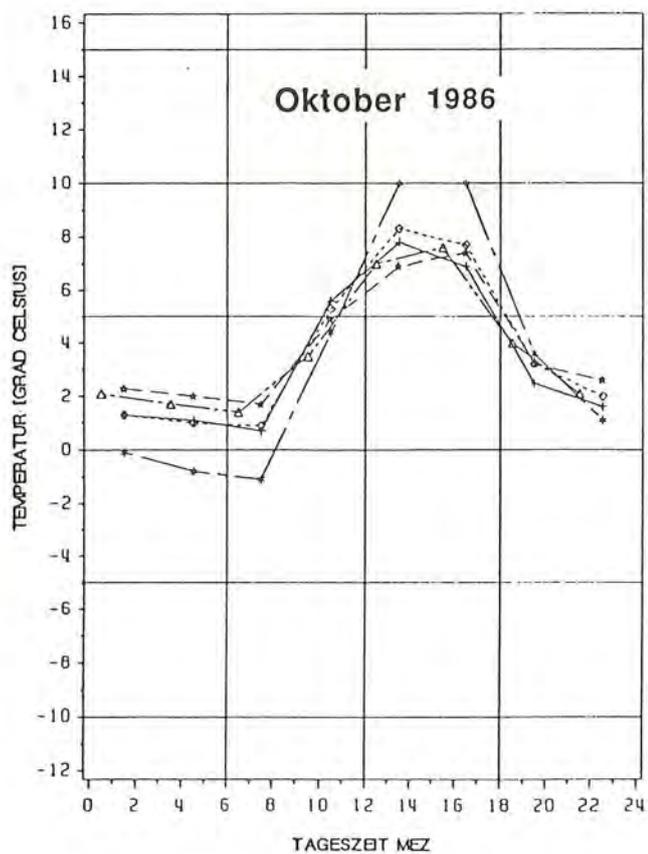
August 1986



September 1986



Oktober 1986



November 1986

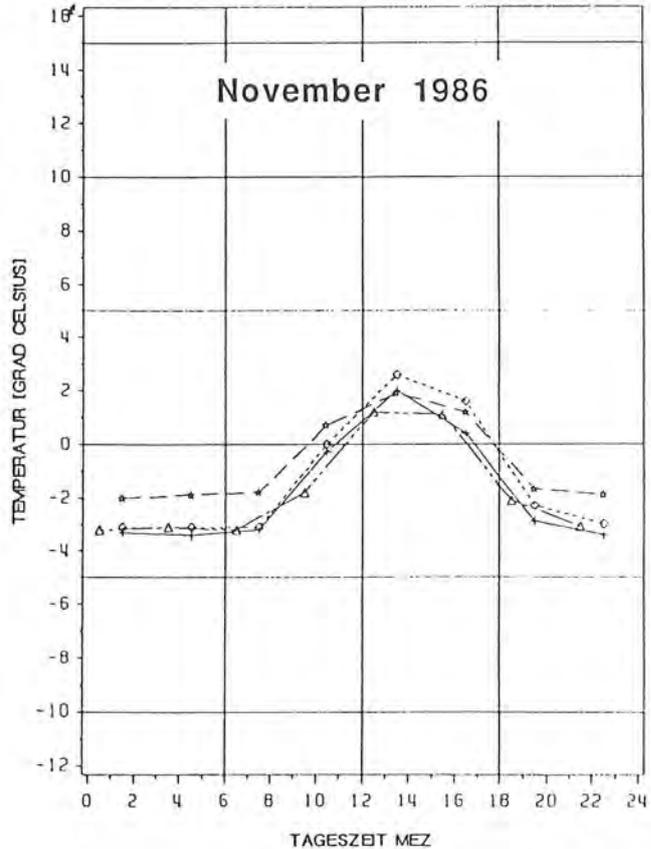


Abb. 14: Mittlere monatliche Tagesgänge der Lufttemperaturen (+150 cm) an den verschiedenen Standorten (I)

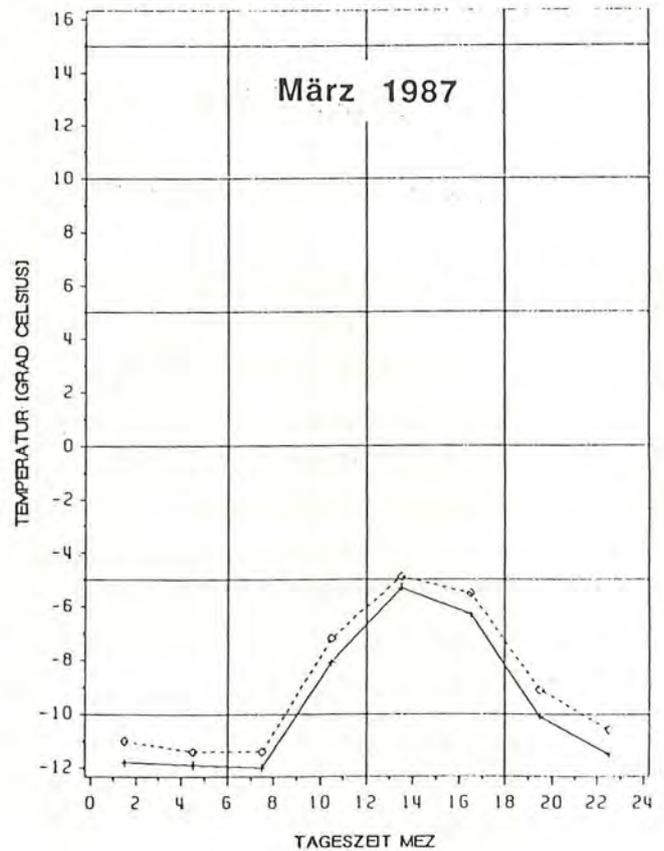
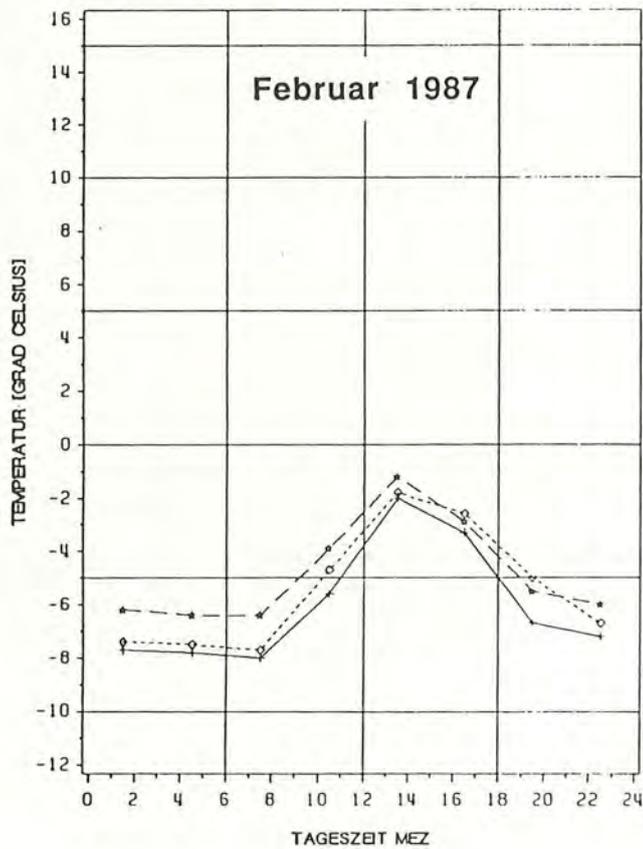
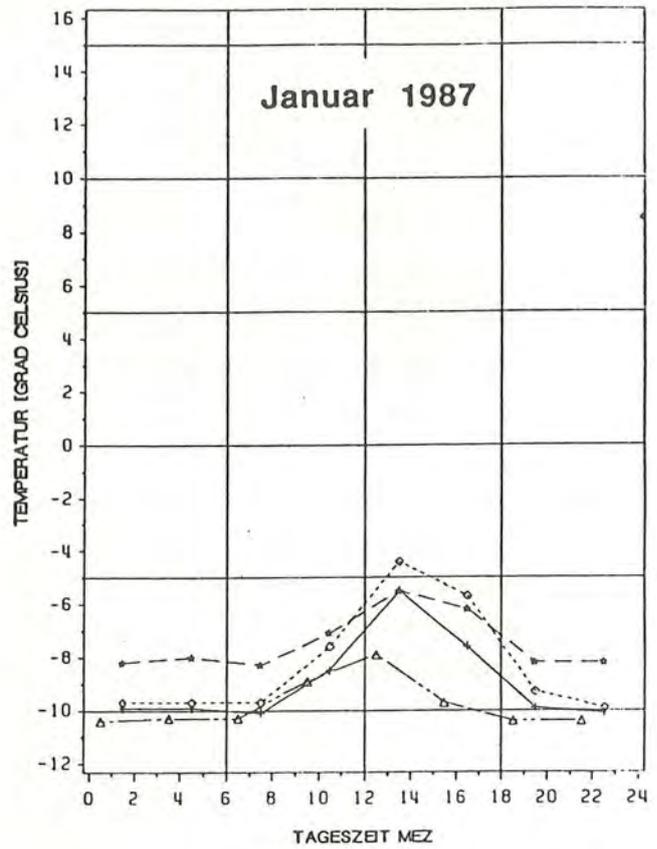
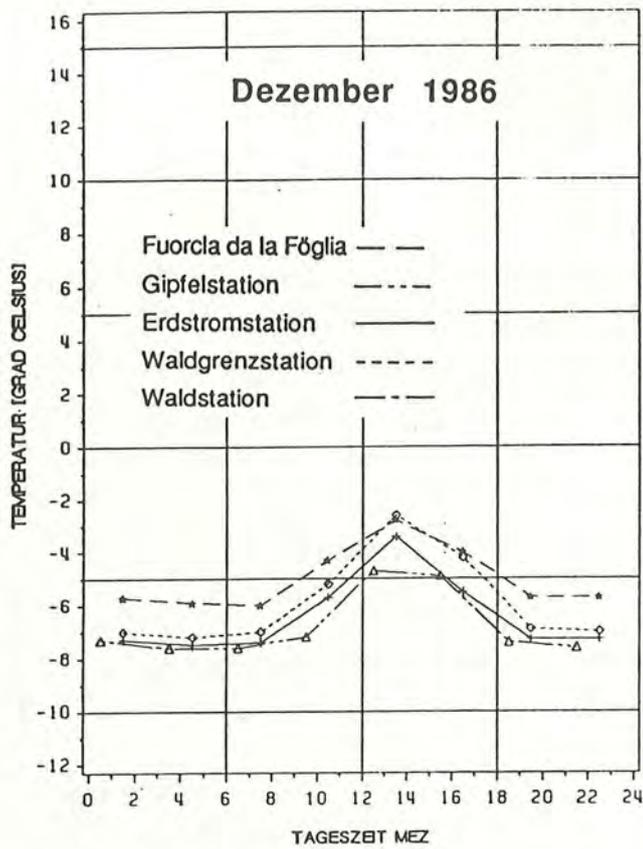


Abb. 15: Mittlere monatliche Tagesgänge der Lufttemperaturen (+150 cm) an den verschiedenen Standorten (II)

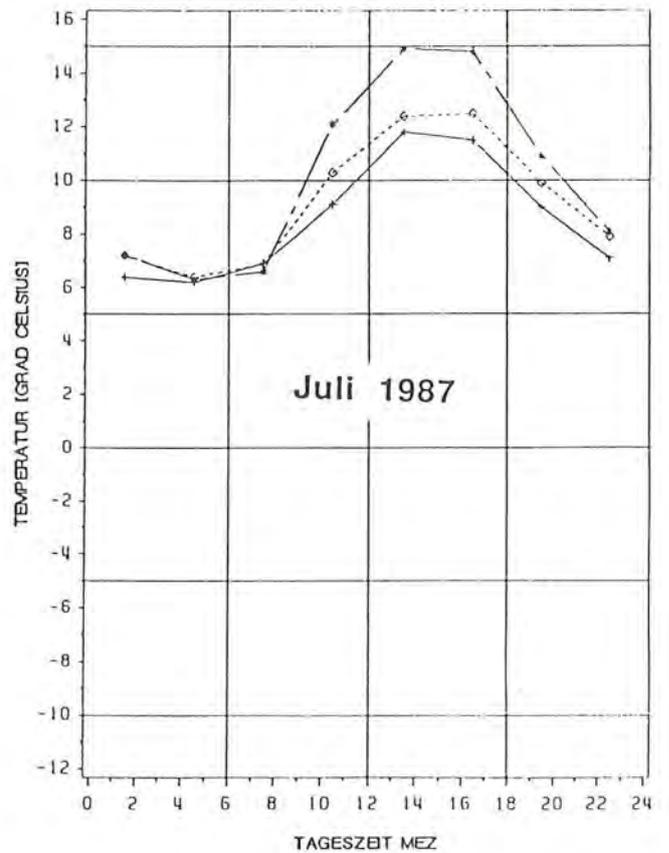
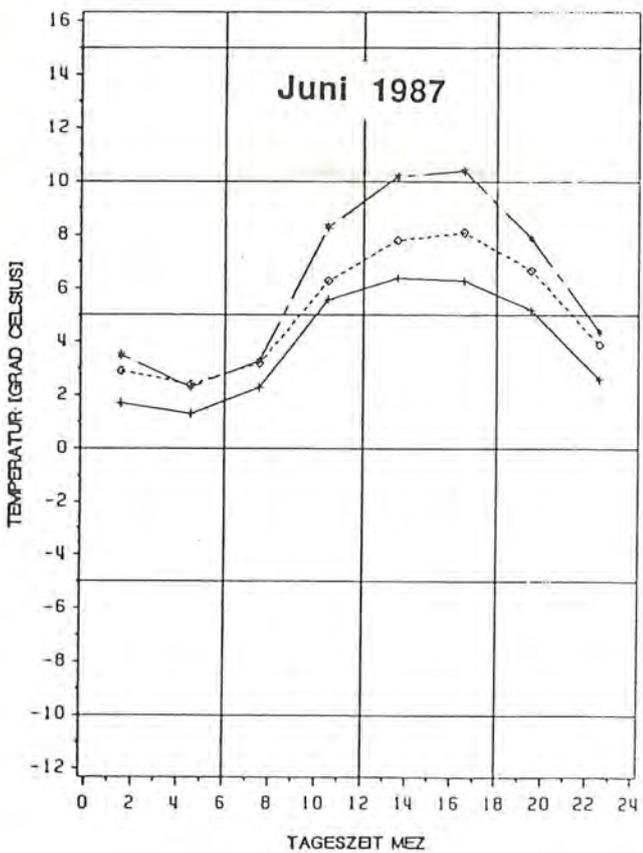
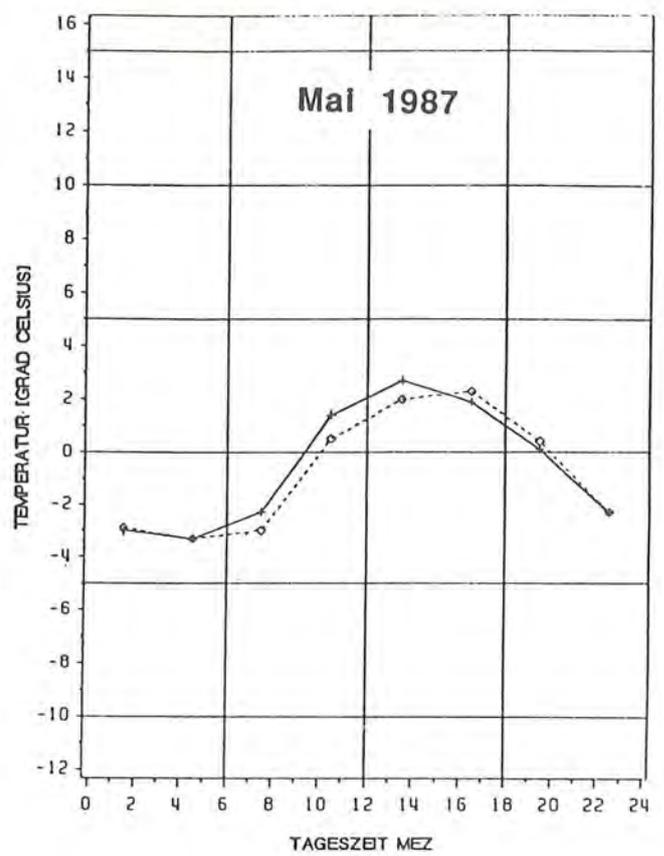
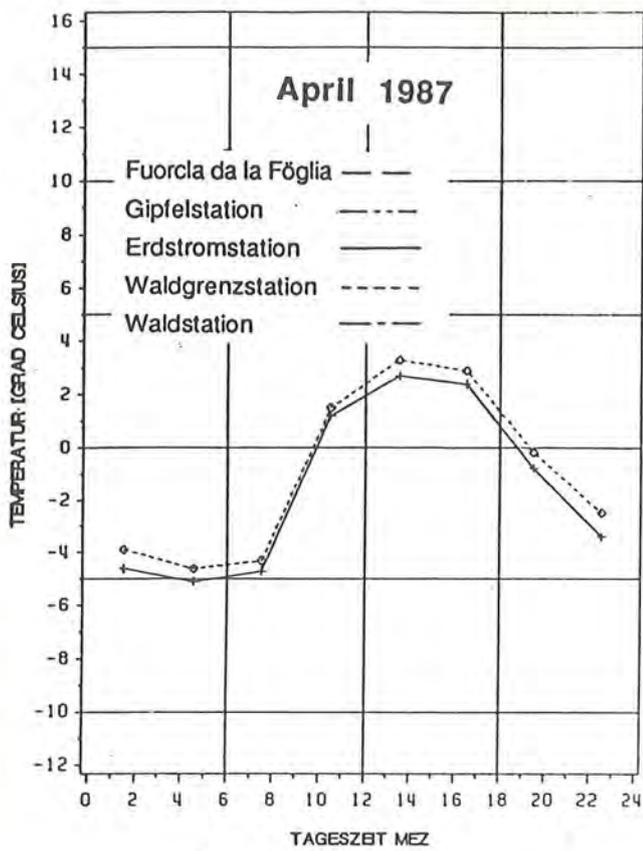


Abb. 16: Mittlere monatliche Tagesgänge der Lufttemperaturen (+150 cm) an den verschiedenen Standorten (III)

6.5.2 Der Tagesgang der Lufttemperaturen

Abb. 17 zeigt den Tagesgang der Strahlung (Globalstrahlung und langwellige Strahlungsbilanz) an zwei aufeinanderfolgenden Tagen. Am 23. September herrschte wolkenloses, schönes Wetter. Die Druckverteilung über Mitteleuropa war sehr flach, ein Hochdruckgebiet lag über Belgien. Am 24. September drang eine Kaltfront von Skandinavien nach Süden vor und erreichte am 26. September die Schweiz. Das Wetter am 24. September im Untersuchungsgebiet war bewölkt, jedoch niederschlagsfrei.

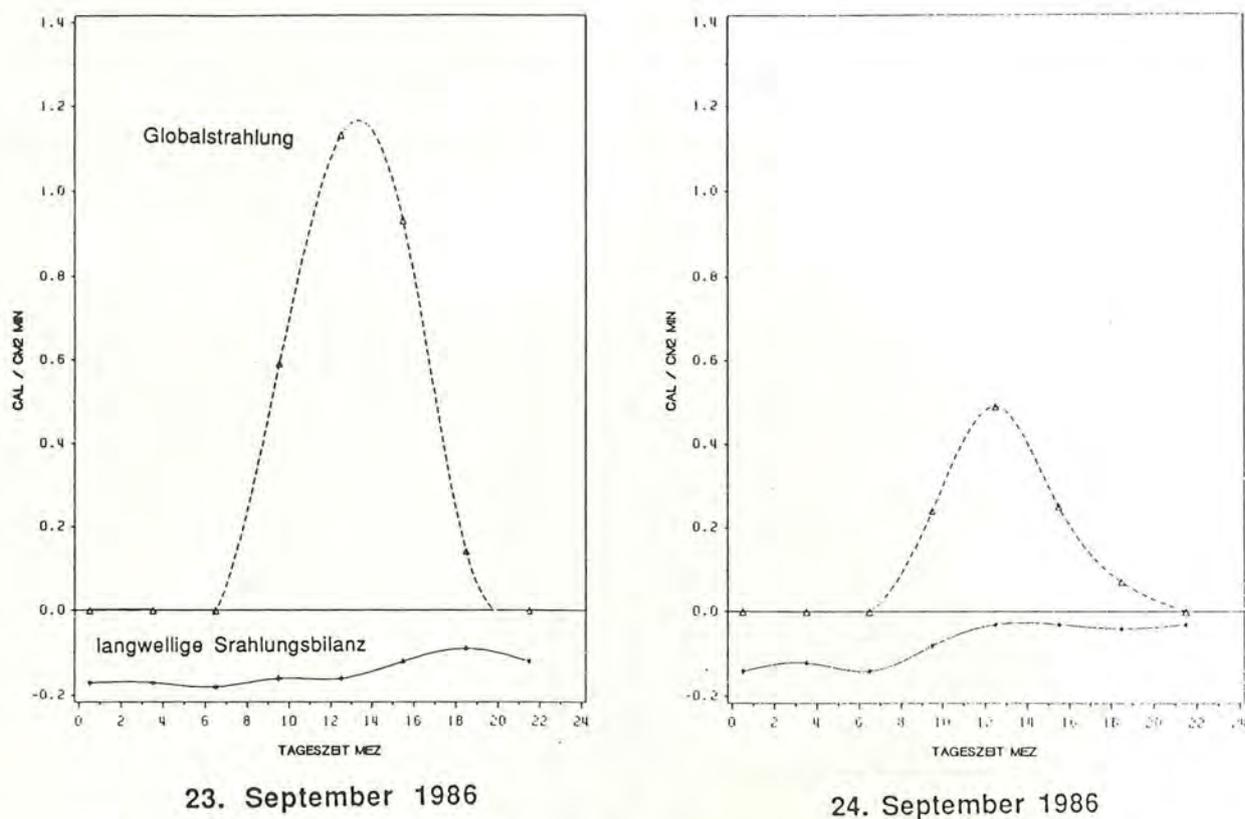


Abb. 17: Tagesgang der Globalstrahlung und der langwelligen Strahlungsbilanz am 23. und 24. September 1986.

