

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

ISSN 0373-0468

Herausgegeben von

W. Lauer - P. Höllermann - K.A. Boesler

E. Ehlers - J. Grunert - M. Winiger - G. Aymans - R. Grotz

Schriftleitung: H.-J. Ruckert

Heft 93

Gerald Braun

**Vegetationsgeographische Untersuchungen
im NW-Karakorum (Pakistan)**

**Kartierung der aktuellen Vegetation und Rekonstruktion
der potentiellen Waldverbreitung auf der Basis von
Satellitendaten, Gelände- und Einstrahlungsmodellen**

1996

In Kommission bei

Ferdinand Dümmlers Verlag - Bonn

Vegetationsgeographische Untersuchungen im NW-Karakorum (Pakistan)

**Kartierung der aktuellen Vegetation und Rekonstruktion
der potentiellen Waldverbreitung auf der Basis von
Satellitendaten, Gelände- und Einstrahlungsmodellen**

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

ISSN 0373-0468

Herausgegeben von: W. Lauer · P. Höllermann · K.A. Boesler

E. Ehlers · J. Grunert · M. Winiger · G. Aymans · R. Grotz

Schriftleitung: H.-J. Ruckert

Heft 93

Gerald Braun

**Vegetationsgeographische Untersuchungen
im NW-Karakorum (Pakistan)**

Kartierung der aktuellen Vegetation und Rekonstruktion
der potentiellen Waldverbreitung auf der Basis von
Satellitendaten, Gelände- und Einstrahlungsmodellen



1996

In Kommission bei

FERD. DÜMMLERS VERLAG · BONN

— Dümmlerbuch 7643—

Vegetationsgeographische Untersuchungen im NW-Karakorum (Pakistan)

Kartierung der aktuellen Vegetation und Rekonstruktion
der potentiellen Waldverbreitung auf der Basis von
Satellitendaten, Gelände- und Einstrahlungsmodellen


von

Gerald Braun

mit 13 Tabellen, 8 Photos, 45 Abbildungen und 4 farbigen Anlagen

In Kommission bei

FERD. DÜMMLERS VERLAG · BONN

 *Dümmlerbuch 7643*

alle Rechte vorbehalten

ISBN 3 - 427 - 76431 - 1

© 1996 Ferd. Dümmlers Verlag, 53113 Bonn

Herstellung: Druckerei Plump, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort

Ein grundlegendes Problem in der Hochgebirgsforschung besteht in der Beschaffung repräsentativer und ausreichender Daten zur Landschaftscharakterisierung. Ursachen hierfür sind die außerordentlich große morphologische und ökologische Heterogenität und die eingeschränkte Zugänglichkeit der Gebirge. Ein diesbezüglich hohes Potential liegt in der Auswertung von Satellitendaten sowie dem Einsatz statistischer und physikalischer Modelle mit deren Hilfe einerseits zeitlich invariante Geofaktoren wie die Verbreitung der aktuellen Vegetation kartiert und zeitlich hochvariable Faktoren wie die potentielle direkte Einstrahlung flächendeckend modelliert werden können. Darüberhinaus können auf der Grundlage gemessener und modellierter Geofaktoren Landschaftspotentiale flächendeckend mit hoher räumlicher Auflösung ausgewiesen werden. Der Reiz dieses methodischen Ansatzes liegt mit Sicherheit darin, daß zur Analyse der Vegetationsverarbeitung im Untersuchungsgebiet überwiegend modellierte Daten und Fernerkundungsdaten genutzt werden. Diese Vorgehensweise soll jedoch in keinem Falle die Meinung propagieren, Felderhebungen, wie sie auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden, seien durch Modelldaten zu ersetzen. Allerdings ist es m. E. notwendig zu überlegen, wie eine Integration dieser unterschiedlichen Daten unter Berücksichtigung von Geoinformationsmethoden angelegt werden muß, um die durch Felderhebungen, Satellitendaten und Modelle gewonnenen Informationen sinnvoll in einen Bezug zum betrachteten Raum und zum untersuchten Problem zu stellen. Wenn die Eignung einer solchen Methodik für landschaftsökologische Fragestellungen im Rahmen einer geographischen Forschungsarbeit mit thematisch-regionalem Schwerpunkt untersucht werden soll, kann dies entweder nur durch interdisziplinäre Arbeit geschehen, die methodische und thematische Schwerpunkte verbindet oder durch zeitintensive Einarbeitung in die Methoden der digitalen Bildverarbeitung.

Die ersten Gehversuche auf dem Terrain der Verarbeitung digitaler Fernerkundungsdaten erleichterten mir U. Tempelmann und W. Schickler vom Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn (IPB). T. Scherer vom IPB stellte freundlicherweise seine Digitalisierungssoftware für die Bearbeitung des DHM zur Verfügung. U. Schmidt war eine unentbehrliche Hilfe bei der Digitalisierung der topographischen Grundlagen. Zur computergestützten Auswertung der Satellitendaten waren ausgedehnte Feldarbeiten notwendig. Für die hierbei zuteil gewordene Unterstützung in Organisation, Versorgung und Transport durch Ikram Beg, Niknam Beg und Fedar Mohammed Beg möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanken.

Überhaupt ermöglicht wurde die Arbeit erst dank großzügiger Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) sowie durch die unermüdliche Arbeit der Koordinatorin des Projektes Culture Area Karakorum (CAK), Frau Prof. Dr. I. Stellrecht.

Meinem akademischen Lehrer Herrn Prof. Dr. M. Winiger bin ich für die zahlreichen Diskussionen verbunden, die in schwierigen Phasen oft eine entscheidende Hilfe darstellten. Darüberhinaus nahm er die Mühe auf sich, die im Rahmen der Arbeit aus den Satellitendaten erzeugte Vegetationskarte während eines Feldaufenthaltes im Sommer 1993 punktuell zu verifizieren. Ihm und

VI

meinen Kollegen S. Weiers und T. Cramer sei ganz herzlich für die fruchtbare Zusammenarbeit und das hervorragende Arbeitsklima gedankt. Die endgültige Fertigstellung der Arbeit wurde in äußerst großzügiger Weise von der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) unterstützt. Insbesondere Herrn Dr. R. Backhaus möchte ich für den zur Verfügung gestellten Freiraum bei der Endfassung vorliegender Arbeit danken. Meiner Frau Carola verdanke ich interessante und anregende Diskussionen über innovative Konzepte in der digitalen Bildverarbeitung.

Bonn, im September 1995

Gerald Braun

Inhalt

Vorwort.....	V
Inhalt.....	VII
Verzeichnis der Abbildungen.....	IX
Verzeichnis der Tabellen.....	XII
Verzeichnis der Photographien.....	XIII
Verzeichnis der Anlagen.....	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Forschungsziele.....	1
1.2 Stand der Forschung.....	5
2 Methodisches Vorgehen.....	6
2.1 Vegetationskartierung aus digitalen LANDSAT-5-TM-Daten.....	11
2.1.1 Das LANDSAT-5-System.....	11
2.1.2 Datenbeschaffung und Datenqualität.....	15
2.1.2.1 Beschaffungsmaßnahmen, -Probleme und Optimierung der Datenakquisition.....	15
2.1.2.2 Beurteilung der Datenqualität und Störungs-beseitigung.....	16
2.1.3 Grundlagen interaktiver und automatischer Auswertung von Fernerkundungsdaten.....	19
2.1.3.1 Grundlagen der satellitengestützten Fernerkundung von Landoberflächen.....	19
2.1.3.2 Computergestützte Klassifikation.....	25
2.1.4 Klassifikation der Daten.....	30
2.1.4.1 Histogrammanalyse der Kanäle 1-5 und 7.....	30
2.1.4.2 Übertragung von Trainingsgebietsdaten in die digitalen Satellitendaten und Analyse der Trainingsgebietsstatistik.....	36
2.1.4.3 Segmentierung der Satellitendaten zur Ausblendung bewässerter Flächen.....	41
2.1.4.4 Klassifikation des Datensatzes mit euklidischer Distanz und Verifikation durch Konfusionsmatrix.....	42
2.1.4.5 Verbesserung der Vegetationskarte durch interaktive Verfahren.....	45
2.1.4.6 Geokorrektur der Daten und Anlage der Karte.....	46
2.2 Die Generierung eines hochaufgelösten DHM und die Ableitung potentieller Einstrahlungsmodelle.....	47
2.2.1 Die Auswahl und Verarbeitung der topographischen Grundlagen und die Erstellung eines Raster-DHM.....	47
2.2.2 Berechnung von Expositions- und Hangneigungsmodellen.....	52
2.2.3 Die Ableitung eines Modells der potentiellen direkten Einstrahlung.....	52
2.2.3.1 Berechnung der potentiellen Sonnenscheindauer und der potentiellen direkten Einstrahlung.....	52
2.2.3.2 Korrektur der potentiellen direkten Einstrahlung mit der horizontabhängigen potentiellen Besonnungsdauer.....	63
3 Ergebnisse.....	64
3.1 Regionale Einordnung des Untersuchungsraumes.....	64
3.1.1 Differenzierung der Landschaft und Geologie des Untersuchungsgebietes.....	64
3.1.2 Klima.....	68

3.1.3 Die Verbreitung der Vegetationsformationen.....	72
3.1.4 Die Nutzung der biologischen Ressourcen durch die Bevölkerung.....	78
3.2 Landschaftsökologische Analyse der Vegetationsverbreitung im NW-Karakorum.....	81
3.2.1 Die räumliche Anordnung der Vegetation im NW-Karakorum und die Interpretation der Vegetationskarte.....	81
3.2.1.1 Chenopodiaceen-Steppe	84
3.2.1.2 Montane Artemisia-Steppe.....	85
3.2.1.3 Montane bis subalpine Waldsteppe und Steppenwald.....	87
3.2.1.4 Montaner, feucht-temperierter Nadelwald.....	88
3.2.1.5 Hochmontane bis subalpine Laubwälder mit <i>Betula utilis</i>	90
3.2.1.6 Subalpines bis alpines Krummholz, Triften, alpine Cyperaceen-Matten und Wiesensteppe.....	91
3.2.1.7 Vergleichende Diskussion der Vegetationskarte NW-Karakorum.....	93
3.2.2 Landschaftsökologische Analyse des räumlichen Verbreitungsmusters der Vegetationsformationen	95
3.3 Ein stochastischer Ansatz zur Modellierung der potentiellen Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Karakorum.....	104
3.3.1 Ansätze zur Quantifizierung der Beziehung zwischen Vegetationsverbreitung und Standortfaktoren	104
3.3.2 Die Verbreitungsmerkmale feucht-temperierter Nadelwälder, montan bis subalpiner Laubwälder mit <i>Betula utilis</i> und der Steppenwälder im Landschaftsmodell.....	107
3.3.3 Interpretation und Bedeutung 2-dimensionaler Streudiagramme zur Rekonstruktion der potentiellen Verbreitungsgrenzen feucht-temperierter Nadelwälder	112
3.3.4 Räumliche Approximation ökologisch-physiologischer Optimalstandorte von Waldformationen durch mehrdimensionale Normalverteilung	118
3.3.5 Maximum Likelihood-Klassifikatoren digitaler Bildverarbeitungsanlagen als Instrument zur Analyse der Wahrscheinlichkeitsdichte in einer Umweltsimulation.....	122
3.3.6 Kartierung potentieller Standorte des feucht-temperierten Nadelwaldes.....	124
4 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick.....	131
5 Zusammenfassung	140
6 Summary	142
7 Literatur.....	144
8 Photoanhang.....	153

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Schema der Verknüpfung von Fernerkundungs-, Boden- und digitalen Modelldaten.....	8
Abb. 2:	Flußdiagramm der Arbeit.....	10
Abb. 3:	Die LANDSAT-Plattform.....	14
Abb. 4:	Sonnensynchrone Umlaufbahn der LANDSAT-4 und -5 Satelliten.....	14
Abb. 5:	LANDSAT Aufnahmemuster.....	14
Abb. 6:	Gestörte Bildausschnitte, Zeilenmittelwertprofile und die weitgehende Eliminierung des "banding" durch lokaladaptive Schwellenwertverfahren.....	17
Abb. 7:	Schematische Darstellung der Reflexions-, Streuungs- und Absorptionsprozesse in der Erdatmosphäre und an der Erdoberfläche.....	20
Abb. 8:	Reflektierte, absorbierte und transmittierte Strahlung eines grünen Blattes.....	23
Abb. 9:	Dreidimensionaler Merkmalsraum der Kanäle 3, 4 und 7 des LANDSAT-5-TM.....	28
Abb. 10:	Klassifikationsstrategie zur Vegetationskartierung im NW-Karakorum.....	29
Abb. 11:	Histogramme der Kanäle 1-5 und 7 der LANDSAT-5-TM-Szene von 1990.....	31
Abb. 12:	2-dimensionale Häufigkeitshistogramme der LANDSAT-TM - Kanäle 1/4, 3/4 und 1/7.....	35
Abb. 13:	Identifikation von Trainingsgebieten durch Interpretation von Falschfarbkompositen und Extraktion von spektralen Signaturen aus den digitalen LANDSAT-5-TM-Daten.....	Anlage I
Abb. 14:	Spektrale Signaturen aus den LANDSAT-5-TM-Kanälen 1-5 und 7.....	40
Abb. 15:	Vergleich zwischen Ausschnitten aus der bearbeiteten LANDSAT-5-TM-Szene und Photographien derselben Standorte im Tal des Minapin-Gletschers.....	Anlage I
Abb. 16:	Klassifikationsergebnis in 2-dimensionalen Merkmalsräumen für verschiedene Kombinationen von LANDSAT-5-TM-Kanälen.....	Anlage II
Abb. 17:	Vergleich unterschiedlicher Repräsentationsformen der topographischen Daten mit geometrisch korrigierten Daten des Kanal 3, LANDSAT-5-TM.....	50

Abb. 18:	Geometrie direkter und diffuser Strahlung nach MONTEITH (1978), verändert.....	54
Abb. 19:	Jahreszeitlich variable Besonnungsdauer für einen Ausschnitt aus dem zentralen Hunza-Tal.....	56
Abb. 20:	Jahresgang der Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung in [cal/cm ² *d] bei wolkenfreiem Wetter auf unterschiedlich geneigten und exponierten Flächen.....	61
Abb. 21:	Diagramm des Jahresganges der Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung in [cal/cm ² *d] bei wolkenfreiem Wetter auf unterschiedlich geneigten und exponierten Flächen.....	62
Abb. 22:	Karte des Untersuchungsraumes und der angrenzenden Gebiete.....	66
Abb. 23:	Klimadiagramme der Stationen Naltar, Karimabad und Misgar, im unteren, mittleren und zentralen Hunza-Tal.....	72
Abb. 24:	Schematisches S-N-Profil der wichtigsten Vegetationsformationen vom Himalaya-Hauptkamm bis in den NW-Karakorum.....	74
Abb. 25:	Übersichtsbild des Untersuchungsraumes mit der Lage der Vegetationskartierung und der Feldaufnahmen.....	Anlage II
Abb. 26:	Verbreitung der Vegetationsformationen im Hunza-Tal in Abhängigkeit von Höhe und Exposition der Standorte.....	Anlage III
Abb. 27:	Vergleich einer manuell gefertigten Vegetationskarte des Hunza-Karakorum aus PAFFEN et al. (1956) und der Vegetationskarte des NW-Karakorum aus einer überwachten Klassifikation digitaler LANDSAT-5-TM-Daten.....	Anlage II
Abb. 28:	Höhen- und Expositionsabhängigkeit des NDVI, berechnet für den NW - Karakorum auf der Basis der LANDSAT-5-TM-Szene vom 6. 7. 1990 und des DHM.....	97
Abb. 29:	Digitale Vegetationskarte mit Höhen- und Expositionsinformation und die Abstraktion der Raummuster der Vegetationsverbreitung in einem Modelltalkessel.....	99
Abb. 30:	Tagesgang der Bewölkung an der Station Miar am Barpu-Gletscher.....	101
Abb. 31:	Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung entlang eines Nord-Süd orientierten Transekts im zentralen Hunza-Tal von Karimabad nach Nager.....	Anlage III
Abb. 32:	Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung entlang eines Nord-Süd orientierten Transekts im zentralen Hunza-Tal von Nasirabad nach Minapin.....	Anlage III
Abb. 33:	Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung entlang eines Nord-Süd orientierten Transekts im Chaprot-Tal.....	Anlage III

Abb. 34:	Wüchsigkeit einer Pflanzenart in Abhängigkeit von ihrem physiologischen und ökologischen Optimum.....	105
Abb. 35:	Beziehung zwischen der Häufigkeit des Auftretens feucht-temperierter Nadelwälder und unterschiedlichen Standortfaktoren im Hunza-Tal.....	108
Abb. 36:	Beziehung zwischen der Häufigkeit des Auftretens hochmontaner bis subalpiner Laubwälder und unterschiedlichen Standortfaktoren im Hunza-Tal.....	109
Abb. 37:	Beziehung zwischen der Häufigkeit des Auftretens montaner bis subalpiner Waldsteppe und Steppenwälder und unterschiedlichen Standortfaktoren im Hunza-Tal.....	110
Abb. 38:	Zweidimensionales Verbreitungsdiagramm der feucht - temperierten Nadelwälder im Hunza-Karakorum in Abhängigkeit von Höhe und Exposition der Standorte.....	113
Abb. 39:	Zweidimensionale Verbreitungsdiagramme der feucht-temperierten Nadelwälder in 2 kleineren Testräumen in Abhängigkeit von Exposition und Höhe der Standorte.....	117
Abb. 40:	Altoisothermendiagramm errechnet aus den von WEIERS (1994) ermittelten mittleren monatlichen Vertikalgradienten der Lufttemperatur im Hunza-Karakorum.....	120
Abb. 41:	Schematische Darstellung der im GIS integrierten Datenebenen und ihrer Analyse zur Rekonstruktion der potentiellen Standorte feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Karakorum.....	121
Abb. 42:	Aktuelle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Tal. Die Waldverbreitung wurde aus LANDSAT-5-TM-Daten interpretiert und entspricht dem Stand vom 6.7.1990. Die Karte wurde geometrisch rektifiziert und mit einem Höhenlinienauszug aus dem DHM überlagert.....	126
Abb. 43:	Potentielle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Tal. Die Verbreitungsmuster wurden mit einem Maximum Likelihood-Klassifikator auf der Basis unterschiedlicher Standorteigenschaften errechnet.....	Anlage III
Abb. 44:	Aktuelle und potentielle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Chaprot-Tal. Die Verbreitungsmuster wurden mit einem Maximum Likelihood-Klassifikator auf der Basis von unterschiedlichen Standorteigenschaften errechnet.....	128
Abb. 45:	Aktuelle und potentielle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Minapin-Tal. Die Verbreitungsmuster wurden mit einem Maximum Likelihood-Klassifikator auf der Basis von unterschiedlichen Standorteigenschaften errechnet.....	129

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Technische Daten der LANDSAT-Erderkundungssatelliten.....	12
Tab. 2:	Überblick über die Interpretationsmöglichkeiten für die LANDSAT-5-TM-Kanäle.....	24
Tab. 3:	Korrelationsmatrix der Spektralkanäle 1-5 und 7 der LANDSAT -5-TM-Daten.....	32
Tab. 4:	Korrelationsmatrix der Kanäle 1-5 und 7 des LANDSAT-5-TM für einen schneefreien Ausschnitt aus der bearbeiteten Szene.....	33
Tab. 5:	Mittelwerte der Trainingsgebiete in den Spektralkanälen 1-5 und 7 des LANDSAT-5-TM-Sensors.....	38
Tab. 6:	Konfusionsmatrix zur Schätzung der in der Klassifikation aufge- tretenen Fehler.....	44
Tab. 7:	Verfügbare topographische Karten aus dem Untersuchungsgebiet und benachbarten Regionen.....	48
Tab. 8:	Referenzblatt zur Koordinatenmessung aus den Stereoautographen- plänen NW-Karakorum 1:50.000.....	51
Tab. 9:	Tagessummen der globalen Strahlung auf der Basis von Messungen im Tibesti-Gebirge bei wolkenfreiem Wetter für verschiedene Hang- neigungen und Expositionen in [cal/cm ² *d].....	60
Tab. 10:	Berechnete Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung in 21° nördlicher Breite, 1020 m Höhe ü. NN, Transmissionskoeffizient 0,75, in [cal/cm ² *d].....	61
Tab. 11:	Mittlere tägliche potentielle direkte Einstrahlung in 3000 m ü. NN und 36° 15' nördl. Breite.....	63
Tab. 12:	Lineare Regressionsgleichung zur Bestimmung des vertikalen Temperaturgradienten aus 16 Meßreihen (reduziert auf Periode 1965- 1989).....	68
Tab. 13:	Flächenvergleich zwischen der im Jahr 1990 vorhandenen und der potentiellen Fläche feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Karakorum, berechnet für 3 Szenarien.....	130

Verzeichnis der Photographien

Photo 1:	Holzeinschlag in der Stufe des feucht-temperierten Nadelwaldes im oberen Chaprot-Tal. Höhe: 3300 m, Exposition: N, Aufnahmedatum: 9.8.1991.....	153
Photo 2:	Degradierete <i>Chenopodiaceen</i> -Steppe nahe Karimabad. Höhe: 2330 m, Exposition: S, Aufnahmedatum: 9.5.1990.....	153
Photo 3:	Degradierete Waldsteppe oberhalb Haiderabad. Höhe: 3520 m, Exposition: S, Aufnahmedatum: 10.5.1990.....	154
Photo 4:	<i>Artemisia-Juniperus</i> -Waldsteppe auf einer Seitenmoräne des Minapin-Gletschers. Höhe: 2820 m, Exposition: SW, Aufnahmedatum: 22.7.1990.....	154
Photo 5:	Durch Holzeinschlag degradierter feucht-temperierter Nadelwald mit <i>Picea smithiana</i> im Minapin-Gebiet. Höhe: 2910 m, Exposition: N, Aufnahmedatum: 22.7.1990.....	155
Photo 6:	<i>Betula utilis</i> -Bestand am Pisan-Gletscher. Höhe: 3000 m, Exposition: N, Aufnahmedatum: 31.7.1991.....	155
Photo 7:	<i>Juniperus communis</i> -Bestand in der oberen montanen Stufe im Minapin-Tal, unterhalb der Rakaposhi-Nordabdachung. Höhe: 3300 m, Exposition: ONO, Aufnahmedatum: 24.7.1990.....	156
Photo 8:	Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme aus dem oberen Chaprot. Aufgenommen im Jahre 1959. Die Aufnahme zeigt Waldbestände im oberen Chaprot-Tal auf Seitenmoränen, die zum Zeitpunkt der Feldbegehung nicht mehr angetroffen werden konnten.....	156

Verzeichnis der Anlagen

Anlage I:	Zusammendruck der Abb. 13 und 15
Anlage II:	Zusammendruck der Abb. 16, 25 und 27
Anlage III:	Zusammendruck der Abb. 26, 31, 32, 33 und 43
Anlage IV:	Vegetationskarte des NW-Karakorum. Erstellt mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung aus LANDSAT-5-TM-Daten

Verzeichnis der ...

121	...	...
122	...	...
123	...	...
124	...	...
125	...	...
126	...	...
127	...	...
128	...	...
129	...	...
130	...	...
131	...	...
132	...	...
133	...	...
134	...	...
135	...	...
136	...	...
137	...	...
138	...	...
139	...	...
140	...	...
141	...	...
142	...	...
143	...	...
144	...	...
145	...	...
146	...	...
147	...	...
148	...	...
149	...	...
150	...	...

Verzeichnis der ...

151	...	...
152	...	...
153	...	...
154	...	...
155	...	...
156	...	...
157	...	...
158	...	...
159	...	...
160	...	...
161	...	...
162	...	...
163	...	...
164	...	...
165	...	...
166	...	...
167	...	...
168	...	...
169	...	...
170	...	...

1 Einleitung

Aufgabe der Geographie ist es, den kausalen, funktionalen, ökologischen Zusammenhängen unter Heranziehung aller in den Einzelwissenschaften erworbenen Kenntnisse nachzugehen.

C. Troll, 1959

1.1 Forschungsziele

Während beschreibende Überblicksarbeiten zur Hochgebirgsforschung heute in großer Zahl vorhanden sind, besteht ein Defizit an Detailforschung und Kartierungsarbeiten auf zuverlässiger topographischer Grundlage. Dieses Defizit steht im Widerspruch zu den Anforderungen, die moderne Rauminformationssysteme an die Erhebungsmethodik und die Dokumentationsweise von raumbezogenen Daten stellen. Eine Analyse von Gebirgsökosystemen mit Geoinformationssystemen, wie sie in der vorliegenden Arbeit versucht wird, ist ohne eine genaue Lokalisierung von punktuell erhobenen Daten und ohne die Verbindung kartographisch dokumentierter Befunde mit dem Relief des Untersuchungsgebietes undenkbar.

Obwohl die physisch-geographische Forschung heute in immer stärkerem Maße quantitative räumliche Befunde rechnerisch zu integrieren und zu extrapolieren versucht, ergibt sich die wissenschaftliche Bedeutung großmaßstäbiger Kartierung nicht nur aus dem zu beobachtenden Wandel der Arbeitsmethodik, sondern auch aus der zunehmenden Differenziertheit der Modellvorstellung von Hochgebirgsräumen und hochgebirgstypischen Landschaftsmustern.

Aufbauend auf dem klassischen dreidimensionalen Raumverständnis als dem konzeptionellen Gerüst der vergleichenden Hochgebirgsgeographie entwickelt sich in jüngerer Zeit ein modifiziertes modellhaftes Bild von der Gebirgslandschaft. Es wird nicht mehr durch die markanten absoluten Höhendifferenzen zwischen Talböden und Gipfelfluren dominiert, sondern durch Aspekte topographischer Dynamik ergänzt, die sich aus der Reliefenergie der betrachteten Räume ergeben. So bilden neben der Vertikalität des Gebirges kleinräumig alternierende, topographische Elemente wie Hangneigung und Exposition den grundlegenden topoklimatischen Bezug für die Untersuchung des Gebirgsraumes.

Aus dieser Betrachtungsweise ergibt sich ein erweitertes Modell der Hochgebirgslandschaft. Typisch für Gebirgsräume ist eine mehr oder weniger starke, fliesenartige Verteilung der Biotope im Raum. Ihre räumliche Anordnung zeigt eine starke Abhängigkeit von der Exposition und der Höhe, die das Topoklima maßgeblich modifizieren. Da diese topographischen Parameter im Hochgebirgsrelief häufig wechseln, entsteht ein an *patchwork* erinnerndes Landschaftsmuster.

Um diese Befunde landschaftsökologisch interpretierbar darzustellen, eignen sich Streuungsdiagramme, die die Vegetationsverbreitung in Abhängigkeit von Höhe und Exposition der Standorte

wiedergeben (vgl. Abb. 26 in Anl. III, Abb. 28 und 29). Sie wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt und erlauben überregionale, vergleichende Analysen der Vegetationsverbreitung im Gebirgsrelief. Wenn die Achsen der Streuungsdiagramme mit einer ökoklimatologischen Skalierung versehen werden können, lassen sich die Verbreitungsgrenzen der Vegetationsformationen im Diagramm mit den topoklimatischen Standortbedingungen korrelieren.

Die Zuverlässigkeit der Streuungsdiagramme ist abhängig von der Genauigkeit und der Anzahl der Befunde, die zu ihrer Erstellung genutzt werden. Die ihnen zugrundeliegenden Daten können sowohl im Gelände aufgenommen, als auch mit Hilfe von Geoinformationssystemen gewonnen werden, wobei die Datenaufbereitung mit einem Geoinformationssystem einige Vorteile gegenüber den klassischen Methoden aufweist. Sie liegen in der Nachvollziehbarkeit der Aufnahmemethode und der großen Zahl von Befunden, die in kurzer Zeit eingearbeitet werden können. Dies setzt allerdings voraus, daß die Topographie und weitere wesentliche Geofaktoren entweder räumlich modellierbar oder flächendeckend meßbar sind.

Trifft dies zu, könnten auf der Basis der flächendeckenden Daten die Ursachen für ein beobachtetes Raummuster, beispielsweise die Vegetationsverbreitung, untersucht werden. Sind die Kausalitäten, die zum Verbreitungsmuster der Vegetation im Raum führen, bekannt, sollte eine flächendeckende, rechnerische Rekonstruktion des beobachteten Landschaftsmusters durchführbar sein.

Ansätze dazu finden sich bei HORMANN (1980, 1986), der sowohl eine flächendeckende Niederschlags- und Temperaturmodellierung am Beispiel der Himalayaländer vorlegte, als auch die Zusammenhänge zwischen berechneten Niederschlagsdaten, Temperaturdaten und der Verbreitung der Vegetation im Himalaya untersuchte. Bisher geäußerte Kritik an dem Ansatz bezieht sich zum überwiegenden Teil darauf, daß die klimatischen Grenzwerte einzelner Taxa untersucht werden und daß durch die Vernachlässigung von Einstrahlung, Exposition und Hangneigung ein verzerrtes Bild der ökologisch-physiologischen Ansprüche des Taxum entsteht (Diskussion zu HORMANN 1980). Unbezweifelbar ist jedoch, daß die Arbeit HORMANNs konsequent den klassischen geökologischen Ansätzen zur Bestimmung klimatischer Amplituden von Vegetationsformationen folgt. Durch flächendeckend modellierte Daten könnte die Kennzeichnung der klimatischen Grenzwerte von Vegetationsformationen unterstützt werden; insbesondere wenn man bedenkt, daß die klassische Vorgehensweise durch punktuelle Messung im Gelände nur eine relativ geringe Anzahl von Befunden zuläßt.

Neben den oben skizzierten, eher operationellen Gründen können wissenschaftstheoretische Kriterien angeführt werden, die zum Popularitätsgewinn der Rasterdatenverarbeitung in der physischen Geographie beitragen. Einerseits kommt die Repräsentation der Landschaftsinhalte und Geofaktoren in Form von Rasterdaten der mosaikartigen Landschaftsstruktur im Gebirge entgegen, andererseits erlaubt die Einbeziehung digitaler Höhenmodelle die Analyse der dreidimensionalen Lagebeziehung der Landschaftsinhalte. Der topographische Bezug erschließt auf diese Weise Möglichkeiten zur Untersuchung topologisch-kausaler Zusammenhänge zwischen pedologischen, hydrologischen, klimatologischen und vegetationsgeographischen Befunden.

Einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung von rasterorientierten Rauminformationssystemen hat die Satellitenfernerkundung geleistet. Der geowissenschaftlich-kartographische Wert der Satellitendaten wurde schnell erkannt, und es wurde nach Möglichkeiten gesucht, Satellitendaten mit weiteren geowissenschaftlich relevanten Daten zu kombinieren.

Die Auswertung von Satellitenbildern hat heute einen Stand erreicht, der es ermöglicht, auch in kompliziert strukturierten Gebieten wichtige Landschaftsdaten wie die aktuelle Vegetationsbedeckung zu erheben. Noch ungelöst ist, inwieweit die aus den Satellitendaten gewonnene Information über die Vegetationsdecke mit der geographischen und geobotanischen Systematik kompatibel ist. Darüberhinaus ist ungeklärt, ob die entwickelten Methoden zur Auswertung der Satellitendaten im komplexen Hochgebirgsrelief zu Ergebnissen mit ausreichender Genauigkeit führen.

Die Repräsentation von Höhenmodellen als digitale Rasterdaten eignet sich besonders im Gebirge gut zur flächendeckenden Berechnung ökologisch relevanter Daten. Beispiele hierfür sind die reliefgestützte, räumliche Extrapolation der Jahresniederschläge und der Temperaturen (WEIERS 1995) oder die Berechnung der potentiellen Sonnenscheindauer (SCHMIDT 1993). Sowohl die potentielle Besonnung als auch die Einstrahlung besitzen in der komplex strukturierten Hochgebirgslandschaft eine große zeitlich-räumliche Dynamik. Sie beeinflussen darüberhinaus wesentlich die topoklimatische Differenzierung des Gebirgsraumes und sind durch in situ-Messungen nicht flächendeckend erfassbar.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit auf der Grundlage von digitalen Geländemodellen Einstrahlungsberechnungen vorgenommen und in ein Geographisches Informationssystem des Untersuchungsgebietes integriert werden können.

Die auf diese Weise gewonnenen potentiellen Einstrahlungsdaten können mit Reliefdaten, Niederschlags-, Temperatur- und Bodenkarten sowie einer Vielzahl weiterer ökologisch relevanter Parameter verknüpft werden. Ihre Rekombination und Weiterverarbeitung ermöglicht die Ableitung von wichtigen, mit konventionellen Methoden nicht erschließbaren räumlichen Informationen, wie z.B. die Berechnung von kaltauftbeeinflussten Geländepartien oder erosionsgefährdeten Reliefabschnitten.

Dieser methodisch-konzeptionelle Rahmen umfaßt vegetationsgeographisch-kartographische, topoklimatische und synthetisch-analytische Aspekte der Hochgebirgsgeographie. Ihre Umsetzung erfolgte am Beispiel des Hunza-Tales im NW-Karakorum. Die langanhaltende und intensive Bewirtschaftung dieses ressourcenarmen Hochgebirgsraumes führte in allen Höhenstufen zu einer Veränderung der Vegetationsdecke. Angesichts des erheblichen Nutzungsdrucks auf die Vegetation im NW-Karakorum steht daher im analytischen Teil der Arbeit die Frage nach dem Landschaftspotential oder der potentiellen Naturraumausstattung im Vordergrund.

Durch den Ausbau des Karakorum Highway 1974-1978 wurde das Hunza-Tal wirtschaftlich eng an die Distrikthauptstadt Gilgit angebunden. In Folge verloren die traditionellen Wirtschaftsformen wie z.B. die Nutzung der Hochalmen an Bedeutung (KREUTZMANN 1987). Obwohl aufgrund des sozioökonomischen Wandels vielerorts eine Regeneration der Hochweiden beobachtet werden

kann, besteht doch die Gefahr, daß sich der Nutzungsdruck auf die tieferen, leichter erreichbaren Lagen verstärkt. Problematisch ist hierbei, daß gerade die Sommerdörfer, also die untere Weidestafel, im Bereich der ohnehin durch Einschlag stark gefährdeten Nadelwaldstufe liegen. Letztere trägt neben ihrem subsistenzuell-kommerziellen Wert wesentlich zur Stabilisierung der Hangzonen und der Wasserbilanz bei (SHEIKH u. KHAN 1982).

Das Hunza-Tal markiert in seinem West-Ost verlaufenden Abschnitt die nördliche, vermutlich trockenheitsbedingte Grenze der wirtschaftlich wichtigen Kiefern- und Fichtenwälder. Aufgrund der Grenzlage können in dieser Höhenstufe durch eine Nutzungsintensivierung erhebliche, vielleicht irreversible Schäden entstehen.

Um eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressourcen, vor allem der ohnehin bereits stark degradierten Nadelwälder, zu planen und zu steuern, müssen einerseits die ökologischen Ansprüche der Waldformationen bekannt sein, andererseits grundlegendes Wissen über das Landschaftspotential (z.B. räumlich und zeitlich differenzierte Daten zu Niederschlag, Temperatur, Bodenfeuchte, Einstrahlung und Windgeschwindigkeit) verfügbar sein. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die generelle Kennzeichnung der ökologischen Amplituden der Pflanzenformationen nicht modernen Planungsansprüchen genügen kann. Ideal wäre eine ökologische Bewertung des Untersuchungsraumes, die alle für die Vegetationsverbreitung bedeutsamen Geofaktoren integriert. Dies ist in Hochgebirgsräumen um so dringlicher, als hier die hohe Reliefenergie die mikroklimatischen Bedingungen und das Verbreitungsmuster der natürlichen Vegetation räumlich stark modifiziert. Aus diesem Grund können punktuelle Befunde eine Extrapolation der Landschaftsausstattung oder der ökoklimatischen Faktoren nur sehr eingeschränkt gestatten.

Aus der Verknüpfung der aufgezeigten methodischen und inhaltlichen Schwerpunkte ergeben sich fünf zentrale Fragen, die der Arbeit zugrunde liegen.

1. Besitzen Vegetationskarten aus dem Hochgebirge, die mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung aus Fernerkundungsdaten erzeugt werden, eine ausreichende Klassifizierungsgenauigkeit?
2. Inwieweit decken sich die aus den Fernerkundungsdaten kartierten Vegetationstypen mit dem für vegetationsgeographische und ökologische Fragen bedeutsamen Begriff der Vegetationsformation?
3. Können modellierte Daten wie z.B. der potentiellen direkten Einstrahlung eingesetzt werden, um das räumliche Verbreitungsmuster einer Waldformation zu untersuchen?
4. Besteht auf der Grundlage der modellierten Geofaktoren und der Vegetationskartierung die Möglichkeit, die ökologischen Amplituden einer Waldformation zu errechnen?
5. Kann auf der Basis der ökologischen Amplituden und der modellierten Geofaktoren die potentielle Verbreitung der Waldformation im Untersuchungsraum rekonstruiert werden?

1.2 Stand der Forschung

Zahlreiche Expeditionen mit militärischer, bergsteigerischer und wissenschaftlicher Zielsetzung trugen seit Mitte des letzten Jahrhunderts zur Erforschung dieses nur schwer zugänglichen Raumes bei (SCHLAGINTWEIT 1865, CONWAY 1894, HEDIN 1909-1912, DESIO 1930, VISSER 1933, SHIPTON 1940 u.a.). Im Jahre 1937 fand eine Karakorum-Nomenklatur-Konferenz statt, die eine erste Harmonisierung der Benennung der ungezählten 6000 und 7000 m messenden Gipfel und Höhenzüge erreichen sollte.

Die Anfänge der vegetationsgeographischen Forschung im nordwestlichen Himalaya können in den Reisen von MOORCROFT, JACQUEMONT, VIGNE und von HÜGEL 1820-1840 gesehen werden. Eine erste umfassende wissenschaftliche Aufnahme der Vegetation des NW-Himalaya und des Karakorum erfolgte durch die Reisen von THOMSON 1847 und 1848. Die Reisen der Brüder SCHLAGINTWEIT 1856 erbrachten im Rahmen einer allgemeinen wissenschaftlichen Expedition ebenfalls zahlreiche Hinweise auf die Flora des inneren NW-Himalaya (SCHLAGINTWEIT 1865). THOMSON begründete gemeinsam mit HOOKER, der Befunde aus dem östlichen Himalaya einbrachte, 1855 die Flora Indica (HOOKER 1872-1897). Die Reise- und Forschungsberichte von ADAMS (1867), Sir BRANDIS (BRANDIS 1883, 1884a und 1884b), GANZEMÜLLER (1881) und DAINELLI (1934) erweiterten die floristischen Kenntnisse aus dem Gebirgsraum.

Ein wichtiger Abschnitt der wissenschaftlichen Erforschung - überwiegend des äußeren Himalaya - wurde durch die Einrichtung des britisch-indischen Forstdienstes eingeleitet, die letztlich auf den Aufstand 1857 zurückzuführen ist. Der während des Aufstandes erfolgte Ausbau der Infrastruktur führte zu einem Raubbau in den nun durch Bahnlinien erschlossenen Wäldern des äußeren Himalaya. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, wurde Sir BRANDIS mit dem Aufbau einer forstwissenschaftlichen Institution und der Sicherung einer nachhaltigen Waldwirtschaft beauftragt. Auf der Basis seiner Reisen 1913-1914 veröffentlichte PAMPANINI die erste Flora des Karakorum (SCHWEINFURTH 1957). Eine ausgezeichnete Übersicht über die botanische Erforschung des Raumes gibt ALI (1978).

Die zunehmende räumliche Verdichtung der wissenschaftlichen Erkenntnisse über unterschiedliche Aspekte der Hochgebirgsnatur beruhte auf Reiseberichten und punktuellen Sammlungen. Sie führten zu kleinmaßstäbigen Überblicksarbeiten mit vorwiegend deskriptivem Charakter, denen zumeist eine zuverlässige topographische Grundlage fehlte, zum Beispiel für den Himalaya (SCHWEINFURTH 1957) und den Karakorum (PAFFEN 1956).

Die Geographie konnte daher lange Zeit in den komplex strukturierten Hochgebirgen nur einen stark generalisierten Bezug zum Raum herstellen. Die Ursache hierfür lag zum großen Teil in den Problemen bei der Aufnahme topographischer Karten im Gebirge. Überraschend modern wirkt daher in einer Zeit generalisierender und klassisch-deskriptiver Überblicksforschung die vegetationsgeographische Bearbeitung des Nanga Parbat (TROLL 1939). Auf der Basis einer topographischen Karte, Feldbegehungen und der Auswertung terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahmen erarbeitete er eine großmaßstäbige Karte der Vegetationsformationen des Gebirgsstocks mit einer eingehenden ökologischen Charakterisierung der Vegetation. Sie blieb bis in die heutige Zeit neben der

Arbeit von SCHICKHOFF (1993) die einzige großmaßstäbige Vegetationskartierung aus dem nordwestlichen Himalaya. Im Rahmen einer deutsch-österreichischen Expedition in den Hunza-Karakorum wurde von PAFFEN eine schematische Kartenskizze der Vegetationsverbreitung angefertigt, die jedoch einer topographischen Grundlage entbehrte. (PAFFEN et al. 1956).

Die Arbeit von SCHWEINFURTH (1957) untersucht die horizontale und vertikale Verbreitung der Vegetation im gesamten Himalaya. Neben einer umfassenden Recherche der Literatur enthält sie für das Untersuchungsgebiet eine gute Übersicht über die Vegetationsverbreitung in kleinmaßstäbiger Karte und Profilen. Darüber hinaus existieren Kartierungen der Vegetation für größere Gebiete im zentralen Hindukush (FREY und PROBST 1978).

Neuere botanische bzw. pflanzengeographisch-ökologische Arbeiten aus dem Karakorum liegen nur begrenzt vor. Zu nennen sind die ausgezeichneten pflanzensoziologischen Untersuchungen von HARTMANN (1966, 1968, 1972) aus dem Biafo-Baltoro-Gebiet sowie Beobachtungen von REPP (1963) im Rakhiot- und im Naltar-Tal. Die Arbeit von MEUSEL und SCHUBERT (1971) gibt anhand zahlreicher Verbreitungskarten einen guten Überblick über die pflanzengeographische Gliederung des Westhimalaya. Allerdings kommt bei der Diskussion der Waldtypen der innere Gebirgsraum zu kurz.

Überwiegend forstökologische bzw. forstwirtschaftliche Ansätze liegen den Arbeiten von BAKSHI (1972), FAO (1959 und 1958), GUPTA (1966, 1974), PURI und GUPTA (1968), RANA (1988), SINGH (1987) JHA (1984) und WALI (1964) zugrunde. Sie beziehen sich zum größten Teil auf den äußeren Himalaya und seine vergleichsweise intensiv bewirtschafteten Waldvorkommen. Botanisch-systematische Aspekte der Flora des westlichen Himalaya, insbesondere der Gattungen der Koniferen behandeln die Arbeiten von JAIN (1975, 1976) und JAVEID (1978).

2 Methodisches Vorgehen

Zur Verfolgung der eingangs aufgeworfenen Fragen mußten vegetationskundliche, topographische und klimatologische Daten für ein geographisches Informationssystem des NW-Karakorum (im folgenden mit GIS abgekürzt) bereitgestellt werden. Den räumlichen Bezug für die geometrische Integration der Daten bildete ein digitales Höhenmodell.

WEIERS (1995) stellte vertikale Temperatur- und Niederschlagsgradienten zur Verfügung, die aus Stationsauswertungen berechnet wurden. SCHMIDT (1993) modellierte auf der Grundlage des digitalen Höhenmodells (DHM) die potentielle Besonnungsdauer im Relief des Untersuchungsgebietes. Sie wurde zur Korrektur der potentiellen direkten Einstrahlung benötigt, deren Berechnung in Kapitel 2.2.3 vorgestellt wird. Auf der Basis von Feldbefunden und einer vegetationsorientierten Auswertung von LANDSAT-5-TM-Daten wurde eine Karte der Vegetationsformationen des Untersuchungsgebietes erarbeitet.

Die Ausgangsdaten (Satellitenbilder, Höhenmodelle, Strahlungsmodelle, Klimamessungen und Vegetationsaufnahmen) waren bezüglich ihrer Genauigkeit und räumlich-zeitlichen Repräsentativität

inhomogen. Daher sollen im Folgenden einige grundsätzliche Überlegungen zur Integrierbarkeit von geowissenschaftlichen Daten in einem GIS angestellt werden.

Aufnahmen satellitengestützter Erderkundungssysteme ergänzen in unterschiedlichster Weise die klassischen geowissenschaftlichen Erhebungs-, Meß- und Kartierungsmethoden. Ein großer Teil der Arbeiten zur Fernerkundung von Landoberflächen genügt dabei dem Anspruch einer Statusbeschreibung des Landschaftszustandes oder eines Monitoring in Form regelmäßiger Wiederholung der Auswertung und Flächenbilanzierung (UNNI 1990, KAWOSA 1985, aus dem Himalaya). Andere Arbeiten stellen Grundlagen zur Interpretation von Fernerkundungsdaten bereit (KHAN 1969, TOMAR 1971).

Haben einige Aufnahmesysteme in der Fernerkundung bereits einen operationellen Status erreicht, kann dies von der Inwertsetzung der Fernerkundungsdaten noch nicht behauptet werden. Probleme treten neben der Auswertung der Primärdaten verstärkt bei der Verknüpfung der großflächigen Fernerkundungsaufnahmen mit anderen raumbezogenen Informationen sowie punktbezogenen Meßdaten auf.

Insbesondere die Integration von einerseits flächen-, andererseits punktbezogenen Daten (Abb. 1) ist schwierig. Fernerkundungsdaten besitzen zumeist eine hohe räumliche Dichte bei einer geringen zeitlichen Auflösung. Punktbezogene Messungen weisen bei einer geringen räumlichen Dichte häufig eine höhere zeitliche Auflösung auf. Zur Deutung komplexer landschaftsökologischer Zusammenhänge sind jedoch sowohl die räumlich generalisierende, als auch die lokal begrenzte, hochdifferenzierte Betrachtungsweise erforderlich. Es ist daher notwendig, die unterschiedlichen Datentypen zu verknüpfen.

Hierbei ist nicht in erster Linie die Herstellung des geometrischen Bezugs problematisch, sondern das unterschiedliche Aggregationsniveau der Daten (Abb. 1). Es fällt auf, daß sich das Aggregationsniveau und die thematische Differenziertheit der beiden Datentypen gegenläufig verhalten. Das unterschiedliche Aggregationsniveau der Ausgangsdaten wird in der Abbildung durch die verschiedenartige Orientierung der Pyramiden angedeutet, der Grad der thematischen Differenzierung der beiden Datentypen ergibt sich aus der Breite der Pyramiden.

Aus der Abbildung geht hervor, daß eine direkte Verknüpfung der Fernerkundungsdaten mit Feldmessungen auf Kompatibilitätsprobleme hinsichtlich des unterschiedlichen Abstraktions- bzw. Integrationsgrades der Daten stößt. Nicht ausgewertete Fernerkundungsdaten sind hochaggregiert und besitzen keinerlei geographisch relevante, thematische Differenzierung. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 1 durch die Pyramidenspitze symbolisiert. In situ-Messungen oder Beobachtungen sind demgegenüber zumeist thematisch und zeitlich hochdifferenziert und weisen ein sehr geringes Aggregationsniveau auf, worauf die nach oben gekehrte Pyramidenbasis in Abb. 1 hindeuten soll. Bei den ebenfalls in Abb. 1 aufgeführten modellierten Daten handelt es sich häufig um Befunde mit einem mittleren Aggregationsniveau, die auf der Grundlage physikalischer oder statistischer Modelle entstanden sind. Hierzu zählen beispielsweise Einstrahlungs- und Windfeldberechnungen.

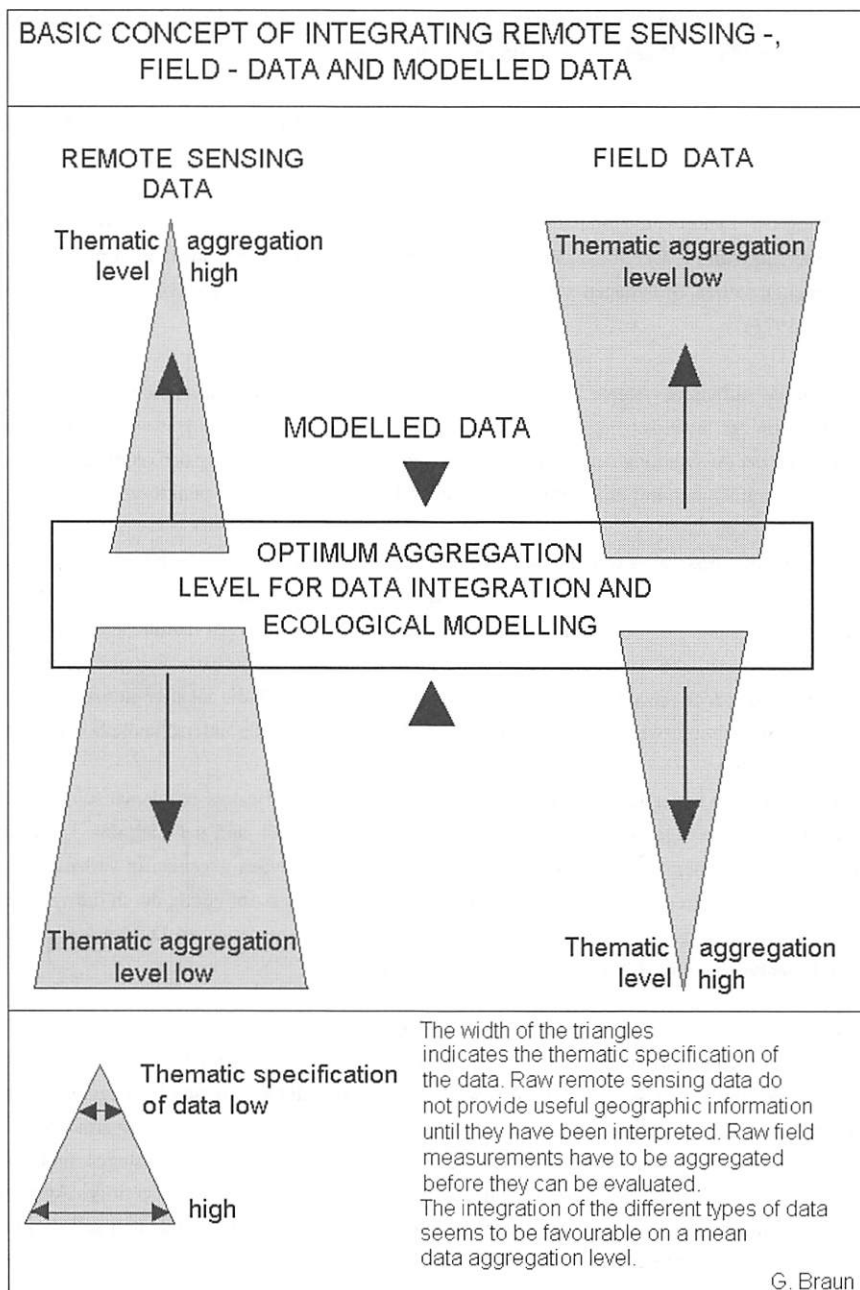


Abb. 1: Schema der Verknüpfung von Fernerkundungs-, Boden- und digitalen Modelldaten

Fig. 1: Basic concept for the integration of remote sensing-, field data and digital model data

Eine Verknüpfung der unterschiedlichen Datentypen kann sinnvollerweise nur auf einem mittleren Aggregationsniveau durch statistische Modelle geleistet werden. Denn nur bei entsprechender Aufbereitung sind die räumlichen, zeitlichen und thematischen Eigenschaften der geowissenschaftlichen Befunde kompatibel. Klimatologische Messungen und pflanzensoziologische Aufnahmen in ihrer vollständigen Differenzierung und zeitlichen Auflösung räumlich zu extrapolieren, ist mit den derzeit verfügbaren wissenschaftlichen Ansätzen und technischen Mitteln nicht möglich. Daher müssen von klimatologischen Daten Mittelwerte gebildet, klimaökologische Ergebnisse aus unterschiedlichen Daten zusammengesetzt oder pflanzensoziologische Befunde zu höheren geobotanischen Einheiten zusammengefaßt werden (BRAUN u. BACKHAUS 1993). Fernerkundungsdaten sind gut zur geographischen Modellierung einsetzbar, wenn ihre Interpretation so weit wie möglich an die fach- und aufgabenspezifische Systematik angelehnt ist. Die Integration von Fernerkundungsdaten und weiteren geowissenschaftlichen Befunden sollte in einem Aggregationsbereich maximaler Kompatibilität erfolgen. Er ist in Abb. 1 in einem mittleren Aggregationsniveau (angedeutet durch die etwa gleiche Breite der Pyramiden) durch einen Kasten hervorgehoben.

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen wurde in der vorliegenden Arbeit versucht, die benötigten Daten zu gewinnen, zu homogenisieren, und durch statistische Modelle zu verknüpfen (Abb. 2). Hierbei stand der Gedanke im Vordergrund, eine möglichst zuverlässige räumliche Differenzierung der Parameter Höhe, Exposition, Hangneigung, Einstrahlung, und Vegetationsbedeckung zu erreichen. In Abb. 2 wird der Aufbau der Arbeit durch ein Flußdiagramm schematisch darstellt. Im wesentlichen können drei übergeordnete Arbeitsschritte unterschieden werden:

- Datenbeschaffung (Karten, Satellitendaten, Felderhebungen),
- Homogenisierung und Vorverarbeitung der Daten (DHM-Erstellung, Klassifikation der Satellitendaten, Einstrahlungsberechnung),
- Vegetationsökologische Analyse und Verifikation der Ergebnisse (Analyse der Vegetationsverbreitung, Berechnung der ökologisch-physiologischen Amplituden der feuchttemperierten Nadelwälder, Rekonstruktion ihrer Verbreitung).

Für den zentralen Teil des Untersuchungsgebietes war eine ausreichend zuverlässige Kartengrundlage der deutsch-österreichischen Karakorumexpeditionen 1954 und 1959 im Maßstab 1:50.000 verfügbar. Auf dieser topographischen Grundlage sollte ein digitales Höhenmodell mit einer räumlichen Auflösung von 40 m erstellt werden (Abb. 2). Zur Aufnahme der Höhenlinien aus den Kartengrundlagen wurde nach Prüfung unterschiedlicher Digitalisierungssoftware das am Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn entwickelte Programm KARTE benutzt. Zum einen konnte das Programm durch Änderungen des Quelltextes an die aufgabenspezifischen Anforderungen angepaßt werden, zum anderen war die Digitalisierung der Höhenlinien in einem automatischen Modus möglich, der die Aufnahme der Höhenpunkte erheblich erleichterte (SCHMIDT 1993). Die Vorgehensweise bei der Erstellung des DHM wird in Kap. 2.2.1 näher beschrieben.

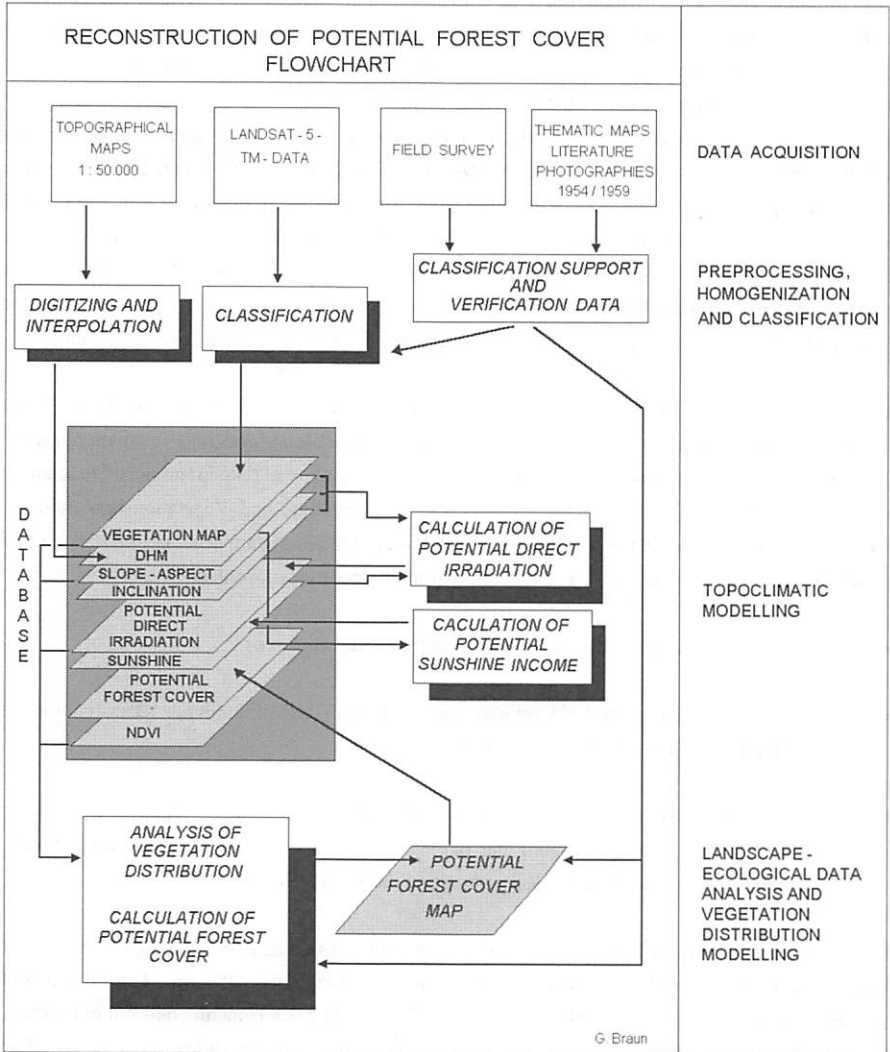


Abb. 2: Flußdiagramm der Arbeit

Fig. 2: Flowchart of the work

Das DHM wurde sowohl zur Korrektur der geometrischen Verzerrungen in den Satellitendaten als auch zur Modellierung der potentiellen Besonnungsdauer und der potentiellen direkten Einstrahlung benötigt (FUNK 1983, KUNZ 1983, SCHMIDT 1993). Diese Parameter bildeten wichtige Grundlagen für das Verständnis des räumlichen Vegetations- und Landnutzungsmusters (Kap. 2.2.3).

Auf der Basis statistischer Auswertungen von amtlichen Klimadaten konnte WEIERS Regressionsgleichungen zur Höhenabhängigkeit der mittleren jährlichen Niederschlagssumme und der Monatsmitteltemperaturen im gesamten Untersuchungsraum aufstellen. Eine flächenhafte Extrapolation dieser Parameter war mit Einschränkungen ebenfalls durchführbar (WEIERS 1995). Die Verifikation der Ergebnisse wurde, soweit möglich, durch Geländebeobachtungen und Messungen unterstützt. Insbesondere die apparativ gut ausgestatteten und intensiv bearbeiteten Testräume Bagrot und Yasin boten aufgrund hochliegender Klimastationen Möglichkeiten zur Kontrolle und Verbesserung der erstellten Modelle (CRAMER 1994).

Auf der Grundlage geowissenschaftlich etablierter, automatischer und manueller Bildauswertungsverfahren wurden Vegetations- und Landnutzungsdaten aus digitalen Satellitendaten des L-5-TM-Systems gewonnen (vgl. Abb. 2). Die Erstellung der Vegetationskarte wird in Kap. 2.1 beschrieben.

Durch die Geokorrektur der digitalen Vegetationskarte konnte die Verbreitung der Vegetation im NW-Karakorum in eine räumliche Beziehung zu ökologisch bedeutsamen topographischen und topoklimatischen Parametern gesetzt werden, die durch die Modellierungen flächendeckend zur Verfügung standen. Die hierzu entwickelten Methoden stehen in engem Zusammenhang mit den besonderen klimaökologischen Bedingungen im NW-Karakorum. Sie ergaben sich aus einer eingehenden Analyse der Vegetationsverbreitung und der topoklimatischen Differenzierung des Untersuchungsgebietes.

Daher werden die entwickelten Verfahren zur rechnerischen Erfassung ökologisch-physiologischer Amplituden von Vegetationsformationen und zur Rekonstruktion der Verbreitung feucht temperierter Nadelwälder im Anschluß an die landschaftsökologische Analyse der Vegetationsverbreitung im NW-Karakorum dargestellt (Kap. 3.3).

2.1 Vegetationskartierung aus digitalen LANDSAT-5-TM-Daten

2.1.1 Das LANDSAT-5-System

Das LANDSAT-Programm gehört zu den operationellen, satellitengestützten Erderkundungsprogrammen. Seit dem Start des LANDSAT 1 (ERTS-1) 1972 wurden regelmäßig multispektrale Bild-daten des MSS (Multispektralabtaster), der RBVs (Return Beam Videcon) und des TM (Thematic Mapper) von den Bodenstationen empfangen und weiterverarbeitet. Während die erste Generation der LANDSAT-Satelliten eine relativ geringe spektrale und geometrische Auflösung der Erdoberfläche lieferte, erreichen die TM-Daten des LANDSAT-4 und LANDSAT-5 in den optischen Spektralkanälen eine räumliche Auflösung von 30 m (Tab. 1).

Instrument	spektrale Auflösung	geometr. Auflösung	überdeckte Fläche
MSS LANDSAT-1,-2 u.-3			
4	0,50 - 0,60 μm	79 x 56 m	185 x 185 km
5	0,60 - 0,70 μm	"	"
6	0,70 - 0,80 μm	"	"
7	0,80 - 1,10 μm	"	"
RBV LANDSAT-1 u.-2			
1	0,475 - 0,575 μm	80 x 80 m	185 x 185 km
2	0,580 - 0,680 μm	"	"
3	0,698 - 0,830 μm	"	"
RBV LANDSAT-3			
1	0,505 - 0,750 μm	40 x 40 m	98 x 98 km
TM LANDSAT-4 u. -5			
1	0,45 - 0,52 μm	30 x 30 m	185 x 185 km
2	0,52 - 0,60 μm	"	"
3	0,63 - 0,69 μm	"	"
4	0,76 - 0,90 μm	"	"
5	1,55 - 1,75 μm	"	"
6	10,40 - 12,50 μm	120 x 120 m	"
7	2,08 - 2,35 μm	30 x 30 m	"
MSS LANDSAT-4 u. -5			
1	0,50 - 0,60 μm	79 x 56 m	185 x 185 km
2	0,60 - 0,70 μm	"	"
3	0,70 - 0,80 μm	"	"
4	0,80 - 1,10 μm	"	"

Tab. 1: Technische Daten der LANDSAT-Erderkundungssatelliten. Der Thermalkanal des LANDSAT-3 wurde nicht mit aufgeführt, da er nach dem Start ausfiel (KRAUS 1988, LANDSAT-4 Data Users Handbook 1984, TASCHENBUCH ZUR FERNERKUNDUNG 1990, KRAMER 1993)

Tab. 1: Technical data of the LANDSAT-satellites. The thermal channel of LANDSAT-3 has not been mentioned (KRAUS 1988, LANDSAT-4 Data Users Handbook 1984, TASCHENBUCH ZUR FERNERKUNDUNG 1990, KRAMER 1993)

Die spektralen Kanäle der LANDSAT-4 und -5 Satelliten wurden gegenüber den Baureihen 1-3 enger gewählt, im nahen und mittleren Infrarot wurden zusätzliche Spektralkanäle implementiert. Die Verschiebung und die schmalere Auslegung der TM-Kanäle 3 und 4 gegenüber den Kanälen 2 und 3 des MSS erwies sich als vorteilhaft für die Differenzierung der Vegetation. Die MSS-Kanäle 2 und 3 mitteln in Wellenlängen von 0,60-0,70 μm und insbesondere 0,70-0,80 μm über den gesamten Reflexionslope der grünen Vegetation zwischen absorbiertem Rot und reflektiertem Infrarot. Hingegen trennen die Bänder 3 und 4 des TM-Sensors das Absorptionsmaximum der Vegetation in Wellenlängen zwischen 0,63 und 0,70 μm von den Reflexionsspitzen im nahen Infrarot (0,76-0,90 μm). In Tab. 1 sind die wichtigsten Sensordaten der LANDSAT-Satelliten zusammengestellt.

Alle LANDSAT-Satelliten haben eine sonnensynchrone, nahezu polare Umlaufbahn in einer Höhe von ca. 705 km. Die Bahninklination beträgt 98,2 Grad. Die Datenübertragung zu den Bodenstationen erfolgt über X- und S-Band Antennen (Abb. 3). GPS-Empfänger gewährleisten die Überwachung der Orbitalparameter und liefern Bahnparameter zur geometrischen Korrektur der Satellitendaten, die mit den TM- und MSS-Instrumenten aufgezeichnet werden (Abb. 3).

Die Äquatorüberquerung erfolgt während des N-S verlaufenden Abstiegs des Satelliten um ca. 9.45 Uhr örtlicher Sonnenzeit. Ein Umlauf dauert 98,9 min. Abb. 4 zeigt den Orbit und die Bahnparameter der LANDSAT-4 und LANDSAT-5 Satelliten.

Eine vollständige Abdeckung der Erdoberfläche ist in 16 Tagen möglich. Aufgrund der Erdrotation und der Umlaufzeit der Satelliten liegen die Nadirlinien aufeinanderfolgender Orbits am Äquator ca. 2753 km voneinander entfernt (LILLESAND u. KIEFER 1987). Den zeitlichen Versatz von 7 Tagen bei der Aufnahme benachbarter Streifen an der Erdoberfläche zeigt Abb. 5.

Die seitliche Überlappung benachbarter Aufnahmestreifen liegt am Äquator bei 7,3 %. Mit zunehmender nördlicher und südlicher Breite nimmt die Szenenquerüberdeckung zu. Dies ist auf den konstanten Öffnungswinkel des Scanspiegels zurückzuführen, der auf jeder geographischen Breite einen Streifen von 185 km Breite abdeckt. So erhöht sich mit zunehmender geographischer Breite auch die Repetitionsrate für das Monitoring einzelner Flächen.

Im Gegensatz zum älteren MSS erfolgt die Aufnahme der Strahlung beim TM sowohl bei der Vorwärts- als auch bei der Rückwärtsbewegung des schwingenden Scanspiegels. Der TM verfügt über jeweils 16 Detektoren in den optischen Wellenlängen und über 4 Detektoren für das thermale Infrarot. Die aufgefangenen Signale werden verstärkt und in 8 bit Signale umgewandelt. So steht in jedem Kanal potentiell eine Differenzierung von 255 DN (digital numbers) zur Verfügung (LANDSAT Data Users Handbook).

In enger Verbindung zum LANDSAT-Programm stehen die TDRS-Systeme (Tracking and data relay satellite). Sie dienen als Relais-Satelliten für den Datenempfang aus Satellitenpositionen, die im Empfangsschatten der Bodenstationen liegen.

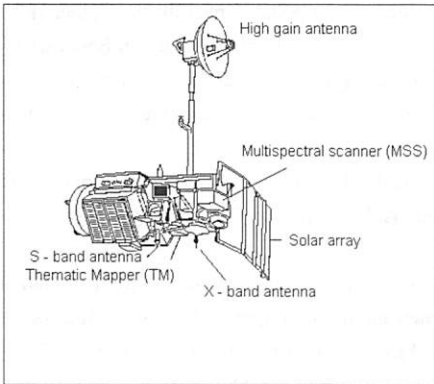


Abb. 3: Die LANDSAT-Plattform
Fig. 3: The LANDSAT-platform

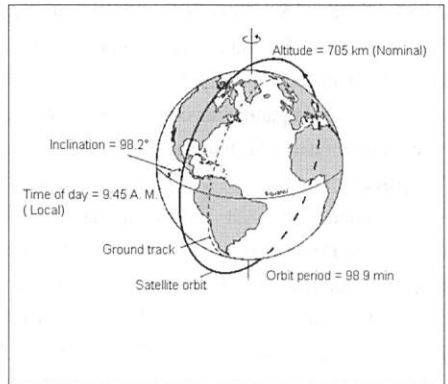


Abb. 4: Sonnensynchrone Umlaufbahn der
LANDSAT-4 und -5 Satelliten (aus
LILLESAND und KIEFER 1987)

Fig. 4: Sun-synchronous orbit of LANDSAT-4
and -5 (from LILLESAND and
KIEFER 1987)

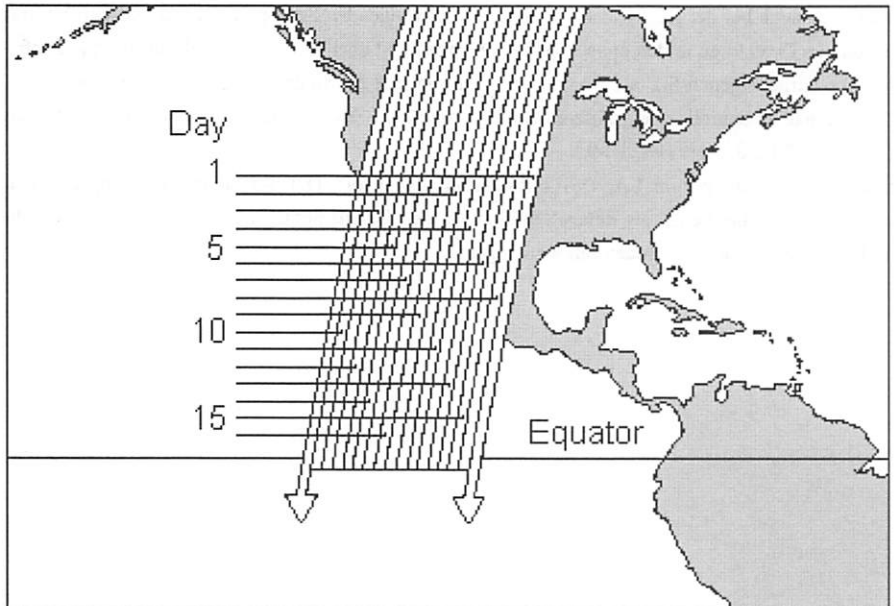


Abb. 5: LANDSAT Aufnahmepattern (LILLESAND und KIEFER 1987)

Fig. 5: LANDSAT swathing pattern (LILLESAND and KIEFER 1987)

2.1.2 Datenbeschaffung und Datenqualität

2.1.2.1 Beschaffungsmaßnahmen, -Probleme und Optimierung der Datenakquisition

Da zur Zeit der Datenbeschaffung ein TDRS-System für die benötigten Orbits nicht zur Verfügung stand, wurden die Daten bei den lokalen Empfangsstationen in Pakistan und Indien angefordert. Die Installation und Inbetriebnahme der pakistanischen TM-Empfangsanlage sollte Ende 1988 abgeschlossen sein (National Report To XVII COSPAR Meeting Espoo, Finland 1988). Tatsächlich konnten jedoch erst ab Anfang 1990 LANDSAT-TM-Daten von der pakistanischen Empfangsstation angefordert werden.

