Article

Traditionelle Methoden der Vegetationsgeographie im Wandel: Potentiale und Limitierungen der digital...

Nüsser, Marcus

in: Die Erde - 127 | Periodical
20 page(s) (93 - 112)

Nutzungsbedingungen

DigiZeitschriften e.V. gewährt ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht kommerziellen Gebrauch bestimmt. Das Copyright bleibt bei den Herausgebern oder sonstigen Rechteinhabern. Als Nutzer sind Sie sind nicht dazu berechtigt, eine Lizenz zu übertragen, zu transferieren oder an Dritte weiter zu geben.
Die Nutzung stellt keine Übertragung des Eigentumsrechts an diesem Dokument dar und gilt vorbehaltlich der folgenden Einschränkungen:
Sie müssen auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten; und Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgend einer Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen; es sei denn, es liegt Ihnen eine schriftliche Genehmigung von DigiZeitschriften e.V. und vom Herausgeber oder sonstigen Rechteinhaber vor.
Mit dem Gebrauch von DigiZeitschriften e.V. und der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

DigiZeitschriften e.V. grants the non-exclusive, non-transferable, personal and restricted right of using this document. This document is intended for the personal, non-commercial use. The copyright belongs to the publisher or to other copyright holders. You do not have the right to transfer a licence or to give it to a third party.
Use does not represent a transfer of the copyright of this document, and the following restrictions apply:
You must abide by all notices of copyright or other legal protection for all copies taken from this document; and You may not change this document in any way, nor may you duplicate, exhibit, display, distribute or use this document for public or commercial reasons unless you have the written permission of DigiZeitschriften e.V. and the publisher or other copyright holders.
By using DigiZeitschriften e.V. and this document you agree to the conditions of use.

Kontakt / Contact

DigiZeitschriften e.V.
Papendiek 14
37073 Goettingen
Email: info@digizeitschriften.de

DIE ERDE	127	1996	S. 93 - 112	Methoden-Beitrag

• *Vegetationsanalyse - Fernerkundung - Hochgebirgsforschung*

Marcus Nüsser und **Udo Schickhoff** (Bonn)

Traditionelle Methoden der Vegetationsgeographie im Wandel: Potentiale und Limitierungen der digitalen Verarbeitung vegetationsbezogener Datensätze

Mit 5 Bildern

Traditionelle Methoden der Geographie und Landschaftsökologie werden zunehmend durch computergestützte Verfahren modifiziert oder ersetzt. Diese Entwicklung hat inzwischen dazu geführt, daß in vielen neueren geographischen Arbeiten nicht mehr die eigentlichen Forschungsgegenstände wie Klima, Vegetation etc. den Schwerpunkt des Interesses bilden, sondern daß technische Aspekte der Prozessierung von Datensätzen in den Vordergrund rücken. Andererseits bieten moderne Verfahren zahlreiche neue Ansatzpunkte für Problemlösungen. Die Vegetationsgeographie wird durch statistische Analysemethoden und moderne Fernerkundungsverfahren stark von der 'digitalen Revolution' beeinflußt. Potentiale und Limitierungen computergestützter Verfahren werden in diesem Beitrag am Beispiel der Vegetationsgeographie diskutiert. Dies geschieht aus der Perspektive der Hochgebirgsforschung, in der vegetationsgeographische Fragestellungen von besonderem Interesse sind.

1. Einleitung

Seit die grundlegende Konzeption einer geographischen Betrachtungsweise der Pflanzenwelt von *v. Humboldt* (1807) entworfen wurde, sind bald 200 Jahre vergangen. In diesem Zeitraum haben vegetationsgeographische Fragestellungen kontinuierlich an Bedeutung gewonnen. Im 19. Jahrhundert stand mit der Prägung des Begriffes 'pflanzengeographische Formation' (*Grisebach* 1838) zunächst die physiognomische Betrachtung bei der Erforschung des Pflanzenkleides der Erde im Vordergrund. Im 20. Jahrhundert wurde die Vegetationsgeographie von der Entwicklung zweier neuer Forschungsrichtungen, der Pflanzensoziologie und der Landschaftsökologie, nachhaltig beeinflußt. Nach der Ausbreitung der Pflanzensoziologie (*Braun-Blanquet* 1928) wurden deren Methoden zunehmend auch in der geographischen Vegetationsforschung erfolgreich eingesetzt (*Schmithüsen* 1968: 136). Die Vegetationsforschung bildete in der von *Troll* (1939a) begründeten Landschaftsökologie die Basis für entsprechende Raumgliederungen und Differenzierungen (*Leser* 1991). Auf dieser Grundlage wurden in der Hochgebirgsforschung richtungsweisende Arbeiten geleistet (*Troll* 1975). Die geographische Vegetationsforschung erhielt ferner zahlreiche Anregungen aus der Geobotanik (u.a. *Ellenberg* 1986).