Die Strahlung zeigte am 23. September den für diese Jahreszeit typischen Tagesgang bei Schönwetter. Am 2.Tag wurde die Globalstrahlung aufgrund der Bewölkung um rund 58% reduziert. Die langwellige Strahlungsbilanz ist an beiden Tagen ständig negativ. Der Strahlungsverlust ist am bewölkten Tag aber deutlich geringer. Die Ausstrahlung der Erde wird durch die erhöhte atmosphärische Gegenstrahlung bei Bewölkung beinahe vollständig kompensiert.

Die Tautochronendarstellungen zeigen die Auswirkungen der verschiedenen Strahlungsgänge auf die Temperaturverhältnisse. Bei allen Standorten werden erwartungsgemäss die Amplituden am 2.Tag reduziert. Die Tagesmittel der Lufttemperaturen reduzierten sich bei allen Standorten um rund 1°C .

Folgt man einer einzelnen Tautochronenlinie erhält man einen Eindruck über die vertikale Temperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt. Am 24. September sind die Tautochronen weniger stark geneigt und verlaufen gleichmässiger. Die Temperaturverhältnisse der bodennahen Luftschicht und des Bodens sind viel ausgeglichener als am Schönwettertag. Der Einfluss der täglichen Einstrahlung auf die Bodentemperaturen ist bis in eine Tiefe von 40 cm feststellbar. Bis in diese Tiefe ist ein Unterschied zwischen den beiden Tagen zu erkennen.

Von Interesse sind in diesem Zusammenhang aber vor allem die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten. Am Gipfel und im Wald traten am 23. September Strahlungsfröste auf. Im Wald war der Frost mit -2.3°C recht beträchtlich. Der Boden gefror allerdings bei keinem der Standorte. In der Nacht vom 23. auf den 24. September war der Himmel schon stellenweise mit Wolken bedeckt. Die Temperaturen sanken nicht mehr so tief und waren bis zu 2°C wärmer als in der letzten Nacht. Im Wald trat aber trotzdem noch ein schwacher Frost ein, dies im Gegensatz zum Gipfelstandort, der doch rund 270 m höher liegt. In der Nacht vom 24. auf den 25. September war der Himmel dann vollständig bedeckt und es traten keine Fröste mehr auf, die Temperaturen blieben deutlich über der 0°C -Marke.

Während des Tages gibt es bei Schönwetter beachtliche Temperaturunterschiede. Die bodennahe Luftschicht erwärmt sich im Wald bis fast 24°C , an der Waldgrenze und am Gipfel bis 17°C , an den Erdströmen bis 15°C . Bei bedecktem Himmel wurden diese Unterschiede kleiner. Der Wald erreicht noch 11°C , die Waldgrenze 12°C , Erdströme und Gipfel etwas über 10°C .

Damit lassen sich auch die monatlichen Schwankungen der Amplitudenunterschiede zwischen den Standorten erklären. Monate mit vorwiegend Schönwetter zeigen grosse Unterschiede, solche mit vorwiegend Schlechtwetter geringere (Tab. 18 auf Seite 58). Durch die Bewölkung aber nicht beeinflusst werden aber die Unterschiede der Tagesmitteltemperaturen.

Mit den grossen Amplituden setzt sich der Waldstandort klar von den anderen Standorten ab. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass in der obersten Bodenschicht steile Temperaturgradienten existieren. Solch steile Gradienten deuten auf eine schlechte Temperatur- bzw. Wärmeleitfähigkeit hin. Selbst bei Oberflächentemperaturen von -2.6°C kühlt sich der Boden nicht unter $+4^{\circ}\text{C}$ ab. Andererseits vermag der Bodenwärmestrom in der Nacht vom 23. auf den 24. September den Frost an der Oberfläche nicht zu verhindern, obwohl die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe zu jenem Zeitpunkt 5.8°C betrug.

Auf die Ursachen und Gründe für dieses unterschiedliche thermische Verhalten wird in Kapitel 7 eingegangen.

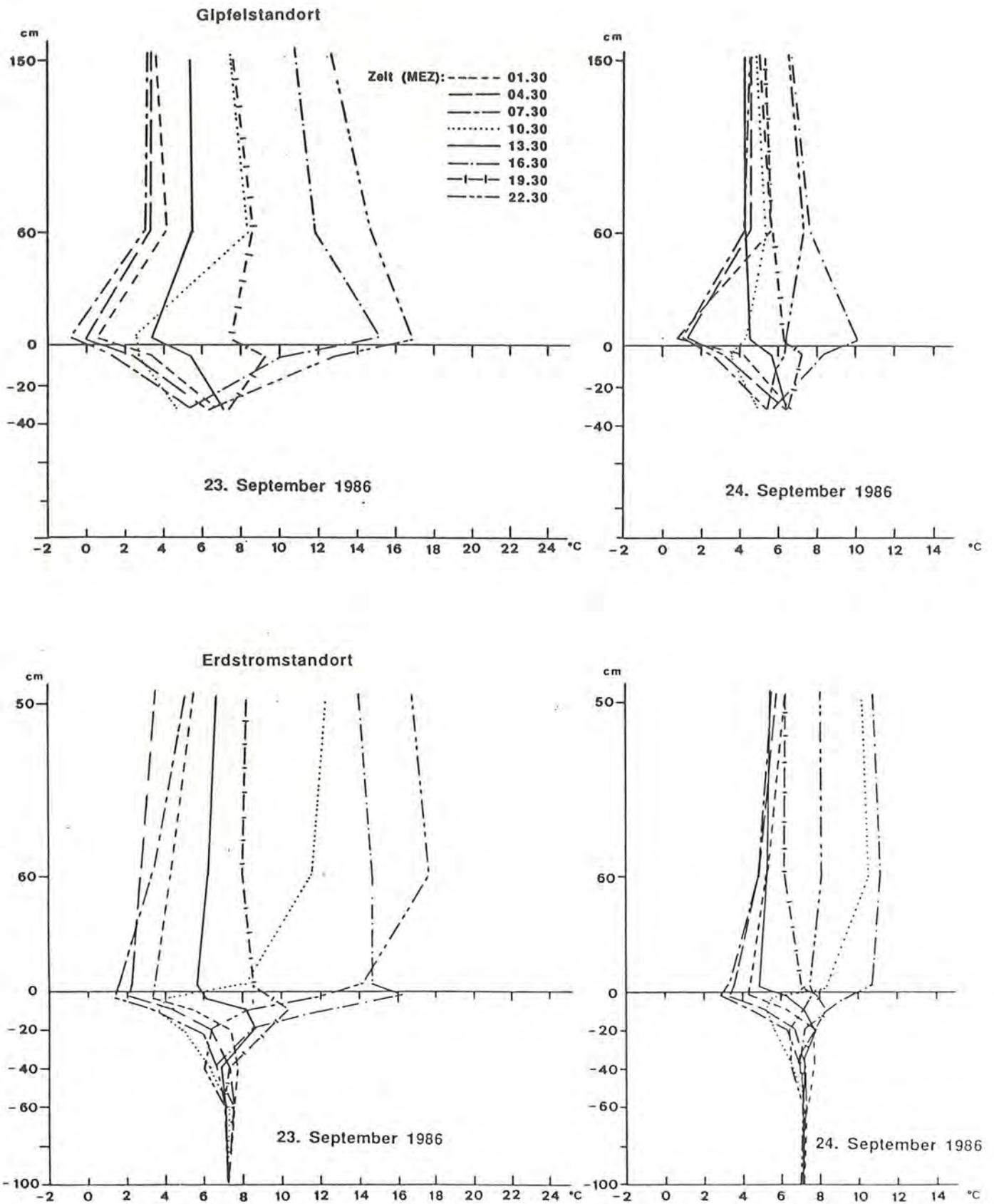


Abb. 18: Tautochronendarstellungen der Temperaturen am 23. und 24. September 1986 (I).

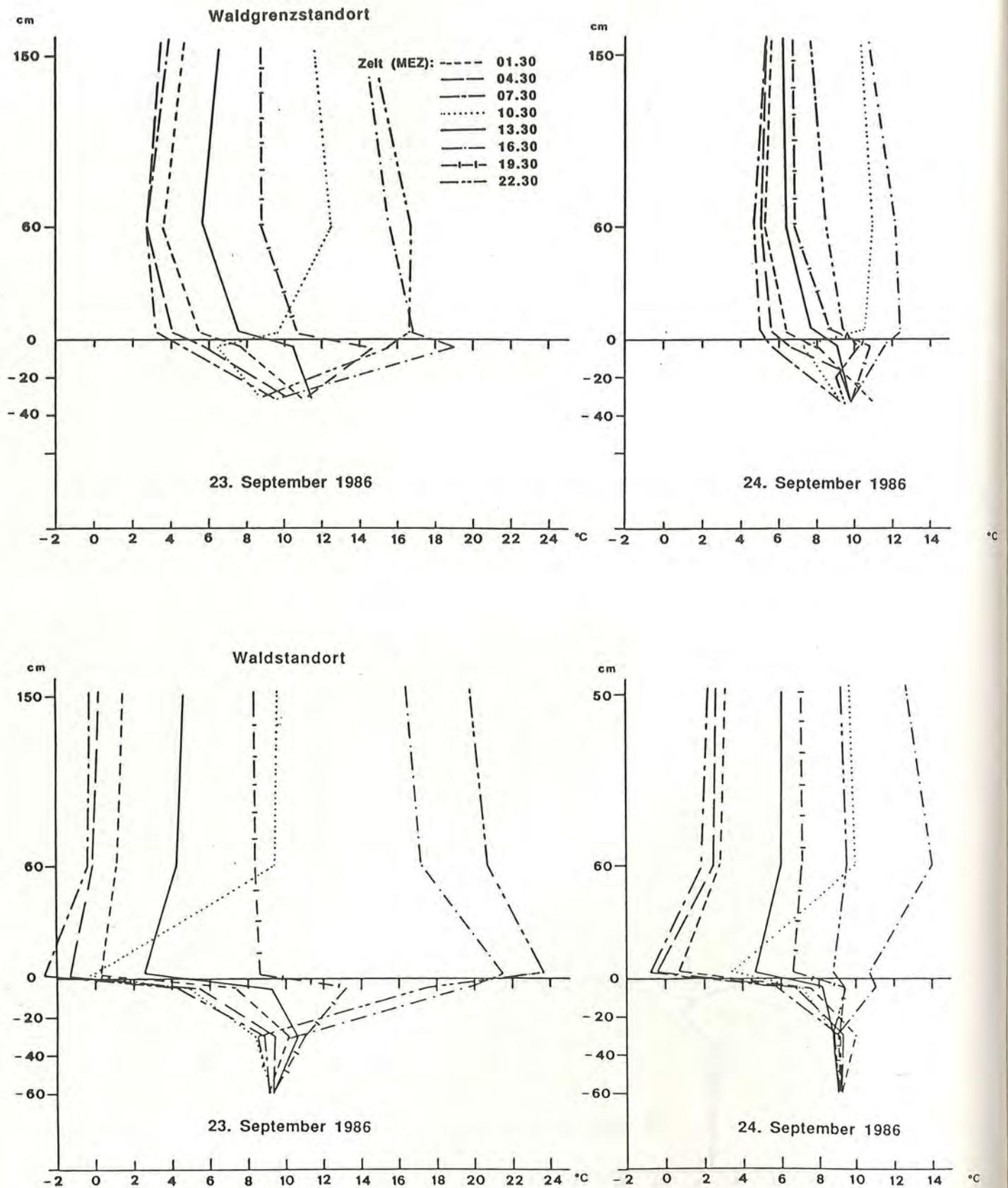


Abb. 19: Tautochronendarstellungen der Temperaturen am 23. und 24. September 1986 (II).

6.6 Die Bodentemperaturen

6.6.1 Der Jahresgang der Bodentemperaturen

Ähnlich den Lufttemperaturen zeigen auch die Bodentemperaturen einen sinoiden Tages- und Jahresgang. Dieser sinoide Gang ist im Boden bekanntlich durch zwei Gesetzmässigkeiten geprägt. Zum einen nimmt die Amplitude mit der Tiefe ab, zum andern verzögern sich die Temperaturen mit der Tiefe immer stärker, d.h. die Phasenverschiebung nimmt zu.

Abb. 20 gibt einen Überblick über die Temperaturverhältnisse bei der Erdstromstation im Untersuchungszeitraum. Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung der Tagesmittelwerte der Bodentemperaturen vom August 1986 bis Juli 1987.

Es fällt auf, dass in allen Bodentiefen fast 50% der Werte negativ sind. Der Boden war also während der Hälfte des Jahres gefroren. An der Oberfläche waren sogar 60% der Tagesmittel kleiner als 0°C , in 100 cm Tiefe noch etwa 50%.

Eine entsprechende vertikale Verteilung zeigt auch das Intervall von 10 bis 15°C . In den obersten Bodenschichten befinden sich noch 10% der Tagesmittel in diesem Intervall, in 100 cm Tiefe wurde die 10°C -Isotherme nicht mehr überschritten. Mit zunehmender Bodentiefe schwanken die Tagesmittelwerte vermehrt in den Intervallen $0/5^{\circ}\text{C}$ und $5/10^{\circ}\text{C}$. Die Verteilung der Bodentemperaturen wird mit der Tiefe also in zweifacher Hinsicht ausgeglichener:

1. nimmt die Zahl der Intervalle ab und
2. wird die Häufigkeitsverteilung gleichmässiger.

Ein erster Vergleich der verschiedenen Standorte zeigt Abb. 21. Die Graphiken wurden mit den Monatsmittelwerten konstruiert. Aus den Jahreskurven begründet sich eine mikroklimatische Zweiteilung der Standorte:

Waldgrenze und Erdströme zeigen eher hohe Wintertemperaturen, d.h. sie haben eine mächtige winterliche Schneedecke. Gipfel und Fuorcla da la Föglia haben kalte Wintertemperaturen, die Mächtigkeit der Schneedecke ist hier geringer. Dass die Isolationswirkung der Schneedecke hier die entscheidende Rolle spielt, beweist ein Vergleich mit den Lufttemperaturen in 150 cm Höhe, wo die Unterschiede wesentlich geringer ausfielen (vgl. Tab. 18 auf Seite 58). In 5 cm Höhe sind die Unterschiede schon bedeutend grösser als in +150 cm.

Aus der Graphik geht auch hervor, dass die Unterschiede im Winter viel grösser sind als im Sommer.

Vergleicht man die Kurven in 5 cm Tiefe und 5 cm Höhe miteinander, erkennt man, wie sich die Temperaturunterschiede im Boden gegenüber der Luft verringern. Dies gilt insbesondere

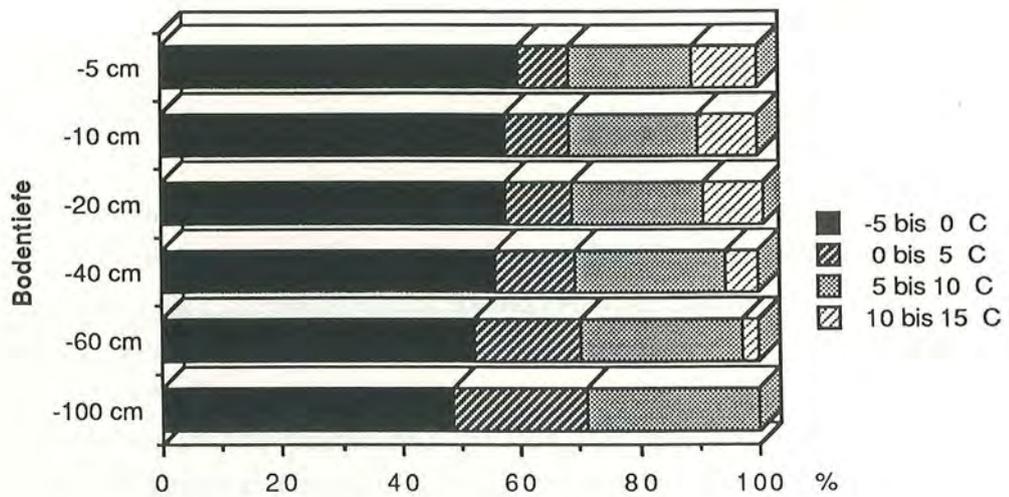


Abb. 20: Häufigkeitsverteilung der Tagesmittelwerte der Bodentemperaturen im Untersuchungszeitraum (August 1987-Juli 1987) an der Erdstromstation.

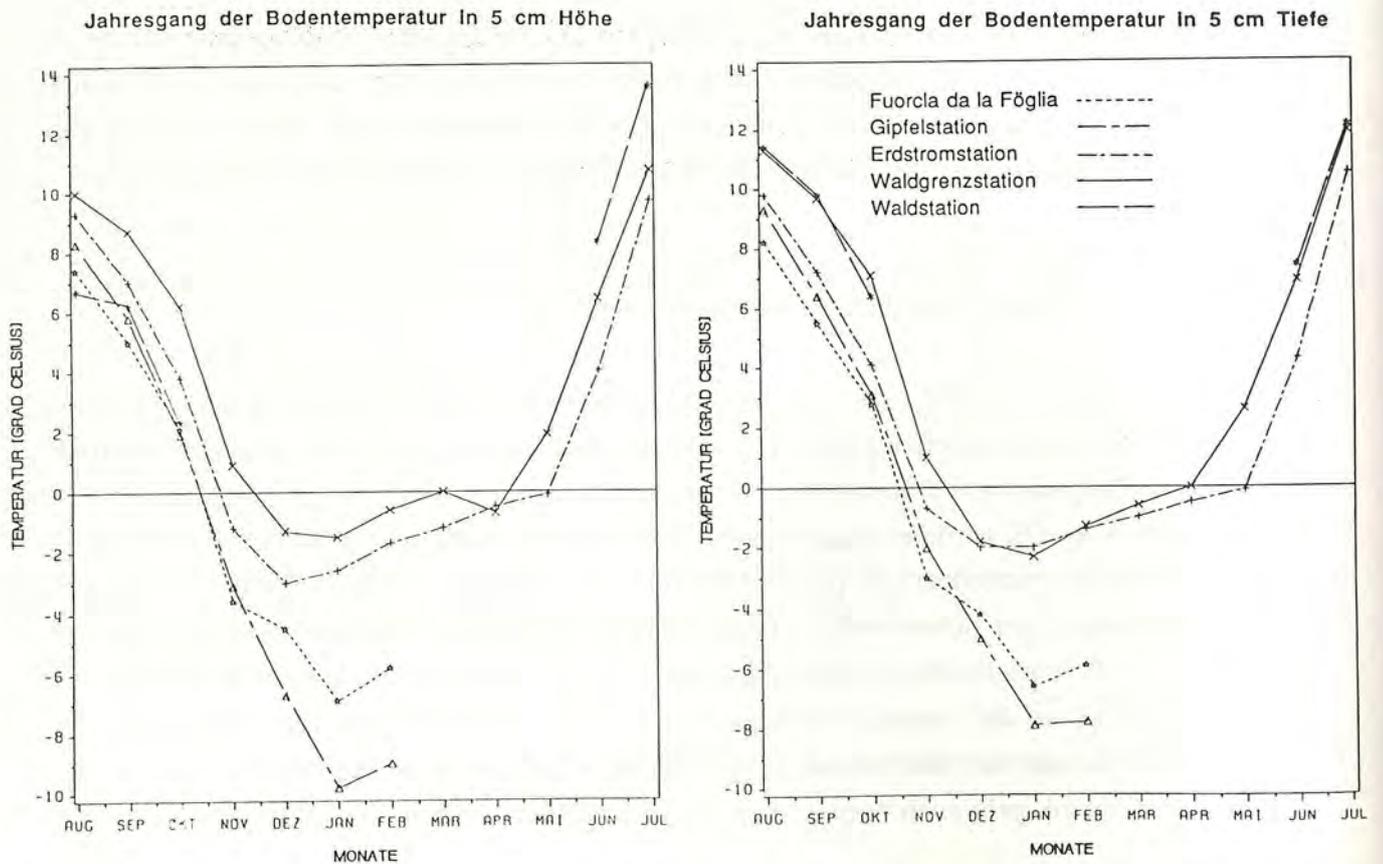


Abb. 21: Jahresgang der Luft- und Bodentemperaturen in 5 cm Höhe und 5 cm Tiefe (August 1986-Juli 1987)

für die Wald- und Waldgrenzstation, wo im Sommer Unterschiede von einigen Grad Celsius in der bodennahen Luftschicht registriert wurden, während die Bodentemperaturen praktisch identisch verliefen. Wald und Waldgrenze sind im Sommer in 5 cm Tiefe klar wärmer als die Stationen in der alpinen und subnivalen Stufe.