Die Identifikation der benötigten Szene erfolgte zunächst anhand des WRS (Worldwide Reference System). Es zeigt die gesamte Erdoberfläche mit einem überlagerten Gradnetz, die Lage aller Szenenmittelpunkte und Orientierungshilfen wie Kontinentalumrisse, Gebirgsschraffen, Siedlungsbezeichnungen und Staatsgrenzen. Die Identifikation der Szene innerhalb eines Satellitenorbits erfolgt durch die Angabe der den Mittelpunkt der Szene markierenden Zeile.

In Abhängigkeit von der gestellten Aufgabe ist der Zeitpunkt der Satellitenaufnahme von erheblicher Bedeutung. Zum einen müssen Witterungsbedingungen berücksichtigt werden, zum anderen spielen die phänologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet eine entscheidende Rolle. Darüber hinaus kann das Kartierungsvorhaben das Einbeziehen älterer Daten erfordern oder ausschließen.

Auf der Basis der räumlichen und zeitlichen Angaben können die nationalen Empfangsstationen Katalogauszüge anfertigen, die datenspezifische Informationen enthalten. Für die endgültige Datenauswahl sind insbesondere Angaben über die Bewölkungssituation zum Aufnahmezeitpunkt wichtig. Zusätzlich enthalten die Kataloge Angaben über die Missionsnummer, das Aufzeichnungsdatum, die geographischen Koordinaten des Szenenmittelpunktes und die Signalqualität der Daten.

Hinsichtlich des eigenen Vorhabens wurde die Recherche auf die Sommer- und Herbstmonate beschränkt. Den größten Einfluß auf die zeitliche Einschränkung hatte das phänologische Verhalten der Vegetation und die Dynamik der Schneedecke. Die Monate Juli, August und September weisen bezüglich der Höhenlage der Schneegrenze und des Entwicklungsstadiums der montanen bis alpinen Vegetationsformationen die besten Voraussetzungen für die Kartierung der aktuellen Vegetationsbedeckung im NW-Karakorum auf.

Je nach geographischer Lage des Untersuchungsgebietes können bei der Datenbeschaffung von den regionalen Empfangsstationen erhebliche Zeitverluste sowie Probleme bezüglich der Datenqualität auftreten. Im vorliegenden Fall nahm die Beschaffung der ersten Datensätze bei der indischen Empfangsstation Hyderabad ein halbes Jahr in Anspruch. Die Ursache hierfür liegt häufig in dem schwierigen Devisentransfer.

Zur Unterstützung der Kartierungen wurden Daten des französischen Erderkundungssatelliten SPOT angefordert. Die Instrumente des SPOT bieten 2 Aufnahmeoptionen an. Zum einen kann in einem multispektralen Modus (3 Kanäle mit 20 m geometrischer Auflösung) aufgenommen werden, zum anderen steht ein panchromatischer Aufnahmemodus mit 10 m Auflösung zur Verfügung.

Neben der Anforderung digitaler multispektraler Scannerdaten wurden Programming Requests an SPOT Image in Auftrag gegeben, die der Beschaffung digitaler, panchromatischer Stereopaare zu topographisch-kartographischen Zwecken diene.

Zur Unterstützung der Auswertung der digitalen Multispektraldaten wurden analoge Einzelbilder und Stereopaare der sowjetischen KFA-1000-Kamera mit einer Bodenauflösung von ca. 5 m angefordert. Die Farbbilder stellten eine hervorragende Grundlage zur Orientierung und Kartierung im Gelände dar.

2.1.2.2 Beurteilung der Datenqualität und Störungs beseitigung

Die Systemkorrektur von LANDSAT-Daten beinhaltet in der Regel eine Korrektur der Aufnahmecharakteristiken der Scannerdetektoren, den Ausgleich der durch Erdkrümmung, Erdrotation, Flugbahn und Fluglage verursachten Verzerrungen der Abbildung sowie eine Sweep-Korrektur des Scanspiegels (SCHARDT 1990).

Bei einer ersten Kontrolle der TM-Daten wurde eine größere Zahl fehlender Zeilen und eine unregelmäßige Streifung in Zeilenrichtung über alle Kanäle außer im thermischen Infrarot festgestellt, die eine Klassifikation der Daten erheblich beeinträchtigt hätte. Abb. 6 zeigt die Störungen anhand eines Bildbeispiels. Sie wiesen eine unterschiedliche Breite auf und ließen bei einer ersten, visuellen Analyse keine Regelmäßigkeit bezüglich des Intensitätwechsels von Störung zu Störung erkennen.

Aufgrund der unterschiedlichen Breite der gestörten Bildbereiche kam eine Glättung mit konventionellen zweidimensionalen Filtern fester Größe nicht in Frage, da ausreichend große Glättungsfilter auch ungestörte Bildbereiche erheblich verändert hätten. Eine interaktive Beseitigung am Bildschirm war aufgrund der großen Zahl der Störungen ebenfalls nicht durchführbar. Es mußte daher ein halbautomatisches Verfahren entwickelt werden, mit welchem die gestörten Bildbereiche markiert und korrigiert werden konnten. Dieses Korrekturverfahren wird im Folgenden beschrieben.

Digitale Satellitendaten weisen eine hohe Korrelation der Grauwerte benachbarter Bildzeilen bzw. Bildspalten auf. Sie beruht auf der Tatsache, daß Grauwertkanten in den seltensten Fällen parallel zu den Achsen des Bildkoordinatensystems verlaufen, und die Übergänge zwischen aufgenommenen Oberflächen durch Mischpixelbildung mehr oder weniger kontinuierlich sind.

Im Falle einer zeilenparallelen Bildstörung verändert sich deutlich die Korrelation der Grauwerte zwischen den benachbarten Zeilen. Daher läßt sich die Intensität einer zeilenparallelen Störung durch Profile der Zeilenmittelwerte und Standardabweichungen abschätzen, die ein Maß für die Helligkeit und den Kontrast der Bildzeilen sind. Das Profil der Zeilenmittelwerte ist für einen Ausschnitt der gestörten Daten in Abb. 6 gezeigt. Die Länge des Profils (in Abb. 6 oben) entspricht der Zeilenzahl des dargestellten Bildausschnittes.

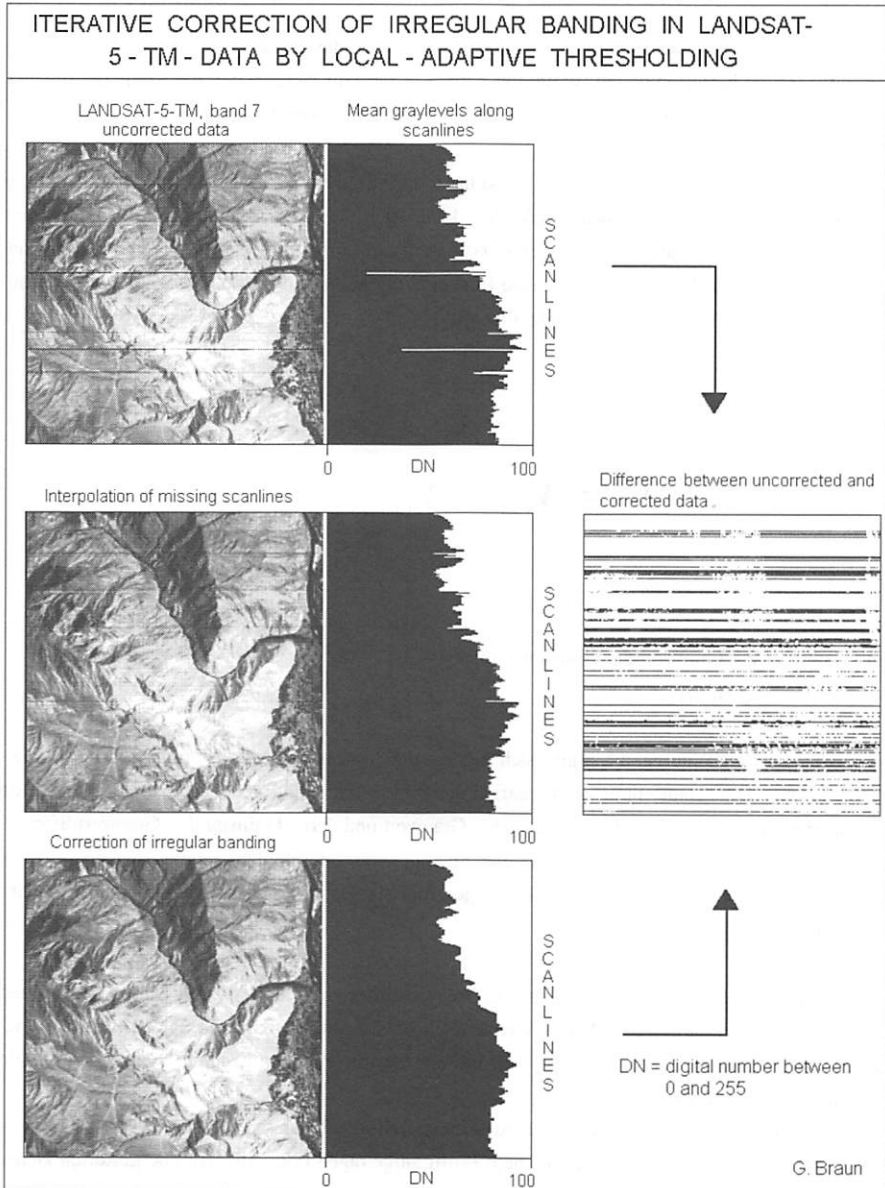


Abb. 6: Gestörte Bildausschnitte, Zeilenmittelwertprofile und die weitgehende Eliminierung des "banding" durch lokaladaptive Schwellenwertverfahren

Fig. 6: Correction of irregular banding in a LANDSAT-5-TM-scene by semiautomatic identification and interpolation of missing scanlines

Die Analyse der Zeilenmittelwerte und Standardabweichungen zeigte, daß in Kanal 2 das Signal/Rauschverhältnis am ungünstigsten war, wohingegen die Infrarotkanäle von der Streifung deutlich geringer betroffen waren. Weiterhin konnte festgestellt werden, daß die Breite und Intensität der Störungen ebenso wie ihre Frequenz in allen betroffenen Kanälen stark variierte.

Zur Charakterisierung von Grauwertschwankungen oder Signalstörungen, die parallel zu einer der Achsen des Bildkoordinatensystems verlaufen, kann auch die erste Ableitung in Normalrichtung genutzt werden. Die erste Ableitung gibt sowohl Aufschluß über die Intensität der Signalschwankungen von Zeile zu Zeile als auch über die Linearität der Fehler innerhalb der Zeile. Für die Grauwertdifferenzen (V') benachbarter Bildzeilen gilt:

$$V' = V_{(i)} - V_{(i+1)} ; \quad (1)$$

mit: V = Grauwert des Bildelements
 i = Bildzeile

Wird $V'(i)$ als $f(V(i))$ aufgefaßt, ergibt sich hieraus die Abhängigkeit der Störung von der Signalstärke. Eine schnelle Beurteilung der Linearität der Bildstörung erhält man durch die Erstellung von Diagrammen, deren Abszisse dem betrachteten Grauwert und deren Ordinate den Grauwertdifferenzen V' entspricht. Gestörte Bildzeilen, die gleichmäßig heller oder dunkler als die benachbarte Zeile sind, verursachen ein Bias, d. h. eine über die gesamte Signalstärke und Bildzeile konstante Veränderung der Störung.

Zur Korrektur der Daten wurden zunächst die Grauwertdifferenzen benachbarter Bildzeilen ermittelt und in einer Matrix dargestellt. Hierbei konnte nachgewiesen werden, daß es sich bei den radiometrischen Störungen zum überwiegenden Teil um ein lineares Problem handelte, welches durch ein geeignetes Bias der Daten korrigierbar ist.

Für die einzelnen Bildzeilen wurden daraufhin als Helligkeits- und Kontrastmaß Mittelwert und Standardabweichung berechnet und in einem Profil aufgetragen (vgl. Abb. 6). Die gestörten Bereiche sind in dem dargestellten Profil deutlich durch Grauwertsprünge zu erkennen. Mit Hilfe flexibler Schwellenwerte (ROSENFELD u. KAK 1982) wurden zunächst die nichtlinearen Störungen und ausgefallene Bildzeilen isoliert und linear interpoliert (Abb. 6).

In einem weiteren Schritt mußte die Markierung der gestörten Bildbereiche und die Berechnung des zur Korrektur benötigten Bias erfolgen. Zu diesem Zweck wurden die Zeilenmittelwertprofile be-

rechnet und visualisiert. Die Einführung von variablen Glättungsfiltern erlaubte eine einfache visuelle Trennung der gestörten und der intakten Bildbereiche. Zusätzlich wurde ein Bias eingeführt, mit dem das geglättete Mittelwertprofil entlang der Ordinate verschoben werden konnte. Die Grauwerte der auf diese Weise markierten gestörten Zeilen wurden mit einem Korrekturwert versehen, welcher sich aus der Differenz der Mittelwerte benachbarter gestörter und ungestörter Zeilen ergab. Abb. 6 zeigt das Ergebnis der Korrektur sowohl im Bild als auch im Zeilenmittelwertprofil des korrigierten Bildes.

Zur Überprüfung der in den Daten durch die Korrektur vorgenommenen Modifikationen wurden Differenzbilder von den jeweiligen Ausgangskanälen und den korrigierten Daten erstellt. Die Differenz zwischen den korrigierten Daten und den Ausgangsbildern ergab für die manipulierten Zeilen positive Werte (im Differenzbild Abb. 6 schwarze Linien). Für die nicht korrigierten, intakten Bildbereiche war die Differenz gleich null.

In dem in Abb. 6 gezeigten Beispiel fällt auf, daß innerhalb der korrigierten Bildabschnitte Lücken auftreten. Hier sind im Differenzbild negative Werte vorhanden, die auf eine leichte Nichtlinearität der Störung bei extrem hohem oder niedrigem Signal schließen lassen. Sie konnten bei der Korrektur vernachlässigt werden, da extrem hohe oder niedrige Signale ausschließlich bei hochliegenden Schneeflächen, hellen Sanden und stark abgeschatteten Felswänden beobachtet wurden.

Mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens konnte der überwiegende Teil der Störungen beseitigt und so die Bildqualität erheblich verbessert werden. Versuche mit den gestörten und den korrigierten Daten zeigten, daß ohne eine Korrektur der Daten eine Kartierung der Vegetation mit computergestützten Klassifizierungsverfahren keine zuverlässigen Ergebnisse erbracht hätte.

2.1.3 Grundlagen interaktiver und automatischer Auswertung von Fernerkundungsdaten

2.1.3.1 Grundlagen der satellitengestützten Fernerkundung von Landoberflächen

Die von der Sonne emittierte elektromagnetische Strahlung erfährt in der Atmosphäre eine Intensitätsschwächung und Veränderung durch Absorptions- und Streuvorgänge (Abb. 7). Je nach Wellenlänge treten Wechselwirkungen mit atmosphärischen Gasen wie H_2O , CO_2 , O_2 und O_3 auf. Die Absorptionsbanden für O_3 liegen bei 0,27 μm , für H_2O bei 1,4 und 1,9 μm . Schwache Wasserdampfabsorptionsbanden befinden sich bei 0,8 und 0,94 μm . Als atmosphärische Fenster werden diejenigen Spektralbereiche bezeichnet, in denen die Atmosphäre einen geringen Reflexions- und Absorptionskoeffizienten besitzt, d. h. auftreffende elektromagnetische Strahlung weitgehend ungehindert transmittiert (DECH 1987, BOLLE 1975). Wichtige atmosphärische Fenster liegen bei 0,4-0,7 μm , 1,4-1,9 μm und im thermalen Infrarot bei 8-14 μm .

Die LANDSAT-TM-Kanäle 4, 5 und 7 nutzen zwar die atmosphärischen H_2O -Fenster des mittleren Infrarot, sind jedoch nicht gänzlich frei von Wasserdampfeinfluß. Kurzwellige Strahlung unter 0,27 μm kann aufgrund der starken Ozonabsorption außer zur Ozondetektion nicht genutzt werden.

Neben der Veränderung durch die Wasserdampf- und Ozonabsorption wird die Strahlung in der Atmosphäre durch Streuung an Aerosolen wie Staub- und Rußteilchen oder an Wassertropfen und

Eispartikeln modifiziert (Abb. 7). Die Gesamtstreuung innerhalb des optischen Spektralbereichs, die in jedem Fall zu einer Änderung der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung führt, setzt sich im wesentlichen aus zwei Anteilen zusammen. Rayleigh-Streuung im molekularen Bereich entsteht, wenn die Wellenlänge größer als die mittlere Partikelgröße ist. In den kurzwelligen Bereichen des sichtbaren Lichts tritt Rayleigh-Streuung an den Gasmolekülen der Atmosphäre auf (RUWWE et al. 1991). Sind die Wellenlänge der Strahlung und die Partikelgröße etwa gleich, tritt Mie-Streuung auf. Sie entsteht an Aerosolen in der Atmosphäre wie Staub- und Rußteilchen. Rayleigh- und Mie-Streuung sind die Ursache für das diffuse Himmelslicht, das die Aufhellung der Kernschattenbereiche an der Erdoberfläche bewirkt. Die Streuungsintensität nimmt mit abnehmendem Sonneninkinationswinkel zu.

Neben der Modifikation der einfallenden Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre wird auch das von der Erdoberfläche reflektierte und vom Satelliten empfangene Signal verändert (Abb. 7).

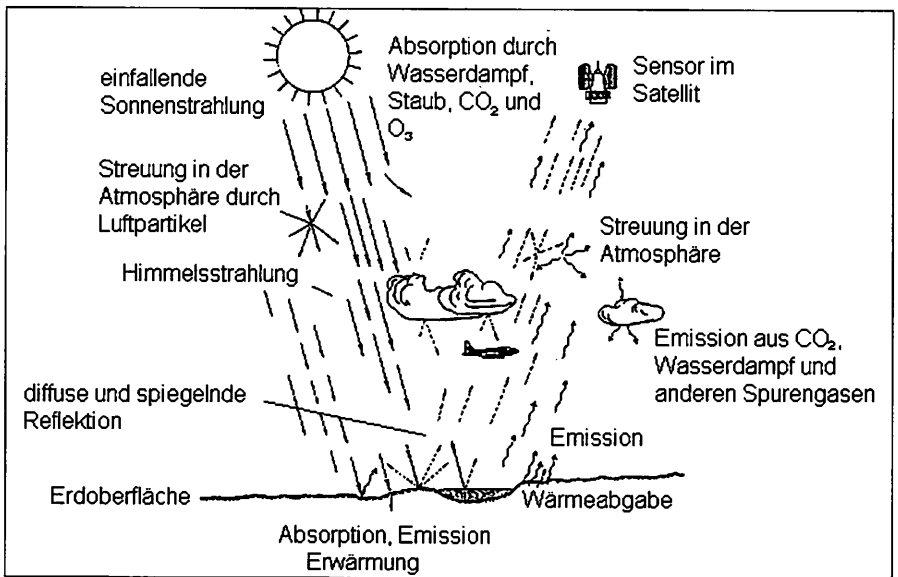


Abb. 7: Schematische Darstellung der Reflexions-, Streuungs- und Absorptionsprozesse in der Erdatmosphäre und an der Erdoberfläche (KRONBERG 1985)

Fig. 7: Schematic representation of reflection, scattering and absorption of radiation in the atmosphere and at the earth surface (KRONBERG 1985)

Bei der Betrachtung der Interaktion von Strahlung und Atmosphäre ist der transmittierte Strahlungsanteil von wesentlicher Bedeutung für die Fernerkundung. Bezüglich der Eigenschaften zu beobachtender Körper ist jedoch der Reflexionsgrad der bestrahlten Oberfläche das für die Fernerkundung bedeutsamste Merkmal. Nach KRAUS (1988) gilt für den Übergang der Strahlung von einem Medium 1 in ein Medium 2:

$$I_0 = I_a + I_r + I_t \quad (2)$$

wobei: I_0 = einfallende Strahlung
 I_r = reflektierte Strahlung
 I_t = transmittierter Anteil
 I_a = absorbierte Strahlung

Hinsichtlich der Fernerkundung von Landoberflächen ist die im Objekt transmittierte Strahlung von untergeordneter Bedeutung. Trifft elektromagnetische Strahlung auf ein optisch dünnes Medium, beispielsweise ein Laubdach, wird der transmittierte Anteil durch tieferliegende Pflanzenstockwerke oder den Boden vollständig absorbiert oder zurückgestreut. Gleichung (2) reduziert sich in diesem Fall zu:

$$I_0 = I_a + I_r; \quad 3)$$

wobei die Reflexion je nach Oberflächenbeschaffenheit gerichtet oder diffus sein kann (Abb. 7). Ob die Reflexion an einer Oberfläche diffus oder gerichtet (spiegelnd) ist, hängt im wesentlichen von dem Verhältnis der Wellenlänge zur Rauigkeit der Oberfläche ab. Im Spektralbereich des sichtbaren Lichts erscheint die unbewegte Oberfläche eines klaren Gewässers glatt. Der Sensor empfängt im Idealfall kein Signal, da der gesamte Teil der reflektierten solaren Strahlung absorbiert oder gerichtet reflektiert wird. Diese Eigenschaft von Wasseroberflächen kann für eine einfache atmosphärische Korrektur der Satellitendaten genutzt werden.

Da im allgemeinen die gerichtete Reflexion nicht von den Fernerkundungssensoren erfaßt wird, ist sie für die Fernerkundung von Landoberflächen ebenfalls von untergeordneter Bedeutung.

Wesentlich für die Fernerkundung von Landoberflächen ist die ungerichtete Reflexion der Objekte. Ihre Intensität in den verschiedenen Wellenlängen hängt von den Materialeigenschaften, der Ober-

flächenstruktur und, da bei teilweiser Transparenz der Stoffe oft auch Volumenrückstreuung stattfindet, der inneren Struktur der reflektierenden Objekte ab (KRAUS 1988).

Darüber hinaus hat die Richtung der einfallenden Strahlung und die Morphologie der bestrahlten Objekte, z.B. von Pflanzenbeständen, einen großen Einfluß auf die diffuse Reflexion.

Grundlage für die Kartierung von thematischen Klassen aus digitalen Multispektraldaten ist das charakteristische spektrale Verhalten einzelner Oberflächen aufgrund ihrer verschiedenen chemischen und physikalischen Zusammensetzung. Hierunter wird das spezifische Absorptions-, Transmissions- und Reflexionsverhalten der Objekte in unterschiedlichen Bereichen des optischen Spektrums verstanden (LANTIERI 1988).

Die reflektierten, absorbierten und transmittierten Strahlungsanteile eines Blattes in Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigt Abb. 8. Die Ratio der Anteile variiert in Abhängigkeit von der Wellenlänge, der Blattstruktur, der Zellorganisation und der Pigmentierung. Betrachtet man ausschließlich das fernerkundungsrelevante Reflexionsvermögen, so fällt zunächst die schwache Reflexion des Blattes im Bereich des sichtbaren Lichts auf. Die beiden lokalen Minima der Reflexion in Wellenlängen von 0,45-0,65 μm sind auf die Absorption der blauen und roten Spektralbereiche durch Blattpigmente wie das Chlorophyll zurückzuführen. Eine untergeordnete Rolle spielen Karotinoide und Xantophylle. Im Wellenlängenbereich des grünen Lichts ist ein lokales Reflexionsmaximum der Vegetation vorhanden.

Allgemein ist im sichtbaren Bereich des Lichts das Reflexionsvermögen grüner Vegetation gering. Im nahen Infrarot jedoch kann aufgrund der fehlenden Pigmentabsorption und der starken Volumenrückstreuung ein hohes Reflexionsvermögen grüner Blätter beobachtet werden.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Albedo hat in Wellenlängen zwischen 0,7 und 1,3 μm die Zellstruktur des Blattes. Je nach Pflanzenart werden hier 30-70 % der eingestrahnten Energie reflektiert (HILDEBRANDT 1976). Faktoren, die die Reflexionsintensität von Blättern im nahen Infrarot beeinflussen, sind Größe, Anzahl und Form der Blattzellen. Diese Parameter bestimmen die Größe der für die Reflexions- und Streuungsprozesse zur Verfügung stehenden Grenzflächen.

Im mittleren Infrarot dominiert H_2O -Absorption, bedingt durch den Wassergehalt im Blattgewebe. Die Absorptionsmaxima liegen bei 1,45 und 1,96 μm . Bei steigendem Wassergehalt nimmt die Absorption zu, bei sinkendem Wassergehalt nimmt sie ab. Bei etwa 1,65 und 2,2 μm liegen lokale Reflexionsmaxima (SCHARDT 1990).

Im Kontrast zu diesen eher idealisierten Darstellungen der Reflexionscharakteristika von Vegetation stehen die Reflexionsverhältnisse bei geschlossenen Beständen einer Art oder bei den in Hochgebirgslandschaften häufig anzutreffenden Mischbeständen mit inhomogenen Altersstrukturen. HILDEBRANDT (1976) unterscheidet pflanzensoziologische und pflanzenmorphologische Einflußgrößen, die die Reflexion von Beständen erheblich reduzieren und modifizieren können.

SCHARDT (1990) definiert als pflanzenmorphologische Merkmale Stellung und Größe der Blattorgane, Aufbau der Sprossen und der Baumkronen, Dichte und Belaubung, Ratio des Flächenanteils besonnener und beschatteter Kronenbereiche sowie das Verhältnis zwischen Blättern und Fruchtständen.

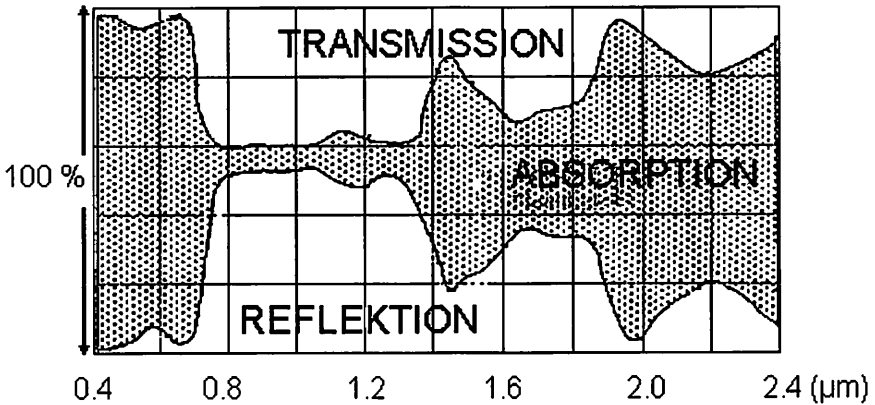


Abb. 8: Reflektierte, absorbierte und transmittierte Strahlung eines grünen Blattes (aus KRAUS 1988)
 Fig. 8: Reflection, absorption and transmission of radiation by a green leaf (after KRAUS 1988)

Als pflanzensoziologische, reflexionsbeeinflussende Merkmale führt er die Zusammensetzung der Bestände nach Art und Alter der Pflanzen, Dichte der Bestockung und Anteil der Bodenreflexion an.

Neben den genannten Parametern wird häufig der Vitalitätszustand der Pflanzen als ein reflexionsbeeinflussendes Kriterium genannt. Entscheidend ist hier jedoch nicht die Ausbildung von Sekundärbelaubung oder Nadeln, die kaum signifikante Reflexionsunterschiede gegenüber der primären Belaubung erkennen lassen, sondern die Auflichtung der Baumkronen und der damit erhöhte Anteil an Bodenreflexion oder der Reflexion beschatteter Blätter bzw. Nadeln.

Die Eigenschaften, die das bestandspezifische Reflexionsvermögen beeinflussen, werden von pflanzen- bzw. bestandsunabhängigen Parametern überlagert, die insbesondere im Hochgebirge zu unterschiedlicher Reflexion gleichartiger Oberflächen führen. Ein wesentlicher, die Reflexion modifizierender Faktor ist die ausgeprägte Reliefdynamik von Hochgebirgsräumen. In Abhängigkeit vom Sonnenstand zum Überflugszeitpunkt des Satelliten und vom Öffnungswinkel des Sensors

bewirkt die Topographie eine erhebliche räumliche Differenzierung der einfallenden und reflektierten Strahlung. Durch die topographischen Parameter Exposition, Höhe und Inklination und den umgebungsabhängigen Horizont der betrachteten Fläche wird der Strahlungsempfang und somit auch die Reflexionsintensität im Relief beeinflusst.

TM-1 0,45-0,51 μm	
	bewachsener - unbewachsener Boden
	Laubwald - Nadelwald
	Pflanzenstress
	Tiefenmessung im Wasser
	Straßen, Gebäude
TM-2 0,52-0,60 μm	
	Vitalität von Pflanzen
	Lokales Maximum grüner Vegetation
	Straßen, Gebäude
TM-3 0,62-0,69 μm	
	Pflanzenunterscheidung
	Biomassenkartierung
	Differenzierung von Vegetation
TM-4 0,77-0,90 μm	
	Wasser - Land
	Biomassenkartierung
	Bodenfeuchte
	Pflanzenunterscheidung
TM-5 1,56-1,78 μm	
	Wassergehalt von Pflanzen u. Böden
	Wolken - Schnee
TM-6 10,4-12,5 μm	
	Temperatur, Pflanzenstress
TM-7 2,09-2,34 μm	
	Geologie, Bodengüte
	Mineral- und Felsansprache
	Vegetationsfeuchte

Tab. 2: Überblick über die Interpretationsmöglichkeiten für die LANDSAT-5-TM-Kanäle (zusammengestellt nach KRAUS 1990, LILLESAND u. KIEFER 1987, SCHARDT 1990)

Tab. 2: Thematic items interpretable from different LANDSAT-5-TM channels (compiled from KRAUS 1990, LILLESAND u. KIEFER 1987, SCHARDT 1990)

Die kleinräumige topographische Kammerung und die Heterogenität der Hochgebirgslandschaft sind daher eine ungünstige Basis für die computergestützte, halbautomatische Vegetationskartierung mit digitalen Satellitendaten.

Ein extremes Relief führt im Zusammenhang mit niedrigen Sonnenständen während der Aufnahme zu einer deutlichen Abschwächung der Signalintensität in den schwächer ausgeleuchteten Reliefpartien. Der geringe Flächenanteil und die Inhomogenität der naturnahen Pflanzengesellschaften

verursachen schwierig zu interpretierende Mischsignale sowohl an den Bestandsrändern als auch in den Beständen.

Die unterschiedliche Ausleuchtung des Reliefs modifiziert die Intensität des reflektierten Signals bei gleichen Oberflächen, so daß für eine Bedeckungsklasse Trainingsgebiete in unterschiedlichen Beleuchtungssituationen aufgenommen werden müssen. Die Inhomogenität der natürlichen Vegetation und die geringe räumliche Ausdehnung homogener Pflanzenbestände erschweren die Zusammenstellung von Trainingsgebieten mit normalverteilten Grauwerten in den verschiedenen Wellenlängen. Eine zusätzliche Modifikation der vom Sensor gemessenen Reflexion der Erdoberfläche wird durch die unterschiedliche Höhenlage der Flächen und die möglicherweise räumlich stark differenzierte Trübung der Atmosphäre verursacht.

In Tab. 2 sind einige Interpretationsmöglichkeiten für die Kanäle des TM nach verschiedenen Autoren zusammengestellt. Ebenso wie die bereits beschriebenen Reflexionsvorgänge an Vegetationsoberflächen ist die Reflexion unbewachsener Landoberflächen neben den Materialeigenschaften von standortbezogenen Parametern abhängig. Die Reflexion von Gesteinen nimmt im sichtbaren Bereich des Lichts mit der Wellenlänge zu. Im nahen und mittleren Infrarot liegen für die Mineralzusammensetzung charakteristische Absorptionsbanden. Das Reflexionsvermögen von Böden variiert erheblich in Abhängigkeit von der mineralischen Zusammensetzung und dem Gehalt an organischer Substanz.

Auf das Reflexionsverhalten weiterer Objekte soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da sie für die vorliegende Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind. Eine gute Übersicht zu den Reflexionscharakteristiken verschiedener Oberflächen geben DECH (1987) und ALBERTZ (1991).

Die vielfältigen Gesichtspunkte, nach denen eine Segmentierung vorgenommen werden kann, sind bei ROSENFELD und KAK (1982) sowie HARALIK und SHAPIRO (1992) ausgezeichnet dokumentiert. In diesem Zusammenhang sind auch die Arbeiten von GIERLOFF-EMDEN et al. (1985) zur vergleichenden Interpretation von Luftbildern und Metric-Camera-Aufnahmen zu beachten.

Weiterführende Angaben zu Problemen der Mustererkennung und Bildauswertung finden sich bei ROSENFELD und KAK (1982) sowie HARALIK und SHAPIRO (1992). Im Folgenden soll die Verfahrensweise bei der bildpunktorientierten Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten erläutert werden.

2.1.3.2 Computergestützte Klassifikation

Einen guten Überblick über operationelle Verfahren der computergestützten Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten gibt QUIEL (1986). Die Klassifikationsverfahren werden allgemein in überwachte und unüberwachte bildpunktorientierte Verfahren unterschieden. Bei der unüberwachten Klassifizierung erfolgt die Bedeutungszuweisung zu den kartierten, homogenen Flächen interaktiv nach der Bildsegmentierung. Bei der überwachten Klassifikation werden die Klassenmerkmale vor dem Zuordnungsvorgang bestimmt und die Bildelemente aufgrund ihrer numerischen Eigenschaften den bereits vorgegebenen Klassen zugeordnet.

Unüberwachte und überwachte Verfahren können anhand der Kriterien, die zur Zuordnung der Bildelemente zu den Klassen genutzt werden oder anhand der Klassifizierungsstrategie weiter untergliedert werden. Eine Unterteilung nach den Zuordnungskriterien differenziert die Klassifizierungsverfahren auf der Grundlage der verwandten Klassifizierungsalgorithmen. Eine Unterteilung nach der Klassifizierungsstrategie kann beispielsweise zwischen baumförmigen Verfahren und hybriden Verfahren getroffen werden, wobei letztere auch GIS-Methoden und interaktive Auswertungsschritte einschließen.

Im weiteren soll ausschließlich auf überwachte, hybride Klassifizierungsverfahren eingegangen werden, da dieser Ansatz der vorliegenden Arbeit zugrundeliegt.

Voraussetzung für die Klassifizierung multispektraler Fernerkundungsdaten ist die eindeutige Beziehung zwischen den vorgegebenen Klassen und den zur Klassifikation benutzten Merkmalen der einzelnen Klassen im Bild (QUIEL 1986). Um eine Klassifizierung zu ermöglichen, müssen eine ausreichende Anzahl von Bildelementen (Pixel) vorgegebenen Musterklassen (Schneeflächen, Wasser usw.) zugeordnet werden. Für einige Orte im zu bearbeitenden Bildausschnitt muß der Bedeckungstyp bekannt sein (vgl. auch Kapitel 2.1.4.2). Anhand eines Zuordnungsalgorithmus werden nun die Bildelemente auf der Basis des Vergleichs ihrer Grauwertvektoren (Grauwerte in den Spektralkanälen) mit den Grauwertvektoren der Musterklassen derjenigen Klasse zugeordnet, mit der die größte Übereinstimmung besteht.

Im TERRAMAR/MICROIMG System sind 4 Klassifikationsalgorithmen, das Maximum Likelihood-Kriterium, das Mahalanobis-, das Parallelepiped-Verfahren (Box-classifier) und das euklidische Distanzmaß implementiert. Als ein gutes Zuordnungskriterium wird in der Literatur häufig der Maximum Likelihood-Algorithmus genannt (HABERÄCKER 1989, KRAUS et al. 1990). Die Zuordnung der Bildelemente bei diesem auf einem Wahrscheinlichkeitsdichteanatz beruhenden Verfahren erfolgt auf der Basis der Trainingsgebietsstatistik, der Mittelwerte in den verschiedenen Spektralkanälen und der Kovarianzmatrizen.

Da die Kovarianzen und die Mittelwerte aus den Trainingsgebieten errechnet werden und die Grauwerte in den einzelnen Kanälen weitgehend normalverteilt sein müssen, sollten die Stichproben möglichst groß und homogen sein. In einem kleingekammerten Hochgebirgsraum mit stark variierenden Beleuchtungsverhältnissen und kleinen, inhomogenen Vegetationseinheiten sind dies kaum erfüllbare Voraussetzungen. Nach SCHULZ (zitiert bei KRAUS 1990) sollten im Falle starker Abweichungen der Trainingsgebietsdaten von Normalverteilungen die Cluster durch Kugelwolken approximiert werden.

Zusätzlich kann bei den Maximum Likelihood-Ansätzen die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Klasse im Bild auftritt, vorgegeben werden, was jedoch recht gute Vorkenntnisse über die Flächenanteile der Klassen im Raum voraussetzt. QUIEL (1986) verweist auf Schwierigkeiten bei der Kartierung großer Gebiete mit inhomogenen Landschaftstypen mit dem Maximum Likelihood-Verfahren.

In der vorliegenden Arbeit wurde aus diesen Gründen die Klassifikation der Satellitendaten nach dem euklidischen Distanzkriterium durchgeführt. Die Darstellung des Verfahrens erfolgt im wesentlichen nach PARLOW (1988), KRAUS et al. (1990) und HABERÄCKER (1989).

Die Anzahl der in die Klassifikation eingebrachten Kanäle des Sensors spannt einen n-dimensionalen Merkmalsraum auf, in dem n der Anzahl der Spektralkanäle entspricht.

Im Merkmalsraum sind, basierend auf der statistischen Analyse der Trainingsgebiete, die Schwerpunkte der die Landnutzungsklassen bestimmenden Punktwolken eindeutig definiert. Die Zuordnung der Bildelemente zu den vorgegebenen Klassen erfolgt nach dem Kriterium der Minimierung ihrer Distanz zu den Klassenzentren, wobei sich die Distanz zwischen Klassenzentrum und betrachtetem Bildpunkt errechnet nach:

$$D_{(x,y)} = \sqrt{\sum (xi - yi)^2}; \quad (4)$$

mit:

$i = 1..n$ (Anzahl der Spektralkanäle)

x = Klassenmittelpunkt

y = Bildpunkt

Abb. 9 zeigt für einen dreidimensionalen Merkmalsraum, der durch die Spektralkanäle 3, 4 und 7 des LANDSAT-5-TM definiert ist, die Lage einiger Klassen. Die Kugeloberflächen im Merkmalsraum repräsentieren die maximal zulässigen Distanzen von den einzelnen Klassenmittelpunkten. Abb. 10 stellt die der Arbeit zugrunde liegende Klassifizierungsstrategie dar.

Um die weitgehende Erfassung der wesentlichen Vegetationsformationen in dem überaus heterogenen Hochgebirgsraum zu ermöglichen, mußte die auf konventionelle Art erstellte Klassifikation durch GIS-technische Arbeitsschritte sowie manuelle Kartierung unterstützt und ergänzt werden. Teilweise wurden Ansätze baumförmiger Klassifizierungsstrategien verwandt, im Falle der Gewässerkartierung ein Farbsegmentierungsverfahren.

Die Festlegung des Untersuchungsausschnittes im Gesamtgebiet und somit auch die Bestimmung des zu bearbeitenden Szenenausschnittes erfolgte im wesentlichen auf der Grundlage der allgemeinen Datenverfügbarkeit und der Feldbeobachtungen. Eine Vorentscheidung zugunsten des Hunzertales fiel aufgrund der guten kartographisch-topographischen Bearbeitung des Gebietes durch PILLEWIZER und HECKLER 1954 sowie SCHNEIDER 1959 im Maßstab 1:50.000 (vgl. hierzu auch Kapitel 2.2.1, sowie PAFFEN et al. 1956, SCHNEIDER u. BAUMERT 1968). Eine entsprechend gute topographische Grundlage im gleichen Maßstab lag nur noch für den Nanga Parbat durch die Arbeiten von FINSTERWALDER und RECHL aus dem Jahr 1934 vor.

Von Bedeutung war auch die Zugänglichkeit der Gebirgstäler zur Aufnahme der Trainingsgebiete. Die Lage des vom Karakorum Highway erschlossenen Hunza-Haupttales und die Ausdehnung der Seitentäler erlaubte in den meisten Fällen das Erreichen der Talschlüsse der vergletscherten Seitentäler in zwei bis drei Tagesmärschen.

Die kosten- und zeitsparenden Faktoren einer satellitengestützten Vegetationskartierung treten in einem derartigen Gelände gegenüber traditionellen Kartierungsverfahren deutlich hervor. Das eigentliche Untersuchungsgebiet wurde nach Süden über das zentrale Hunza-Tal hinaus ausgedehnt, um den wichtigen landschaftsökologischen Gradienten Rechnung zu tragen, die sich südlich und nördlich des Rakaposhi-Hauptkammes in der Vegetationsverbreitung widerspiegeln.

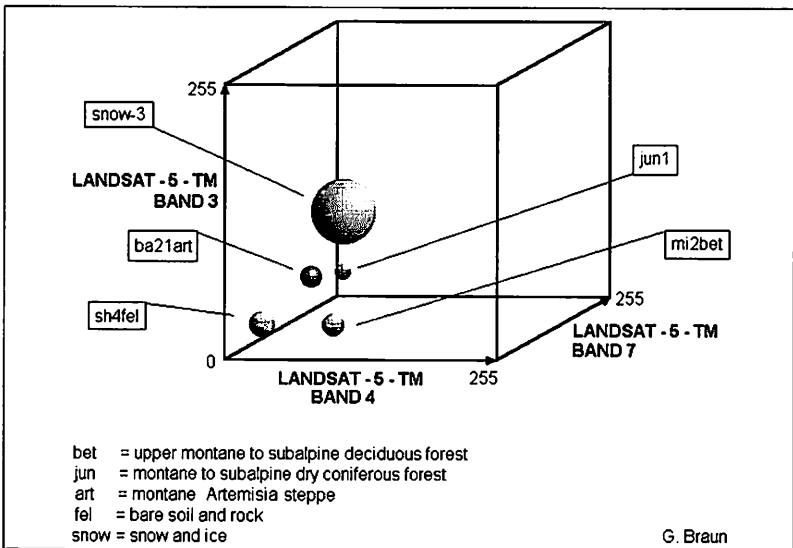


Abb. 9: Dreidimensionaler Merkmalsraum der Kanäle 3, 4 und 7 des LANDSAT-5-TM. Die Kugeloberflächen repräsentieren die maximal zulässige Distanz zum Zentrum einzelner spektraler Klassen.

Fig. 9: Threedimensional feature space from channels 3, 4 and 7 of LANDSAT-5-TM. The spheres represent the maximum allowable distance to the gravity centres of the single spectral classes.

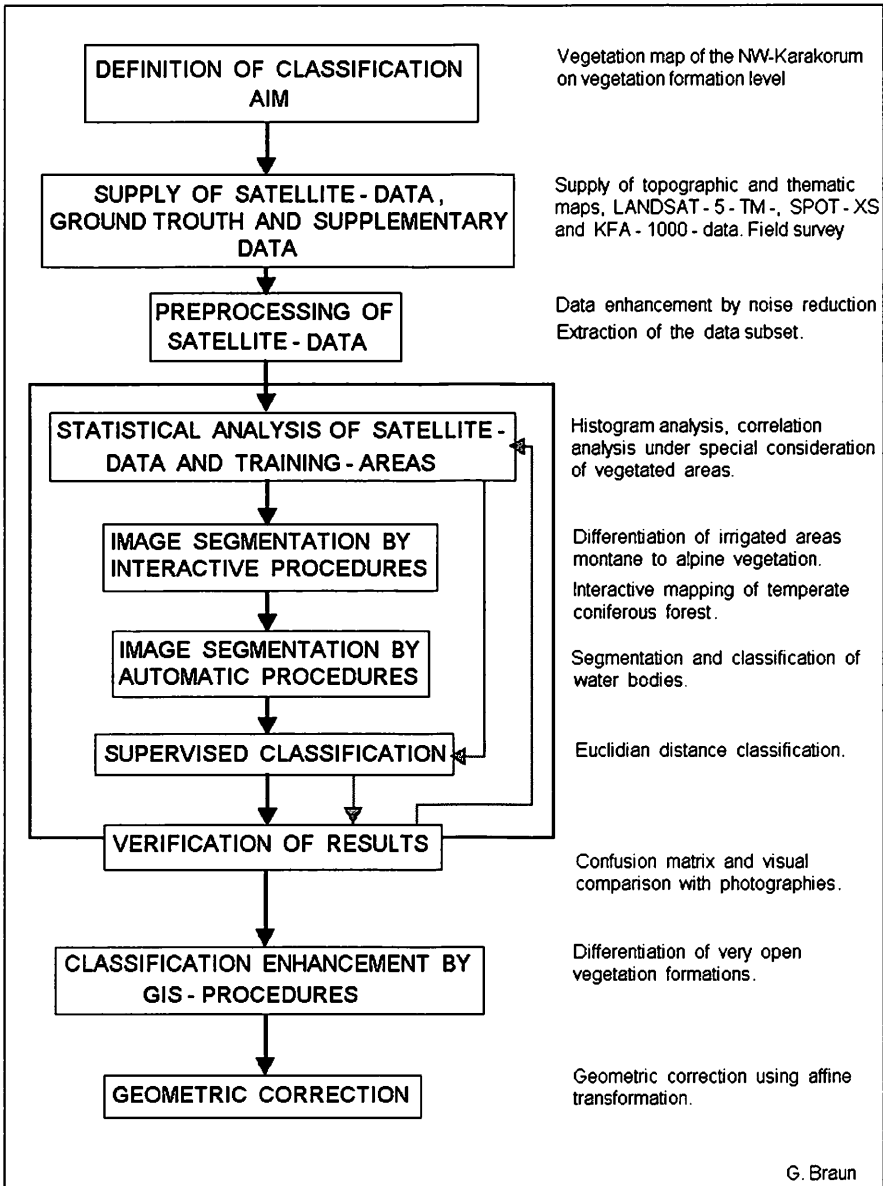


Abb. 10: Klassifikationsstrategie zur Vegetationskartierung im NW - Karakorum

Fig. 10: Classification strategy used for mapping vegetation formations in the NW Karakorum

Die westliche Ausdehnung der ausgewählten LANDSAT-5-TM Szene vom 06.07.1990 begrenzt das Untersuchungsgebiet bei $74^{\circ} 15' O$, die östliche Grenze wurde in Übereinstimmung mit der vorhandenen topographischen Kartierung auf $74^{\circ} 45' O$ festgelegt. Die Nordgrenze der Teilszene schließt die Batura-Mauer ein, die den Shishpar-Gletscherkessel vom Batura-Gletscher bei $36^{\circ} 30' N$ trennt. Die Südgrenze des Ausschnittes quert das untere Bagrot-Tal und schneidet den Hunza südlich von Nomal bei etwa $36^{\circ} 00' N$ (vgl. Abb. 25 in Anlage II, sowie die Vegetationskarte in der Anlage IV).

Die Extraktion des gewählten Ausschnittes aus der zuvor auf einem Massenspeicher abgelegten und störungskorrigierten Viertelszene (Kapitel 2.1.2.2) erfolgte mit Routinen des TERRAMAR-/MICROIMG Systems. Der Bildausschnitt beanspruchte 28 Mb Speicherkapazität, zu denen im Laufe der weiteren Arbeit zahlreiche Overlays, Gelände-, Besonnungs- und Einstrahlungsmodelle hinzukamen, so daß zeitweise bis zu 200 Mb Festplattenspeicher benötigt wurden.

Zur weiteren Auswertung und zur Klassifikation der Daten mußten zunächst die Spektralkanäle statistisch analysiert werden, um Informationen über die Eignung der Daten zur geplanten Vegetationskartierung zu erhalten.

2.1.4 Klassifikation der Daten

2.1.4.1 Histogrammanalyse der Kanäle 1-5 und 7

Zu Beginn der Bilddatenverarbeitung ist es notwendig, die Grauwertverteilung in den einzelnen Spektralkanälen im Hinblick auf die geplante Auswertung statistisch zu untersuchen.

Eine einfache Charakterisierung der Helligkeit und des Kontrastes der Bilddaten erfolgt durch die Berechnung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der einzelnen Spektralkanäle. Allgemein kann davon ausgegangen werden, daß hohe Mittelwerte bei digitalen Bilddaten helle Bilder repräsentieren, und eine hohe Standardabweichung auf ein kontrastreiches Bild schließen läßt. Weitergehende Informationen über die zu bearbeitenden Daten können aus den Häufigkeitsverteilungen der Grauwerte in den einzelnen Kanälen abgeleitet werden (HABERÄCKER 1989).

Grauwertmessungen in den Bildern und Vergleiche mit den Histogrammen der Spektralkanäle liefern Befunde zur Lage der zu trennenden Klassen in den Histogrammen. Die Erfassung von Grenzwerten der Reflexion bestimmter Klassen im Bild unterstützt erste Segmentierungsversuche mit Schwellenwertverfahren.

Abb. 11 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte eines LANDSAT-5-TM-Datensatzes für die zur Klassifikation herangezogenen Kanäle 1-5 und 7. Zusätzlich sind die Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben. Aus den Häufigkeitsverteilungen lassen sich erste Flächenabschätzungen bezüglich gut unterscheidbarer Oberklassen wie Schnee- und Wasserflächen oder vegetationsbedeckter Bereiche ableiten. Die Histogramme sollen im einzelnen kurz diskutiert werden.

Alle in Abb. 11 gezeigten Verteilungen besitzen eine für LANDSAT-Daten bemerkenswert hohe Dynamik.

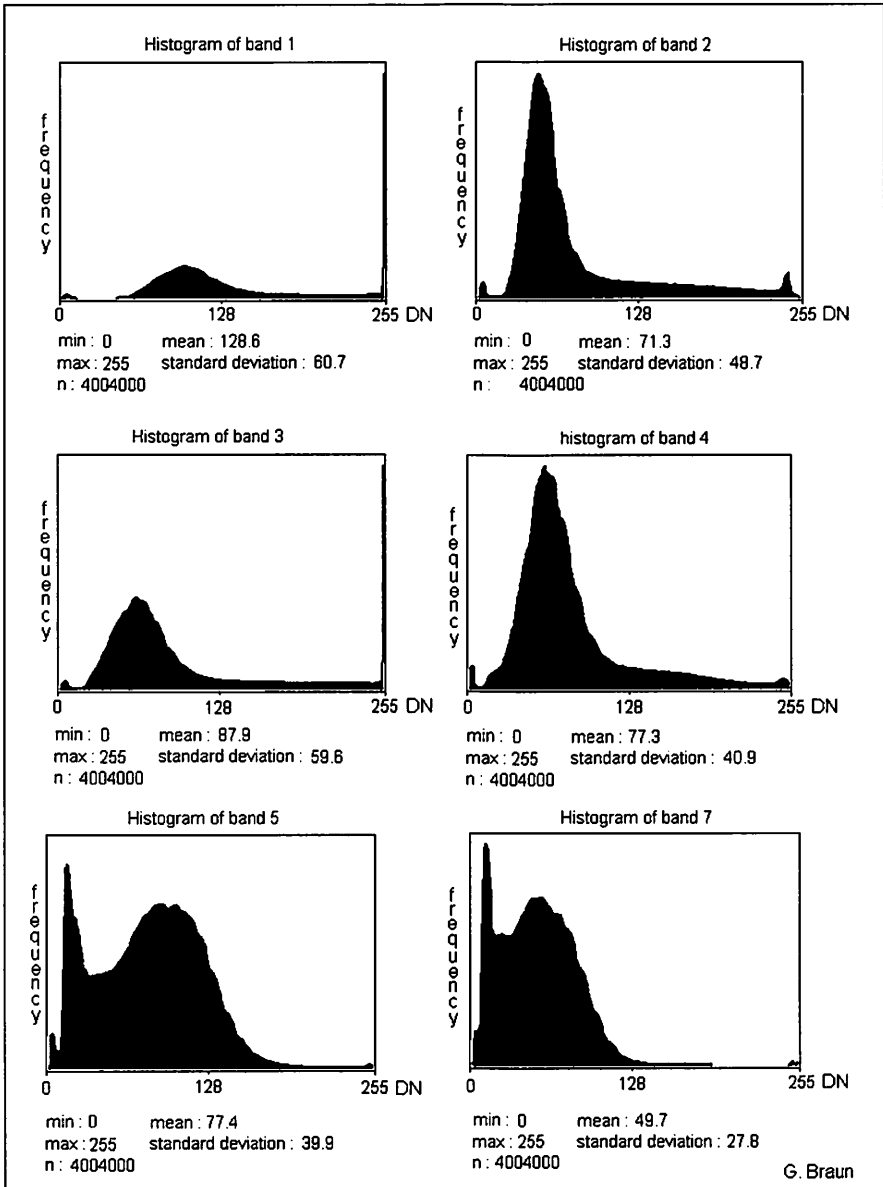


Abb. 11: Histogramme der Kanäle 1-5 und 7 der LANDSAT-5-TM-Szene von 1990

Fig. 11 Histograms of bands 1 to 5 and 7 from LANDSAT-5-TM-data from 1990

Sie resultiert aus der im Untersuchungsgebiet auftretenden hohen Reliefenergie. Die hellen Schneeflächen mit hohen Reflexionswerten in den Spektralbändern 1 bis 4 und das gekammerte Relief mit ausgeprägten Schatten und somit niedrigen Reflexionswerten schöpfen die Dynamik des Aufnahmesystems des LANDSAT-5-TM weitgehend aus.

Das ausgeprägte Häufigkeitsmaximum bei Grauwerten um 250 bis 255 im ansonst flachen Histogramm des Kanal 1 wird durch die ausgedehnten Schneeflächen hervorgerufen. In diesem Wellenlängenbereich ist innerhalb der schneebedeckten Gebiete keine hohe Grauwertdynamik zu beobachten. Die Reflexion von Laub- und Nadelwäldern ist im Spektralbereich von 0,45-0,52 μm sehr gering. Vegetationsfreie Flächen werden durch Grauwerte größer 120 repräsentiert.

Im Histogramm des Kanal 2 fehlt das charakteristische Häufigkeitsmaximum der Schneeflächen. Aufgrund der starken Hangabschattung (z.B. an der Rakaposhi-Nordflanke) weisen in diesem Spektralbereich die schneebedeckten Flächen Grauwerte zwischen 89 und 250 auf.

Das markante Häufigkeitsmaximum in Kanal 2 wird im Gegensatz zu Kanal 1 durch die Reflexion der vegetationsbedeckten und der kaum bewachsenen Fels und Bodenflächen hervorgerufen. Die unbewachsenen Flächen weisen hier geringfügig höhere Reflexionswerte als die vegetationsbedeckten Flächen auf.

Kanal 3 des TM nimmt ein spektrales Band von 0,63-0,69 μm im roten Bereich des Lichts auf. Die Vegetation zeigt hier ein deutliches Reflexionsminimum im Vergleich zu den übrigen Flächen. Die Schneeflächen weisen auch in diesem spektralen Band eine relativ hohe Dynamik auf, wobei jedoch ein deutlich ausgeprägtes schmales Reflexionsmaximum bei Grauwerten um 250-255 zu beobachten ist. Der Kanal 4 des TM (0,76-0,9 μm) liegt im Bereich des Reflexionsmaximums der grünen Vegetation.

	K1	K2	K3	K4	K5	K7
K1	1,000	0,948	0,963	0,751	-0,179	-0,095
K2	0,948	1,000	0,983	0,817	-0,203	-0,134
K3	0,963	0,983	1,000	0,814	-0,143	-0,070
K4	0,751	0,817	0,814	1,000	0,016	-0,026
K5	-0,179	-0,203	-0,143	0,016	1,000	0,963
K7	-0,095	-0,134	-0,070	-0,026	0,963	1,000

Tab. 3: Korrelationsmatrix der Spektralkanäle 1 - 5 und 7 der LANDSAT-5-TM - Daten

Tab. 3: Correlation matrix of spectral bands 1 - 5 and 7 from LANDSAT-5-TM - data

Während die Schneeflächen in diesem Spektralband reflexionsäquivalente Grauwerte zwischen 80 und 255 aufweisen, beobachtet man bei grüner Vegetation Grauwerte zwischen 50 und 110. Vegetationsfreie und spärlich bewachsene Flächen absorbieren häufig stärker. Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Reflexion sowie die Grauwertdynamik innerhalb der Schneeflächen ab. Dies beruht

auf der geringen Beeinflussung der infraroten Spektralbereiche durch Ausleuchtung und Abschattung.

Ein weiteres Hilfsmittel zur Analyse der Daten in den einzelnen Spektralkanälen ist die Korrelationsmatrix der Spektralbänder. Für den vorliegenden Datensatz ist sie in Tab. 3 wiedergegeben. Die Korrelationsmatrix kann als Kriterium für die Informationsredundanz in den Spektralkanälen genutzt werden. Aus ihr läßt sich für die zu bearbeitende Szene in erster Näherung abschätzen, welche Kombination der Spektralbänder zur Klassifizierung der Daten sinnvoll ist (BÄHR u. VÖGTLE 1991). Sind die Grauwerte unterschiedlicher Kanäle hoch korreliert, tragen sie nicht signifikant zur Verbesserung des Klassifizierungsergebnisses bei.

Die in Tab. 3 wiedergegebene Korrelationsmatrix wurde für den gesamten bearbeiteten Ausschnitt berechnet. Auffällig ist die hohe Korrelation der sichtbaren Spektralbereiche und die schwächere Korrelation der mittleren Infrarot-Bänder mit dem nahen Infrarot des TM.

Hieraus läßt sich ableiten, daß eine Signalkombination aus sichtbarem Licht, nahem Infrarot und mittlerem Infrarot gute Voraussetzungen für eine Unterscheidung aller in der Szene auftretenden Objekte oder Flächen bietet. In der Praxis wird jedoch häufig eine Interpretation der Daten mit bestimmten thematischen Schwerpunkten, wie beispielsweise einer Mineralkartierung oder der Differenzierung der Vegetation angestrebt.

	K1	K2	K3	K4	K5	K7
K1	1,000	0,953	0,945	-0,244	0,333	0,595
K2	0,953	1,000	0,958	-0,117	0,473	0,693
K3	0,945	0,958	1,000	-0,172	0,496	0,725
K4	-0,244	-0,117	-0,172	1,000	0,458	0,080
K5	0,333	0,473	0,496	0,458	1,000	0,893
K7	0,595	0,693	0,725	0,080	0,893	1,000

Tab. 4: Korrelationsmatrix der Kanäle 1 - 5 und 7 des LANDSAT-5-TM für einen schneefreien Ausschnitt aus der bearbeiteten Szene

Tab. 4: Correlation matrix of bands 1 - 5 and 7 of LANDSAT-5-TM, derived from a subset free from snowcover

Betrachtet man in Tab. 3 die Korrelation der Kanäle 3 und 4, so fällt der relativ hohe Koeffizient auf, der in keiner Weise der Tatsache Rechnung trägt, daß dem markanten Reflexionsanstieg zwischen TM-Kanal 3 und TM-Kanal 4 eine überaus hohe Bedeutung für die Unterscheidung der Vegetation zukommt.

Tab. 4 gibt zum Vergleich die Korrelationen für einen Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet wieder, der ausschließlich vegetationsbedeckte Flächen oder unbedeckte Böden enthält.

In Tab. 4 ist die Korrelation zwischen Kanal 3 und 4 deutlich geringer als in der für die Gesamtscene berechneten Korrelationsmatrix. Hieraus läßt sich auf die hohe Bedeutung der Kanäle 3 und 4

sowohl für die Differenzierung der Vegetation als auch für die Unterscheidung bewachsener und unbewachsener Flächen schließen.

Aufgrund der hohen Korrelation der Kanäle 1, 2 und 3 untereinander und der hieraus resultierenden Informationsredundanz wurde auf die Einbeziehung des Kanals 2 in die Klassifikation der Daten verzichtet. Darüberhinaus wies der Kanal 2 auch nach der Korrektur erhebliche Störungen auf, die das Klassifikationsergebnis negativ beeinträchtigt hätten (vgl. Kap. 2.1.2.2).

Einen guten visuellen Eindruck von der Grauwertverteilung und der Korrelation zweier Spektralkanäle vermitteln 2-dimensionale Häufigkeitshistogramme, wie sie in Abb. 12 für 3 Kanalkombinationen wiedergegeben sind. Die Histogramme werden erzeugt, indem für jede Position im Bild der Grauwert im Spektralkanal i die X-Koordinate, der korrespondierende Grauwert eines Kanals j die Y-Koordinate repräsentiert. Die Häufigkeit der vorkommenden Grauwertkombinationen wird wiederum als Grauwert kodiert. Die auf diese Weise erzeugten Diagramme (vgl. Abb. 12) lassen durch visuelle Interpretation Rückschlüsse auf die Korrelation der betrachteten Kanäle zu.

Aus dem in Abb. 12 gezeigten 2-dimensionalen Histogramm für die Kanäle 1 und 7 kann aufgrund der Form der Grauwertverteilung auf eine geringe Korrelation der Kanäle geschlossen werden. Dieser Befund wird durch die berechnete Korrelation bestätigt (vgl. Tab. 3).

Darüberhinaus fällt in Abb. 12 die Ähnlichkeit der 2-dimensionalen Häufigkeitsverteilungen auf, die sich aus den Kanalkombinationen 1 und 4 sowie 3 und 4 ergeben. Die Übereinstimmung beruht auf der hohen Korrelation zwischen den Kanälen 1 und 3, deren Grauwerte jeweils die Y-Achse repräsentieren. Die Ähnlichkeit der Verteilungen läßt eine etwa gleich hohe Korrelation der Spektralkanäle 1 und 4 sowie 3 und 4 erwarten. Dies wird durch die berechneten Werte in den Korrelationsmatrizen (Tab. 3 und Tab. 4) bestätigt.

Das 2-dimensionale Histogramm der Kanalkombination 3 und 4 in Abb. 12 deutet auf eine hohe Korrelation der Grauwerte oberhalb 140 hin. In beiden Spektralkanälen sind jedoch überwiegend die Schneeflächen durch Grauwerte größer als 140 repräsentiert. Vergleicht man diese Aussagen mit den errechneten Korrelationswerten für die Kanäle 3 und 4, die sowohl unter Einbeziehung (Tab. 3) als auch unter Ausschluß der Schneeflächen (Tab. 4) aufgestellt wurden, so wird die schneeflächenabhängige, im 2-dimensionalen Histogramm sichtbare, hohe Korrelation von Grauwerten oberhalb 140 durch die Werte in den Matrizen überzeugend belegt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Histogrammanalysen und Korrelationsmatrizen für die meisten Kartierungsanwendungen einen ausreichend guten Überblick über die Ausgangsdaten geben. Jedoch läßt sich m. E. eine deutliche Verbesserung des Informationsgehaltes von Korrelationsmatrizen erzielen, wenn die Berechnung nicht für die gesamte Szene, sondern für vorselektierte Flächen erfolgt. Dies kann entweder durch die Bearbeitung von Ausschnitten erfolgen oder durch Bezug der Korrelationsberechnung auf die Trainingsgebiete, die zur Klassifikation verwandt werden sollen. Die Korrelationsanalyse erhält hierdurch einen thematischen Bezug.

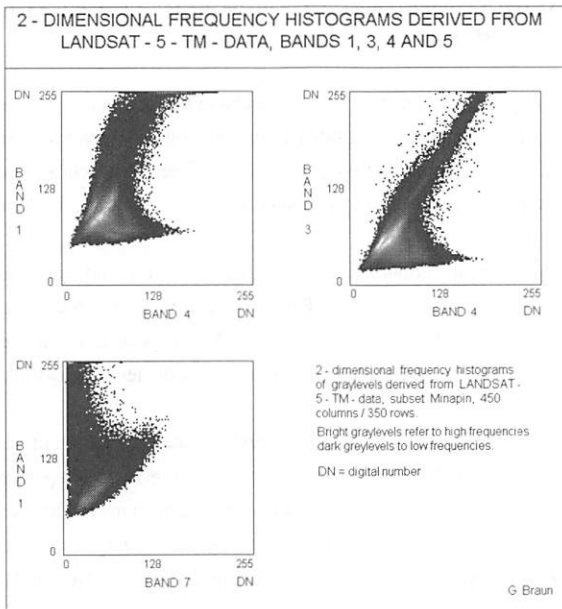


Abb. 12: 2-dimensionale Häufigkeitshistogramme der LANDSAT-TM-Kanäle 1/4, 3/4, 1/7

Fig. 12: 2-dimensional frequency histograms of the LANDSAT-TM-channels 1/4, 3/4, 1/7

Auf diese Weise lassen sich Aussagen über die zu einer Kartierung bestimmter Klassen benötigten Kanäle treffen. Dieses Verfahren wird auch von MÜLLER (1990) für eine gebietsbezogene Hauptkomponententransformation vorgeschlagen, um die Dekorrelation der einzelnen Spektralkanäle auf die ausgewählten Klassen zu beziehen. Werden bei Hauptkomponententransformationen die Korrelations- und Varianz-Kovarianzmatrizen aus dem gesamten Datenkollektiv ermittelt, wird die Hauptkomponententransformation keine optimale Dekorrelation der Daten erbringen, da sie ohne Bezug zu den zu kartierenden Klassen erfolgt.

2.1.4.2 Übertragung von Trainingsgebietsdaten in die digitalen Satellitendaten und Analyse der Trainingsgebietsstatistik

Die bei der Feldbegehung aufgenommenen Trainingsgebiete müssen in einen geometrischen Bezug zu den auf Massenspeichern abgelegten digitalen Datensätzen gebracht werden. Hierzu werden die im Gelände interpretierten Falschfarbkomposite mit den auf dem Bildschirm visualisierten Daten verglichen und die Trainingsgebiete mit einer Kodierung ihrer Bedeutung in dem digitalen Datensatz markiert.

Im Falle der hier besprochenen bildpunktbezogenen Klassifikation sind die Trainingsgebiete, die zunächst als Punkt- oder Flächenmarkierung in Papierabzügen von Luft- oder Satellitenbildern vorliegen, nach der Übertragung in die digitalen Daten als näherungsweise normalverteilte Grauwertmengen aufzufassen. Ihre Mittelwerte sollten sich in den verschiedenen Spektralkanälen möglichst deutlich unterscheiden.

Die Registrierung der Trainingsgebiete im auszuwertenden Datensatz kann auf verschiedene Arten erfolgen. Zum einen können alle Bilddaten geometrisch auf ein gemeinsames Bezugssystem korrigiert werden, und die Aufnahme der Trainingsgebiete kann am Digitalisiertablett erfolgen (RUWWE et al. 1991), zum anderen können die im Falschfarbkomposit aufgenommenen Trainingsgebiete durch Digitalisierung am Bildschirm direkt in den geometrisch nicht korrigierten Datensatz übernommen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Trainingsgebiete am Bildschirm in den geometrisch nicht rektifizierten Datensatz übertragen, da eine geometrische Korrektur der Bilddaten aufgrund der hohen Reliefenergie im Untersuchungsgebiet durch das anschließende Resampling bereits vor der Klassifikation zu einem deutlichen Informationsverlust geführt hätte.

In den meisten rasterorientierten Bildverarbeitungssystemen werden im Anschluß an die Digitalisierung der Trainingsgebiete die Vektorpolygone in ein Bildraster konvertiert, das den geometrischen Eigenschaften der Satellitendaten entspricht. Die Rasterdaten tragen die Nummern der Trainingsgebiete und weisen Flächen mit homogener Oberflächenbedeckung aus. In dem in Abb. 13 (in Anlage I) gezeigten Falschfarbkomposit der Minapin- und Pisan-Gletschertäler sind für einige Vegetationsklassen die im Gelände aufgenommenen Trainingsgebiete als weiße Flächen markiert worden. Durch Bildverschneidung können nun für die verschiedenen Trainingsgebiete die Grauerthistogramme aus den einzelnen Spektralkanälen extrahiert und ausgewertet werden. Abb. 13 (Anlage I) zeigt die zu einigen Oberflächen- und Vegetationstypen gehörigen spektralen Signaturen. Sie geben exemplarisch die mittleren Grauwerte in den einzelnen Spektralkanälen wieder.

Die aus den digitalen Daten gewonnenen spektralen Signaturen geben Aufschluß über die Trennbarkeit der einzelnen Klassen und die hierzu benötigten Spektralkanäle. Insbesondere die schneebedeckten Gebiete unterscheiden sich deutlich von den vegetationsbedeckten Flächen durch die kontinuierliche Abnahme der Reflexion mit zunehmender Wellenlänge (Abb. 13 in Anlage I). Anhand von Abb. 13 soll auf einige grundlegende Probleme der Klassifizierung in dem bearbeiteten subtropischen Hochgebirgsraum eingegangen werden, die erheblich die Klassifizierung der Daten beeinflussen.

Berücksichtigt man in dem etwa N-S-orientierten Bildausschnitt die zum Aufnahmezeitpunkt von unten rechts einfallende Beleuchtung, so wird die starke Abschattung der NW-exponierten Hänge deutlich. Diese durch das Relief hervorgerufenen Beleuchtungsunterschiede müssen bei der Auswahl der Trainingsgebiete berücksichtigt werden, da gleiche Oberflächen in Abhängigkeit von ihrer Ausleuchtung erheblich voneinander abweichende Reflexionsintensitäten aufweisen können.

Zum Problem der variierenden Hangausleuchtung im Relief und zu möglichen Lösungsansätzen bei der Klassifizierung der Daten sollen einige Überlegungen stichwortartig aufgeführt werden:

- Würde man bei der Aufnahme der Trainingsgebiete die Schattenlagen unberücksichtigt lassen, wäre die anschließende Klassifizierung der Bedeckungseinheit unvollständig.
- Eine Zusammenfassung der beschatteten und besonnten Standorte zu einer spektralen Signatur führt zu mehrgipfeligen Verteilungen in der Trainingsgebietsstatistik und somit zu erheblichen Fehlklassifikationen.
- Eine Korrektur der Beleuchtungsunterschiede vor der Klassifikation, wie sie PARLOW (1988) und ITTEN et al. (1992) vorschlagen, kam aus mehreren Gründen ebenfalls nicht in Betracht. Zum einen lag nur für ein Teilgebiet des zu klassifizierenden Ausschnittes das zu diesem Verfahren benötigte DHM vor, zum anderen fordern ITTEN et al. (1992) ein DHM mit einer räumlichen Auflösung, die deutlich über der der Satellitendaten liegt.

Um den erheblichen Beleuchtungsunterschieden in der Satellitenszene hinsichtlich der Klassifikation Rechnung zu tragen, wurden bei der Aufnahme der Trainingsgebiete sowohl beschattete als auch besonnte Standorte gleicher Oberflächenklassen berücksichtigt und in getrennten Signaturen gehalten.

Im Zusammenhang mit der Wahl der Trainingsgebiete ergaben sich weitere Schwierigkeiten aus der beabsichtigten Klassifizierung von Vegetationsformationen mit einem geringen Bedeckungsgrad oder starker Inhomogenität. In den Artemisia-Steppen und den lichten Steppenwäldern mit *Juniperus macropoda* (Kap. 3.2) ist der Deckungsgrad der Vegetation häufig so gering, daß die spektralen Eigenschaften der vegetationsfreien Oberflächenanteile erheblichen Einfluß auf die vom Sensor gemessene Reflexion besitzen. Der hohe Anteil trockener Phytomasse in den Steppenformationen beeinflußt ebenfalls erheblich die Reflexion (ELVIDGE 1990). Darüber hinaus setzen sich die montanen bis alpinen Vegetationsformationen zumeist aus mehreren dominanten Arten zusammen, die aufgrund ihrer kleinräumig alternierenden Durchmischung schwer interpretierbare, hybride Signaturen erzeugen (FRANK 1988).