Parallel zum Aufschwung der Ökologie insgesamt ist vor allem in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten das Interesse an vegetationsgeographischen Fragestellungen stark angewachsen. Dies liegt zum einen an der weltweit fortschreitenden Degradierung und Zerstörung natürlicher Lebensräume, die in Vegetationsveränderungen besonders deutlich zum Ausdruck kommt. Andererseits werden im Rahmen der Global-Change-Problematik anthropogene Umweltbelastungen (z.B. verstärkter Treibhauseffekt, CO_2-Düngungseffekt, Eutrophierung durch Stickstoffverbindungen) in ihren Auswirkungen auf die Verschiebung von Vegetationszonen und -höhenstufen und auf die Vegetationsdynamik intensiv diskutiert.

Zweifellos haben auch methodische Entwicklungen zu einer stärkeren Beschäftigung mit vegetationsgeographischen Problemen beigetragen. Die Möglichkeiten, die der Einsatz von Fernerkundungssystemen mit hoher räumlicher und spektraler Auflösung, von Geographischen Informationssystemen, Simulationsmodellen und stetig verbesserter Software heute bietet, werden zunehmend für vegetationskundliche Studien genutzt. Die Entwicklung im Bereich der digitalen Verarbeitung vegetations- und landschaftsbezogener Datensätze wird in diesem Beitrag zum Anlaß genommen, den Einfluß moderner Verfahren auf grundlegende Methoden der Vegetationsgeographie zu beleuchten. Ziele und Vorgehensweise dieser Ansätze sowie ihre Anwendbarkeit in Hochgebirgsräumen werden zunächst charakterisiert. Computergestützte Verfahren, die sich zur Bearbeitung vegetationsgeographischer Fragestellungen aufdrängen, werden anschließend in ihren Potentialen und Limitierungen bewertet. Es soll gezeigt werden, inwieweit solche Verfahren konventionelle Methoden sinnvoll ergänzen oder gar ersetzen können und welche Probleme bei ihrem Einsatz bestehen.

2. Methodische Ansätze zur Aufnahme, Gliederung und Ordnung der Vegetation

2.1 Physiognomisch-ökologische Vegetationstypologie

Mit der Aufnahme und Gliederung der Vegetation nach physiognomischen Kriterien begann die moderne vegetationsgeographische Forschung im 19. Jahrhundert. Sie kann als klassische Methode angesehen werden, die für großräumige Übersichten nach wie vor große Bedeutung besitzt. Die physiognomische Klassifikation von Vegetationseinheiten basiert auf Strukturtypen, auf Pflanzenformationen, die durch bestimmte, dominierende Wuchs- oder Lebensformen gekennzeichnet werden und damit zugleich Ausdruck der standortsökologischen Verhältnisse sind. Diese Formationen werden nach dominanten Arten benannt. Die physiognomische Betrachtungsweise und Typologie ermöglichte ohne spezielle Artenkenntnisse in floristisch noch weitgehend unerforschten Gebieten eine rasche Gliederung und erste Charakterisierung der Vegetationsdecke z.B. nach ihrer klimaökologischen Beziehung. Physiognomisch-strukturelle und physiognomisch-ökologische Klassifikationen bilden die Grundlage für Vegetationsgliederungen der Erde und werden vor allem für großräumige bis weltweite Vegetationskartierungen genutzt (*Klink* und *Glawion* 1982, *Klink* und *Mayer* 1983). Ein einheitliches, allgemein akzeptiertes physiognomisches System von Vegetationsformationen hat sich bisher nicht durchsetzen können. Unter den verschiedenen Systemen wird das physiognomisch-ökologisch ausgerichtete Formationssystem von *Ellenberg* und *Mueller-Dombois* (1967) von Vegetationsgeographen am häufigsten verwendet. Es wird für Transektstudien in Hochgebirgsräumen ausdrücklich empfohlen (*Mueller-Dombois*, *Little* und *van der Hammen* 1986).