In Abb. 22 sind für die Monate Juli und Januar die Monatsmittel der täglichen Maxima und Minima eingetragen. Man erhält so einen Eindruck über die vertikale Temperaturverteilung und die Amplituden im Boden. Die Unterschiede zwischen Sommer und Winter treten deutlich hervor. Während die Unterschiede zwischen den Standorten im Sommer trotz einiger nicht unbedeutender Differenzen eher gleichmässig verlaufen, sind die winterlichen Differenzen frappant. Es zeigt sich, dass man auch den Gipfelstandort und die Fuorcla da la Fögliä mikroklimatisch als Standortkomplexe voneinander trennen kann.

Der Gipfelstandort kühlt sich am stärksten ab und weist selbst im Januar noch beachtliche Amplituden auf, ein Zeichen dafür, wie geringmächtig die isolierende Schneedecke gewesen sein muss. Die Fuorcla da la Fögliä weist viel geringere Amplituden und einen recht steilen Gradienten ($-3^{\circ}\text{C}/60\text{ cm}$ Tiefe) auf. Die Temperaturleitfähigkeit scheint nicht so gross zu sein wie am Gipfel- und am Erdstromstandort, wo die Gradienten nur rund -1 bis $-1.5^{\circ}\text{C}/60\text{ cm}$ Tiefe betragen. Die Waldgrenze hat einen leicht steileren Gradienten im Winter als Gipfel und Erdströme.

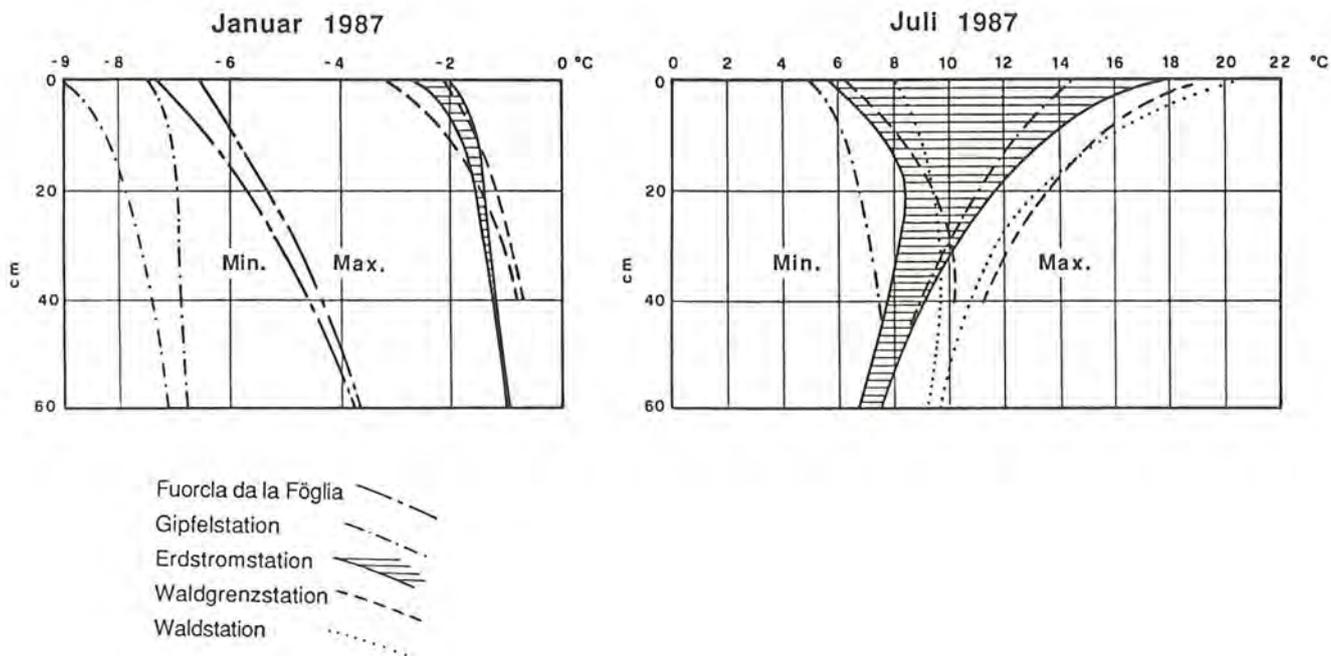


Abb. 22: Monatsmittel der täglichen Maxima und Minima der Bodentemperatur an den verschiedenen Stationen.

Im Sommer kehrt sich erwartungsgemäss der Gradient um. Wald- und Waldgrenzstation erwärmen sich am stärksten und besitzen auch die grössten Amplituden. Gipfel- und Erdstromstation haben ähnliche Temperaturverläufe.

Eine Übersicht über den Jahresverlauf der Bodentemperatur geben die Isothermendarstellungen der Abb. 23. Die Kurven sind leicht geglättet, da zur Konstruktion die 5-Tagesmittelwerte verwendet wurden. Die Darstellungen orientieren über die vertikalen Temperaturverteilungen und die Eindringtiefen der Temperaturen in den Boden. Folgt man einer horizontalen Achse, so ergibt sich der Jahresgang der Temperatur in einer bestimmten Tiefe. Die "V"-Formen der Isothermen bringen zum Ausdruck, dass die Temperaturverhältnisse mit der Tiefe ausgeglichener werden.

Vergleicht man den Wald- mit dem Waldgrenzstandort, so erkennt man, dass die Temperaturleitfähigkeit im Wald deutlich geringer sein muss. Die Isothermen dringen im Sommer weniger weit in den Boden ein als beim Waldgrenzstandort. So reicht die 14° C-Isotherme im Wald nur bis 15 cm Tiefe (im August) und 10 cm Tiefe (im Juli), an der Waldgrenze bis 35 cm, resp. 20 cm. Bereits in 5 cm Tiefe ist der Waldgrenzstandort gleich warm wie der Waldstandort, in 30 cm Tiefe aber schon durchwegs wärmer.

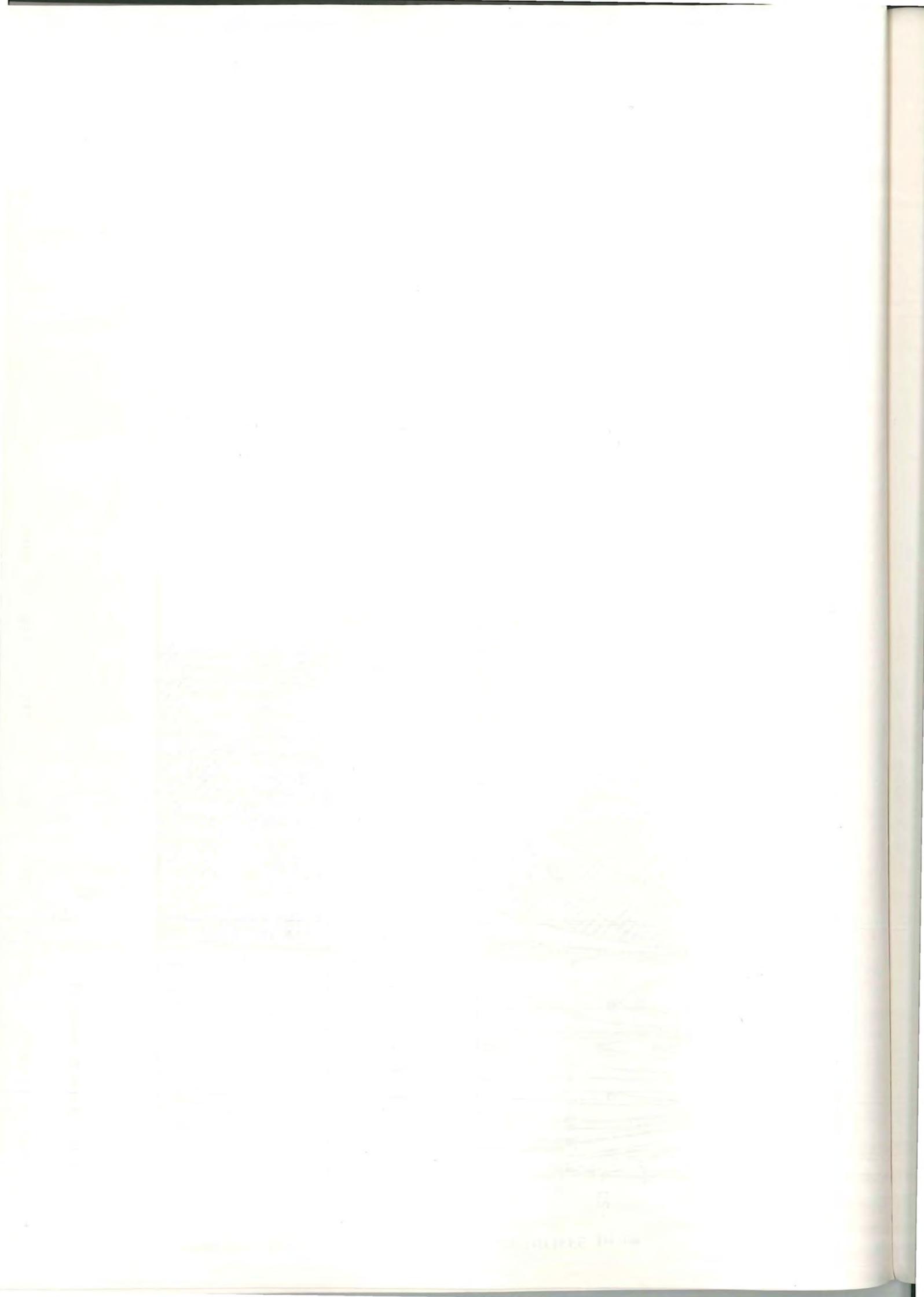
Verantwortlich für dieses unterschiedliche thermische Verhalten der Böden sind hauptsächlich 3 Faktoren:

1. Organische Substanz: Der Waldstandort besitzt stellenweise eine mächtige Rohhumusauflage, der Gehalt an Humus ist in der obersten Bodenschicht mit 14.1% viel höher als an der Waldgrenze mit 9.2%.
2. Textur: Der Anteil der Schlufffraktion an der Waldgrenze ist bedeutend höher als in Wald. Der Boden ist dadurch kompakter, der Anteil der luftgefüllten Poren geringer.
3. Wassergehalt: Die leichte Verdichtung und die einseitige Korngrössenzusammensetzung führen an der Waldgrenzstation dazu, dass sich zeitweise Wasser staut. Der Wassergehalt dürfte höher sein als beim Waldstandort.

Dies führt dazu, dass die Temperaturleitfähigkeit an der Waldgrenzstation höher ist als im Wald, der Boden erwärmt sich daher schneller und gleichmässiger.

Bei allen Stationen gefror der Boden von oben her und der Frost erreichte mit einiger Verzögerung jeweils alle Messtiefen. Bei der Erdstromstation dauerte es mehr als 2 Monate, bis 100 cm Boden durchgefroren war. Bei der Erdstrom- und der Waldgrenzstation taute der

Abb. 23: Isothermendarstellungen der 5-Tagesmittel der Bodentemperaturen.



Boden auch wieder von oben her auf. Das Auftauen ging aber rascher vor sich als das Gefrieren. Bei der Erdstromstation taute der oberste Meter des Bodens innerhalb von etwas mehr als einem Monat vollständig auf. Die frostfreie Zeit nimmt also mit der Bodentiefe zu (vgl. Abb. 20 auf Seite 70). Dies ist vor allem für Baumgewächse bedeutsam, da dadurch die Gefahr der Frosttrocknis reduziert wird. Leider fehlen hierzu Angaben aus dem Wald.

Eindrücklich zeigt sich die Wirkung der winterlichen Schneedecke auf das Temperaturregime des Bodens. Bei der Waldgrenz- und Erdstromstation werden die Temperaturschwankungen stark reduziert. Zu Beginn des Winters sind noch leichte Schwankungen festzustellen. In dieser Zeit ist der Boden auch am kältesten, ab Mitte Februar steigen die Temperaturen auf -1° bis 0° C an und bleiben in der Folgezeit nahezu konstant bis zur Ausaperung. Ab Mitte Februar erhöhte sich die Mächtigkeit der Schneedecke und der Boden wurde nicht mehr von den Lufttemperaturen beeinflusst.

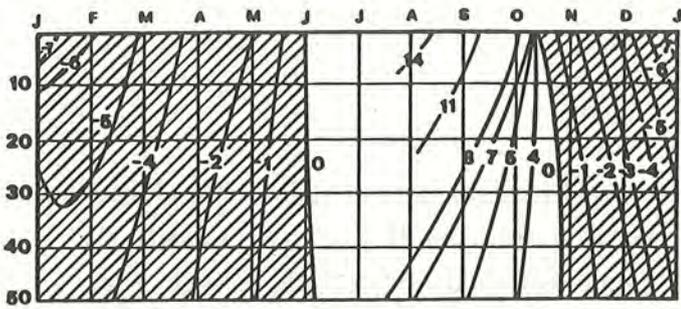
In den Monaten Dezember bis Januar sind drei markante Temperaturstürze feststellbar (vgl. Abb. 12 auf Seite 55). Im Boden konnten diese in abgeschwächter Form nachgewiesen werden: beim Erdstromstandort drangen die tiefen Temperaturen weiter in den Boden ein als beim Waldgrenzstandort. Doch selbst Lufttemperaturen von fast -30° C konnten den Boden nicht mehr unter -3.5° C abkühlen. Im März vermochten Lufttemperaturen von -20° C den Boden beinahe nicht mehr zu beeinflussen.

Ganz anders verhält es sich bei der Gipfelstation. Hier wurden im Winter Temperaturschwankungen fast wie im Sommer registriert. Der Boden gefror innert weniger Tage bis in 40 cm Tiefe und kühlte sich stark ab. Bei den Temperaturstürzen im Winterhalbjahr wurden Bodentemperaturmittelwerte bis zu -9.5° C erreicht! Im Januar wurden selbst in -34 cm Tiefe noch -8.4° C gemessen.

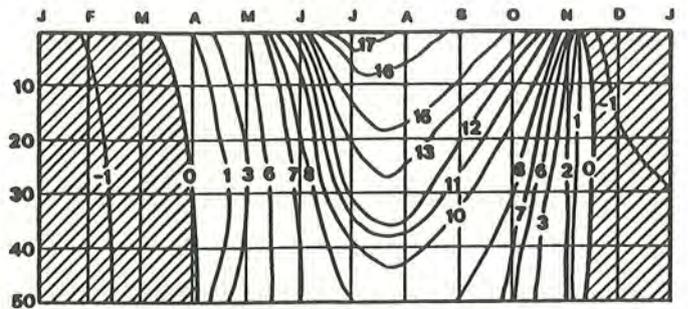
Der Standort auf der Fuorcla da la Föglia nimmt eine Mittelstellung ein. Die Schwankungen der Bodentemperaturen sind zwar beträchtlich, doch deutlich geringer als auf dem Gipfel des Munt Chavagl.

In Abb. 24 sind die Isothermen noch stärker geglättet. Zur Konstruktion wurden die Monatsmittelwerte der täglichen Maxima und Minima benützt. Durch den Vergleich der Maxima- mit den Minima-Isothermen kann man die durchschnittlichen Temperaturschwankungen zu einem bestimmten Zeitpunkt erkennen. Ist der Boden gefroren, sind diese Schwankungen bei der Waldgrenz- und Erdstromstation praktisch gleich Null, bei der Fuorcla da la Föglia maximal 2° C, auf dem Gipfel des Munt Chavagl 3° C.

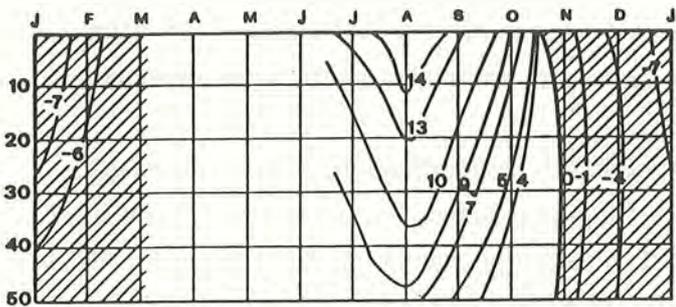
Die Kurven zeigen auch, wie unterschiedlich weit die sommerliche Erwärmung und die winterliche Abkühlung in den Boden eindringen. Gut erkennbar ist auch die Verzögerung des Jahresgangs mit der Tiefe.



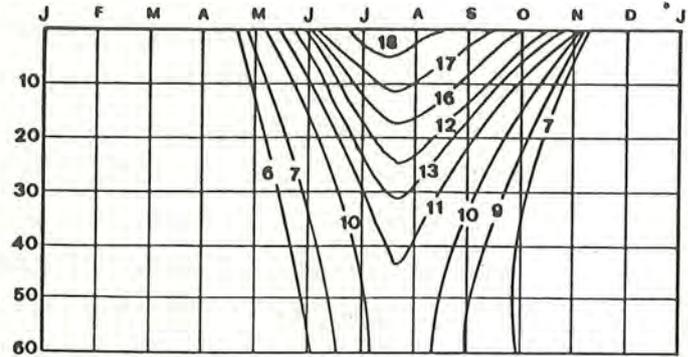
Fuorcia da la Föglia



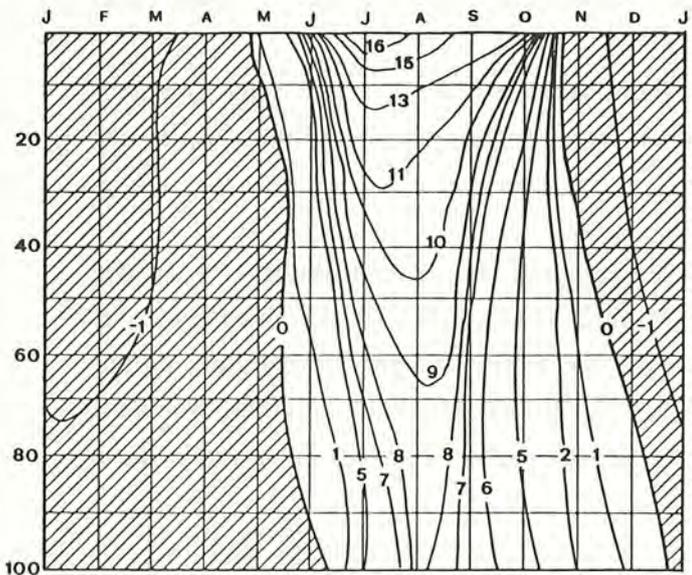
Waldgrenzstandort



Gipfelstandort

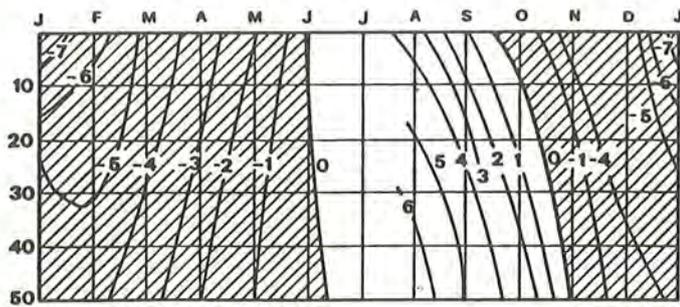


Waldstandort

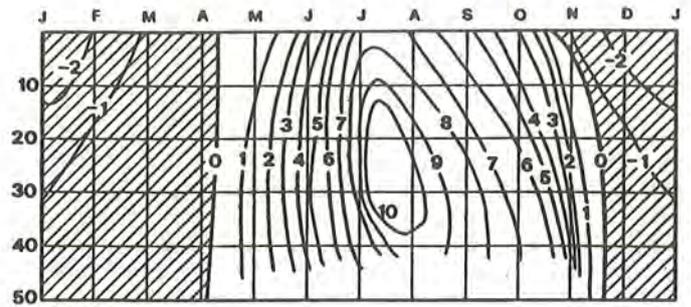


Erdstromstandort

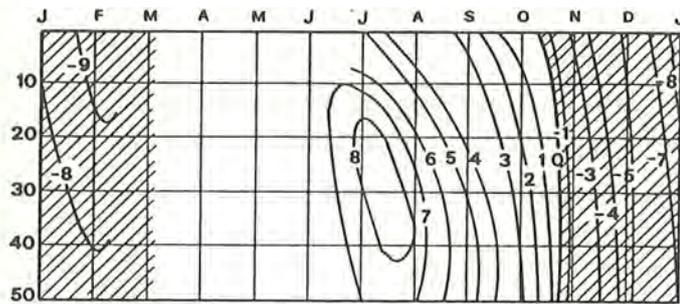
Abb. 24: Isothermen der täglichen Maxima an den verschiedenen Standorten.