Unter Berücksichtigung der im Untersuchungsgebiet räumlich stark variierenden Beschaffenheit der Bodenoberflächen mußten auch bei der Aufnahme der Trainingsgebiete für die offenen Vegetationsformationen mehrere Signaturen erzeugt werden. Der Einsatz stark hybrider Signaturen wie *Betula utilis*-*Pinus wallichiana*-Mischwälder oder die Kartierung der artenreichen Bachschluchtenebüsche

und Auengehölze in der montanen und der subalpinen Stufe wurden nach Analyse der Trainingsgebietsstatistiken und einigen Klassifikationsversuchen verworfen.

In Tab. 5 sind die wichtigsten zur Klassifikation herangezogenen Trainingsgebiete aufgelistet. Die Tabelle zeigt einige Beispiele für die erheblichen Reflexionsunterschiede zwischen Signaturen, die zur gleichen Oberklasse gehören, und weist auch einige Beispiele schlecht trennbarer Einheiten aus, die bei der Klassifizierung der Daten zu Problemen führten.

Name des Trainingsgebiets	L-5-TM K1	L-5-TM K2	L-5-TM K3	L-5-TM K4	L-5-TM K5	L-5-TM K7
snow-1	253,8	199,0	243,1	172,8	18,9	10,8
snow-2	253,9	243,7	253,8	245,5	52,6	27,7
snow-3	207,9	106,8	136,9	96,1	16,4	10,1
snow-4	248,3	153,4	200,4	141,3	13,6	8,3
snow-5	141,8	67,4	80,4	53,5	14,3	9,3
sh4fel	55,8	21,4	22,0	15,7	16,0	12,5
sh11fel	135,0	70,0	88,7	68,1	121,7	93,1
sa2fel	213,8	112,3	149,9	118,9	205,3	127,6
wasser	104,1	49,3	57,8	41,0	21,5	13,9
ba20art	99,9	49,7	59,3	53,7	110,3	80,5
ba21art	103,7	52,3	63,5	57,7	118,2	82,4
mi28art	105,2	54,6	72,7	64,6	111,8	74,3
sh20art	99,5	50,1	64,7	55,8	109,5	80,2
sh21art	106,8	53,8	71,7	61,2	118,6	88,1
sh23art	128,7	67,6	92,0	80,6	139,5	92,6
mi39art	77,8	36,6	43,2	37,8	58,0	37,1
jun-1	82,3	42,7	50,9	74,8	93,6	57,1
jun-2	68,5	32,1	36,0	51,2	60,1	34,9
jun-3	76,5	38,4	45,3	69,2	74,6	41,3
picpin	63,3	28,6	28,8	48,6	44,8	22,3
mi2bet	58,0	26,0	24,4	80,2	47,6	16,2
mi19bet	63,3	30,3	26,5	107,6	67,1	23,8
ch13bet	65,2	31,3	31,6	76,6	69,1	29,7
ba16med	70,1	34,5	37,2	95,8	105,2	46,5
sh6med	74,7	38,0	43,8	90,5	116,8	56,0
ch2med	63,4	32,1	33,1	94,5	73,5	27,9
mi3ded	78,4	40,7	45,8	117,1	119,0	50,3
mi34leg	69,8	37,4	36,4	107,4	87,2	35,1
ba11sal	59,3	28,1	28,0	89,8	73,6	27,0

Tab. 5: Mittelwerte der Trainingsgebiete in den Spektralkanälen 1 - 5 und 7 des LANDSAT-5-TM-Sensors

Tab. 5: Mean grey values of training subsets from spectral bands 1 - 5 and 7 of the LANDSAT-5-TM-sensor

Vergleicht man die Signaturen der Trainingsgebiete sh4fel, sh11fel und sa2fel, so wird deutlich, daß erhebliche Unterschiede bezüglich der mittleren Grauwerte zwischen den Trainingsgebieten bestehen, die gleiche Bedeckungseinheiten repräsentieren. Bei dem Trainingsgebiet sh4fel handelt es sich um eine abgeschattete Felswand, deren Reflexion in allen Kanälen gering ist. Die Signatur sh11fel repräsentiert eine mächtige Schuttdedecke auf dem Shishpar-Gletscher (vgl. auch Abb. 14). Bei der Signatur sa2fel handelt es sich um eine frische Rutschung mit sehr heller Oberfläche (Abb. 14).

Der Vergleich zwischen sh23art und mi39art läßt ebenfalls erhebliche Reflexionsunterschiede bei gleicher Klasse erkennen. Es handelt sich bei mi39art um eine *Artemisia*-Steppe auf der ostexponierten Flanke oberhalb des Minapin-Gletschers (Abb. 13 in Anlage I), bei sh23art um einen SO-exponierten, *Artemisia*-bestandenen Hang oberhalb des Shishpar-Gletschers (Abb. 14 und Kap. 3.2).

Zur weiteren Beurteilung der Signaturen ist es sinnvoll, die mittleren Grauwerte in den einzelnen Spektralkanälen als Diagramm aufzutragen und diese mit den Felderhebungen vergleichend zu diskutieren. In Abb. 14 sind für einige Trainingsgebiete die mittleren Grauwerte in den Spektralkanälen 1 - 5 und 7 wiedergegeben. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Signaturen fällt auf, daß zwischen den spektralen Eigenschaften der Steppengesellschaften (sh23art) und der Felsflächen ein fließender Übergang besteht.

Hier tritt ein grundlegendes Problem der Klassifizierung von schütterten Vegetationsdecken auf. Die im Gelände zu beobachtende, zunächst kontinuierlich mit der Höhe zunehmende Biomasse (Abb. 28) läßt keine scharfe Trennung der Signale von unbewachsenen und spärlich mit *Chenopodiaceen*-Steppe oder *Artemisia*-Steppe bestandenen Flächen zu (Kap. 3.2). Eine Unterscheidung muß daher auf empirische Weise, und zwar durch Einbeziehung von topographischen oder klimatischen Informationen getroffen werden. Hinzu tritt das Problem, daß die ohnehin geringe Differenzierung bei reliefabhängiger, abnehmender Ausleuchtung der Standorte weitgehend verwischt wird.

Eine große Ähnlichkeit hinsichtlich des Reflexionsverhaltens kann auch zwischen ausgedehnten Legwacholderbeständen und *Juniperus macropoda*-Wäldern mit Kronenschluß beobachtet werden. Offene, mit *Gramineen* durchwachsene *Juniperus communis*-Fluren besitzen eine große spektrale Ähnlichkeit mit *Betula utilis*-*Juniperus macropoda*-Mischbeständen, die in den west- und ostexponierten Lagen um 3600 m häufig auftreten (Kap. 3.2). Diese Mischbestände führen durch ihre inhomogene Artenzusammensetzung in den LANDSAT-TM-Daten zu schwer interpretierbaren hybriden Signaturen (PARLOW 1988, QUIEL 1986, FRANK 1988).

In Abb. 15 (in Anlage I) wird versucht, dieses grundlegende Problem der Satellitenfernerkundung natürlicher oder naturnaher Bestände visuell nachvollziehbar darzustellen. In dem ca. N-S-orientierten Ausschnitt des LANDSAT-5-TM Farbkomposit der Kanäle 3, 5, 4 aus dem Minapin-Gebiet sind 2 Testräume markiert. Die Ausschnitte der beiden Gebiete wurden vergrößert und so transformiert, daß ihre Lage ungefähr mit der Aufnahmerichtung der im selben Gebiet aufgenommenen Photographien übereinstimmt. In die Photographien wurde manuell die ungefähre Lage der TM-Bildelemente eingetragen.

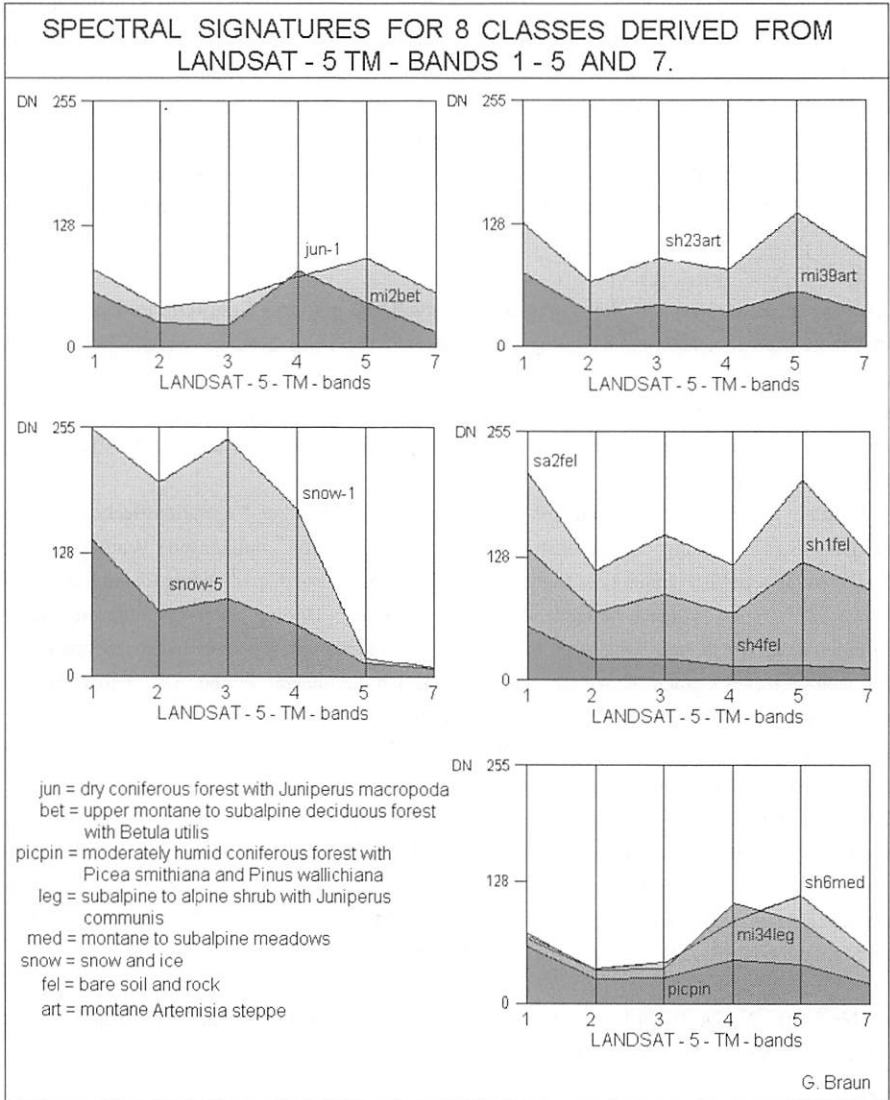


Abb. 14: Spektrale Signaturen aus den LANDSAT-5-TM-Kanälen 1-5 und 7

Fig. 14: Spectral signatures derived from LANDSAT-5-TM-channels 1-5 and 7

Der Vergleich zwischen Subset 1 und Photo A in Abb. 15 (in Anlage I) verdeutlicht, wie stark das vom Sensor aufgezeichnete Signal sowohl von der Mischung im Bestand (*Artemisia maritima*, *Juniperus macrospoda*, *Hyppophae rhamnoides*, *Berberis spec.*) und der Bodenreflexion als auch von der Mischung zwischen unterschiedlichen Bedeckungsarten betroffen ist. Die mit lichtem Steppenwald bewachsene Moräne im oberen Beispiel fällt auf der dem Gletscher zugewandten Flanke steil ab. Das Signal in den vom Moränenfirst gekreuzten Bildelementen setzt sich daher aus den frisch angeschnittenen, unbewachsenen Schottern der gletscherzugewandten Flanke und der bewachsenen, dem Ufertal zugewandten Flanke der Moräne zusammen.

Subset 2 zeigt einen Ausschnitt, in dem kleinräumig alternierend *Betula utilis*, *Juniperus macrospoda*, subalpine Triften und weitgehend unbewachsene Felswände auftreten. Die Anordnung der in sich sehr homogenen Bestände ist in Photographie B noch gut zu verfolgen, verwischt jedoch im Satellitenbild aufgrund der unzureichenden räumlichen Auflösung.

Besonders deutlich wird die Wirkung der Mischpixel auf die vom Satelliten gemessene Reflexion in Subset 2 an den dunklen Kränzen, die rings um die abgeschatteten Felswände zu erkennen sind.

Die beiden aufgezeigten Effekte - einerseits die Entstehung eines hybriden Signals durch Mischbestände und lückenhafte Vegetation im Bildelement, andererseits die Mischpixelbildung und Verfälschung durch Generalisierung des Signals über unterschiedliche Flächen - werden durch die extreme Topographie des Raumes zusätzlich verzerrt und verstärkt.

Die annähernd senkrechte Aufnahmerichtung des Satelliten und die sich häufig ändernde Neigung und Exposition der Geländeoberfläche variieren zusätzlich die Reflexion der einzelnen Oberflächenklassen. Hinzu treten die bereits angesprochenen, reliefbedingten Ausleuchtungsunterschiede sowie die sich mit der Höhenlage verändernden atmosphärischen Einflüsse.

2.1.4.3 Segmentierung der Satellitendaten zur Ausblendung bewässerter Flächen

Ein Vergleich der Signaturen subalpiner Birkenbestände mit den mittleren Reflexionswerten des bewässerten Gartenlandes in den Talböden (Abb. 13 in Anlage I) weist auf ein Problem hin, das mit den zur Verfügung stehenden Klassifikationsverfahren nicht lösbar war. Trotz mehrfacher Versuche mit unterschiedlichen Klassifizierungsverfahren war eine Trennung der subalpinen Laubwälder mit *Betula utilis* von den Obstgärten der Bewässerungsgebiete im Talboden nicht durchführbar. Daher mußte die Kartierung der Bewässerungsoasen manuell unterstützt werden.

Zur Kartierung der Bewässerungsoasen wurden zunächst Polygone angelegt, die ausschließlich die ariden Tallagen und die Bewässerungsgebiete umfaßten. Im Falle höhergelegener Sommersiedlungen mit Feldanlagen wurde aufgrund der Geländekenntnis im Detail kartiert.

Die von den Polygonen umfaßten Bereiche mußten in einem weiteren Schritt aus dem Bildkomplex herausgelöst werden. Durch multiplikative Verknüpfung eines die Tallagen ausweisenden Binärbildes mit den Ausgangsdaten wurden für die Satellitenkanäle 1 - 5 und 7 Datensätze erzeugt, die ausschließlich Bewässerungsgebiete, Steppe und vegetationsfreie Flächen enthielten.

Für diese Bilder wurde der NDVI (Kap. 2.1.4.5) berechnet und wiederum mit einem Schwellenwert von 128 binarisiert, wobei die Bewässerungsgebiete den Wert 0, die restlichen Bildbereiche den Wert 1 erhielten. Eine erneute multiplikative Verknüpfung der Ausgangsdaten mit dem Binärbild ergab den Originaldatensatz mit ausgeblendeten bewässerten Flächen.

2.1.4.4 Klassifikation des Datensatzes mit euklidischer Distanz und Verifikation durch Konfusionsmatrix

Zur Auswahl des Klassifikators und zur Klassifikation selbst beschreibt ITTEN (1980) mehrere grundlegende Verfahren. In der Praxis bieten sich häufig hybride Klassifikationsverfahren an, wie sie für die vorliegende Arbeit in Kap. 2.1.3.2 diskutiert wurden. In Übereinstimmung mit den dort angestellten Überlegungen zur Eignung von Klassifizierungsalgorithmen wurde die Klassifikation der Daten mit dem euklidischen Distanzkriterium durchgeführt. Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich ebenfalls in Kap. 2.1.3.2. Weitergehende Darstellungen können HABERÄCKER (1989), PARLOW (1988), QUIEL (1986), DONKER und SOETERS (o. J.), KAZMIERCZAK (1980) und BÄSSMANN und BESSLICH (1991) entnommen werden.

Abb. 16 in Anlage II gibt die Lage der Klassen in verschiedenen 2-dimensionalen Merkmalsräumen wieder, die durch die Spektralkanäle der LANDSAT-TM-Daten aufgespannt werden. In die Darstellung gingen alle zur Klassifikation der Szene benutzten Subklassen ein. Sie wurden in den Diagrammen (Abb. 16, in Anlage II) zu Oberklassen zusammengefaßt.

Die in den Diagrammen dargestellte Lage der Cluster gibt die tatsächliche, bei der Klassifikation entstandene Situation nicht vollständig wieder. Während bei der Klassifikation der Satellitendaten ein graphisch nicht darstellbarer 5-dimensionaler Merkmalsraum aufgespannt wird, liegt den Darstellungen in Abb. 16 nur jeweils ein 2-dimensionaler Merkmalsraum zugrunde.

Dennoch können anhand der Diagramme wichtige Eigenschaften des euklidischen Distanzkriteriums diskutiert und die spektralen Eigenschaften der Klassen untersucht werden. So geht aus Abb. 16 (Anlage II) hervor, daß ein euklidischer Distanzklassifikator bei überlappenden Zurückweisungsschwellen keinesfalls kreis- oder kugelförmige Merkmalsräume für einzelne Klassen generiert.

Die Ordinaten der drei dargestellten Diagramme geben die Reflexion in den Kanälen 1 und 3 wieder. Die Lage der einzelnen Klassen in Relation zur Ordinate der Merkmalsräume zeigt ihr spektrales Verhalten in den Kanälen 1 und 3, welches bereits bei der Analyse der Trainingsgebiete diskutiert wurde.

Da die Reflexion der vegetationsfreien und gering bedeckten Flächen in diesen Kanälen hoch ist, die Reflexion der vegetationsbedeckten Flächen jedoch niedrig, liegen die Vegetationsklassen bei relativ kleinen Abszissenwerten. Die vegetationsfreien Oberflächenarten liegen relativ zur Ordinate bei hohen Werten.

Eine interessante Interpretation bezüglich der Korrelation einzelner Kanäle läßt das Diagramm zu, welches den Merkmalsraum der LANDSAT-Kanäle 3 und 4 (Abb. 16 in Anlage II) beschreibt. Vergleicht man die Lage und die Form des Schneecusters und der Vegetationsklassen mit den Korrelationswerten in Tab. 3 und Tab. 4, so fällt auf, daß die Form und Lage der Vegetationsklassen in

Abb. 16 gut mit der niedrigen Korrelation zwischen den Kanälen 3 und 4 in Tab. 4 übereinstimmt. Die hohe Korrelation zwischen den Kanälen in Tab. 3 ist auf die Einbeziehung der Schneeflächen in die Berechnung zurückzuführen, womit auch die gestreckte Lage und Richtung des Schneecusters in Abb. 16 (Anlage II) übereinstimmt.

Zur Qualitätsbeurteilung einer Datenklassifikation bieten die in Abb. 16 vorgestellten Diagramme nur sehr unzureichende Möglichkeiten. Allerdings kann aus den Diagrammen abgeschätzt werden, inwieweit die bei der Klassifikation gewählte Kriterienkombination aus unterschiedlichen Zurückweisungsschwellen und Zuweisungsalgorithmen die Grauwertverteilung in den Trainingsgebieten wiedergibt.

Ein konventionelles Verfahren zur Qualitätsbeurteilung einer Klassifikation stellt die Konfusionsmatrix dar, die eine prozentuale Abschätzung der Klassifikationsfehler erlaubt. RUWWE et al. (1991) unterscheiden zwischen einer Beurteilung von Fehlern erster und zweiter Ordnung.

Die Abschätzung der Fehler erster Ordnung bezieht sich ausschließlich auf die Fehlklassifikationen, die in den zur Klassifikation benutzten Trainingsgebieten auftreten. Die Abschätzung von Fehlern zweiter Ordnung wird auf der Basis von nicht zur Klassifikation benutzten Kontrollflächen durchgeführt, deren Bedeckung bekannt ist. In der vorliegenden Arbeit wurde anhand der eingegebenen Trainingsgebiete und zahlreicher, im Gelände aufgenommener Verifikationsflächen eine Beurteilung der Fehler erster und zweiter Ordnung gemeinsam durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tab. 6 zusammengestellt. Es ist anzumerken, daß es sich hier nicht um eine vollständige Erfassung handelt, sondern nur um eine Abschätzung der Fehlklassifikationen. In der Verifikation, die von RUWWE et al. (1991) durchgeführt wurde, konnte eine digitalisierte, flächendeckende Landnutzungserhebung zur Fehlerbetrachtung einbezogen werden.

Die Abszisse in Tab. 6 zeigt die verschiedenen zugewiesenen Nutzungsarten. Auf der Ordinate ist die tatsächliche Klassenzugehörigkeit der Trainings- und Verifikationsgebiete aufgeführt, wie sie auf Basis der Geländeerhebungen zugeordnet wurde. Die Spalten zeigt die Zahl der zur Verifikation genutzten Bildelemente, die drei letzten Spalten den prozentualen Anteil richtig, falsch und nicht zugewiesener Bildelemente.

Zahlreiche Klassen weisen Zuordnungsgenauigkeiten von über 80 % auf. Die besten Ergebnisse automatischer Kartierung von über 90 % liegen für die Schnee- und Wasserflächen vor. Die interaktive bzw. interaktiv unterstützte Kartierung der Waldflächen und Bewässerungsgebiete zeigt ebenfalls gute Ergebnisse von 86 und 100 %, wobei der hohe Wert für die Bewässerungsgebiete auf die gute Trennbarkeit der vegetationsbedeckten Bewässerungsflächen von den wüstenhaften Talböden zurückzuführen ist (vgl. auch Kap. 2.1.4.3). Die weiteren zur Unterstützung der Kartierung angewandten Verfahren werden in Kapitel 2.1.4.5 vorgestellt.

2.1.4.5 Verbesserung der Vegetationskarte durch interaktive Verfahren

Um die Kartierung der Vegetationsformationen zu vervollständigen und zu verbessern, mußten interaktive Verfahren einbezogen werden. Zum einen wurde eine manuelle Kartierung der feucht-temperierten Nadelwälder vorgenommen, zum anderen wurden Formationen mit einem überaus geringen Vegetationsbedeckungsgrad mit Unterstützung durch GIS-orientierte Verfahren ausgewiesen.

Die Kartierung der feucht-temperierten Nadelwälder wurde zu Beginn der Arbeit mit überwachten Klassifikatoren versucht. Diese Vorgehensweise wurde nicht weiter verfolgt, da aufgrund der starken Abschattung insbesondere NW-exponierter Hänge und der hieraus resultierenden geringen Reflexion der Waldbestände erhebliche Fehlklassifikationen zu beobachten waren.

Desweiteren war es notwendig, die in der trocken-heißen Talstufe auftretende *Chenopodiaceen*-Steppe von den offenen, degradierten *Artemisia*-Steppen der unteren Hänge zu unterscheiden. TROLL (1939) weist in seiner Vegetationskarte des Nanga Parbat die Wüstensteppe (*Chenopodiaceen*-Steppe) isohypsenparallel bis zu einer Höhe von ca. 2000 m ü. NN aus.

Da für das eigene Kartiergebiet kein flächendeckendes DHM zur Verfügung stand, konnte das Kriterium der Höhe nicht zur Abgrenzung der beiden Formationen genutzt werden. Die Abgrenzung wurde daher anhand des NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) vorgenommen (GERSTL 1990, PRINCE 1990, KANEMASU et. al. 1990).

Nach MENZ (1993) steht der aus Satellitendaten berechnete NDVI in enger Beziehung zu unterschiedlichen Vegetationsparametern wie Chlorophyllabsorption, grüner oberirdischer Phytomasse, der Primärproduktion und der grünen Vegetationsbedeckung. Er errechnet sich aus LANDSAT-TM Daten nach:

$$NDVI = \frac{(Kanal4 - Kanal3)}{(Kanal4 + Kanal3)} \quad (5)$$

Aufgrund der bereits in Kap. 2.1.3.1 diskutierten Reflexions- und Absorptionseigenschaften der grünen Vegetation ergeben sich für den NDVI positive Werte bei hoher Chlorophyllabsorption im roten Spektralbereich und hohen Reflexionswerten im nahen Infrarot. Treten im Kanal 3 des LANDSAT-TM höhere Reflexionswerte auf als im Kanal 4, kann aufgrund der negativen NDVI-Werte auf eine fehlende oder kaum entwickelte Pflanzendecke geschlossen werden.

Der normierte Vegetationsindex wurde für den gesamten klassifizierten Szenenausschnitt aus den LANDSAT Kanälen 3 und 4 berechnet und mit der bereits zur Ausblendung der Bewässerungsflächen erstellten Maske der Tallagen verknüpft. Anhand eines empirisch aus den Felderhebungen ermittelten Schwellenwertes wurden die Bildelemente der Tallagen reklassifiziert und als *Cheno-*

podiaceen-Steppe ausgewiesen. In gleicher Weise wurde die Stufe der offenen hochalpinen Polster- und Rosettenpflanzen kartiert.

2.1.4.6 Geokorrektur der Daten und Anlage der Karte

Vegetationskartierungen aus Fernerkundungsdaten ermöglichen zwar eine Darstellung der flächenhaften Vegetationsanordnung im Gelände, jedoch können quantitative Aussagen zur Höhenstufung und Verteilung der kartierten Pflanzenformationen nur unter Einbeziehung topographischer Datensätze gemacht werden.

Insbesondere im stark reliefierten Hochgebirge treten erhebliche Abweichungen der Bildgeometrie von der Orthogonalprojektion topographischer Karten auf, die vor der Weiterverarbeitung der Vegetationskarten korrigiert werden müssen. In Gebieten mit geringer Reliefenergie reicht häufig eine Navigierung der Satellitenszene oder Karte zur geometrischen Korrektur aus (Rotation, Translation der Ergebnisse). Sie kann mittels einer Helmertransformation durchgeführt werden. (BÄHR und VÖGTLE 1991, ITTEN et al. 1992).

Im stärker reliefierten Gelände nimmt die Veränderung von Hanglängen bei der zentralperspektiven Abbildung der Erdoberfläche zu. Sie ist positiv mit dem Öffnungswinkel des Aufnahmesystems und den Höhenunterschieden im Gelände korreliert. Zur geometrischen Korrektur von Satellitendaten aus Gebieten mit geringer Reliefenergie bieten sich nicht parametrische affine Entzerrungsansätze an, die in zahlreichen kommerziellen Bildverarbeitungsprogrammen implementiert sind. Sie fanden auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung.

Affine Abbildungen erlauben die Einführung verschiedener Maßstäbe in X- und Y-Richtung, wodurch die Geometrie der Abtasteraufnahmen besser an die orthogonale Projektion topographischer Karten angepaßt werden kann. In stark reliefiertem Gelände kann ein affiner Ansatz die durch die großen Höhenunterschiede entstehenden Lageveränderungen einzelner Punkte gegenüber der Orthogonalprojektion topographischer Karten nicht mehr vollständig ausgleichen. Fehlerschätzungen nach dem Least Square-Verfahren zeigten mittlere Residuen an den Paßpunkten von 3,7 Pixeln bei der durchgeführten Entzerrung.

Im Anschluß an die geometrische Korrektur der Vegetationskarte wurden zwei Datensätze erzeugt. Zum einen wurde analog zu dem durch das DHM abgedeckten Ausschnitt ein Vegetationsdatensatz aus der Karte des Gesamtgebietes extrahiert, zum anderen die Vegetationskarte in DTP-Software (*Desk Top Publishing*) übernommen und weiterverarbeitet. Der Datensatz, dessen Ausdehnung mit dem DHM übereinstimmte, wurde zur Untersuchung verbreitungsökologischer Gesichtspunkte benötigt. Die Befunde sind in Kap. 3.2.1 und Kap. 3.2.2 dargestellt.

Der gesamte klassifizierte und geometrisch korrigierte Ausschnitt wurde mit Rahmenmarken, Kartentitel, Legende und Übersichtskarten versehen (Anlage IV). Die Legende enthält neben der Farbkodierung und Benennung der Vegetationsformationen Angaben zur Klassifizierungsgenauigkeit, die der Konfusionsmatrix (Tab. 6) entnommen wurden. Zur besseren Orientierung wurde die

Karte mit einem UTM-Gitter überlagert, das aus den von Prof. Dr. FINSTERWALDER zur Verfügung gestellten Stereoautographenplänen übernommen wurde.

Auf eine eingehendere Diskussion der Vegetationskarte wird an dieser Stelle verzichtet. Sie soll im Zusammenhang mit der Beschreibung der Vegetationsverbreitung im Untersuchungsraum erfolgen (Kap. 3.2.1).

2.2 Die Generierung eines hochaufgelösten DHM und die Ableitung potentieller Einstrahlungsmodelle

2.2.1 Die Auswahl und Verarbeitung der topographischen Grundlagen und die Erstellung eines Raster-DHM

Einen hinreichenden Überblick über die Topographie des NW-Karakorum und angrenzender Räume boten topographische Karten im Maßstab 1:250.000. Darüber hinaus existieren mehrere topographische Einzelaufnahmen, die für die Geländearbeit eine ausreichende Genauigkeit besitzen. Einen Überblick über die für den Untersuchungsraum verfügbaren Karten und Pläne gibt Tab. 7.

Von besonderer Bedeutung für das eigene Vorhaben waren die Arbeiten der deutsch-österreichischen Karakorumexpedition 1954 und der deutschen Karakorumexpedition 1959. Das von W. PILLEWIZER und K. HECKLER im Rahmen der ersten Expedition in den NW-Karakorum aufgenommene Gebiet umfaßt eine Fläche von etwa 3000 km². Es erstreckt sich in nord-südlicher Richtung vom Kamm der Rakaposhi-Range bis zum Batura-Gletscher, in west-östlicher Richtung von Naltar bis Gulmit (Abb. 25 in Anlage II und Abb. 22).

Da durch den Tod K. HECKLERs 1954 bei Sarat in der Hunza-Schlucht wichtige, zur Fertigstellung der Karte benötigte Informationen verloren waren, wurde 1959 eine zweite, ergänzende Geländeaufnahme unter der Leitung von H.-J. SCHNEIDER durchgeführt (BAUMERT 1960).

Die Ergebnisse der beiden Expeditionen wurden am Institut für Kartographie und Reprotechnik der TU München gesammelt und bis zur Fertigstellung der Stereoautographenpläne bearbeitet. Eine vollständige Veröffentlichung der Pläne erfolgte nicht. Neben den Höhenschichtenplänen im Maßstab 1:50 000 und 1:100 000 verfügt das Institut über etwa 640 Phototheodolitplatten, die hervorragende Möglichkeiten für thematische Kartierungen des Untersuchungsgebietes zum Zeitpunkt der photogrammetrischen Aufnahme bieten.

Die Integration der topographischen Grundlagen in ein GIS erforderte eine Digitalisierung der Karten und die Repräsentation der aufgenommenen Daten als DHM im Raster- oder Vektorformat. Da die geplanten vegetationsbezogenen Auswertungen auf der Grundlage von Rasterdaten aus Satellitenbildinterpretationen durchgeführt werden sollten, wurde für die topographischen Daten ebenfalls ein Rasterformat gewählt. Die Erstellung des DHM gliederte sich im wesentlichen in 5 Schritte:

- Auswahl der topographischen Grundlagen
- Auswahl der Software und Festlegung der Datenformate
- Vorbereitung und Digitalisierung der Karten
- Interpolation der Daten zu regelmäßigen Rastermodellen
- Überprüfung der Ergebnisse

Als topographische Basisdaten wurden die World Map 1:250.000 sowie Stereoautographenpläne der deutsch-österreichischen Karakorum-Expeditionen 1954 und 1959 ausgewählt.

Gebiet	Maßstab	Autor / Aufnahmejahr	Veröffentlicht
Nanga Parbat und Nachbargebiete	1:100.000	R. FINSTERWALDER 1934	1936
Nanga Parbat	1:50.000	R. FINSTERWALDER 1934	1936
Vegetationskarte des Nanga Parbat	1:50.000	C. TROLL 1937	1939
Minapin (Rakaposhi-Range)	1:50.000	H.-J. SCHNEIDER 1954 und 1959	1967
NW-Karakorum (Stereoautographenplan)	1:100.000	R. FINSTERWALDER 1954 und 1959	unveröff.
Blatt Toltar (Stereoautographenplan)	1:50.000	R. FINSTERWALDER 1954 und 1959	unveröff.
Blatt Pasu (Stereoautographenplan)	1:50.000	R. FINSTERWALDER 1954 und 1959	unveröff.
Blatt Mouchuhar (Stereoautographenplan)	1:50.000	R. FINSTERWALDER 1954 und 1959	unveröff.
Blatt Batura (Stereoautographenplan)	1:50.000	R. FINSTERWALDER 1954 und 1959	unveröff.
Blatt Minapin (Stereoautographenplan)	1:50.000	R. FINSTERWALDER 1954 und 1959	unveröff.

Tab. 7: Verfügbare topographische Karten aus dem Untersuchungsgebiet und benachbarten Regionen

Tab. 7: Available topographic maps for the research area and adjacent parts

Zur Erstellung eines Übersichts-DHM aus der World Map 1:250.000 wurden 4 Blätter gewählt, die das gesamte Untersuchungsgebiet abdecken. Auf der Basis der Zuverlässigkeitsangaben in der Legende der Karten wurden die zur Digitalisierung vorgesehenen Gebiete ausgegrenzt. Die Aufnahme der Höhenlinien erfolgte in UTM-Gitter-Einheiten von 10 x 10 km. Zusätzlich wurden Höhenpunkte digitalisiert, die die spätere Interpolation der Vektordaten zu Raster-Höhenmodellen stabilisieren sollten (SCHMIDT 1993). Die topographischen Karten 1:250.000 ließen insbesondere im Bereich des zentralen Hunza-Tales erhebliche Ungenauigkeiten bezüglich der Reliefwiedergabe erkennen.

Daher wurde für die DHM-Erstellung in diesem Teil des NW-Karakorum auf die Stereoautographenpläne der Expeditionen aus den Jahren 1954 und 1959 zurückgegriffen.

Die digitale Aufnahme der Stereoautographenpläne Hunza zielte auf die Erstellung eines Raster-DHM mit einer räumlichen Auflösung von 30 bis 40 m ab. Diese relativ hohe räumliche Auflösung wurde benötigt, da der topographische Datensatz nicht nur zur Geokorrektur der Satellitendaten, sondern insbesondere zur Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung und Besonnung benötigt wurde. Darüber hinaus sollte das DHM zur statistischen Auswertung der Vegetationsverbreitung genutzt werden.

Zur Fehlerreduktion bei der weiteren Auswertung war eine DHM-Auflösung in der Größenordnung der Vegetationsdaten sinnvoll, um einen Informationsverlust bei der Anpassung der Raster der Vegetationskarte an das DHM zu vermeiden. Legt man eine Kartiergenauigkeit von 0,2 mm zugrunde, ergeben sich bei einer Stereokartierung im Maßstab 1:50.000 Höhen- und Lagefehler von etwa 1 m. Die mit einem Höhenlinienabstand von 50 m angelegten Stereoautographenpläne des NW-Karakorum sind allerdings in einigen Bereichen, die im Gelände schwierig aufzunehmen waren, mit einem größeren Fehler behaftet. Dies betrifft zumeist die hochliegende Gletscherkare (PAFFEN et al. 1956).

Die zur Digitalisierung vorgesehenen Stereoautographenpläne wurden einer visuellen Qualitätskontrolle durch Vergleich mit räumlich hochauflösenden Satellitendaten (SPOT-PAN, SPOT-HRV, KFA-1000, LANDSAT-5-TM) unterzogen. Hierbei wurde besonders auf zuverlässige Wiedergabe des Reliefskeletts durch die Pläne geachtet, die von grundlegender Bedeutung für die Erfassung der topographischen Daten der Standorte einzelner Vegetationsformationen ist.

Abb. 17 zeigt für einen Ausschnitt aus dem bearbeiteten Gebiet (Minapin- und Pisan-Tal) einen Vergleich zwischen dem DHM und geometrisch korrigierten LANDSAT-5-TM-Daten. Alle dargestellten Ausschnitte sind N-orientiert. Aus dem DHM wurden Höhenlinien extrahiert, auf deren Beschriftung in Abb. 17 aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet wurde. Die Abbildung im unteren linken Bereich zeigt ein ebenfalls aus dem DHM erzeugtes Modell der Hangazimute. Die Graustufen, die die Hangrichtung anzeigen, wurden an die Beleuchtungssituation im Satellitenbildausschnitt (Abb. 17, unten rechts) angepaßt. Der Vergleich zwischen dem Expositionsmodell und dem geometrisch korrigierten Kanal 3 des LANDSAT-5 zeigt die gute Wiedergabe der Reliefstruktur durch das Modell.

Zur Aufnahme der Daten wurden die kleinsten und größten Geländehöhen aus den Blättern ermittelt und ein Aufnahmeschlüssel mit Höhenabständen von 100 m erstellt. Je nach Abstand der Isohypsen in den Kartenblättern war es notwendig, Zwischenhöhenlinien aufzunehmen, um die Messungen lokal zu verdichten und die Oberflächeninterpolation zu stabilisieren. Die Aufnahme von Höhenpunkten, die ebenfalls die genauere Wiedergabe des Reliefs durch die Interpolation unterstützen sollte, erfolgte auf einem separaten Code (Tab. 8). Zur Messung der einzelnen UTM-Gitter von 5 x 5 km Ausdehnung wurden Referenzblätter geführt, in welchen Angaben zur Lage, Name und Höhenbelegung der Digitalisierungs-codes gehalten wurden (Tab. 8).

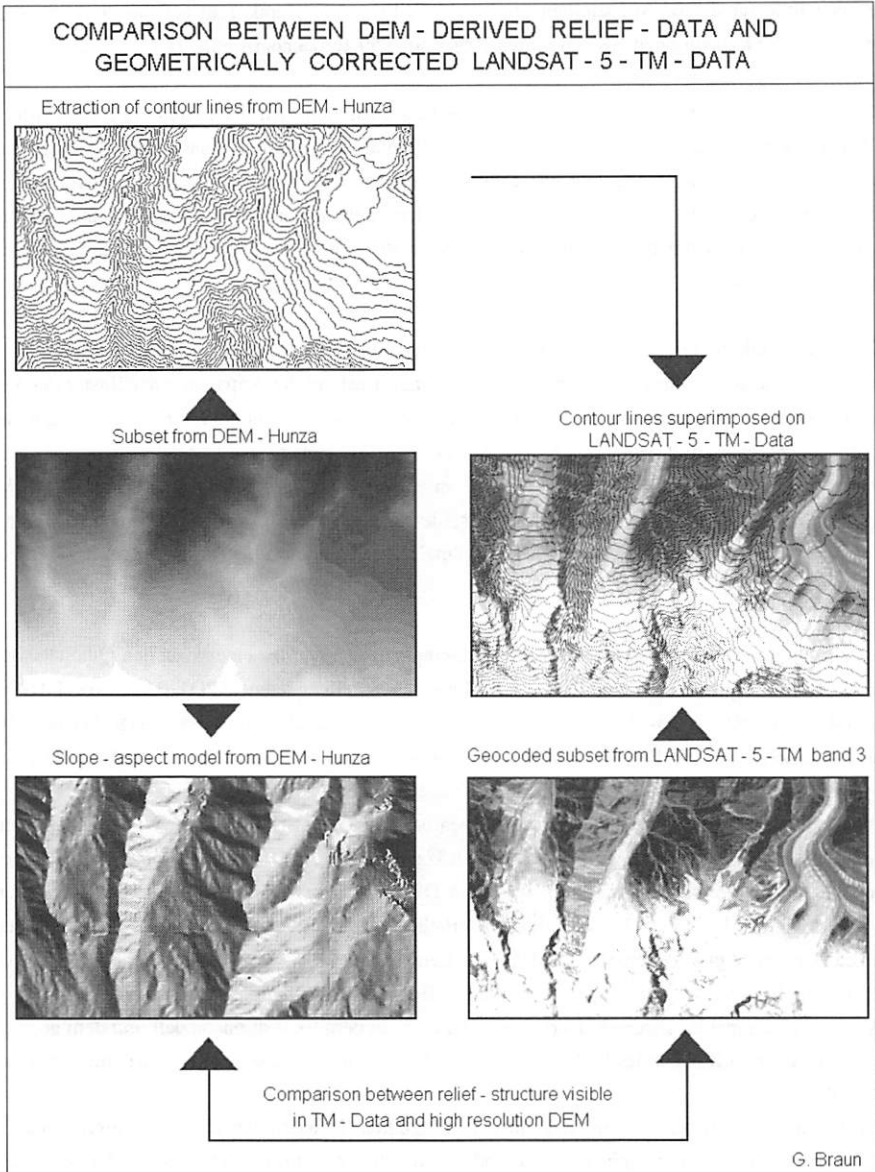


Abb. 17: Vergleich unterschiedlicher Repräsentationsformen der topographischen Daten mit geometrisch korrigierten Daten des Kanal 3, LANDSAT-5-TM. Der Vergleich zwischen dem berechneten Besonnungsbild und den LANDSAT-5-TM-Daten zeigt die gute Übereinstimmung zwischen der Reliefstruktur im Satellitenbild und dem DHM.

Fig. 17: Comparison between DEM-derived relief-data and geocoded L-5-TM-data, channel 3. The figure shows the DEM-derived hill shading (lower left) and the extracted contour lines. The orientation is N-S. The comparison between the isolation model and the geocoded L-5-TM band 3 shows the high coincidence between the real topographical structure and the model.

Höhenbelegung für die Digitalisierung der Hunza-Pläne 1 : 50.000, Aufnahmeabstände der Höhenkurven 100 m		
Aufnahmeblatt/Dateiname : (6505) (Dateiname Rechtswert/Hochwert der linken unteren Ecke des UTM-Gitters)		
Bearbeiter : (U. Schmidt) Aufnahmedatum : (11.04.91 / 12.04.91) Korrigiert : (J/N) Datum : (-)		
00 : 1700 m	01 : 1800 m	02 : 1900 m
03 : 2000 m	04 : 2100 m	05 : 2200 m
06 : 2300 m	07 : 2400 m	08 : 2500 m
09 : 2600 m	10 : 2700 m	11 : 2800 m
12 : 2900 m	13 : 3000 m	14 : 3100 m
15 : 3200 m	16 : 3300 m	17 : 3400 m
18 : 3500 m	19 : 3600 m	20 : 3700 m
21 : 3800 m	22 : 3900 m	23 : 4000 m
24 : 4100 m	25 : 4200 m	26 : 4300 m
27 : 4400 m	28 : 4500 m	29 : 4600 m
30 : 4700 m	31 : 4800 m	32 : 4900 m
33 : 5000 m	34 : 5100 m	35 : 5200 m
36 : 5300 m	37 : 5400 m	38 : 5500 m
39 : 5600 m	40 : 5700 m	41 : 5800 m
42 : 5900 m	43 : 6000 m	44 : 6100 m
45 : 6200 m	46 : 6300 m	47 : 6400 m
48 : 6500 m	49 : 6600 m	50 : 6700 m
51 : 6800 m	52 : 6900 m	53 : 7000 m
54 : 7100 m	55 : 7200 m	56 : 7300 m
57 : 7400 m	58 : 7500 m	59 : 7600 m
60 : 7700 m		
Belegung der Zwischenhöhenlinien: 61 : (4350 m) 62 : (5150 m) Sonderbelegungen: 63 : Höhenkoten 1) lo 5445 m (1376/8192) 2) lm 4655 m (1091/4569) 3) mm 5465 m (5005/4919) 4) mu 5425 m (5355/4114) 5) ru 5168 m (7089/1454)		

Tab. 8: Referenzblatt zur Koordinatenmessung aus den Stereoautographenplänen NW-Karakorum 1:50.000

Tab. 8: Reference-sheet used for digitizing topographic maps in scale 1:50.000 from the NW-Karakorum

Das zur Digitalisierung der topographischen Grundlagen verwandte Programm legt die Tischkoordinaten in komprimierter Form ab (SCHERER 1989). Da die zur Oberflächeninterpolation benutzte Software nicht auf das Format der Tischkoordinaten zugreifen konnte, wurden die Daten mit einer in PASCAL implementierten Schnittstelle in ein allgemeines ASCII-Format überführt. Die Datenkontrolle erfolgte durch Bildschirmausgabe der konvertierten Dateien. Die aufgenommenen Höhenlinien wurden mit den entsprechenden Kartenausschnitten verglichen.

Die aus den topographischen Karten erstellten, jeweils eine Fläche von 5 x 5 km überdeckenden Dateien sollten zu regelmäßigen Oberflächenrastern interpoliert werden. Die Interpolation erfolgte mit kommerzieller Software (SURFER). Es wurden 5 x 5 km große Oberflächenausschnitte mit einer räumlichen Auflösung von 40 x 40 m berechnet.

Bei der Verknüpfung der separat berechneten Geländeabschnitte zeigten sich Restklaffungen zwischen benachbarten Ausschnitten. Von der Korrektur dieser Höhenklaffungen wurde abgesehen, da es sich um geringe Beträge handelte, von denen die für die Untersuchung wichtigen stärker geneigten Geländeabschnitte nicht berührt wurden.

2.2.2 Berechnung von Expositions- und Hangneigungsmodellen

Zur Erzeugung von Expositions- und Hangneigungsmodellen aus einem DHM werden die Flächennormalvektoren der einzelnen Elemente des Höhenmodells berechnet. Dies erfolgt unter Einbeziehung der 8 oder 24 Nachbarn des betrachteten Bildelementes. Vorausgesetzt, die Y-Achse des Bildkoordinatensystems repräsentiert die geographische Nordrichtung, ergibt der in die Ebene projizierte Normalvektor des zu betrachtenden Bildelementes den Azimut der Fläche.

Da die Rasterelemente diskrete Höhenwerte in Metern repräsentieren und ihre horizontale Auflösung bekannt ist, kann nach dem gleichen Verfahren die Inklination der Flächenelemente berechnet werden. Abb. 17 (unten links) zeigt das Ergebnis einer Berechnung der Hangazimute. Da in stark reliefierten Gebieten die Hangrichtung großen Einfluß auf den Strahlungsempfang der Flächen hat, besteht eine ausgeprägte visuelle Ähnlichkeit zwischen digitalen Expositionsmodellen und der in Karten üblichen Reliefschattierung. In Abb. 17 repräsentieren dunkle Flächen die östliche, helle Flächen die westliche Richtung.

2.2.3 Die Ableitung eines Modells der potentiellen direkten Einstrahlung

2.2.3.1 Berechnung der potentiellen Sonnenscheindauer und der potentiellen direkten Einstrahlung

Die Messung solarer Strahlung an der Erdoberfläche wird in der Regel aus Gründen der Datenvergleichbarkeit auf eine horizontale Fläche bezogen. Hierbei werden direkte und diffuse kurzweilige Strahlung (kurzweiliger Anteil der Globalstrahlung) als durch die Bewölkung, die Höhe des Meßpunktes und den wahren Horizont des Ortes modifizierte Größen erfaßt. Bezogen auf eine horizon-

tale Fläche setzt sich die solare Beleuchtungsdichte des Meßpunktes aus direkter und diffuser Strahlung zusammen, wobei die direkte Strahlung als Funktion der Sonneninklination beschrieben werden kann:

$$S_{total} = S_{direkt} \cdot \sin\beta + S_{diffus}; \quad (5)$$

wobei: S_{total} = kurzweilige Einstrahlung
 S_{direkt} = direkte Einstrahlung
 S_{diffus} = diffuse Einstrahlung
 β = Sonneninklination

Abb. 18 zeigt die Geometrie der solaren Strahlung für die Anteile der diffusen und der direkten Strahlung. Die Größe der Anteile ist von der Sonnenhöhe, der Streuung und Absorption durch Gase und Aerosole sowie durch Streuung an Wasser und Eisparkeln in Wolken abhängig. Für Sonneninklinationen größer als 10° kann die von der Sonnenstrahlung transmittierte Luftmasse $m = 1/\sin \beta$ gesetzt werden. Bei Sonneninklinationen $<10^\circ$ wird die transmittierte Luftmasse geringfügig kleiner als $1/\sin \beta$ (MONTEITH 1978). Für Sonnenhöhen größer als 30° bleibt der Anteil der diffusen Strahlung an der Gesamtbeleuchtung nahezu konstant.

Eine weitere Modifikation erfährt die direkte Einstrahlung auf eine horizontale Fläche infolge der Horizontüberhöhung durch natürliche Hindernisse (vgl. Abb. 18, unten). Vor allem in Gebieten mit hoher Reliefenergie kann die Horizontüberhöhung erhebliche Auswirkungen auf die Bestrahlungsdauer haben. Auch können in Abhängigkeit von der Horizontmorphologie mehrere Sonnenauf- und -untergänge beobachtet werden.

Nach KONDRATYEV (1969, zit. bei FUNK 1983) setzt sich die kurzweilige diffuse Strahlung aus der Reflexstrahlung umgebender Hänge und aus der diffusen Himmelsstrahlung zusammen. Die räumliche Verteilung der diffusen Himmelsstrahlung über die sichtbare Hemisphäre ist abhängig von Sonnenhöhe, -azimut und der Bewölkung.

Die von den umliegenden Hängen reflektierte Strahlung wird durch den Reflexionskoeffizienten der Oberflächen und in sehr hohem Maße durch die Beleuchtung der Hangabschnitte beeinflusst. Da die diffuse Strahlung keine signifikante Auswirkung auf die im Untersuchungsgebiet beobachtete starke Expositions-differenzierung der Standortklimate und Vegetation hat und für Sonnenhöhen $>30^\circ$ als konstant angesehen werden kann, wurde sie bei der vorliegenden modellhaften Betrachtung vernachlässigt (MONTEITH 1978).

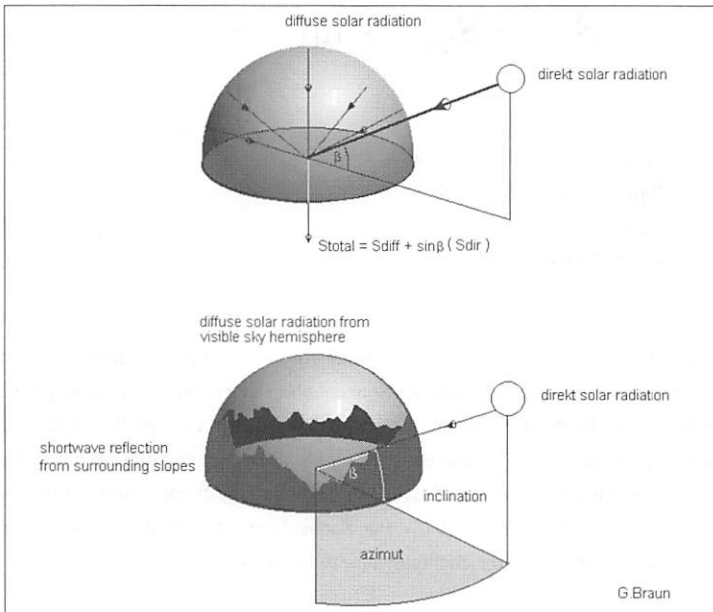


Abb. 18: Geometrie direkter und diffuser Strahlung nach MONTEITH (1978), verändert

Fig. 18: Geometry of direct and scattered radiation modified according to MONTEITH (1978)

Die hohe Reliefenergie des Untersuchungsgebietes führt zu einer starken räumlichen Differenzierung der mittleren direkten Einstrahlungsverhältnisse.

Betrachtet man ausschließlich die Einstrahlung auf eine horizontale, nicht abgeschattete Fläche, für die der wahre Horizont gleich dem maximal möglichen Horizont ist, kann die potentielle Einstrahlung in direkter Abhängigkeit von den astronomischen Parametern Sonnenazimut und Inklination als ein Integral über den betrachteten Zeitraum für die gegebene geographische Breite des Ortes aufgefaßt werden (vgl. Abb. 18, oben). In realen Landschaften, insbesondere jedoch in Hochgebirgsräumen, müssen bei der Betrachtung der potentiellen direkten Einstrahlung für gegebene Flächen zusätzliche Informationen über das Gelände bereitgestellt werden. Dies sind zum einen ortsbezogene Größen wie Höhe über NN und geographische Koordinaten des Meßpunktes, zum anderen

raumbezogene Informationen wie Richtung und Höhe des wahren Horizontes des betrachteten Flächenelementes.

Abb. 18, unten, gibt schematisch die Situation in einem realen Geländeausschnitt wieder. Der Sonnenaufgang an einer im Kreismittelpunkt liegenden Fläche ist demzufolge nicht nur von der Sonnenbahn, sondern auch von der Horizonthöhe bei gegebenem Sonnenazimut abhängig. Der Vergleich zwischen der Sonnenhöhe und der Höhe des wahren Horizontes bei gegebenem Azimut ist die Grundlage für die Berechnung der Sonnenscheindauer aus digitalen Höhenmodellen.

In der vorliegenden Arbeit erwies es sich als vorteilhaft, für das zu bearbeitende Höhenmodell die Parameter potentielle direkte Einstrahlung und Besonnungsdauer getrennt zu berechnen. Zum einen konnten die im Rahmen einer Diplomarbeit von SCHMIDT (1993) erstellten Besonnungsmodelle nur bei dieser Verfahrensweise anhand von Geländemessungen verifiziert werden, was bei einer gleichzeitigen Berechnung der Einstrahlung und der Besonnung nicht möglich gewesen wäre, zum anderen wurde für das Modell der potentiellen Sonnenscheindauer in Monatssummen, das auf einer SUN SPARC 2 des Instituts für Photogrammetrie der Universität Bonn gerechnet werden konnte, eine CPU-Zeit von ca. 1 Woche benötigt, was eine Kombination der Ansätze aus zeitökonomischen Gründen ausschloß.

Die Berechnung der Sonnenscheindauer erfolgte nach der Methode von KUNZ (1983), aufbauend auf HUEGLI (1980), im Rahmen der Diplomarbeit von U. SCHMIDT.

HUEGLI unterscheidet Kernschatten und Schlagschatten. Für Kernschattenbereiche gilt, daß der Winkel zwischen Flächennormale des Geländepunktes und des Sonnenvektors größer als 90° ist. Der Schlagschatten umfaßt zusätzlich die Strecke zwischen dem beobachteten Geländepunkt und einem möglichen Hindernis in Richtung des Sonnenvektors (zur Methode vgl. SCHMIDT 1993). Für das DHM NW-Karakorum wurde für jedes Rasterelement die Monatssumme der wahren Sonnenscheindauer als prozentuale Abweichung von der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer berechnet. Zur Verifikation der Modelle dienten Geländeaufnahmen mit einem Fisheye-Objektiv, die zum Vergleich der lokal gemessenen Besonnungsdaten mit den modellierten Werten eingesetzt wurden.

In Abb. 19 werden für einen Ausschnitt aus dem zentralen Hunza-Tal bei Minapin (zur Lage vgl. auch Abb. 25 in Anlage II) die Beleuchtungsverhältnisse in Abhängigkeit von der Jahreszeit dargestellt. Zu diesem Zweck wurden die für die einzelnen Rasterelemente berechneten Monatssummen der Besonnung als Graustufen kodiert, wobei helle Grautöne hohe Werte, dunkle Töne eine niedrige Besonnungsdauer repräsentieren. Ausschließlich bei jahreszeitlich bedingt niedrigen Sonnenständen (vgl. Abb. 19, Dezember) treten markante Unterschiede in der Beleuchtungsdauer nord- und südexponierter Hänge auf.

Die steile, nordexponierte Flanke westlich der Minapin-Gletscherzunge und der nordexponierte, zum Hunza-River hin abfallende Hang östlich Minapin weisen eine geringe Besonnungsdauer auf. Dies kann allgemein für die gesamte Rakaposhi-Nordflanke während der Monate November bis Februar festgestellt werden.

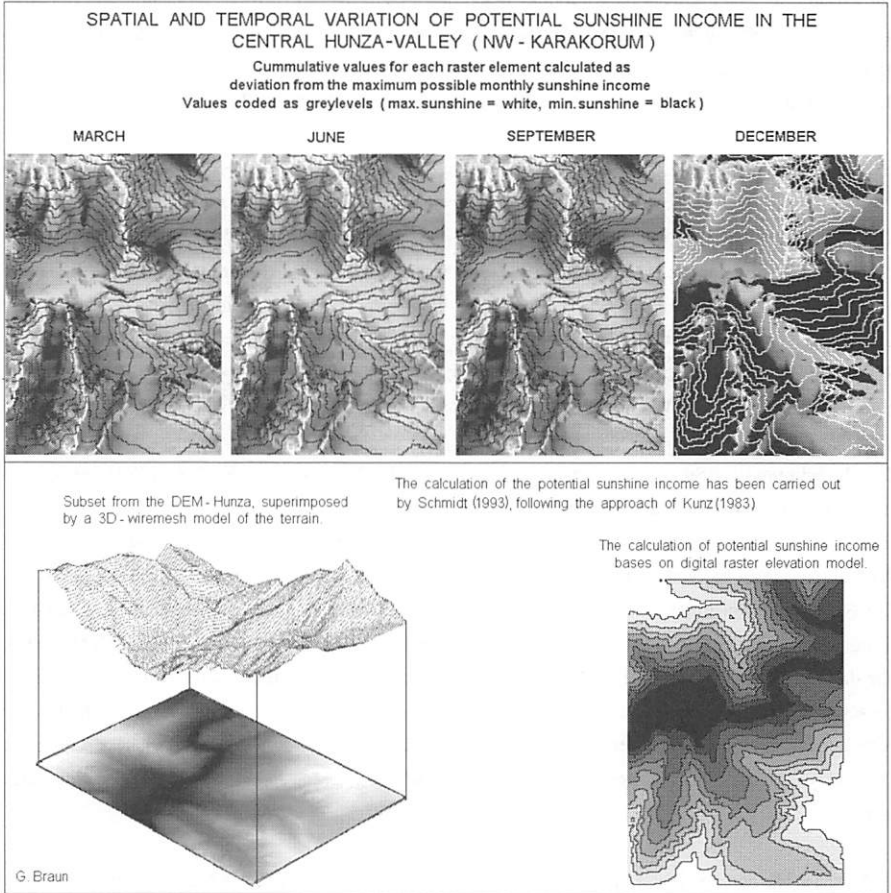


Abb. 19: Jahreszeitlich variable Besonnungsdauer für einen Ausschnitt aus dem zentralen Hunza-Tal. Bemerkenswert sind die in den Wintermonaten erheblichen Besonnungsdefizite tief eingeschnittener Täler und der nordexponierten Hänge.

Fig. 19: Seasonal differences in sunshine income for a section in the central Hunza-valley. The potential sunshine in winter in the narrow valleys and on north faced slopes is remarkably low.

Die Wintermonate und die Übergangsjahreszeiten zeigen in den Datensätzen aufgrund der niedrigen Sonnenstände große Bereiche mit starken Kern- und Schlagschatten, die zumeist nordexponierte Hanglagen sowie die Böden tief eingeschnittener Täler betreffen. Ein Defizit an direkter Sonneneinstrahlung weisen auch die tiefer eingeschnittenen, N-S-orientierten Täler gegenüber dem W-O-verlaufenden Haupttal auf.

Dieser Effekt, der auf einer Einengung und Überhöhung des Horizontes in West- und Ostrichtung beruht, könnte großen Einfluß auf die Vegetationsverteilung in Seiten- und Haupttälern haben. In den Modellen der potentiellen Besonnungsdauer läßt sich für die Wintermonate eine deutliche Asymmetrie der Beleuchtungsverhältnisse in Nord- und Südexpositionen sowie die Symmetrie von O- und W-Hängen erkennen (Abb. 19). Es ist jedoch anzumerken, daß die Übereinstimmung der Beleuchtungsdauer der West- und Osthänge im Modell durch die Vernachlässigung der Bewölkungsverhältnisse zustandekommt und daher der Realität nur bedingt Rechnung trägt.

Die Vegetationsverteilung weist im Gelände (vgl. Vegetationskarte in der Anlage IV) eine deutliche Ost-West Asymmetrie auf, die auf die nachmittägliche Konvektionsbewölkung und den damit verbundenen geringeren Strahlungsgenuß der westexponierten Hänge zurückzuführen ist (WEIERS 1994). Einen wichtigen Einfluß auf die Differenzierung der Sonnenscheindauer besitzt die Höhe und Form des wahren Horizontes der betrachteten Flächenelemente. Dieser Effekt überlagert die reduzierte Beleuchtungsdauer der Nordhänge in den Wintermonaten.

Zusammenfassend ist zu bemerken, daß hinsichtlich der Beleuchtungsdauer eine Differenzierung des Gebietes nach Talrichtung sowie Einschnidungstiefe (d.h. Kammhöhe und Horizontalabstand der Flanken) zu beobachten ist. Die extremen N-S-Expositionsunterschiede, die sich in der räumlichen Anordnung der Vegetationsformationen widerspiegeln, werden durch die Besonnungsdauer allein nicht hinreichend erklärt.

Setzt man die oben angestellten Überlegungen zur Geometrie der direkten Einstrahlung auf horizontale Flächen in Beziehung zu einem realen Gelände, sind einige Modifikationen hinsichtlich des Strahlungsempfanges der Flächen notwendig. Es ist selbstverständlich, daß bei beliebig geneigten und orientierten Flächen im Raum Abweichungen der Strahlungssumme gegenüber horizontalen Flächen auftreten. Die topographischen Parameter des Geländeausschnittes sind daher die Grundlage für die Berechnung der Strahlungssummen beliebig geneigter Ebenen auf der Basis digitaler Geländemodelle.

Für die Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung müssen folgende Daten bereitgestellt werden:

- Geographische Breite des Flächenelementes
- Sonnenazimut für den gegebenen Zeitpunkt
- Sonneninklination für den gegebenen Zeitpunkt
- Azimut des Flächenelementes
- Inklination des Flächenelementes
- Höhe ü. NN des Flächenelementes
- Besonnungsdauer des Flächenelementes

Eine absolute Orientierung im Raum erhält die betrachtete Fläche p durch die geographischen Koordinaten, die Höhe \ddot{u} . NN und die beiden Richtungswinkel Azimut und Inklination. Aus den Richtungswinkeln wird der Vektor normal zur Geländeoberfläche bestimmt:

$$\begin{aligned}x_{(p)} &= \sin \alpha \cdot \cos \beta \\y_{(p)} &= \cos \alpha \cdot \cos \beta \\z_{(p)} &= \sin \beta\end{aligned}\tag{6}$$

wobei: α = Azimut (p)
 β = Inklination(p)

Unter der vereinfachenden Annahme parallelen Strahlenganges wird analog hierzu der Richtungsvektor zur Sonne bestimmt (vgl. FUNK 1983). Es bietet sich aus Gründen der Rechenzeiterparnis an, die Normalvektoren zur Sonne nur einmal zu berechnen und in einer *lookup table* abzulegen. Die direkte Strahlung für einen Punkt p zu einem Zeitpunkt t ergibt sich durch:

$$I_{(x,y)} = I_{0(x,y)} \cdot (N \cdot S);\tag{7}$$

mit: I_0 = Strahlungsintensität senkrecht zur Sonnenrichtung
 N = Normalvektor der Oberfläche am Punkt p
 S = Normalvektor der Sonne zur Zeit t

Zur Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung wurden in Anlehnung an die Verfahren von FUNK (1983) und KUNZ (1983) die benötigten Routinen implementiert. Die Prozeduren zur Berechnung der Sonnenazimute und Inklinationen wurden aus der Diplomarbeit von U. SCHMIDT übernommen (SCHMIDT 1993). Die Berechnung der Sonnenazimute und -inklinationen erfolgte in Pentaden zu 24 Stunden. Die reduzierte Anzahl von Sonnenbahnen (72 anstelle von 365) gibt den Jahresgang der Sonnenhöhe ausreichend genau wieder. Aus den vorhandenen Winkeln wurden die Flächennormalvektoren für die verschiedenen Zeiten berechnet und ebenfalls vertafelt. Zur Berechnung der direkten Strahlung ist es darüber hinaus notwendig, die Masse der durchstrahlten Atmosphäre zu berücksichtigen. Hier gehen die Höhe der Fläche \ddot{u} . NN und die Inklination der Sonne ein. Mit abnehmender Sonneninklination vergrößert sich die optische Luftmasse der durchstrahlten Atmosphäre, mit zunehmender Geländehöhe nimmt sie ab.

Der mittlere Transmissionskoeffizient der Atmosphäre wird nach KONDRATYEV (1977) mit 0,75 angegeben. Die Korrektur der veränderten atmosphärischen Mächtigkeit bei unterschiedlichen Sonnenständen kann dann ausgedrückt werden mit :

$$I_0 = S_0 \cdot p^m ; \quad (8)$$

S_0 entspricht der Solarkonstanten von 1367 [W/m²], p dem Transmissionskoeffizienten der Atmosphäre und m der optischen Luftmasse. Die optische Luftmasse ergibt sich aus:

$$m_{(x,y)} = \frac{1 - z_{(x,y)}}{ht} \cdot \frac{1}{(LL \cdot SS)} ; \quad (9)$$

wobei: ht = atmosphärische Dicke (ca. 10 km)
 z = Höhe ü. NN
 LL = Weglänge durch die Atmosphäre in Zenitrichtung
 SS = Weglänge durch die Atmosphäre in Richtung zur Sonne

(nach FUNK 1983)

Die Werte für Höhe, Azimut und Inklination der Geländeelemente wurden aus Gründen der Rechenzeiterparnis aus Dateien gelesen. Aus den Richtungswinkeln wurden die Flächennormalen berechnet und ebenfalls im Kernspeicher abgelegt.

Unter der Annahme einer Modellatmosphäre mit einem Transmissionskoeffizienten von 0,75 und einer Mächtigkeit von 10 km konnte für jedes Element die wahre Mächtigkeit der aufgelagerten Luftsäule und die Weglänge durch die optische Luftmasse in Richtung zur Sonne bestimmt werden, die zur Korrektur der Einstrahlung benötigt wurden. Die Datenablage erfolgte aufgrund des eingeschränkten Massen- und Kernspeicherplatzes als Monatssummen der potentiellen direkten Einstrahlung bezogen auf [cm²].

Zur Verifikation der Modelle eignen sich Messungen der Einstrahlung auf unterschiedlich geneigten Hängen in verschiedenen Expositionen. INDERMÜHLE (1972) gibt im Rahmen mikroklimatologischer Untersuchungen im Tibesti-Gebirge Tagessummen der globalen Strahlung für verschiedene Hangazimute und Inklinationen an. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen von INDERMÜHLE wurden die eigenen Berechnungen ebenfalls in [cal/cm²*d] und nicht in [W/m²*d] durchgeführt.

Tabelle 9 zeigt die gemessenen Tagessummen der Globalstrahlung für Nord- und Südexpositionen bei Hangneigungen von 30° und 60° sowie für flache Lagen. Nur die Werte für den 21.12.68 beruhen auf einer Berechnung mit einem mittleren Transmissionskoeffizienten von 0,75, einer Höhe von 3000 m ü. NN und für eine geographische Breite von 21° N. In Tab. 10 sind die Ergebnisse einer Berechnung der direkten Einstrahlung für wolkenfreien Himmel mit dem Programm SHINING vorgestellt. Die weitestgehende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten ist bei den Werten für den Monat Juli festzustellen.

Exposition/ Neigung	04.05.68 3300 m	15.06.68 3415 m	09.07.68 1020 m	21.12.68 3000 m
Ebene	718	716	650	402
N/30°	583	691	599	128
N/60°	354	512	426	0
S/30°	612	541	529	568
S/60°	390	268	323	584

Tab. 9: Tagessummen der globalen Strahlung auf der Basis von Messungen im Tibesti-Gebirge bei wolkenfreiem Wetter für verschiedene Hangneigungen und Expositionen in [cal/cm²*d] (nach INDERMÜHLE 1972, S. 127, verändert)

Tab. 9: Daily sums of net radiation under clear-sky conditions for different slope-inclinations and -aspects, derived from measurements taken in the Tibesti mountains in [cal/cm²*d] (according to INDERMÜHLE 1972, p. 127, modified)

Hier liegt den berechneten Werten aus Tab. 10 und den gemessenen Werten die gleiche Höhe zugrunde. Die Unterschätzung der an steilen Hanglagen auftretenden Summen durch das Modell kann als Folge der Vernachlässigung diffuser Strahlung aufgefaßt werden. Die Überschätzung der ebenen Lagen und der schwächer geneigten Hänge ist im Zusammenhang mit dem mittleren Transmissionskoeffizienten von 0,75 zu sehen. DUBIEF (1959, zitiert bei INDERMÜHLE 1972) gibt für Tamnasset (21° 03' N) im Juli einen Transmissionskoeffizienten von 0,64 an.

Obwohl die berechneten und die gemessenen Werte im einzelnen voneinander abweichen, stimmt der jahreszeitliche Trend für die verschiedenen Expositionen und Hangneigungen weitgehend überein. Die Abweichungen zwischen den berechneten Werten in Tab. 10 und den gemessenen Größen in Tab. 9 beruhen auf der unterschiedlichen Höhe der Flächen, dem mittleren Transmissionskoeffizienten und natürlich auf der Vernachlässigung der diffusen Himmelsstrahlung im Modell.

Tab. 10 ist in Abb. 20 als Diagramm wiedergegeben und zeigt den Jahresgang der Tagessummen der direkten Sonnenstrahlung bei wolkenfreiem Wetter auf unterschiedlich geneigten und exponierten Flächen.