Der Formationsbegriff kommt in erster Linie bei Kartierungen in kleinerem Maßstab zur

Anwendung. Der Wandel diesbezüglicher methodischer Ansätze wird daher bei der Vegetationskartierung *(Kap. 3)* diskutiert. Für großmaßstäbliche, detailliertere Untersuchungen ist es dagegen zweckmäßig, über strukturelle Ansätze hinausgehend feinere Gliederungen von Vegetationstypen vorzunehmen. Solche Gliederungen erfordern gegenüber dem Prinzip der physiognomischen Dominanz differenziertere Aufnahmetechniken, die z.B. in der Pflanzensoziologie auf eine vollständige Erfassung des Arteninventars von Pflanzenbeständen abzielen.

2.2 Die kontinentaleuropäische Pflanzensoziologie

Zu den wichtigsten Aufnahme- und Auswertungstechniken gehören zweifellos die in den vegetationskundlichen Schulen Mitteleuropas und Nordamerikas erarbeiteten Methoden, die sich weltweit durchgesetzt haben[1]. Diese pflanzensoziologischen bzw. gradientenanalytischen Verfahren gewährleisten die Aufnahme von Daten, die ein breites Spektrum an vegetationsgeographischen Auswertungs- und Interpretationsmöglichkeiten bieten.

Große Bedeutung besitzt die sog. *Braun-Blanquet*-Methode, die in Mitteleuropa maßgeblich von *Braun-Blanquet* (1928) und *Tüxen* (1937) entwickelt wurde und nach dem 2. Weltkrieg weite Verbreitung fand (*Mueller-Dombois* und *Ellenberg* 1974, *Dierschke* 1994). Das Ziel dieser Methode ist die übersichtliche Ordnung der natürlichen Vielfalt an Vegetationstypen in einem hierarchisch aufgebauten Klassifikationssystem, wobei die einzelnen Pflanzengesellschaften nach floristischen Kriterien, d.h. nach soziologischen Artengruppen (Charakter- u. Differentialarten) voneinander abgegrenzt werden. Die Grundeinheit der Klassifikation ist die Assoziation. Zur Ermittlung der Pflanzengesellschaften werden Vegetationsaufnahmen mit Hilfe pflanzensoziologischer Tabellenauswertung verarbeitet. Anschließend können sie in ein System hierarchisch gegliederter Syntaxa eingeordnet und im Hinblick auf ihre Merkmale, Eigenschaften, auf ihr räumliches und zeitliches Verhalten oder bezüglich ihrer historischen und ökologischen Ursachen analysiert werden.

Die *Braun-Blanquet*-Methode ist rationell einsetzbar, standardisiert und liefert daher mit vertretbarem Aufwand vergleichbare Ergebnisse. In der Hochgebirgsforschung hat sie sich als besonders geeignet erwiesen, zu einem vertieften Verständnis der Pflanzengemeinschaften zu gelangen. Dies gilt vor allem auch für außereuropäische, z.T. vegetationskundlich kaum bearbeitete Gebirgsräume (*Müller-Hohenstein* 1986, *Miehe* 1990). Eigene Erfahrungen im Westhimalaya (*Schickhoff* 1993) bestätigen die Eignung der *Braun-Blanquet*-Methode in einem bislang unbearbeiteten Hochgebirgsraum. Korrelationen von Standortsfaktoren mit Artenspektren und Artmächtigkeiten sowie die Aufstellung von Lebensformspektren, Arealtypenspektren und Zeigerwertspektren ermöglichen umfassende synökologische Charakterisierungen von Pflanzengesellschaften. Abgegrenzte Phytozoenosen stellen zudem kartierbare Vegetationseinheiten dar. Entsprechend der summarischen Aussagekraft der Vegetation für das Wirkungsgefüge ökologischer Faktoren wird damit eine Grundlage für landschaftsökologische Raumgliederungen von Gebirgsräumen geschaffen.