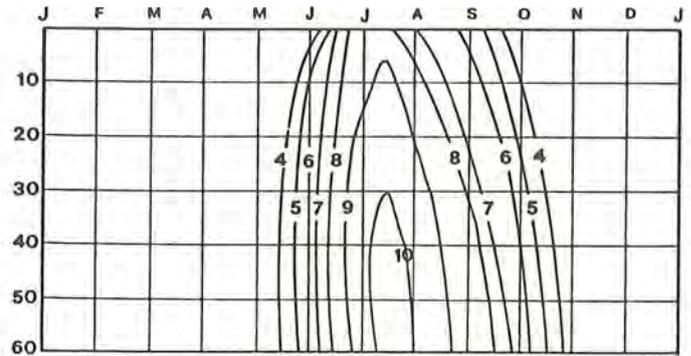
Fuorcla da la Föglla



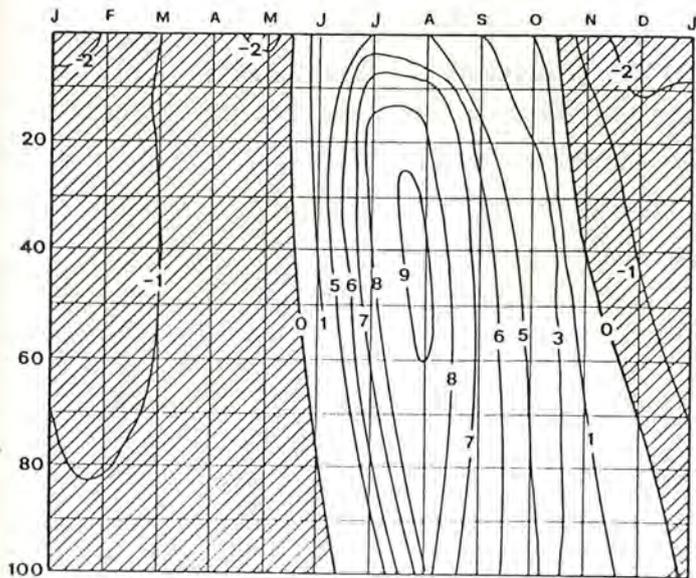
Waldgrenzstandort



Gipfelstandort



Waldstandort



Erdstromstandort

Abb. 25: Isothermen der täglichen Minima an den verschiedenen Standorten.

Im Sommer zeigt sich ein interessantes Phänomen: die Maxima-Isothermen sind stets nach unten gekrümmt, die Minima-Isothermen sind im oberen Bodenteil nach aufwärts, im unteren Bodenteil nach abwärts gekrümmt. Bei den mittleren täglichen Maxima wird der Jahresgang mit der Tiefe ausgeglichener, bei den mittleren täglichen Minima ist bis zu einer bestimmten Tiefe genau das Gegenteil der Fall. Erst ab dieser Tiefe verringert sich die Jahresamplitude gegen unten zu wieder, bis schliesslich keine Jahresschwankungen mehr feststellbar sind.

Diese merkwürdige Erscheinung lässt sich physikalisch folgendermassen erklären: Die mittleren täglichen Maxima werden direkt durch die Erwärmung der Bodenoberfläche gesteuert. Der Bodenwärmestrom am Tag ist gegen unten gerichtet, also nach Definition negativ (HÄCKEL, 1985). Aus leicht einsehbaren Gründen erreichen tiefer gelegene Bodenschichten niemals so hohe Temperaturen wie die Bodenoberfläche, die Jahresamplitude wird kleiner. Die tägliche Wärmewelle dringt nur bis in eine bestimmte Tiefe in den Boden ein, es wird also nicht das ganze Pedon erwärmt.

In der Nacht kühlt sich der Boden von oben her wieder ab. Der Temperaturgradient und damit auch der Wärmestrom kehrt sich um. Da sich der Boden von oben her nur kontinuierlich abkühlt, bleibt in der Tiefe der negative Bodenwärmestrom vom Tag her erhalten. Der Bodenwärmestrom ist bis zu einer bestimmten Tiefe z also positiv, wechselt aber dann seine Richtung und wird wieder negativ, da durch die nächtliche Abkühlung die wärmsten Bodenpartien in der Tiefe z anzutreffen sind. Diese Tiefe z wandert von Sonnenuntergang an von der Erdoberfläche in die Tiefe bis zu einer maximalen Tiefe z_{\max}^2 (vgl. Abb. 26).

Mit zunehmender Entfernung vom Ausgangsort verringert sich der Bodenwärmestrom, da immer mehr Bodenvolumen erwärmt werden muss. Als Folge davon verkleinern sich die Amplituden der jeweils betrachteten Temperaturwerte (Minima, Maxima, Mittelwerte) in Richtung des Wärmefflusses. An seinem "Ursprungsort" sind die Amplituden am grössten. Die Krümmungsrichtung der Isothermen geben daher auch die Richtung des Bodenwärmestroms an und es erklärt sich auch, wieso die Kurven immer in der gleichen Art angeordnet sein müssen.

2 Randbedingungen:

1. Dieses Modell gilt nur für die erste Hälfte der Vegetationsperiode, wenn der Boden in der Tiefe kälter ist als an der Oberfläche.
2. Der Boden muss genügend mächtig sein, damit nicht das ganze Pedon am Tag erwärmt werden kann.

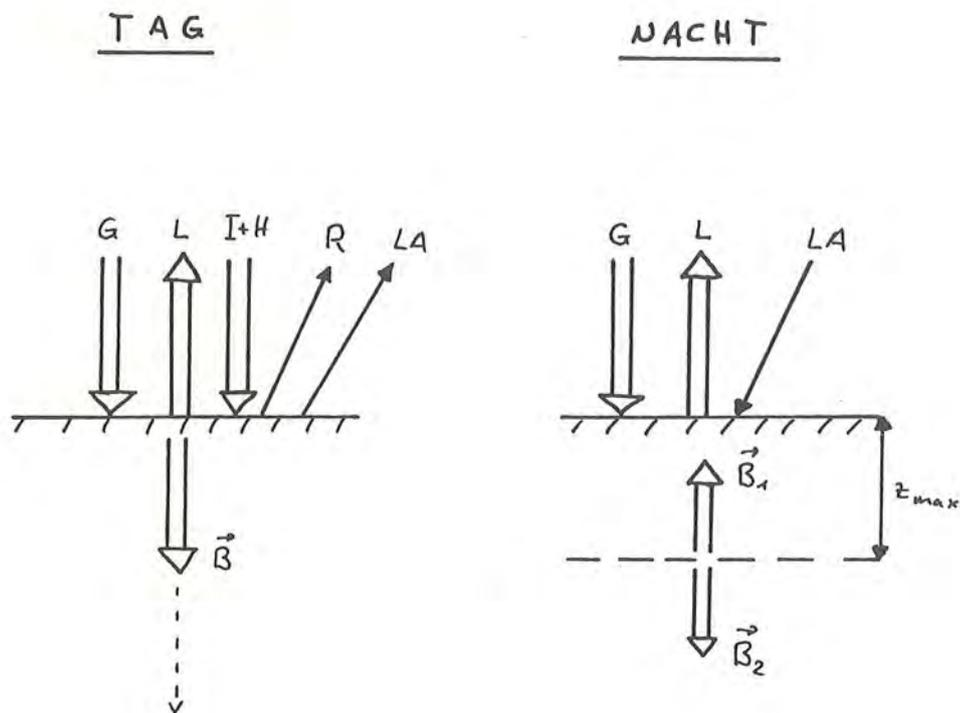


Abb. 26: Energieflüsse an der Bodenoberfläche. Dargestellt sind die Verhältnisse am Tag und in der Nacht. Nähere Erläuterungen im Text.

- L= langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche
- G= langwellige atmosphärische Gegenstrahlung
- I+H= Globalstrahlung (direkte und diffuse kurzwellige Einstrahlung)
- B= Bodenwärmestrom
- R= Reflexion
- LA= latente Wärme
- z= Bodentiefe

Zusammenfassend kann man bezüglich des Bodentemperaturregimes bisher folgendes festhalten:

Im Sommer und im Winter bestehen nicht die selben Unterschiede zwischen den Stationen. Die Standorte können jeweils zu unterschiedlichen Komplexen geordnet werden.

	Sommer	Winter
Standortskomplex	Wald Waldgrenze	Wald ? Waldgrenze Erdstrom
	Erdstrom Gipfel Fuorcla	Fuorcla
		Gipfel

Im Sommer ergibt sich ein Unterschied zwischen den Stationen im Waldbereich und denen oberhalb der Waldgrenze. Im Winter spielen vor allem die Schnee- (bzw. Wind-)verhältnisse eine entscheidende Rolle.

TURNER (1980) unterscheidet 4 Haupttypen des Mikroklimas im Hochgebirge und benützt dazu die beiden Parameter Strahlung (R) und Wind (W). Die Indizes h (high) und l (low) bezeichnen die jeweiligen Intensitäten.

1. Sunny windward (R_h, W_h)
2. Sunny lee (R_h, W_l)
3. Shaded windward (R_l, W_h)
4. Shaded lee (R_l, W_l)

Zur feineren Unterteilung dieser Typen verwendet TURNER zwei weitere Parameter, nämlich die Vegetationsbedeckung (V) und die Schneedecke (S) (vgl. Abb. 27). Nach diesem Vorschlag können die untersuchten Standorte in folgende Klassen eingeteilt werden:

1. Waldstandort: R_h, W_l, V_h, S_h (S_h ist unsicher)
sonniger, windgeschützter Standort mit z.T. dichter Vegetationsdecke und hoher winterlicher Schneedecke.
2. Waldgrenzstandort: R_h, W_h, V_m, S_h
sonniger, windexponierter Standort mit einer mittleren Vegetationsbedeckung und hoher winterlicher Schneedecke.
3. Erdstromstandort: R_h, W_h, V_l, S_h
sonniger, windexponierter Standort mit geringer Vegetationsbedeckung und hoher winterlicher Schneedecke.
4. Gipfelstandort: R_h, W_h, V_l, S_l
sonniger, stark windexponierter Standort mit geringer Vegetationsbedeckung und geringer winterlicher Schneedecke.
5. Fuorcla da la Fögliä: R_h, W_h, V_l, S_m
sonniger, stark windexponierter Standort mit geringer Vegetationsbedeckung und mittlerer winterlicher Schneedecke.

Vergleicht man den Waldgrenz- und den Erdstromstandort mit dem Gebiet vor den Erdströmen, so dürfte die ersten beiden Standorte bei der Schneedecke eigentlich nicht den Index h haben. Um diese Standorte aber von den anderen abzugrenzen, schien es doch vorläufig sinnvoll die Einteilung so vorzunehmen. Es scheint aber, dass man den Faktor Schneedecke mit vier Intensitätsstufen versehen sollte.

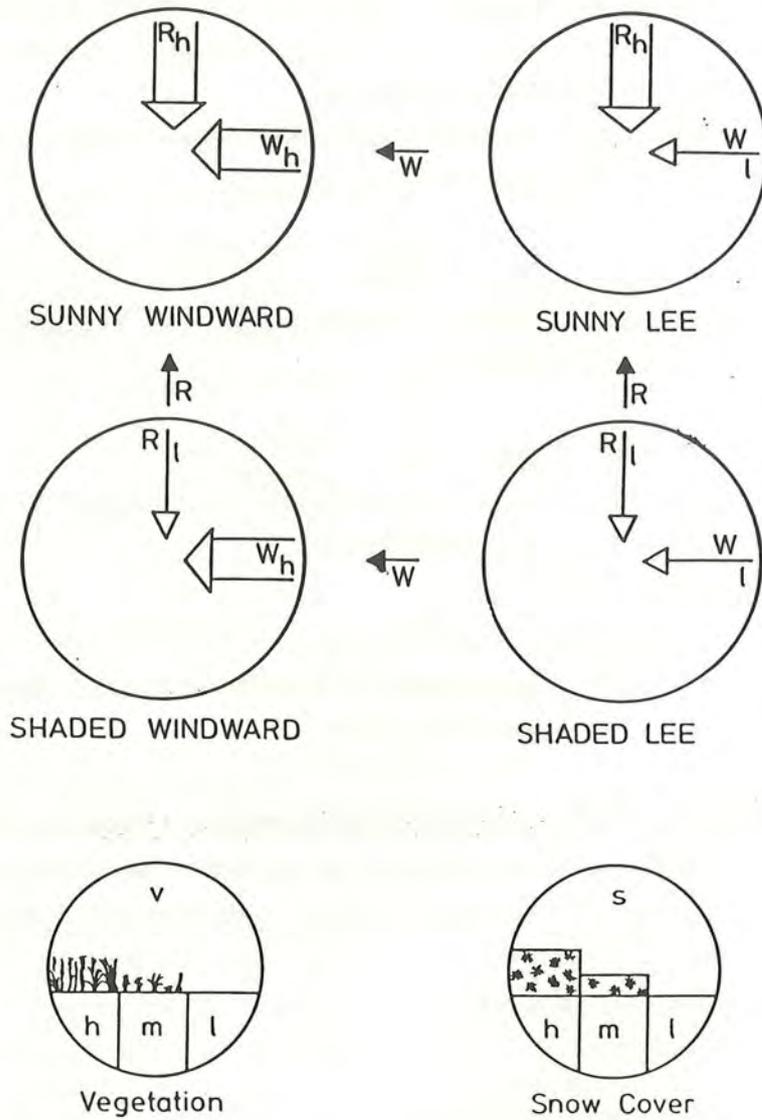


Fig. 1. Upper part: Model for classification of alpine micro-climates (site climates). The four main types are based on high and low slope irradiance (R) and wind speed (W), respectively. The five intermediate sub-types (intermediate values of one or both factors) are omitted. Lower part: Important additional site characteristics of vegetation cover (V) dense (h), sparse (m), or absent (l); snow cover (S) deep (h), mean (m), or scarce (l).

Abb. 27: Klassifikation des Mikroklimas im Hochgebirge (aus TURNER 1980)

6.6.2 Der Tagesgang der Bodentemperaturen

Die bisher diskutierten Resultate basierten hauptsächlich auf Mittelwerten und Extrema. Dadurch geht viel Information verloren. Es sollen daher die genauen Tagesgänge der Bodentemperatur kurz erläutert werden. Als Beispiel wurde der 6. August 1986 gewählt. An diesem Tag herrschte schönes, wolkenloses Wetter.

Da nicht alle Temperaturmessungen in der gleichen Tiefe registriert wurden, erschwert sich ein Vergleich. Einzig das -5 cm Niveau ist bei allen Stationen identisch. Auf der Fuorcla da Fögliä gab es hier die stärksten täglichen Temperaturschwankungen von 20.5° C. Die Gipfelstation zeigt noch eine Amplitude von 14.7° C, Erdstrom- und Waldgrenzstation eine von 13.9° C. Die Waldgrenzstation war dabei aber ständig rund 2° C wärmer. Der Waldstandort zeigt erwartungsgemäss wieder eine höhere Amplitude von 15.1° C.

Der Wärmetransport im Boden lässt sich analog zum Darcy-Gesetz wie folgt definieren:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = K \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (I)$$

Diese Gleichung gibt die Beziehung zwischen der Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Zeit (t) und der Strecke (x) an. T bedeutet dabei die Temperatur. Der Koeffizient K wird Temperaturleitfähigkeit oder Wärmediffusität genannt. K ist ein Mass für die Erwärmbarkeit eines Bodens und gibt die Temperaturänderung an, welche durch Zufuhr jener Wärme erzeugt wird, die bei einer Einheit des Temperaturgradienten in dieses Bodenvolumen fliesst. Es gilt auch folgende Beziehung:

$$K = \frac{\lambda}{c} \quad (II)$$

Die Temperaturleitfähigkeit ist also abhängig von der Wärmeleitfähigkeit (λ) und der spezifischen Wärmekapazität (c). Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt K zunächst zu, sinkt aber nach einem bestimmten Wassergehalt wieder leicht ab, da die Wärmekapazität bei höherem Wassergehalt stärker ansteigt als die Wärmeleitfähigkeit (HARTGE, 1978, S.272).

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung 2. Ordnung (Gl. I) lautet nach Carslaw und Jäger 1959 (in MONTEITH 1982):

$$T(z,t) = \bar{T} + A_0 \cdot \exp(-z(\omega/2K)^{1/2}) \cdot \sin(\omega t - z(\omega/2K)^{1/2}) \quad (III)$$

Dabei bedeutet ω die Frequenz in Sekunden (1 Tag oder 1 Jahr), z die Bodentiefe in cm von der Bodenoberfläche aus und A_0 die Amplitude der Temperatur an der Bodenoberfläche. Setzt man $z=0$ (Bodenoberfläche), so reduziert sich die Gleichung auf:

$$T(z=0,t) = \bar{T} + A_0 \cdot \sin \omega t \quad (\text{IV})$$

Vergleicht man Gleichung IV mit Gleichung III, wird die Phasenverschiebung und die Amplitudenänderung mit der Bodentiefe sofort ersichtlich. Betrachtet man die Amplitude in zwei verschiedenen Bodentiefen z_1 und z_2 , so ergibt sich nach einigen einfachen Umformungen:

$$A_1/A_2 = \exp[(z_2-z_1) \cdot (\omega/2K)^{1/2}] \quad (\text{V})$$

Daraus folgt

$$K = \frac{\omega}{2} \cdot [(z_2-z_1)/\ln(A_1/A_2)]^2 \quad (\text{VI})$$

Aus den Temperaturamplituden (A_1 und A_2) in den verschiedenen Tiefen (z_1 und z_2) lassen sich also nach Gleichung VI die Temperaturleitfähigkeiten berechnen.

In Tab. 20 sind die berechneten Werte zwischen den einzelnen Niveaus aufgeführt. Man stellt fest, dass z.T. erheblich zu hohe Werte von K auftreten. Bei der Erdstromstation, wo am meisten Messniveaus zur Berechnung zur Verfügung standen, erhält man das beste Bild über die vertikale Verteilung von K . Die Temperaturleitfähigkeiten nehmen bis in eine Tiefe von 40 cm zu, höchstwahrscheinlich eine Folge der zunehmenden Bodenfeuchtigkeit. Es kommt weiter deutlich zum Ausdruck, dass der Boden bezüglich der thermischen Eigenschaften sehr inhomogen ist. Dies erschwert Berechnungen und Interpolationen enorm.

Der Waldstandort hat einen relativ hohen Wert ab 5 cm Tiefe. Die oftmals erwähnte schlechte Wärmeleitfähigkeit beschränkt sich nur auf die obersten 5 cm des Bodens, hier sind tiefere Werte zu erwarten (Humusform, org. Substanz).

Verglichen mit dem Waldstandort hat der Waldgrenzstandort zwischen 5 und 30 cm Tiefe eine höhere Temperaturleitfähigkeit (leichte Verdichtung, höhere Wassergehalt).

Tab. 20: Berechnete Temperaturleitfähigkeiten zwischen den Messniveaus [10^{-3} cm/s].

Tiefe in cm	Wald	Waldgrenze	Erdstrom	Gipfel	Fuorcla
- 5/- 10 - 5/- 20 - 5/- 30 - 5/- 34 - 5/- 40 - 5/- 50 - 5/- 60	8.348 10.572	10.094	4.811 6.432 10.66 9.949	14.266	8.605
- 10/- 20 - 10/- 40 - 10/- 60			7.568 12.634 10.89		
- 20/- 40 - 20/- 60			17.323 12.051		
- 30/- 60	13.183				
- 40/- 60			8.864		

6.6.3 Zur Bedeutung der Vegetation

Grosse Teile des Munt Chavagl und des Munt la Schera tragen unabhängig von Mikrorelief und Exposition eine lückenhafte Vegetationsdecke. Die Pflanzengesellschaften sind oft gekennzeichnet durch ein Mosaik von vegetationsfreien und vegetationsbedeckten Stellen.