Exposition	Neigung	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
-	0°	381	462	558	629	666	677	671	647	591	502	410	357
N	30°	132	228	368	505	606	648	628	549	425	283	164	108
N	60°	0	0	81	246	383	445	416	304	146	0	0	0
S	30°	527	572	598	584	548	524	535	572	598	587	545	511
S	60°	533	528	477	382	283	232	256	343	444	514	534	528

Tab. 10: Berechnete Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung in 21° nördlicher Breite, Höhe 1020 m ü. NN, Transmissionskoeffizient 0,75, in [cal/cm²*d]

Tab. 10: Calculated daily sums of potential direct radiation in [cal/cm²*d] for 21° northern latitude and 1020 m elevation, coefficient of transmission 0,75

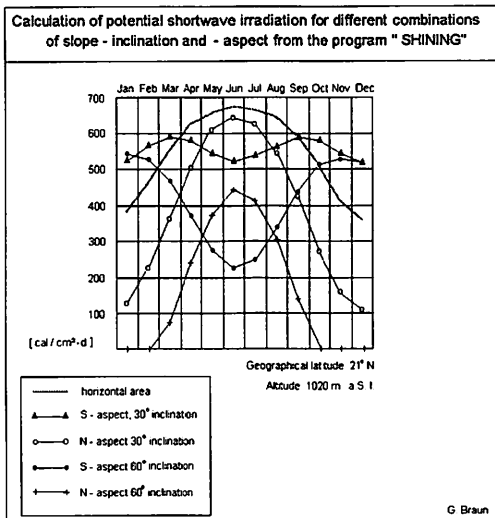


Abb. 20: Jahresgänge der Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung in [cal/cm²*d] bei wolkenfreiem Wetter auf unterschiedlich geneigten und exponierten Flächen. Transmissionskoeffizient 0,75, Höhe 1020 m ü. NN, geogr. Breite 21° N

Fig. 20: Seasonal variation of daily sums of the potential direct radiation in [cal/cm²*d] for 21° northern latitude and 1020 m elevation for different slope aspect and inclination. Atmospheric transmission coefficient 0.75

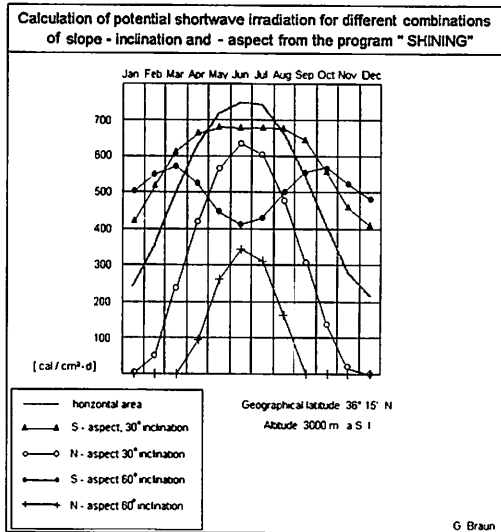


Abb. 21: Diagramm des Jahresganges der Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung in [cal/cm²*d] bei wolkenfreiem Wetter auf unterschiedlich geneigten und exponierten Flächen. Die Berechnung wurde mit einem Transmissionskoeffizienten von 0.75 für eine Höhe von 3000 m ü.NN durchgeführt. Die geographische Breite entspricht dem zentralen Hunza-Tal.

Fig. 21: Seasonal variation of potential direct radiation in [cal/cm²*d] for 36° 15' northern latitude and 3000 m elevation. Calculation has been carried out for various slope aspect and inclination and under consideration of an atmospheric transmission coefficient of 0.75. The geographical latitude corresponds to the central Hunza-valley.

Beim Vergleich der Diagramme fällt die weitgehende Übereinstimmung der Kurvenverläufe sowie die Übereinstimmung der Lage der Maxima und Minima auf. Die Absolutwerte sind in Abb. 20 gegenüber dem von INDERMÜHLE (1972) vorgestellten Diagramm durch den konstanten Transmissionskoeffizienten etwas verzerrt.

Die Abb. 21 zugrunde liegenden für den NW-Karakorum modellierten Daten lassen interessante Rückschlüsse auf die räumliche Differenzierung des Mikroklimas durch die Exposition zu.

Tab. 11 zeigt die mittleren Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung für unterschiedlich geneigte Flächen in 3000 m Höhe ü. NN im zentralen Hunza. Die höchsten mittleren Tagessummen werden bei den 30° Süd geneigten Standorten erreicht. Obwohl, wie in Abb. 21 zu erkennen, im Sommer die Einstrahlungsmaxima nicht die Werte flacher Lagen erreichen, gleicht die in den Übergangsjahreszeiten und im Winter zu beobachtende deutlich höhere Einstrahlung die Sommerdefizite

aus. Der gleiche Effekt ist bei den stärker geneigten Südhängen zu beobachten, die mit 508 [cal/cm²*d] etwa den mittleren Einstrahlungsverhältnissen flacher Lagen entsprechen.

Azimut	Inklination	mittlere Tagessumme der direkten Einstrahlung [cal/cm ² *d]
-	0°	505,7
N	30°	292,9
N	60°	99,0
S	30°	585,7
S	60°	508,2

Tab. 11: Mittlere tägliche potentielle direkte Einstrahlung in 3000 m ü. NN und 36° 15' nördl. Breite

Tab. 11: Mean daily potential direct radiation in 3000 m elevation and 36° 15' northern latitude

Während im Sommer bei den 60° geneigten Südhängen ein deutliches Minimum auftritt, zeichnen sich v.a. die Übergangsjahreszeiten und Wintermonate durch Tagessummen zwischen 490 und 580 [cal/cm²*d] aus. Eine deutliche Abnahme der Einstrahlung ist bei den N-exponierten Hängen mit mittleren Tagessummen von 292,9 und 99 [cal/cm²*d] (jeweils als Jahresmittelwert) zu bemerken. Obwohl die Einstrahlung auf den 30° geneigten Hängen durchaus Größenordnungen von 640 [cal/cm²*d] erreichen kann, nimmt die direkte Einstrahlung im Frühjahr und Herbst stark ab. In den Monaten Januar und Dezember erhalten die Flächen keine direkte Sonnenstrahlung.

2.2.3.2 Korrektur der potentiellen direkten Einstrahlung mit der horizontabhängigen potentiellen Besonnungsdauer

Da in dem zur Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung vorgestellten Ansatz die Abschätzung durch den wahren Horizont der betrachteten Flächenelemente vernachlässigt wurde, mußten die Werte unter Einbeziehung der von U. SCHMIDT berechneten Besonnungsdauer korrigiert werden.

Hierzu wurden die Modelle der direkten Einstrahlung, die ausschließlich die Bereiche der Kernschatten berücksichtigten, mit den Werten der zwischen 0 und 1 skalierten Besonnungsmodelle verknüpft, die im Rahmen der Arbeit von U. SCHMIDT erstellt wurden. Der Vorgehensweise liegt der Gedanke zugrunde, daß die berechneten Monatssummen der potentiellen Einstrahlung durch eine in allen Fällen vorhandene Horizontüberhöhung reduziert werden müssen. Da die Modelle der potentiellen monatlichen Sonnenscheindauer die Beleuchtungsdauer in Abhängigkeit von der Horizontüberhöhung am Ort wiedergeben, können sie für eine Korrektur der potentiellen Einstrahlungsmodelle genutzt werden.

Einschränkend ist anzumerken, daß der wahre Horizont im Gelände in den meisten Fällen einen verspäteten Sonnenaufgang und einen verfrühten Sonnenuntergang herbeiführt. Bei kleinen Son-

neninklinationen ist jedoch aufgrund der großen optischen Luftmasse die direkte Einstrahlung zu meist schwach. Die tatsächliche Reduktion der potentiellen direkten Einstrahlung ist in diesem Falle geringer als die mit dem angewandten Verfahren erzielte. In jedem Fall wäre jedoch für die Berechnung der direkten Einstrahlung die vollständige Integration der beiden oben vorgestellten Ansätze wünschenswert.

3 Ergebnisse

In Kap. 2 wurden überwiegend die methodischen Aspekte der Auswertung von Fernerkundungsdaten, der Erstellung digitaler Höhenmodelle und der Modellierung der potentiellen direkten Einstrahlung behandelt. Diese methodischen Vorarbeiten waren notwendig, um auf der Basis der erstellten Daten eine landschaftsökologische Analyse im Untersuchungsgebiet durchführen zu können, deren Ergebnisse im folgenden dargestellt werden.

Ausgehend von den erstellten Datensätzen zur Vegetationsverteilung, zur Topographie, Topoklimatologie und Klimatologie (CRAMER 1994, WEIERS 1995) wird der Versuch unternommen, die punktuell im Untersuchungsgebiet gesammelten vegetationsökologischen Daten zur Analyse des dreidimensionalen Verbreitungsmusters der Vegetation in einem geographischen Informationssystem zu nutzen. Die Verbindung zwischen den Feldarbeiten und den digitalen Datensätzen wird hierbei nicht durch eine rechnergestützte Extrapolation der Felddaten in die Fläche hergestellt, sondern durch die Übertragung der im Feld erarbeiteten Regelmäßigkeit der dreidimensionalen Vegetationsanordnung in ein integratives Modell, das in Kapitel 3.3 vorgestellt wird.

Die Einbindung von Modellen zur Vegetationsverbreitung in Hochgebirgen (TROLL 1939, 1959, LAUER 1979, 1986, WINIGER 1979, 1981) in ein geographisches Informationssystem eröffnet zahlreiche, weiterführende Möglichkeiten zur Interpretation und zur Präzisierung geoökologischer Zusammenhänge.

Im folgenden wird auf der Grundlage der erarbeiteten Befunde eine verbreitungsökologische Analyse der Vegetation im NW-Karakorum vorgestellt. Desweiteren werden Möglichkeiten aufgezeigt, auf der Basis der erarbeiteten Daten und Modelle eine Rekonstruktion der potentiellen Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder durchzuführen.

3.1 Regionale Einordnung des Untersuchungsraumes

3.1.1 Differenzierung der Landschaft und Geologie des Untersuchungsgebietes

Der Karakorum schließt sich zwischen 35° und 36° nördlicher Breite und 72° bis ca. 79° östlicher Länge nordwestlich an das Gebirgssystem des Himalaya an, dessen westliche Grenze durch den Gebirgsstock des Nanga Parbat (8126 m) gebildet wird. Die weiter westlich bis zum Indus-Durchbruch anschließende Kette (vgl. Abb. 22) erreicht nur noch Höhen bis 5000 m.

In nordwest-südöstlich streichende, gegeneinander versetzte Ketten gliedert, wird der Karakorum im Süden vom Himalaya und im Norden vom Kunlun begrenzt. Seine Nordwestgrenze wird durch

den Pamir gebildet, im Westen stößt das Gebirge an den Hindukusch-Bogen. Nach TAHIRKHELI und JAN (1984) liegt die Westgrenze des Karakorum zwischen Yasin und Mastuj (Abb. 22), die südöstliche Grenze des Gebirges aufgrund geologischer Befunde in dem Raum zwischen 78° und 79° östlicher Länge im Anschluß an das Deosai-Plateau.

Sie differenzieren die Karakorum-Hauptkette in nordwestlich-südöstlicher Richtung in Batura Mustagh, Hispar Mustagh, Baltoro Mustagh, Siachen Mustagh und Saser Mustagh. Südlich der Hauptkette finden sich Rakaposhi, Haramosh-Gruppe, Masherbrum und Baltoro-Gruppe, die unter dem Oberbegriff Lesser-Karakorum zusammengefaßt werden.

Das etwa 650 km lange Kettengebirge erfährt eine markante morphologische Gliederung durch die großen Flußläufe des Indus, Gilgit und Hunza, die auf weiten Strecken dem Streichen der Kämmen folgen. Ausgedehnte, wüstenhafte Täler prägen neben stark vergletscherten Hochlagen das Landschaftsbild des Raumes. Ein dominierendes Landschaftselement sind die ausgedehnten Gletscher, die nach WISSMANN (1959) 37 % der Fläche überdecken. Der Karakorum ist damit das größte vereiste Gebiet außerhalb der Polarzonen. Die Gletschersysteme erstrecken sich ausgehend von den Hauptketten und den hohen Kämmen des Lesser-Karakorum in tief eingeschnittenen Tälern. Ihre Zungen reichen häufig bis in die Haupttäler hinab. Eine eingehende Diskussion der pleistozänen und heutigen Vergletscherung des Gebietes findet sich bei HASERODT (1989).

Das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit erstreckt sich zwischen 36° 30' und 35° 40' N sowie 74° 10' und 75° 00' O. Es wird im Norden von der hier durch den Batura Mustagh repräsentierten Hauptkette des Karakorum gequert. Etwa im Zentrum des Gebietes befindet sich der Hauptgipfel der Rakaposhi Range mit 7788 m Höhe (vgl. Abb. 22).

Die großen Flüsse haben sich tief in den jungen Gebirgsraum eingeschnitten und stellenweise schluchtartige Täler geschaffen, deren heißes und trockenes Klima im Talgrund häufig hervorgehoben wird (TROLL 1939, PAFFEN et al. 1956, CRAMER 1994, WEIERS 1995, SCHWEINFURTH 1956, 1957). Zusätzlich entwickelt sich durch die außerordentlich hohe Reliefenergie an den Talflanken eine deutliche hygrothermische Höhenstufung, die sich in der vertikalen Abfolge verschiedener Pflanzenformationen dokumentiert.

Klimatisch ist der Karakorum als Übergangsraum zwischen dem warm/humiden, vom Monsun geprägten Himalayavorland und den zentralasiatischen kontinentalen Steppenräumen einzuordnen (WEIERS 1995). Die nach Norden abnehmenden Niederschläge führen zu einem auffälligen Wandel in der floristischen Zusammensetzung und der räumlichen Verteilung der Vegetationsformationen. Nicht nur die zunehmende Auflösung einzelner Vegetationsformationen mit Annäherung an ihre Trockengrenze, sondern auch die durch das extreme Relief geschaffenen Expositionsunterschiede bewirken eine mosaikartige Verteilung der Pflanzengesellschaften in ihren Höhenstufen.

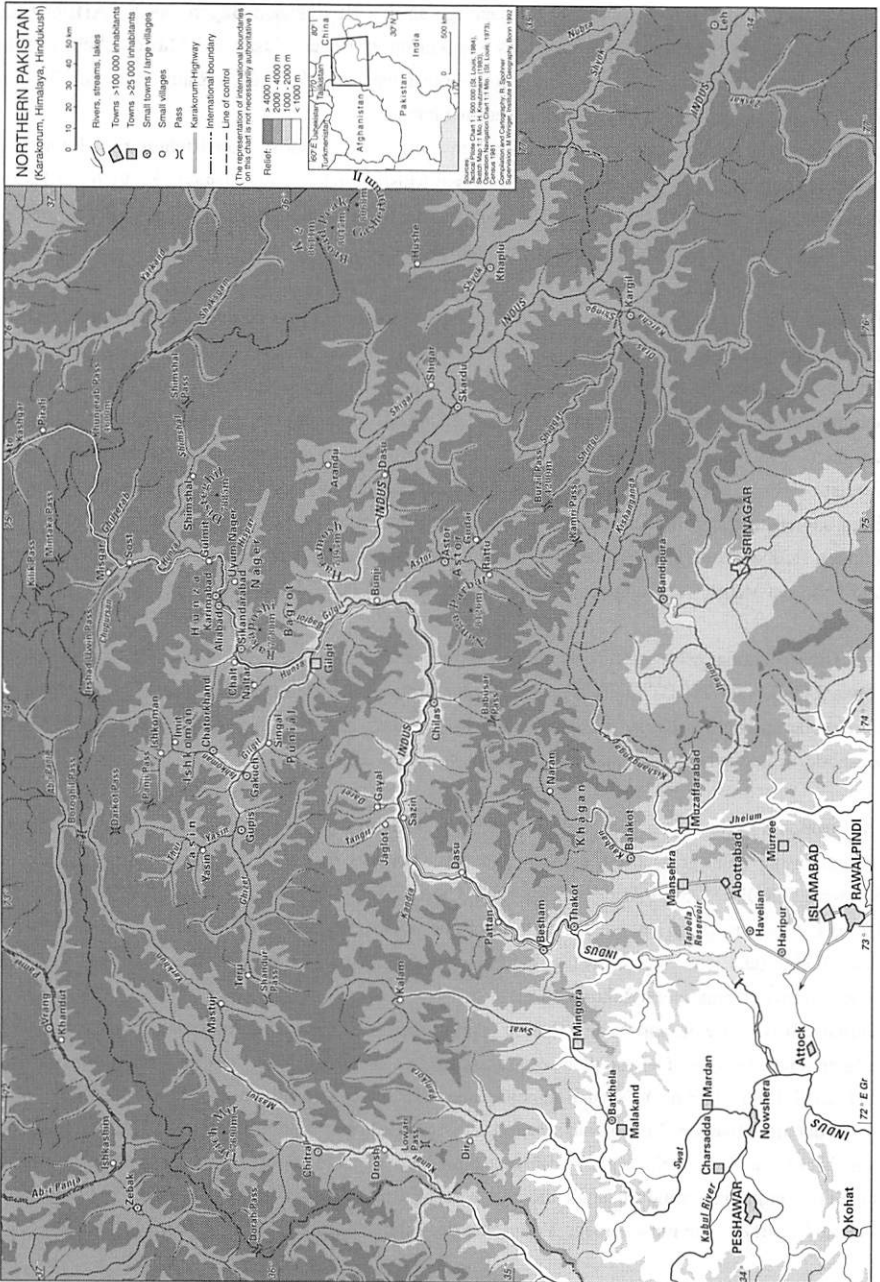


Abb. 22: Karte des Untersuchungsraumes und der angrenzenden Gebiete (kartographische Bearbeitung R. SPOHNER)

Fig. 22: Map of the research area and adjacent regions (cartographic design R. SPOHNER)

Neben zahlreichen älteren Arbeiten zur Geologie des Karakorum (DAINELLI 1939, HAYDEN 1916, PAFFEN et al. 1956, GANSSER 1964), liegen neuere Arbeiten von TAHIRKHELI u. JAN (1984) und GOUDIE et al. (1984) vor. Eine umfassende Übersicht über die geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet stellte SEARL (1991) zusammen.

Nach SCHNEIDER (in PAFFEN et al. 1956) stellt der Karakorum die geologische Verbindung zwischen Pamir, Hindukusch und K'un Lun im Nordwesten und dem Himalaya im Südosten dar.

Im wesentlichen unterscheidet SCHNEIDER von NNO nach SSW entsprechend dem Streichen des Hauptzuges folgende Zonen im NW-Karakorum:

- Tethys-Karakorum
- Kristalline Hauptmasse
- Hochmetamorphe Schieferhülle
- Schwach metamorpher Sedimentkomplex
- Kristallin des Salto-Karakorum

Die Grenze der jungpaläozoisch-mesozoischen Serien des Tethys-Karakorum gegen das Kristallin des Hauptkammes beschreibt SCHNEIDER aus der Tallinie des Batura-Gletschers. In der Zone des Tethys-Karakorum dominieren Quarzite, Kalkschiefer und Tonschiefer, die Gipfel werden von Kalken gebildet.

Wichtige Formationen sind nach TAHIRKHELI und JAN (1984) die Misgar-Schiefer (Schiefer und phyllitische Schiefer mit karbonatischen und quarzitischen Bändern sowie vereinzelt plutonischen Intrusionen), die Kilik-Formation mit 2000 m mächtigen, oberdevonischen bis unterkarbonischen Crinoidenkalken und Dolomiten, die 4000 m mächtige Gircha-Formation aus dem unteren Perm mit sandigen Sedimenten und die jungpaläozoischen Pasu-Schiefer mit max. 1500 m Mächtigkeit aus Schiefen und phyllitischen Schiefen sowie dunklen Kalksteinen.

Südlich an den Tethys-Karakorum schließt sich das Kristallin des Hauptmassivs an. Nach GOUDIE et al. (1984) handelt es sich bei den Granodioriten der axialen Karakorum-Hauptkette um tektonisch deformierte und rekristallisierte Biotit-Granodiorite, Biotitgranite und Hornblendegranite. Der Karakorum Batholith bildet die zentrale Zone und erstreckt sich auf einer Breite von ca. 10 km in einem etwa 350 km langen Bogen. SCHNEIDER (in PAFFEN et al. 1956) vermutet die Intrusion des Granodiorites in ein älteres, regionalmetamorphes Schieferdach.

Südlich des kristallinen Kerns schließt sich eine metamorphe Schieferhülle an, mit nach Norden zunehmendem Metamorphosegrad der Gesteine. Neben intensiv gefalteten chloritischen und Granat-Stauroolith-Schiefen treten in dieser metamorphen Serie Marmorvorkommen auf.

Oberhalb Sarat fallen Bändergneise auf. Südlich der Hindi-Störung (Northern Megashere Suture bei TAHIRKHELI und JAN 1984) sind Grünschiefer mit Granodiorit-Intrusionen verbreitet. Die Northern Suture bildet die Grenze zur Kohistan-Folge. Südlich der Chalt-Gruppe und der tektonischen Bruchlinie lagern stark deformierte Abfolgen von Metagrauwacken, Schiefen, Epidotiten, sowie Tuffe, Amphibolite und Basalte. Die Mächtigkeit beträgt mehrere Kilometer. Südlich schließt sich

ein plutonischer Gürtel mit einer komplizierten Abfolge von Tonaliten, Dioriten, Apliten, Pegmatiten und basischen Gängen an, der den mittleren bis unteren Krustenbereich des Orogenbogens markiert.

Der Karakorum gilt als die Region mit der höchsten Reliefenergie der Erde (GOUDIE et al.1984, PAFFEN et. al. 1956). Im Hunza-Tal wird eine Vertikalerstreckung des Reliefs von 5938 m von der Talsohle bis zum Gipfel des Rakaposhi auf einer Horizontalabstreckung von nur 11 km durchgemessen. Die Gliederung der Täler lehnt sich eng an die geologischen Strukturen an. Talverengungen korrespondieren mit morphologisch widerstandsfähigen Formationen wie den Ghujal-Dolomiten und den Karakorum-Granodioriten, weite Talböden mit weicheren Schichten wie Pasu- und Misgar -Schiefer (GOUDIE et al.1984).

3.1.2 Klima

Der klimatische Wandel vom äußeren westlichen Himalaya bis nördlich der Karakorum-Hauptkette wird von zwei markanten Gradienten dominiert, die die Vegetationsverbreitung im Untersuchungsgebiet beeinflussen.

Während aus den Niederschlagsdaten der Talstationen (Abb. 24) eine deutliche Abnahme der Niederschläge in nordöstlicher Richtung zu erkennen ist (WEIERS 1995, REIMERS 1992 und FLOHN 1958, 1969), stößt eine Beschreibung der ausgeprägten Vertikalgradienten der Temperatur und der Niederschläge aufgrund des lückenhaften Höhenstationsnetzes auf erhebliche Probleme.

Monat	$Y = a - b * H$ (Höhe in m ü. NN)	r^2 (%)
Januar	$Y = 14,303 - 0,00682 * H$	90,38
Februar	$Y = 16,502 - 0,00691 * H$	92,99
März	$Y = 22,266 - 0,00747 * H$	91,36
April	$Y = 28,736 - 0,00793 * H$	91,26
Mai	$Y = 32,911 - 0,00790 * H$	95,14
Juni	$Y = 39,670 - 0,00871 * H$	93,06
Juli	$Y = 42,240 - 0,00874 * H$	89,14
August	$Y = 40,829 - 0,00835 * H$	88,91
September	$Y = 36,766 - 0,00838 * H$	90,03
Oktober	$Y = 29,175 - 0,00762 * H$	93,27
November	$Y = 21,786 - 0,00685 * H$	91,14
Dezember	$Y = 15,368 - 0,00621 * H$	89,98
Jahr	$Y = 28,364 - 0,00765 * H$	95,25

Y = Monatsmitteltemperatur

Tab. 12: Lineare Regressionsgleichung zur Bestimmung des vertikalen Temperaturgradienten aus 16 Meßreihen (reduziert auf Periode 1965-1989). Aus WEIERS (1995)

Tab. 12: Linear regression equation for determining vertical temperature gradients, based on 16 records (reduced to reference period 1965-1989). From WEIERS (1995)

HEWITT (1989) schätzt die Höhenstufe maximaler Niederschläge zwischen 5000 und 7000 m und gibt für diesen Bereich Jahressummen zwischen 1000 und 1800 mm an. Aus Daten von 16 Stationen errechnete WEIERS (1995) vertikale Temperatur- und Niederschlagsgradienten sowie horizontale Niederschlagsgradienten für den Karakorum, die durch die intensiven geländeklimatologischen Arbeiten von JACOBSEN im Yasin und CRAMER (1994) im Bagrot verifiziert werden konnten (zur Lage der Täler Yasin und Bagrot vgl. Abb. 22).

Die von WEIERS (1995) errechneten mittleren Vertikalgradienten der Temperatur und des Niederschlages sind in Abb. 26 (Anlage III) dargestellt. Tab. 12 zeigt die thermischen Vertikalgradienten nach Monaten differenziert. Einen Eindruck des horizontalen Niederschlagsgradienten vermittelt Abb. 24, in der die Niederschläge nach Sommer und Winter differenziert dargestellt sind.

Nach WEIERS (1995) und FLOHN (1969) nehmen analog zu den Jahressummen auch die Sommerniederschläge mit zunehmender nördlicher Breite und östlicher Länge ab (Abb. 24). WEIERS schließt hieraus auf eine Abnahme des monsonalen Einflusses. Selbst die aufgrund ihres sommerlichen Sekundärmaximums als randmonsonal einzustufenden Stationen Naran und Butta Kundi im Kaghan-Tal (vgl. auch SCHICKHOFF 1993) erreichen kaum noch einen 10prozentigen Anteil an den Sommerniederschlägen (FLOHN 1969).

Ein direkter, monsonaler Einfluß ist auch im thermischen Jahresgang an den Stationen des Gebirgsinneren nicht nachzuweisen, da die typische Dämpfung der Juli- und August-Temperaturen fehlt. WEIERS stellte bei der statistischen Analyse der Stationsdaten keine Abhängigkeit der Temperatur von der geographischen Breite im Untersuchungsgebiet fest. Die Jahresgänge sind an den einzelnen Stationen nahezu parallel.

In nordöstlicher Richtung tritt eine deutliche Abnahme der Niederschläge auf, wobei alle Talstationen nördlich der Himalaya-Hauptkette Niederschlagssummen unter 250 mm aufweisen. Jedoch ist aufgrund der markanten Höhenstufung der Vegetation und der extrem vergletscherten Hochlagen, die den wüstenhaften Talböden gegenüberstehen, eine deutliche Zunahme der Niederschläge und eine Abnahme der Temperaturen mit zunehmender Höhe zu erwarten.

Auf der Basis von Messungen im Bagrot-Tal 1991 (zur Lage vgl. Abb. 25 in Anlage II) gibt CRAMER (1994) Werte für die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse in unterschiedlichen Höhenstufen an.

Das Jahresmittel der Temperatur an der Station Oshikhan-Das in 1490 m Höhe beträgt 16,7 °C, die Jahressumme des Niederschlags 110 mm. An der Station Sat in 2560 m Höhe betrug die Jahresmitteltemperatur 7,1 °C, die Niederschlagssumme bereits 291 mm. Die Stationen Dadormal und Dubani liegen in 3569 und 3780 m Höhe. CRAMER gibt Jahresmitteltemperaturen von 0,6 und 0,2 °C an. Die Niederschlagssummen erreichen hier 287 und 491 mm. An der höchstgelegenen Station im Bagrot-Tal (Diran, 4150 m) wurde eine Jahresmitteltemperatur von -2,9 °C und eine Niederschlagssumme von 720 mm gemessen (CRAMER 1994).

Für das Hunza-Tal liegen Daten aus Naltar, aus Karimabad, und vom oberen Hunza aus Misgar vor (WHITEMAN 1985 zit. in KREUTZMANN 1989).

Die Jahresmitteltemperatur in Naltar (2880 m) liegt bei 6,4 °C. Der Jahresniederschlag beträgt 410 mm. Die Station liegt in der Höhenstufe des feucht-temperierten Nadelwaldes. In dem Klimadiagramm der Station in Abbildung 23 ist ein Niederschlagsminimum in den Monaten Juni und Juli zu erkennen (23 mm und 13,5 mm), welches im Zusammenhang mit den hohen Temperaturen die Vegetationsperiode der feucht-temperierten Nadelwälder an ihrer Untergrenze einschränkt.

Die Daten der Station Karimabad repräsentieren die klimatischen Verhältnisse des Talbodens im zentralen Hunza-Tal in 2300 m Höhe (vgl. Abb. 23 und zur Lage Abb. 25 in Anlage II). Die Niederschlagssumme beträgt 145 mm/a, die Jahresmitteltemperatur liegt bei 11,4 °C. Aus dem oberen Hunza liegen Daten einer Station aus dem Misgar-Tal vor (Abb. 23). Die auf 3102 m Höhe gelegene Station weist im Vergleich zu der südlicheren Station Naltar eine deutlich reduzierte Niederschlagshöhe von 128,7 mm/a auf. Auch im Vergleich der Höhenstationen manifestiert sich die Niederschlagsabnahme mit zunehmender nördlicher Breite.

Neben den Niederschlägen und der Temperatur werden weitere klimatische Faktoren wie Verdunstung, Windgeschwindigkeit und die Einstrahlung von der Höhe modifiziert (BRECKLE 1971). Aus Chalt im Hunza-Tal geben PAFFEN et al. (1956) einige Werte für die relative Feuchte an klaren Tagen in den Monaten Juni und Juli an.

Von 5 Uhr auf 8 Uhr nahm die relative Feuchte von 20 % auf 19 % ab. Um 11 Uhr betrug sie nur noch 13 %, um 14 und um 17 Uhr 12 %. Um 20 Uhr wurden 15 % relative Feuchte gemessen. PAFFEN et al. (1956) nehmen an, daß die niedrige Luftfeuchtigkeit die Ursache für die Niederschlagsarmut der Talböden gegenüber den Höhenlagen ist. Die Ereignisse, die in den Hochlagen noch ergiebige Niederschläge verursachen, werden an den Talstationen häufig nur als Niederschlagsspuren (traces) verzeichnet, da die größten Mengen der Niederschläge bereits vor dem Erreichen der Talböden verdunsten.

Für Hochlagen in 5000 m berichten PAFFEN et al. (1956) an Strahlungstagen von Luftfeuchtwerten um 25 bis 30 %. Für die Station Misgar (36° 47' N, 74° 46' O, 3102 m ü. NN) gibt FLOHN (1969) mittlere Werte der relativen Feuchte für einen 5 Uhr- und einen 17 Uhr-Termin an. Die relative Feuchte nimmt sowohl an dem 5 Uhr- als auch zu dem 17 Uhr-Beobachtungszeitpunkt in den Sommermonaten erheblich ab. Während in den Monaten Dezember und Januar für den 5 Uhr-Termin Werte zwischen 76 und 78 % angegeben werden, ist die relative Feuchte an dem 17 Uhr-Termin mit 61 % im Dezember und 56 % im Januar erheblich geringer. In den Sommermonaten sind die Werte deutlich kleiner. Zum 5 Uhr-Termin gibt FLOHN (1969) für die Monate Juni bis September 52, 46, 47 und 50 % relative Feuchte an, an dem 17 Uhr-Termin konnten im gleichen Zeitraum 23, 27, 27 und 23 % gemessen werden.

Angaben zur Jahressumme der potentiellen Evapotranspiration aus dem Bagrot-Tal macht CRAMER (1994). Auf der Grundlage von Stationsmessungen errechnete er für die in 1520 m Höhe gelegene Station Dainyor eine potentielle Evapotranspiration von 1090 mm/a. An einem nordexponierten Hang in 3220 m Höhe betrug die potentielle Evapotranspiration nur noch 443 mm/a gegenüber einer Niederschlagssumme von 485,9 mm. Für einen südexponierten Hang in 4150 m Höhe gibt CRAMER eine potentielle Evapotranspiration von 302 mm/a und eine Niederschlagssumme von 653,9 mm an.

Die Werte belegen eine deutliche Verbesserung der Wasserbilanz mit zunehmender Höhe, die bereits aus dem Vergleich der Temperatur- und Niederschlagsgradienten abgeleitet werden konnte.

Wie oben beschrieben, resultiert vornehmlich aus dem markanten, hygrothermischen Höhenwandel eine deutliche, vertikale Differenzierung des Landschaftscharakters. Entsprechen die wüstenhaften Talböden des Indus- und Hunza-Tales gut den durch die Talstationen wiedergegebenen klimatischen Verhältnissen, stellen sich mit zunehmender Höhe zwischen 2600 m und 4000 m Gehölze, in den südlicheren Räumen ausgedehnte Wälder ein. Die Hochlagen oberhalb 5000 m sind stark vergletschert. Die intensive Einstrahlung führt auf den Gletschern zu einer starken, sommerlichen Strahlungsablation. Es sind Penitentesformen, Firn Seracs und Ablationsschluchten am Gletscherand zu beobachten. In unmittelbarer Nähe der schuttbedeckten Oberfläche des Minapin-Gletschers stellte PAFFEN eine außerordentlich hohe relative Luftfeuchte fest, die bereits 1 m über dem Gletscher erheblich reduziert war.

Mit den genetischen Aspekten des Klimas im NW-Karakorum befassen sich WEIERS (1995) und FLOHN (1958, 1969). Nach WEIERS (1995) unterliegt im Hochgebirge Nordpakistans das Wetter ganzjährig dem Einfluß westlicher Störungen, deren Genese an die großräumige Anordnung der Höhenträge in Form von ROSSBY-Wellen im Jetstream gebunden ist. Die Barriere der zentralasiatischen Hochländer bewirkt im Winter eine Divergenz des Strahlstroms in zwei Äste, die das tibetische Hochland nördlich und südlich umströmen und im Osten Chinas konvergieren. An der Vorderseite der Tröge in der Frontalzone zwischen sibirischer Kaltluft und relativ warmer Subtropik-Luft bilden sich Störungen aus.

Die mit der Höhenströmung aus dem Mittelmeerraum über den mittleren Osten herangeführten Störungen sieht WEIERS als Hauptniederschlagsquelle für den oberen Indus-Raum an. Die Niederschläge werden im Staubereich der Bergmassive durch orographische Hebung ausgelöst.

Nach FLOHN (1959) sind die sommerlichen Regen im Gebirgsinneren häufig konvektiv. Sie stehen jedoch im Zusammenhang mit den synoptischen Störungen.

Eigene Beobachtungen im Raum Gilgit und Hunza im Sommer 1990 und 1991 zeigten, daß Schlechtwetterperioden häufig von durch Westwinde abgewehten Schneefahnen an Gipfeln über 7000 m angekündigt wurden. Gleichzeitig konnte in den Tälern ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit verzeichnet werden, der auf von S heranziehende Luftmassen aus dem Tiefland schließen läßt. Heftige Niederschläge in Gilgit und Skardu korrespondierten bei einer zeitlichen Verzögerung von 1 bis 1,5 Tagen mit extremen Monsunstarkregen in den Räumen Rawalpindi, Abbottabad und Peshawar, die der lokalen Presse entnommen werden konnten (WEIERS 1995).

Analogien in der klimatischen Differenzierung des gesamten Himalaya und der Randgebiete stellt WISSMANN (1960, 1961) überblicksartig dar. Im folgenden Kapitel wird zunächst anhand eines idealisierten Profils der großräumige, in erster Linie niederschlagsabhängige Wandel der Vegetation beschrieben. Kapitel 3.2 stellt im Anschluß den Zusammenhang zwischen der reliefabhängigen, klimatischen Differenzierung des Raumes und der daraus resultierenden Vegetationsverbreitung im NW-Karakorum dar.

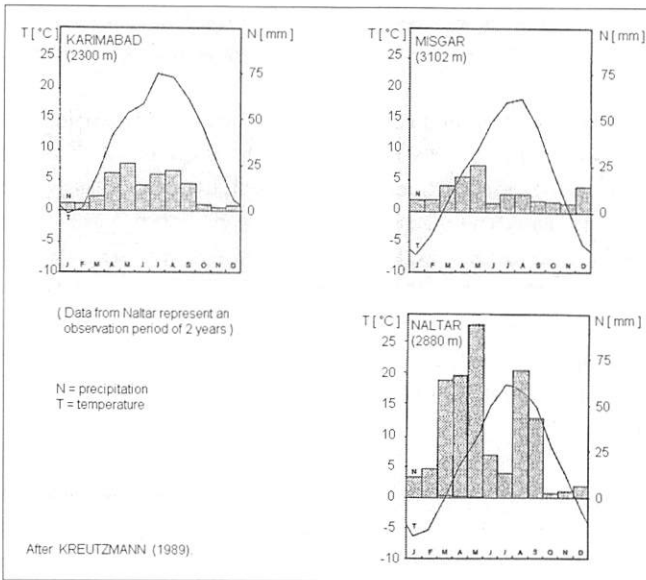


Abb. 23: Klimadiagramme der Stationen Naltar, Karimabad und Misgar im unteren, mittleren und zentralen Hunza-Tal (nach KREUTZMANN 1989)

Fig. 23: Climatic diagrams from Naltar, Karimabad and Misgar in the lower, central and upper Hunza-valley (cit. from KREUTZMANN 1989)

3.1.3 Die Verbreitung der Vegetationsformationen

Um einen Überblick über die Verbreitung der Vegetation entlang eines S-N-orientierten Transekts zu geben, wurden neben eigenen Beobachtungen die Arbeiten von TROLL (1939), PAFFEN et al. (1956), HARTMANN (1966, 1968, 1972) und MIEHE et al. (1993) herangezogen, denen floristisch-pflanzensoziologische, vegetationsgeographische und ökologische Ansätze zugrundeliegen. Die Nomenklatur lehnt sich im wesentlichen an die älteren Arbeiten an, da die neuere Nomenklatur der Vegetationsformationen von MIEHE et al. (1993) von vorläufigem Charakter ist (freundl. mündl. Mitt.).

Bedingt durch die Lage im Hauptkamm des Himalaya ist der nördliche Teil des Nanga Parbat bereits deutlich trockener und floristisch ärmer als die stärker monsunbeeinflusste Südabdachung der Himalaya-Hauptkette, wie aus den Niederschlagssummen der Stationen Butta Kundi (1010 mm/a) und Babusar (395 mm/a) zu entnehmen ist (WEIERS 1995 und Abb. 24). Während für die Südab-

abdachung der Himalayahauptkette zahlreiche Eichenarten, die Himalayazeder (*Cedrus deodara*) und *Rhododendren* bestandsbildend sind, tritt *Cedrus deodara* bereits am Nanga Parbat zurück. Als einzige Eichenart kann nördlich des Indus noch *Quercus baloot* (*Quercus ilex*) beobachtet werden. Von den zahlreichen, für die feuchte Südabdachung des Himalaya typischen *Rhododendren* tritt nach TROLL (1939) in den Hochregionen des Nanga Parbat nur noch *Rhododendron hypeanthum* auf.

Das weiter nördlich gelegene Hunza-Tal zeigt gegenüber dem Nanga Parbat eine aufgrund der zunehmenden Trockenheit noch stärker reduzierte Artenzahl der Flora. So liegen beispielsweise die nördlichsten Vorkommen der Eichen nach eigenen Beobachtungen bereits unmittelbar westlich der Astor-Mündung, und die am Nanga Parbat häufig anzutreffenden feucht-temperierten Nadelwälder erreichen an der Nordabdachung der Rakaposhi-Range ihre nördliche Verbreitungsgrenze (Abb. 24).

Wird durch das allmähliche Ausfallen der hygrophileren Pflanzenformationen in süd-nördlicher Richtung eine Abnahme der Niederschläge mit zunehmender nördlicher Breite angezeigt (Abb. 24), so gilt dies auch für einen Vergleich der Situation am Nanga Parbat und im weiter östlich gelegenen Braldo-Tal nördlich von Skardu. Feucht-temperierter Nadelwald und Steppenwald fehlen im Braldo-Tal. Nach HARTMANN (1966) ist mit dem Auftreten buschartiger Wacholderbestände *Juniperus polycarpus* nur lokal in abgelegenen Hochtälern zu rechnen.

Die im gesamten Untersuchungsgebiet verbreitete *Chenopodiaceen*-Steppe ist an die Täler der größeren Flüsse gebunden. Sie reicht den Indus aufwärts bis Leh, zieht sich den Gilgit-River hinauf und folgt dem gesamten Hunza-Tal bis nördlich des Batura-Gletschers (Abb. 24). Ihre obere Verbreitungsgrenze steigt von Süd nach Nord zum Gebirgsinneren erheblich an. Die Vertikalerstreckung der *Chenopodiaceen*-Steppe nimmt jedoch durch die zum Gebirgsinneren hin ebenfalls ansteigenden Talböden ab, so daß die Formation schließlich ausfällt und die *Artemisia*-Steppe die Talböden und die unteren Hänge besetzt.

TROLL (1939) unterscheidet innerhalb der klimatisch bedingten *Chenopodiaceen*-Steppe des Nanga Parbat-Gebietes verschiedene edaphisch-hygrische Varianten, eine Felsenhalbwüstengesellschaft, Gesellschaften der steilen Schuttkegel, baumfreie Strauchsteppen der Schwemmkegelterrassen und Grundwassergehölze.

Die Felsenhalbwüstengesellschaft ist gekennzeichnet durch weitständige, krüppelwüchsige Bäume wie *Pistacia spec.*, *Olea cuspidata* und die *Rhamnacee sageretia*. Die Gesellschaften der steilen Schuttkegel sind charakterisiert durch offene Gesträuche aus *Artemisia maritima*, *Salsola spec.*, *Rumex hastatus*, *Echinops tibetica* und *Haplophyllum griffithianum*. Die baumfreien Strauchsteppen der Schwemmkegel sind je nach ihrer Lage im Gebiet (nördlich oder südlich) von *Artemisia maritima* oder *Salsola spec.* dominiert. Gegen die Strauchsteppe der höheren Lagen sind sie in erster Linie durch ihren geringeren Deckungsgrad von 20-35 % abzugrenzen.

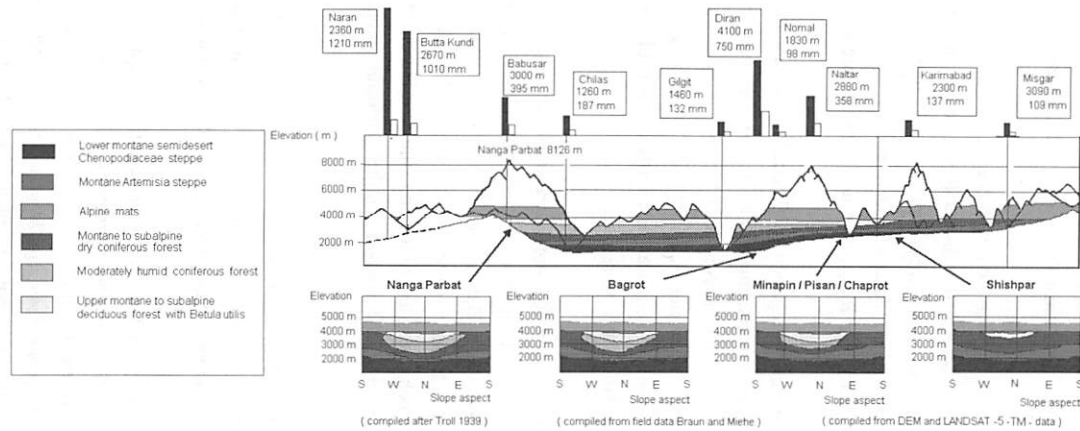


Abb. 24: Schematisches S-N-Profil der wichtigsten Vegetationsformationen vom Himalaya-Hauptkamm bis in den NW-Karakorum. Zusätzlich sind die Niederschläge (nach WEIERS 1995 u. CRAMER 1995) sowie die Höhenstufung der Vegetationsformationen in Abhängigkeit von der Exposition dargestellt.

Fig. 24: Schematic S-N-oriented profile of the main vegetation formations from the Himalaya to the NW-Karakorum. Precipitation decrease along the profile has been calculated by WEIERS (1995) and CRAMER (1995). The lower part of the figure shows the spatial variation of the vegetation formations depending on altitude and slope aspect.

Aus dem nördlich des Nanga Parbat gelegenen Hunza-Tal und kleineren Nebentälern ist die Verbreitung und Ausprägung der *Chenopodiaceen*-Steppe durch PAFFEN bekannt geworden. Ihre Obergrenze steigt vom Nanga Parbat in 2000 m Höhe bis Khaibar am Ausgang des Hunza-Tales auf 2700 m an. Charakteristische Pflanzen der *Chenopodiaceen*-Steppe im Hunza sind zahlreiche ru-tenästige, halbsukkulente Sträucher, Gräser und Kräuter überwiegend zentralasiatischer Abstammung, wie *Artemisia spec.*, *Salsola spec.*, *Ephedra spec.*, *Capparis spinosa*, *Echiops spec.* und Gräser der Gattungen *Stipa*, *Pennisetum* und *Andropogon* (PAFFEN et al. 1956).

Oberhalb der *Chenopodiaceen*-Steppe schließt sich eine Pflanzenformation an, die in der Literatur allgemein als Strauchsteppe (*Artemisia maritima*) bzw. *Artemisia*-Steppe bezeichnet wird.

Die Untergrenze der *Artemisia*-Steppe liegt im Nanga Parbat-Gebiet bei etwa 2000 m. Ihre Obergrenze variiert erheblich mit der Exposition. In Nordlagen wird die Formation bereits in 2600-3000 m Höhe vom feucht-temperierten Nadelwald abgelöst. In Südlagen fällt der feucht-temperierte Nadelwald aus, und die *Artemisia*-Steppe reicht bis maximal 4200 m hinauf.

Auffällig innerhalb der Formation ist das Auftreten von Gehölzen, die zum Teil auch zu lichten Wäldern zusammengeschlossen sind. Mit zunehmender Höhe und Feuchte mischen sich in die *Artemisia*-Steppe *Juniperus macropoda* und *Pinus spec.* (im Bagrot- und im Hunza-Tal *Pinus wallichiana*), die mit Annäherung an den feucht-temperierten Nadelwald lichte Steppenwälder bilden.

Eine eindeutige Trennung der *Artemisia*-Steppe von den Steppenwäldern mit *Juniperus macropoda* und *Pinus spec.* ist schwierig, da alle Übergangsformen von der baumfreien Steppe über eine Waldsteppe bis hin zum Steppenwald verbreitet sind.

Im Hunza-Karakorum ist ebenfalls eine lichte Waldsteppe entwickelt, deren Flora jedoch gegenüber dem Nanga Parbat-Gebiet artenärmer ist. *Juniperus macropoda* ist im Hunza-Tal über weite Strecken die einzige in die *Artemisia*-Steppe eingestreute Baumart. Ihre Verbreitungsgrenzen zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Exposition. In Nordexposition beginnen sich die Wacholderbestände ab 2400 m zu verdichten, in Südexposition werden sie erst ab 3000 m häufiger.

Die trockenere Variante der *Artemisia*-Steppe der tieferen Lagen im Nanga Parbat-Gebiet weist einen Deckungsgrad von etwa 50-70 % auf, durch den sie deutlich von der darunterliegenden Stufe der *Chenopodiaceen*-Steppe zu trennen ist. Humusanreicherung ist aufgrund der sommerlichen Trockenheit und der großen Hangneigungen nicht erkennbar. Leitarten der trockenere *Artemisia*-Steppe sind *Artemisia maritima*, *Kochia spec.*, und *Eurotia ceratoides* (TROLL 1939). Zusätzlich treten eine größere Anzahl laubwerfender Büsche wie *Daphne oleoides*, *Rosa webbiana*, *Ribes orientale*, *Fraxinus xanthoxyloides*, *Prunus spec.*, *Ribes grossularia*, *Lonicera persica* und *Berberis spec.* auf.

Eine deutliche Veränderung der Vegetationsdecke bewirken Bachläufe und Quellhorizonte, die das Wasserangebot für die Vegetation verändern.

Auf felsigen oder steinigen Steilhängen tritt *Artemisia maritima* zurück. Häufiger trifft man auf *Ephedra intermedia* und eine große Zahl anspruchsvoller Hochstauden und Stauden, die diese Standorte wegen der besseren Wasserbedingungen bevorzugen (KOJIMA 1990).

Oberhalb 2600 m entwickelt sich mit Annäherung an den feucht-temperierten Nadelwald eine feuchtere Form der *Artemisia*-Steppe, deren Arten auch in den Steppenwäldern zu finden sind. *Thymus serpyllum*, *Leontopodium leontopodium*, *Mertensia primuloides*, *Nepeta spec.*, *Androsace rotundifolia*, *A. aizoon*, *Ranunculus meinshauseni*, *Pedicularis pycnantha*, *Saxifraga sibirica*, *Acantholimon lycopodioides* können nach TROLL (1939) als Zeiger für den mit der Feuchtigkeit zunehmenden Humusgehalt der Böden dienen.

Mit dem Wechsel der Exposition von Nord auf Süd zieht sich die Grenze zwischen feuchter und trockener *Artemisia*-Steppe in größere Höhen zurück. Der feucht-temperierte Nadelwald der Nordexpositionen fällt in West- bis Südwestlagen aus. Die Untergrenze der feuchten *Artemisia*-Steppe ist in Südlagen charakterisiert durch das Auftreten von *Ephedra gerardiana*, die die Bestände erheblich verdichtet (Deckungsgrad 80-90 %). Eine Obergrenze dieser feuchteren Variante der *Artemisia*-Steppe ist nur unbefriedigend zu ziehen, da sich mit zunehmender Höhe immer mehr alpine Elemente in die Bestände einmischen. HARTMANN (1968, 1972) berichtet für den zentralen Karakorum ebenfalls von einer deutlichen Zweiteilung der *Artemisia*-Steppe. In Südexposition erstrecken sich die *Artemisia*-Steppen im Braldo- und Biafo-Tal bis etwa 4200 m. Die *Kochia-Ephedra intermedia*-Steppe, die der trockenen Variante TROLLs am Nanga Parbat entspricht, besetzt die Hänge bis etwa 3600 m. Darüber bildet sich nach HARTMANN (1972) bis 4200 m eine *Oxytropis mollis-Koeleria gracilis*-Steppe aus, die einen deutlich höheren Deckungsgrad und einen höheren Chlorophyllgehalt aufweist als die trockenere Steppe der tieferen Lagen. Oberhalb 4200 m schließen sich alpine Rasen an, die bei 4700 m beginnende Auflösung in Pionierrasen zeigen.

In Nordexposition liegt die Grenze zwischen trockener und feuchter Variante der *Artemisia*-Steppe deutlich tiefer als an den sonnigen Südhängen. Arten der *Oxytropis mollis-Koeleria gracilis*-Steppe treten hier bereits in 3200 m auf. In der Regel ist zwischen die obere *Artemisia*-Steppe der Nordlagen und die alpinen Rasen ein Strauchgürtel mit wechselnder Breite eingeschoben. Mit zunehmender Höhe tritt *Salix karelinii* in den Vordergrund, die ab 3700 m dominiert. Ihre Obergrenze erreichen die *Salix*-Gebüsche bei 4200-4300 m. Darüber können artenreiche Wiesengesellschaften beobachtet werden, die sich in Höhen von 4600 m auflösen und in Pionierrasen übergehen.

Versucht man, eine Unterscheidung nach Physiognomie oder Deckungsgrad der Pflanzengesellschaften vorzunehmen, so tritt in Nordexposition die "feuchte" obere Stufe mit einem Deckungsgrad von 60-70 % bereits in 3500 bis 3600 m Höhe auf. In Südexposition ist eine deutliche Grünfärbung erst in 4000 m Höhe festzustellen. Einige wichtige Arten der *Kochia-Ephedra intermedia*-Steppe sind nach HARTMANN (1968) *Kochia prostrata*, *Ephedra intermedia*, *Astragalus gracilipes*, *Plantago baltistanica*, *Artemisia maritima*, *Krascheninikowia ceratoides* und *Stipa szowitziana*.

Auch im Hunza-Tal ist die Zerteilung der Artemisiensteppen zu beobachten, die bereits vom Nanga Parbat bekannt ist. PAFFEN et al. (1959) bemerken mit zunehmender Höhe eine gesteigerte Humusanreicherung im Boden, einen höheren Deckungsgrad und einen größeren Artenreichtum der Formation.

Am Nanga Parbat, im Braldu- und Biafo-Tal sowie im Hunza führen unterschiedliche Expositionen zu einer bemerkenswerten räumlichen Differenzierung der Höhenstufung der Vegetation (TROLL 1939, HARTMANN 1966, BRAUN und WINIGER 1992). Die Auswertung der Literatur, die qualitative Untersuchung von terrestrisch-photogrammetrischen Meßbildern aus dem Nanga Parbat und satellitengestützte Vegetationskartierungen aus dem Hunza-Tal (vgl. Anlage IV) belegen, daß ausgehend von den Leitlinien größerer Täler und Gebirgszüge die Höhenstufung der Vegetationsformationen durch eine ständig verfeinerte Differenzierung und Kammerung der Topographie des Raumes in ein stark expositionsabhängiges Mosaik zerlegt wird. Die im Makrorelief bemerkbare, hygrothermisch bedingte vertikale Stufung der Vegetation wird im Meso- und Mikrorelief durch expositionsbedingte Strahlungsunterschiede gänzlich überprägt (vgl. auch BÖHM 1968).

Am deutlichsten wird die von Süden nach Norden und nach Osten zum Gebirgsinneren hin zunehmende Trockenheit bei der Betrachtung der feucht-temperierten Nadelwälder und den sich oberhalb anschließenden Birkenwäldern und Weidengebüschen im Vegetationsprofil (Abb. 24).

Während diese hygrophileren Pflanzenformationen noch rings um den Gebirgsstock des Nanga Parbat verbreitet sind, fallen die feucht-temperierten Nadelwälder bereits an der Nordflanke der Rakaposhi Range aus.

Obwohl die feucht-temperierten Nadelwälder als eine eigenständige Vegetationshöhenstufe aufzufassen sind, bilden sie nördlich der Himalaya-Hauptkette keinen geschlossenen Nadelwaldgürtel. Bereits am Nanga Parbat wird ihre Verbreitung durch die Topographie des Raumes erheblich beeinflusst (vgl. Expositionsprofil Nanga Parbat in Abb. 24). Das Mesorelief, dessen hauptsächliche expositionelle Differenzierung durch die Ausrichtung der Haupt- und Seitentäler bestimmt ist, verschiebt nicht nur - wie bei der feuchten Variante der *Artemisia*-Steppe zu beobachten - die Höhenstufung der Pflanzenformationen, sondern läßt auf kleinem Raum variierend den feucht-temperierten Nadelwald in südexponierten Lagen ausfallen (vgl. auch PURI 1960).

Die Baumschicht der feucht-temperierten Nadelwälder am Nanga Parbat setzt sich nach TROLL (1939) aus *Abies webbiana*, *Pinus excelsa*, *Picea morinda* und *Juniperus semiglobosa* zusammen.

Die Begleitflora bilden in erster Linie ausdauernde Kräuter, sowie die Gräser *Bromus inermis*, *Festuca rubra* und *Poa spec.*

Die Kräuter der feucht-temperierten Nadelwälder und des Birkengürtels gehen vielfach ineinander über. Allerdings besitzt der Birkenwald eine größere Zahl eigener Arten, die nach TROLL (1939) die größere Feuchtigkeit der Birkenstufe signalisieren.

Wie in den Stufen der *Artemisia*-Steppe und der *Chenopodiaceen*-Steppe finden sich auch im feucht-temperierten Nadelwald an edaphisch oder topographisch modifizierten Standorten andere Pflanzengesellschaften. In steilen, nordexponierten, stark beschatteten und felsigen Lagen treten

Bestände von *Bergenia ligulata* auf. Ähnliche Standorte besetzt eine *Bergenia spec.* auch im Pisan-Tal an der Nordabdachung der Rakaposhi Range.

Auf Blockfeldern, die den Baumbestand auflockern und die Lichtverhältnisse verändern, treten Koniferen-Laubmischwälder auf, deren Unterwuchs durch eine größere Zahl Sträucher, Zwergsträucher und Kräuter gebildet wird. Alte Moränenrücken sind in der Nadelwaldregion zumeist mit Baumwacholder bewachsen.

Die Waldgrenze wird in Nordexpositionen bei 3800-3900 m von Birken (*Betula utilis*) gebildet. Oberhalb der *Betula utilis*-Wälder, die TROLL (1939) noch zur subalpinen Stufe rechnet, treten an schattige Hänge gebunden *Rhododendron hypeanthum* und *Salix hastata* vermehrt auf. Die *Salix*-Zwergsträucher sind in Abhängigkeit von den lokalklimatischen Bedingungen zwischen 3800 und 4200 m verbreitet, wobei sie in Lawinengassen in die feucht-temperierten Nadelwälder und in die Birkenstufe absteigen.

In sonnigen Lagen ersetzen Legwacholder *Juniperus nana*, *Juniperus squamata* die feuchteliebenden *Salix*- und *Rhododendron*-Teppiche. Oberhalb 4200 m tritt in schattigen Lagen vereinzelt *Salix hastata* auf. Für die alpinen Grasfluren des Nanga Parbat erwähnt TROLL *Cobresia spec.*

Die subalpinen Birkenwälder erreichen im Hunza-Tal ihre nördliche Verbreitungsgrenze. Für die nordexponierten Flanken oberhalb des Batura-Gletschers berichten PAFFEN et al. (1956) von Birken-Weiden-Ebereschengebüsch mit *Betula utilis*, *Salix spec.* und *Sorbus aucuparia*. Der artenreiche Unterwuchs aus Sträuchern, Kräutern und Gräsern setzt sich aus Arten der Gattungen *Rubus*, *Ribes*, *Rosa*, *Lonicera*, *Geranium*, *Aquilegia*, *Fragaria* und *Hieracium* zusammen. Die Untergrenze liegt in Nordexpositionen auf 3600 m. Oberhalb schließt sich ein alpines Weidengesträuch an, das in Nordlagen von *Salix hastata* und *Juniperus communis* gebildet wird. In sonnigen Lagen fehlt *Salix hastata*. In der alpinen Stufe treten im Hunza nur noch *Cobresia*-Matten auf, bis 4500 m auch *Bistorta affinis* (früher *Polygonum affine*)-Zwergstrauchmatten.

3.1.4 Die Nutzung der biologischen Ressourcen durch die Bevölkerung

Der NW-Karakorum zeichnet sich, wie die Niederschlags- und Temperaturgradienten in Abb. 24 und Abb. 26 (in Anlage III) zeigen, durch aride Talböden mit einer schüttereren, wüstenhaften Pflanzendecke aus (WEIERS 1995, CRAMER 1994, KLÖTZLI et al. 1989, MIEHE et al. 1993). Die Hauptsiedlungszone bilden die von ausgedehnten Hangschuttfächern überdeckten Terrassenflächen. Da die Hauptterrasse 80-100 m über dem mittleren Wasserspiegel des Vorfluters liegt (KREUTZMANN 1989), kann die notwendige Bewässerung der Anbauflächen nur durch Kanalbauten ermöglicht werden, die in den Seitentälern unterhalb der Gletscherzungen das Schmelzwasser ableiten und auf die im Haupttal gelegenen Felder führen.

Wie bereits von KREUTZMANN für das Hunza-Tal beschrieben und von WEIERS (1995) für den gesamten Untersuchungsraum berechnet, können aufgrund der thermischen Verhältnisse Gebiete mit Einfach- und Doppelernte sowie Gebiete mit erhöhtem Anbauisiko unterschieden werden. Nach den Untersuchungen von WEIERS (1995) und KREUTZMANN (1989) liegt das Hunza-Tal

bereits im Übergangsbereich zwischen Doppel- und Einfacherntemöglichkeit. WEIERS (1995) kennzeichnet die Übergangsbereiche durch Zonen erhöhten Anbausrisikos.

Im Hunza-Tal liegen sich teilweise Doppel- und Einfacherntegebiete gegenüber. Während in Kari-mabad auf den leicht südlich geneigten Flächen Doppelernten eingebracht werden, können die Bedingungen für die Reifung einer Zweitfrucht auf den nordseitigen Flächen Nagers als wesentlich ungünstiger eingestuft werden.

Die Höhenverteilung der Feldfrüchte und Besonderheiten des Anbaus im zentralen Hunza-Tal beschreiben KREUTZMANN (1989) und KLÖTZLI et al. (1989). Als wichtigste Arten werden Buchweizen, Winterweizen, Mais, Hirse, Ackerbohnen, Erbsen und Kartoffeln genannt. Das bewässerte Kulturland setzt sich aus Ackerland, Obstgärten und bewässertem Grasland zusammen. Je nach Viehbestand der Haushalte werden 15-55 % des bewässerten Ackerlandes mit Luzerne bebaut, der restliche Teil mit Brotgetreide und Gemüse (KREUTZMANN 1989). In den Obstgärten werden Aprikose, Apfel, Maulbeere, Pfirsich, Walnuß Mandel und Birne gezogen, die zum Teil getrocknet den Wintervorrat ergänzen. Als Nutzholz findet man Weide, Esche und Pappel.

Auf dem bewässerten Grasland findet im September ein Heuschnitt statt. Das bis zum Winter nachwachsende Gras wird abgeweidet. Der Winterweizen reift von der Aussaat im November bis Ende Juni. Im September wird die Zweitfrucht eingebracht, zumeist Mais, Buchweizen oder Hirse. Reis- und Dal-Anbau konnte nur im Gilgit-Tal beobachtet werden (SNOY 1975). Im wesentlichen gleichen sich die Anbauverhältnisse in dem klimatisch homogenen zentralen Hunza-Tal. Aus dem Bagrot-Tal berichtet SNOY (1975) von Gerstenanbau an der Ackerbaugrenze, der jedoch heute nur noch vereinzelt beobachtet werden kann.

Die Sommerdörfer spielen im zentralen Hunza-Tal eine untergeordnete Rolle, da das Relief nur geringe Möglichkeiten zur Anlage von Feldern und Siedlungen bietet. Einige Sommerdörfer konnten im Shishpar-Gletschergebiet besucht werden. Sie liegen auf alten Moränenresten und werden augenscheinlich nur sporadisch oder gar nicht mehr genutzt. Ausgedehnte Sommerdörfer finden sich in den Gletschertälern oberhalb der Nager-Dörfer, Chaprot, und Minapin. Sie liegen in der unteren Verbreitungsgrenze der feucht-temperierten Nadelwälder .

Für das Nanga Parbat-Gebiet liegen Angaben von TROLL (1973) zur Nutzung des Raumes vor. Die Stufe der Dauersiedlungen reicht von 2000 bis 2700 m. Bis Ende Mai werden in den Doppelerntegebieten Winterweizen und Gerste eingebracht. Der Mais, häufig als Zweitfrucht kultiviert, wird Ende August geerntet. Die trockene Talstufe dient wie im Hunza-Tal zur Winter- und Frühjahrsweide.

Aus dem AKRSP (Aga Khan Rural Support Program) livestock census (zit. bei KREUTZMANN 1989) ergibt sich für das zentrale Hunza-Tal ein Viehbestand von 5,5 Schafen, 3,3 Ziegen und 3,1 Rindern oder Yaks pro Haushalt. Für das Weidegebiet Shimshal im oberen Hunza gibt BUTZ

(1989) einen Bestand von 6800 Ziegen und Schafen, 460 Yaks und 300 Rindern an. PAFFEN et al. (1956) berichten aus dem Jahre 1954 von 15-20 Ziegen oder Schafen pro Haushalt.

Die Zahlen, die STALEY (1966) (zit. bei KREUTZMANN 1989) aus dem Bagrot-Tal angibt, liegen mit 20-60 Tieren pro Haushalt deutlich höher. Setzt man die von GRÖTZBACH (1984) angegebenen 650-700 Haushalte im Jahre 1982 zur Abschätzung der Größe der Viehherden ein, so ergäben sich bei konservativer Schätzung etwa 13.000 Stück Kleinvieh allein für das Bagrot-Tal. Nach CASIMIR (1991) liegt der Trockenmassebedarf einer Ziege bei 761,5 g/d, was für den Bedarf des geschätzten Gesamtbestandes an Ziegen im Bagrot einen Betrag von 9,8 Tonnen täglich ausmacht. RAM et al. (1988) geben für den zentralen Himalaya zwischen 3500 und 4000 m Höchstwerte der Biomassenproduktion von 4,2 g/m²/d im August an. Dies entspricht einem täglichen Flächenbedarf zur Ernährung der Herde von 230 ha. Weitere Werte zur Trockenmasseproduktion unterschiedlicher Biotope und zur Verbrauchsschätzung durch Weidetiere finden sich bei CASIMIR (1991). (Zur Weidekartierung aus Fernerkundungsdaten vgl. auch LAL et al. 1991 sowie zur Biomassenabschätzung aus Fernerkundungsdaten KANEMASU et al. 1990).

Von Oktober bis Februar werden die Tiere in der Talstufe in Höhen zwischen 2200 und 2800 m geweidet (KREUTZMANN 1989). Mit fortschreitender Erwärmung werden sie der phänologischen Entwicklung der Pflanzendecke folgend in die höheren Lagen getrieben, wobei Ende Mai der Auftrieb in die eigentlichen Almgebiete in 3700-4000 m Höhe beginnt. Die Tiere bleiben bis in den September hinein in den hohen Lagen. Auf den Almen werden in erster Linie eine Vielzahl von Milchprodukten (Butterschmalz, Quark, Quarkkäse, Buttermilch) hergestellt, die in regelmäßigen Abständen in die Talsiedlungen transportiert werden. Das Butterschmalz wird traditionell in Birkenrinde verpackt. Da im Hunza Birken selten sind, muß die Rinde aus Nager und Gilgit zugekauft werden (KREUTZMANN 1989).

KLÖTZLI et al. (1989) machen Angaben zum Einfluß der Beweidung auf die Vegetation des Raumes. Sie stellen fest, daß die intensive Beweidung in der *Artemisia*-Steppe zu einer deutlichen Reduktion des Bedeckungsgrades und der Wuchshöhe der Formation führt. Auf geschützten Parzellen zwischen 2600 und 3300 m stellte sich bereits nach 2 Jahren eine doppelte Wuchshöhe und eine dreimal so hohe Bedeckung des Bodens mit Vegetation ein, wie in den benachbarten, der Beweidung ausgesetzten Flächen. Die Artenzusammensetzung änderte sich nicht signifikant.

Von 2600 auf 3300 m nahm die Bedeckung des Bodens mit Vegetation auf den geschützten Flächen von 50-70 % auf 70-90 % zu. Die ungeschützten, beweideten Lagen wiesen in 2600 m Höhe eine Deckung von etwa 25 %, in den höheren Lagen bei 3300 m 80 % auf.

Ein negativer Einfluß der Beweidung kann auch in den bereits stark geschädigten feuchttemperierten Nadelwäldern und Steppenwäldern festgestellt werden. Nicht nur durch die unkontrollierte Waldweide, sondern auch durch wachsenden Bedarf an Bau- und Brennholz werden die labilen Waldökosysteme erheblich geschädigt (Sustainable Forest Development 1987). Für das Chalt-Chaprot-Gebiet gibt GOHAR (1985, zit. bei KLÖTZLI et al. 1989) einen Gesamtrückgang der na-

türlichen Waldbedeckung von 75 % in den letzten 20 Jahren an, der auf Holzverkauf, Waldweide und subsistentielle Nutzung zurückzuführen ist.

Aus einem Report an das AKRSP, Northern Areas Pakistan liegen Schätzungen vor, nach denen pro Jahr etwa 3-6 m³ Holz/ha allein aus den Steppenwäldern im Chaprot-Tal entnommen werden. Eine nachhaltige Nutzung der Wälder würde eine Entnahme von etwa 1 bis 1,5 m³ gestatten (Sustainable Forest Development 1987).

Ähnliche Beobachtungen können auch im Minapin-Tal gemacht werden. Befragungen der Bevölkerung, Untersuchungen im Gelände und Vergleiche mit älteren Photographien weisen auf einen dramatischen Rückgang der Waldbedeckung hin. Insbesondere der Verkauf von Holzkohle während des Baus des Karakorum Highway scheint die ohnehin knappen Reserven stark angegriffen zu haben. Der Jungwuchs vor allem von *Picea smithiana* zeigt deutliche Krüppelformen, die auf die Beweidung der Bestände zurückzuführen sind. Die steilen Hänge sind durch Abweidung des Unterwuchses und den Viehtritt stellenweise kahl und der Erosion ausgesetzt.

SAGWAL (1990) bezeichnet die Waldweide als außerordentlich schädigend für die natürliche Verjüngung der Koniferen. GUPTA (1978) beschreibt aus dem westlichen Himalaya die durch die Waldweide hervorgerufene Bodenverdichtung als erosionsfördernd, da die Niederschlagsinfiltration erheblich herabgesetzt wird. GRÖTZBACH (1984) berichtet aus dem Bagrot ebenfalls von starker Schädigung der Wälder durch die Beweidung. Der Jungwuchs ist stark zurückgedrängt, Laubgehölze, *Salix spec.* und Eschen sind geschnitten und abgefressen.

Insgesamt zeigt sich für das Untersuchungsgebiet ein starker Druck auf die biologischen Ressourcen. Photo 1 zeigt einen Einschlagplatz in der Stufe des feucht-temperierten Nadelwaldes im Chaprot-Tal.

3.2 Landschaftsökologische Analyse der Vegetationsverbreitung im NW-Karakorum

3.2.1 Die räumliche Anordnung der Vegetation im NW-Karakorum und die Interpretation der Vegetationskarte

Während in Kapitel 3.1 die Vegetationsverbreitung und -nutzung sowie das Klima im Überblick beschrieben wurden, soll nun auf die räumliche Anordnung der Vegetation im eigentlichen Untersuchungsgebiet eingegangen werden. Lag in Kapitel 3.1.3 der Schwerpunkt auf dem allgemeinen S-N-Wandel der Vegetationshöhenstufung und dem Ausfallen der humideren Waldformationen mit zunehmender nördlicher Breite, steht in Kap. 3.2 die eher kleinräumig variierende Verbreitung der Vegetationsformationen im Relief des NW-Karakorum im Vordergrund. Die Grundlage der Diskussion bilden ein Übersichtsbild über den Untersuchungsraum (Abb. 25 in Anlage II), die Vegetationskarte (Anlage IV) und das Modell der Vegetationsverbreitung im NW-Karakorum (Abb. 26 in Anlage III).

Ein leitender Gedanke in der kritischen Betrachtung bisheriger Arbeiten zur Vegetationszonierung lag in der Umsetzbarkeit vorgestellter Formationsabgrenzungen auf die computergestützte Auswer-

tung der digitalen Fernerkundungsdaten. Dieser zentralen Frage, die sowohl vegetationsgeographische wie auswertungsmethodische Aspekte berücksichtigen muß, wurde durch manuelle und halbautomatische Kartierungsproben aus LANDSAT-5-TM, SPOT-HRV und KFA-1000 Aufnahmen sowie durch ständigen Vergleich mit Kartierungen, Literaturangaben und Felderhebungen nachgegangen.

Zahlreichen Arbeiten (TROLL 1939, PAFFEN et al. 1959, MIEHE et al. 1993, HASERODT 1989, BRECKLE und FREY 1974, HARTMANN 1966, KLÖTZLI et al. 1989, SCHICKHOFF 1993) liegen unterschiedliche Ansätze zur Differenzierung der Vegetationshöhenstufen und Pflanzengesellschaften im Karakorum und den umliegenden Gebirgen auf Formations- oder Assoziationsebene zugrunde. Das engere Untersuchungsgebiet im zentralen Hunza-Tal des NW-Karakorum betreffen die Arbeiten von PAFFEN et al. (1956), MIEHE et al. (1993), REPP (1963), SCHWEINFURTH (1957) und KLÖTZLI et al. (1989). Auf der Grundlage der genannten Forschungen und eigener Feldarbeiten in den Jahren 1990/1991 wurde die Höhenstufung der Vegetation entworfen (vgl. auch Abb. 26 in Anlage III).

Da die dreidimensionale Vegetationsanordnung in enger Beziehung zu den klimaökologischen Bedingungen im NW-Karakorum steht, wurde in Abb. 26 (Anlage III) versucht, die Vegetationshöhenstufung und die wesentlichen klimatischen Eigenschaften des Raumes synthetisch darzustellen. Im LANDSAT-5-TM-Falschfarbkomposit (Abb. 25 in Anlage II) sind als dominante Raumstrukturen die Haupttäler und Gebirgszüge zu erkennen, die das Untersuchungsgebiet gliedern. Am unteren Bildrand rechts ist die Nordabdachung des Nanga Parbat-Massivs sichtbar. Unmittelbar nördlich mündet der Astor River in den Indus.