Da die Aufstellung eines Systems hierarchisch gegliederter Syntaxa in Mitteleuropa bereits weit fortgeschritten ist, bleibt die Zielsetzung einer Klassifikation von Pflanzengesellschaften in einem floristischen Gesellschaftssystem vor allem in außereuropäischen Gebieten eine aktuelle Fragestellung. In Gebieten mit hoher standörtlicher Diversität, mit komplexen Vegetationsstrukturen und großer Artenvielfalt auf engem Raum sind bei der Aufstellung einer großräumigeren Übersicht von Pflanzengesellschaften jedoch syntaxonomische

Probleme zu erwarten, die auf der schwierigeren Erfassung synthetischer Merkmale von Pflanzengesellschaften (z.B. Gemeinschaftskoeffizienten, Gesellschaftsstetigkeit, Gesellschaftstreue, Minimumareal) beruhen. Induktiv aufgebaute Gesellschaftssysteme existieren auf anderen Kontinenten noch nicht. Erfolgreichen Ansätzen (*Miehe* 1990 im Himalaya) steht ein sehr großer Forschungsbedarf gegenüber.

2.3 Gradientenanalytische Verfahren

Im Gegensatz zur in Mitteleuropa üblichen Klassifikation abgegrenzter Vegetationstypen ist bei den im angloamerikanischen Sprachraum verbreiteten gradientenanalytischen Verfahren die Ordination von Vegetationsdaten entlang konkreter oder abstrakter Gradienten die grundlegende Methode. Die Gradientenanalyse, maßgeblich in Nordamerika von der Wisconsin-Schule (*Bray* und *Curtis* 1957) und von *Whittaker* (1967, 1973) entwickelt, geht von dem Kontinuum-Konzept in der Vegetationskunde aus und zielt darauf ab, kontinuierliche Veränderungen innerhalb der Vegetationstypen bzw. floristisch-ökologische Übergänge (Ökotone) zu erfassen, um die Wechselbeziehungen zwischen Vegetation (Artenspektrum, Frequenz, Dominanz) und Standorts-Gradienten zu interpretieren.

Man unterscheidet die direkte Gradientenanalyse, bei der direkt gemessene oder beobachtete bzw. erkannte Gradienten verwendet werden, von der indirekten Gradientenanalyse, die mit aus Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Aufnahmen oder Arten abgeleiteten Gradienten arbeitet. In extremen Lebensräumen, wie dem Hochgebirge mit entsprechend steilen ökologischen Gradienten, haben diese Verfahren große Bedeutung. Über die Ermittlung ökologischer Artengruppen ergeben sich auch bei der Gradientenanalyse Ansätze zur Klassifikation.

Zur Erfassung der Vegetationsdaten, die in der Regel über Geländetransekte erfolgt, ist im anglophonen Sprachraum eine Vielzahl quantitativer Methoden entwickelt worden. Während in Europa meist das pflanzensoziologische Aufnahmeverfahren in modifizierter Form angewendet wird, werden dort weit aufwendigere, mit exakten Zählungen und Messungen verbundene Methoden eingesetzt, z.B. Quadrat-Aufnahmen mit exakter Bestimmung von Baumdurchmessern, Dichte, Frequenz und Deckung der Arten oder punktzentrierte Aufnahmen mit Messungen von Distanzen und Brusthöhendurchmessern der Bäume von bestimmten Punkten aus, einer Erfassung des Unterwuchses in Kleinquadraten und der Auswertung nach Dichte, Basalfläche der Stämme und Frequenz. Meist werden jedoch nur Holzgewächse oder dominierende Arten erfaßt.