Es stellt sich die Frage, ob und wie ausgeprägt kleinräumige Unterschiede in den thermischen Verhältnissen auftreten. Zu diesem Zweck wurde an der Waldgrenzstation die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe unter einer vegetationsbedeckten und einer vegetationsfreien Stelle gemessen. Bei der Vegetationsbedeckung handelt es sich hauptsächlich um *Calluna vulgaris*, mit einer Höhe von ca. 8 cm. Von kurzfristigen Messungen im Untersuchungsgebiet ist der Einfluss der Vegetation bekannt (FRIES 1985, GALLAND 1980). Es sollen hier vor allem die langfristigen Einflüsse diskutiert werden.

Die Messwerte sind in Tab. 21 zusammengestellt. Bei den Jahresmittelwerten ergeben sich überraschenderweise keine Unterschiede, die Differenz liegt innerhalb der Fehlergrenze der Messgeräte. Im Sommer sind die Mittelwerte fast gleich, in den Wintermonaten ergeben sich grössere Unterschiede: Der vegetationsfreie Boden ist fast um 1° C kälter. Der Grund dürfte

darin zu suchen sein, dass im Herbst, wenn die Abkühlung einsetzt, der vegetationsbedeckte Boden besser isoliert ist. Diese Isolation zeigt sich ausgeprägt aber erst in den Wintermonaten.

Anders verhält es sich mit den Amplituden und Extrema. Diese werden durch die Vegetation gedämpft. Die Unterschiede betragen im Sommer maximal 2° C. An der Bodenoberfläche (0-1 cm) ergeben sich grössere Unterschiede. Messungen in Obergurgl in einer Höhenlage von 1915 m ergaben unter *Calluna vulgaris* an der Bodenoberfläche in den Sommermonaten bis um 9 °C geringere Amplituden als unter unbedecktem Boden (AULITZKY und TURNER 1982, S.501). Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass ich durch meine Messmethode nicht die tatsächlichen absoluten Extrema erfassen konnte (vgl. Kapitel 6.5.1).

Tab. 21: Mittelwerte, Extrema und Amplituden unter vegetationsbedecktem und -freiem Boden an der Waldgrenzstation in 5 cm Tiefe

	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	JAHR
Mittelwerte mit Veg. ohne Veg.	11.4 11.3	9.6 9.7	7.3 7.1	1.3 1.0	-0.9 -1.8	-1.5 -2.3	-0.9 -1.3	-0.4 -0.6	0.0 -0.1	2.5 2.6	6.9 6.9	11.7 11.9	3.9 3.7
mittl. Amplituden mit Veg. ohne Veg.	7.6 8.7	8.3 10.2	7.6 9.3	3.0 3.6	0.7 1.1	0.5 0.9	0.3 0.5	0.0 0.1	0.3 0.4	4.3 5.1	6.5 7.2	7.1 8.4	3.9 4.6
abs. Maxima mit Veg. ohne Veg.	23.1 25.2	18.6 19.9	18.0 20.5	8.1 9.4	1.9 -0.1	-0.5 -0.7	-0.4 -0.5	-0.3 -0.2	6.6 6.9	12.4 13.9	20.5 21.7	21.5 23.9	10.8 11.7
abs. Minima mit Veg. ohne Veg.	2.5 1.8	3.6 2.6	-0.2 -1.1	-0.8 -1.4	-2.9 -5.1	-3.2 -5.2	-2.9 -3.9	-0.4 -0.9	-0.3 -0.5	0.1 0.0	1.9 1.5	3.8 2.8	0.1 -0.8

Pflanzenökologisch sind die registrierten Differenzen meiner Meinung nach nicht ausgeprägt genug, um ein Mosaik der Pflanzenbedeckung zu bewirken. Als Ursachen müssen andere Faktoren in Frage kommen:

- mechanische Windwirkung, Erosion
- Wildverbiss
- Solifluktion
- oberflächennahe Fröste und Kammeisbildung

- Ausfrieren der Samen an unbedeckten Stellen
- Konkurrenz
- Allelopathie
- spezielle Bodeneigenschaften von Dolomit- und Kalkböden
- u.a. das geringe Wasserspeichervermögen (vgl. GIGON, 1971)

Diese Punkte sind als hypothetisch zu betrachten und müssen durch weiterführende Messungen überprüft werden.

6.7 Die Frostwechselerhältnisse

In Abb. 28 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Die Blockdiagramme illustrieren die Verteilung der Eis-, Frostwechsel- und frostfreien Tage³ an den verschiedenen Stationen für die drei Messniveaus +150 cm, +5 cm und -5 cm. Die Höhen der Balken entsprechen den Anzahl Messtagen im jeweiligen Monat. Folgt man den Balken in einer Reihe, ergibt sich der Jahresverlauf der Frostwechselerhältnisse für einen Standort. Die dreidimensionale Darstellungsweise erlaubt, die verschiedenen Standorte untereinander direkt zu vergleichen.

Der Einfluss des Messniveaus auf die Frostverhältnisse ist bei GAMPER (1981) bereits beschrieben worden. Seine Untersuchungen können bei allen Standorten bestätigt werden. Die Resultate seien hier nicht mehr aufgeführt und können an erwähnter Stelle nachgelesen werden.

Es interessieren hier vielmehr die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten. Als wesentlichster Punkt kann zunächst festgehalten werden, dass die Unterschiede beim Messniveau +150 cm weit geringer ausfallen als bei +5 und -5 cm. Dies unterstreicht erneut die grosse Bedeutung des Mikroklimas für standortkundliche Untersuchungen.

Es fällt auf, dass an der Bodenoberfläche (Messniveau +5 cm) im Wald am meisten Frostwechseltage registriert wurden. Bei diesen Frösten handelt es sich hauptsächlich um Strahlungsfröste. Als Ursachen sind einerseits die bereits erwähnten speziellen thermischen Bodeneigenschaften des Waldstandortes aufzuführen (vgl. Bodenkundliche Untersuchungen). Andererseits wird im Wald der vertikale Luftaustausch weniger stark vom Wind beeinflusst als oberhalb der Waldgrenze. Es stellen sich öfters windstille Verhältnisse ein, was die Ausbildung von Strahlungsfrösten erst ermöglicht.

³ Begriffe nach der üblichen klimatologischen Definition verwendet (GEIGER 1961).

Ähnliche Verhältnisse wie an der Waldstation findet man erst wieder an den bedeutend höher gelegenen Stationen auf dem Gipfel des Munt Chavagl und der Fuorcla da la Föglia. Waldgrenz- und Erdstromstation hingegen sind bis in den September frostfrei.

Die kurz andauernden Strahlungsfröste vermögen allerdings nicht bis in 5 cm Bodentiefe einzudringen. Die ersten Bodenfrostwechsel treten im September auf der Fuorcla da la Föglia auf. Auffällig sind die vielen Bodenfrostwechseltage an der Waldgrenzstation im November. Zu diesem Zeitpunkt war dieser Standort noch weitgehend schneefrei und die starken Fröste in dieser Jahreszeit konnten in den Boden eindringen. Diese häufigen Frostwechsel führen zu Kammeisbildung, was das Ausfrieren von Steinen bewirkt. Man findet an der Waldgrenze auch einen ausgeprägten Ask-Horizont (vgl. Bodenprofil Abb. 6 auf Seite 33). Im November unterscheidet sich die Waldgrenzstation also stark von den höher gelegenen Stationen. An der Waldgrenze gab es doch noch Tage ohne Frost und der Boden war noch nicht permanent gefroren. Die höher gelegenen Stationen zeigten zur selben Zeit schon die ausgeglichenen winterlichen Verhältnisse. Entsprechend präsentiert sich das Bild zur Zeit der Ausaperung im Mai.

Die Zahl der Eistage nimmt mit der Meereshöhe zu, besonders gut erkennbar beim Messniveau -5 cm. Der Boden gefriert also mit zunehmender Höhe öfter und früher.

Zusammenfassend kann man die Standorte bezogen auf die Messniveaus +5 und -5 cm wie folgt einteilen:

1. Waldstandort: häufige sommerliche Frostwechseltage
2. Waldgrenzstandort: keine sommerlichen Frostwechseltage, häufige Bodenfrostwechsel im Herbst
3. Erdstromstandort: keine sommerlichen Frostwechseltage, wenig Bodenfrostwechsel
4. Gipfel und Fuorcla da la Föglia: sommerliche Frostwechseltage, wenige Bodenfrostwechsel.

Es zeigt sich noch ein merkwürdiges Detail. Auf dem Messniveau +150 cm treten das ganze Jahr über Fröste auf. An der Bodenoberfläche ergeben sich aber wider erwarten bei der Waldgrenz- und Erdstromstation weniger Frostwechseltage als auf +150 cm. Dieses unerwartete Ergebnis lässt sich eventuell damit erklären, dass durch Tau- und Eisbildung der Bodenoberfläche in der Nacht wieder Wärme zugeführt wird und die Temperaturen daher nicht unter 0° C sinken.

Abb. 28: Verteilung der Eis-, Frostwechseltage und Tage ohne Frost an den verschiedenen Standorten (Messniveau +150 cm). Die Höhen der Balken entsprechen den unten angegebenen Zahlen und geben die Anzahl Messtage im jeweiligen Monat an.

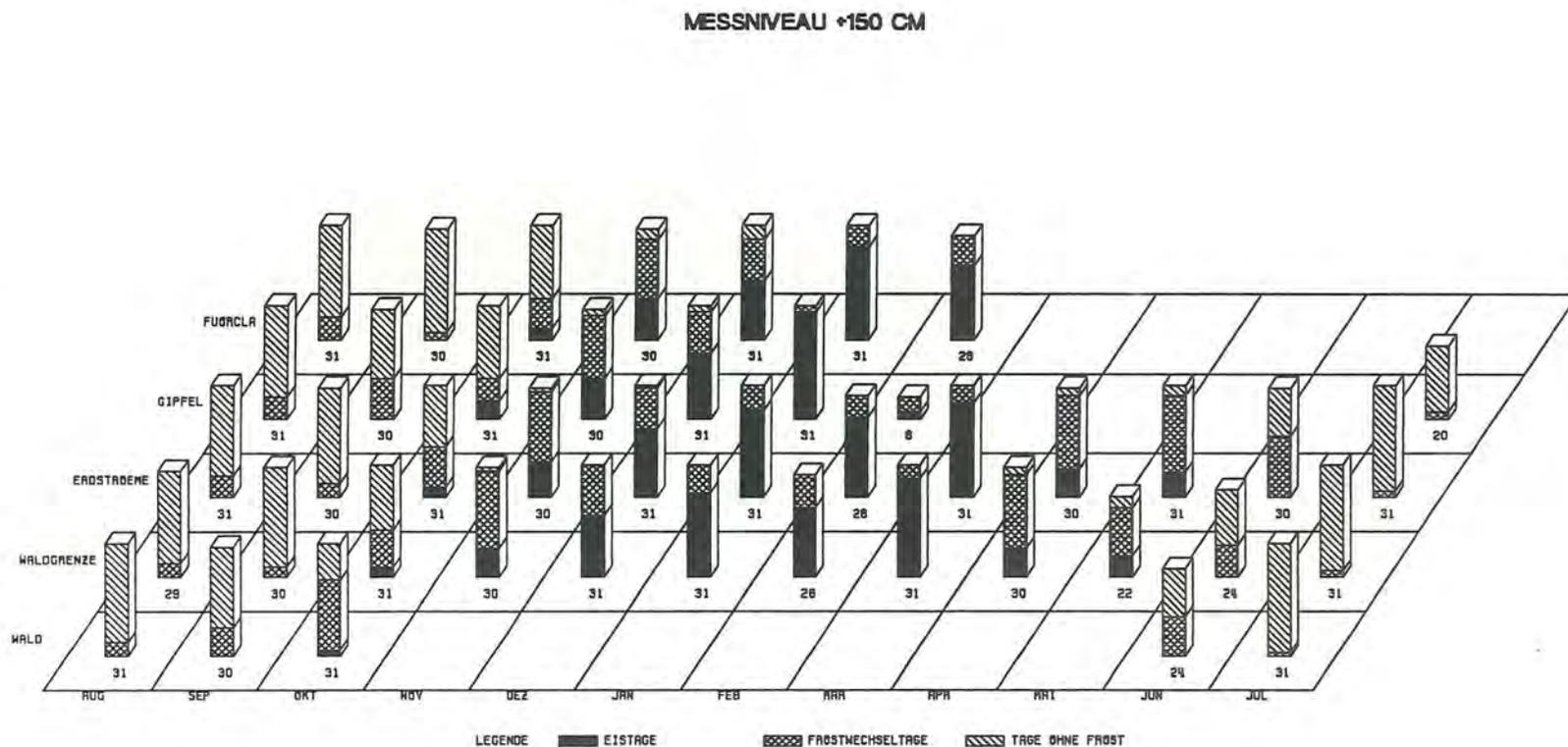


Abb. 29: Verteilung der Eis-, Frostwechseltage und Tage ohne Frost an den verschiedenen Standorten (Messniveau +5 cm).

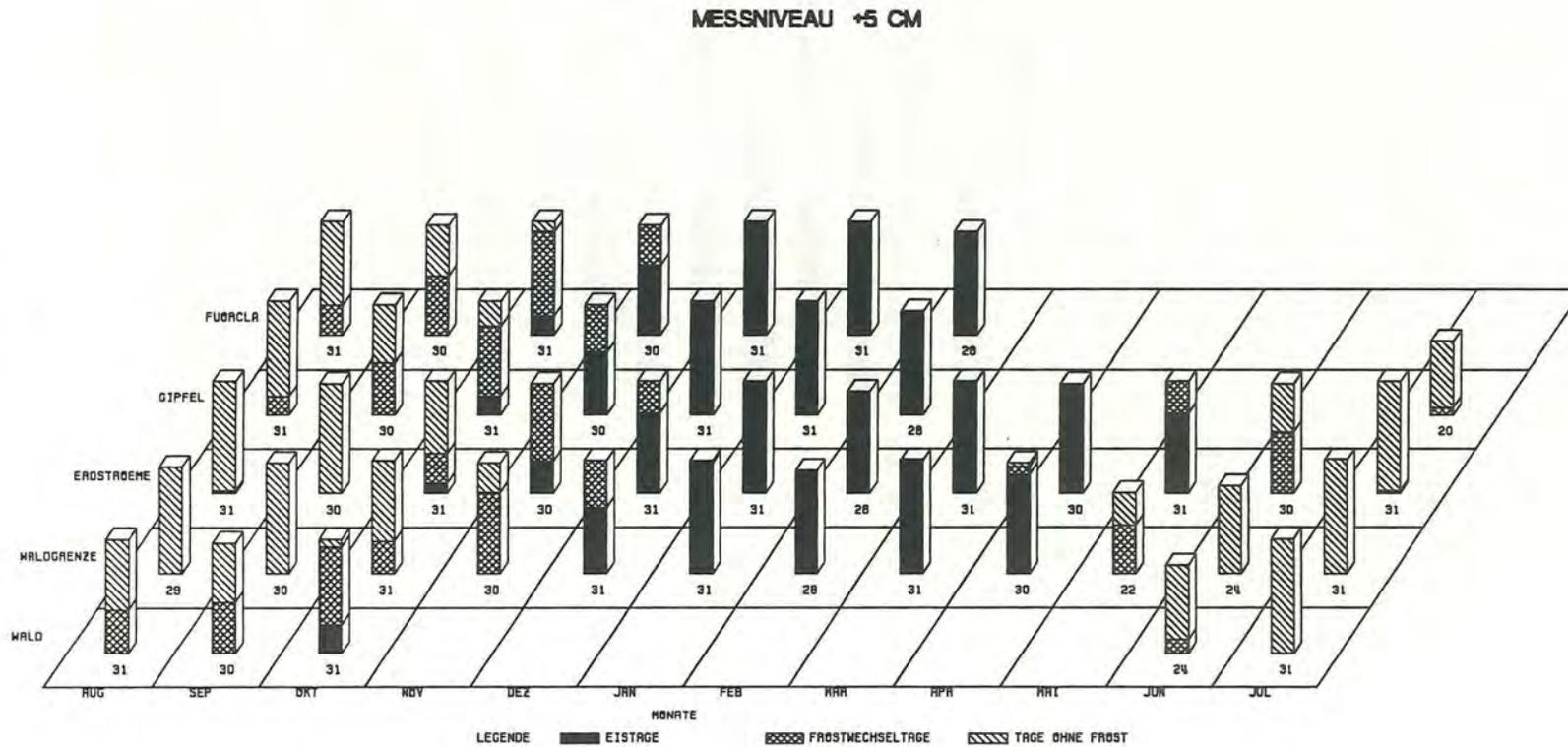
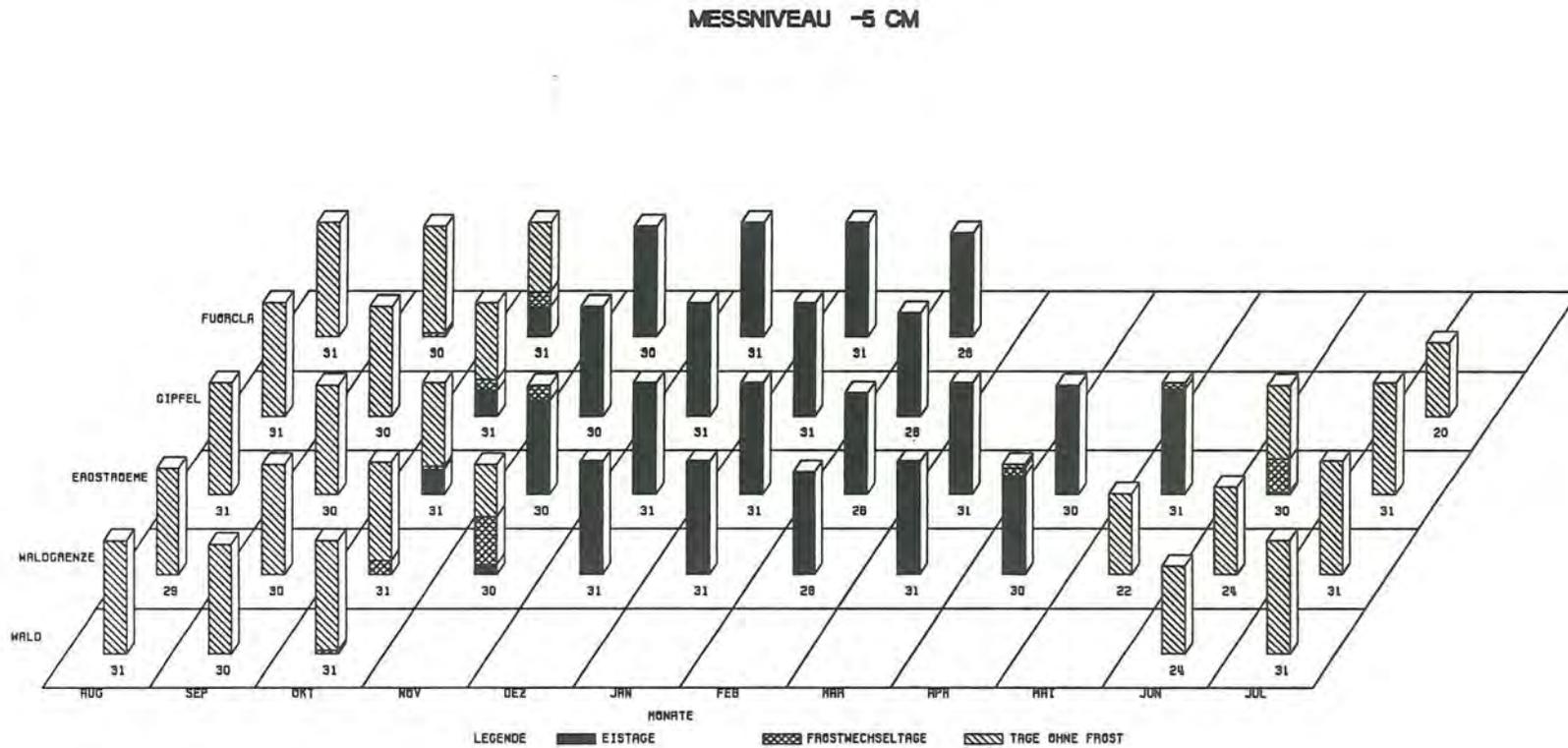


Abb. 30: Verteilung der Eis-, Frostwechseltage und Tage ohne Frost an den verschiedenen Standorten (Messniveau -5 cm).

- 91 -



6.8 Die Windverhältnisse am Munt Chavagl und auf der Fuorcla da la Fögliä

Im Gebirge wird der Wind stark durch das Relief beeinflusst. Zwar strömen die Gradientwinde ohne ihre Richtung zu ändern über die Gebirgskämme, doch folgt ein Teil des Windes auch dem Verlauf der Täler. Die vorherrschende Windrichtung ist daher durch die Topographie meist vorgegeben (AULITZKY 1961a).