Die Lage der Distrikthauptstadt Gilgit markiert den Zusammenfluß des Gilgit- mit dem Hunza-River, der den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes zum Indus hin entwässert. Verfolgt man den Lauf des Hunza-River in nördlicher Richtung bis zu seinem markanten Knick bei Chalt, so fällt östlich des etwa N-S orientierten, ca. 35 km langen Abschnitts die Rakaposhi Range mit dem Hauptgipfel oberhalb des Pisan-Gletschers auf. Sie begrenzt mit einer Gipfelhöhe von 7793 m das W-O verlaufende zentrale Hunza-Tal nach Süden. Östlich von Sarat weist der Hunza-River abermals eine markante Biegung auf. Das obere Hunza-Tal durchbricht nördlich von Sarat die Hauptkette des Karakorum.

Das eingetragene Rechteck am Rand von Abb. 25 (Anlage II) markiert die N-S Ausdehnung der Vegetationskartierung. Ihre Breite umfaßt den gesamten, in Abb. 25 dargestellten Bildausschnitt (vgl. auch Anlage IV). Die in Abb. 25 eingetragenen Standorte markieren Stützpunkte auf einem etwa SSW-NNO verlaufenden Profil, die während der Feldarbeiten aufgesucht wurden. Sie folgen dem im Raum zu beobachtenden hygrischen Gradienten (WEIERS 1995).

Im eigentlichen Untersuchungsgebiet, dem Hunza-Karakorum, wurden die Standorte verdichtet, um eine ausreichend große Zahl an Trainingsgebieten für die Satellitenbilddauswertung und zur Verifikation der Ergebnisse zu erhalten. Die Dokumentation der kleinräumigen Vegetationsverbreitung erfolgte durch die photographische Aufnahme zahlreicher Hangprofile sowie durch Kartierung in LANDSAT-5-TM-Falschfarbkomposite, KFA-1000-Vergrößerungen und Kartierung in Vergrößerungen der Stereoautographenpläne 1:50.000, die freundlicherweise von Prof. Dr.

FINSTERWALDER, Inst. für Kartographie und Reprotechnik der TU München, zur Verfügung gestellt wurden.

Im gesamten Untersuchungsraum wurden die Deckungsgrade der Vegetationsformationen aufgenommen und die dominanten Arten gesammelt, die dankenswerterweise von Frau Dr. S. MIEHE u. Herrn Prof. Dr. G. MIEHE (Geographisches Institut der Universität Marburg) zur Bestimmung an die entsprechenden Spezialisten weitergeleitet wurden.

Eine vollständige Aufnahme der Artenzusammensetzung zur Anfertigung der Vegetationskarte war aufgrund der in Kap. 2.1.3.1 diskutierten Reflexionseigenschaften naturnaher Vegetationsoberflächen nicht notwendig. Jedoch wurden in jedem Fall die Leitarten und Arten mit hohem Deckungsgrad aufgenommen, um in schwierig zu entscheidenden Fällen eine Zuordnung des Testgebietes zur entsprechenden Vegetationsformation zu ermöglichen.

Die im Gelände durchgeführten Kartierungen und Vegetationsaufnahmen stützen sich wesentlich auf die bereits von TROLL (1939) für den Nanga Parbat, von PAFFEN et al. (1956) für den Hunza - Karakorum, von REPP (1963) für das Naltar-Tal und von HARTMANN (1966, 1968, 1972) für das Baltoro- und Biafo-Gebiet erarbeiteten klassifikatorischen Grundlagen. Eingearbeitet wurden auch die neueren Beobachtungen und Formationsabgrenzungen von MIEHE et al. (1993), die weitgehend mit den Angaben bei PAFFEN et al. (1956) und mit den Befunden von TROLL (1939) aus dem unmittelbar benachbarten Nanga Parbat-Massiv übereinstimmen. Die Abgrenzung der Vegetationsformationen folgt dem Prinzip einer physiognomisch-ökologischen Klassifikation im Sinne von ELLENBERG und MÜLLER-DOMBOIS (1965/66). Die Benennung der Formationen lehnt sich an die Nomenklatur bei MIEHE et al. (1993) an.

Abb. 26 in Anlage III integriert neben den Felderhebungen und Literaturinformationen die aus Satellitendaten und topographischen Daten gewonnenen Befunde zur Verbreitung der Vegetationsformationen im Relief. Die der Abb. zugrundeliegende Formationsabgrenzung stellt einen Kompromiß zwischen der physiognomisch-ökologischen und somit vegetationsgeographisch begründeten Untergliederung des Pflanzenkleides und der Erfäßbarkeit der Vegetation aus multispektralen Satellitendaten dar. Die Vegetationsdifferenzierung in Abb. 26 (Anlage III) entspricht weitgehend der Unterscheidung des Pflanzenkleides, wie sie in der Karte (Anlage IV) wiedergegeben ist. Unterschiede zwischen dem Modell der dreidimensionalen Vegetationsverbreitung (Abb. 26, Anlage III) und der Vegetationskarte (Anlage IV) bestehen hinsichtlich der Differenzierung der krautigen Vegetationsformationen. Während bei der Klassifikation der Satellitendaten eine Unterscheidung der montanen bis subalpinen Triften und der alpinen *Cyperaceen*-Matten nicht möglich war, wurden sie im Verbreitungsmodell (Abb. 26 in Anlage III) aufgrund ihrer deutlich verschiedenen Verbreitungshöhen getrennt ausgewiesen. Die in der Karte (Anlage IV) wiedergegebene subalpine Wiesensteppe wurde in Abb. 26 mit den subalpinen Triften zusammengefaßt, da beide Formationen eine ähnliche Verbreitungshöhenstufe besitzen.

Die in der Literatur angegebenen Höhengrenzen für einzelne Formationen variieren erheblich. PAFFEN et al. (1956) beschreiben die obere Waldgrenze auf nordexponierten Flanken im Hunza-Tal auf einer Höhe von 3800-3900 m. Auf südexponierten Hängen ist *Juniperus spec.* noch in Höhen zwischen 4000 und 4100 m zu beobachten. Die Angaben sind vermutlich zuverlässig, da PAFFEN eng mit einer geodätisch-photogrammetrischen Forschergruppe zusammenarbeitete, die im NW-Karakorum eine topographische Karte im Maßstab 1:100.000 aufnahm (PILLEWIZER in PAFFEN et al. 1956).

Zum besseren Verständnis der Vegetationsverbreitung im Untersuchungsgebiet ist es sinnvoll, die vertikale Zonierung zunächst getrennt für die unterschiedlichen Expositionen zu beschreiben.

Mit zunehmender Höhe konnten auf den trockeneren Südexpositionen folgende Vegetationsformationen unterschieden werden: *Chenopodiaceen*-Steppe, *Artemisia*-Steppe, Baumsteppe, Steppenwald sowie subalpine Wiesensteppen (vgl. Abb. 26 in Anl. III). Wird die Baumsteppe mit *Juniperus macropoda* durch Holzentnahme und Beweidung degradiert, entwickelt sich eine montane Steppe mit höherem Deckungsgrad und charakteristischen *Acantholimon lycopodioides*-Polstern. In den subalpinen bis alpinen Steppen dominieren *Oxytropis spec.*, *Artemisia maritima* und *Stipa spec.*. Das subalpine Krummholz wird in Südexposition von *Juniperus macropoda* gebildet.

In den feuchteren Nordexpositionen schließt sich oberhalb der *Chenopodiaceen*-Steppe ein schmaler Saum der Steppenwälder mit *Juniperus macropoda* und *Pinus wallichiana* an, der jedoch bald von feucht-temperiertem Nadelwald mit *Picea smithiana* abgelöst wird. Mit zunehmender Höhe treten hochmontane, laubwerfende Wälder mit *Betula utilis* auf (Abb. 26 in Anl. III). Der Krummholzgürtel wird in Nordexposition von *Salix spec.* und einem Legwacholder gebildet (*Juniperus communis*).

In Rodunginseln der montanen Waldstufe entwickeln sich Triften und in höheren Lagen alpine Matten (vgl. auch die Untersuchungen von KAUL u. SARIN 1971 aus dem zentralen Himalaya). Diese beiden unterschiedlichen Abfolgen der Vegetationsstufung dominieren in Abhängigkeit von der Exposition das Verbreitungsmuster in der Karte (Anlage IV). Es soll auf den folgenden Seiten im Zusammenhang mit den Feldbefunden diskutiert werden.

3.2.1.1 *Chenopodiaceen*-Steppe

In den durch ausgedehnte Schuttfächer aufgefüllten Talböden bildet die *Chenopodiaceen*-Steppe mit zahlreichen hygrisch-edaphischen Varianten die natürliche Vegetation. Der Bedeckungsgrad beträgt, sofern kein Zuschußwasser durch einmündende Seitenbäche zur Verfügung steht, unter 30 % (vgl. Photo 2). Tussock-Gräser der Gattungen *Stipa*, *Cymbopogon* und *Aristida* treten nur in wenig beweideten Gebieten auf (MIEHE et al. 1993). Mit Annäherung an die Siedlungen nehmen *Chenopodiaceen* zu.

In den Schwemmkesselbereichen der Seitenflüsse können *Salix pycnostachya*, *Myricaria germanica* und *Tamarix leptostachya* bei günstiger Wasserversorgung 1-2 m hohe Reinbestände bilden, die bis zu 80 % Bodenbedeckung erreichen. Im Hochflutbett des Hunza-River konnten auf feinen Alluvial-

sanden *Echinops cornigerus*, *Matthiola flavida* und *Tricholepis nakaonii* beobachtet werden (vgl. auch KITAMURA 1963). Eine auffällige Erscheinung sind die großen *Capparis spinosa*-Sträucher mit ihren fleischig roten Früchten (AHMED et al. 1976). Sie treten jedoch im Hunza-Tal bereits in den Hintergrund.

Aufgrund der geringen Vegetationsbedeckung dominieren in dieser Vegetationsformation die spektralen Eigenschaften der Böden (Mineralzusammensetzung, Wassergehalt und Oberflächengestalt) das vom Sensor gemessene Signal und überprägen die Reflexion der Vegetationsdecke. Dies trifft neben den sehr spärlich bewachsenen Talböden auch auf die alpine Pioniervegetation und teilweise auf die alpinen Steppen in den hohen Lagen zu.

In der Vegetationskarte (Anlage IV) ist die *Chenopodiaceen*-Steppe in einem hell-beigen Farbton wiedergegeben. Ihre Verbreitung folgt dem Verlauf der größeren Täler. Vom SW-Sektor der Vegetationskarte aus erstreckt sie sich beiderseits des Hunza-River bis über den NO-Sektor der Karte hinaus. In der Literatur (TROLL 1939, PAFFEN et al. 1956) wird ihre obere Verbreitungsgrenze mit etwa 2000 m angegeben, bei ansteigenden Talböden steigt sie ebenfalls an.

Eine expositionsabhängige Asymmetrie der Obergrenze der *Chenopodiaceen*-Steppe ist aufgrund der Feldbefunde nicht ohne weiteres zu erkennen, da die Höhenstufe einerseits intensiv genutzt wird, andererseits strahlungsklimatisch bedingte Unterschiede durch den ständigen Wechsel des Untergrundes verwischt werden. Eine unterschiedliche Höhenlage der oberen Verbreitungsgrenze der *Chenopodiaceen*-Steppe in verschiedenen Expositionen wird auch in der ausgewerteten Literatur nicht erwähnt. Allerdings gibt ein linearer, isohypsenparalleler Verlauf der Formationsgrenze die Situation im Gelände nicht befriedigend wieder. Nach Befunden von CRAMER (1994) scheint sich die obere Grenze der *Chenopodiaceen*-Steppe etwa mit der unteren Grenze des morgendlichen Tau-falles zu decken.

Bei Betrachtung der Vegetationskarte (Anlage IV) fällt die räumliche Einschränkung der *Chenopodiaceen*-Steppe vor der Verengung des Hunza-Tales südlich von Chalt auf. Unmittelbar hinter der Talverengung bei Chalt öffnet sich das Tal zu einem ausgedehnten Kessel. Die Formation besetzt hier größere Flächen im Talboden sowie in den unteren Hangpartien. Es liegt nahe, diese Effekte mit einer reliefbedingten Kompression und Ausdehnung der durch Talwinde herangeführten Luftmassen zu erklären. Austrocknungseffekte in Verbindung mit Talerweiterungen erwähnt auch WEIERS (1995).

Allgemein ist im Gelände eine starke Verzahnung der *Chenopodiaceen*-Steppe mit der höhenwärts anschließenden *Artemisia*-Steppe zu beobachten, die dem Wechsel von felsigem Untergrund und lockeren Schuttfächern an den Hängen weitgehend entspricht (Anlage IV).

3.2.1.2 Montane *Artemisia*-Steppe

Der Übergang zwischen den beiden Formationen kann als Ökoton aufgefaßt werden, in dem sich die Artenzusammensetzung mit zunehmender Höhe und Humidität allmählich ändert. Generell lassen sich jedoch zur Höhenlage des Artenwechsels einige Aussagen hinsichtlich des Einflusses von lokalklimatischen oder pedologischen Faktoren machen. Vor Talverengungen wie dem Hunza-

Durchbruch durch die Rakaposhi Range bei Chalt (Anlage IV) sinkt die untere Verbreitungsgrenze der *Artemisia*-Steppe deutlich ab (vgl. auch TROLL 1939). Auf Nordflanken liegt sie vermutlich tiefer als auf Südexpositionen.

Im Gegensatz zu den wüstenhaft trockenen Talböden ist die Gesamtbedeckung mit Vegetation in der *Artemisia*-Steppe deutlich höher. Sie kann jedoch in Abhängigkeit von der Beweidung erheblich schwanken. An der Obergrenze der *Chenopodiaceen*-Steppe oberhalb Hayderabad betrug die Bedeckung ca. 30 %. Hier traten in 2560 m *Arnebia guttata*, *Mathiola flavida*, *Heliotropum europaeum* und vereinzelt *Artemisia maritima* auf. Im oberen Bereich älterer, bereits konsolidierter Schuttfächer konnte truppweise auftretend *Colutea arborescens* beobachtet werden. *Matthiola flavida* fiel oberhalb 2700 m aus.

Auch im Kleinrelief wird die starke Verzahnung der Formationen deutlich, da *Artemisia maritima* an ihrer unteren Verbreitungsgrenze zunächst in mit Feinerde gefüllten Felstaschen oder breiteren Klüften vorkommt. In 2795 m treten *Daphne cashmiriana* (ein kleiner skleromorpher Strauch), *Rosa webbiana*, *Chloris barbata*, *Tricholepis nakaoui*, *Stipa spec.* und *Artemisia maritima* sowie *Ephedra spec.* auf, die allerdings im gesamten Untersuchungsgebiet äußerst stark befallen wird.

In der Stufe der *Artemisia*-Steppe sind die markantesten Unterschiede im Bedeckungsgrad und im Artenreichtum von Standorten festzustellen, deren klimaökologische Standortbedingungen etwa gleich sind, deren Beweidungsstatus jedoch unterschiedlich ist. Während im Chaprot-Tal (Vegetationskarte Anlage IV) auf den südexponierten Flanken im August eine stark beweidete *Artemisia-Juniperus*-Waldsteppe mit einer Wuchshöhe der Kraut- und Strauchschicht von 20-30 cm mit nur 4 Arten und einer Bedeckung unter 60 % beobachtet werden konnte, besaß eine nicht beweidete *Artemisia-Juniperus*-Waldsteppe im oberen Naltar-Tal in vergleichbarer Höhenlage eine Bedeckung von nahezu 90 %. Die Wuchshöhe der Strauchsteppe betrug ca. 1,2 m. Es traten *Artemisia maritima*, *Galium verum*, *Rosa spec.*, *Ribes orientale*, *Galium aparine*, *Cynoglossum glochidiatum*, *Oxytropis lapponica* und *Brachyactis roylei* auf.

Bei nachlassendem Beweidungsdruck nimmt in der *Artemisia*-Steppe der Anteil der *Gramineen* zu. MIEHE et al. (1993) erwähnen *Piptatherum gracile*, *Elymus cognatus* und *Poa sterilis*.

In der *Artemisia*-Steppe oberhalb Karimabad findet man in 3520 m Höhe eine bereits deutlich veränderte Artenzusammensetzung vor. Das Bodensubstrat tendiert zu lehmig-sandig und wies beim Besuch des Standortes zahlreiche, einige Zentimeter tiefe Trockenrisse auf. An den *Acantholimon lycopodioides*-Polstern war eine deutliche Windschur der talzugewandten Partien festzustellen, was auf ein ausgeprägtes Hangwindssystem hinweist. Zusätzlich konnten *Artemisia maritima*, *Stipa spec.*, *Thymus linearis*, *Pedicularis spec.* und *Bupleurum falcatum* beobachtet werden.

Vermutlich entspricht dieser Standort bereits der in dieser Höhenstufe verbreiteten Waldsteppe mit *Juniperus macropoda*, der in Höhe des Standortes nur an unzugänglichen Felspartien auftrat (vgl. Photo 3).

In der Vegetationskarte (Anlage IV) wurde die *Artemisia*-Steppe mit einem hellen Olivton wiedergegeben, wodurch ihre hygrothermisch vermittelnde Position zwischen den trocken-heißen Talbö-

den und den feucht-kühlen Hochlagen angedeutet werden soll. Sie tritt im gesamten Kartenblatt auf. Während die *Chenopodiaceen*-Steppe fast ausschließlich in den großen, wasserführenden Haupttälern beobachtet werden kann, reicht die *Artemisia*-Steppe deutlich weiter in die tief eingeschnittenen Nebentäler hinein (Anlage IV).

3.2.1.3 Montane bis subalpine Waldsteppe und Steppenwald

Während *Chenopodiaceen*- und *Artemisia*-Steppe im Untersuchungsgebiet kontinuierliche Höhenzüge bilden, trifft dies für die Steppenwälder des Raumes nur noch sehr eingeschränkt zu. In der Vegetationskarte (Anlage IV) sind die in einem kräftig braunen Farbton wiedergegebenen Steppenwaldvorkommen deutlich stärker gestreut als die zuvor besprochenen Steppenformationen. Die Häufigkeit der Bestände nimmt von SW nach NO erheblich ab, die räumliche Streuung der Vorkommen nimmt in derselben Richtung zu. Dieses in der Vegetationskarte zu beobachtende Raummuster ist auf die Interferenz der expositionsabhängigen Verbreitung der Steppenwälder mit den in nordöstlicher Richtung abnehmenden Niederschlägen zurückzuführen (vgl. Abb. 26 in Anl. III und Vegetationskarte Anlage IV). Während in den südlichen, humideren Bereichen die Steppenwälder mit *Juniperus macropoda* von den konkurrenzstärkeren Fichten- und Birkenbeständen auf die ungünstigeren Südexpositionen abgedrängt werden, kann mit zunehmender nördlicher Breite (etwa nördlich einer durch das Chaprot-Tal und den Ort Minapin markierten WNW streichenden Linie) beobachtet werden, daß *Juniperus macropoda* die humideren Nordexpositionen besetzt (vgl. Anlage IV). Bereits im Batura-Tal, das unmittelbar nördlich an das kartierte Gebiet anschließt, deutet sich mit zunehmender Aridität ein Biotopwechsel der Baumwacholder an. Sie besetzen hier vorwiegend die klimatisch für den Baumwuchs günstigeren Nordexpositionen.

Die natürliche untere Verbreitungsgrenze der Steppenwälder ist aufgrund der anhaltenden Nutzung nur schwierig zu bestimmen. Insbesondere in den nördlich des zentralen Hunza-Tals gelegenen Bereichen (vgl. Anlage IV) stellen die *Juniperus macropoda*-Bestände neben *Populus spec.* für die Bevölkerung die nahezu einzige Quelle für Bauholz dar, und es ist zu erwarten, daß dadurch insbesondere die Untergrenze der Waldformation erheblich degradiert und verschoben wurde.

Baumwacholder werden im Shishpar- und Mouchouhar-Gletschergebiet ab 2850 m häufiger. In den steilen, felsigen Flanken oberhalb Karimabad und Hayderabad treten in dieser Höhe vereinzelt Exemplare an unzugänglichen Felspartien auf. Allerdings läßt die Begleitflora darauf schließen, daß in dieser Höhe potentiell zumindest eine lichte Waldsteppe vorhanden sein müßte.

Im oberen Shishpar-Gletschergebiet konnten baumförmige *Juniperus macropoda* noch in 4200 m Höhe beobachtet werden (nach Höhenmessung auf der Basis von Stereoautographenplänen).

An der nordexponierten Flanke der Rakaposhi Range tritt *Juniperus macropoda* vereinzelt bereits ab einer Höhe von 2000 m in der westlichen Seitenmoräne des Minapin-Gletschers auf (Anlage IV, zur Orientierung vgl. Abb. 25 in Anlage II). Ab 2600 m beobachtet man auch *Acantholimon lycopodioides*. Photo 4 zeigt einen *Juniperus macropoda*-Bestand in der westlichen Seitenmoräne des Minapin-Gletschers in einer Höhe von 2820 m. Der flachgründige, skelettreiche Boden weist gerin-

ge Humusanteile auf. Die in die Moräne eingeschalteten, zahlreichen Felsblöcke in Größen zwischen 30 cm und 4 m dürften den Feuchtigkeits- und Temperaturhaushalt des Standortes erheblich verbessern.

Im oberen Bagrot-Tal, in SSW-Exposition und 2800 m Höhe, traten in der *Artemisia-Juniperus*-Waldsteppe *Juniperus macropoda*, *Daphne spec.*, *Artemisia maritima*, *Salvia nubicola*, *Stachys tibetica*, *Heteropappus holohermaphroditus* auf.

Mit zunehmender Höhe werden die *Juniperus macropoda*-Bestände lichter und erreichen an den südexponierten Flanken oberhalb Sarat in 4100 m ihre obere Verbreitungsgrenze. Neben *Juniperus macropoda* konnten *Potentilla spec.*, *Thymus linearis*, *Astragalus spec.*, *Ephedra spec.*, *Bistorta affinis*, *Carex spec.*, *Androsace spec.*, *Leontopodium leontopodium* und *Bupleurum spec.* beobachtet werden.

3.2.1.4 Montaner, feucht-temperierter Nadelwald

Während an den südexponierten Talflanken des Hunza *Juniperus macropoda* weitgehend die einzige zum Teil lichte Wälder bildende Baumart ist, finden sich auf den klimatisch ausgeglicheneren, humideren, nordexponierten Flanken der Rakaposhi Range feucht-temperierte Nadelwälder mit *Picea smithiana* und *Pinus wallichiana* (Anlage IV, Abb. 25 in Anl. II). Die zwischen 2800 und 3400 m in Nordexpositionen verbreitete Formation wird mit zunehmender Höhe von subalpinen, laubwerfenden Wäldern und Gebüschern mit *Betula utilis* abgelöst (Abb. 26 in Anl. III).

Der von Süden in das Untersuchungsgebiet hineinreichende feucht-temperierte Nadelwald erreicht an den nordexponierten Hängen der Rakaposhi-Range seine nördliche Verbreitungsgrenze im Karakorum. In der Vegetationskarte (vgl. Anlage 2) durch eine dunkelgrüne Signatur ausgewiesen, tritt diese wirtschaftlich bedeutsamste und wahrscheinlich auch am stärksten gefährdete Waldformation auf nahezu allen nordexponierten Hangpartien des südlichen Sektors der Karte auf (vgl. auch CHAUDRI 1963). Mit zunehmender nördlicher Breite und östlicher Länge lösen sich die Bestände in Cluster auf, um im Minapin-Gletschergebiet ihre heutige vermutliche Trockengrenze zu erreichen. Die ausgedehntesten, im Gebiet aufgesuchten Bestände liegen im Naltar-, Bagrot- und Chapat-Tal (Anlage IV und Abb. 25 in Anl. II).

An der unteren Grenze der feucht-temperierten Nadelwälder in 2900 m Höhe im oberen Bagrot (zur Lage vgl. Abb. 25 in Anl. II) beträgt die Bodendeckung der Vegetation etwa 80 %. Die Baumschicht des Waldes setzt sich aus *Pinus wallichiana*, *Picea smithiana* und *Juniperus macropoda* zusammen. Jedoch dringt *Juniperus* an der Untergrenze der feucht-temperierten Nadelwälder nur wenig in die Bestände ein. In der Strauchschicht dominieren *Ribes alpestre*, *Rosa webbiana* und *Berberis orthobotrys*. Die Krautschicht an diesem unmittelbar oberhalb der Sommerdörfer liegenden Standort setzt sich aus *Salvia nubicola*, *Stipa brandisii*, *Eritrichium fruticosum*, *Scorzonera virgata*, *Impatiens brachycentra*, *Brachyactis roylei*, *Picris nuristanica*, *Cynoglossum glochidiatum*, *Fragaria nubicola* und *Thymus serpyllum* zusammen.

Ausgedehnte Bestände der feucht-temperierten Nadelwälder sind auch an den nordexponierten Hängen des Naltar-Tales zu beobachten. Wie im Bagrot ist *Picea smithiana* im Naltar-Tal (vgl. Abb. 25 in Anl. II und Anlage IV) häufig mit *Pinus wallichiana* vergesellschaftet, die an der Untergrenze der feucht-temperierten Nadelwälder die Bestände dominiert. Sowohl im Naltar- und Bagrot-Tal, als auch im weiter nördlich gelegenen Chaprot sind die Talböden in Höhenlagen um 2800 m durch Sommerfeldbau genutzt (Anlage IV). Reliktbestände der von *Pinus wallichiana* dominierten Trockenwälder in den Seitenmoränen des Hinarche-Gletschers im Bagrot-Tal und an der Untergrenze der feucht-temperierten Nadelwälder im Chaprot sowie kleine Bestände im Talboden des mittleren und oberen Naltar (REPP 1963) deuten auf eine vormals weitere Verbreitung dieses Waldtyps hin.

In ungestörtem Zustand könnte er vermutlich die unteren süd- und nordexponierten Hänge sowie die Talböden besetzen (REPP 1963). Im Naltar-Tal konnten in der Stufe des feucht-temperierten Nadelwaldes in 3150 m Höhe *Picea smithiana* (Sämlinge und Jungwuchs häufig), *Pinus wallichiana*, *Fragaria nubicola*, *Oxytropis lapponica*, *Thymus serpyllum*, *Leontopodium leontopodium*, *Euphrasia schlagintweitii* und eine *Trigonella spec.* beobachtet werden. Im Schatten der *Picea smithiana*-Bestände trat *Ligularia thomsonii* auf.

Im Chaprot-Tal befinden sich auf den nordexponierten Flanken ebenfalls ausgedehnte Bestände von *Picea smithiana*, die im oberen Talabschnitt bis in den Talboden hinabreichen. Im mittleren Talabschnitt tritt *Pinus wallichiana* in Vergesellschaftung mit einzelnen Fichten und *Juniperus macrospora* im Talboden auf. Im feucht-temperierten Nadelwald in 3250 m Höhe beträgt die Mächtigkeit der Bodenstreu teilweise 20 cm. *Picea smithiana* ist häufig, *Betula utilis* und *Pinus wallichiana* treten zurück. In der Strauch- und Krautschicht finden sich *Platygaenia lasiocarpa*, *Carex cardiolepis*, *Ribes alpestre*, *Fragaria nubicola* sowie weitere nicht bestimmte Arten.

An der Obergrenze des feuchten Nadelwaldes in 3450 m mischt sich *Thymus linearis*, *Leontopodium leontopodium* und *Gentiana spec.* in die Krautschicht ein. Vereinzelt trifft man auf *Fraxinus spec.* Am Waldrand können ausgedehnte Bestände von *Juniperus communis* sowie *Bistorta affinis* beobachtet werden. Oberhalb von 3300 m ist der Fichtenwald zunehmend mit *Betula utilis* durchsetzt, die ab 3500 m Höhe die Bestände dominiert.

Im tiefeingeschnittenen Pisan-Tal, das aufgrund seiner Topographie eine deutlich reduzierte Einstrahlung aufweist, sind in die feucht-temperierten Nadelwälder an den westlichen Flanken bereits in einer Höhe von 2850 m vereinzelt Birken eingestreut. Neben *Picea smithiana* und *Betula utilis* treten *Carex cardiolepis*, *Fragaria nubicola*, *Thymus serpyllum*, *Rheum spec.*, *Platygaenia lasiocarpa*, *Juniperus communis* und *Pinus wallichiana* auf.

Unmittelbar westlich an das Pisan-Gletschertal schließt sich das Minapin-Tal an, das die Nordgrenze der feucht-temperierten Nadelwälder im Untersuchungsraum markiert (vgl. Abb. 25 in Anl. II und Anlage IV). Die *Picea smithiana*-Bestände, die auch hier an die schattigeren nordexponierten Hänge gebunden sind, sind im gesamten Tal stark degradiert. Feldbefunde ergaben sowohl eine Anhebung der Untergrenze als auch eine erhebliche Auflichtung der Vorkommen durch Holz einschlag.

An allen aufgesuchten Standorten konnte Jungwuchs festgestellt werden, der allerdings stark von weidendem Vieh befressen war. In den Waldbeständen auf den steilen Flanken oberhalb Hapakund im Minapin-Tal war die Krautschicht durch den häufigen Durchtrieb von Ziegen und die Waldweide bereits weitgehend aufgelichtet. Der offene Boden wies deutliche Spuren aktiver Furchenerosion auf. An einem nordexponierten Hang in 2910 m traten *Picea smithiana*, *Ribes alpestre*, *Juniperus macropoda*, *Rosa spec.*, *Spirea hypericifolia*, *Galium verum*, *Heteropappus holohermaphroditus*, *Leontopodium leontopodium*, *Leptorhades parviflora*, *Scorzonera virgata*, *Artemisia maritima*, *Thymus linearis* und *Taraxacum officinale* auf.

In trockeneren SO- bis OSO-Expositionen löst *Pinus wallichiana* in Vergesellschaftung mit *Juniperus macropoda* die Fichte ab. *Artemisia maritima* dominiert dort die Strauchschicht, in der häufig *Acantholimon lycopodioides*-Polster beobachtet werden können.

Photo 5 zeigt einen stark aufgelichteten Bestand feucht-temperierten Nadelwaldes in der Nähe von Sommersiedlungen im Minapin-Tal. Nach Befragungen dürften die schwerwiegendsten Schäden an den Fichtenwäldern in diesem Tal während des Baues des Karakorum Highway entstanden sein, da die Bevölkerung große Mengen Holz bzw. Holzkohle an die Straßenarbeiter verkaufte.

3.2.1.5 Hochmontane bis subalpine Laubwälder mit *Betula utilis*

Oberhalb der feucht-temperierten Nadelwälder treten häufig laubwerfende *Betula utilis*-Wälder oder -Gebüsche auf. In Abhängigkeit von den lokalklimatischen Eigenschaften der Standorte besetzen sie die O-, N- und W-exponierten Hänge in Höhenlagen zwischen 3200 und 3900 m (Abb. 26 in Anl. III). Weit hinabreichende Vorkommen sind zumeist an azonal kühl-feuchte Standortbedingungen gebunden, wie im tiefeingeschnittenen Pisan-Tal, wo Reinbestände vereinzelt bereits in 3000 m beobachtet werden können. Sowohl die relative Strahlungsarmut der Standorte als auch die aus der stark vergletscherten Rakaposhi-Nordflanke abfließende Kaltluft dämpfen die Temperaturen.

Eine ähnliche Wirkung besitzen auch Lawingassen, in denen ausdauernde Schneeakkumulationen zu Vegetationsinversionen führen können (TROLL 1939). Lawingassen und tiefe schattige Einschnitte im Birkenwald sind häufig im oberen Bereich von *Salix spec.* besetzt. Die etwas sonnigeren Lagen nimmt *Juniperus communis* ein.

In der südwestlichen Hälfte des Kartenblattes mischt sich mit zunehmender Höhe *Betula utilis* in die feucht-temperierten Nadelwälder ein. Im Pisangebiet in 3000 m Höhe (Photo 6) waren die *Betula utilis*-Bestände durch Schneedruck leicht an der Stammbasis umgelegt (vgl. auch TROLL 1939). Die vergleichsweise mächtige Laubstreu, die den Boden in den Beständen bedeckt, wirkt als Isolierung gegen Austrocknung. Zahlreiche Sträucher und Stauden mit relativ großen hygromorphen Blättern bilden den Unterwuchs in den *Betula utilis*-Beständen. *Salix hastata* fällt im Birkenbestand fast völlig aus. Am Bestandsrand tritt häufig *Rheum spec.* auf.

Im Pisan-Gletschergebiet wurden in 3100 m Höhe an einem azonal kühl-feuchten, NNW-exponierten und stark abgeschatteten Standort Reinbestände mit 80 % Kronenschluß beobachtet.

Neben zahlreichen nicht bestimmten Arten traten *Geranium spec.*, *Carex spec.*, *Silene vulgaris* und *Arenaria arbusculata* auf.

Die hochmontanen bis subalpinen Laubwälder mit *Betula utilis* sind nahezu im gesamten von der Vegetationskarte abgedeckten Raum verbreitet. Sie sind in der Karte in einem kräftig roten Farbton wiedergegeben (Anlage IV). Die ausgedehntesten Bestände liegen im Südsektor, wobei mit zunehmender nördlicher Breite und östlicher Länge die Gehölze seltener werden und stärker gestreut auftreten. Ihre nordöstliche Verbreitungsgrenze ist gegenüber den feucht-temperierten Nadelwäldern etwas weiter in Richtung NO vorgeschoben. Jedoch handelt es sich bereits bei den im oberen Shishpar-Tal ausgewiesenen Beständen nicht mehr um *Betula utilis*, sondern um die bei PAFFEN et al. (1956) erwähnte *Sorbus aucuparia* (Anlage IV, Abb. 25 in Anl. II).

MIEHE (mdl. Mitt.) berichtet aus dem Shimshal im NO des kartierten Gebietes von *Betula utilis* - Reliktbeständen an wasserzügigen Standorten, ohne generative Verjüngung der Bestände. Geländebeobachtungen und das Ausfallen der *Betula utilis*-Gebüsche im NO-Sektor der Vegetationskarte bestätigen die nördliche Verbreitungsgrenze der Birken in dieser Region.

Bei Betrachtung der Vegetationskarte (Anlage IV) fällt auf, daß die hochmontanen bis subalpinen Laubwälder mit *Betula utilis* ebenso wie die feucht-temperierten Nadelwälder keine geschlossenen Höhenstufen bilden. Wie bereits in der Höhenstufe der von *Picea smithiana* dominierten feucht-temperierten Nadelwälder festgestellt werden konnte, zeigt auch das Auftreten der Birkenwälder eine deutliche Abhängigkeit von der Exposition des Standortes im Relief. Die bei Betrachtung der Karte (Anlage IV) chaotisch erscheinenden Verbreitungsmuster der hygrophilen Waldformationen ordnen sich dem ständigen Wechsel der topographischen Verhältnisse unter, wobei die Kombinationen aus Höhenlage, Exposition und bedingt auch Hangneigung die höhenzonale Ausprägung des Standortklimas modifizieren (vgl. Abb. 26 in Anl. III). Dieses Verbreitungsmuster kann bei allen bisher besprochenen Waldformationen des Untersuchungsgebietes beobachtet werden (Abb. 26 in Anl. III und Anl. IV). Am schwächsten ausgeprägt ist es bei den Steppenwäldern mit *Juniperus macropoda*.

Abb. 26 stellt die mittleren Verhältnisse in dem von der Vegetationskarte abgedeckten Raum dar. Würde man ausschließlich die Verbreitung der Steppenwälder im NO-Sektor der Karte auf ähnliche Weise wie in Abb. 26 darstellen, ergäbe sich für dieses aridere Gebiet ebenfalls eine Häufung der *Juniperus macropoda*-Vorkommen in Nordexpositionen.

3.2.1.6 Subalpines bis alpines Krummholz, Triften, alpine *Cyperaceen*-Matten und Wiesensteppe

Mit einer violetten Signatur wurden in der Vegetationskarte des NW-Karakorum Vorkommen der subalpinen bis alpinen Legwacholder und der Strauchweiden aufgenommen. Das Krummholz schließt sich nicht nur oberhalb der Baumgrenze an die laubwerfenden Wälder und Gebüsche mit *Betula utilis* und auf den Südhängen an die Steppenwälder mit *Juniperus macropoda* an, sondern

steigt in schattigen Rinnen und Lawingassen bis in die montane Stufe der feucht-temperierten Nadelwälder hinab (vgl. Anlage IV, Minapin-Tal).

Aufgrund ihrer typischen Verbreitungsmuster erwies sich die Kartierung der *Juniperus communis*- und *Salix hastata*-Vorkommen als schwierig. Die *Salix*-Bestände sind unter dem Einfluß der Beweidung häufig stark verbissen und ragen kaum über die krautreichen alpinen Matten und subalpinen Triften hinaus. Sie sind auf die feuchtesten Standorte der alpinen und subalpinen Stufe beschränkt. Die fleckenhafte Auflösung der *Juniperus communis*-Teppichsträucher im Gelände führte bei der Aufnahme von Trainingsgebieten und bei der Klassifizierung durch Mischpixelbildung häufig zu Problemen.

Auch die zuverlässige Unterscheidung baumförmiger und (oberhalb der Baumgrenze) Teppichsträucher bildender *Juniperus macropoda* war auf der Basis spektraler Information allein nicht möglich. Ein typisches Verbreitungsmuster subalpiner bis alpiner Legwacholder zeigt Photo 7 aus einem Seitental des Minapin-Gletschers.

In 2900 m Höhe auf einem NW-exponierten, 33° geneigten Hang konnten dichte Triften mit 100 % Deckungsgrad beobachtet werden. Neben *Carex cardiolepis*, *Rheum spec.* und *Artemisia maritima* traten vereinzelt *Salix hastata*, und *Juniperus communis* auf. *Cicer microphyllum*, die Walderdbeere *Fragaria nubicola*, eine Minze, *Thymus spec.*, *Bergenia spec.* und *Bistorta affinis* waren häufiger. Im Minapin-Gebiet wurden in 3650 m Höhe *Juniperus communis*, *Gentiana tianschanica*, *Bistorta affinis*, *Leontopodium leontopodium*, *Cousinia thomsonii*, *Artemisia spec.*, *Taraxacum officinale*, *Nepeta discolor* und *Oxytropis lapponica* gefunden (vgl. Photo 8).

Etwas unterhalb des Standortes war *Salix hastata* verbreitet.

Wie bereits in Kap. 3.2.1 erwähnt, war eine Unterscheidung der montanen bis subalpinen Triften und der alpinen *Cyperaceen*-Matten auf der Grundlage spektraler Information nicht möglich. Sie wurden daher in der Vegetationskarte zusammengefaßt und mit einer hellblauen Signatur wiedergegeben (Anlage IV). Die Wiesensteppen, die einen deutlich höheren Deckungsgrad als die *Artemisia*-Steppen der tieferen Lagen aufweisen, sind der hygrothermisch günstigen Situation entsprechend in einem kräftigen Grünton dargestellt. Sie treten vorwiegend im nordöstlichen Sektor der Vegetationskarte auf. Nach Befunden von MIEHE et al. (1993) dominieren hier Gräser der Gattungen *Elymus*, *Festuca*, *Poa*, verschiedene *Cyperaceen*, sukkulente *Crassulaceen* sowie *Potentilla gelida*, *Nepeta discolor*, *Oxytropis lapponica* und *Geranium pratense*.

In der alpinen Stufe sind im südwestlichen von der Vegetationskarte abgedeckten Teil des Untersuchungsgebietes *Cobresia*-Matten verbreitet, die sich mit zunehmender nördlicher Breite und Aridität in Cluster auflösen. Im oberen Hunza-Tal fallen sie nahezu vollständig aus (Anlage IV). *Bistorta affinis* bildet unmittelbar östlich des Minapin-Tales an den nordexponierten Talflanken des Hunza in Höhen zwischen 3600 und 4000 m ausgedehnte Matten. Kleinere Bestände konnten auch im oberen Teil des Shishpar-Gletschertals beobachtet werden. MIEHE et al. (1993) erwähnen aus dieser Höhenstufe *Gentiana tianschanica*, *Pedicularis cheilanthifolia* und *Swertia petiolata*.

Die *Cobresia*-Matten beginnen sich in Höhen von 4300 m aufzulösen. Oberhalb schließen sich die typischen Lebensformen und Arten der subnivalen Stufe an, deren Lebensraum durch eine deutlich

reduzierte Vegetationsperiode charakterisiert ist. MIEHE et al. (1993) erwähnen polsterförmige Hemikryptophyten wie *Sibbaldia tetrandra*, Rizom-Hemikryptophyten (*Corydalis crassissima* und *Lagotis globosa*) und Rosettenpflanzen der Gattungen *Saussurea*, *Saxifraga* und *Waldheimia*.

3.2.1.7 Vergleichende Diskussion der Vegetationskarte NW-Karakorum

Bevor in Kap. 3.2.2 die Zusammenhänge zwischen dem Geländeklima, der Topographie und den Pflanzenformationen herausgearbeitet werden, sollen zunächst die unterschiedlichen Randbedingungen und Restriktionen aufgezeigt werden, die für die Vegetationskartierung aus Satellitendaten und für eine manuelle Kartierung der Vegetation gültig sind.

Anhand eines Vergleichs der aus digitalen Satellitendaten erzeugten Vegetationskarte mit den manuell angelegten Vegetationskarten des Nanga Parbat-Gebirgsstocks (TROLL 1939) und des Hunza-Karakorum (PAFFEN et al. 1956) lassen sich die Nachteile und die Vorteile der Kartenherstellung aus Raster-Fernerkundungsdaten herleiten. Zu diesem Zweck wurde in Abb. 27 (in Anl. II) die aus digitalen Satellitendaten abgeleitete Vegetationskarte des NW-Karakorum einer manuell angelegten Karte aus PAFFEN et al. (1956) gegenübergestellt. Die Karten zeigen denselben Ausschnitt aus dem mittleren Hunza-Tal. Die Legende zur Satellitenbildkarte kann der Anlage IV entnommen werden.

Nachteile der computergestützten Kartierung aus Fernerkundungsdaten liegen zum überwiegenden Teil in der kartographischen Umsetzung und Präsentation der Ergebnisse.

Während in den auf manuellem Weg erstellten Karten von TROLL und PAFFEN neben der Farbgebung zahlreiche Signaturen und Schraffuren zur Differenzierung des Karteninhaltes und zur Darstellung natürlicher Kontinua genutzt werden konnten (TROLL 1939, PAFFEN et al. 1956), muß bei der Kartenherstellung aus Fernerkundungsdaten im Rasterformat auf den Einsatz von Signaturen im kartographischen Sinn weitgehend verzichtet werden.

Dies liegt im wesentlichen an der Diskretisierung der Information in den einzelnen Bildelementen durch das Aufnahme- und Auswertungsverfahren und bedeutet, daß prinzipiell keine kontinuierlichen Übergänge zwischen Vegetationsformationen erfasst werden können, da bei der Klassifizierung die Bildelemente einer konkreten Vegetationsformation zugewiesen werden (Anlage IV und Abb. 27 in Anl. II).

Miteinander verzahnte Vegetationsformationen oder eine zunehmende räumliche Verdichtung einer bestimmten Waldformation sind jedoch auch in den Karten aus Fernerkundungsdaten zu erkennen (vgl. Verbreitung der Steppenwälder Anlage IV). Kartographische Probleme ergeben sich, wenn räumlich stark durchmischte Pixel unterschiedlicher Klassen zu einem größerflächigen Mischtyp zusammengefaßt werden sollen, oder wenn, wie in Abb. 27 (Beispiel PAFFEN et al. (1956), *Juniperus*-Waldsteppe auf *Artemisia*-Steppe) überschichtete Information durch Flächenfarbe und Signatur dargestellt werden soll.

So kann beispielsweise auch die Durchmischung zwischen den laubwerfenden Wäldern und Gebüschern mit *Betula utilis* und den feucht-temperierten Nadelwäldern, die TROLL (1939) in der Vege-

tationskarte des Nanga Parbat durch Schraffuren hervorhebt, in der aus Rasterdaten erzeugten Vegetationskarte des NW-Karakorum nicht dargestellt werden (vgl. auch Anlage IV).

In seiner Vegetationskarte des Hunza-Karakorum stellt PAFFEN die Verbreitung der Wald- und Gebüschformationen durch Symbole dar (Abb. 27 in Anl. II). Die mit der Höhe kontinuierlich zunehmende Dichte der *Juniperus*-Bestände ist in der stark generalisierten Karte durch unterschiedlich dichte Punktmuster angedeutet. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit aus Satellitenbildern erzeugte Vegetationskarte (Anlage IV) gibt die Verbreitung von *Juniperus macropoda* ebenfalls als ein mit der Höhe an Dichte zunehmendes Punktmuster wieder. Problematisch ist allerdings, daß die an ihrer unteren Verbreitungsgrenze noch sehr lichten Steppenwälder kein zuverlässig interpretierbares Signal im Satellitenbild erzeugen und daher bei der Klassifizierung nicht vollständig erfaßt werden konnten.

Eine weitere kartographische Randbedingung bei der Vegetationskartierung aus Satellitendaten ergibt sich aus der auf eine unterschiedliche Farbgebung eingeschränkten Signatur.

Die in der Vegetationskarte des Nanga Parbat ausgezeichnet gelungene Wiedergabe der hydrothermischen Verhältnisse im Raum durch entsprechende Farbgebung und die Darstellung und Differenzierung der xeromorpheren Waldtypen durch Signaturen kann in die Rasterkarte nicht ohne weiteres übernommen werden (Abb. 27 in Anl. II und Anlage IV). Aus diesen Gründen entspricht die Farbwahl in der Karte nicht vollständig den ökologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet.

Bei der Definition der Farbskala wurden großflächig auftretenden Bedeckungsarten und Vegetationsformationen helle ungesättigte Farben zugeordnet, deren Ton je nach feucht-kühlen oder trocken-warmen Standortverhältnissen variiert wurde. Um die gestreut auftretenden Waldformationen hervorzuheben, wurden gesättigte Farben gewählt, die keinen Zusammenhang mit den Standortverhältnissen implizieren.

Ungeklärt ist bisher, wie weitgehend bei einer computergestützten Vegetationskartierung aus Satellitendaten mit hinlänglicher Genauigkeit thematisch differenziert werden kann. Einige auswertungsmethodische Randbedingungen, die für die Beantwortung dieser Frage wichtig sind, wurden bereits in Kap. 2.1.3 und Kap. 2.1.3.1 diskutiert. Zusätzliche Beschränkungen entstehen durch die reduzierte räumliche Auflösung der Daten und durch die Lage der Spektralkanäle, die bei den meisten operationellen Satellitensystemen einen Kompromiß zwischen verschiedenen thematischen Kartierungsschwerpunkten darstellen. In jedem Fall bilden die kleinräumig alternierenden Vegetationsmuster im Hochgebirge einen Grenzfall zuverlässig kartierbarer vegetationsgeographischer Einheiten aus Satellitendaten. Allerdings erscheint es gesichert, daß aus den Daten des LANDSAT-5-TM selbst im Hochgebirge eine Differenzierung des Pflanzenkleides auf Formationsebene mit hinreichender Genauigkeit möglich ist (vgl. Legende in der Anlage IV und Abb. 27 in Anl. II, Beispiel aus PAFFEN et al. 1956).

Ein wesentlicher Vorteil der computergestützten vegetationsgeographischen Kartierung aus Satellitendaten ist die statistische Qualitätsbeurteilung der durchgeführten Kartierung. Die rechnergestützten Auswertungsmethoden erlauben eine Genauigkeitsabschätzung der Befunde, die bisher bei manuellen Vegetationskartierungen nicht möglich war (Tab. 6 und Anlage IV). Weitere Vorteile der

Vegetationskartierung aus Satellitendaten liegen in der hohen Lagepräzision der Befunde und in der Nachvollziehbarkeit der Kartierungsmethode.

Die schlechte kartographische Generalisierbarkeit von Satellitenbildkarten ist im Hinblick auf die Lagegenauigkeit der Befunde ein Vorteil. Beim Vergleich der beiden Karten in Abb. 27 (Anlage II) fällt das unruhige Bild der aus den LANDSAT-5-TM-Daten erzeugten Vegetationskarte auf. Das Beispiel aus PAFFEN et al. (1956) hingegen zeigt eine ruhige Linienführung und klare Abgrenzung der einzelnen Formationen (Abb. 27). Geländebegehungen und Vergleiche der Vegetationskarten mit photographischen Feldaufnahmen ließen erkennen, daß die Lagegenauigkeit der ausgewiesenen Formationsklassen in den beiden Vegetationskarten so unterschiedlich ist, daß nur ein oberflächlicher Vergleich der beiden Karten sinnvoll ist. Während die Karte von PAFFEN einen generalisierten, an der Differenzierung der Hauptflanken ausgerichteten Eindruck von der Vegetationsverteilung im Raum gibt, zeigt der aus Satellitendaten erstellte Kartenausschnitt die entscheidend durch das Kleinrelief modifizierte Vegetationsverbreitung (Abb. 27 in Anl. II).

Auch hinsichtlich der Gewichtung der ausgewiesenen Vegetationsformationen bestehen erhebliche Abweichungen zwischen den beiden Karten. Während in der Vegetationskarte bei PAFFEN et al. (1956) die Verbreitung der feucht-temperierten Nadelwälder durch die Ausweisung großer geschlossener Bestände an der Rakaposhi-Nordflanke hervorgehoben wird, ist die Verbreitung der *Betula utilis*-Wälder nur untergeordnet wiedergegeben.

Dies entspricht nicht den tatsächlichen Gegebenheiten. Sowohl die Feldbefunde als auch die Vegetationskartierung aus Satellitendaten ergaben für die Rakaposhi-Nordflanke ein deutliches Überwiegen der subalpinen Laubwälder und -gebüsch mit *Betula utilis*. Feucht-temperierte Nadelwälder treten hier nur in relativ kleinflächigen Beständen in Nordexpositionen auf (Anlage IV und Abb. 27 in Anl. II).

Aufgrund der Generalisierung in der Karte bei PAFFEN et al. (1956), die zum Teil ein verzerrtes Bild von der Vegetationsverteilung gibt, erhebt sich die Frage, inwieweit mit derartigen Karten statistische Untersuchungen zur Verbreitung einzelner Vegetationsformationen durchgeführt werden können. Ohne dieses Problem erschöpfend zu diskutieren, ist darauf hinzuweisen, daß auch bei der statistischen Auswertung der Vegetationskartierung aus Satellitendaten Fehler durch Fehlklassifikationen und Restklaffungen bei der Geokorrektur auftraten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Kartierung von Vegetationsformationen aus Satellitenbildern erhebliche Vorteile gegenüber manuellen Kartierungen aufweist. Die Methode ist nachvollziehbar und die Ergebnisse sind somit überprüfbar. Die Lagegenauigkeit der Befunde ist gegenüber den zumeist generalisierten, manuell gefertigten Vegetationskarten hoch, was im Zusammenhang mit der möglichen Fehlerabschätzung eine verbreitungsstatistische Auswertung der Karten erlaubt. Größere Flächen können kostengünstig und zeitsparend kartiert werden.

3.2.2 Landschaftsökologische Analyse des räumlichen Verbreitungsmusters der Vegetationsformationen

Im folgenden soll die Verbreitung der Vegetationsformationen des Untersuchungsgebietes im Kontext mit der geländeklimatischen Differenzierung des Raumes betrachtet werden.

Wie aus Abb. 24 (ergänzt nach WEIERS 1995) hervorgeht, nehmen die Niederschläge auf einem etwa SSW-NNO gerichteten Profil deutlich ab. Insbesondere die Himalaya-Hauptkette, die die Stationen Chilas im Indus-Tal und Naran im Kaghan-Tal trennt, ist eine markante Klimascheide, die sich vorwiegend auf die Ergiebigkeit der monsonalen Sommerniederschläge auswirkt (WEIERS 1995). Fallen in Naran auf einer Höhe von 2360 m ü. NN noch 1210 mm Jahresniederschlag, so repräsentiert Chilas auf 1260 m Höhe im Indus-Tal gelegen mit 187 mm Jahresniederschlag bereits gut die Trockenheit der Talböden nördlich der Himalaya-Hauptkette. Von Chilas aus im Indus-, Gilgit- und Hunza-Tal nordwärts nehmen die Niederschläge weiter ab.

Gilgit, an der Mündung des Hunza- in den Gilgit-River gelegen und etwa die Südgrenze des eigentlichen Untersuchungsgebietes markierend, weist noch Niederschläge von 132 mm/a auf. In Nomal im unteren Hunza-Tal werden nur noch 98 mm/a gemessen. Diese Angaben belegen die von WEIERS (1995) großräumig berechnete Zunahme der Aridität in nordöstlicher Richtung.

Der Trend einer generellen Niederschlagsabnahme in nordöstlicher Richtung wird überlagert von einer Niederschlagszunahme mit der Höhe. Belegt wird dies durch die in Abb. 24 dargestellten Niederschlagssummen der benachbarten Stationen Nomal und Naltar sowie Gilgit und Diran, die neben weiteren Stationen von CRAMER im Bagrot-Tal eingerichtet und betreut wurden (CRAMER 1994).

Während im unteren Hunza-Tal an der Station Nomal in 1830 m Höhe 98 mm Jahresniederschlag fallen, weist die benachbarte Station Naltar in 2280 m Höhe bereits einen Niederschlag von 358 mm auf. An der Station Diran im obern Bagrot-Tal fallen in 4100 m Höhe 750 mm Niederschlag/a. Auf der Grundlage der Daten amtlicher meteorologischer Stationen und kürzerer Meßreihen aus vereinzelt wissenschaftlichen Arbeiten errechnete WEIERS (1995) mittlere Niederschlags- und Temperaturgradienten, die durch die Arbeiten von CRAMER im Bagrot (CRAMER 1994) bestätigt werden konnten. Abb. 26 (in Anl. III) gibt die mittleren Niederschlags- und Temperaturgradienten für das von der Vegetationskarte abgedeckte Untersuchungsgebiet wieder. Zusätzlich wurden die Hauptvegetationsformationen mit ihrer mittleren Höhenlage eingetragen.

Von grundlegender Bedeutung für die vertikale Verteilung der Vegetation ist die Tatsache, daß Niederschlag und Temperatur sich bei veränderter Höhenlage gegenläufig verhalten. Betrachtet man in Abb. 26 (Anl. III) die Extrembereiche des Höhenprofils, die Talböden und die Gipffluren, und vergleicht die klimatischen Eigenschaften der beiden Höhenstufen, so liegt der Gedanke an eine untere Trockengrenze und eine obere Kältengrenze des Pflanzenwuchses nahe.

DEPENDENCY OF NDVI FORM SLOPE - ASPECT AND ELEVATION IN THE CENTRAL HUNZA-VALLEY

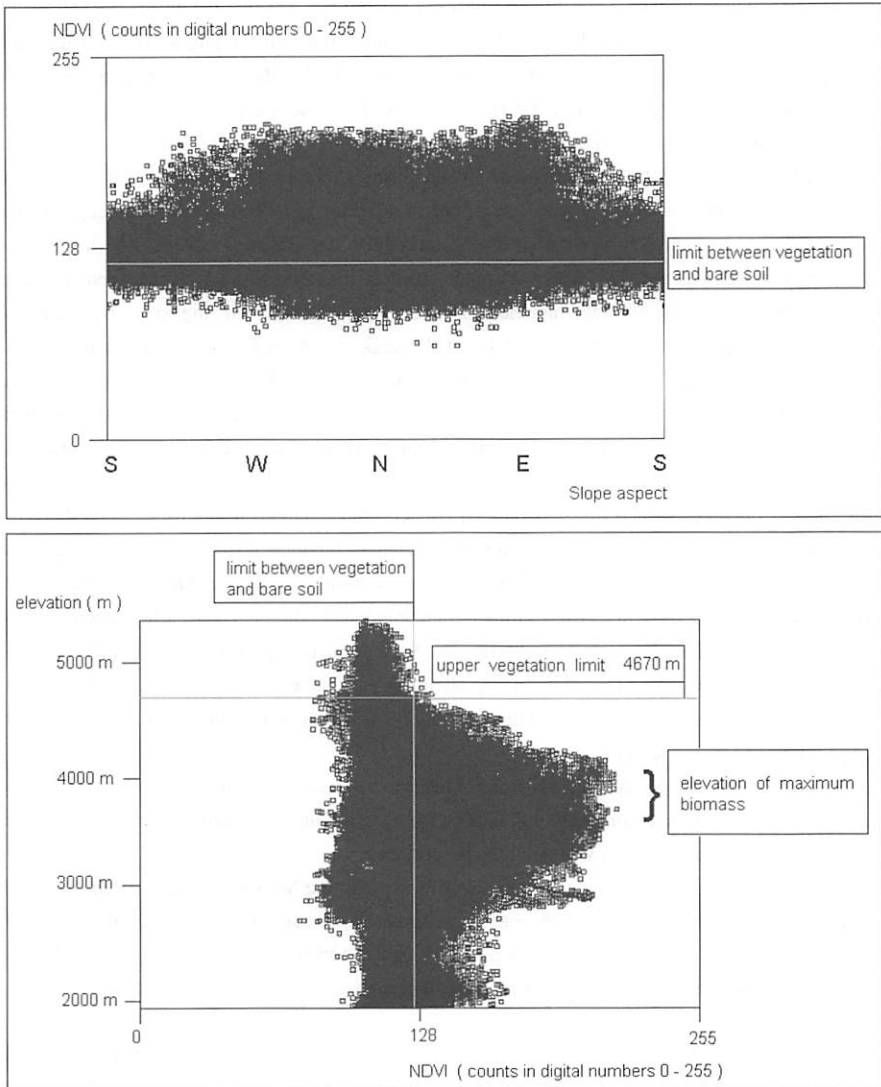


Abb. 28: Höhen- und Expositionsabhängigkeit des NDVI, berechnet für den NW-Karakorum auf der Basis der LANDSAT-5-TM-Szene vom 6.7.1990 und dem DHM

Fig. 28: Dependency of NDVI on altitude and aspect, calculated for the NW-Karakorum from LANDSAT-5-TM-data (6.6.1990) and a DTM

Die Berechnung des NDVI aus Satellitendaten und die Untersuchung der Signalstärke in Relation zur Höhenlage der Bildelemente (vgl. GERSTL 1990, PRINCE 1990, KANEMASU 1990 und Kap. 2.1.4.5) belegen eine Abnahme der grünen Biomasse sowohl mit Annäherung an die trocken-heiße, von der *Chenopodiaceen*-Steppe besetzte Talstufe, als auch mit Annäherung an die kalt-feuchten Hochlagen (Abb. 28). Aus Abb. 28 ergibt sich ein Maximum der Biomasse in Höhen von 3000-4000 m ü. NN, was in etwa der mittleren Höhenlage der feucht-temperierten Nadelwälder und der montanen bis subalpinen laubwerfenden Wälder mit *Betula utilis* entspricht.

Die aus der Analyse des NDVI resultierende Höhenabhängigkeit der Biomasse (Abb. 28) ergibt für den NW-Karakorum eine obere Vegetationsgrenze in 4670 m, in guter Übereinstimmung mit den Feldbeobachtungen. Daten zur jahreszeitlichen Variabilität der Biomassenproduktion sind kaum verfügbar. Von RAM et al.(1988) liegen Angaben aus dem zentralen Himalaya für Höhen zwischen 3250 und 4000 m vor. Die höchsten täglichen Zuwachsraten traten dort im August auf und betragen 4,2 g/m². Zusätzlich ist in Abb. 28 der NDVI in Abhängigkeit von der Exposition im Relief wiedergegeben. Das Diagramm zeigt niedrige Werte in Südexposition und hohe Werte des biomasseäquivalenten NDVI in West-, Nord- und Ostexpositionen und belegt somit nicht nur eine Abhängigkeit der Wuchsbedingungen der Pflanzen von der Höhe, sondern auch von der Exposition der Standorte.

Aufgrund des oben beschriebenen, horizontalen Niederschlagsgradienten modifiziert sich das Verhältnis zwischen Niederschlag und Temperatur in den unterschiedlichen Höhenstufen entlang des in Kapitel 3.1.3 vorgestellten S-N-Profiles. Die Veränderung dieser für die Vegetationsverbreitung auf Formationsebene wohl bedeutsamsten klimatischen Parameter, die sich vermutlich auch auf die Bodenfeuchte auswirken, kann als Ursache für das Ausfallen einzelner Formationen auf dem S-N-Profil herangezogen werden. Dies betrifft vor allem die nördliche Verbreitungsgrenze der feucht-temperierten Nadelwälder mit *Picea smithiana* und *Pinus wallichiana*, die im Hunza-Tal an der Rakaposhi-Nordflanke erreicht wird.

Die subalpinen Laubwälder mit *Betula utilis* reichen etwas weiter in die Karakorum-Hauptkette hinein. Zonal treten sie noch oberhalb von Gulmit im oberen Hunza auf, azonale wurden sie in Boibar nördlich des Batura-Tales an Wasserläufen beschrieben.

Bei Betrachtung des Satellitenbildes in Abb. 25 (Anl. II), fällt die Strukturierung des Raumes durch die Flußläufe und die kleinräumig wirksame Kammerung durch das extreme Hochgebirgsrelief auf. Der kleinräumige Wechsel unterschiedlich geneigter und exponierter Flächen in allen Höhenstufen modifiziert das zonale Standortklima und führt zur fliesenartigen Auflösung und Streuung der Vegetationsformationen im Raum.

Nachfolgend soll die klimabedingte Vegetationszonierung im Höhenprofil anhand eines Modelltalskessels von der Talstufe im Zentrum zu den hohen Lagen am Rand des Diagramms veranschaulicht werden (Abb. 29). Vergleicht man in Abb. 29 das Räummuster, das durch die unterschiedlichen Expositionen der Flächen entsteht, mit dem Verbreitungsmuster im Ausschnitt aus der Vegetationskarte, so fallen deutliche Übereinstimmungen auf.

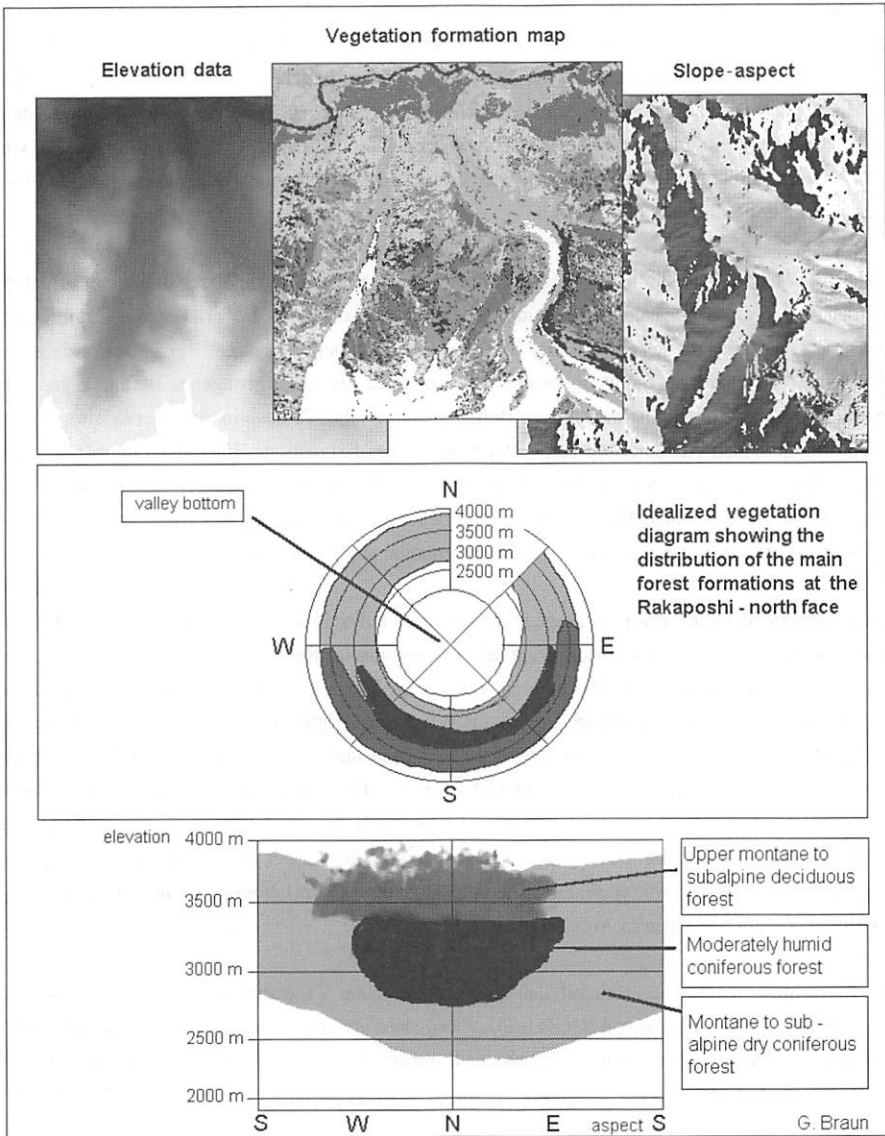


Abb. 29: Digitale Vegetationskarte mit Höhen und Expositionsinformation und die Abstraktion der Raummuster der Vegetationsverbreitung in einem Modelltalkessel

Fig. 29: Digital vegetation map, DEM and slope aspect as information basis for interpreting the spatial pattern of vegetation in a valley model

Topoklimatisch kommt der Hangrichtung (und Neigung) in dem strahlungsreichen, rand- bis subtropischen Hochgebirgsraum eine hohe Bedeutung zu, so daß die Einbeziehung der Exposition in die Untersuchung des Raummusters der Vegetation eine weitergehende, höhenunabhängige Differenzierung ermöglicht. Die Ursachen dieser standortklimatischen Differenzierung liegen in dem unterschiedlichen Strahlungsempfang verschieden geneigter und exponierter Flächen im Raum, von dem weitere klimaökologische Faktoren wie Temperatur, Evaporation, Windgeschwindigkeit und Ausaperung der Schneedecke abhängen.

Höhe ü. NN und Exposition der Flächen können folglich als topographische Faktoren aufgefaßt werden, die klimaökologische Information integrieren und zu einem großen Teil das Raummuster der Vegetationsformationen erklären. Abb. 29 zeigt die räumliche Lage der Vegetationsformationen in einem Modelltalkessel, die weitgehend mit den im Feld zusammengetragenen Befunden zur Formationsverbreitung übereinstimmt. Diese Befunde sind in Abb. 29 auch in einer veränderten, leicht zu interpretierenden Fassung dargestellt. Die Abszisse des Expositions-Höhendiagramms (Abb. 29, unten) repräsentiert die unterschiedliche Exposition, die Ordinate die Höhenlage der Formation. Auf diese Weise kann aus dem Diagramm für jede beliebige Kombination aus Höhe und Exposition eines Standortes die entsprechende Vegetationsformation abgelesen werden.

Die integrierte Wirkung von Höhenlage und Exposition auf die topoklimatischen Eigenschaften der Relieffliesen und somit auch auf die Vegetationsverteilung im Raum variiert das Standortklima in einem hygrothermischen Feld. Die unteren Verbreitungsgrenzen der Vegetationsformationen können als Trockengrenzen, die oberen Grenzen als Wärmemangelgrenzen aufgefaßt werden, wobei für die feucht-temperierten Nadelwälder mit *Picea smithiana* und teilweise *Pinus wallichiana* die anhaltende Schneebedeckung und die damit verbundene Gefahr von Pilzbefall eine weitere Ursache der oberen Verbreitungsgrenze darstellen könnte. Die Exposition variiert in konstanter Höhe primär die Humidität der Standorte. Südexponierte Lagen sind deutlich arider als in gleicher Höhe liegende nordexponierte Flächen, was auch durch die unterschiedliche Vegetationsanordnung auf generell S- oder N-exponierten Flächen in Abb. 26 (Anl. IV) belegt wird.

Bei Betrachtung der Abb. 29 fällt auf, daß die Verbreitung der Vegetationsformationen, insbesondere der Waldformationen, die von *Betula utilis*, *Picea smithiana* und *Juniperus macropoda* dominiert werden, eine leichte Asymmetrie bezüglich der Exposition zeigt. Die Abweichungen von dem vorgestellten Modell der Vegetationsverbreitung und ihre Ursachen sollen im folgenden erläutert werden.

Die leichte Verschiebung der feucht-temperierten Nadelwälder und der subalpinen Laubwälder und Gebüsche mit *Betula utilis* zu den Nordwestexpositionen (Abb. 29) beruht vermutlich auf den markanten Tagesgängen der Bewölkung im Untersuchungsgebiet (CRAMER 1994, SCHMIDT 1993, WEIERS 1995). Die in den Sommermonaten stark ausgeprägte Hangwindzirkulation führt zu einer verstärkten Wolkenbildung am Nachmittag. (vgl. Abb. 30).

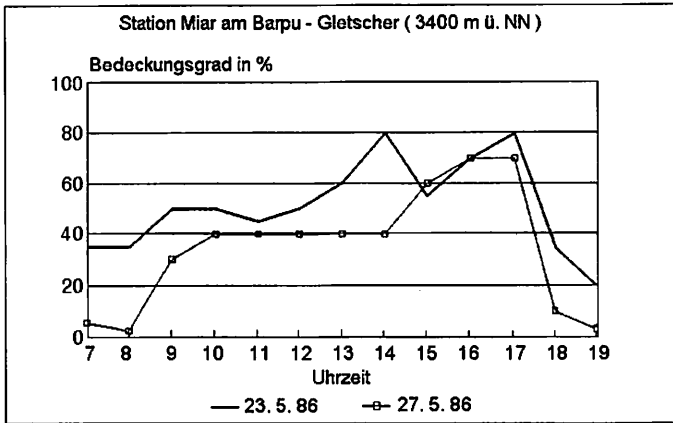


Abb. 30: Tagesgang der Bewölkung an der Station Miar am Barpu-Gletscher (nach WEIERS 1995)

Fig. 30: Daily variation of summer cloudiness at Miar, Barpu glacier (from WEIERS 1995)

Dadurch wird die nachmittägliche Einstrahlung auf westexponierte Hänge deutlich gedämpft und die Austrocknung der Standorte reduziert. Die Wirkung auf das Pflanzenkleid erfolgt wahrscheinlich über eine verzögerte Ausaperung der winterlichen Schneedecke und somit über eine Verbesserung der Wasserbilanz der Pflanzen während der Vegetationsperiode. Ein markantes Beispiel für die Wirkung lokal konstanter Bewölkung auf die Vegetationsverbreitung gibt TROLL (1939): In dem SSO exponierten Talkessel oberhalb von Gor (nördl. Nanga Parbat im Indus-Tal) liegen auf Höhen bis zu 3800 m Nadelmischwälder mit *Picea* (verm. *P. smithiana*) und *Pinus spec.*. Die Obergrenze der Wälder fällt mit der Obergrenze recht konstanter Staubewölkung in ca. 3800 m zusammen. Die Waldgrenze in diesem südexponierten Kessel wird nicht wie in den Nordexpositionen von *Betula utilis* gebildet, sondern oberhalb der Wolken tritt *Juniperus spec.* auf.