Die Windverhältnisse auf dem Gipfel des Munt Chavagl sind mehrheitlich durch die Strömungen der freien Atmosphäre bestimmt. Die Bergkuppen des Munt Chavagl und des Munt la Schera stehen nämlich im Umkreis von mehreren Kilometern völlig frei.

Im Untersuchungszeitraum wehten die Winde hauptsächlich aus den Sektoren WNW-N und SE-S, wobei die Winde aus dem 1.Sektor dominierten.

Der 130 m tiefer gelegene Standort bei den Erdströmen hat im wesentlichen die gleiche Windrichtungsverteilung wie der Gipfel. Die Winde wehen dabei also zwischen Munt la Schera und Munt Chavagl durch. Die Dominanz der Winde aus dem nördlichen Sektor wurde im Frühjahr 1987 durch eine mächtige Wächte in der Nähe des Erdstromstandorts bestätigt. Im Gegensatz zum Gipfel treten aber vermehrt die tagesperiodischen Berg- und Talwinde auf. Im Vergleich zu den Gradientwinden spielen sie aber nur eine untergeordnete Rolle und traten im Untersuchungszeitraum nur an wenigen Tagen im Sommer ausgeprägt in Erscheinung. Der Anteil dieser tagesperiodischen Winde beträgt nur 5%. Der Erdstromstandort liegt von seiner Lage her immer noch im Einflussbereich der Gradientwinde.

Zur Entstehung eines tagesperiodischen Windsystems bedarf es einerseits schönes Wetter, andererseits das Vorhandensein einer Heizfläche (AULITZKY 1961a). Diese Heizfläche ist im Falle des Munt Chavagl allerdings recht klein, so dass diese Lokalwinde eher schwach in Erscheinung treten.

In der tiefer gelegenen Hanglage ist bei Schönwetter im Sommer mit einem deutlicheren Berg-Tal-Windsystem zu rechnen.

Auf der Sattellage der Fuorcla da la Fögliä wehen die Winde mit grosser Konstanz aus Westen und Osten, also quer zum Sattel. Hauptwindrichtung ist West. Zeitweilen herrschte wochenlang ständig Westwind. Als Konsequenz dieser Windrichtungsverteilung fand man östlich der Fuorcla da la Fögliä anfangs August noch Schneefelder.

6.9 Zusammenhang Vegetation/Temperatur unter Berücksichtigung der ökolog. Zeigerwerte von E. Landolt

Die Methode der mittleren Zeigerwerte erwies sich bei den bodenkundlichen Untersuchungen als recht geeignet. Wie steht es nun mit den klimatischen Zeigerwerten T und K verglichen mit den gemessenen Temperaturen?

Zu diesem Zweck wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Als Temperaturwert erwies sich der Mittelwert der Vegetationsperiode (Juli, August, September) als am geeignetsten für den Vergleich.

Auf Abb. 31 sehen Sie die Resultate der Regressionensberechnungen für die drei Messniveaus +150 cm, + 5 cm und -5 cm. Das Ergebnis ist unerwartet: auf dem Messniveau +150 cm besteht eine hohe Korrelation von 83 %. An der Bodenoberfläche besteht aber keine Korrelation mehr (16 %), in 5 cm Tiefe ist sie nur schwach (58 %). Man würde eigentlich genau das umgekehrte Resultat erwarten, da die Zeigerwerte ja den unmittelbaren Lebensraum der Pflanzen charakterisieren und nicht die Luftschicht in 150 cm Höhe. Interessant wäre nun ein Vergleich mit der Zucker-Inversionsmethode von PALLMANN (PALLMANN und FREI, 1943). Diese gibt ja eine exponentielle Temperatur wieder und wird dem Wärmegenuss der Pflanzen möglicherweise besser gerecht.

Als Mass für die Kontinentalität wurden die mittleren Temperaturamplituden der Vegetationsperiode gewählt. Zwischen dem K-Wert und der Amplitude bestand jedoch statistisch überhaupt kein Zusammenhang.

Diese Ergebnisse dürfen nicht allzu stark gewertet werden, da eine ganze Reihe Vorbehalte anzubringen sind:

- es standen zu wenig Messwerte zur Verfügung
- Mittelwerte geben möglicherweise den Wärmegenuss eines Standorts für die Pflanzen nur ungenügend wieder
- Problematik der Eichung der Zeigerwerte

Weitere diesbezügliche Untersuchungen sind unumgänglich.

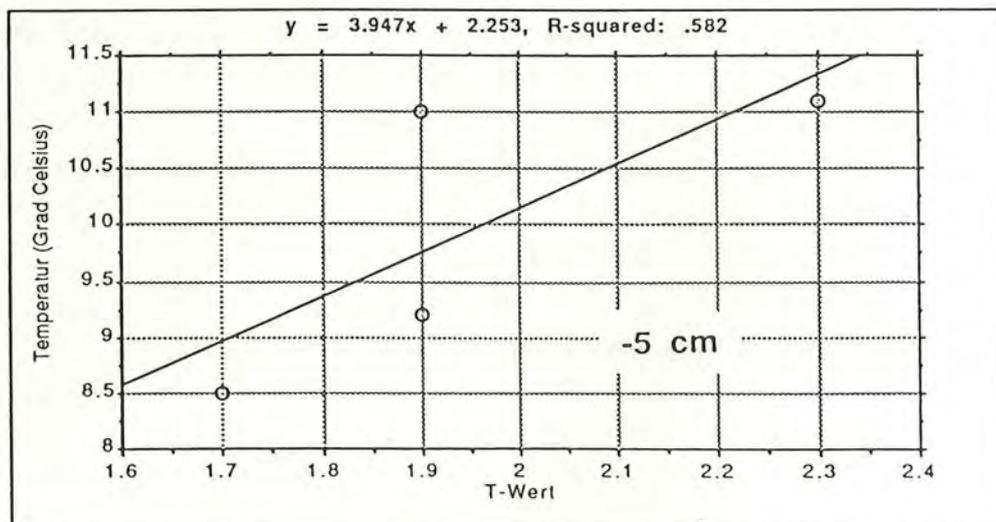
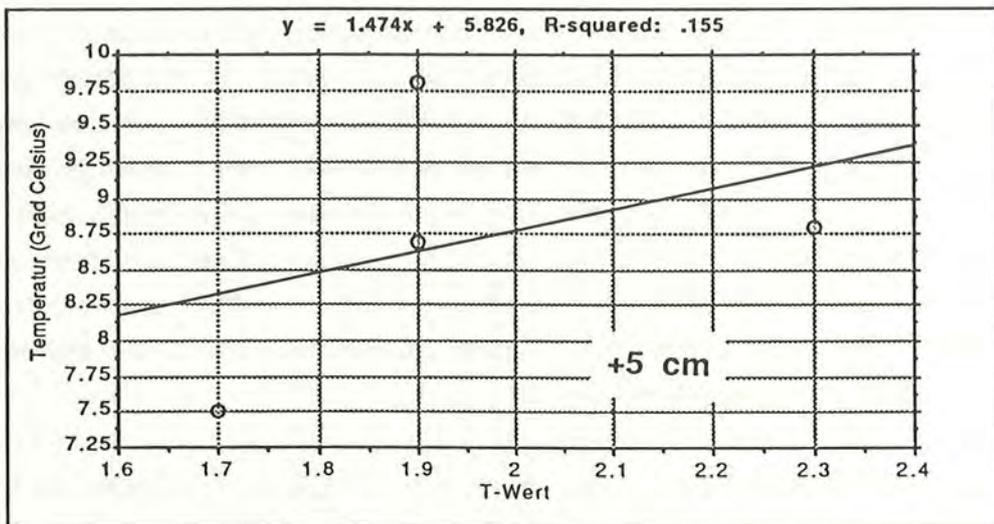
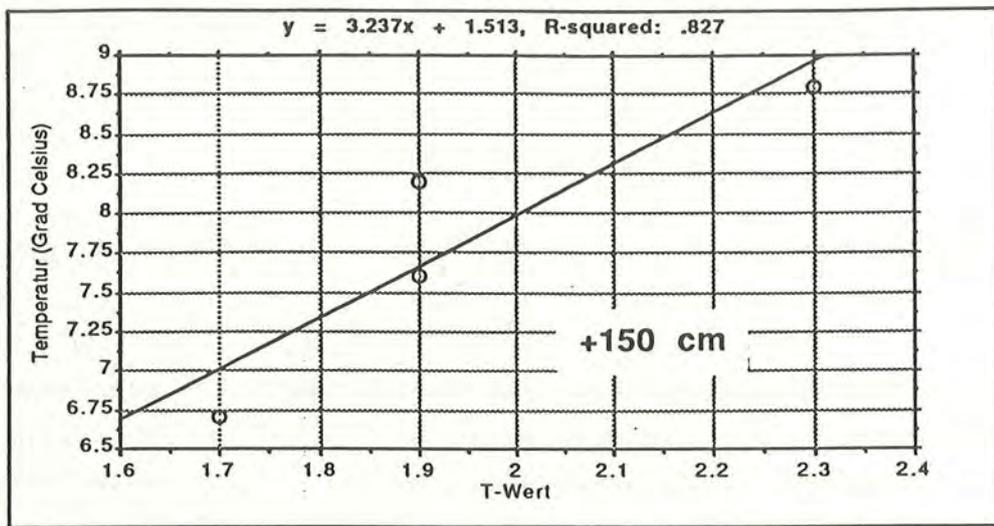


Abb. 31: Regressionsanalyse zum Zusammenhang Temperatur und ökologischen Zeigerwerten.

6.10 Diskussion

Das Untersuchungsgebiet am Munt Chavagl liegt oberhalb der Zone, die man als warme Hangzone bezeichnet. Man könnte also eigentlich einen einheitlichen Temperaturgradienten erwarten. Die mikroklimatischen Messungen zeigen jedoch, dass an einem Hangprofil, selbst abgesehen von der warmen Hanglage, durchaus nicht von einem einheitlichen Gradienten gesprochen werden darf.

Es erstaunt aber doch, dass der höchstgelegene Standort auf dem Gipfel des Munt Chavagl an zwei Monaten die höchsten Monatsmitteltemperaturen aufwies. Dabei spielt wohl vor allem die längere mögliche Sonnenscheindauer eine Rolle.

Es wurde festgestellt, dass die gemessenen Temperaturgradienten generell zu tief sind. Die Standorte liegen also wuchsklimatisch näher beisammen, als man aufgrund des Höhenunterschieds vermuten könnte.

In allen Jahreszeiten treten Fröste auf. Ab einer Höhenlage von 2170 m muss also jederzeit mit Frösten gerechnet werden. Im Sommer handelt es sich dabei meist um Strahlungsfröste. Am Waldstandort traten am häufigsten solche Fröste ein. Durch die Bäume wird die Bewindung reduziert, es stellen sich windstille Verhältnisse ein und die Gefahr für Strahlungsfröste steigt an. Diese Fröste dringen allerdings nicht in den Boden ein.

In dem lichten Erika-Bergföhrenwald traten auch die grössten täglichen Temperaturschwankungen ein. Man kann also nicht von einer grossen klimatischen Begünstigung des Waldstandortes sprechen. Dies steht im Gegensatz zu den Untersuchungen in Obergurgl, wo ein mildes Waldklima einem extremen Klima der alpinen Stufe gegenübersteht (AULITZKY 1962).

Entscheidend für die Beurteilung der klimatischen Situation als Standortfaktor sind die mikroklimatischen Verhältnisse. Auf dem Messniveau +150 cm sind die Unterschiede zwischen den Standorten deutlich geringer als an der Bodenoberfläche und im Boden drin. Den Bodentemperaturen und den Temperaturen der bodennahen Luftschicht kommen daher für standortkundliche Untersuchungen eine grosse Bedeutung zu.

Im Sommer und im Winter treten zwischen den Standorten nicht die gleichen Unterschiede auf.

Im Winter werden die Bodentemperaturen hauptsächlich durch die Mächtigkeit der Schneedecke bestimmt. Unterschiede der winterlichen Bodentemperaturen widerspiegeln also auch Unterschiede in der Schneeverteilung. Waldgrenz- und Erdstromstation haben eher eine mächtige Schneedecke (grösser 60 cm). Der Gipfelstandort hat eine geringmächtigere Schneedecke (kleiner 60 cm) und demzufolge auch die tieferen Bodentemperaturen. Die Fuorcla da

la Föglia nimmt eine Mittelstellung ein.

Der Boden wird generell an der Oberfläche bis zum Januar kälter und erwärmt sich dann infolge zunehmender Isolation der Schneedecke durch Wärmezufuhr aus tieferen Bodenschichten bis auf ca. 0° C. Der Boden taut im Frühjahr bedeutend schneller auf als er im Herbst gefriert. Mit der Bodentiefe nimmt die frostfreie Zeit also zu. Auf einer Höhe von 2410 m.ü.M. war der ganze Boden während mindestens der Hälfte des Jahres gefroren. Im Sommer werden die Bodentemperaturen vor allem von den bodenthermischen und -physikalischen Eigenschaften beeinflusst. Diese dominieren über die Lufttemperaturunterschiede.

Die bodenthermischen Eigenschaften sind sehr inhomogen verteilt, und es lassen sich nur schwer Schlüsse daraus ziehen. Die berechneten Wärmediffusitäten sind im allgemeinen recht hoch und erreichen z.T. Werte, wie man sie von Dolomitfels kennt.

Kapitel 7

STANDORTSKUNDLICHE INTERPRETATION

Im Sinne einer Synthese seien im folgenden die Ergebnisse der drei Blöcke Vegetation, Boden und Mikroklima miteinander in Verbindung gebracht. Jeder Standort wird bezüglich der drei Faktoren zu charakterisieren versucht.

Der Waldstandort

Der Waldstandort ist erwartungsgemäss aufgrund seiner topographischen Lage der wärmste Standort. Man kann allerdings nicht von einer starken klimatischen Begünstigung des Waldes sprechen, wie das bei anderen Wäldern an der Waldgrenze oftmals der Fall ist. Es gibt zwar eine spürbare mikroklimatische Grenze zwischen Wald und der alpinen Stufe, doch ist diese nicht so extrem wie zum Beispiel bei Lärchen-Arven-Wäldern (AULITZKY und TURNER, 1982).

Beim Wald handelt es sich im Untersuchungsgebiet um einen lichten Erika-Bergföhren-Wald (*Erico-Mugetum caricetosum humilis*). Diese Wälder besiedeln extrem flachgründige und trockene Böden im Schweizerischen Nationalpark. Oftmals entstanden sie erst nach der Zerstörung der natürlichen Lärchen-Arven-Wälder. Schon im Mittelalter wurde nämlich die natürliche Vegetation durch Raubbau am Wald zwecks Eisenverhüttung und Köhlerei stark reduziert. Im 17. Jahrhundert wurde der Restbestand des Waldes im Nationalpark an die Salinen von Hall im Tirol verkauft und rücksichtslos kahlgeschlagen. Die Bergföhrenbestände sind daher oft auffallend gleichaltrig und verhältnismässig artenarm (nach ELLENBERG 1978). Die Standortbedingungen am Südwesthang des Munt Chavagl sind aber sehr extrem, so dass man annehmen darf, dass die Bergföhrenwälder hier schon vor den menschlichen Eingriffen bestanden haben und einigermassen natürlich sind.

Die grosse Trockenheit bewirkt, dass die anfallende Nadelstreu nur ungenügend abgebaut werden kann. Es bilden sich hauptsächlich unter den Baumstämmen mächtige

Rohhumusaufgaben. Diese Humusform hat einen grossen Einfluss auf die Nährstoffversorgung und das Temperaturregime des Bodens. Die Nährstoffe werden in Form von Rohhumus vorläufig gespeichert und sind nur für gewisse Spezialisten verfügbar (Vaccinien, Ericaceen). Der Standort ist daher eher nährstoffarm.

Der Dolomitboden ist, wie bei den anderen Stationen auch, sehr flachgründig und skelettreich und hat ein geringes Wasserspeichervermögen.

Die organische Auflage verhindert ein schnelles Eindringen der Wärme in den Boden. Der Boden erwärmt sich im Untergrund daher nur langsam, kühlt sich aber nachts auch nicht so stark ab. An der Bodenoberfläche treten jedoch extreme Bedingungen auf. Da die Wärme nicht schnell genug abgeleitet werden kann, erhitzt sich die Bodenoberfläche tagsüber sehr stark. Umgekehrt kühlt sie sich in der Nacht sehr stark ab, da wenig Wärme gespeichert werden kann und zudem die Wärme nur schlecht aus tieferen Bodenschichten zugeführt werden kann. Die täglichen Amplituden sind im Wald daher am grössten.

Die heutige Waldgrenze am Südwest-Hang des Munt Chavagl liegt bei 2240 m.ü.M. Ab dieser Höhe beginnt sich der geschlossene Wald aufzulösen, man spricht hier von der sogenannten "Kampfzone". Einzelne Bäume wachsen noch bis auf eine Höhe von 2300 m.ü.M. Betrachtet man die häufig für Waldgrenzbestimmungen zugezogenen Werte der mittleren Julitemperatur, so erkennt man, dass die 10° C-Isotherme bei einer Höhe von 2175 m verläuft, die 9,2° C-Isotherme bei der Waldgrenzstation auf 2275 m und bei der Erdstromstation befindet sich die 8,5° C-Isotherme. Bis zur 9° C-Isotherme ist das Gebiet sicherlich als waldfähig zu erachten. Interpoliert man diese Isotherme mit dem Temperaturgradienten zwischen Waldgrenz- und Erdstromstation von 0,5° C pro 100 m, so liegt die potentielle Waldgrenze auf einer Höhe von 2315 m. Dies wäre ca. 20 m höher als der Verlauf der heutigen Baumgrenze.

Interessanterweise findet man in 2410 m Höhe an geschützten Stellen noch kleine Bergföhren, die allerdings nicht über die Krautschicht hinauszuwachsen vermögen. Da diese Waldgrenzbestimmung nur auf den Daten eines Messjahres beruhen, ist sie nur als grober Anhaltspunkt aufzufassen. Genauere Aussagen bedürfen längerer Messreihen. Mit Sicherheit kann aber festgehalten werden, dass die jetzige Waldgrenze mindestens 60 m zu tief liegt.

Es stellt sich, angesichts der Feststellung, dass der mikroklimatische Unterschied zwischen dem Wald- und Waldgrenzstandort nicht so extrem ausfällt, die Frage, ob die natürliche Waldgrenze auch in einer scharfen Linie verläuft. Man geht ja heute von der Annahme aus, dass der Wald die extremen klimatischen Verhältnisse der alpinen Stufe sehr stark dämpft und so eine natürliche Verjüngung erst gewährleistet. Überschreitet man die Waldgrenze, so sind die Bedingungen sofort zu extrem für das Baumwachstum. Bei lichten Erika-Bergföhrenwäldern fällt nun dieses Bestandesklima, so scheint es, nicht so stark ins Gewicht.

Man kann sich fragen, ob es unter solchen Bedingungen auch möglich wäre, dass sich der Wald hier gegen oben zu natürlicherweise auflockert.

Der Waldgrenzstandort

Der Waldgrenzstandort liegt, wie erwähnt, innerhalb der Kampfzone und besitzt eine ganz ähnliche Krautschicht wie der Waldstandort. Pflanzensoziologische Untersuchungen ergaben, dass beide Standorte zur gleichen Pflanzengesellschaft gehören. Bezüglich der Bodeneigenschaften sind die Verhältnisse aber verschieden. Der Waldgrenzstandort hat eine sehr einseitige Korngrössenzusammensetzung. Es dominiert ausschliesslich die Schlufffraktion. Dies bewirkt eine Verdichtung des Bodens ab ca. 20 cm Tiefe. Fahlrotfärbungen deuten auf eine leichte Pseudovergleyung hin. Der Boden ist also zeitweise vernässt. In der Vegetation kann man diese Verhältnisse am Auftreten von Wechselfeuchtezeigern erkennen (*Parnassia palustris*, *Pinguicula alpina*, *Cirsium acaule*, *Gymnadenia odoratissima*, *Euphrasia salisburgensis*).

Das Wasserspeichervermögen ist aber trotz des Stauhorizontes als gering zu bezeichnen, da die Textur und Struktur des Bodens sehr ungünstig für den Wasserhaushalt ist.

Die Temperaturen verlaufen an der Waldgrenze gleichmässiger als im Wald. Im Sommer ist das Temperaturregime im Boden ähnlich dem des Waldstandortes. Der Boden erwärmt sich hier allerdings, über das ganze Bodenprofil gesehen, stärker und gleichmässiger, da eine Rohhumusaufgabe fehlt, die Wärmeleitung ist grösser.