Aus diesem Beispiel wird deutlich, daß die Reduktion der direkten Einstrahlung auf die Hänge zu einer wesentlichen Verbesserung der hygrischen Standortbedingungen führen kann. Allerdings wird die direkte Einstrahlung, die ein Standort im Relief empfängt, nicht nur durch die topographischen und klimatischen Faktoren Exposition, Hangneigung und Bewölkung modifiziert, sondern es besteht vor allem im Gebirge ein erheblicher Einfluß des wahren Horizonts des Standortes (vgl. Kapitel 2.2.3.1 und 2.2.3.2). Die horizontabhängige Besonnungsdauer und somit die Tagessumme der potentiellen direkten Einstrahlung modifiziert die klimatischen Standortbedingungen und das Pflanzenkleid (BÖHM 1968, TROLL 1972, LANG 1985).

Wie bereits in den Kapiteln 2.2.3.1 und 2.2.3.2 sowie bei DOZIER u. OUTCALT (1979) beschrieben, ist die räumliche Verteilung der potentiellen direkten Einstrahlung rechnerisch gut zu modellie-

ren. In der Arbeit von SCHMIDT (1993) sind Strahlungssummen für den gesamten Untersuchungsraum dargestellt. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich zugunsten der Darstellung der Zusammenhänge zwischen klimatischen Standortbedingungen und der Vegetationsverbreitung auf einige Beispiele aus dem Untersuchungsraum, die im folgenden vorgestellt werden.

Abb. 31 (in Anl. III) zeigt für einen Ausschnitt aus dem zentralen Hunza-Tal den Jahresgang der potentiellen direkten Einstrahlung auf einer Nord-Süd orientierten Profillinie, die das Haupttal schneidet und die südexponierten Anbauflächen Karimabads sowie die nordexponierten Bewässerungsgebiete Nagers umfaßt. Es ist davon auszugehen, daß auf dem kurzen Transekt keine ins Gewicht fallende, räumliche Differenzierung der Strahlung durch die Bewölkung auftritt. Die Farben in der Abbildung entsprechen den täglichen Strahlungssummen in der Legende. Auf den ersten Blick wird deutlich, daß die von einem steilen Hang nach Süden abgeschirmten Flächen Nagers gegenüber den Kulturflächen von Karimabad in den Übergangsjahreszeiten ein Strahlungsdefizit aufweisen. Berücksichtigt man, daß der Raum aufgrund seiner Höhenlage bereits als ein Übergangsbereich zwischen Doppel- und Einfachernte anzusehen ist (KREUTZMANN 1989, WEIERS 1995, CONWAY et al. 1987), kann der unterschiedliche Strahlungsgenuß der beiden Talseiten erhebliche Auswirkungen auf das Anbaurisiko bei dem Versuch der Doppelernte haben.

Hinsichtlich der im Feld zu beobachtenden Erweiterung der Anbauflächen sowohl auf der Nager- als auch auf der Hunza-Seite können aus Abb. 31 (Anl. III) ebenfalls Abschätzungen zur potentiellen Produktivität der Flächen gewonnen werden. Da die Erweiterungen der Anbauflächen nur zum Hang hin möglich sind und durchgeführt werden, bestehen auf der südexponierten Karimabad-Talseite keine Restriktionen hinsichtlich des Strahlungsgenusses. Auf der Nagerseite ist jedoch zu bemerken, daß vor allem der durch neue Feldanlagen erschlossene Unterhang ein erhebliches Defizit an direkter Einstrahlung bis in die Sommermonate hinein aufweist.

Hieraus ergeben sich sicherlich Restriktionen hinsichtlich der Ausreifung einer Folgefrucht.

Das zweite Beispiel (Abb. 32 in Anl. III) beschreibt ebenfalls ein nord-süd orientiertes-Profil im zentralen Hunza. Es setzt auf einem nordexponierten Hang des Minapin-Tales an, quert den Ort Minapin und den Hunza-River und schneidet den südexponierten Gegenhang oberhalb des Ortes Nasirabad. Auch aus diesem Transekt geht die erhebliche Reduktion der potentiell direkten Einstrahlung vor allem in den Übergangsjahreszeiten auf den nordexponierten Hängen hervor. Besonders deutlich wird sie auf den relativ schmalen nordexponierten Hangpartien, die im Gelände mit feucht-temperiertem Nadelwald bestanden sind.

Die höchsten potentiellen Einstrahlungswerte über das gesamte Jahr werden auf den recht steilen südexponierten Hängen oberhalb Nasirabad erreicht. Auch die steil abfallenden, ca. 70 m hohen Terrassenkanten unterhalb des Ortes Nasirabad besitzen einen markanten Strahlungsüberschuß. Es sind wahrscheinlich ideale Weinanbaulagen.

Abb. 33 (in Anl. III) zeigt die potentielle direkte Einstrahlung, wie sie aus den Daten für ein weiteres, nord-süd-orientiertes Profil im Chaprot-Tal extrahiert wurde. Das Transekt schneidet die auf der

nordexponierten Talflanke vorkommenden subalpinen *Betula utilis*-Wälder und -Gebüsche, die feucht-temperierten Nadelwälder und die am Südhang zu beobachtenden *Juniperus macropoda*-Steppenwälder. Deutlich tritt der Gegensatz der Einstrahlung zwischen den mit hygrophilen Formationen bestandenen Nordhängen und dem auf den Südhängen stockenden Steppenwald hervor. Während auf den Nordhängen nur von April bis September hohe Tagessummen zu beobachten sind, weisen die Südhänge fast ganzjährig Tagessummen über 400 [cal/cm²*d] auf.

Aus dem zentralen Hunza-Tal liegen keine Untersuchungen der Böden vor. Da jedoch die Bodenbildung zu einem großen Teil von den hygrothermischen Standortbedingungen abhängt, ist eine relativ höhenzonale Entwicklung zu erwarten. Zumindest ist im Gelände eine Übereinstimmung zwischen der Humusanreicherung, der Verbraunung und der Vegetationszonierung zu beobachten. Bis auf die Lagen oberhalb 3000 m in Südexposition und oberhalb 2600 m in Nordexposition handelt es sich im weitesten Sinne um glimmerreiche Rohböden.

In einigen Lagen im Untersuchungsraum kommt es aufgrund ungünstiger topographischer Bedingungen zu Kaltluftansammlungen. Dies betrifft Beckenlagen in Gletschnähe und Lawingassen mit einer bis in die Sommermonate andauernden Schneeakkumulation, die bereits von TROLL (1939) beschrieben wurde. In diesen Lagen sind häufig Vegetationsinversionen zu beobachten, welche auf die mikroklimatischen Veränderungen des zonalen Klimas zurückzuführen sind. Beckenlagen, insbesondere strahlungsarme Ablationstäler weisen ein azonal feucht-kühles Mikroklima auf, welches ebenfalls zu Vegetationsinversion führen kann (CRAMER 1994).

Schließt man diese geländeklimatischen Sonderstandorte zunächst von der Betrachtung aus, zeigt sich hinsichtlich des potentiell natürlichen, räumlichen Verbreitungsmusters der Vegetationsformationen im Untersuchungsgebiet eine weitgehende Übereinstimmung mit den standortklimatischen Wuchsbedingungen, die durch die raum-zeitliche Differenzierung der Niederschläge, Temperaturen und der Einstrahlung definiert werden können. Von großer Bedeutung scheint die durch die Interferenz von Temperatur und Einstrahlung räumlich differenzierte Schneeschmelze zu sein. Die Ausaperungsmuster variieren erheblich die Bodenwasserbilanz während der Vegetationsperiode und somit die Humidität und Aridität der Standorte (RICHTER 1979). Eine Kartierung der Ausaperungsmuster der Schneedecke aus Satellitendaten oder eine flächendeckende Modellierung der Ausaperung hätte den Rahmen der vorliegenden Arbeit gesprengt.

Im anschließenden Kapitel wird, aufbauend auf den angestellten Überlegungen, eine Theorie zur Rekonstruktion der potentiellen Verbreitung der feucht-temperierten Nadelwälder im Untersuchungsgebiet vorgestellt.

3.3 Ein stochastischer Ansatz zur Modellierung der potentiellen Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Karakorum

3.3.1 Ansätze zur Quantifizierung der Beziehung zwischen Vegetationsverbreitung und Standortfaktoren

Eine umfassende Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Pflanzenverbreitung und Standortfaktoren unternahm ELLENBERG 1950 und 1952 mit der Veröffentlichung der durch H. WALTER maßgeblich geförderten Zusammenstellung der Zeigerwerte von Gefäßpflanzen. Sie liegen inzwischen in einer verbesserten Auflage vor (ELLENBERG et al. 1992). Grundlegender Gedanke dieser Arbeit ist die empirische Ermittlung von Kennziffern, die das ökologische Verhalten einzelner Arten bezüglich unterschiedlicher Standortansprüche charakterisieren.

Im wesentlichen handelt es sich bei den Zeigerwerten ELLENBERGs um die Beschreibung klimatischer und edaphischer Standortfaktoren durch Licht-, Feuchte-, Temperatur-, Kontinentalitäts-, Reaktions-, Salz- und Nährstoffkennziffern. Sie sollen in ihrer Gesamtheit das ökologische Verhalten der einzelnen Arten approximieren. Die Methode ist heute in zahlreichen mitteleuropäischen Ländern anerkannt und wird in der landschaftsökologischen Forschung und Praxis eingesetzt. (PARK 1985, KUHN 1987, LANDOLT 1977, FRANK 1990 u. a.). Die Arbeit mit Zeigerwerten in der Pflanzensoziologie zielt nicht nur auf einzelne Arten, sondern auch auf pflanzensoziologische Aufnahmen ganzer Gesellschaften ab, wobei Kennziffer-Spektren, Mittel- oder Medianwerte die Standortbeurteilung erleichtern und Hinweise auf das physiologisch-ökologische Verhalten der Taxa geben.

Allerdings ist der Ansatz bis in die heutige Zeit nicht unkritisiert geblieben. Bereits WALTER warnte vor einer weiteren Differenzierung bzw. feineren Skalierung der Zeigerwerte, da der Standort, den die Pflanze in der Natur besetzt, nicht zwangsläufig die optimalen Wuchsbedingungen für die Pflanze aufweisen muß. Aufgrund des Einflusses, den konkurrenzstarke Arten auf die Standortwahl der betrachteten Art haben können, unterscheidet WALTER (1983) zwischen dem ökologischen und physiologischen Optimum einer Art (vgl. hierzu auch ELLENBERG 1952).

Er definiert das ökologische Optimum einer Pflanze als den Standortverhältnissen entsprechend, unter denen die Pflanze in der Natur am wüchsigsten und häufigsten anzutreffen ist. Das physiologische Optimum charakterisiert WALTER als die Standortbedingungen, unter denen sich die Pflanze am günstigsten entwickelt. Wie in Abb. 34 gezeigt, kann das ökologische Optimum unter dem Einfluß von konkurrenzstarken Arten deutlich vom physiologischen Optimum der betrachteten Art abweichen.

Steht die Pflanze an ihrem natürlichen Standort in Konkurrenz mit anderen Arten, kann sie auf unterschiedliche Weise aus ihrem physiologischen Optimum verdrängt werden (WALTER 1983). Ist am Standort keine Konkurrenz vorhanden, sind ökologisches und physiologisches Optimum der Pflanze gleich (Abb. 34).

Versuche, die sich nicht ausschließlich mit dem ökologischen Verhalten einzelner Arten, sondern von Pflanzengesellschaften beschäftigen, unternahm PARK (1985) oberhalb der alpinen Waldgrenze. ELLENBERG et al. (1992, S. 61) zeigen ein Diagramm nach PARK (1985), in welchem die

Zeigerwerte Bodenreaktion, Stickstoff und Feuchte einen Merkmalsraum aufspannen und die von PARK aufgenommenen Pflanzengesellschaften in Abhängigkeit ihrer spezifischen Zeigerwerte eingetragen sind. Die untersuchten Pflanzengesellschaften bilden Cluster im Merkmalsraum, die sich deutlich in ihrer Lage im Diagramm unterscheiden (vgl. ELLENBERG et al. 1992, S. 61). Auf diese Weise lassen sich die untersuchten Pflanzengesellschaften anhand ihrer ökologischen Ansprüche unterscheiden.

Kritisch zu den Zeigerwerten ELLENBERGs äußerten sich neben WALTER auch KOWARIK und SEIDLING (1989). Sie verwiesen auf die Gefahr einer Verwechslung der Zeigerwerte mit Meßwerten, betonten jedoch die Nützlichkeit der Zeigerwerte für Untersuchungen, bei denen aus Kosten- oder Zeitgründen keine direkten Messungen der Standortbedingungen vorgenommen werden können. Dies trifft in hohem Maße für die vegetationsgeographische und landschaftsökologische Forschung in außereuropäischen Hochgebirgen zu. Sie entbehrt häufig der Grundlage mikroklimatischer Messungen, edaphischer Befunde und umfassender pflanzensoziologischer Aufnahmen, so daß eine Beurteilung der ökologischen Standortbedingungen der Vegetation schwierig ist. Zusätzlich handelt es sich bei den Untersuchungsräumen zumeist um große und schlecht zugängliche Gebiete, in denen die Aufnahme ökologisch relevanter Befunde kostspielig und zeitaufwendig ist.

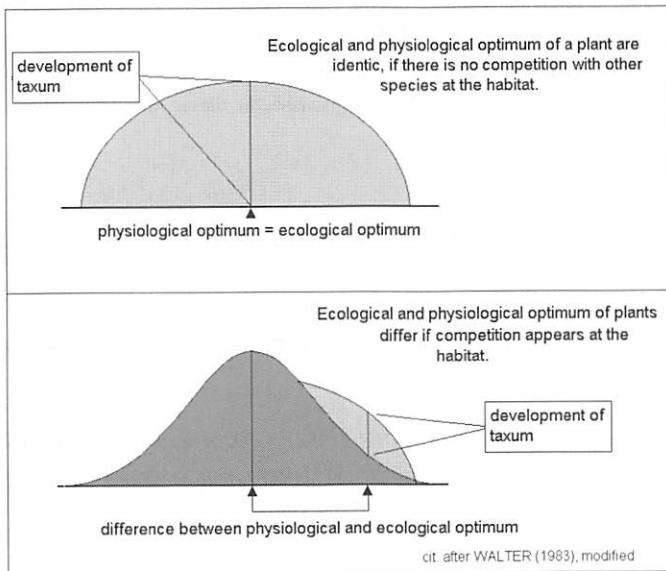


Abb. 34: Wüchsigkeit einer Pflanzenart in Abhängigkeit von ihrem physiologischen und ökologischen Optimum (aus WALTER 1983)

Fig. 34: Development of a plant species in relation to its physiological and ecological growth optimum (from WALTER 1983)

So liegen eingehendere Untersuchungen zur Beziehung zwischen den räumlichen Verbreitungsmustern der Vegetation und der Standortfaktoren in Hochgebirgen häufig nur für kleine Teilräume vor. Beispielhaft sei die Arbeit von RICHTER (1979) im Dschma-Tal genannt, in der die Zusammenhänge zwischen den Ausaperungsmustern der winterlichen Schneedecke und der räumlichen Verbreitung von Pflanzengesellschaften herausgearbeitet wurden. WINIGER (1981) untersuchte die Beziehungen zwischen Vegetationsverbreitung, Niederschlag und Temperatur für den Mount Kenya. Interdependenzen zwischen Einstrahlung, Bodentemperaturen und dem Verbreitungsmuster mikrothermer Wälder in Verbindung mit der räumlichen Differenzierung der Bodentemperaturen in den Hochanden Boliviens wurden von BRAUN (1988) beschrieben.

Zeigen sich bereits bezüglich der Verbreitung von Einzelpflanzen und Pflanzengesellschaften deutliche Zusammenhänge mit klimatischen und edaphischen Standorteigenschaften, so gilt dies insbesondere für die nach physiognomisch-ökologischen Gesichtspunkten klassifizierten Vegetationsformationen im Sinne ELLENBERG's und MUELLER-DOMBOIS' (1967). Eine quantitative Untersuchung der offensichtlichen Beziehungen zwischen der Verbreitung von Vegetationsformationen und der räumlichen Differenzierung klimatischer Bedingungen im Hochgebirge unternahm HORMANN (1980). Er untersuchte die hygrothermischen Grenz- und Mittelwerte von Vegetationsformationen in Nepal auf der Grundlage modellierter Niederschlags- und Temperaturkarten. Die wesentliche Kritik an dem Ansatz bezog sich zum einen auf die Genauigkeit der klimatischen Modellrechnungen, zum anderen auf fehlende Überlegungen zur Einstrahlungsdifferenzierung im Relief. Als ein wesentliches Problem erwähnt HORMANN selbst, eine genügend große Zahl an Vegetationsbefunden mit ausreichender Lagegenauigkeit in die Untersuchung einzubringen (mdl. Mitt.). Einige dieser Kritikpunkte können mit der Vorgehensweise, die dieser Arbeit zugrunde liegt, ausgeräumt werden.

- Durch die Nutzung von Satellitendaten kann eine sehr große Zahl von Vegetationsbefunden in die Auswertung einbezogen werden.
- Die Geokorrektur der Vegetationskarte bietet eine deutlich verbesserte Lagegenauigkeit der Befunde.
- Die in der Arbeit von HORMANN (1980) nicht berücksichtigte Einstrahlung wird räumlich differenziert in die vorliegende Untersuchung einbezogen. Ihre Modellierung auf der Basis von Höhe, Exposition und Horizontüberhöhung wurde bereits in Kap. 2.2.3 beschrieben.

3.3.2 Die Verbreitungsmerkmale feucht-temperierter Nadelwälder, montan bis subalpiner Laubwälder mit *Betula utilis* und der Steppenwälder im Landschaftsmodell

Im folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, in dem unter Nutzung eines raumbezogenen Informationssystems die Zusammenhänge zwischen dem komplexen Raummuster einiger Vegetationsformationen im NW-Karakorum und modellierten Standortfaktoren untersucht werden. Hierbei werden die Beziehungen zwischen hygrothermischen Standortbedingungen und der Höhe im Gebirge genutzt und darüber hinaus eine Differenzierung der hygrothermischen Standortbedingungen je nach Exposition an die Berechnungen der potentiell direkten Einstrahlung geknüpft.

Durch die ausgeprägte morphologische Gliederung des Gebirges und den hierdurch bedingten kleinräumigen Wechsel von Exposition und Hangneigung wird die Höhenstufung der Vegetation erheblich modifiziert (BRAUN 1992, BRAUN und WINIGER 1992, WEIERS 1995, KLÖTZLI u. a. 1989, CRAMER 1994, TROLL 1939, PAFFEN et al. 1956, REPP 1963, MIEHE et al. 1993). Die Beziehungen zwischen der Hangexposition und dem Mikroklima und die Auswirkungen auf den Pflanzenwuchs im Hochgebirge beschreiben JUNGHANS 1969, GEIGER 1961, MIEHE 1984, BRAUN u. WINIGER 1992).

Die räumlich differenzierte Einstrahlung, die die Oberflächentemperaturen sowie die Boden- und Luftfeuchte beeinflusst, führt im Hochgebirge zu einer fliesenartigen Auflösung der Höhenzonierung der Vegetationsformationen, die sich in den aus Satellitendaten gewonnenen Vegetationskarten eindrucksvoll widerspiegelt (vgl. Anlage IV). Sekundäre Einflüsse wie Quellhorizonte, Kaltluftabfluß und -stau, die die höhen- und expositionsabhängige Verbreitung der Vegetation kleinräumig modifizieren, wurden zunächst nicht berücksichtigt, da ihre Modellierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit noch nicht möglich war. Auch fehlten detaillierte Informationen zur Geologie und zu den Böden im Untersuchungsgebiet.

Durch die geometrische Korrektur der Vegetationskarte konnte ein räumlicher Bezug zwischen der aus den LANDSAT-Daten kartierten Vegetation und dem digitalen Geländemodell hergestellt werden. Da die Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung und des Niederschlags auf der Grundlage des DHM durchgeführt wurde, konnten für alle Standorte einer Vegetationsformation neben Angaben zur Höhe und zur Exposition auch topoklimatische und klimatische Befunde zur potentiellen direkten Einstrahlung und zum Niederschlag gewonnen werden (zur Modellierung des Niederschlags und der Monatsmittel der Temperatur vgl. WEIERS 1995).

Die Abb. 35, 36 und 37 zeigen die Ergebnisse der mit einem GIS durchgeführten Verbreitungsanalyse der Waldformationen im NW-Karakorum. Die Verbreitung der feucht-temperierten Nadelwälder (Abb. 35), der Laubwälder mit *Betula utilis* (Abb. 36) und der Steppenwälder und Waldsteppen (Abb. 37) wurde in Abhängigkeit von den oben genannten topographischen und topoklimatischen Faktoren untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Häufigkeiten ermittelt, mit denen ein topographischer oder klimatischer Faktor an den Standorten einer Vegetationsformation beobachtet werden kann, und als Histogramm graphisch wiedergegeben (Abb. 35, 36, 37).

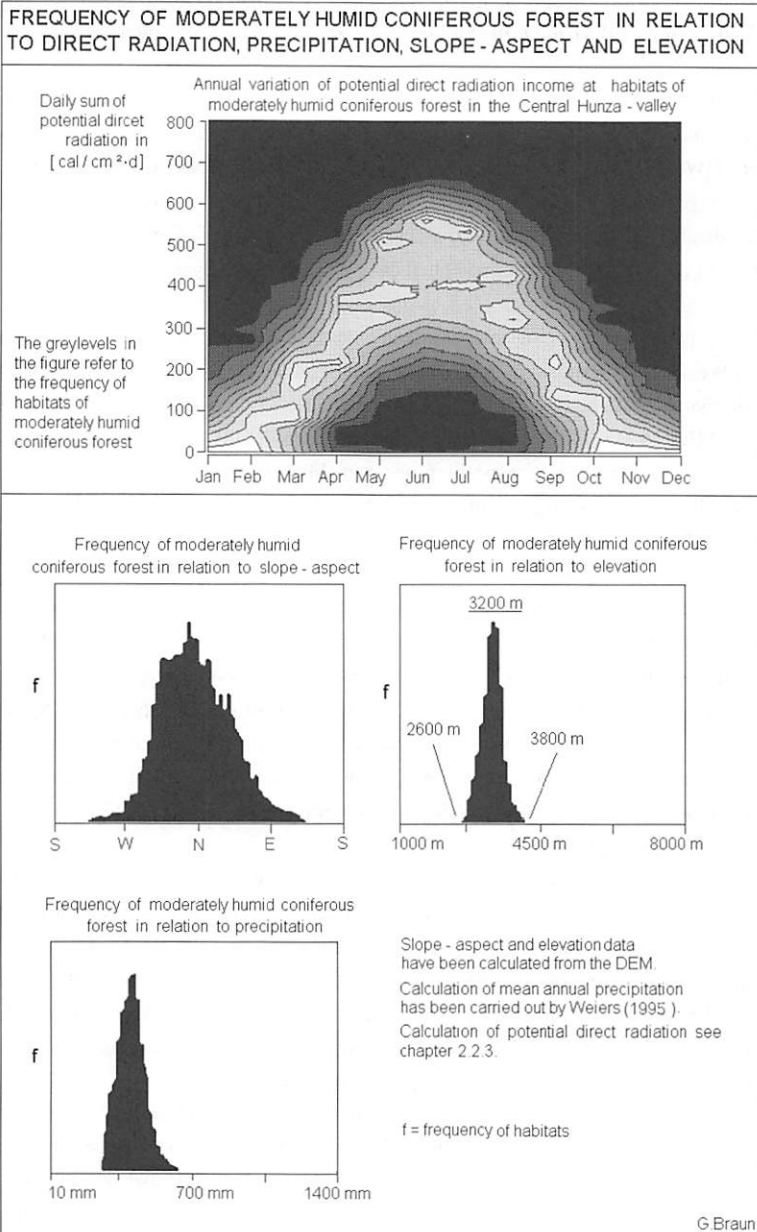


Abb. 35: Beziehung zwischen der Häufigkeit des Auftretens feucht-temperierter Nadelwälder und unterschiedlichen Standortfaktoren im Hunza-Tal

Fig. 35: Relation between the distribution frequency of moderately humid coniferous forest and various habitat conditions in the Hunza-valley

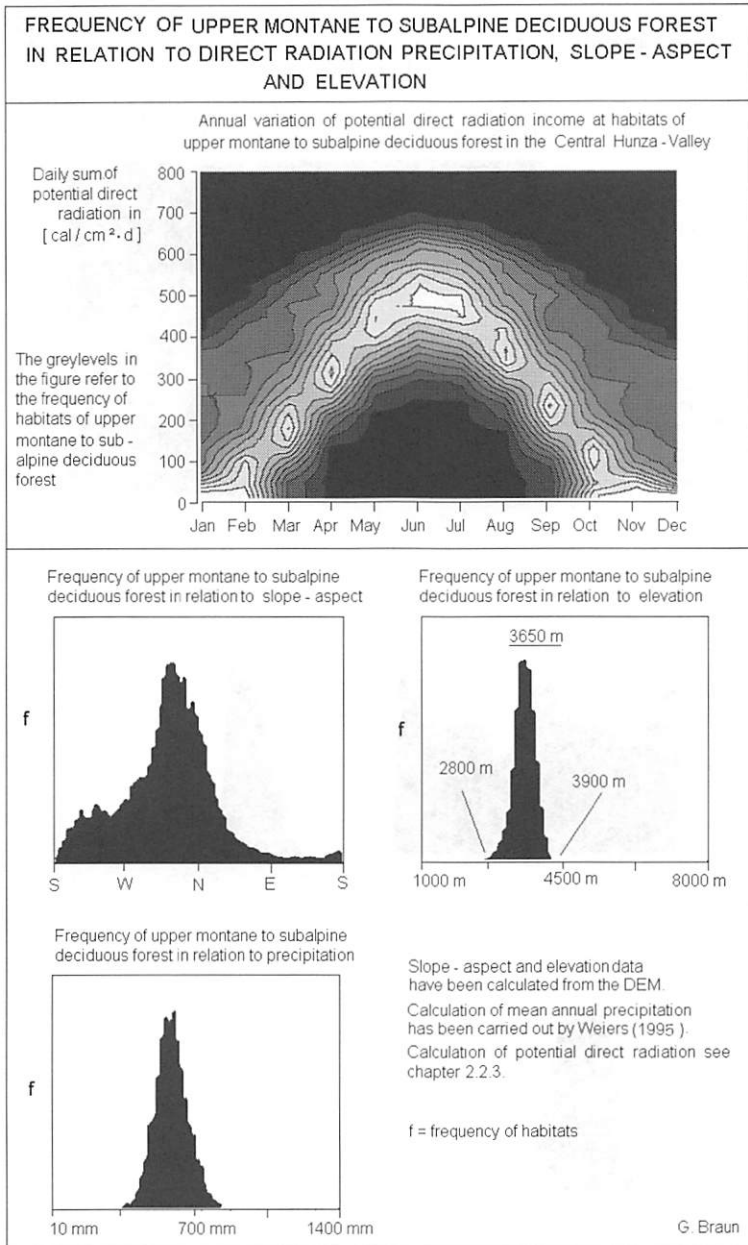


Abb. 36: Beziehung zwischen der Häufigkeit des Auftretens hochmontaner bis subalpiner Laubwälder und unterschiedlichen Standortfaktoren im Hunza-Tal

Fig. 36: Relation between the distribution frequency of upper montane to subalpine deciduous forest and various habitat conditions in the Hunza-valley

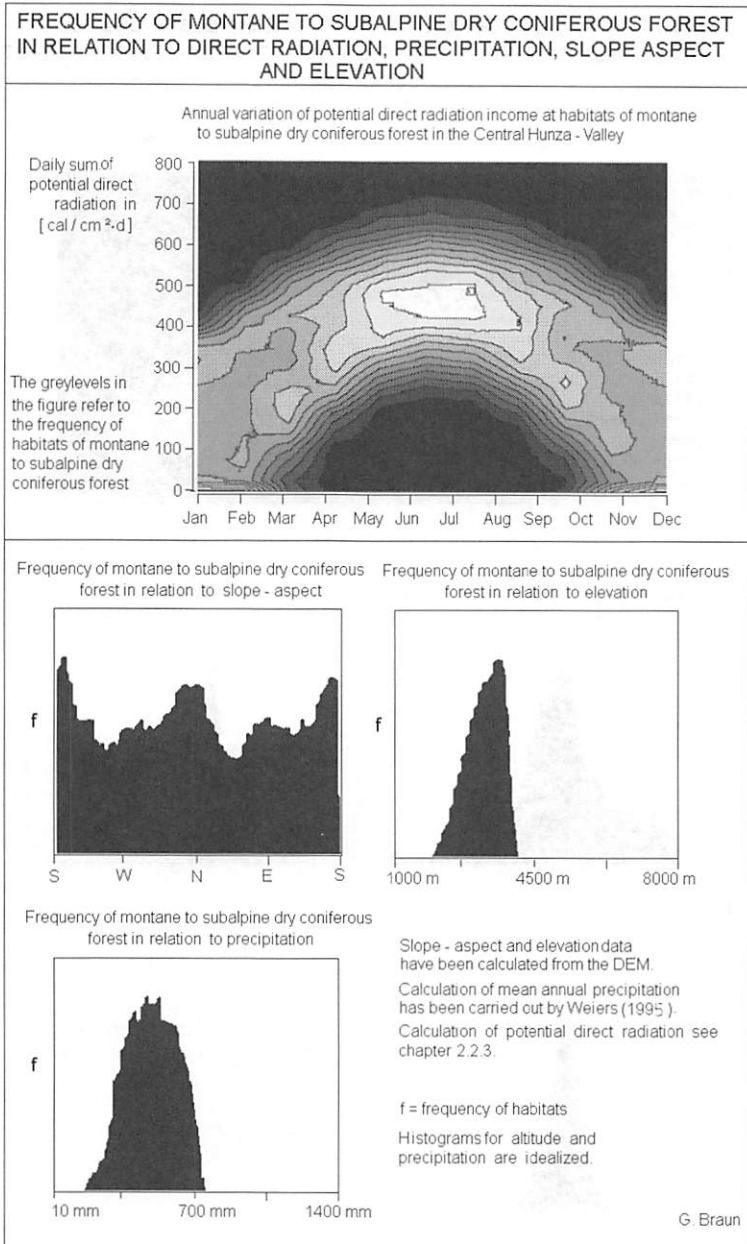


Abb. 37: Beziehung zwischen der Häufigkeit des Auftretens montaner bis subalpiner Waldsteppe und Steppenwälder und unterschiedlichen Standortfaktoren im Hunza-Tal

Fig. 37: Relation between the distribution frequency of montane to subalpine dry coniferous forest and various habitat conditions in the Hunza-valley

Zur Darstellung der jahreszeitlichen Variabilität der potentiellen direkten Einstrahlung an den Standorten der Vegetationsformationen wurden die Häufigkeiten in Graustufen skaliert, wobei hohe Werte hellen Tönen und niedrige Werte dunklen Tönen entsprechen.

Anhand von Abb. 35 kann eine Charakterisierung der klimatischen und topographischen Standortbedingungen des feucht-temperierten Nadelwaldes im Untersuchungsgebiet vorgenommen werden. Die Diagramme zeigen die Ausprägung und die Häufigkeit, mit der die Standortfaktoren Einstrahlung, Höhe und Exposition an den einzelnen Waldflächen auftreten (Abb. 35). Es wird deutlich, daß die oberen und unteren Verbreitungsgrenzen der Formation, die aus dem GIS errechnet wurden, gut mit den Felderhebungen übereinstimmen. Der Mittelwert der annähernd normalverteilten Daten für die Höhe der feucht-temperierten Nadelwälder liegt bei 3200 m. Auch ist eine deutliche Verschiebung der von den Beständen bevorzugten Exposition nach NW festzustellen, was sich ebenfalls mit den Feldbefunden deckt.

Vergleicht man die Verteilung der feucht-temperierten Nadelwälder in Abhängigkeit von der Höhe und Exposition ihrer Standorte (Abb. 35) mit der Verteilung der Birkenwälder in Abb. 36, fällt auf, daß sich die Verbreitungsgrenzen der Formationen überlagern. Die untere Grenze der laubwerfenden Wälder mit *Betula utilis* befindet sich weit in der Verbreitungshöhenstufe der feucht-temperierten Nadelwälder mit *Picea smithiana*. Diese höhenabhängige Verzahnung ist teilweise auf das bereits von TROLL (1939) und PAFFEN et al. (1956) angesprochene und in Kap. 3.2.2 diskutierte Absteigen der Vegetation höherer Lagen in Lawingassen und kaltluftbeeinflussten Bereichen zurückzuführen. Darüber hinaus ist im Feld eine deutliche Durchdringung und Durchmischung der Arten an der Höhengrenze zwischen feucht-temperiertem Nadelwald und den laubwerfenden Wäldern mit *Betula utilis* festzustellen, die sich in der höhenbezogenen Auswertung der Formationsverbreitung aus Satellitenbildkarten und digitalen Geländemodellen widerspiegelt.

Komplexer sind die Zusammenhänge zwischen der potentiellen direkten Einstrahlung und der Verbreitung der feucht-temperierten Nadelwälder (Abb. 35, oben). Die Ordinate des Diagramms entspricht den Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung in $[\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{d}]$, die Abszisse weist eine Einteilung nach Monaten auf. Die Häufigkeit der Fichtenbestände wurde in Graustufen skaliert, wobei in den schwarzen Bereichen des Diagrammes keine Fichtenbestände mehr auftreten.

Das Diagramm zeigt die reduzierte Einstrahlung an den Standorten dieser Formation während des Winters und die allmähliche Zu- und Abnahme der potentiellen direkten Einstrahlung während der Übergangsjahreszeiten. Aus Abb. 36 kann die Situation an den Standorten der Laubwälder mit *Betula utilis* entnommen werden, Abb. 37 zeigt die potentielle direkte Einstrahlung an den Standorten der Steppenwälder und Waldsteppen mit *Juniperus macropoda* in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Auffallend sind die beim Vergleich der Diagramme zu beobachtenden unterschiedlichen zeitlichen Verläufe der Einstrahlung an den Standorten. Während an den Standorten der feucht-temperierten Nadelwälder (Abb. 35) in den Übergangsjahreszeiten und im Winter niedrige tägliche Einstrahlungssummen um $250 [\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{d}]$ dominieren, treten an den Standorten der laubwerfenden Wälder mit *Betula utilis* (Abb. 36) Werte um $300 [\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{d}]$ auf. Darüber hinaus kann den Diagrammen entnommen werden, daß die Abweichung vom Mittelwert der potentiellen direkten Einstrahlung an

den Standorten der feucht-temperierten Nadelwälder im Sommer größer ist als an den Standorten der laubwerfenden Wälder mit *Betula utilis*. In den Wintermonaten kehrt sich das Verhältnis um (Abb. 35 und 36).

Die größten Unterschiede hinsichtlich der potentiellen direkten Einstrahlung an den Standorten der Waldformationen sind jedoch bei einem Vergleich der hygrophileren Formationen (feucht-temperierter Nadelwald und laubwerfende Wälder und Gebüsche mit *Betula utilis*) mit den Steppenwäldern festzustellen (Abb. 35, 36 und 37). Selbst in den Wintermonaten können an den Standorten der Steppenwälder mit *Juniperus macropoda* mittlere tägliche Einstrahlungssummen von 300 [cal/cm²*d] festgestellt werden, die an den Standorten der hygrophileren Formationen nicht erreicht werden. In den Sommermonaten liegt die Einstrahlung an den Standorten dieser Formation bei 450 [cal/cm²*d].

Von besonderem Interesse für die Standortdifferenzierung ist daher zum einen das von den Formationen besetzte Höhenintervall, zum anderen die Einstrahlung an den Standorten in den Übergangsjahreszeiten. Die den Abb. 35, 36 und 37 zugrundeliegenden Ergebnisse legen im Zusammenhang mit den Feldbefunden den Schluß nahe, daß durch das langsame Ansteigen der Einstrahlung auf den nordexponierten Lagen die winterliche Schneedecke verzögert abschmilzt, und daß somit den hygri-sch anspruchsvolleren Vegetationsformationen eine verbesserte Wasserbilanz zur Verfügung steht als den in Südlagen verbreiteten Steppenwäldern (vgl. auch TROLL 1939).

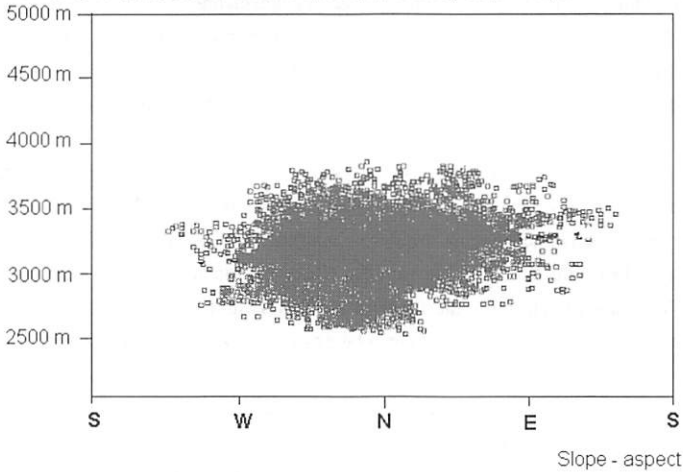
3.3.3 Interpretation und Bedeutung 2-dimensionaler Streuungsdiagramme zur Rekonstruktion der potentiellen Verbreitungsgrenzen feucht-temperierter Nadelwälder

Die Zusammenhänge zwischen der topoklimatischen Differenzierung des Untersuchungsraumes und der Verbreitung der Waldformationen sollen anhand 2-dimensionaler Verbreitungsdiagramme eingehender untersucht werden. Abb. 38 zeigt ein 2-dimensionales Diagramm, das zur Abstraktion der Verbreitungsmuster feucht-temperierter Nadelwälder im Untersuchungsgebiet angelegt wurde. Die Ordinate des Diagramms repräsentiert die Höhe der Formationsstandorte ü. NN, die Abszisse die Exposition der Vorkommen.

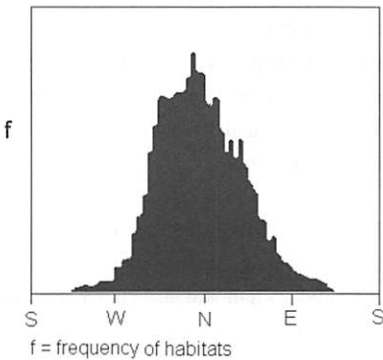
Von wesentlicher Bedeutung für die Interpretation der Verbreitung der Formation im Relief ist zunächst die Ausprägung ihrer Verbreitungsgrenzen in den verschiedenen Expositionen (Abb. 38). Das Ansteigen der Formationsuntergrenze zu den West- und Ostexpositionen hin steht im Zusammenhang mit der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität der direkten Einstrahlung (Abb. 38). Im Frühjahr führt der erhöhte Anteil der Einstrahlung in den tieferen Lagen der West- und Ostexpositionen zu einem schnelleren Abtauen der Schneedecke als in Nordexpositionen und somit zu einer ungünstigeren Wasserbilanz dieser Standorte in den Sommermonaten. Auf diese Weise differenziert die Strahlungsgunst oder -ungunst der Expositionen in Wechselwirkung mit den vertikalen Temperaturgradienten (Kap. 3.2.2) das räumliche Ausaperungsmuster und bewirkt die unterschiedliche Humidität der Standorte.

AMPLITUDE AND FREQUENCY OF MODERATELY HUMID CONIFEROUS FOREST IN THE HUNZA-KARAKORUM IN RELATION TO ALTITUDE AND SLOPE - ASPECT

Elevation Scattergram showing the distribution of moderately humid coniferous forest in a 2 - dimensional feature space, spread by slope - aspect and elevation.



Frequency of moderately humid coniferous forest in relation to slope - aspect



Frequency of moderately humid coniferous forest in relation to elevation

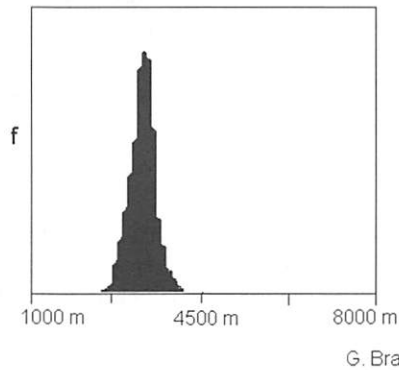


Abb. 38: Zweidimensionales Verbreitungsdiagramm der feucht-temperierten Nadelwälder im Hunza-Karakorum in Abhängigkeit von Höhe und Exposition der Standorte

Fig. 38: 2-dimensional distribution diagram of moderately humid coniferous forest in the Hunza-Karakorum depending on latitude and slope aspect

Die Verbreitungsgrenze der feucht-temperierten Nadelwälder besitzt zur W- und O-Exposition hin eine unterschiedliche Physiognomie (Abb. 38). Die Untergrenze der Formation steigt von der N- zur O-Exposition hin relativ stetig an. Die Vorkommen werden mit Annäherung an die Ostexposition seltener und fallen keilförmig um 3500 m aus. Das Ausklingen der Formation gegen die W-Expositionen hingegen ist nicht allein durch eine Anhebung der Untergrenze, sondern auch durch eine leichte Absenkung der oberen Verbreitungsgrenze gekennzeichnet. Dadurch entsteht gegen die W-Expositionen hin eine stumpfe, konvexe Verbreitungsgrenze in etwa 3200 m Höhe. Vermutlich drücken sich in diesem Verbreitungsmuster die zeitlich differenzierten Bewölkungsverhältnisse im Hunza-Karakorum aus (zum Bewölkungsgang vgl. auch LISTER und PENDLINGTON in JAMES 1968, Fig. 1.9).

Im Verbreitungsdiagramm der feucht-temperierten Nadelwälder ist zu erkennen, daß die untere Verbreitungsgrenze zu den Ostexpositionen hin stärker ansteigt als zu den Westexpositionen (Abb. 38, oben). Diese leichte Asymmetrie kann mit der nachmittäglichen Konvektionsbewölkung in Zusammenhang stehen. Der hohe Strahlungsgewinn der Ostexpositionen im Herbst könnte - während die eigentlichen Westlagen noch durch die nachmittäglich verstärkte Bewölkung etwas günstigere hygrische Verhältnisse aufweisen - in den Ostlagen bereits zu Trockenstreß der Vegetation führen.

Aufgrund der Überlegung, daß die W-Expositionen gegenüber den O-Expositionen in gleicher Höhenlage hygrisch etwas günstigere Bedingungen aufweisen, könnten das leichte Absinken der oberen Verbreitungsgrenze der Formation im Westen und die konstante Höhe der Obergrenze nach Osten auf relative Standortkonstanz der feucht-temperierten Nadelwälder bezüglich ihrer Verbreitung im Relief hinweisen.

Zusätzlich zu dem 2-dimensionalen Verbreitungsdiagramm werden in Abb. 38 eindimensionale Histogramme der feucht-temperierten Nadelwälder in Abhängigkeit von Höhe und Exposition ihrer Standorte gezeigt. Sie sollen in Ergänzung zu dem 2-dimensionalen Diagramm (Abb. 38, oben) eine Vorstellung von der Häufigkeit geben, mit der die beiden topographischen Parameter an den Standorten der Formation zu beobachten sind. Wie den Histogrammen zu entnehmen, liegt sowohl in Abhängigkeit von der Höhe als auch von der Exposition Normalverteilung um den Mittelwert mit unterschiedlichen Streuungen vor. Insgesamt wurden 6633 Standorte der Waldformation untersucht. Sie entsprechen 0,0029 % der Gesamtfläche des betrachteten Gebietes.

Mit den Angaben zum Mittelwert der expositionsabhängigen (NNW) und der höhenabhängigen (3200 m) Häufigkeitsverteilung kann der Verbreitungsschwerpunkt der Formation festgelegt werden (Abb. 38). Er läßt sich als das topoklimatische bzw. ökologische Optimum hinsichtlich der Verbreitung im untersuchten Raum interpretieren, wobei den möglichen Verschiebungen durch Konkurrenz mit anderen Formationen und somit der Untersuchung des physiologischen Optimums der Formation im Sinne WALTERs (1983) im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht nachgegangen werden konnte. Es wäre jedoch ein interessanter Versuch, die in WALTER (1983) für Konkurrenz zwischen einzelnen Taxa beschriebenen Verdrängungsformen auf die Daten der vorliegenden Arbeit zu übertragen.

Faßt man die oben angestellten Überlegungen zusammen, so ergibt sich für die Verbreitung der Waldformationen im Untersuchungsgebiet ein recht deutliches Bild ihrer Abhängigkeit von topoklimatischen Standortfaktoren.

- Das in Abb. 38 gezeigte Häufigkeitscluster des feucht-temperierten Nadelwaldes in einem orthogonalen Koordinatensystem zeigt sowohl in Abhängigkeit von der Höhe als auch von der Exposition annähernd Normalverteilung.
- Die Ober- und Untergrenzen sowie die Grenzen der Formation zu den strahlungsreicheren Expositionen entsprechen den im Feld gesammelten Daten. Diese Befunde lassen auch Rückschlüsse auf die Klassifizierungsgenauigkeit und die Güte der Geokorrektur zu.
- Die Überschneidungsbereiche unmittelbar benachbarter Formationen sind hinlänglich mit Durchdringung, Verzahnung und der Ausbildung von Ökotonen erklärbar.

Dies führt zu weiteren Überlegungen, die die aktuelle und potentielle Verbreitung der Waldformationen im Untersuchungsraum betreffen.

Die oben vorgestellten Auswertungen sowie die Daten, die Abb. 38 zugrunde liegen, beziehen sich auf den gesamten Untersuchungsraum und die in ihm vorkommenden Standorte feucht-temperierter Nadelwälder. Dies bedeutet, daß bei der Betrachtung der vertikalen und expositionsabhängigen Verbreitung der Waldformation die Gesamtheit aller im Gebiet vorkommenden Standorte aufgrund der Satellitenbilddauswertung in die Analyse einbezogen wurde.

Obwohl es sich bei der Satellitenbilddauswertung um eine Kartierung der aktuellen Verbreitung der Waldbestände und nicht um eine Aufnahme der potentiell natürlichen Waldstandorte handelt, kann die Stichprobe, die in einem klimaökologisch homogenen Raum gezogen wurde, annähernd die potentiell natürliche Verbreitung der Waldformationen im Hunza-Karakorum repräsentieren. Diese auf den ersten Blick widersprüchliche These soll im Folgenden begründet werden.

Abb. 39 zeigt zweidimensionale Verbreitungsdiagramme der feucht-temperierten Nadelwälder in verschiedenen kleineren Tälern des Untersuchungsgebietes. Betrachtet man die Verteilung der feucht-temperierten Nadelwälder in den für kleinere Räume erstellten Diagrammen (Abb. 39), so fällt zum einen die Lückenhaftigkeit, zum anderen die unregelmäßige Form der Verteilungen auf. Der Auswertung für das Minapin/Pisan-Gebiet liegen 378 Standorte zugrunde, dem Diagramm für das Chaprot-Tal 1749 Standorte. Die Anzahl der in die Auswertung einbezogenen Standorte ist natürlich deutlich kleiner als die Standortzahl, die dem Diagramm für das Gesamtgebiet zugrundeliegt (Abb. 38).

Die zusätzlich gezeigten Histogramme beziehen sich in Abb. 39 nicht auf die Höhe und die Exposition der Waldformation, sondern sollen die vollständige Verteilung der topographischen Parameter Höhe und Exposition im Relief der beiden Testräume wiedergeben.

In den 2-dimensionalen Verbreitungsdiagrammen zeigen sich sowohl im Chaprot-Tal als auch im Minapin/Pisan-Gebiet deutliche Verbreitungslücken (Abb. 39). Die ebenfalls dargestellten Verteilungen der Expositionen und Höhenstufen in den entsprechenden Teilgebieten engen die möglichen Ursachen für die lückenhafte Waldbedeckung ein.

Das unregelmäßige Ausfallen der feucht-temperierten Nadelwälder kann nicht mit dem Fehlen der entsprechenden Kombinationen aus Höhe und Hangneigung im Relief der Teilgebiete erklärt werden, da die entsprechenden Klassen, wie den Histogrammen zu entnehmen, gut besetzt sind. Sowohl im Minapin/Pisan-Gebiet als auch im Chaprot-Tal erreichen die feucht-temperierten Nadelwälder nicht geschlossen die aus dem Streuungsdiagramm für das Gesamtgebiet hervorgehende untere Verbreitungsgrenze bei 2600 m (Abb. 38 und 39).

Insbesondere im Minapin/Pisan-Gebiet ist die räumliche Verteilung des Waldes sehr gestreut. In nahezu allen Expositionen-Höhenkombinationen, die in Abb. 38 gut besetzt sind, treten bei der Analyse kleiner Teilgebiete deutliche Lücken auf (Abb. 39). Während der Feldarbeiten durchgeführte Befragungen legen den Schluß nahe, daß vor allem im Minapin-Tal die Lückenhaftigkeit der feucht-temperierten Nadelwälder auf eine intensive Nutzung durch die ansässige Bevölkerung während der Errichtung des Karakorum Highway zurückzuführen ist. Die aus Pakistan und China stammenden Arbeiter erhandelten bei der Bevölkerung des Tales Holzkohle, die zum Kochen und Heizen benötigt wurde.

Obwohl die Bestände im Minapin-Tal die nordöstliche Trockengrenze der feucht-temperierten Nadelwälder im Untersuchungsgebiet repräsentieren, kann in dieser Lage und im benachbarten Pisan-Tal ein intensiver Jungwuchs von *Picea smithiana* an der unteren Waldgrenze beobachtet werden. Auch eine Konzentrierung der Bestände auf ökologisch-physiologisch optimale Standorte ist weder aufgrund der Feldbefunde noch bei der Untersuchung der Verbreitungsdiagramme festzustellen (Abb. 39). Vielmehr existieren deutliche Hinweise auf eine fortschreitende Auflichtung und Verschiebung der unteren Waldgrenze, die sowohl im Minapin- als auch im Chaprot-Tal in unmittelbarer Nähe der Sommersiedlungen liegt.

Die Unregelmäßigkeit des Ausfallens der feucht-temperierten Nadelwälder in den Streuungsdiagrammen der Teilgebiete (Abb. 39) schließt auch lokalklimatische Ursachen weitgehend aus, da in diesem Falle Ordnungsprinzipien erkennbar wären, wie sie weiter oben bereits im Zusammenhang mit der unteren Verbreitungsgrenze diskutiert wurden. Entweder wurden die Wälder in diesen Bereichen durch Lawinen, Steinschläge oder andere Massenbewegungen zerstört, oder die unregelmäßig angeordneten Verbreitungslücken in den feucht-temperierten Nadelwäldern sind auf anthropozogene Einflüsse zurückzuführen.

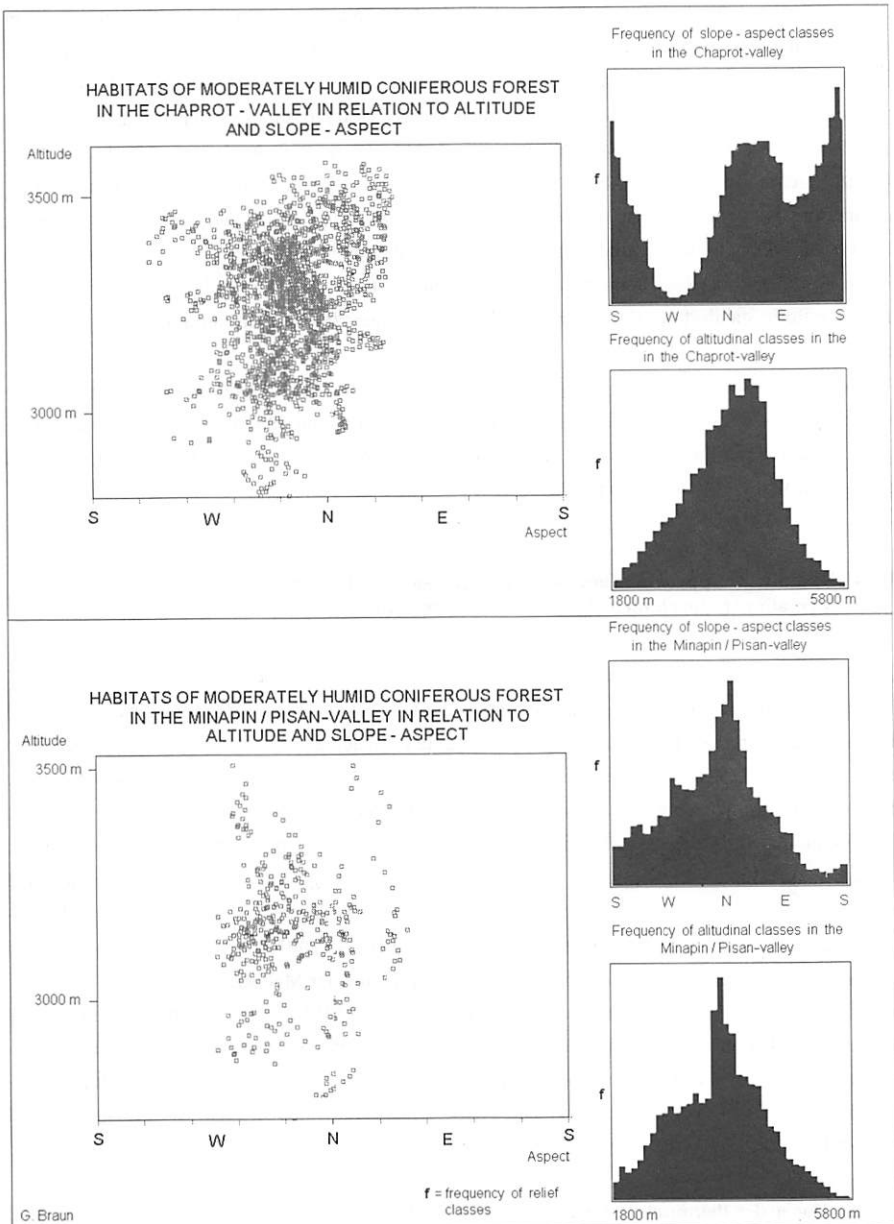


Abb. 39: zweidimensionale Verbreitungsdiagramme der feucht-temperierten Nadelwälder in zwei kleineren Testräumen in Abhängigkeit von Exposition und Höhe der Standorte

Fig. 39 Scattergrams showing the distribution of moderately humid coniferous forest for 2 small test areas in a 2-dimensional feature space spread by slopeaspect and elevation

Die angestellten Überlegungen zur Lückenhaftigkeit der Wälder in den Verbreitungsdiagrammen kleiner Teilgebiete und zur regelmäßigen, ökologisch-physiologisch begründbaren Anordnung bei Betrachtung des Verbreitungsdiagrammes des gesamten, klimaökologisch homogenen Raumes führen zu dem Schluß, daß sich bei der Untersuchung des Gesamtgebietes die primär anthropogenen Einflüsse verwischen. Die große Zahl von Standorten, die bei der Analyse der Verbreitung der Waldformation in einem 2-dimensionalen Höhen-Expositionsdiagramm berücksichtigt wird, schließt die anthropozoogenen Verbreitungslücken, die bei der Untersuchung kleiner Teilgebiete so deutlich auffallen (Abb. 38 und 39). Je größer die Stichprobe in einem klimatisch homogenen Raum gewählt wird, desto homogener die Verteilung und desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß auch Reliktstandorte an den natürlichen Verbreitungsgrenzen der Formation in die Analyse einbezogen werden.

Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, die potentiellen Verbreitungsgrenzen der feucht-temperierten Nadelwälder im Hunza-Karakorum modellhaft zu approximieren, wobei die Integration der Analysen in ein GIS erlaubt, den Raumbezug des Standortclusters (Abb. 38) der potentiell natürlichen Waldverbreitung wiederherzustellen.

3.3.4 Räumliche Approximation ökologisch-physiologischer Optimalstandorte von Waldformationen durch mehrdimensionale Normalverteilung

Das in Abb. 38 dargestellte Streudiagramm sowie die Histogramme zeigen sowohl die Verbreitungsgrenzen als auch die Häufigkeit, mit der feucht-temperierte Nadelwälder in Abhängigkeit von der Exposition und der Höhe ihrer Standorte auftreten. Inwieweit sind aber diese topographischen Parameter in der Lage, die eigentlichen klimatischen Standortbedingungen zu repräsentieren, die das Verbreitungsmuster der feucht-temperierten Nadelwälder im Raum verursachen?

Im wesentlichen handelt es sich bei diesen Standortbedingungen um Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Windgeschwindigkeit, Einstrahlung und die Vegetationsperiode. Temperatur und Niederschlag sind, wie bereits festgestellt und in Abb. 40 wiedergegeben, in erster Linie höhenabhängig und besitzen einen ausgeprägten Jahresgang. WEIERS (1995) zeigt, daß Niederschlag und Temperatur bei einer ausreichenden Stationsdichte und Länge der Meßperioden kleinmaßstäbig zuverlässig interpolierbar sind. Auf eine Integration der von WEIERS berechneten Temperatur- und Niederschlagskarten in die räumliche Auswertung der Standortbedingungen wurde jedoch verzichtet, da die vertikalen Temperatur- und Niederschlagsgradienten durch die Höhe ü. NN implizit berücksichtigt wurden (vgl. Temperatur- und Niederschlagsgradienten in Abb. 26, Anlage III, und Abb. 40).

Für die Dauer der thermischen Vegetationsperiode gibt LARCHER (1984) als ein einfaches Maß einen Schwellenwert von 5 °C des Tagesmittels der Lufttemperatur an. In Abb. 40 wurden in ein Altoisothermendiagramm, welches den Jahresgang der Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Höhe zeigt, die durch den Schwellenwert LARCHERs markierte Vegetationsperiode sowie die Ober- und Untergrenze der feucht-temperierten Nadelwälder eingetragen. An der oberen Verbreitungsgrenze der feucht-temperierten Nadelwälder im Hunza-Karakorum beträgt die Dauer der thermi-

schen Vegetationsperiode ca. 135 Tage (Abb. 40). An der unteren Verbreitungsgrenze der Formation in NNW-Exposition bei 2600 m ist mit einer 302 Tage andauernden Vegetationsperiode zu rechnen. Im hypsometrischen Verbreitungsschwerpunkt dürften folglich etwa 200 Tage mit einer mittleren Temperatur über 5 °C auftreten (Abb. 40).

Die Bestimmung der Vegetationsperiode nach LARCHER (1984) kann jedoch nur ein erster, stark vereinfachender Ansatz sein, da wichtige klimatische Größen wie der jahreszeitlich differenzierte Niederschlag, die Windgeschwindigkeit, die Verdunstung und die Globalstrahlung nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus würde auch dieser für den Pflanzenwuchs wichtige Faktor in einem thermisch primär durch die Höhenunterschiede differenzierten Raum nur die räumliche Höhendifferenzierung reproduzieren, die bereits durch das DHM gegeben ist.

Sind die Monatsmitteltemperaturen, die Niederschlagssummen und die näherungsweise in diesem Raum anzunehmende thermische Vegetationsperiode nach LARCHER (1984) in erster Linie durch die Vertikalität des Raumes differenziert (vgl. auch RAWAT u. PANGTEY 1987), werden die Windgeschwindigkeit und die potentielle Evapotranspiration räumlich bereits in erheblich stärkerem Maß von komplexeren topographischen Faktoren wie der Exposition und der Hangneigung beeinflusst. Nach einer mdl. Mitt. von CRAMER nehmen die Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration zwar stark mit der Höhe ab, es lassen sich jedoch auch erhebliche Unterschiede bezüglich der Exposition der Standorte feststellen.

In Gilgit (1520 m) betrug die Jahressumme der potentiellen Evapotranspiration 1090 mm (mdl. Mitt. CRAMER). An einem Nordhang in 3220 m kann sie noch 443 mm betragen, für einen südexponierten Hang in 4150 m Höhe gibt CRAMER (1994) eine potentielle Evapotranspiration von 302 mm an. Neben der potentiellen Evapotranspiration ist auch die Windgeschwindigkeit auf den spärlicher bewachsenen, südexponierten Hängen in vergleichbarer Höhe deutlich größer als auf den Nordhängen.

Dies läßt sich auf das ausgeprägte Hangwindssystem zurückführen, das auf den strahlungsreichen Südflanken wesentlich kräftiger entwickelt ist als auf den nordexponierten Hängen. CRAMER (1994) zeigt, daß die Überwärmung der Südhänge nur bei Betrachtung der Temperaturen während der Einstrahlungsperiode deutlich hervortritt. Die nächtliche Abkühlung ist auf den Nordflanken schwächer. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, daß die Nordexpositionen ein ausgeglicheneres Mikroklima besitzen als die südexponierten Hänge.

Von wesentlicher Bedeutung für die kleinräumige horizontale Differenzierung der klimatischen Standortfaktoren scheint folglich der Strahlungsgenuß der unterschiedlich exponierten und geeigneten Flächen zu sein. Er wird sowohl durch die Orientierung der Flächen im Raum als auch durch die unterschiedlichen Sonnenauf- und -untergangszeiten, die vom wahren Horizont des Ortes abhängen, beeinflusst. Die bereits diskutierten tageszeitlichen Bewölkungsgänge wirken sich ebenfalls auf die räumliche Differenzierung der Einstrahlung aus (Kap. 2.2.3 und 3.2).

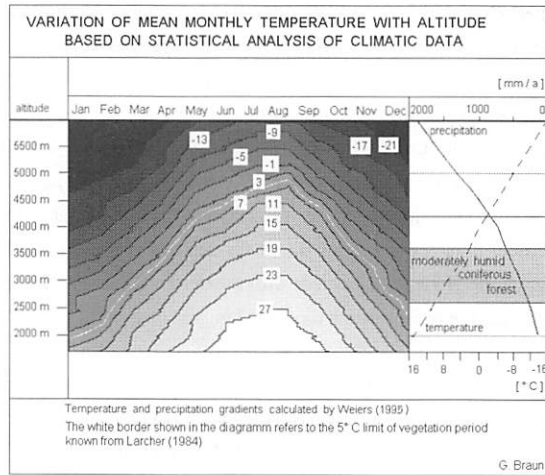


Abb. 40: Altoisothermendiagramm errechnet aus den von WEIERS (1995) ermittelten mittleren monatlichen Vertikalgradienten der Lufttemperatur im Hunza-Karakorum. Zusätzlich sind die vertikal differenzierte Dauer der thermischen Vegetationsperiode nach LARCHER (1984) und das Höhenintervall der feucht-temperierten Nadelwälder angegeben.

Fig. 40 Vertical and seasonal variation of temperatures in the NW-Karakorum, calculated from mean monthly temperature gradients WEIERS(1995). The figure shows the altitudinal range of the moderately humid coniferous forest and the variation of the upper limit of vegetation period according to LARCHER (1984)

In einer ersten Näherung kann daher die topoklimatische Differenzierung des Raumes durch die Interaktion von Höhe und Exposition der Flächen beschrieben werden. Die Untersuchungen stützen sich zusätzlich auf die in Kap. 2.2.3 beschriebenen Modelle der potentiellen direkten Einstrahlung, um die umgebungs- bzw. horizontabhängige Dauer der direkten Einstrahlung auf die Einzelflächen berücksichtigen zu können. Die Integration dieser Daten im GIS zeigt vereinfacht Abb. 41.

Aufgrund der geometrischen Korrektur der aus den Satellitendaten erzeugten Vegetationskarte auf das DHM besteht, wie bereits erwähnt, eine räumliche Übereinstimmung zwischen der Lage der feucht-temperierten Nadelwälder und den reliefbezogenen Informationen Höhe, Exposition und Hangneigung. Hieraus ergibt sich für die aus den topographischen Parametern abgeleiteten Karten der potentiellen direkten Einstrahlung ebenfalls geometrische Übereinstimmung mit den Vegetationsinformationen.

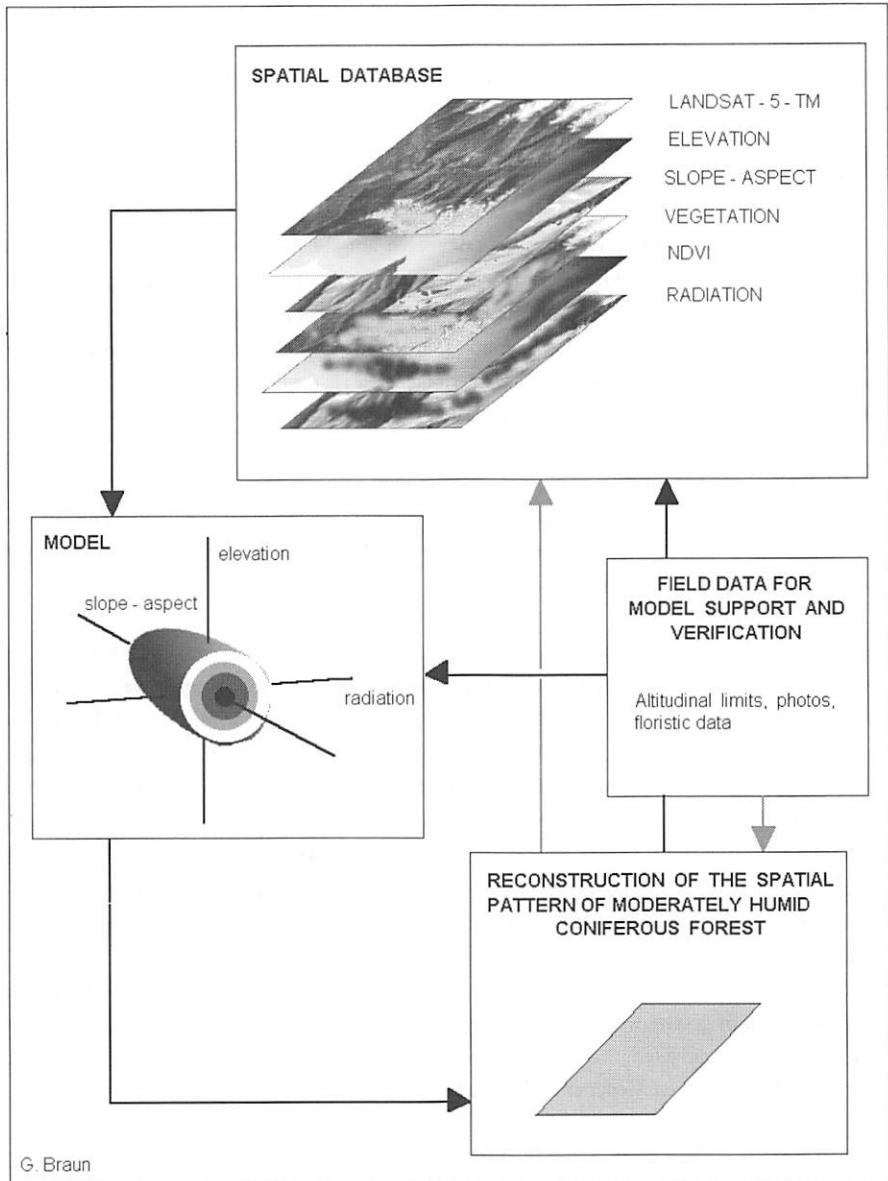


Abb. 41: Schematische Darstellung der im GIS integrierten Datenebenen und ihrer Analyse zur Rekonstruktion der potentiellen Standorte feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Karakorum

Fig. 41 Schematical representation of the integration and analysis of multisource data in a GIS to reconstruct the potential pattern of moderately humid coniferous forest in the Hunza-Karakorum

Jede Datenebene setzt sich aus ca. 2.000.000 Flächen mit einer Größe von jeweils 900 m² zusammen. Wird für jedes Flächenelement, welches als Vorkommen des feucht-temperierten Nadelwalds ausgewiesen ist, die Höhe, Exposition und Einstrahlung aus den Daten extrahiert, so ergibt sich sowohl in Abhängigkeit von der Exposition als auch von der Höhe eine Normalverteilung der Standorte (Abb. 35 und 38). Bezüglich der potentiellen direkten Einstrahlung sind die Standorte der Formation nur in den Übergangsjahreszeiten weitgehend normalverteilt.

Die auf diese Weise gewonnenen Daten repräsentieren aufgrund der großen Stichprobe und der Einbeziehung von Reliktstandorten an den natürlichen Verbreitungsgrenzen die topoklimatisch maximal mögliche Verbreitung der Formation im Gelände. In jedem Fall müssen die Ergebnisse mit Felderhebungen oder Angaben in der Literatur abgeglichen werden, da es sowohl aufgrund von Fehlklassifikationen bei der Auswertung der Satellitendaten als auch aufgrund der im Hochgebirge problematischen geometrischen Korrektur der Daten zu Abweichungen kommen kann.

Die Approximation der ökologisch-physiologischen Standortbedingungen von Vegetationsformationen im GIS beruht auf der Analyse der Häufigkeiten, mit welcher die topographischen oder klimatischen Eigenschaften an den Standorten auftreten. Der Mittelwert der Verteilungen markiert das ökologisch-physiologische Optimum (Abb. 41).

Die Oberfläche des angeschnittenen Ellipsoids in Abb. 41 repräsentiert die Verbreitungsgrenzen der Formation in einem mehrdimensionalen Merkmalsraum, der von den topoklimatischen Parametern Höhe, Exposition und der potentiellen direkten Einstrahlung aufgespannt wird. Da der Schwerpunkt des Standortclusters das ökologische Optimum der Formation kennzeichnet, können zunehmende Abweichungen von den Mittelwerten der Verteilungen als abnehmende Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der feucht-temperierten Nadelwälder im Relief aufgefaßt werden (zur Methode vgl. BAHRENBERG u. GIESE 1975, CLARK et al. 1986, S.109-148 und SCHÖNWIESE 1985). Es kann folglich für die unterschiedlichen Relief- und Einstrahlungskombinationen die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der feucht-temperierter Nadelwald an den entsprechenden Standorten auftritt.

Hieraus ergibt sich die Frage, mit welcher Methode diese abstrakten Befunde wieder in Bezug zum Untersuchungsraum gesetzt werden können. In Kap. 3.3.5 soll daher ein in der Mustererkennung und digitalen Bildverarbeitung häufig genutztes Verfahren beschrieben werden, mit welchem die gewonnenen Informationen wieder einen konkreten räumlichen Bezug erhalten können.

3.3.5 Maximum Likelihood-Klassifikatoren digitaler Bildverarbeitungsanlagen als Instrument zur Analyse der Wahrscheinlichkeitsdichte in einer Umweltsimulation

In der computergestützten Mustererkennung, die den Klassifikationsverfahren digitaler Bildverarbeitungssoftware zugrundeliegt, wird die Interpretation von Bilddaten häufig mit Hilfe punktbezogener Zuordnungskriterien durchgeführt (vgl. auch Kap. 2.1.3.2). Bei diesen Verfahren ist es belanglos, ob es sich bei den Bildern um Fernerkundungsdaten oder klimatische, topographische und

vegetationsgeographische Daten handelt. Nach QUIEL (1986) sind bei der punktbezogenen computergestützten Mustererkennung zwei Schritte charakteristisch:

- Durch die Analyse von Daten, die repräsentativ für Klassen sind, werden die Klassen charakterisiert.
- Mit numerischen Regeln, die diese Klassenmerkmale verwenden, werden alle übrigen Daten klassifiziert.

Dieser in der digitalen Bildverarbeitung und Klassifizierung übliche Prozeß soll auf das vorliegende Problem, welches einer automatisierten Interpretation mehrerer thematischer Karten gleicht, abgebildet werden.

Die Analyse von repräsentativen Daten oder Merkmalen einer Klasse (feucht-temperierte Nadelwälder) erfolgt in Bezug auf die thematischen Datenebenen (Karten). Hierbei wird die Verteilung der Merkmale Höhe ü. NN, Exposition, Einstrahlung usw. an den Standorten der feucht-temperierten Nadelwälder erfaßt (vgl. Kap. 3.3.4). Aus den Häufigkeitsverteilungen der Standortmerkmale der feucht-temperierten Nadelwälder, die in Kap. 3.3.2 und 3.3.3 diskutiert wurden, geht hervor, daß ein einzelnes Kriterium zur sicheren Charakterisierung der Standorte nicht ausreicht. In der digitalen Bildverarbeitung übliche Verfahren nutzen folglich mehrdimensionale Merkmalsräume zur Charakterisierung der Musterklassen (ROSENFELD u. KAK 1982, QUIEL 1983, KRAUS 1989, BÄSSMANN u. BESSLICH 1991, HABERÄCKER 1989).

Eine weitere entscheidende Frage ist die Wahl der Regel oder des Kriteriums, nach dem die Zuweisung eines Datenvektors zu einer Klasse erfolgen soll. Das Kriterium sollte die Form der Häufigkeitsverteilung, die die Musterklasse im Merkmalsraum besitzt, möglichst gut approximieren. (Unter Datenvektor soll die Summe aller zur Unterscheidung herangezogenen Merkmale verstanden werden).

Abb. 38 zeigt die Ausdehnung und Form des für die feucht-temperierten Nadelwälder aus den Daten Höhe ü. NN und Exposition der Standorte approximierten Merkmalsraumes. Da sich die Formation sowohl bezüglich der Höhe ü. NN, der Exposition als auch der Einstrahlung normalverteilt verhält, ergibt die Darstellung im dreidimensionalen Raum annähernd ein Ellipsoid mit zum Schwerpunkt hin zunehmenden Häufigkeiten und verschiedenen Längen der Hauptachsen. Dieser Befund ist in Abb. 41 schematisch dargestellt. Ellipsoidale Merkmalsräume sind nach QUIEL (1986) und KRAUS (1990) gut mit dem Maximum Likelihood-Kriterium zu approximieren, das im folgenden kurz beschrieben werden soll.

Die nach SCHÖNWIESE (1985) zu den Schätzverfahren gehörende Methode beruht auf dem Prinzip der maximalen Mutmaßlichkeit. Auf der Basis einer ausreichend großen Stichprobe werden die Kenngrößen der Verteilung errechnet und Vermutungen über die Grundgesamtheit angestellt (SCHÖNWIESE 1985). Im vorliegenden Beispiel entspricht die Stichprobe den aktuell beobachteten Standorten der feucht-temperierten Nadelwälder, die Grundgesamtheit den potentiellen Standor-

ten der Formation. Nach QUIEL (1986) liegt dem Maximum Likelihood-Kriterium in der Fernerkundung ein parametrischer Ansatz zugrunde. Die Verteilungsfunktion kann mit einer normalverteilten (Gaußschen) Wahrscheinlichkeitsfunktion approximiert werden. Da aufgrund der stichprobenbezogenen Auswertung Standortmerkmale für die Vegetationsformation aus mehreren Informationsebenen (Höhe ü. NN, Exposition, potentielle direkte Einstrahlung, Besonnungsdauer) vorliegen, wird für die Annäherung der Wahrscheinlichkeitsfunktion eine n-dimensionale normalverteilte Dichtefunktion benutzt.

Die Zuordnung eines Musters (Geländeelementes) zu einer Klasse (potentieller Standort der Vegetationsformation) erfolgt dann nach dem Kriterium der größten Wahrscheinlichkeit (QUIEL 1986, KRAUS 1990, SWAIN et al. 1978).

In dem nach RICHARDS (1986) in dem Modul MAXLIKE (vgl. auch IDRISI Technical Reference ver. 4.0) implementierten Klassifikationsverfahren, das zur Berechnung benutzt wurde, kann zusätzlich eine Zurückweisungsschwelle eingeführt werden, durch welche der Bereich des Merkmalsraumes bestimmt wird, in dem die Zuordnung zur Klasse erlaubt ist. (KRAUS 1990, HABERÄCKER 1989). Diese in der englischsprachigen Fachliteratur auch als *lower probability cutoff* bezeichnete Zurückweisungsschwelle kann im Kontext mit dem vorliegenden Problem genutzt werden, um eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit zu erhalten, mit der feucht-temperierter Nadelwald an den einzelnen Standorten auftreten kann. Die Zurückweisungsschwelle wird aus einer χ^2 -Tafel entnommen, wobei die Anzahl der einbezogenen Merkmalsebenen den Freiheitsgraden entspricht. Da die Berechnung der Diskriminanzfunktion nach QUIEL (1986) negative Werte ergibt, jedoch nur die Beträge der Ergebnisse berücksichtigt werden, bedeuten hohe absolute Werte dieses Wahrscheinlichkeitsmaßes eine geringe Wahrscheinlichkeit und niedrige Werte eine hohe Wahrscheinlichkeit. Eine umfassende Beschreibung des Maximum Likelihood-Verfahrens und seines Einsatzes in der digitalen Bildverarbeitung geben BÄSSMANN u. BESSLICH (1991), QUIEL (1986), RICHARDS (1990) und KRAUS (1990).

Die Standorteigenschaften Höhe ü. NN, Exposition, Summe der potentiellen direkten Einstrahlung im Monat April und der geometrisch korrigierte NDVI aus den LANDSAT-5-TM-Kanälen 3 und 4 wurden nun mit Hilfe des Maximum Likelihood-Verfahrens für das gesamte Untersuchungsgebiet klassifiziert, wobei der NDVI zur Eliminierung der vergletscherten Gebiete benötigt wurde. Bei der Klassifizierung der potentiellen Waldstandorte wurden unterschiedliche Zurückweisungsschwellen genutzt. Die χ^2 -Werte betragen für 4 Freiheitsgrade mit zunehmender Wahrscheinlichkeit 5.989, 3.357, 2.195 und 1.649.

3.3.6 Kartierung potentieller Standorte des feucht-temperierten Nadelwaldes

Die unterschiedlich gewählten Zurückweisungsschwellen schließen jeweils die am stärksten von den Mittelwerten der Standortbedingungen, also vom ökologischen Optimum der Formation abweichenden Daten aus. So besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem *lower probability cutoff*, der unteren Wahrscheinlichkeitsgrenze für das Auftreten der Vegetationsformation und den als potentielle Standorte ausgewiesenen Flächen. Der Darstellung in Abb. 43 (in Anl. III) liegt eine Klas-

sifikation potentieller Standorte des feucht-temperierten Nadelwaldes mit 4 verschiedenen Zurückweisungsschwellen zugrunde. Die vier separat durchgeführten Klassifikationen wurden addiert, wodurch für Standorte mit hoher Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Nadelwaldformation relativ hohe Werte erzeugt wurden, Standorte mit niedriger Wahrscheinlichkeit erhielten den Wert 1.

Wie aus den Abb. 43 (in Anl. III) und den Abb. 44 und 45 zu entnehmen ist, konzentrieren sich die Standorte hoher Wahrscheinlichkeit in Höhen zwischen 3100 und 3400 m in NNW-Exposition. Dies entspricht dem in Abb. 38 gezeigten Streuungsverhalten der feucht-temperierten Nadelwälder mit *Picea smithiana* in einem Merkmalsraum, auf dessen Abszisse die Exposition und auf dessen Ordinate die Höhe der Standorte aufgetragen ist. Die Verbreitungsgrenzen stimmen mit den Geländebeobachtungen überein. Die aktuelle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Untersuchungsgebiet zum Datum der LANDSAT-5-TM-Aufnahme (06.07.1990) gibt Abb. 42 wieder (vgl. auch Anlage IV).

Ein erster Vergleich der Karten der aktuellen und der potentiellen Waldverbreitung zeigt eine weitgehende Übereinstimmung der Raummuster bezüglich der Lage der Waldvorkommen (Abb. 43 in Anl. III, Abb. 44 und 45). Deutliche Unterschiede sind allerdings hinsichtlich der Ausdehnung der Flächen festzustellen. Während das Raummuster in der Karte der aktuellen Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder einen sehr gestreuten Charakter aufweist (Abb. 42), ist in der Karte der potentiellen Waldbedeckung eine Tendenz zur Clusterbildung zu erkennen (Abb. 43 in Anl. III). Insbesondere entlang der gesamten Rakaposhi-Nordflanke ist eine deutliche Differenz zwischen der Ausdehnung der aktuellen und der berechneten potentiellen Verbreitung der Wälder festzustellen. Dies deckt sich weitgehend mit den Beobachtungen von SCHICKHOFF (freundl. mündl. Mitt.), der die Degradation der feucht-temperierten Nadelwälder an der Rakaposhi-Nordflanke untersucht.

Wenn insgesamt davon ausgegangen werden kann, daß die Kartierung der potentiellen Standorte der feucht-temperierten Nadelwälder gut mit der Lage der aktuellen Waldbedeckung übereinstimmt, stellt sich die Frage, warum die Ausdehnung der Cluster und somit die Flächenanteile der berechneten potentiellen und aktuellen Verbreitung der Formation erheblich voneinander abweichen. Dies kann auf die regional typischen Nutzungsformen der feucht-temperierten Nadelwaldvorkommen zurückgeführt werden, die zu einer fortschreitenden Auflichtung der Waldbestände von ihren Verbreitungsgrenzen her führten.

Zusätzlich können in die Berechnung der potentiell natürlichen Verbreitung der feucht-temperierten Nadelwälder Fehler eingehen, die mit der Erstellung der Datengrundlagen zusammenhängen.

Zum Beispiel kann eine ungenaue Geokorrektur der Satellitendaten zu Lagefehlern der kartierten Waldflächen auf dem DHM führen. Der Fehler kann durch einen parametrischen Rektifizierungsansatz minimiert oder eliminiert werden. Inwieweit die Lagefehler, die durch nichtparametrische Rektifizierungsansätze auftreten, durch die große Stichprobe kompensiert werden, wurde nicht untersucht, da ein parametrischer Ansatz nicht zur Verfügung stand.

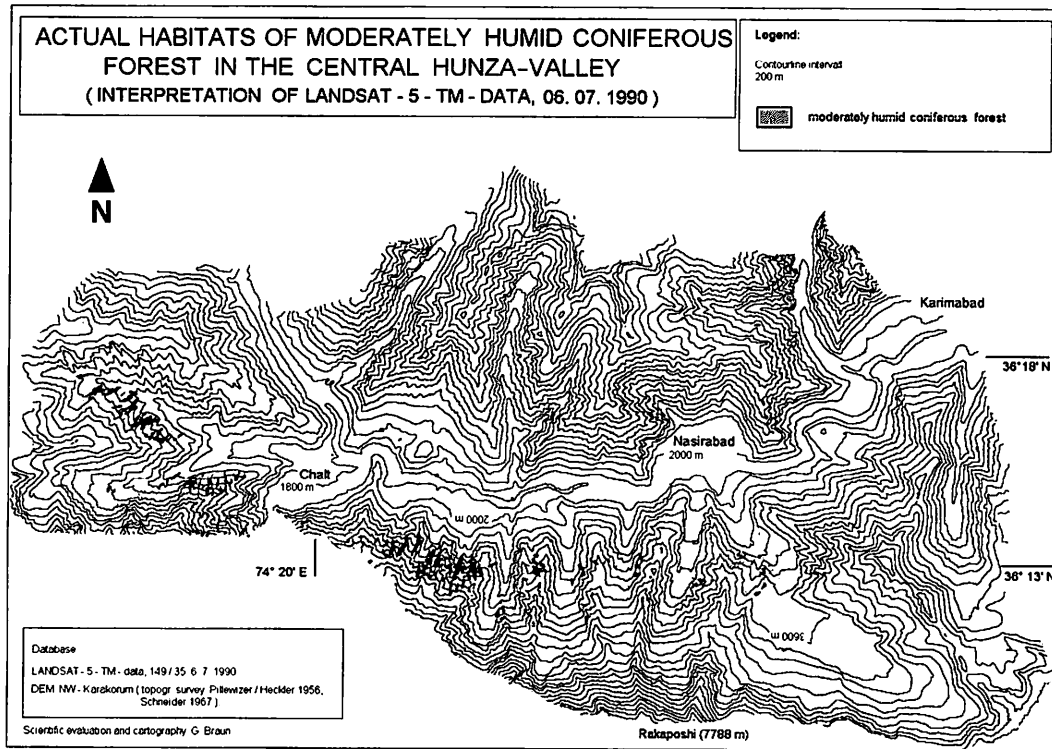


Abb. 42: Aktuelle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Tal. Die Waldverbreitung wurde aus LANDSAT-5-TM-Daten interpretiert und entspricht dem Stand vom 6.7.1990. Die Karte wurde geometrisch rektifiziert und mit einem Höhenlinienauszug aus dem DHM überlagert.

Fig. 42 Actual distribution of moderately humid coniferous forest in the Hunza-valley. Forest distribution has been manually interpreted from LANDSAT-5-TM-false colour composite and represents the forest cover from 6.7.1990. The map has been geometrically rectified and has been superimposed by contour lines derived from DEM.

Konkurrenz zwischen einzelnen Taxa führt, wie bereits beschrieben, zur Verdrängung der schwächeren Art aus ihrem physiologischen Optimum (vgl. WALTER u. BRECKLE 1983). Für Vegetationsformationen als physiognomisch-ökologische Einheiten trifft dies ebenfalls zu. Im Gegensatz zu einer Verlagerung des ökologischen gegenüber dem physiologischen Optimum kommt es jedoch an den Verbreitungsgrenzen der Formation - sowohl an den Höhen wie an den Expositionsgrenzen - zur ökotonartigen Durchdringung mit Leitarten benachbarter Formationen. Werden die potentiellen Standorte einzelner Vegetationsformationen berechnet, so werden diese Ökotonflächen der bearbeiteten Formation zugeschlagen. Die Ökotone könnten jedoch durch die getrennte Berechnung der potentiellen Verbreitung benachbarter Formationen und die anschließende Verschneidung der Ergebnisse identifiziert werden.

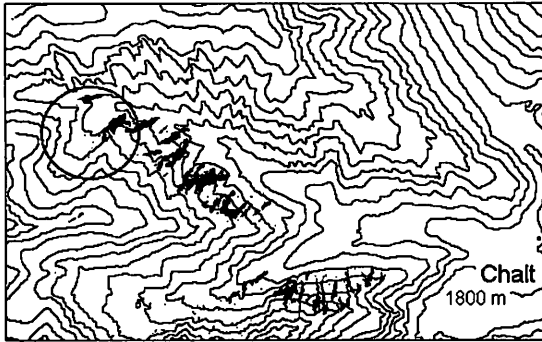
Die Modifizierung des Geländeklimas durch Kaltluftabfluß, -stau und durch ausdauernde Lawinenkegel führt in einigen Fällen zu Vegetationsinversionen (vgl. TROLL 1939, PAFFEN et al. 1956). Zur Charakterisierung und räumlich differenzierten Erfassung dieser klimatischen Sonderstandorte wird derzeit ein Modell des Kaltluftabflusses entwickelt. Die Einbeziehung von Informationen aus den Satellitendaten (Distanz zu Schneeakkumulationen usw.) erbrachten zur Lösung dieses Problems keine zufriedenstellenden Ergebnisse.


Entscheidend für die Qualität der Rekonstruktion potentieller Vegetationsformationsstandorte war die Qualität des DHM bzw. der topographischen Karten. Da im Hunza-Karakorum selbst kleinräumige Wechsel der Exposition die Vegetationsverbreitung erheblich modifizieren, war eine möglichst genaue Wiedergabe der Geländestruktur unabdingbar.


Neben dem visuellen Vergleich und der räumlichen Ansprache der potentiellen und aktuellen Verbreitung der feucht-temperierten Nadelwälder bieten die Datensätze, die Abb. 42 und Abb. 43 (in Anl. III) zugrundeliegen, die Möglichkeit, quantitative Angaben zur Degradation der Waldformation zu gewinnen. Tab. 13 gibt die aktuelle Ausdehnung der Formation im Untersuchungsgebiet sowie die Größe der rekonstruierten Waldfläche für die unterschiedlichen, in der Verbreitungskarte (Abb. 43 in Anl. III) dargestellten Wahrscheinlichkeitsniveaus an. Zur Zeit sind im Untersuchungsraum noch etwa 600 ha feucht-temperierter Nadelwald vorhanden. Legt man das in der potentiellen Verbreitungskarte (Abb. 43, Anl. III) grün dargestellte Raummuster zugrunde, sollte die Ausdehnung der Waldformation im Untersuchungsraum etwa 3000 ha betragen.

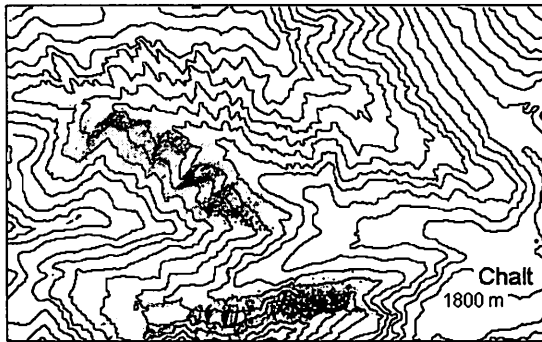
Einen guten Einblick in die kleinräumigen Verbreitungsmuster der feucht-temperierten Nadelwälder geben die Abb. 44 und 45. Sie stellen vergrößerte Ausschnitte der Karten der aktuellen und der rekonstruierten Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Minapin- und im Chaprot-Tal zum unmittelbaren Vergleich gegenüber. Betrachtet man die in den Karten der potentiellen Waldverbreitung in grün, gelb und rot dargestellten Flächen und vergleicht ihre Lage und Form mit den aktuellen Verbreitungsmustern der feucht-temperierten Nadelwälder, so fällt insbesondere im Chaprot-Tal (Abb. 44) die weitgehende Übereinstimmung des rekonstruierten Raummusters mit dem aktuellen Verbreitungsmuster auf.

ACTUAL AND POTENTIAL DISTRIBUTION OF MODERATELY HUMID CONIFEROUS FOREST IN THE CHAPROT VALLEY.



 Actual forest cover

 Site of photography 9



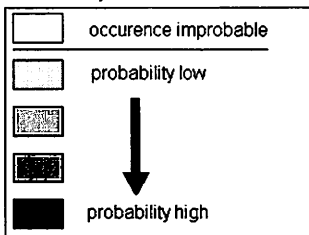
Contourline intervall 200 m

Database:

Potential solar radiation model
(Braun, Schmidt)
NDVI, calculated from LANDSAT-
5 - Tm - data, 149 / 35, 6. 7. 1990.
Slope - aspect model, calculated
from DEM NW - Karakorum.
DEM - NW - Karakorum (topogr.
survey Pillewizer, Heckler 1956,
Schneider 1967).

Scientific evaluation and
cartography G. Braun.

Probability for the occurrence of
moderately humid coniferous forest

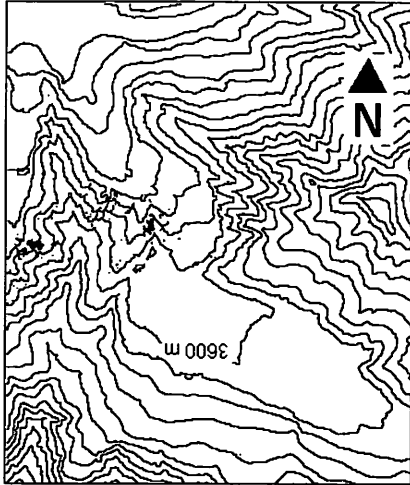


G. Braun

Abb. 44: Aktuelle und potentielle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Chaprot-Tal. Die Verbreitungsmuster wurden mit einem Maximum Likelihood-Klassifikator auf der Basis von unterschiedlichen Standorteigenschaften errechnet.

Fig. 44 Actual and potential distribution of moderately humid coniferous forest in the Chaprot-valley, based on varying habitat conditions and calculated by maximum likelihood classifier.

ACTUAL AND POTENTIAL DISTRIBUTION OF MODERATELY HUMID CONIFEROUS FOREST IN THE MINAPIN VALLEY.



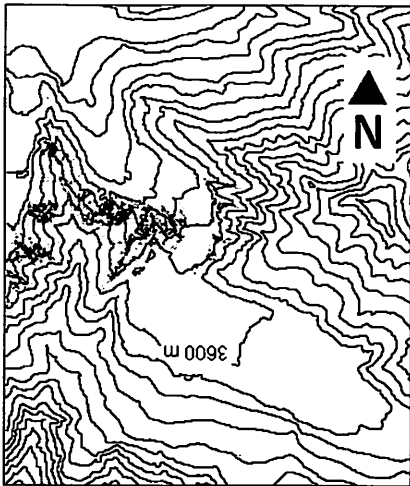
■ Actual forest cover

Contourline intervall 200 m

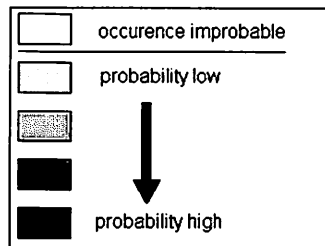
Database:

Potential radiation model
(Braun, Schmidt 1992)
NDVI, calculated from LANDSAT-
5 - Tm - data, 149 / 35, 6. 7. 1990.
Slope - aspect model, calculated
from DEM NW - Karakorum.
DEM - NW - Karakorum (topogr.
survey Pillewizer, Heckler 1956,
Schneider 1967).

Scientific evaluation and
cartography G. Braun.



Probability for the occurrence of
moderately humid coniferous forest



G. Braun

Abb. 45: Aktuelle und potentielle Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder im Minapin-Tal. Die Verbreitungsmuster wurden mit einem Maximum Likelihood-Klassifikator auf der Basis von unterschiedlichen Standorteigenschaften errechnet.

Fig. 45 Actual and potential distribution of moderately humid coniferous forest in the Minapin-valley, based on varying habitat conditions and calculated by maximum likelihood classifier.

Mit Sicherheit würde die in Abb. 43 (in Anl. III) und den Abb. 44 und 45 durch die blaue Fläche wiedergegebene Verbreitung im Gelände die potentielle Ausdehnung der Waldformation überschätzen. Dies wohl nicht so sehr bezüglich ihrer oberen und unteren Verbreitungsgrenze, sondern im Hinblick auf ihre Verbreitung zu den von NNW abweichenden Expositionen.

Aktuelle Fläche der feucht-temperierten Nadelwälder im Hunza-Tal		
	Pixel	ha
	6677	600
Potentielle Fläche der feucht-temperierten Nadelwälder im Hunza-Tal		
Szenario	Pixel	ha
1	9531	858
2	15826	1424,3
3	33521	3016,9

Tab. 13: Flächenvergleich zwischen der im Jahr 1990 vorhandenen und der potentiellen Fläche feucht-temperierter Nadelwälder im Hunza-Karakorum, berechnet für 3 Szenarien

Tab. 13: Comparison between the area actually covered by moderately humid coniferous forest in the Hunza-Karakorum in 1990 and the potential coverage of the forest, calculated for 3 scenarios

Sowohl für die potentielle Verbreitungskarte des Chaprot-Tales (Abb. 44) als auch für die Karte des Minapin-Tales (Abb. 45) ist eine teilweise Verifikation der Rekonstruktionen möglich. Photo 8 zeigt eine terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme aus dem Chaprot-Tal. In der aus dem Jahre 1959 stammenden Aufnahme von der mit feucht-temperiertem Nadelwald bestandenen Nordflanke des Tales können im linken unteren Quadranten des Bildes Waldbestände in den Seitenmoränen erkannt werden, von denen zum Zeitpunkt der Feldbegehung und der Satellitenbildkartierung nur noch einzelne Stämme vorhanden waren (Photo 8).

Vergleicht man das Meßbild (Photo 8) aus dem Jahr 1959 mit der rekonstruierten Verbreitungskarte für das Chaprot-Tal (Abb. 44), so wird deutlich, daß die in der aktuellen Verbreitungskarte nicht ausgewiesenen Standorte durch das vorgestellte Verfahren zur Rekonstruktion der Verbreitungsgebiete als potentielle Waldstandorte markiert wurden (Abb. 44).

Ein Beispiel aus dem Minapin-Tal zeigt Abb. 45. Die im Kartenausschnitt zu beobachtenden östlichsten potentiellen Waldstandorte an der westexponierten Flanke oberhalb des Minapin-Gletschers konnten weder bei der Feldaufnahme 1990 noch bei der Satellitenbildkartierung nachgewiesen werden. Jedoch wurden sie von PAFFEN kartiert und sind in der Vegetationskarte PAFFENs wiedergegeben (PAFFEN et al. 1956 und Abb. 27 in Anl. II).

Weitere Verifikationen werden durch die Arbeiten von SCHICKHOFF ermöglicht, der ausgedehnte pflanzensoziologische Untersuchungen, Bestandsstrukturanalysen und Befragungen im Hunza-Tal durchführt.

4 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

Umfang und Verschiedenheit der Arbeitsschritte, die einerseits zur Erstellung und Harmonisierung der benötigten Datengrundlagen, andererseits zur vegetationsgeographisch - verbreitungsökologischen Auswertung der Befunde durchgeführt werden mußten, legten bei der Gliederung der Arbeit die Aufteilung in einen methodischen und einen integrativ-analytischen Teil nahe. Die Diskussion der Ergebnisse orientiert sich nun weitgehend an der Abfolge der in den einzelnen Kapiteln behandelten Themen, nachdem einzelne Aspekte aus Gründen des inhaltlichen Zusammenhangs bereits im Ergebnisteil diskutiert wurden.

Ein für die Untersuchungen wesentlicher Arbeitsschritt war die Erstellung eines digitalen Höhenmodells. Die Randbedingungen, die bei der Erstellung des DHM berücksichtigt werden mußten, wurden primär durch die räumliche Auflösung der LANDSAT-5-TM-Daten und das stark strukturierte Relief im Untersuchungsgebiet bestimmt. Um einen Informationsverlust bei der Weiterverarbeitung des DHM mit den Satellitendaten zu vermeiden und die Feinstruktur des Reliefs möglichst differenziert wiederzugeben, wurde bei der DHM-Erstellung eine räumliche Auflösung von 30 m angestrebt.

Die hohe Qualität der Stereoautographenpläne und die sorgfältige Digitalisierung durch U. SCHMIDT waren wesentliche Voraussetzungen für die Erstellung eines zuverlässigen Höhenmodells.

Probleme bereitete allerdings die Interpolation der aus den topographischen Grundlagen gemessenen Daten. Da die verfügbare Software erhebliche Beschränkungen bezüglich der Größe der bearbeitbaren Datensätze aufwies, mußte die Interpolation segmentweise durchgeführt werden. Bei der Montage der Segmente traten leichte Restklaffungen auf, die jedoch in erster Linie kleine Bereiche in hohen Lagen oberhalb der Schneegrenze betrafen. Sie konnten bei der Analyse der Vegetationsverbreitung vernachlässigt werden. Eine visuelle Abschätzung der Wiedergabequalität der Reliefsstruktur durch das berechnete DHM ermöglicht Abb. 17.

Darüber hinaus reagierte die verfügbare Software zur Interpolation des Oberflächenrasters empfindlich auf eine ungleiche Verteilung der Höhenmessungen im Raum, die durch die erheblich variierenden Abstände der Höhenlinien in der Karte entstanden. Daher mußten in flachen Lagen häufig Zwischenhöhenlinien aufgenommen werden.

Ein sicherlich vorteilhafteres Verfahren zur Erstellung von Höhenmodellen ist die Auswertung von Stereobildern oder -bildverbänden. Zum einen ist die gleichmäßigere räumliche Verteilung der Messungen aus Stereoaufnahmen günstiger für die Interpolation eines regelmäßigen Oberflächenrasters, zum anderen sind die aus Stereobildern abgeleiteten topographischen Daten noch nicht generalisiert, wie es bei topographischen Karten der Fall ist. Neben Luftbildern können panchromatische SPOT-Daten und KFA-1000-Daten als Grundlage für die DHM-Ableitung in Maßstäben von 1:50.000 bis 1:100.000 dienen.

Die Messung und Berechnung eines DHM aus Stereopaaren ist heute weitgehend automatisiert und wird in jüngster Zeit von einer Vielzahl von Anbietern digitaler Bildverarbeitungssysteme in die

Softwarepakete integriert, so daß in diesem Arbeitsbereich mit einer baldigen Verbesserung gerechnet werden kann.

Digitale Höhenmodelle bieten die Grundlage für die rechnerische Ableitung weiterer ökologisch relevanter Zusatzinformationen wie der potentiellen direkten Einstrahlung, des bodennahen Windfelds, des Erosionsrisikos sowie von Hangneigungs- und Expositionsdaten. Allerdings besteht in Geoinformationssystemen ein deutliches Defizit bezüglich der Bereitstellung von Routinen zur Modellierung oder Extrapolation solcher klimatischer und hydrologischer Parameter. Daher mußte die zur Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung verwandte Software selbst erstellt werden.

Die Genauigkeit einer räumlich differenzierten Modellierung der potentiellen direkten Einstrahlung unterliegt einigen Restriktionen. Sie hängt vor allem von der Qualität des Atmosphärenmodells und von der Genauigkeit der eingesetzten Transmissionskoeffizienten ab. Für eine möglichst zuverlässige räumliche Differenzierung ist außerdem ein exaktes Höhenmodell unerlässlich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde aufbauend auf den Arbeiten zur potentiellen Sonnenscheindauer von SCHMIDT (1993) ein Verfahren zur Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung nach FUNK (1983) implementiert und auf der Grundlage des DHM mit monatlicher Auflösung gerechnet (Kap. 2.2.3).

Es zeigt sich bezüglich der räumlichen Differenzierung der potentiellen direkten Einstrahlung, wie zu erwarten, eine starke Abhängigkeit von der Orientierung der Flächen im Raum. Die jahreszeitliche Differenzierung steht in engem Zusammenhang mit der unterschiedlichen Horizontüberhöhung der Flächen (Abb. 19). Bei der Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung wurden zunächst die tatsächlichen Horizonte der Flächenelemente nicht berücksichtigt. Die ortsabhängige Horizontüberhöhung wurde durch die Korrektur der Befunde mit den Modellen der potentiellen Sonnenscheindauer in die Untersuchung einbezogen. Aufgrund dieser nachträglichen Korrektur ergaben sich Fehler, die bereits in Kap. 2.2.3.2 beschrieben wurden. Zur Lösung des Problems bietet sich die Integration der beiden Ansätze an, an der zur Zeit gearbeitet wird.

Ein zentraler Bestandteil der Arbeit war die Auswertung der LANDSAT-5-TM-Daten mit dem Ziel, eine Vegetationskarte des Untersuchungsgebietes auf Formationsebene zu erstellen. Die Karte (Anlage IV) deckt eine Fläche von etwa 3000 km² im NW-Karakorum ab und wurde im wesentlichen mit bildpunktorientierten, computergestützten Klassifikationsverfahren erstellt (Kap. 2.1). Die Vegetationskartierung aus digitalen Satellitendaten weist einige Vor- und Nachteile gegenüber konventionellen Kartierungen auf, die bezogen auf das Untersuchungsgebiet bereits in Kap. 3.2.1.7 diskutiert wurden. Ein Vorteil der Vegetationskartierung aus digitalen Satellitendaten gegenüber manuellen Kartierungen ist die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und die Beurteilbarkeit der Kartierungsgenauigkeit durch statistische Verfahren. Die Automatisierung der Kartierung führt zu einem wesentlich geringeren Zeitaufwand für die Bearbeitung als bei einer manuellen Kartierung. Hieraus ergibt sich eine höhere Wiederholungsrate zum Zweck eines Landschaftsmonitoring und die Möglichkeit zur Kartierung größerer Flächen. Zusätzlich besitzen die Befunde, die aus hochaufgelösten Satellitendaten gewonnen werden, häufig eine bessere Lagegenauigkeit als manuelle Kartierungen. Ein wesentlicher Vorteil ist auch die unproblematische Weiterverarbeitung der Kartierungsergebnis-

se durch Verknüpfungsmöglichkeiten mit anderen raumbezogenen Daten in Geoinformationssystemen.

Als nachteilig sind die schlechten Generalisierungsmöglichkeiten der Ergebnisse; die Unübersichtlichkeit der Karten und der eingeschränkte Detaillierungsgrad der Kartierung zu bewerten.

Bereits in der Einleitung wurden die Fragen aufgeworfen, ob mit einer computergestützten Kartierung der Vegetation aus LANDSAT-5-TM-Daten eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden kann und inwieweit Übereinstimmung zwischen den aus den Satellitendaten kartierten Bedeckungseinheiten und dem Begriff der Vegetationsformation besteht. Eine statistische Genauigkeitsabschätzung der Ergebnisse wurde bereits in Kap. 2.1.4.4 durchgeführt. An dieser Stelle sollen daher noch einmal die methodischen Probleme zusammengestellt werden, die sowohl die Genauigkeit der Auswertung als auch die thematische Differenzierung der Karte beeinflussen. Die Genauigkeit der Ergebnisse bei der Vegetationskartierung aus Satellitendaten hängt wesentlich von den benutzten Auswertungsverfahren und der sorgfältigen Aufnahme der Trainingsgebiete ab. Ein pauschaler Vergleich zwischen der Qualität von Satellitenbildklassifikationen und manuellen Kartierungen im vergleichbaren Maßstab kann daher nicht angestellt werden. Stellt man jedoch die im Rahmen dieser Arbeit angefertigte Vegetationskarte aus LANDSAT-5-TM-Daten der manuellen Kartierung aus PAFFEN et al. (1956) gegenüber (Abb. 27 in Anl. II), wird deutlich, daß die Kartierung aus LANDSAT-TM-Daten ein wesentlich differenzierteres Bild der Vegetationsverbreitung im Untersuchungsraum ergibt. Die in Kap. 2.1.4.4 durchgeführte statistische Bewertung der Klassifikationszuverlässigkeit zeigt für die Mehrzahl der ausgewiesenen Formationen eine hinreichende Genauigkeit (Tab. 6). Die unzureichende Klassifizierungsgenauigkeit des subalpinen bis alpinen Krummholzes mit *Salix spec.* und *Juniperus communis* ist auf die unzureichende Bestandsausdehnung und den starken Verbiß der Strauchweiden zurückzuführen.

Allein auf der Basis einer bildpunktorientierten Klassifikation multispektraler Daten konnte das gesteckte Ziel einer Kartierung der Vegetationsformationen allerdings nicht erreicht werden, wie bereits in Kap. 2.1.3 und 2.1.4 diskutiert wurde. Die Schwierigkeiten, die bei der Kartierung aus Satellitendaten im Hochgebirge auftreten, stehen im Zusammenhang mit dem ausgeprägten Relief und mit den methodischen Einschränkungen durch die bisher operationalisierten Auswertungsverfahren. Die großen Höhenunterschiede führen zu einer erheblichen räumlichen Differenzierung des Einflusses der Atmosphäre auf die Reflexion der Oberflächen. Über den Tälern ist häufig der Aerosolgehalt höher als an den Flanken der Gebirgsketten und in der Gipfelregion. Hinsichtlich einer Vegetationsklassifikation treten diese Probleme jedoch in den Hintergrund, da gleiche Vegetationsformationen ähnliche Höhenstufen besetzen und die bestandsspezifische Reflexion durch die höhenabhängige Atmosphärentrübung nur unerheblich differenziert wird.

Wesentlich problematischer für die Vegetationsklassifizierung ist der häufige Wechsel zwischen besonnten und beschatteten Hängen, der zu erheblichen Reflexionsunterschieden gleicher Pflanzenbestände führt. In der vorliegenden Arbeit wurden daher die einzelnen zu kartierenden Vegetationsformationen in besonnte und beschattete Unterklassen aufgespalten. Mit den auf diese Weise ge-

wonnenen Trainingsgebieten wurde die Szene klassifiziert. Hierbei erwies sich die automatische Kartierung der feucht-temperierten Nadelwälder und der *Chenopodiaceen*-Steppe als nicht zuverlässig. Erstere waren schwierig auszuweisen, da sie häufig an den während des Satellitenüberflugs beschatteten Hängen auftraten; die spektrale Signatur der *Chenopodiaceen*-Steppe wurde aufgrund ihres geringen Bedeckungsgrades von der Reflexion der Böden dominiert. Daher mußte die Waldformation interaktiv kartiert, die Steppenformation mit einem GIS-orientierten Verfahren ausgewiesen werden.

Zur Verbesserung der Ergebnisse computergestützter Klassifizierung im Hochgebirge bietet sich neben dieser Kartierungsstrategie ein Verfahren zur radiometrischen Korrektur der Daten an. ITTEN et al. (1992) stellen zur Korrektur der Beleuchtungsunterschiede in Satellitendaten eine Methode vor, mit welcher vor der Klassifikation durch Modellierung der Einstrahlung auf der Basis eines hochaufgelösten DHM die Beleuchtungsunterschiede korrigiert werden können. Da jedoch in der vorliegenden Arbeit ein zuverlässiges DHM nur für den nördlichen Bereich des zu kartierenden Gebietes vorhanden war, konnte dieses Verfahren nicht eingesetzt werden.

Weitere Schwierigkeiten ergaben sich aufgrund der für Hochgebirge typischen hohen Landschaftsdiversität. Die komplexen, häufig abwechselnden Verbreitungsmuster der Vegetation im Raum und der häufige Wechsel zwischen Licht und Schatten verursachen eine Vielzahl kontinuierlicher Übergänge zwischen einzelnen homogenen Vegetationsflächen im Satellitenbild. Die Festlegung von Grenzen zwischen diesen räumlichen und thematischen Kontinua ist mit den bisher operationalisierten Verfahren zur computergestützten Auswertung digitaler Fernerkundungsdaten nur unbefriedigend durchführbar. Zusätzlich handelt es sich bei den in den Fernerkundungsdaten als homogen auszuweisenden Beständen einer Formation häufig um Mischbestände, die eine unklare spektrale Signatur besitzen. Auch sind die Flächen, die zu einer Klasse zusammengefaßt werden sollen, häufig sehr klein, so daß die Auswahl geeigneter Trainingsgebiete schwierig ist.

Wird die geometrische und spektrale Auflösung der verfügbaren Fernerkundungsdaten als Randbedingung gesetzt, ist eine Verbesserung der Kartierungsergebnisse nur durch verstärkte methodische Forschung zu erwarten. Aussichtsreich erscheint eine Integration der bildpunktorientierten Verfahren mit konturbezogenen, texturbezogenen und wissensbasierten Methoden. Dazu bieten sich in der industriellen Bildanalyse bereits operationell eingesetzte Verfahren der Bereichsegmentierung und Merkmalsextraktion an (BÄSSMANN und BESSLICH 1991, ROSENFELD und KAK 1982, TON et al. 1991).

Das Ziel einer satellitengestützten Kartierung der Vegetation auf Formationsebene wirft die Frage nach der Kompatibilität des vegetationsgeographischen Modellbegriffes "Vegetationsformation" mit den aus Satellitendaten ableitbaren Bedeckungsklassen, und damit die Frage nach der Zusammensetzung des vom Sensor des Satelliten gemessenen Signals und seiner Beeinflussung durch die Pflanzendecke auf. In Kap. 2.1.3.1 wurden Reflexions-, Absorptions- und Streuvorgänge an Pflanzenbeständen ausführlich diskutiert. Aus den dortigen Ausführungen kann gefolgert werden, daß bezüglich der Satellitenfernerkundung von bewachsenen Landoberflächen der eher artenspezifische, zellstrukturbeeinflusste Reflexionsanteil durch die Kronen- bzw. Bestandsstrukturmerkmale

erheblich überprägt wird. Aufgrund der relativ geringen räumlichen Auflösung des Sensors wird die Bestandsreflexion in einem Bildelement integriert gemessen (SCHARDT 1990). Daher sind für die Zusammensetzung der spektralen Signatur von Pflanzenbeständen die Bestandsmorphologie, die Blattmorphologie, die Gestalt der Pflanzen und die Deckungsgrade von großer Bedeutung. Auch der wuchsformenorientierte Modellbegriff der Vegetationsformationen richtet sich an der Struktur und der Morphologie der Pflanzenbestände aus. Es wäre daher zu erwarten, daß sich die aus den LANDSAT-5-TM-Daten kartierten Vegetationseinheiten weitgehend mit der in der vegetationsgeographischen Forschung üblichen Differenzierung des Pflanzenkleides nach Vegetationsformationen decken. Hinweise in diesem Sinne geben auch die Auswertungen der Verbreitungsmerkmale der aus den Satellitendaten kartierten Vegetationseinheiten (Kap. 3.3.2 und 3.3.3). Sie decken sich weitgehend mit den Verbreitungsmerkmalen der Vegetationsformationen, die die Feldebefunde erbrachten.

Die hohe Reliefenergie in Gebirgsräumen führt zu erheblichen geometrischen Störungen der Satellitenbilddaten, die mit konventionellen Rektifizierungsansätzen nur unbefriedigend korrigiert werden können (Kap. 2.1.4.6). Die Geokorrektur der Vegetationskarte auf das DHM wurde mittels einer in der TERRAMAR/MICROIMG Anlage implementierten affinen Transformation auf der Basis von 210 Paßpunkten durchgeführt. Die mittleren Lagefehler von 3-3,5 Bildelementen sind darauf zurückzuführen, daß die durch die Reliefenergie im Untersuchungsgebiet verursachten Störungen der Abbildungsgeometrie nicht vollständig ausgeglichen werden konnten. Eine Verbesserung der Geokorrektur in stark reliefiertem Gelände kann jedoch durch parametrische Orthorektifizierungsansätze erreicht werden, die zunehmend in kommerzielle Bildverarbeitungssoftware integriert werden. Wird zur Rektifizierung der Daten ein DHM benutzt, können die bei konventionellen Verfahren auftretenden Lagefehler erheblich reduziert werden (ITTEN et al. 1992, BÄHR und VÖGTLE 1991, ECKER 1992).

Neben der Kartierung der aktuellen Vegetationsbedeckung war die Quantifizierung der durch anthropogene Eingriffe verursachten Landschaftsveränderungen im Raum ein zentrales Anliegen der Arbeit. Die in der Vegetationsgeographie angewandten Verfahren zur Rekonstruktion der potentiellen räumlichen Verbreitung der Vegetation beruhen zumeist auf der räumlichen Extrapolation ökologisch relevanter Primärdaten sowie dem Vergleich der für Vegetationsformationen ermittelten topographischen, klimatischen und pedologischen Kenngrößen mit den Verhältnissen im betrachteten Landschaftsausschnitt. Allen derartig ausgerichteten Ansätzen liegt die Überlegung zugrunde, daß Vegetationsformationen sich bezüglich ihrer räumlichen Verbreitung normalverteilt um ihr ökologisch-physiologisches Optimum verhalten. Verschiebungen und größere Symmetrieveränderungen der Verteilungsfunktion erfolgen ausschließlich durch Konkurrenz einwirkung oder anthropogene Eingriffe (WALTER u. BRECKLE 1983).

Im extremen Hochgebirgsrelief des NW-Karakorum mit seinen starken Vertikal- und Horizontalgradienten konnte eine hohe Übereinstimmung zwischen topoklimatischen Standortbedingungen und der Verbreitung der Vegetationsformationen festgestellt werden (BRAUN u. WINIGER 1992). Höhe und Exposition variieren in gegenseitiger Wechselwirkung das Standortklima und besitzen

somit erheblichen Einfluß auf die Vegetationsanordnung, d. h. das Nebeneinander der verschiedenen Vegetationsformationen im Relief.

Werden mit einem Geoinformationssystem die Verbreitungsmerkmale der Vegetation im Raum in Abhängigkeit von den topoklimatischen und topographischen Standortbedingungen untersucht, ergibt sich ein gut interpretierbares Bild der Vegetationsanordnung in Abhängigkeit von den modellierten Standortfaktoren. Wie in Abb. 26 in Anl. III, und den Abb. 35, 36, 37 und 38 gezeigt, ordnen sich die Vegetationsformationen hinsichtlich ihrer Verbreitung deutlich der topoklimatischen und klimatischen Differenzierung im Relief des Raumes unter. Bezüglich der Häufigkeit ihres Auftretens in Abhängigkeit von den einzelnen Standortfaktoren sind sie normalverteilt.

Auf der Grundlage dieser in Kap. 3.3 dargestellten Verbreitungsmuster wurde am Beispiel der feucht-temperierten Nadelwälder der Versuch unternommen, ihre potentiell natürliche Verbreitung im Untersuchungsgebiet zu rekonstruieren. Obwohl es sich bei den zur Rekonstruktion genutzten topoklimatischen Verbreitungsmerkmalen um recht einfache, räumlich und (soweit notwendig) auch zeitlich differenziert gut modellierbare Parameter handelt, geben die berechneten Verbreitungskarten (Abb. 43 in Anl. III, 44 und 45) das in Abb. 42 gezeigte aktuelle Verbreitungsmuster der feucht-temperierten Nadelwälder zuverlässig wieder. Eine punktuelle Verifikation der berechneten potentiellen Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder wurde im Minapin- und im Chaprot-Tal mit terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahmen und Karten aus den Jahren 1954 und 1959 durchgeführt. An Standorten, an denen zu dieser Zeit die Waldformation noch vorhanden war, weisen die Karten der potentiellen Verbreitung feucht-temperierter Nadelwälder hohe Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Formation aus (Photo 8 und Abb. 44).

Die Qualität der durchgeführten Rekonstruktion hängt im wesentlichen von 2 Parametern ab. Sicherlich ist zu erwarten, daß die Zuverlässigkeit der Ergebnisse mit steigender Zahl der berücksichtigten Standortfaktoren zunimmt. Von wesentlicher Bedeutung für diesen Ansatz ist darüber hinaus die Erfassung einer ausreichenden Anzahl von Reliktstandorten an den natürlichen Verbreitungsgrenzen der einzelnen Formationen, die benötigt werden, um die klimaökologischen Grenzwerte der untersuchten Formation festzustellen.

Ein weiterer kritischer Faktor bei dieser Vorgehensweise ist neben der Zuverlässigkeit der topoklimatischen Daten die Qualität der Geokorrektur. Aufgrund einer nicht vollständig befriedigenden Lagegenauigkeit können die topoklimatischen Grenzwerte der Formationen über- oder unterschätzt werden. Allerdings lassen sich diese Fehler durch einen parametrischen Orthorektifizierungsansatz vollständig ausgleichen.

Ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht mehr behandeltes Problem stellt die Modellierung klimatischer Sonderstandorte dar. Vor allem an den kaltluftbeeinflussten Standorten können häufig Vegetationsinversionen beobachtet werden, die durch die in die Untersuchung einbezogenen topoklimatischen Daten nicht approximiert werden können (Kap. 3.3.6). Ein Verfahren, das die räumlich differenzierte Identifizierung derartiger Standorte im Gebirge erlaubt, wird zur Zeit auf der Grundlage von Satellitendaten und digitalen Geländemodellen entwickelt.

Sicherlich sollte auch die räumliche Differenzierung der Böden bei weiteren Arbeiten nicht unberücksichtigt bleiben. In vorliegender Untersuchung wurde jedoch davon ausgegangen, daß die räumliche Differenzierung der Bodenentwicklung im wesentlichen die Niederschlags- und Temperatur- und damit die Höhenverhältnisse im Raum widerspiegelt und darüber hinaus von der Hangneigung beeinflußt wird. Da sowohl Bodenkarten als auch ausreichend differenzierte geologische Karten nicht verfügbar waren, konnten weitergehende pedologische Informationen nicht in die Untersuchung einbezogen werden.

Aus den Überlegungen zur Verbesserung des Ansatzes durch Einbeziehung weiterer Standortfaktoren ergibt sich die Frage, inwieweit die vorgestellte Methode zur Rekonstruktion des potentiell natürlichen Verbreitungsmusters von Vegetationsformationen auf andere Hochgebirgsräume oder andere Landschaftstypen übertragbar ist. Zu diesem Zweck wurden Versuche mit Daten aus hochandinen Wäldern im Nordwesten Boliviens durchgeführt (BRAUN 1988, BRAUN u. BACKHAUS 1993). Die Vegetationskartierung erfolgte aus Luftbildern des Instituto Geografico Militar. Die Ergebnisse der Rekonstruktion der potentiellen Verbreitung hochandiner *Polylepis tomentella*-Wälder am Vulkan Sajama sollen hier nicht im Detail wiedergegeben werden, da die Bestände in diesem Raum kaum degradiert waren und das rekonstruierte Raummuster weitgehende Übereinstimmung mit der aktuellen Verbreitung der Waldformation zeigte. Interessant war jedoch die weitgehende Übereinstimmung der im Gelände zu beobachtenden wechselnden Bestandsdichten der *Polylepis*-Wälder mit den Verteilungsmustern, die bei unterschiedlichen Zurückweisungsschwellen des Maximum Likelihood-Klassifikators entstanden.

Während die Versuche an den hochandinen *Polylepis tomentella*-Beständen in der Westkordillere Boliviens ebenfalls auf der Basis eines digitalen Höhenmodells sowie von Expositions- und Einstrahlungsdaten durchgeführt wurden, müssen bei der Übertragung der Methode auf gänzlich andere Landschaftstypen auch andere Geofaktoren berücksichtigt werden. Im Hochgebirge können die Standortfaktoren, die die Verbreitung der Vegetation beeinflussen, gut durch die räumliche Differenzierung des Reliefs substituiert werden. Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß die eigentlichen Ursachen für die Anordnung der Vegetation mit hoher Wahrscheinlichkeit in der räumlichen Differenzierung des Bodenwasser-, Temperatur- und Feuchtehaushaltes zu suchen sind. Werden im Hochgebirge diese Standortfaktoren noch im wesentlichen durch die Exposition und die Höhe ü. NN modifiziert, gewinnen bei abnehmender Reliefenergie zumeist die pedologischen und geologischen Verhältnisse an Bedeutung. Es ist anzunehmen, daß in flachen Lagen Bodenart und Bodentyp sowie die zeitliche Variabilität von Bodenfeuchte und Temperatur die potentiell natürliche räumliche Anordnung der Vegetationsformationen dominieren. Unter der Voraussetzung daß die notwendigen Geofaktoren räumlich differenziert verfügbar sind, könnte auch in nicht oder schwach reliefiertem Gelände eine Approximation der potentiell natürlichen Verbreitung einer Vegetationsformation gelingen.

Anhand der vorgestellten Regeln konnte auf der Grundlage der Auswertung von LANDSAT-5-TM-Daten und modellierten, ökologisch relevanten Parametern die Wahrscheinlichkeit, mit der eine

bestimmte Waldformation auf einer Fläche im Untersuchungsraum vorkommen kann, durch einen Maximum Likelihood-Ansatz abgebildet werden. Hierbei wurden die Standortfaktoren durch strahlungsklimatologische und topographische Daten substituiert. Die eigentliche Ursache für die expositionsabhängige Differenzierung der Bodenfeuchte könnten jedoch die Ausaperungsmuster der Schneedecke im Frühjahr sein. Ihre Berechnung aufgrund von Einstrahlungsmodellen und vertikalen, nach Jahreszeiten differenzierten Temperaturgradienten und die Verknüpfung mit Raummustern der Vegetationsformationen wäre daher ein lohnenswerter Forschungsansatz.

Wie bereits in den Kap. 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3 angesprochen, ist bei der Auswertung der ökologischen Amplituden einzelner Waldformationen eine randliche Überschneidung der Verbreitung festzustellen. Bei der Rekonstruktion der potentiellen natürlichen Verbreitung einer Formation sollten diese Ökotonbereiche gesondert ausgewiesen werden. Hierzu müßten die benachbarten Formationen in die Untersuchung einbezogen und die Durchdringung mit einem räumlichen Ansatz modelliert werden. Diesbezügliche Verfahren wurden angedacht, ließen sich jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgen.

Weitgehend ungeklärt bleibt auch, ob sich andere geobotanische Einheiten wie beispielsweise nach dem System von BRAUN-BLANQUET definierte Assoziationen und Subassoziationen aus LANDSAT-5-TM-Daten zuverlässig kartieren lassen und ob die Verbreitung dieser nach gesellschaftssystematischen Gesichtspunkten unterschiedenen Einheiten ebenfalls räumlich approximierbar ist.

Die vorgestellten Ergebnisse können nicht nur zur Abschätzung der Walddegradation (Tab. 13) oder zur Rekonstruktion der potentiell natürlichen Waldbedeckung eines Raumes genutzt werden (Abb. 43 in Anl. III, Abb. 44 und 45). Der Ansatz ermöglicht darüber hinaus, Befunde zur ökologischen, und wenn Informationen zur Konkurrenz zwischen Formationen vorliegen, auch zur physiologischen Amplitude der Vegetationsformationen zu gewinnen. Das in den Karten der Abb. 43, 44 und 45 gezeigte Raummuster kann daher auch als Raummuster eines feucht-temperierten Klimatypus im Sinne einer klimaökologischen Raumgliederung interpretiert werden. Die Einbeziehung von Fernerkundungsdaten und ihre Auswertung mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung zur Kartierung der aktuellen Vegetationsverbreitung auf Formationsebene erlaubt eine schnelle, flächendeckende Beurteilung auch größerer Räume.

Bei einem entsprechenden Ausbau des Verfahrens durch Berücksichtigung einer größeren Zahl von Standortfaktoren und die Option der gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer Vegetationsformationen könnten vollständige Karten der potentiellen natürlichen Vegetation erstellt werden.

Hieraus ergeben sich zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für landschaftsökologische, forstwirtschaftliche, landwirtschaftliche und raumplanerische Fragestellungen. Beispielsweise können Karten der potentiellen natürlichen Waldbedeckung Wiederaufforstungsmaßnahmen mit natürlichen Arten in schlecht zugänglichen Gebirgsregionen unterstützen, indem sie die Lokalisierung geeigneter Standorte erleichtern. Anhand von Vergleichen der aktuellen und der potentiellen natürlichen Vegetationsverbreitung könnte die Naturnähe eines Landschaftsausschnitts objektiv beurteilt wer-

den, wobei sich die Objektivität der Beurteilung aus der Nachvollziehbarkeit der Kartierung der potentiell natürlichen Formationsverbreitung ergäbe. Desweiteren liegt die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Verfahrens gerade in der Reproduktion und vergleichenden Untersuchung von räumlichen Verbreitungsmustern der Vegetation, so daß die Messung des Landschaftszustandes nicht an den Zustand der einzelnen Vegetationsflächen geknüpft ist, sondern anhand der Abweichungen zwischen potentiell natürlichem und aktuellem Landschaftsmuster erfolgen kann.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zur Landschaftsökologie und Landschaftsentwicklung im NW - Karakorum dar, wobei der inhaltliche Schwerpunkt auf der Kartierung der aktuellen Vegetationsverbreitung und der Rekonstruktion der potentiellen Waldverbreitung liegt. Die gesamte Datenauswertung wurde mit digitalen Bildverarbeitungsanlagen und einem GIS durchgeführt. Wesentliche methodische Arbeitsteile sind die Erstellung eines digitalen Höhenmodells, die Berechnung der potentiellen direkten Einstrahlung und eine Vegetationskartierung für den Untersuchungsraum aus digitalen LANDSAT-5-TM-Daten.

Die Vegetation des Untersuchungsgebietes wurde zum überwiegenden Teil auf der Basis einer computergestützten Multispektralklassifikation der Satellitendaten kartiert. Hierbei stand das Ziel im Vordergrund, eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den aus den Satellitendaten kartierbaren Bedeckungseinheiten und einer vegetationsgeographisch sinnvollen Differenzierung, beispielsweise nach Vegetationsformationen, zu erreichen.

Die im Untersuchungsgebiet zu beobachtende, teilweise erhebliche Degradation der Waldvorkommen ist die Folge einer Übernutzung dieser labilen Ökosysteme und steht im Zusammenhang mit der Veränderung sozioökonomischer und kultureller Merkmale. Um den Degradationsgrad der intensiv genutzten, feucht temperierten Nadelwälder abschätzen zu können, wurde ein statistisches Modell zur Rekonstruktion der potentiellen Waldbedeckung entwickelt, in dem topographische und topoklimatische Daten als Proxys zur räumlichen Differenzierung der Standortfaktoren eingesetzt wurden.

Die räumliche Anordnung der Vegetationsformationen im NW-Karakorum wird entscheidend von der Humidität und Temperatur der Standorte beeinflusst. Die Wasserversorgung wird primär durch die Höhe und die Exposition der Standorte im Relief modifiziert. Niederschlag und Temperatur zeigen eine starke Höhenabhängigkeit, die Einstrahlung und damit auch das räumliche Muster der frühjährlichen Schneeschmelze werden von der Exposition der Standorte dominiert (CRAMER 1994, WEIERS 1995, BRAUN und WINIGER 1992, BRAUN und BACKHAUS 1993). In Übereinstimmung mit den ausgeprägten klimatischen Vertikalgradienten kann eine konsequent höhenzonale Anordnung der Vegetation in konstanter Exposition beobachtet werden, jedoch auch eine deutliche Differenzierung der Vegetation in konstanter Höhe bei wechselnder Hangexposition. Insbesondere die ungünstige Wasserbilanz der Südhänge im Sommer, die durch das verfrühte Abschmelzen der Schneedecke in Südexpositionen entsteht, scheint der limitierende Faktor für eine weitere Verbreitung der feucht-temperierten Nadelwälder der Nordhänge zu sein.

Die Verbreitung der Vegetationsformationen im Untersuchungsraum kann daher als ein fliesenartiges Muster beschrieben werden, das primär durch die räumliche Differenzierung der Höhe, Exposition und Einstrahlung im Gebirgsrelief verursacht wird.

Um Befunde zu verbreitungsökologischen Aspekten der Waldformationen zu erhalten, wurde anhand der aus den Satellitendaten kartierten Standorte die Häufigkeit des Auftretens der Waldformationen in Abhängigkeit von den topographischen Parametern Höhe und Exposition sowie von der potentiellen direkten Einstrahlung untersucht. Aufgrund der großen Stichprobe bei Berücksichtigung des gesamten Untersuchungsgebietes war zu beobachten, daß sich die feucht-temperierten Nadelwälder und die Laubwälder mit *Betula utilis* normalverteilt um ihr ökologisches Optimum verhalten. Im Gegensatz hierzu zeigte die Untersuchung der Verteilungen in kleinen Testgebieten erhebliche Abweichungen von der Normalverteilung. Diese bei kleinen Stichproben zu beobachtenden Verbreitungslücken sind nur durch anthropogene Einflüsse erklärbar, da im Relief der Testräume topoklimatische Gunststandorte der untersuchten Waldformationen in ausreichender Zahl vorhanden sind.

Es kann daher in einem klimatisch weitgehend homogenen Raum geschlossen werden, daß die bei ausreichender Größe der Stichprobe berücksichtigten Reliktstandorte und die aus der Auswertung resultierende Häufigkeitsverteilung die potentielle Verbreitung der Waldformation in Abhängigkeit der untersuchten Parameter repräsentiert. Die mehrdimensionale Verteilungsform der feucht-temperierten Nadelwälder unter Berücksichtigung aller Standorte kann mit einer statistischen Normalverteilung approximiert werden. Auf diese Weise kann die Abweichung von den Mittelwerten der Verteilung als abnehmende Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Waldformation bezüglich der untersuchten Standortfaktoren aufgefaßt werden.

Mit einem in Bildverarbeitungsanlagen implementierten Maximum Likelihood-Verfahren können die Standortfaktoren für die flächendeckend Datensätze vorliegen auf ihre Eignung als Standort feucht-temperierter Nadelwälder untersucht werden. Die Ergebnisse können zum einen als potentielle Verbreitungskarten der untersuchten Waldformation interpretiert werden, zum anderen bieten sie im Zusammenhang mit der Verbreitungsanalyse weiterer Vegetationsformationen die Möglichkeit zur Erstellung einer differenzierten, klimaökologischen Raumgliederung.

6 Summary

This work should be understood as a contribution to landscape differentiation and landscape transformation in the NW-Karakorum. It focuses on the actual vegetation and the potential forest inventory of this semiarid high mountain landscape in the Northern Areas of Pakistan. The whole data processing and evaluation has been carried out with digital image processing techniques and geographic information systems. The central methodological components were the preparation of a digital elevation model, the calculation of potential direct solar irradiance, and the preparation of a vegetation map from digital LANDSAT-5-TM-data covering the whole research area.

The vegetation had to be mapped by multispectral classification methods, discriminating the plant cover in physiognomic formation units.

To estimate the decline of forest cover it was necessary to develop a statistical model for the reconstruction of the potential forest cover applying ecoclimatological criteria.

Humidity was found to be the basic ecoclimatological element in the Karakorum mountains. It varies depending on changing altitude and slope aspect. Precipitation is strongly influenced by elevation, while irradiation and snow melting depend on the relation between altitude and slope aspect (CRAMER 1994, WEIERS 1995, BRAUN and WINIGER 1992, BRAUN and BACKHAUS 1993). The mean annual precipitation increases and the temperature decreases with increasing altitude.

A distinct altitudinal zoning of the natural vegetation formations under constant slope aspect is observed according to these strong climatic gradients, however, a large variability of vegetation formations may be observed at constant altitudes but varying slope aspect. Therefore, different ecoclimatic conditions on southern and northern slopes at the same altitude cause significantly different vegetation growth. Higher irradiance on southern slopes leads to dryer phytoclimatic conditions than indicated by the mean temperature and precipitation gradient at a given altitude. In spring, the early onset of snowmelting on south facing slopes reduces the water supply during the hot season. Consequently, the vegetation distribution is not only a function of altitude. The spatial vegetation patterns are rather determined by the more complex interrelation of slope aspect, direct irradiation and altitude in the mountain topography.

The spatial distribution of vegetation was mapped according to the available spatial and spectral resolution of the satellite sensor. The distribution frequency of vegetation was evaluated as a function of topographical parameters i. e. altitude and slope aspect as well as potential direct irradiation. The main task was to scale the topographic parameters altitude, slope aspect, slope inclination and the potential direct irradiation to represent their deviation from optimal ecoclimatological conditions. The frequency patterns of moderately humid coniferous forest derived from the total area were nearly normally distributed. Larger differences were evident when these patterns were compared to

frequency distribution derived from smaller areas. This deviation can be interpreted as degradation of forest cover due to human impact.

A Maximum likelihood algorithm has been used to classify three topographical databases, i. e. altitude, aspect and slope inclination. It is possible to reconstruct potential forest cover for the whole region by using the actual distribution of moderately humid coniferous forest as a virtual training subset. According to the strong subsistential and commercial use of forest in the research area, a remarkable decline of forest resources can be observed.

7 Literatur

- ADAMS, A.L. (1867): Wanderings of a naturalist in India, the Western Himalayas and Cashmere. Edinburgh.
- AHMED, M.U. u. S.A. QADIR (1976): Phytosociological studies along the way of Gilgit to Gopis, Yasin and Phunder. - Pak. J. For. 26, 93-104.
- ALBERTZ, J. (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: Eine Einführung in die Fernerkundung. Darmstadt.
- ALI, S.I. (1978): The flora of Pakistan, some general and analytical remarks. - Notes from the Royal Bot. Gard. Edinburgh 36, 2, 427-439.
- BÄHR, H.-P. u. T. VÖGTLE (1991): Digitale Bildverarbeitung: Anwendungen in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. Karlsruhe.
- BÄSSMANN, H. u. Ph.W. BESSLICH (1991): Bildverarbeitung Ad Oculos. Heidelberg.
- BAHRENBERG, G. u. E. GIESE (1975): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. Stuttgart.
- BAKSHI, B.K., M.A. RAM REDDY, H.S. THAPAR u. S.N. KHAN (1972): Studies on Silver Fir Regeneration. - Ind. For. 98, 135-143.
- BAUMERT, H. (1960): Die Vermessungsarbeiten im NW-Karakorum 1959. - ZfV 8, 292-295.
- BÖHM, H. (1968): Neue Forschungen im Umkreis der Glocknergruppe. - Wissensch. Alpenvereinshefte 21, 143-174.
- BOLLE, H.-J. (1975): Physikalische Grundlagen der Fernerkundung. In: Symposium Erderkundung, DFVLR-DGP, 11-24. Köln.
- BRANDIS, D. (1883): On the distribution of forests in India. - Ind. For. 9, 173-189, 221-233.
- BRANDIS, D. (1884a): Der Wald des äußeren und nordwestlichen Himalaya. - Verh. d. naturhist. Ver. d. Pr. Rhld., 153-180.
- BRANDIS, D. (1884b): Die Beziehungen zwischen Regenfall und Wald in Indien. - Verh. d. naturhist. Ver. d. Pr. Rhld., 380-417.
- BRAUN, G. (1988): Die Ökologie der andinen Polylepisgehölze unter besonderer Berücksichtigung des Vulkans Sajama in der Westkordillere Boliviens. Dipl.-Arb., Geogr. Inst. Univ. Bonn. (unveröff.).
- BRAUN, G. (1992): Vegetation mapping from L-5-TM-data and a statistical approach for the reconstruction of potential forest cover using GIS and digital image processing techniques. In: CAK newsletter 2. Wiesbaden.
- BRAUN, G. u. M. WINIGER (1992): Vegetation mapping and a statistical approach for the reconstruction of the potential forest cover using LANDSAT-5-TM-Data and DTM. In: Proc. of Satellite Symposia 1 & 2, Munich, 30.3.-4.4.1992 (ESA ISY-2, July 1992), 381-385.
- BRAUN, G. u. R. BACKHAUS (1993): Quantitative evaluation of ecologically relevant structures by image analysis of classified areas. Paper held on the 25th Int. Symp. on Remote Sensing and Global Environmental Change. Graz. (im Druck).
- BRECKLE, S.-W. (1971): Ökologie und Mikroklima in der alpinen Stufe des afghanischen Hindukush. - Ber. d. Deutsch. Bot. Ges. 84, 721-730.

- BRECKLE, S. W. u. W. FREY (1974): Die Vegetationsstufen im zentralen Hindukusch. - Afghanistan J. 1, 75-80. Graz.
- BUTZ, D. (1989): Pastures and pastoralism in Shimshal. Preliminary Report to AKRSP. McMaster Univ. Canada.
- CASIMIR, M.J. (1991): Fernerkundung und die ökologischen Grundlagen der Wanderviehwirtschaft. In: SCHOLZ, F. (Hrsg.): Nomaden - Mobile Tierhaltung, 265-285. Berlin.
- CHAUDHRI, I.I. (1963): Distribution of gymnosperms in West Pakistan. - Vegetatio 11, 372-382.
- CLARK, W.A.V. u. P.L. HOSKING (1986): Statistical Methods for Geographers. New York.
- CONWAY, G., A. MIAN, Z. ALAM, M. YAR u. T. HUSSAIN (1987): Agroecosystems of the Hunza-valley. First iteration, May 1987. Draft Report, Internat. Inst. for Environment and Development. London.
- CONWAY, W. H. (1894): Climbing in the Himalayas. Maps and Scientific Reports. London.
- CRAMER, T. (1994): Klimaökologische Studien im Bagrot. Diss. Univ. Bonn. (in Vorber.).
- DAINELLI, G. (1934): La esplorazione della regione fra l'Himalaya occidentale e il Caracorum. In: Spedizione Italiana de Filippi nell'Himalaia, Caracorum e Turchestan cinese (1913-1914). Ser. II, Vol. I. Bologna.
- DAINELLI, G. (1939): Beiträge zur Geologie des Himalaya. - Mitt. d. Geol. Ges. Wien 15/16, 1-36.
- DECH, S.W. (1987): Erfassung der Landnutzungsstrukturen nordwestlich Würzburg anhand digitaler multispektraler LANDSAT-5-Thematic-Mapper-Daten. DFVLR-FB 87-37. Oberpfaffenhofen.
- DESIO, A. (1930): Geological work of the Italian Expedition to the Karakorum. - Geogr. Journ. LXXV.
- DONKER, N.H.W. u. I.R. SOETERS (o. J.): Digital image processing subjects for earth sciences. - ITC, RSD 8.
- DOZIER, J. u. S.I. OUTCALT (1979): An approach toward energy balance simulation over rugged terrain. - Geogr. Annal. 11, 65-85.
- DUTHIE, J. F. (1893/94): Report on a botanical tour in Kashmir. - Rec. Bot. Surv. India 1, 1, 1-18 a. 1, 3, 25-47.
- EASTMAN, J.R. (1992): IDRISI Technical Reference. Worcester.
- ECKER, R. (1992): Digital orthophoto generation based on a high-quality DTM. - ITC Journal 1992-1, 59-64.
- ELLENBERG, H. (1952): Physiologisches und ökologisches Verhalten derselben Pflanzenarten. - Ber. Dt. Bot. Ges. 65, 351-362.
- ELLENBERG, H. u. D. MUELLER-DOMBOIS (1967): Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the earth. - Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, 37, 21-55.

- ELLENBERG, H., H.E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRTH, W. WERNER u. D. PAULISSEN (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobot. 18, 2. verb. Aufl. Göttingen.
- ELVIDGE, C.D. (1990): Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. - Int. J. Remote Sensing 10, 1775-1795.
- FAO (1958): Choice of tree species. Forestry development paper No. 13.
- FAO (1959): Tree planting practices in temperate Asia. Burma-India-Pakistan. Forestry development paper No. 14.
- FLOHN, H. (1958): Beiträge zur Klimakunde Hochasiens. - Erdkunde 12, 294-308.
- FLOHN, H. (1969): Zum Klima und Wasserhaushalt des Hindukush und der benachbarten Hochgebirge. - Erdkunde 23, 205-215.
- FRANK, T.D. (1988): Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain front range with Landsat thematic mapper and digital terrain data. - Photogramm. Engineering and Remote Sensing 54, 12, 1727-1734.
- FRANK, D., S. KLOTZ u. W. WESTHUS (1990): Biologisch-ökologische Daten zur Flora der DDR. Wiss. Beitr. Univ. Halle-Wittenberg, 2. Aufl., 32 (P 41).
- FREY, W. u. W. PROBST (1978): Vegetation und Flora des Zentralen Hindukush (Afghanistan). Beih. z. Tübinger Atl. d. Vorderen Orients, Reihe A (Naturwiss.), Nr. 3. Wiesbaden.
- FUNK, M. (1983): Berechnung der Globalstrahlung auf der Basis eines digitalen Geländemodells. Ber.u. Skripten d. Geogr. Inst. d. Univ. Zürich., Nr. 15. Zürich.
- GANSSER, A. (1964): Geology of the Himalaya. London.
- GANZEMÜLLER, K. (1881): Über Klima, Pflanzen- und Tierwelt in dem Centralzug des nordwestlichen Himalaya. - Ztschr. d. Ges. f. Erdk. Berlin 16, 385-420.
- GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. München.
- GERSTL, S.A.W. (1990): Physics concepts of optical and radar reflectance signatures. - Int. J. Remote Sensing 11, 7, 1109-1117.
- GOHAR, A. (1985): Report on pasture survey of Chalt-Chaprote valley. AKRSP. Gilgit.
- GOUDIE, A.S., D. BRUNSDEN, D.N. COLLINS, E. DERBYSHIRE, R.I. FERGUSON, Z. HASHMET, D.K.C. JONES, F.A. PERROTT, M. SAID, R.S. WATERS u. W.B. WHALLEY (1984): The geomorphology of the Hunza-valley, Karakorum mountains, Pakistan. In: MILLER, K. J. (ed.): The International Karakorum Project, Vol. 2, 359-410. Cambridge.
- GRÖTZBACH, E. (1984): Bagrot - Beharrung und Wandel einer peripheren Talschaft im Karakorum. - Die Erde 115, 305-321.
- GUPTA, R.K. (1966): Studies on the succession of the oak-conifer forests of the Garhwal Himalayas. - Trop. Ecol. 7, 67-81.
- GUPTA, R.K. (1974): Synecology of the grass cover and parallelism with forest types in Garhwal Himalaya. - Ind. For. 100, 499-510.
- GUPTA, R.K. (1978): Impact of human influences on the vegetation of the Western Himalayas. - Vegetatio 37, 111-118.
- HABERÄCKER, P. (1989): Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen und Anwendungen. Wien.