Im Winter sind die Bodentemperaturen zu vergleichen mit denen des Erdstromstandortes. Der Boden kühlt sich kaum stärker als $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab und die Amplituden werden durch eine mächtige Schneedecke gedämpft. Die Temperaturverhältnisse sind sehr ausgeglichen. Ab Ende Januar werden die Bodentemperaturen nicht mehr von der Lufttemperatur beeinflusst. Die Bodengefrorenis dauerte knapp 5 Monate lang.

An der Waldgrenzstation baute sich die winterliche Schneedecke auf, noch bevor der Boden gefroren war. Bei den höher gelegenen Stationen war genau das Gegenteil der Fall. An der Waldgrenze wurden mit Abstand am meisten Bodenfrostwechseltage registriert.

Der Erdstromstandort

Die eigentliche Station befindet sich auf einem etwa 1 m hohen, noch aktiven Erdstrom. Dies bringt den Nachteil mit sich, dass die Stangen, auf denen die Messinstrumente montiert sind, von Zeit zu Zeit wieder in ihre vertikale Lage zurückversetzt werden müssen.

Bezüglich des Bodens kann man nur von einem Gesteinsrohboden sprechen. Es ist nur sehr wenig Humus vorhanden, der Boden ist extrem flachgründig und ab einer Tiefe von 10 cm leicht verdichtet. Die Feinerde besteht zur Hauptsache aus der Schluff- und Sandfraktion, Tonfraktion ist beinahe keine vorhanden. Entsprechend dieser Bodenbildung findet man einen kärglichen Pflanzenwuchs. Nur wenige Arten können sich hier halten.

Wie erwähnt sind die Bodentemperaturen im Winter ähnlich denen des Waldgrenzstandortes. Nur einmal sanken die Temperaturen für kurze Zeit unter $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Trotz der starken Windexposition trägt der Erdstromstandort eine recht mächtige winterliche Schneedecke ($> 60\text{ cm}$), der Boden wird gegen die tiefen Lufttemperaturen sehr gut isoliert. Die Bodengefrorenis dauerte 6 Monate, also rund einen Monat länger als an der Waldgrenzstation. Im Sommer sind die Bodentemperaturen aber deutlich kälter als am Waldgrenzstandort und eher vergleichbar mit den Standorten auf dem Gipfel des Munt Chavagl und der Fuorcla da la Föglia. Die Pflanzengesellschaft, ein *Caricetum firmae typicum*, ist etwa zu vergleichen mit derjenigen bei der Gipfelstation.

Der Gipfelstandort

Dieser Standort setzt sich am deutlichsten von den anderen Standorten ab. Von einer Bodenbildung kann kaum mehr gesprochen werden. Nur wenige anspruchslose Pflanzenarten können hier noch leben. Anfallende Streu der Pflanzen und Feinerde werden sofort weggeblasen, es kann sich kein richtiger Ah-Horizont bilden. Der hohe Skelettgehalt bewirkt, dass die Temperaturleitfähigkeit sehr hoch ist. Man findet hier Werte, wie sie für Dolomittfels typisch sind.

Der Gipfelstandort ist am stärksten windexponiert. Dies hat grosse Auswirkungen auf die Schneesverhältnisse und damit auch auf das winterliche Temperaturregime des Bodens. Die Bodentemperaturen sinken im Winter bis fast $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und es treten starke Temperaturschwankungen auf, beinahe wie im Sommer. Die tiefen Temperaturen dringen bis 40 cm in den Boden ein. Es fehlt eine isolierende Schneedecke. Die Pflanzen müssen daher sehr frostresistent sein, um nicht zu erfrieren.

Im Sommer profitiert der Gipfelstandort von der längeren möglichen Sonnenscheindauer als bei Hanglagen. Es können erstaunlich hohe Monatsmitteltemperaturen auftreten, welche sogar diejenigen des 370 m tiefer gelegenen Waldstandortes übertreffen können!

Der Gipfel des Munt Chavagl liegt im Einflussbereich der freien Atmosphäre. Es wehen praktisch nur Gradientwinde, ein tagesperiodisches Windsystem ist nicht festzustellen. Hauptwindrichtungen sind WNW-N und SE-S.

Auf dem Gipfelplateau des Munt Chavagl findet man ein Musterbeispiel für die grosse Bedeutung des Reliefs im Hochgebirge. In einer Mulde findet man einen gut entwickelten alpinen Rasen. Es hat sich ein für das Pflanzenwachstum recht günstiger Boden entwickelt. Dieser Standort ist windgeschützt und trägt im Winter eine mächtige schützende Schneedecke. Im Sommer wird die Verdunstung, sowie Winderosion und mechanische Beanspruchung der Pflanzen reduziert. Es herrschen hier also ganz andere Bedingungen als bei der Messstation. Dieses kleinräumige Nebeneinander von lebensfreundlichen und -feindlichen Bedingungen, so typisch dies ja ist für das Hochgebirge, versetzt einen doch immer wieder in Erstaunen.

Die Fuorcla da la Fögliä

Die Fuorcla da la Fögliä liegt 6 km westlich des Munt Chavagls. Bezüglich der Vegetation bestehen keine Übereinstimmungen mit den anderen Standorten. Es handelt sich um eine andere Pflanzengesellschaft als man sie am Munt Chavagl findet, nämlich um eine Blaukressen-Schneebodengesellschaft (*Arabietum coeruleae*).

Die Fuorcla da la Fögliä ist der höchstgelegene Standort, zeigt aber eine deutliche Wärmegunst gegenüber dem Südwesthang des Munt Chavagl. Die Sommertemperaturen der Luft entsprechen etwa denen des 270 m tiefer gelegenen Waldgrenzstandortes. Im Winter sind die Lufttemperaturen sogar wärmer als beim Waldgrenzstandort, die Bodentemperaturen sind jedoch viel kälter. Der Boden wird weniger gut isoliert, die Mächtigkeit der Schneedecke ist deutlich geringer als an der Waldgrenze. Die minimalen Temperaturen sanken unter $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, doch drangen diese Kältewellen nicht so weit in den Boden ein wie beim Gipfelstandort. Die Amplituden der Bodentemperaturen sind im Winter recht beträchtlich, aber wiederum nicht so stark wie auf dem Gipfel des Munt Chavagls.

Als einziger Standort trägt die Fuorcla da la Fögliä einen Frostmusterboden. Es haben sich sehr schöne Steinstreifen, und an den flacheren Stellen Steinpolygone gebildet. Voraussetzung zur Bildung solcher Musterböden sind Frostwechsel. Solche Frostwechsel treten auf der Fuorcla da la Fögliä an der Bodenoberfläche das ganze Jahr über auf, mit Ausnahme des Winters natürlich. In 5 cm Bodentiefe wurden im Herbst 1986 aber keine Frostwechsel registriert. Die Fröste müssen daher nur ganz oberflächlich wirksam sein. Wie die Verhältnisse im Frühjahr aussehen, kann leider nicht gesagt werden. Falls die Verhältnisse im Frühjahr aber ähnlich sein sollten wie im Herbst, würde das bedeuten, dass diese solifluidalen Prozesse nur in den obersten 5 cm des Bodens wirksam sind.

Übersicht und Ausblick

In Tab. 22 sind die Standortseigenschaften der Lokalitäten in einer Übersicht zusammengestellt. Aufgeführt sind die zur Charakterisierung der Standorte wesentlichen Parameter. Die Wertung der einzelnen Parameter erfolgt mit Hilfe einer 4-stufigen Skalierung:

- +++ sehr hoch
- ++ hoch
- + gering
- sehr gering

Diese Skalierung bezieht sich auf die Quantität des jeweiligen Faktors. Es ist zu prüfen, ob man diese Skalierung auch zahlenmässig ausdrücken kann. Dann könnte man schliesslich für jeden Standort eine "Summe" errechnen und so eine Art standortkundliche Bonitierung erhalten, ähnlich wie man es bei landwirtschaftlichen Meliorationen bezüglich des Bodens macht.

Es ergäbe sich dann eine Möglichkeit, einen Standort nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu werten. Eine solche Bewertung kann in bewirtschaftetem Gebiet auch praktisch angewandt werden.

In einem weiteren Schritt könnte ein Modell zur Simulierung der Bodenwärmeströme erstellt werden. Anhand ausgewählter Lokalitäten wäre dieses Modell dann zu überprüfen.

Ein wesentlicher Parameter konnte in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden, nämlich der Niederschlag. Niederschlagsuntersuchungen sind bisher in Nationalpark noch nie durchgeführt worden und angesichts der Bedeutung des Niederschlags besteht hier eine noch zu schliessende Lücke.

Standorte	Strahlung	Wind	Mächtigkeit der Schneedecke	Vegetationsbedeckung	sommerliche Frostwechseltage	Bodenfrostwechsel	Qualität des Bodens als Pflanzenstandort
Waldstandort	+++	-	++	++	+++	-	+
Waldgrenzstandort	+++	++	++	+	+	+	+
Erdstromstandort	+++	++	++	-	+	+	-
Gipfelstandort	+++	+++	-	-	++	+	-
Fuorcla da la Föglia	+++	+++	+	-	+++	+	-

Tab. 22: Übersicht der Standortseigenschaften der Lokalitäten

Kapitel 8

ZUSAMMENFASSUNG

An einer zentralalpinen Hanglage im Schweizerischen Nationalpark (Engadin, Graubünden) wurden während eines Jahres die meso- und mikroklimatischen Verhältnisse untersucht. Mit dem Ziel, den Einfluss der Höhenlage auf das Mikro- und Mesoklima zu erfassen, sind an einem Südwesthang (Munt Chavagl, 2175-2540 m.ü.M.) verschiedene Messstationen eingerichtet worden. Die Stationen mussten dabei folgenden Anforderungen genügen:

Sie haben alle die gleiche Exposition, die gleiche Hangneigung, das gleiche Muttergestein und das gleiche Mikrorelief. An allen Stationen wurden Luft- und Bodentemperaturen in verschiedenen Messniveaus registriert.

In einem ersten Schritt wurden pflanzensoziologische und bodenkundliche Untersuchungen durchgeführt. Dadurch ergibt sich ein detailliertes Bild der Standortverhältnisse an den einzelnen Stationen. Dann wurden, vor allem mit Hilfe von Temperaturmessungen, die mikroklimatischen Verhältnisse untersucht. Es werden sowohl Jahres- wie auch Tagesgänge der Luft- und Bodentemperaturen der verschiedenen Standorte miteinander verglichen. Windrichtungs- und Strahlungsmessungen runden die klimatischen Untersuchungen ab. Aufgrund der Resultate können die Stationen in verschiedene Standortkomplexe gegliedert werden. Messungen an einer vegetationsfreien und -bedeckten Stelle geben Aufschluss über den Einfluss der Vegetationsbedeckung auf die Temperaturverhältnisse der oberflächennahen Bodenschicht.

Anschliessend erfolgt ein Vergleich der mittleren ökologischen Zeigerwerte der Temperatur aus den pflanzensoziologischen Untersuchungen mit den effektiv gemessenen Temperaturen. Im Sinne einer Synthese erfolgt zum Schluss eine standortkundliche Interpretation der gemachten Ergebnisse, wobei jeder Standort getrennt charakterisiert wird. Interessant gestaltet sich die Frage nach der Art und Lage der Waldgrenze, die aber aufgrund der Messungen nicht beantwortet werden kann.

Anhang A

VEGETATIONSTABELLE

Bemerkungen

Die Aufnahmeummern entsprechen den in Tab. 3 auf Seite 10 beschriebenen Lokalitäten. Pflanzensoziologisch ergibt sich folgende Einteilung (die Nomenklatur richtet sich nach TREPP W. und CAMPELL E., 1968):

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Waldstandort: | Erico-Mugetum caricetosum humilis |
| 2. Waldgrenzstandort: | Erico-Mugetum caricetosum humilis
(stark aufgelockerter Bestand in der Kampfzone) |
| 3. Erdstromstandort: | Caricetum firmae typicum (aktiver Erdstrom) |
| 3a. Erdstromstandort: | Caricetum firmae typicum (inaktiver Erdstrom) |
| 3b. Erdstromstandort: | Seslerio-Caricetum sempervirentis
(Gebiet vor den Erdströmen) |
| 4. Gipfelstandort: | Caricetum firmae typicum |
| 4a. Gipfelstandort: | Caricetum firmae caricetosum mucronatae |
| 5. Fuorcla da la Föglia: | Arabidetum coeruleae |

Legende zu den Artengruppen

- A: Artengruppe des Arabietum coeruleae
(auf frischen, feinerdereichen Böden mit langer Schneebedeckung)
- B: Artengruppe des Caricetum firmae
- C: Art des Caricetum firmae caricetosum mucronatae
- I: Arten mit grosser ökologischer Amplitude
- II: Arten auf stark austrocknenden, flach- oder tiefgründigen Feinschuttböden
- III: Arten auf frischen (bis trockenen) Feinschuttböden
- IV: Säurezeiger
- V: Zeiger wechselnder Bodenfeuchtigkeit

Arten	Aufnahme-Nummer																																																																						
	5	4	4a	3b	3	3a	2	1																																																															
A: Hutchinsia alpina Ranunculus alpestris Taraxacum alpinum Silene acaulis Salix reticulata	<table border="1"> <tr><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td></td><td></td><td>1.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>								+									+									+									+			1.						+																										
+																																																																							
+																																																																							
+																																																																							
+			1.																																																																				
+																																																																							
B: Carex firma Gentiana clusii Saxifraga caesia Crepis jaquini	<table border="1"> <tr><td>+</td><td>1</td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>+</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td>+</td><td></td><td></td><td>+</td><td>+</td><td></td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td></tr> </table>								+	1		1	1	1						1	1	+	+				+	+			+	+		1										1																											
+	1		1	1	1																																																																		
		1	1	+	+																																																																		
+	+			+	+		1																																																																
								1																																																															
C: Carex mucronata	<table border="1"> <tr><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>								+																																																														
+																																																																							
I: Dryas octopetala Helianthemum alpestre Minuartia verna Sesleria coerulea Festuca pumila	<table border="1"> <tr><td>+</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>+</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>+</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td></td><td>1</td><td>+</td><td></td><td>+</td><td>+</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td></td><td>3</td><td>2</td><td></td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td></td><td>1</td><td>1</td><td></td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td></tr> </table>								+	1	1	1	1	1	1	+			+	1	1		1	1	1		+		1	+		+	+	1		+		3	2		2	2	1		+		1	1		1	1																				
+	1	1	1	1	1	1	+																																																																
	+	1	1		1	1	1																																																																
+		1	+		+	+	1																																																																
+		3	2		2	2	1																																																																
+		1	1		1	1																																																																	
II: Erica carnea Daphne striata Hieracium bifidum Euphrasia salisburgensis Polygala chamaebuxus	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>+</td><td>2</td><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>r</td><td>+</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td></td><td>+</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>								1	+	2	4						r	+	1	1								1					+							+		+			+																									
1	+	2	4																																																																				
r	+	1	1																																																																				
		1					+																																																																
					+		+																																																																
	+																																																																						
III: Bellidiastrum michelii Campanula scheuchzeri Gentiana campestris Bartsia alpina Sedum atratum	<table border="1"> <tr><td>+</td><td>1</td><td>+</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>+</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>+</td><td>+</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>								+	1	+	1						1	+	1							+	+				+				1	+								+	+																									
+	1	+	1																																																																				
1	+	1																																																																					
+	+				+																																																																		
1	+																																																																						
+	+																																																																						
IV: Vaccinium myrtillus Vaccinium vitis-ideae Pyrola uniflora Senecio abrotanifolius Antennaria dioeca Dicranum scoparium Cetraria islandica	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td>+</td></tr> </table>																+									+									+									+									+									+								+	+
								+																																																															
								+																																																															
								+																																																															
								+																																																															
								+																																																															
								+																																																															
							+	+																																																															
V: Kobresia bibartitia Carex hostiana Gymnadenia odoratissima Cirsium acaule Pinguicula vulgaris Parnassia palustris	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td>+</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>+</td><td>1</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>												1									1																					+	+								+	1																		
				1																																																																			
				1																																																																			
							+	+																																																															
							+	1																																																															

Arten	Aufnahme-Nummer							
	5	4	4a	3b	3	3a	2	1
<u>Uebrige Arten</u>								
B: Pinus montana							+	3
S: Pinus montana							+	2
K: Homogyne alpina			1	+			+	+
Polygala alpestris				+		1	+	+
Polygonum viviparum	+			1		+		+
Anthyllis alpestris			1	1		1	1	
Globularia nudicaulis				+		+	+	
Gentiana verna	+		+	+				
Draba aizoides						+	+	+
Leontopodium alpinum			+	+		1	+	
Juniperus nana							+	+
Thymus polytrichus				+				+
Arenaria ciliata				1				+
Poa alpina				1				1
Globularia cordifolia						1	1	
Biscutella leavigata				+			1	
Erigeron neglectus	+			+				
Thalictrum alpinum					1	+		
Elyna myosuroides			1	1				
Cerastium latifolium	+							
Saxifraga oppositifolia	+							
Arabis pumila				+				
Soldanella alpina				+				
Salix serpyllifolia				1	+			
Myosotis alpestris				1				
Viola calcarata				+				
Senecio doronicum				+				
Salix retusa					+			
Arenaria biflora					+			
Gentiana nivalis					+			
Carex sempervirens					2			
Coeloglossum viride					+			
Leontodon montanum						+		
Campanula cochlearifolia								1
Hieracium murorum								+
Kernera saxatilis								+
Thesium alpinum								+
Cardus defloratus								+
Carex humilis								1
Calamagrostis varia								1
Leontodon hispidus								+
Galium anysophyllum								+
Carex digitata								1

Anhang B

LITERATURVERZEICHNIS

AULITZKY, H., 1961a: Über die Windverhältnisse einer zentralalpinen Hangstation in der subalpinen Stufe. Mitt. der forstl. Bundesvers. Mariabrunn, 59. Heft, S. 209-230.

AULITZKY, H., 1961b: Die Bodentemperaturverhältnisse an einer zentralalpinen Hanglage beiderseits der Waldgrenze. I. Die Bodentemperatur oberhalb der zentralalpinen Waldgrenze. Archiv f. Meteorol. Geophys. Bioklimat., Ser. B, 10:445-532.

AULITZKY, H., 1962a: Die Bodentemperaturverhältnisse an einer zentralalpinen Hanglage beiderseits der Waldgrenze. II. Über die Bodentemperaturen im subalpinen Zirben-Lärchenwald. Archiv f. Meteorol. Geophys. Bioklimat., Ser. B, 11:301-362.

AULITZKY, H., 1962b: Die Bodentemperaturverhältnisse an einer zentralalpinen Hanglage beiderseits der Waldgrenze. III. Die Bodentemperatur in ihren Beziehungen zu anderen Klimafaktoren. Archiv f. Meteorol. Geophys. Bioklimat., Ser. B, 11:362-376.

AULITZKY, H. und TURNER, H., 1982: Bioklimatische Grundlagen einer standortsgemäßen Bewirtschaftung des subalpinen Lärchen-Arvenwaldes. Mitt. Eidg. Anstalt forstl. Vers., Band 58, Heft 4, S.327-580.

BAVER, L.D., GARDNER, W.R., 1972: Soil physics. 4. Auflage, Wiley, New York.

BRAUN-BLANQUET, J., PALLMANN, H. u. BACH, R., 1954: Pflanzensoziologische und bodenkundliche Untersuchungen im schweizerischen Nationalpark und seinen Nachbargebieten. II. Vegetation und Böden der Wald- und Zwergstrauchgesellschaften.

- Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band IV (neue Folge), 28.
- CERNUSCA, A., 1972: Zur Frage der Messhäufigkeit bei Mikroklimamessungen bei Ökosystemanalysen. *Oecologia* (Berl.) 9, 113-122.
- CERNUSCA, A. ed., 1977a: Alpine Grasheide Hohe Tauern. Ergebnisse der Ökosystemstudie 1976. Veröff. des österreichischen MaB-Hochgebirgsprogrammes Hohe Tauern, Band 1, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.
- CERNUSCA, A., 1977b: Bestandesstruktur, Mikroklima, Bestandesklima und Energiehaushalt von Pflanzenbeständen des alpinen Grasheidegürtels in den Hohen Tauern. Erste Ergebnisse der Projektstudie 1976. In CERNUSCA (ed.) 1977: Alpine Grasheide Hohe Tauern. Veröff. des österreichischen MaB-Hochgebirgsprogrammes Hohe Tauern, Band 1, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.
- CERNUSCA, A. ed., 1978: Ökologische Analysen von Almflächen im Gasteiner Tal. Veröff. des österreichischen MaB-Hochgebirgsprogrammes Hohe Tauern, Band 2, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.
- DÖSSEGGER, R., 1987: Geologische Karte des schweizerischen Nationalparks, 1:50 000. Geologische Spezialkarte Nr. 122, Herausgegeben von der Schweiz. Geol. Kommission.
- ELLENBERG, H. und KLÖTZLI, F. 1972: Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt. Eidg. Anstalt forstl. Vers., Band 48, Heft 4.
- ELLENBERG, H., 1978: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- FRANZ, H., 1979: Ökologie der Hochgebirge. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- FREI, E. et al., 1980: Bodeneignungskarte der Schweiz. Grundlagen für die Raumplanung, EDMZ, Bern.
- FRIES, M., 1985: Bodenkundliche Studien unter einem Caricetum firmæ auf dem Munt la Schera im schweizerischen Nationalpark. *Physische Geographie*, Vol. 18, Geographisches Institut der Universität Zürich.