- HARTMANN, H. (1966): Beiträge zur Kenntnis der Flora des Karakorum. - Engl. Bot. Jahrb. 85, 259-328 u. 329-409.
- HARTMANN, H. (1968): Über die Vegetation des Karakorum. 1. Teil: Gesteinsfluren, subalpine Strauchbestände und Steppengesellschaften im Zentral-Karakorum. - Vegetatio 15, 297-387.
- HARTMANN, H. (1972): Über die Vegetation des Karakorum. 2. Teil: Rasen- und Strauchgesellschaften im Bereich der alpinen und der höheren subalpinen Stufe des Zentral-Karakorum. - Vegetatio 24, 91-157.
- HASERODT, K. (1984): Aspects of the actual climatic conditions and historic fluctuations of glacier in Western Karakorum. - J. of Central Asia 7, 2, 77-94.
- HASERODT, K. (1989): Zur pleistozänen und postglazialen Vergletscherung zwischen Hindukusch, Karakorum und Westhimalaya. In: HASERODT, K. (Hrsg.): Hochgebirgsräume Nordpakistan im Hindukusch, Karakorum und Westhimalaya. Beitr. u. Mat. z. Reg. Geogr. H. 2, 181-233. TU Berlin.
- HAYDEN, H.H. (1916): Notes on the geology of Chitral, Gilgit and the Pamirs. - Rec. Geol. Surv. India 45, 271-335.
- HEDIN, S. (1909-1912): Transhimalaya. Bd. 1-3. Leipzig.
- HEWITT, K. (1989): The altitudinal organisation of Karakoram geomorphic processes and depositional environments. - Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 76, 9-32.
- HILDEBRANDT, G. (1976): Die spektralen Reflexionseigenschaften der Vegetation. Remote sensing in Forestry, Proceedings of the Symposium held during the XVI. IUFRO World Congress, Oslo, 9-22.
- HOOKE, J.D. (1872-97): Flora of British India. Vol. 1-7. London.
- HORMANN, K. (1980): Versuche der Bestimmung klimatischer Grenzen der Vegetationstypen in Nepal. - Arb. a. d. Geogr. Inst. d. Univ. d. Saarlandes 29, 191-211.
- HORMANN, K. (1986): Berechnete Niederschlagskarten der Himalaya-Länder. - Göttinger Geogr. Abh. 81, 167-183.
- HÜGLI, H. (1980): De la synthèse d' images appliquee aux maquettes de terrain numeriques. - Mitt. d. Inst. f. Geodäsie u. Photogramm. d. ETH Zürich 28.
- INDERMÜHLE, D. (1972): Mikroklimatische Untersuchungen im Tibesti-Gebirge. In: Arbeitsgem. f. vergl. Hochgebirgsforschung (Hrsg.): Hochgebirgsforschung - High mountain Research, 121-143. Innsbruck.
- ITTEN, K.I. (1980): Grossräumige Inventuren mit Landsat-Erderkundungssatelliten. Landes-kundl. Luftbildausw. im mitteleurop. Raum, BfLR, 15.
- ITTEN, K.I., P. MEYER, T. KELLENBERGER, R. LEU, S. SANDMEIER, P. BITTER u. K. SEIDEL (1992): Correction of the impact of topography and atmosphere on LANDSAT-TM forest mapping in alpine regions. Remote Sensing Series, Vol.18. Zürich.
- IVES, J.D. u. B. MESSERLI (1989): The Himalayan Dilemma. Reconciling development and conservation. London.
- JAIN, K.K. (1975): A taxonomic revision of the Himalayan firs. - Ind. For. 101, 199-204.

- JAIN, K.K. (1976): A taxonomic revision of the Himalayan junipers. - Ind. For. 102, 2, 109-117.
- JAMES, A. (Hrsg.) (1968): Environmental research in the Samir valley of the Hindu Kush, Afghanistan. - Final Technical Report, Univ. of Newcastle upon Tyne.
- JAVEID, G.N. (1978): Forest Flora of Kashmir: A check list I. - Ind. For. 104, 772-779.
- JHA, M.N., R.K. RATHORE u. P. PANDE (1984): Soil factor affecting the natural regeneration of silver fir and spruce in Himachal Pradesh. - Ind. For. 110, 3, 293-297.
- JUNGHANS, H. (1969): Sonnenscheindauer und Strahlungsempfang geneigter Ebenen. Abhandlungen des Met. Dienstes der DDR Nr. 85 (Bd. XI). Berlin.
- KANEMASU, E.T., T.H. DEMETRIADES-SHAH, H. SU u. A.R.G. LANG (1990): Estimating grassland biomass using remotely sensed data. In: STEVEN, M.D. u. J.A. CLARK (Hrsg.): Applications of remote sensing in agriculture, 185-199. Cambridge.
- KAUL, V. u. Y.K. SARIN (1971): The phytosociology of some alpine meadows in N.W. Himalayas. - Vegetatio 23, 361-368.
- KAWOSA, M. A. (1985): Der Einsatz von Satellitenbildern für die Kartierung vegetationsorientierter Landnutzung und der Dynamik von Waldsystemen in den Ländern am Himalaya. - Veröff. d. Naturforsch. Ges. Emden, N.F. Bd 2-3 D1.
- KAZMIERCZAK, H. (Hrsg.) (1980): Erfassung und maschinelle Verarbeitung von Bilddaten. Grundlagen u. Anwendungen. Wien.
- KHAN, M.F. (1969): Aerial forest inventory and land use survey in Northern West Pakistan. - Pak. J. For. 19, 235-247.
- KITAMURA, S. (1963): New species from West Pakistan and Afghanistan. - Acta Phytotax. Geobot. 19, Nos. 4-6, 97-111.
- KLÖTZLI, F., R. SCHAFFNER u. A. BOSSHARD (1989): Pasture development and its implications in the Hunza-valley. Preliminary Report. Bern.
- KOJIMA, S. (1990): A geobotanical study of *Ephedretum gerardianae* in North Central Nepal. - Phytocoenologia 19, 1, 93-108.
- KONDRATYEV, K.Y.A. (1977): Radiation regimes of inclined surfaces. Technical note No. 152, WMO No. 467.
- KOWARIK, I. u. W. SEIDLING (1989): Zeigerwertberechnungen nach Ellenberg - Zu Problemen und Einschränkungen einer sinnvollen Methode. - Landschaft u. Stadt 21, 132-143.
- KRAMER, H.J. (1993): Observation of the earth and its environment - survey of missions and sensors. DLR - DFD. Oberpfaffenhofen.
- KRAUS, K. u. W. SCHNEIDER (1988): Fernerkundung. Bd. 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Bonn.
- KRAUS, K. u. W. SCHNEIDER (1989): Fernerkundung. Bd. 2: Auswertung photographischer und digitaler Bilder. Bonn.
- KREUTZMANN, H. (1987): Die Talschaft Hunza (Northern Areas of Pakistan). Wandel der Austauschbeziehungen unter Einfluß des Karakorum Highway. - Die Erde 118, 37-53.

- KREUTZMANN, H. (1989): Hunza. Ländliche Entwicklung im Karakorum. - Abh. Anthropogeogr., Inst. f. Geogr. Wiss. FU Berlin, Bd. 44.
- KRONBERG, P. (1985): Fernerkundung der Erde. Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie. Stuttgart.
- KUHN, N., R. AMIET u. N. HUFSCHEID (1987): Veränderungen in der Waldvegetation der Schweiz infolge Nährstoffanreicherungen aus der Atmosphäre. - Allg. Forst- u. Jagdztg. 158, 77-84.
- KUNZ, S. (1983): Anwendungsorientierte Kartierung der Besonnung im regionalen Maßstab. - Geographica Bernensia 19.
- LAL, J.B., A.K. GULATI u. M.S. BIST (1991): Satellite mapping of alpine pastures in the Himalayas. - Int. J. Remote Sensing 12, 3, 435-443.
- LANDOLT, E. (1977): Ökologische Zeigerwerte der Schweizer Flora. - Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, 64.
- LANDSAT data users handbook 1984.
- LANG, R. (1985): Globalstrahlung und kurzweilige Strahlungsbilanz als Hilfsmittel zur Abgrenzung von Klimatopen. - Regensburger Geogr. Schr. 1 (Schäfer-Festschr.), 557-571.
- LANTIERI, D. (1988): Introduction to remote sensing. FAO Remote Sensing Centre, RSC Series No. 48. Rome.
- LARCHER, W. (1984): Ökologie der Pflanzen. Stuttgart.
- LAUER, W. (1979): Die hypsometrische Asymmetrie der Paramohöhenstufe in den nördlichen Anden. - Innsbrucker Geogr. Studien 5, 115-130.
- LAUER, W. u. M.D. RAFIQPOOR (1990): Topographische Karte des Berglandes von Charazani (Bolivien). - Erdkunde 44, 1, 37-46.
- LILLESAND, T.M. u. R.W. KIEFER (1987): Remote sensing and image interpretation. New York.
- MANI, M.S. (1978): Ecology and phytogeography of high altitude plants of the Northwest Himalaya. New Delhi.
- MENZ, G. (1993): Niederschlag und Biomasse in den wechselfeuchten Tropen Ostafrikas - Neuere Methoden zur quantitativen Erfassung klimaökologischer Raumparameter aus digitalen Satellitendaten (METEOSAT und NOAA). Habil.-Schr. Geogr. Inst. Univ. Bonn. (Unveröff.).
- MEUSEL, H. u. R. SCHUBERT (1971): Beiträge zur Pflanzengeographie des West-Himalayas. Teil 1-3. - Flora 160, 137-194, 373-432 u. 573-606.
- MIEHE, G. (1984): Vegetationsgrenzen im multizonalen und extremen Hochgebirge (Zentraler Himalaya). - Erdkunde 38, 268-277.
- MIEHE, S., T. CRAMER, J.-P. JACOBSEN u. M. WINIGER (1993): Humidity conditions in the NW-Karakorum as indicated by climatic data and corresponding distribution patterns of the montane and alpine vegetation. (In Vorber.)
- MONTEITH, J.L. (1978): Grundzüge der Umweltphysik. Darmstadt.

- MÜLLER, U. (1989): Klassifizierung landwirtschaftlicher Nutzungen mit multispektralen Satellitendaten. Dipl.-Arb. Univ. Bonn. (Unveröff.).
- PAFFEN, K.H., W. PILLEWIZER u. H.-J. SCHNEIDER (1956): Forschungen im Hunza-Karakorum. - *Erdkunde* 10, 1, 1-33.
- PARK, G.J. (1985): Ökologische und pflanzensoziologische Untersuchungen von Almweiden der bayrischen Alpen unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten ihrer Verbesserung. Diss. Fak. Landw. u. Gartenb. TU München, 211 S.
- PARLOW, E. (1988): Ableitung strahlungsklimatologischer Daten und Raummuster für ein subpolares Ökosystem Nordskandiaviens mit Hilfe der Digitalen Bildverarbeitung. Habil.-Schr. Freiburg.
- PRINCE, S.D. (1990): High temporal frequency remote sensing of primary production using NOAA AVHRR. In: STEVEN, M.D. u. J.A. CLARK (Hrsg.): Applications of remote sensing in agriculture. Cambridge.
- PURI, G.S. (1960): Indian Forest Ecology. A Comprehensive Survey of Vegetation and its Environment in the Indian Subcontinent. Bd. 1 u. 2. New Delhi.
- PURI, G.S. u. R.K. GUPTA (1968): Ecology of silver firs in Western Himalayas. - *Trop. Ecol.* 9, 1-15.
- QUIEL, F. (1986): Landnutzungskartierung mit LANDSAT-Daten. Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau. H. 17, BfLR. Bonn.
- RAM, J., S.P. SINGH u. J.S. SINGH (1988): Community level phenology of grassland above treeline in Central Himalaya, India. - *Arctic a. Alpine Res.* 20, 3, 325-332.
- RANA, B.S., S.P. SINGH u. R.P. SINGH (1988): Biomass structure and net primary production of Siwalik chir pine (*Pinus roxburghii* Sarg.) - mixed broadleaf forest. - *Proc. Indian Acad. Sci. (Plant Sci.)* 98, 4, 307-316.
- RAWAT, G.S. u. Y.P.S. PANGTEY (1987): Floristic structure of snowline vegetation in central Himalaya, India. - *Arctic a. Alpine Res.* 19, 2, 195-201.
- REIMERS, F. (1992): Untersuchungen zur Variabilität der Niederschläge in den Hochgebirgen Nordpakistans und angrenzender Gebiete. - *Beitr. u. Mat. z. Regionalen Geographie*, H. 6. TU Berlin.
- REPP, G. (1963): Waldökologische Studien im westlichen Himalaya. - *Mitt. Flor.-Soz. Arb.-gem. N. F.* 10, 209-222.
- RICHARDS, J. A. (1986): Remote sensing digital image analysis. Berlin.
- RICHTER, M. (1979): Geoökologische Untersuchungen in einem Tessiner Hochgebirgstal. Dargestellt am Val Vegorness im Hinblick auf planerische Maßnahmen. *Bonner Geogr. Abh.* 63.
- RIESS, A., J. ALBERTZ, R. SÖLLNER u. R. TAUCH (1993): Neue hochauflösende Satellitendaten aus Rußland. - *ZPF* 1/93, 42-46.
- RUWWE, T., T. SCHERER u. U. TEMPELMANN (1991): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Multitemporaler Vergleich der vom Satelliten multispektral registrierten Reflexion von Pflanzenbeständen mit zeitgleich durchgeführten In-Situ-Messungen". Bonn.
- ROSENFELD, A. u. A.C. KAK (1982): Digital picture processing. Bd. 1 + 2. Orlando.

- SAGWAL, S.S. (1990): Constraint analysis of natural regeneration of conifer forests. In: CHADA, S. K. (Hrsg.): Ecology of Kashmir, 137-145. New Delhi.
- SAXENA, H.O. u. P.B.L. SRIVASTAVA (1973): Forest communities of Mussoorie. In: Trop. Ecol. 14, 197-217.
- SCHARDT, M. (1990): Verwendbarkeit von Thematic-Mapper-Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen. DLR-Forschungsbericht 90-44. Oberpfaffenhofen.
- SCHERER, T. (1989): Entwicklung eines interaktiven graphischen Programms zur Digitalisierung der Ergebnisse einer Bodennutzungserhebung aus der DGK 5 L. Dipl.-Arb. Univ. Bonn. (Unveröff.).
- SCHICKHOFF, U. (1993): Das Kaghan-Tal im Westhimalaya (Pakistan). Studien zur landschaftsökologischen Differenzierung und zum Landschaftswandel mit vegetationskundlichem Ansatz. Bonner Geogr. Abh. 87.
- SCHLAGINTWEIT, R.v. (1865): Physikalisch-geographische Schilderungen von Hochasien. - Pet. Geogr. Mitt. 11, 361-377.
- SCHMIDT, U. (1993): Berechnung der direkten Strahlung auf der Basis eines digitalen Höhenmodells des Hunza-Karakorum (Pakistan). Dipl.-Arb. Univ. Bonn. (Unveröff.).
- SCHNEIDER, H.J. u. H. BAUMERT (1968): Die Expeditionskarte Minapin/NW-Karakorum 1:50.000. - Ztschr. f. Verm. 11, 68, 446-457.
- SCHÖNWIESE, C.D. (1985): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Berlin.
- SCHWEINFURTH, U. (1956): Über klimatische Trockentäler im Himalaya. - Erdkunde 10, 297-302.
- SCHWEINFURTH, U. (1957): Die horizontale und vertikale Verbreitung der Vegetation im Himalaya. Bonner Geogr. Abh. 20.
- SEARLE, M.P. (1991): Geology and tectonics of the Karakorum Mountains. Oxford.
- SHEIKH, M.I. u. S.M. KHAN (1982): Forestry and range management in northern areas. Report, Forestry Research Division, Pak. Forest Inst., Peshawar.
- SHIPTON, E. (1940): Karakorum 1939. - Geogr. J. 95, 409-427.
- SINGH, R.P. (1987): Rainfall interception by *Pinus wallichiana* plantation in temperate region of Himachal Pradesh, India. - Ind. For. 113, 559-565.
- SNOY, P. (1975): Bagrot. Eine dardische Talschaft im Karakorum. Bergvölker im Hindukush und Karakorum, Bd. 2. Graz.
- STALEY, E. (1966): Arid mountain agriculture in Northern West Pakistan. Lahore.
- SUSTAINABLE FORESTRY DEVELOPMENT (1987): Proposal in the Aga Khan Rural Support Programme Northern Areas, Pakistan.
- SWAIN, P. u. S.M. DAVIS (1978): Remote sensing: the quantitative approach. New York.
- TAHIRKHELI, R.A.K. u. Q.M. JAN (1984): The geographical and geological domains of the Karakorum. In: MILLER, K. J. (Hrsg.): The International Karakorum Project, 2, 57-70. Cambridge.

- TOMAR, M.S. (1971): Aerial photography specifications for Himalayan Forests with special reference to Jammu and Kashmir. - *Ind. For.* 97, 1, 13-19.
- TON, J., J. STICKLEN u. A.K. JAIN (1991): Knowledge-based segmentation of LANDSAT images. - *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 29, 2, 222-232.
- TROLL, C. (1939): Das Pflanzenkleid des Nanga Parbat. Vegetationskarte der Nanga Parbat-Gruppe (NW-Himalaya) 1:50.000 mit Begleitworten. - *Wiss. Veröff. d. Dt. Museums f. Länderk. zu Leipzig N.F.* 7, 151-180.
- TROLL, C. (1967): Die klimatische und vegetationsgeographische Gliederung des Himalaya-Systems. In: HELLMICH, W. (Hrsg.): *Khumbu Himal. Ergebnisse des Forschungsunternehmens Nepal Himalaya*. Bd. 1, 353-388. Berlin-Heidelberg-New York.
- TROLL, C. (1972): The three-dimensional zonation of the Himalayan System. In: TROLL, C. (Hrsg.): *Landschaftsökologie der Hochgebirge Eurasiens*. *Erdwiss. Forsch.* 4, 264-275.
- TROLL, C. (1973): Die Höhenstaffelung des Bauern- und Wanderhirtentums im Nanga Parbat-Gebiet (Indus-Himalaya). In: RATHJENS, C., TROLL, C. u. H. UHLIG (Hrsg.): *Vergleichende Kulturgeographie der Hochgebirge des südlichen Asien*. *Erdwiss. Forsch.* 5, 43-48.
- UNNI, N.V.M. (1990): Space and forest management in India. In: *Space and forest management, Special Current Event Session Int. Astron. Fed., 41st IAJ Congress*, 49-69. Dresden.
- VISSER, Ph.C. u. J. VISSER-HOOFT (1933): *Wissenschaftliche Ergebnisse der Niederländischen Expeditionen in den Karakorum und die angrenzenden Gebiete in den Jahren 1922, 1925 und 1929/30*. Bd. I: Geographie, Ethnographie, Zoologie. Leipzig.
- WALI, M.K. (1964): A preliminary survey of the conifer communities of Kashmir Himalaya. - *Trop. Ecol.* 5, 32-41.
- WALTER, H. u. S.-W. BRECKLE (1983): *Ökologie der Erde, Bd.1: Grundlagen*. Stuttgart.
- WEIERS, S. (1995): *Zur Klimatologie des NW-Karakorum und angrenzender Gebiete. Statistische Analysen unter Einbeziehung von Wettersatellitenbildern und eines Geographischen Informationssystems (GIS)*. *Bonner Geogr. Abh.* 92.
- WINIGER, M. (1979): Bodentemperaturen und Niederschlag als Indikatoren einer klimatisch-ökologischen Gliederung tropischer Gebirgsräume. - *Geomethodica* 4, 121-150.
- WINIGER, M. (1981): Zur thermisch-hygrischen Gliederung des Mt. Kenya. - *Erdkunde* 35, 248-263.
- WINIGER, M. (1992): Gebirge und Hochgebirge. *Forschungsentwicklung und -perspektiven*. - *Geogr. Rdsch.* 44, 400-408.
- WISSMANN, H. v. (1959): Die heutige Vergletscherung und Schneegrenze in Hochasien mit Hinweisen auf die Vergletscherung der letzten Eiszeit. - *Abh. Akad. Wiss. Mainz, Math.-Nat. Kl.* Bd. 14, 1101-1407. Mainz.
- WISSMANN, H. v. (1960): Stufen und Gürtel der Vegetation und des Klimas in Hochasien und seinen Randgebieten. Teil A. - *Erdkunde* 14, 4, 249-272.
- WISSMANN, H. v. (1961): Stufen und Gürtel der Vegetation und des Klimas in Hochasien und seinen Randgebieten. Teil B. - *Erdkunde* 15, 1, 19-44.



Photo 1: Holzeinschlag in der Stufe des feucht-temperierten Nadelwaldes im oberen Chaprot-Tal. Höhe: 3300 m; Exposition: N; Aufnahmedatum: 9.8.1991
 Tree cutting in the moderately humid coniferous forest in the upper Chaprot-valley. Altitude: 3300 m; aspect: N; date: 9.8.1991

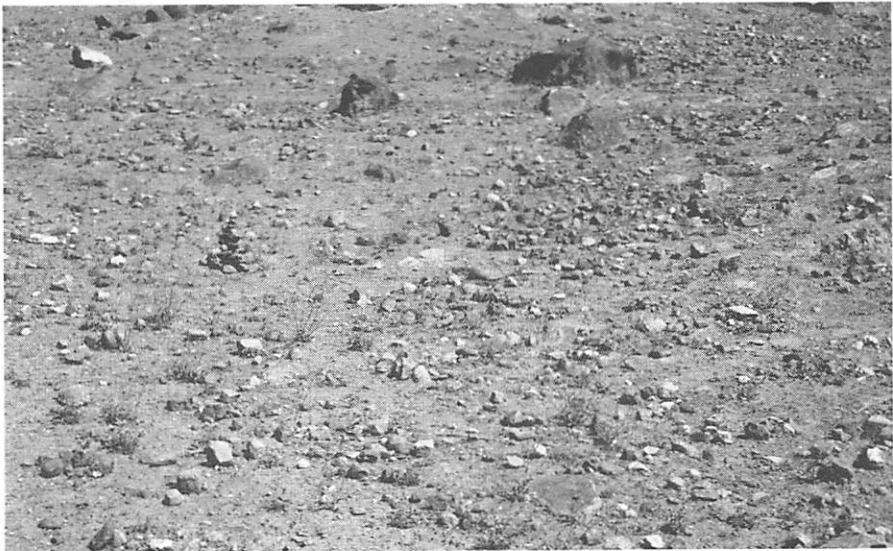


Photo 2: Degradierte Chenopodiaceen-Steppe nahe Karimabad. Höhe: 2330 m; Ex-position: S; Aufnahmedatum: 9.5.1990
 Degraded Chenopodiaceae-Steppe near Karimabad. Altitude: 2330 m; as-pect: S; date: 9.5.1990



Photo 3: Degradierte Waldsteppe oberhalb Haiderabad. Höhe: 3520 m; Exposition: S;
Aufnahmedatum: 10.5.1990
Degraded forest steppe above Haiderabad. Altitude: 3520 m; aspect: S; date: 10.5.1990

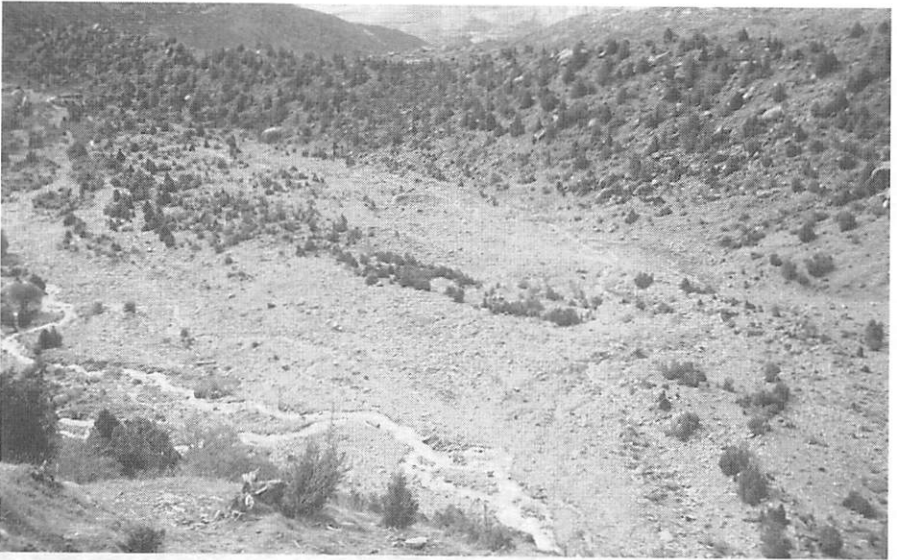


Photo 4: Artemisia-Juniperus-Waldsteppe auf einer Seitenmoräne des Minapin-Gletschers.
Höhe: 2820 m; Exposition: SW; Aufnahmedatum: 22.7.1990
Forest steppe with Artemisia and Juniperus, on a lateral moraine of the Minapin -Glacier.
Altitude: 2820 m; aspect: SW; date: 22.7.1990



Photo 5: Durch Holzeinschlag degradiertes feucht-temperiertes Nadelwald mit *Picea smithiana* im Minapin-Gebiet. Höhe: 2910 m; Exposition: N; Aufnahmedatum: 22.7.1990
Moderately humid coniferous forest with *Picea smithiana* in the Minapin-valley, strongly degraded by tree felling. Altitude: 2910 m; aspect: N, date: 22.7.1990

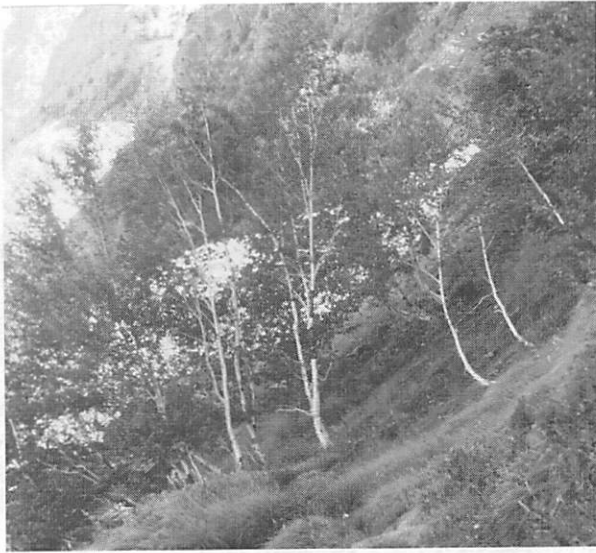


Photo 6: *Betula utilis*-Bestand am Pisan-Gletscher. Höhe: 3000 m; Exposition: N; Aufnahmedatum: 31.7.1991
Habitat of *Betula utilis* at the Pisan Glacier. Altitude: 3000 m; aspect: N; date: 31.7.1991



Photo 7: *Juniperus communis*-Bestand in der oberen montanen Stufe im Minapin-Tal, unterhalb der Rakaposhi-Nordabdachung. Höhe: 3300 m; Exposition: ONO; Aufnahmedatum: 24.7.1990
 Patches of *Juniperus communis* in the upper montane zone in the Minapin-valley, below the Rakaposhi northface. Altitude: 3300 m; aspect: ENE; date: 24.7.1990



Photo 8: Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme aus dem oberen Chaprot-Tal. Die Aufnahme von 1959 zeigt Waldbestände auf Seitenmoränen, die zum Zeitpunkt der Feldbegehung nicht mehr angetroffen werden konnten.
 Terrestrial photogrammetrical picture from the upper Chaprot-valley, taken in 1959. The picture shows forest stands on lateral moraines which could not be found at the time

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN (Fortsetzung)

- Heft 55: *Selke, W.*: Die Ausländerwanderung als Problem der Raumordnungspolitik in der Bundesrepublik Deutschland. 1977. 167 S. DM 28,--
- Heft 56: *Sander, H.-J.*: Sozialökonomische Klassifikation der kleinbäuerlichen Bevölkerung im Gebiet von Puebla-Tlaxcala (Mexiko). 1977. 169 S. DM 24,--
- Heft 57: *Wiek, K.*: Die städtischen Erholungsflächen. Eine Untersuchung ihrer gesellschaftlichen Bewertung und ihrer geographischen Standorteigenschaften - dargestellt an Beispielen aus Westeuropa und den USA. 1977. 216 S. DM 19,--
- Heft 58: *Frankenberg, P.*: Florengographische Untersuchungen im Raume der Sahara. Ein Beitrag zur pflanzengeographischen Differenzierung des nordafrikanischen Trockenraumes. 1978. 136 S. DM 48,--
- Heft 61: *Leusmann, Ch.*: Strukturierung eines Verkehrsnetzes. Verkehrsgeographische Untersuchungen unter Verwendung graphentheoretischer Ansätze am Beispiel des süddeutschen Eisenbahnnetzes. 1979. 158 S. DM 32,--
- Heft 62: *Seibert, P.*: Die Vegetationskarte des Gebietes von El Bolsón, Provinz Río Negro, und ihre Anwendung in der Landnutzungsplanung. 1979. 96 S. DM 29,--
- Heft 63: *Richter, M.*: Geoökologische Untersuchungen in einem Tessiner Hochgebirgstal. Dargestellt am Val Vegorness im Hinblick auf planerische Maßnahmen. 1979. 209 S. DM 33,--
- Heft 65: *Böhm, H.*: Bodenmobilität und Bodenpreisgefüge in ihrer Bedeutung für die Siedlungsentwicklung. 1980. 261 S. DM 29,--
- Heft 66: *Lauer, W. u. P. Frankenberg*: Untersuchungen zur Humidität und Aridität von Afrika - Das Konzept einer potentiellen Landschaftsverdunstung. 1981. 127 S. DM 32,--
- Heft 67: *Höllermann, P.*: Blockgletscher als Mesoformen der Periglazialstufe - Studien aus europäischen und nordamerikanischen Hochgebirgen. 1983. 84 S. DM 26,--
- Heft 69: *Graafen, R.*: Die rechtlichen Grundlagen der Ressourcenpolitik in der Bundesrepublik Deutschland - Ein Beitrag zur Rechtsgeographie. 1984. 201 S. DM 28,--
- Heft 70: *Freiberg, H.-M.*: Vegetationskundliche Untersuchungen an südchilenischen Vulkanen. 1985. 170 S. DM 33,--
- Heft 71: *Yang, T.*: Die landwirtschaftliche Bodennutzung Taiwans. 1985. 178 S. DM 26,--
- Heft 72: *Gaskin-Reyes, C.E.*: Der informelle Wirtschaftssektor in seiner Bedeutung für die neuere Entwicklung in der nordperuanischen Regionalstadt Trujillo und ihrem Hinterland. 1986. 214 S. DM 29,--
- Heft 73: *Brückner, Ch.*: Untersuchungen zur Bodenerosion auf der Kanarischen Insel Hierro. 1987. 194 S. DM 32,--
- Heft 74: *Frankenberg, P. u. D. Klaus*: Studien zur Vegetationsdynamik Südosttunesiens. 1987. 110 S. DM 29,--
- Heft 75: *Siegburg, W.*: Großmaßstäbige Hangneigungs- und Hangformanalyse mittels statistischer Verfahren. Dargestellt am Beispiel der Dollendorfer Hardt (Siebengebirge). 1987. 243 S. DM 38,--
- Heft 76: *Kost, K.*: Die Einflüsse der Geopolitik auf Forschung und Theorie der politischen Geographie von ihren Anfängen bis 1945. 1988. 467 S. DM 46,--
- Heft 77: *Anhuf, D.*: Klima und Ernteertrag - eine statistische Analyse an ausgewählten Beispielen nord- und südsaharischer Trockenräume - Senegal, Sudan, Tunesien. 1989. 177 S. DM 36,--
- Heft 78: *Rheker, J.R.*: Zur regionalen Entwicklung der Nahrungsmittelproduktion in Pernambuco (Nordostbrasilien). 1989. 177 S. DM 35,--
- Heft 79: *Völkel, J.*: Geomorphologische und pedologische Untersuchungen zum jungquartären Klimawandel in den Dünengebieten Ost-Nigers (Südsahara und Sahel). 1989. 258 S. DM 39,--
- Heft 80: *Bromberger, Ch.*: Habitat, Architecture and Rural Society in the Gilán Plain (Northern Iran). 1989. 104 S. DM 30,--
- Heft 81: *Krause, R.F.*: Stadtgeographische Untersuchungen in der Altstadt von Djidda / Saudi-Arabien. 1991. 76 S. DM 28,--

(Fortsetzung umseitig)

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN (Fortsetzung)

- Heft 82: *Graafen, R.*: Die räumlichen Auswirkungen der Rechtsvorschriften zum Siedlungswe-
sen im Deutschen Reich unter besonderer Berücksichtigung von Preußen, in der Zeit
der Weimarer Republik. 1991. 283 S. DM 64,--
- Heft 83: *Pfeiffer, L.*: Schwermineralanalysen an Dünenstränden aus Trockengebieten mit Bei-
spielen aus Südsahara, Sahel und Sudan sowie der Namib und der Taklamakan. 1991.
235 S. DM 42,--
- Heft 84: *Dittmann, A. and H.D. Laux (Hrsg.)*: German Geographical Research on North
America - A Bibliography with Comments and Annotations. 1992. 398 S. DM 49,--
- Heft 85: *Grunert, J. u. P. Höllermann, (Hrsg.)*: Geomorphologie und Landschaftsökologie.
1992. 224 S. DM 29,--
- Heft 86: *Bachmann, M. u. J. Bendix*: Nebel im Alpenraum. Eine Untersuchung mit Hilfe di-
gitaler Wettersatellitendaten. 1993. 301 S. DM 58,--
- Heft 87: *Schickhoff, U.*: Das Kaghan-Tal im Westhimalaya (Pakistan). 1993. 268 S. DM 54,--
- Heft 88: *Schulte, R.*: Substitut oder Komplement - die Wirkungsbeziehungen zwischen der
Telekommunikationstechnik Videokonferenz und dem Luftverkehrsaufkommen deut-
scher Unternehmen. 1993. 177 S. DM 32,--
- Heft 89: *Lützel, R.*: Räumliche Unterschiede der Sterblichkeit in Japan - Sterblichkeit als In-
dikator regionaler Lebensbedingungen. 1994. 247 S. DM 42,--
- Heft 90: *Grafe, R.*: Ländliche Entwicklung in Ägypten. Strukturen, Probleme und Perspektiven
einer agraren Gesellschaft, dargestellt am Beispiel von drei Dörfern im Fayyûm.
1994. 225 S. DM 46,--
- Heft 91: *Bonine, M.E., Ehlers, E., Krafft, Th. and G. Stöber (Hrsg.)*: The Middle Eastern
City and Islamic Urbanism. An Annotated Bibliography of Western Literature. 1994.
877 S. DM 68,--
- Heft 92: *Weiers, S.*: Zur Klimatologie des NW-Karakorum und angrenzender Gebiete. Stati-
stische Analysen unter Einbeziehung von Wettersatellitenbildern und eines Geographi-
schen Informationssystems (GIS). 1995. 218 S. DM 38,--

In Kommission bei Ferd. Dummlers Verlag, Bonn

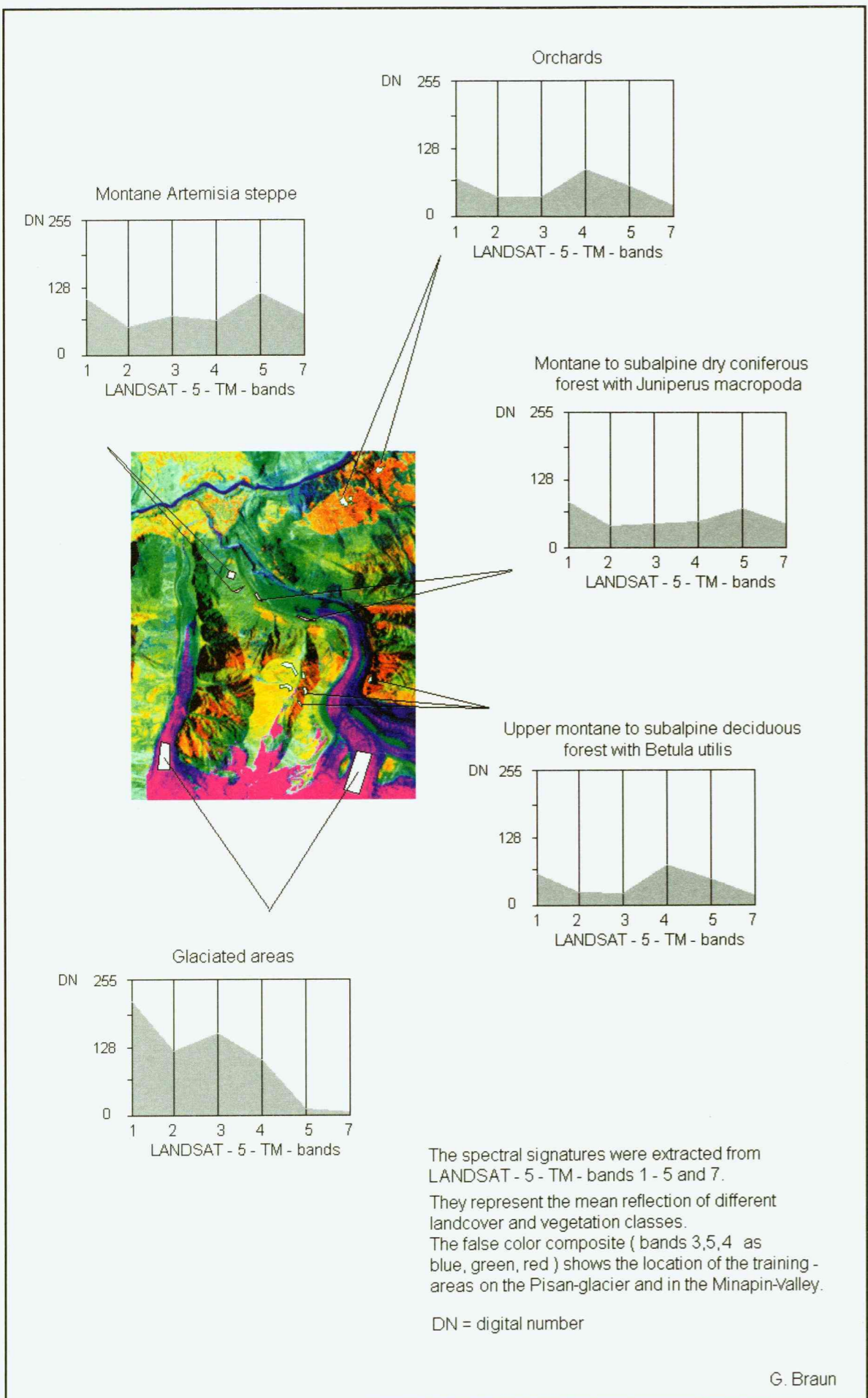


Abb. 13: Identifikation von Trainingsgebieten durch Interpretation von Falschfarbkompositen und Extraktion von spektralen Signaturen aus den digitalen LANDSAT - 5 - TM - Daten

Fig. 13: Identification of training subsets by interpretation of false color composites and extraction of spectral signatures from digital LANDSAT - 5 - TM - data

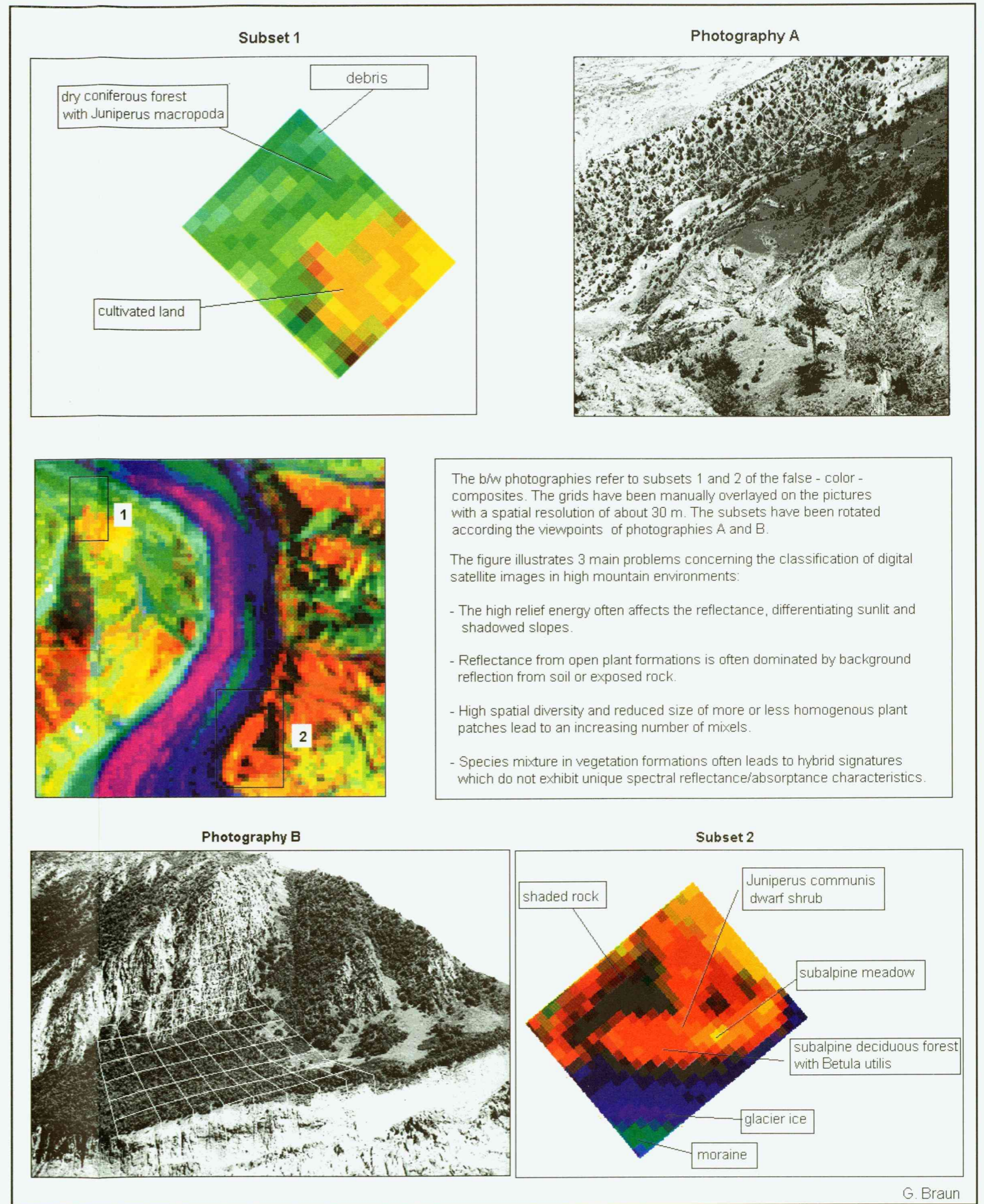


Abb. 15: Vergleich zwischen Ausschnitten aus der bearbeiteten LANDSAT - 5 - TM - Szene (Kanäle 3,5,4 als BGR) und Photographien derselben Standorte im Tal des Minapin-Gletschers

Fig. 15: Comparison between LANDSAT - 5 - TM - subsets (Bands 3,5,4 as BGR) and photographies from the same locations in the Minapin Valley

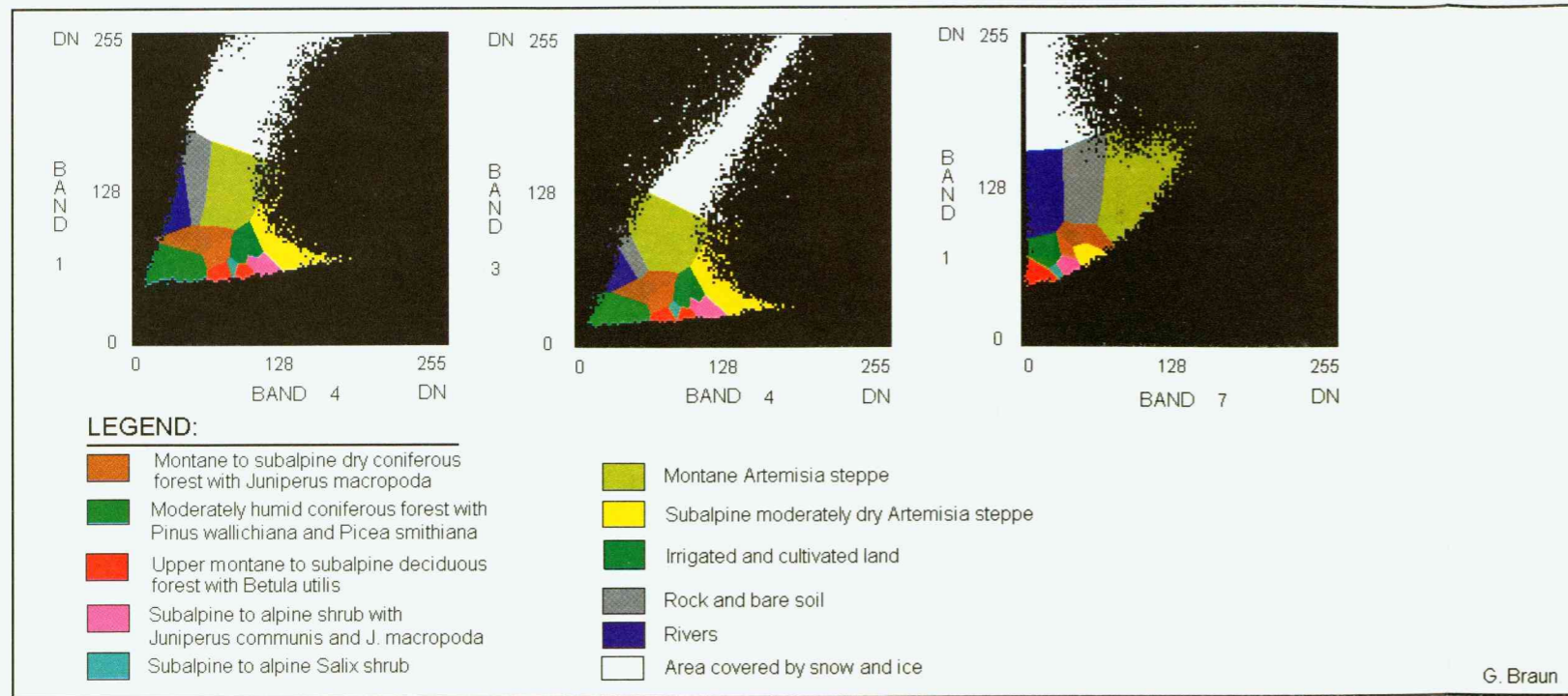


Abb. 16: Klassifikationsergebnis in zweidimensionalen Merkmalsräumen für verschiedene Kombinationen von LANDSAT - 5 - TM - Kanälen

Fig. 16: Classification result in 2-dimensional feature spaces for different combinations of LANDSAT - 5 - TM - bands

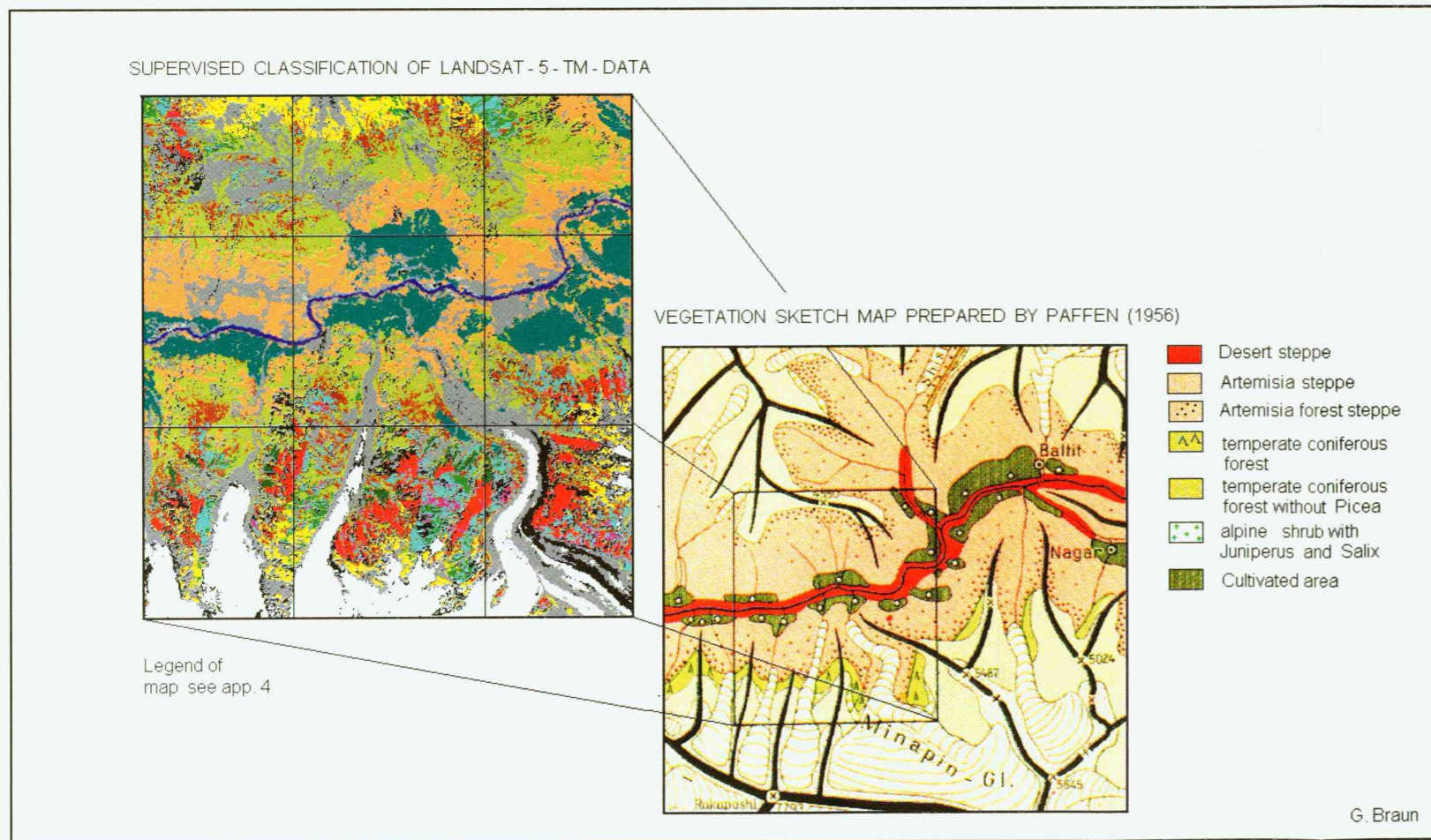


Abb. 27: Vergleich einer manuell angefertigten Vegetationskarte des Hunza - Karakorum aus PAFFEN et al. (1956) und der Vegetationskarte des NW - Karakorum aus einer überwachten Klassifikation digitaler LANDSAT - 5 - TM - Daten (Anl. 4)

Fig. 27: Comparison between a conventional vegetation map from the Hunza Karakorum (Paffen et al. 1956) and the vegetation map of the NW Karakorum prepared by supervised classification of digital LANDSAT - 5 - TM - data (App. 4)

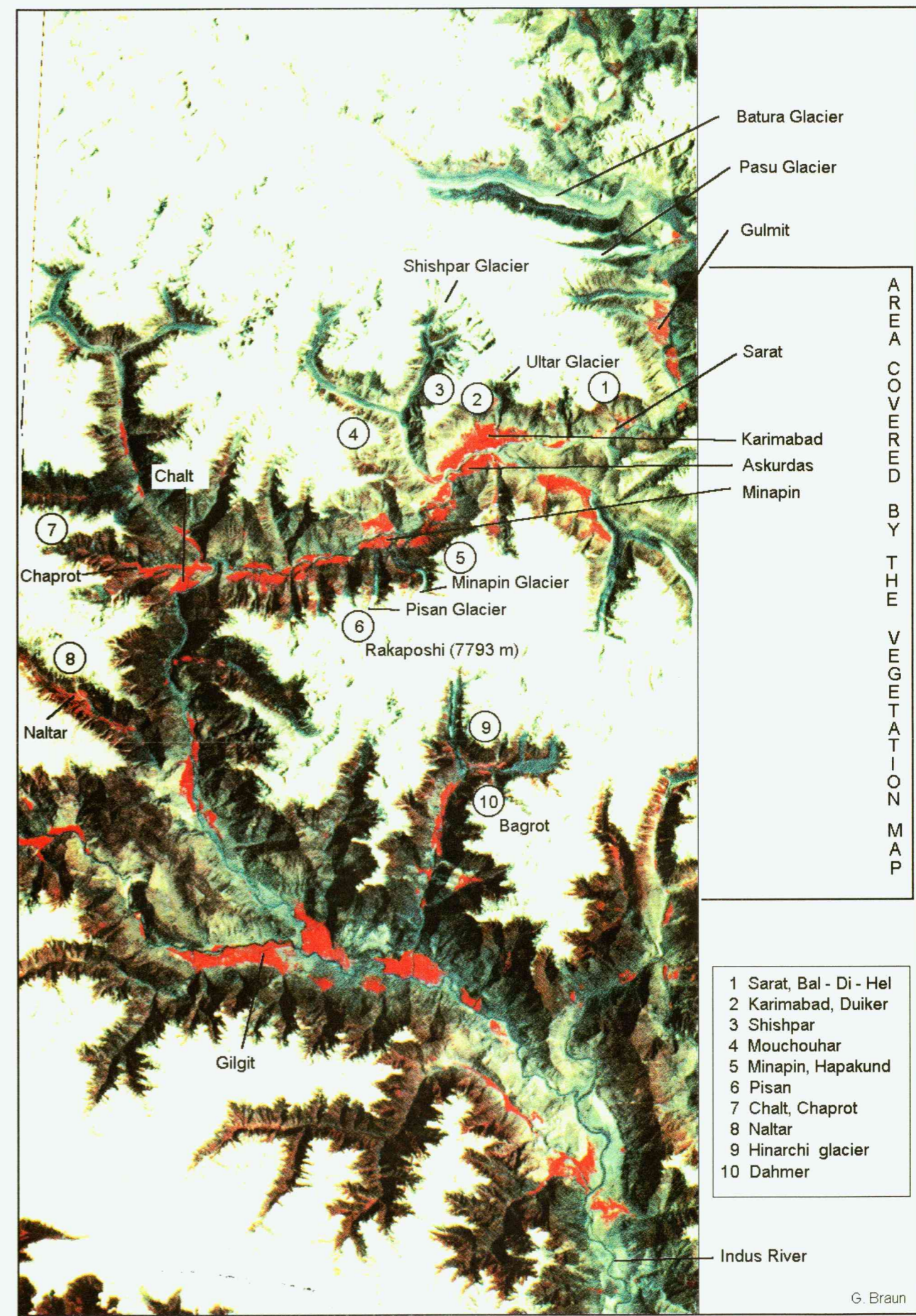


Abb. 25: Übersichtsbild des Untersuchungsraumes mit der Lage der Vegetationskartierung und der Feldaufnahmen. Als Orientierungshilfe in der Vegetationskarte (Anl. 4) sind die wichtigsten Ortsnamen eingetragen. Das Falschfarbkomposit wurde aus den LANDSAT - 5 - TM - Kanälen 2,3,4 als BGR erstellt.

Fig. 25: Overview on the investigation area showing the coverage of the vegetation map and the sites of field research. To support the orientation in the vegetation map (App. 4), the names of major locations have been added. The LANDSAT - 5 - TM - false color composite was calculated with bands 2,3,4 as BGR

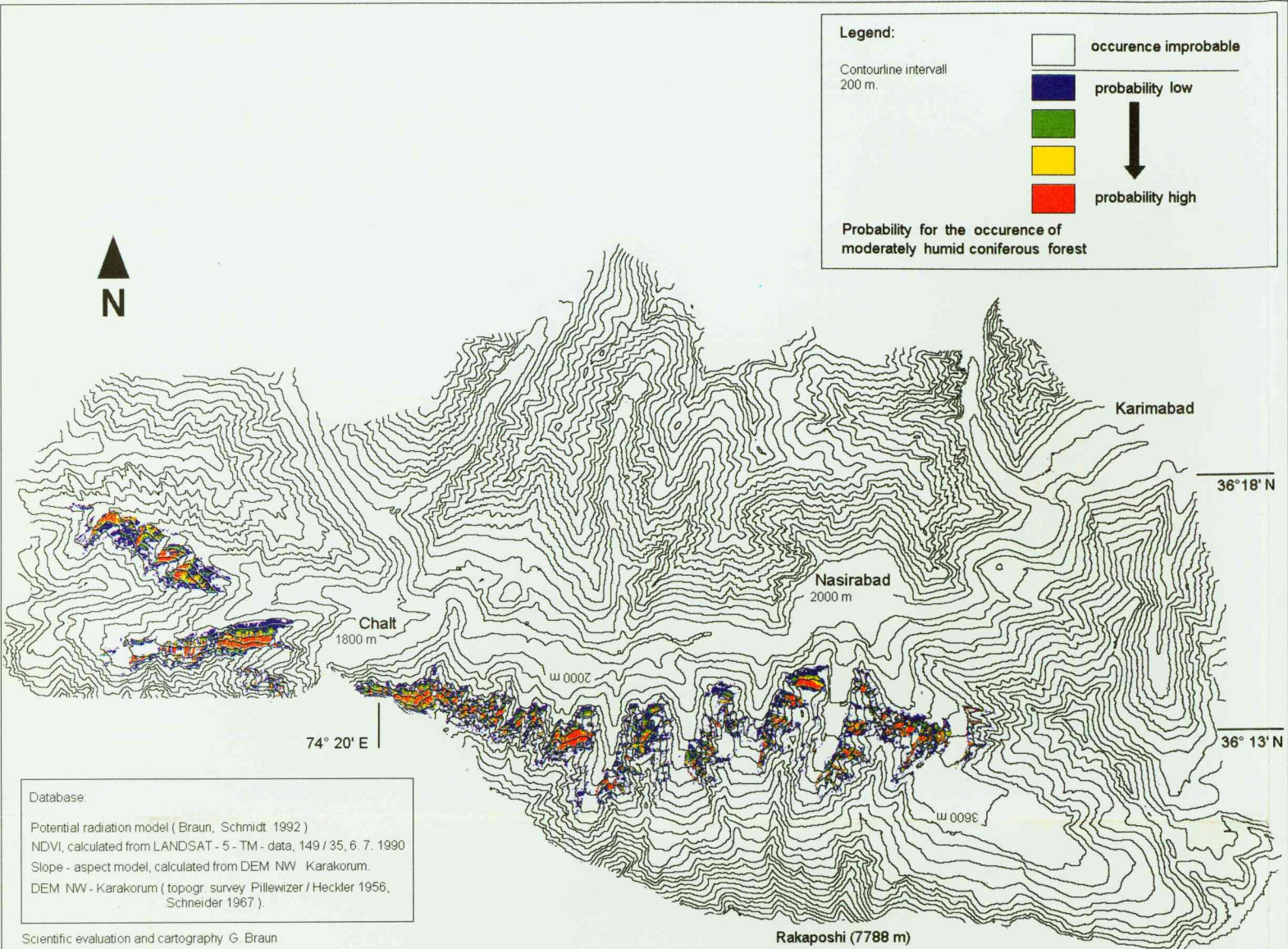


Abb. 43: Potentielle Verbreitung feucht - temperierter Nadelwälder im Hunza-Tal. Die Verbreitungsmuster wurden mit einem Maximum - Likelihood - Klassifikator auf der Basis unterschiedlicher Standorteigenschaften errechnet.

Fig. 43: Potential distribution of moderately humid coniferous forest in the Hunza valley. The spatial pattern has been calculated using modelled habitat conditions and a maximum likelihood classifier

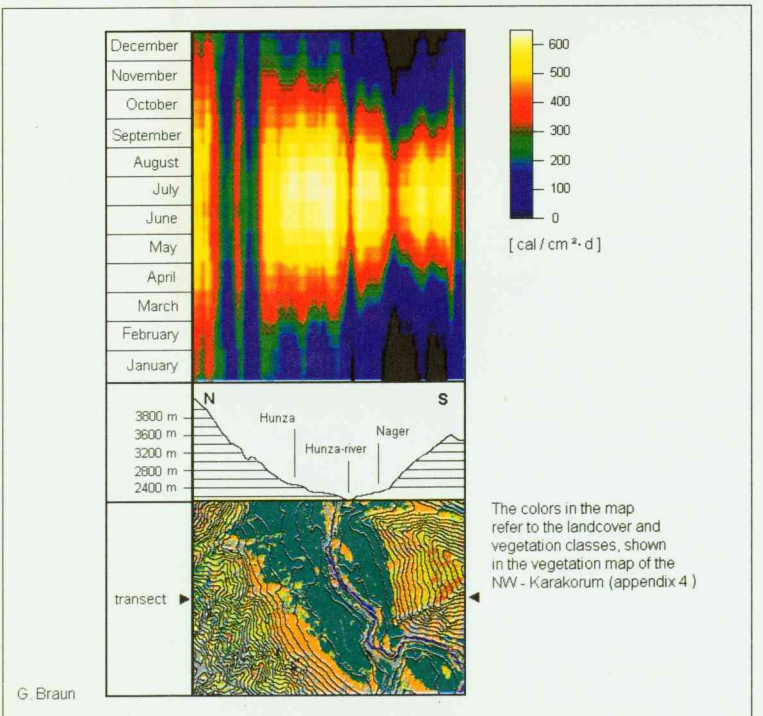


Abb. 31: Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung entlang eines Nord-Süd orientierten Transekts im zentralen Hunza-Tal von Karimabad nach Nager

Fig. 31: Daily sums of potential direct solar irradiation on a north-south orientated transect in the Central Hunza valley from Karimabad to Nager

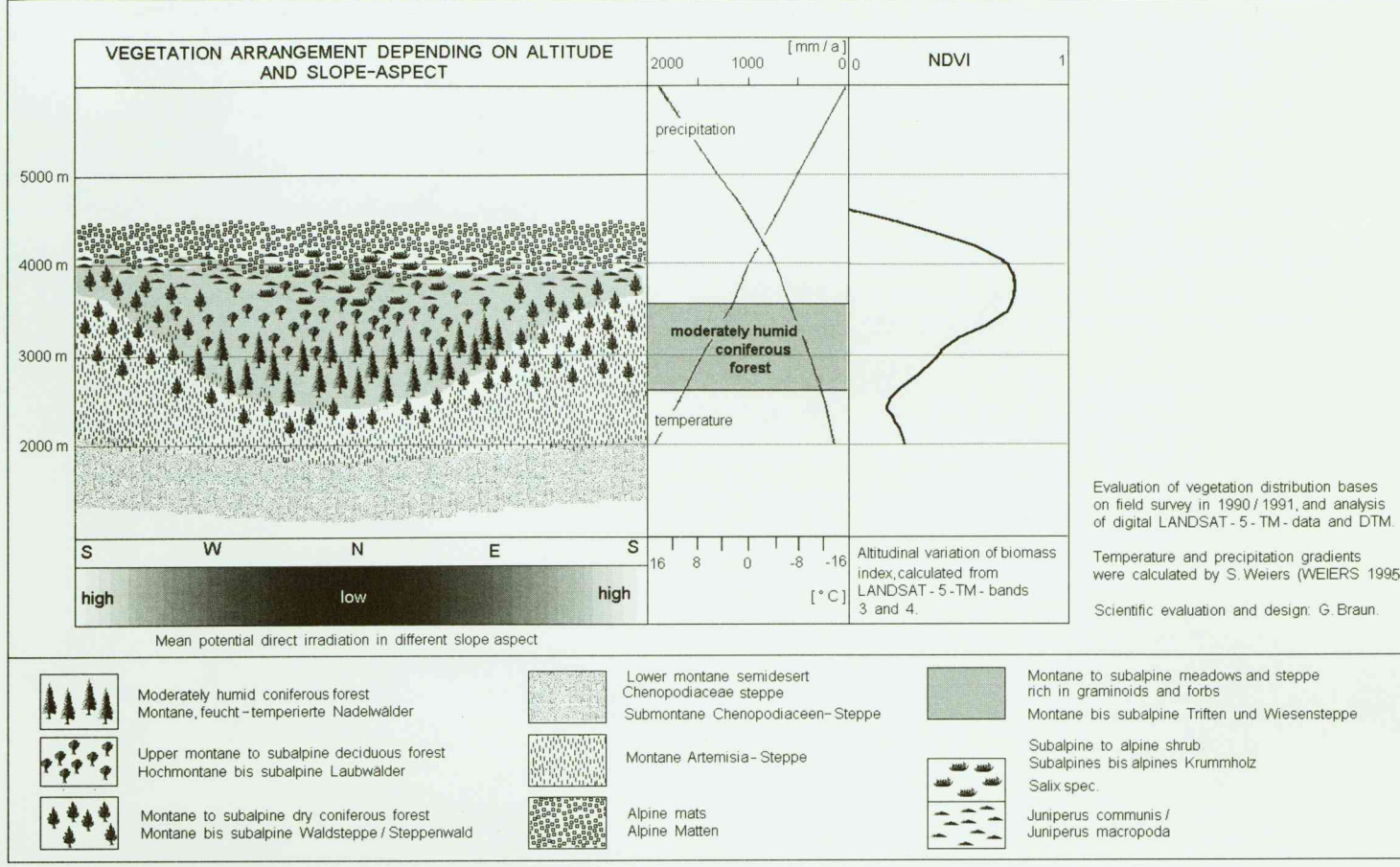


Abb. 26: Verbreitung der Vegetationsformationen im Hunza-Tal in Abhängigkeit von Höhe und Exposition der Standorte

Fig. 26: Spatial arrangement of the vegetation formations in the Hunza valley in relation to altitude and slope aspect of the habitats

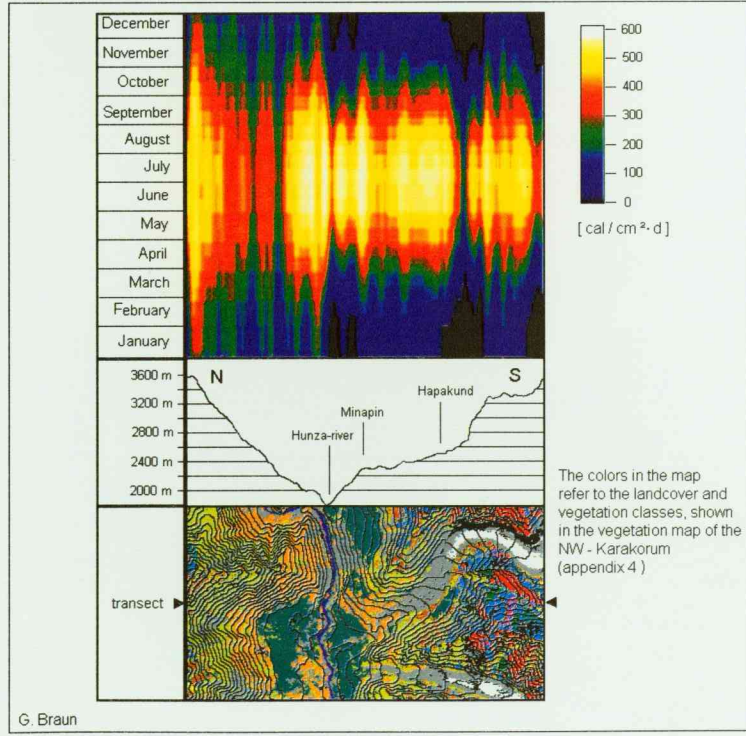


Abb. 32: Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung entlang eines Nord-Süd orientierten Transekts im zentralen Hunza-Tal von Nasirabad nach Minapin

Fig. 32: Daily sums of potential direct solar irradiation on a north-south orientated transect in the Central Hunza valley from Nasirabad to Minapin

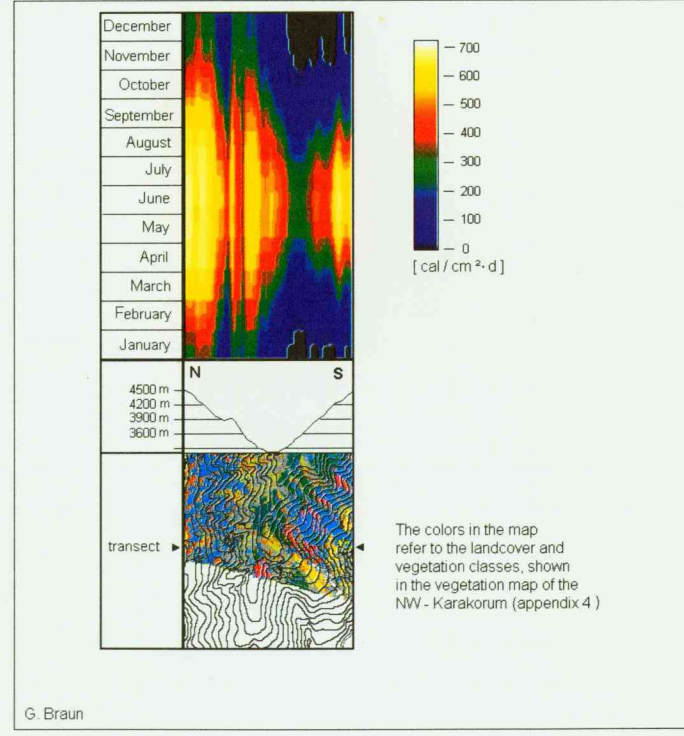


Abb. 33: Tagessummen der potentiellen direkten Einstrahlung entlang eines Nord-Süd orientierten Transekts im Chaprot-Tal

Fig. 33: Daily sums of potential direct solar irradiation on a north-south orientated transect in the Chaprot valley