- FURRER, G., 1954: Solifluktfonnen im schweizerischen Nationalpark. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band IV (neue Folge), 29.
- FURRER, G., 1965: Die Höhenlage der subnivalen Bodenformen. Habilitationsschrift Universität Zürich.
- FURRER, G., BACHMANN, F., FITZE, P., 1971: Erdströme als Formenelemente von Solifluktfonnen im Raum Munt Chavagl / Munt Buffalora (schweiz. Nationalpark). Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band XI, 65.
- GALLAND, P., 1982: Etudes de la vegetation des pelouses alpines au Parc National Suisse. These, Université de Neuchatèl, Institut de botanique.
- GAMPER, M., 1981: Heutige Solifluktfonnen von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band XV, 79.
- GAMPER, M., 1983: Controls and rates of Movement of Solifluction Lobes in the Eastern Swiss Alps. Permafrost: Fourth International Conference, Proceedings, National Academy Press, Washington D.C.
- GENSLER, G.A., 1946: Der Begriff der Vegetationszeit. Diss. Universität Zürich.
- GENSLER, G.A., 1978: Das Klima von Graubünden. Arbeitsbericht 77, Meteorologische Zentralanstalt, Zürich.
- GEIGER, R., 1961: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 4. Auflage, Braunschweig.
- GIGON, A., 1971: Vergleich alpiner Rasen auf Silikat- und auf Karbonatboden. Konkurrenz- und Stickstoffformenversuche sowie standortkundliche Untersuchungen im Nardetum und im Seslerietum bei Davos. Veröff. Geobot. Institut ETH Zürich, Stiftung Rübel 48.
- HÄCKEL, H., 1985: Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- HARTGE, K.H., 1978: Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1. Auflage.

- KARAGOUNIS, K., 1962: Zur Geologie der Berge zwischen Ofenpass, Spöltal und Val del Gallo im schweiz. Nationalpark. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band VII (Neue Folge), 48.
- KÖRNER, CH., 1977: Evapotranspiration und Transpiration verschiedener Pflanzenbestände im alpinen Grasheidegürtel der Hohen Tauern. In CERNUSCA (ed.) 1977: Alpine Grasheide Hohe Tauern. Veröff. des österreichischen MaB-Hochgebirgsprogrammes Hohe Tauern, Band 1, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.
- LANDOLT, E., 1977: Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröff. des Geobotanischen Inst. der ETH, Stiftung Rübel, Zürich, Heft 64.
- LANDOLT, E., 1984: Unsere Alpenflora. Verlag Schweizer Alpen-Club, 5.Auflage, Brugg.
- LARCHER, W., 1984: Ökologie der Pflanzen. Ulmer, 4.Auflage, Stuttgart.
- LÜDI, W., 1966: Lokalklimatische Untersuchungen am Fuornbach (Ova dal Fuorn) und am Spöl im schweizerischen Nationalpark. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band X, 56.
- LÜSCHER, P. et al., 1978: Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Band 1-3, Herausgeber W.Bosshard, EAFV Birmensdorf.
- MONTEITH, J.L., 1978: Grundzüge der Umweltphysik. Übersetzung von Prof. Dr. Reinhard Schlögl, Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt.
- NÄGELI, W., 1971: Der Wind als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe (Stillberg im Dischmatal, Kanton Graubünden). Mitt. Eidg. Anstalt forstl. Vers., Band 47, Heft 2, S.35-147.
- OHMURA, A. und ROTACH, M., 1986: Mikrometeorologie. Berichte und Skripten, Nr. 28, Geographisches Institut der ETH Zürich.
- OHMURA, A. und SCHROFF, K., 1983: Physical Characteristics of the Davos-type Pyrrometer for Short- and Long-Wave Radiation. Archiv f. Meteorol. Geophys. Bioklimat., Ser.B, 33:57-76.

- PALLMANN, H. und FREI, E., 1943: Beitrag zur Kenntnis der Lokalklimate einiger kennzeichnender Waldgesellschaften des Schweizerischen Nationalparks. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band I, 10.
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P., 1984: Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHÖNENBERGER, W. und TURNER, H., 1975: Standortseinflüsse auf Versuchsaufforstungen an der alpinen Waldgrenze (Stillberg/Davos). Mitt. Eidg. Anstalt forstl. Vers., Band 51, Heft 4, S.261-428.
- SCHRÖDER, D., 1984: Bodenkunde in Stichworten. 4.Auflage, Verlag Ferdinand Hirt, Unterägeri.
- SCHÜEPP, M., 1963: Klimatologie der Schweiz, Teil C, Lufttemperatur, 1. Teil, Beiheft zu den Annalen der Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt, Zürich.
- SCHWEIZERISCHE METEOROLOGISCHE ANSTALT: Klimadaten der Stationen Buffalora und Bernina-Hospiz (Monatstabellen).
- STEURI, M., in Vorbereitung: Schnee, Solifluktion und Vegetationsbedeckung im Nationalpark und im Albulagebiet. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich.
- TRANQUILLINI, W., 1969: Photosynthese und Transpiration einiger Holzpflanzen bei verschieden starkem Wind. Centralblatt ges. Forstwesen 86, 35-48.
- TRANQUILLINI, W., 1979: Physiological Ecology of the Alpine Timberline. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- TREPP, W. und CAMPELL, E., 1968: Vegetationskarte des schweiz. Nationalparks. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band XI, 58.
- TURNER, H., 1958: Maximaltemperaturen oberflächennaher Bodenschichten an der alpinen Waldgrenze. Wetter und Leben 10, 1-12.
- TURNER, H., 1966: Die globale Hangbestrahlung als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe. Mitt. Eidg. Anstalt forstl. Vers. Band 42, Heft 3, S. 109-168.

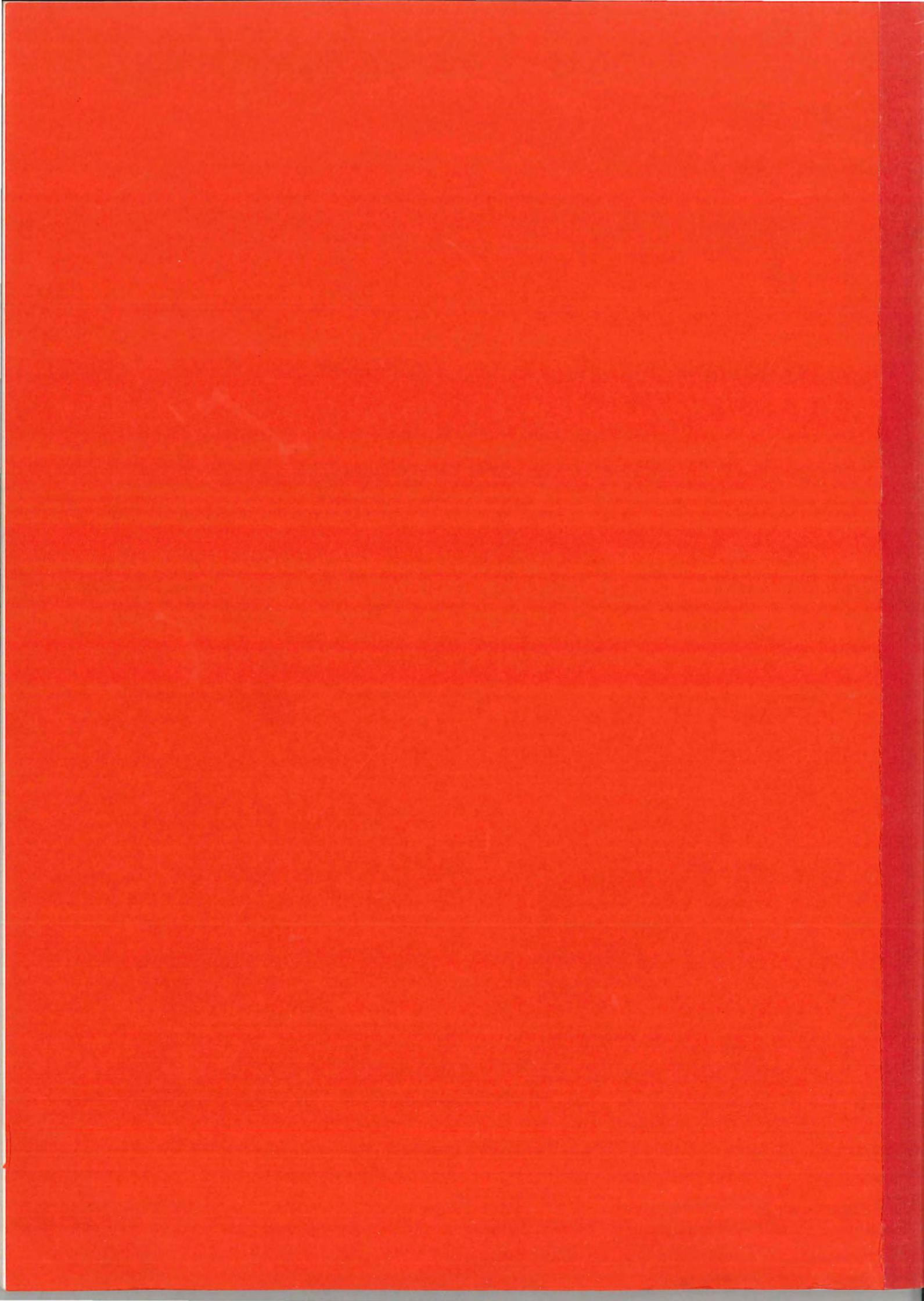
- TURNER, H., 1970: Grundzüge der Hochgebirgsklimatologie. Aus "Die Welt der Alpen", Pinguin Verlag, Innsbruck, 170-182.
- TURNER, H. und TRANQUILLINI, W., 1961: Die Strahlungsverhältnisse und ihr Einfluss auf die Photosynthese der Pflanzen. Mitt. der forstl. Bundesvers. Mariabrunn, 59. Heft, S. 69-103.
- TURNER, H., ROCHAT, P., STREULE, A., 1975: Thermische Charakteristik von Hauptstandortstypen im Bereich der oberen Waldgrenze (Stillberg, Dischmatal bei Davos). Mitt. Eidg. Anstalt forstl. Vers. Band 51, Heft 1, S.95-119.
- TURNER, H. und BLASER, P., 1977: Mikroklima, Boden und Pflanzen an der oberen Waldgrenze. Sonderdruck aus Terra Grischuna/Bündnerland 3/77, S.158-160.
- TURNER, H., 1980: Types of microclimate at high elevations. NZFS FRI Technical Paper No. 70.
- TURNER, H. und STREULE, A., 1983: Wurzelwachstum und Sprossentwicklung junger Koniferen im Klimastress der alpinen Waldgrenze, mit Berücksichtigung von Mikroklima, Photosynthese und Stoffproduktion. Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. Int. Symp. Gumpenstein, Bundesanstalt Gumpenstein, A-8952, Irdning, 617-635.
- UTTINGER, H., 1965:: Klimatologie der Schweiz, Teil E, Niederschlag, 1.Teil, Beiheft zu den Annalen der Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt, Zürich.
- UTTINGER, H., 1966: Das Klima. In: Durch den schweizerischen Nationalpark. Ein wissenschaftlicher Führer. Verlag schweizerischer Bund für Naturschutz, Basel.
- VORNDRAN, E., 1969: Untersuchungen über Schuttentstehung und Ablagerungsformen in der Hochregion der Silvretta (Ostalpen). Schriften des Geogr. Inst. der Universität Kiel, Band XXIX,3.
- VORNDRAN, G., 1972: Kryopedologische Untersuchungen mit Hilfe von Bodentemperaturmessungen. Münchner Geogr. Abhandlungen, 6.

YOSHINO, M.M., 1966: Some Aspects of Air Temperature Climate of the High Mountains in Japan. Japanese Progress in Climatology, Japanese Climatological Seminar, Tokyo University of Education, November 1966.

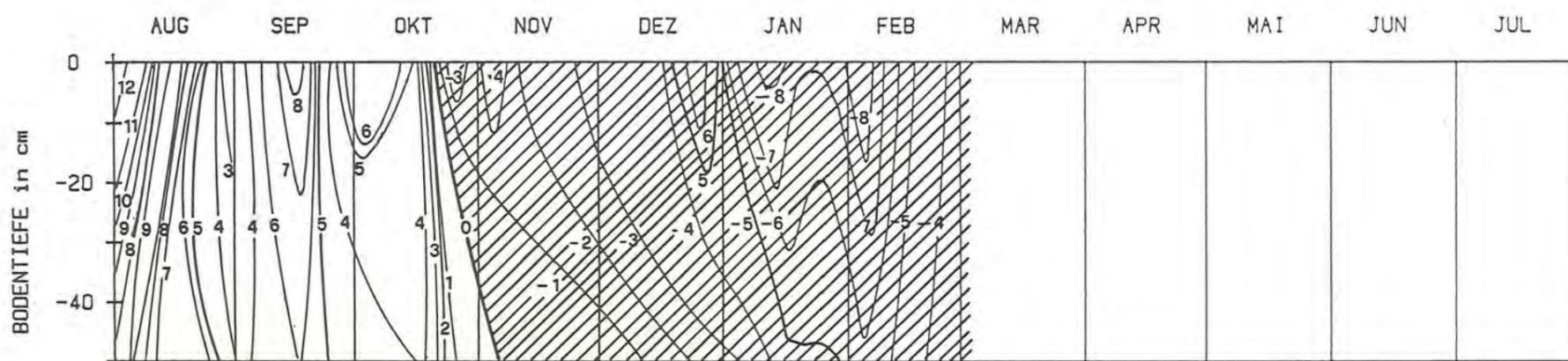
YOSHINO, M.M., 1975: Climate in a small area. University of Tokyo Press.

ZOLLER, H. et al., 1964: Die Flora des schweizerischen Nationalparks und seiner Umgebung. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band IX, 51.

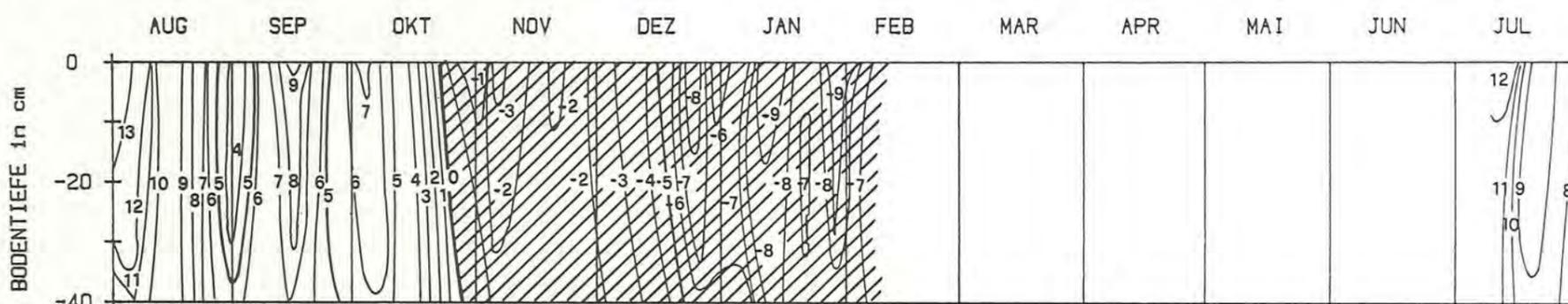
ZUBER, E., 1968: Pflanzensoziologische und ökologische Untersuchungen an Strukturrasen (besonders Girlandenrasen) im schweiz. Nationalpark. Erg. der wiss. Untersuchung im schweiz. Nationalpark, Band XI, 60.



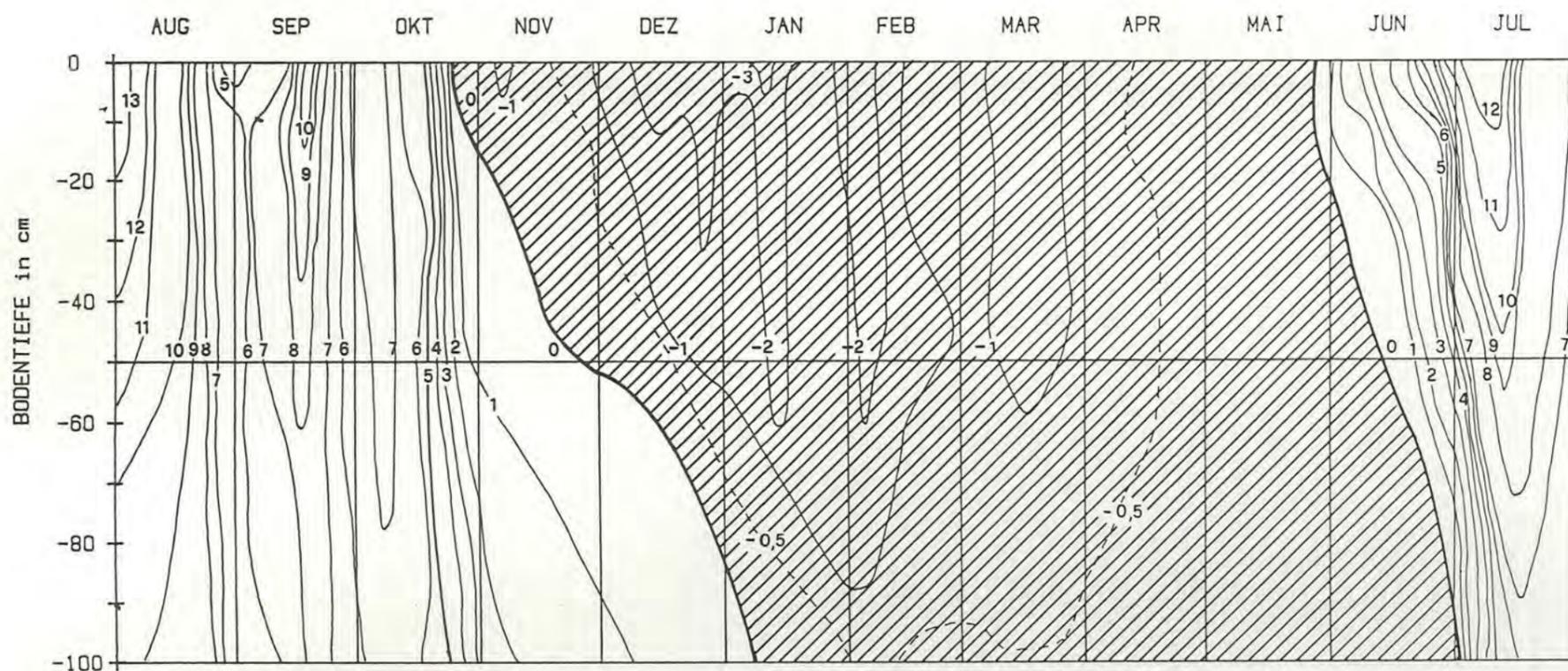
Fuorcla da la Fögla



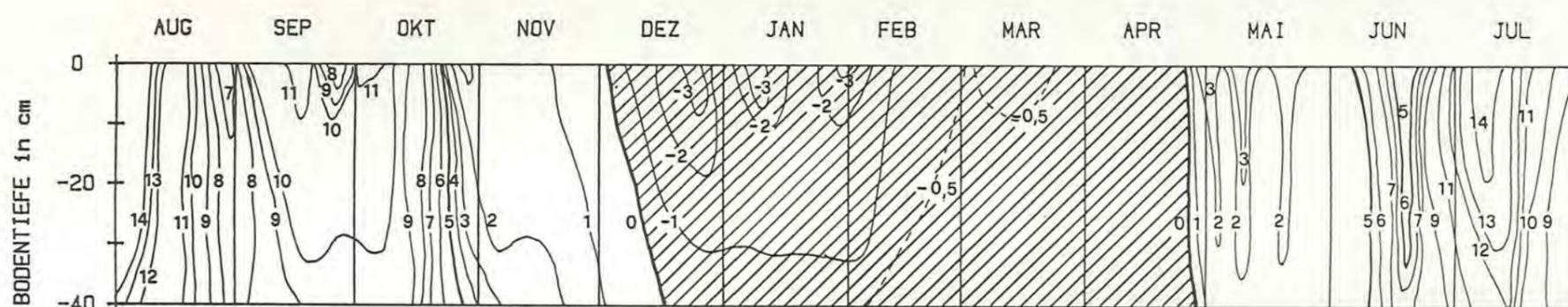
Gipfelstandort



Erdstromstandort



Waldgrenzstandort



Waldstandort