Gegenüber der *Braun-Blanquet*-Methode sind allerdings der hohe Zeitaufwand im Verhältnis zu den erzielten Ergebnissen, die mangelnde Anwendbarkeit auf die Strauch- und Krautschicht sowie Probleme mit der Minimumareal-Forderung als Nachteile anzusehen. Diese fallen bei der schwierigen Logistik in Hochgebirgsräumen, vor allem in der alpinen Stufe, besonders ins Gewicht. Dort wäre daher das *Braun-Blanquet*'sche Aufnahmeverfahren vorzuziehen.

Zur Auswertung und Darstellung von Gradientenanalysen bieten ein- bis mehrdimensionale Ordinationen instruktive Abbildungsmöglichkeiten, die von stark vereinfachten Teilmodellen bis zu anschaulichen Modellen ökologischer Zusammenhänge reichen. Bei komplexeren Ordinationen kommen multivariate Verfahren (mehrdimensionale Korrelationen, Hauptkomponenten-Analysen, Korrespondenzanalysen, Gruppierungsanalysen u.a.) zum Einsatz (*Frankenberg* 1982, *Wildi* 1986).

2.4 Computergestützte Verfahren der Vegetationsanalyse - Möglichkeiten und Grenzen

In welchem Ausmaß sind nun die Methoden bei Aufnahme, Gliederung und Ordnung der Vegetation durch die Entwicklung computergestützter Verfahren modifiziert worden? Welches Potential besitzen diese Verfahren und welche Probleme treten bei ihrem Einsatz auf? Parallel zur Ausbreitung leistungsfähiger Computer werden in der Vegetationskunde seit zwei bis drei Jahrzehnten verstärkt computergestützte Auswertungsverfahren und benutzerfreundliche Software entwickelt und eingesetzt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen a) Tabellenordnungsprogrammen, die zu erheblicher Arbeitsersparnis gegenüber traditioneller pflanzensoziologischer Tabellenarbeit führen (TAB: *Peppler* 1988), b) Auswertungsprogrammen, die die Analyse weiterer Vegetationsdaten wie Zeigerwerte, Lebensformen, Arealtypen etc. ermöglichen (VEGBASE: *Werner* und *Paulißen* 1991), und c) Programmpaketen, die auf explorative, multivariate Datenanalyse ausgerichtet sind (MULVA: *Wildi* und *Orloci* 1990).

Die neuere Entwicklung der ohnehin auf mathematische Berechnungsverfahren ausgerichteten quantitativen Methoden der Vegetationskunde, die im anglophonen Sprachraum vorherrschend sind, setzte in den 50er Jahren ein. Die damals noch von Hand gerechneten, aufwendigen Auswertungsverfahren, z.B. die erstmals von *Goodall* (1954) auf Vegetationsdaten angewendete Hauptkomponentenanalyse, wurden durch die Digitalisierung rationalisiert. Die fortschreitende Entwicklung und Verfeinerung multivariater statistischer Verfahren erweiterten die Auswertungsmöglichkeiten beträchtlich. Beispielsweise wurden im Rahmen von Gradientenanalysen nun rechenintensive, vieldimensionale Ordinationen ermöglicht, die ohne EDV-Einsatz nicht durchführbar wären. Ordinationsmethoden wie Hauptkomponenten- und Korrespondenzanalyse sowie Clustering-Ansätze und Diskriminanzanalyse zur Klassifikation fanden weite Verbreitung. *Wiegleb* (1992: 329) beklagt jedoch, daß bei ihrer Anwendung mathematische und programmiertechnische Ambitionen häufig im Vordergrund standen und daß bis in die 80er Jahre intelligente, erkenntniserweiternde Anwendungen mit einem der Fragestellung angemessenen Methodeneinsatz eher die Ausnahme waren (*James* und *McCulloch* 1990).

Die korrekte Anwendung numerischer Verfahren erforderte meist hohen Einarbeitungsaufwand und stellte erhöhte Anforderungen an eine schlüssige Interpretation, denn die Ergebnisse waren häufig sehr abstrakt und wenig transparent. Mit der Entwicklung einfach zu bedienender und auf PC's zu installierender Methodenprogramme, z.B. DECORANA (*Hill* und *Gauch* 1980) oder CANOCO (*ter Braak* 1986), haben Ordinationsmethoden in den letzten Jahren weiter an Akzeptanz gewonnen und weitere Verbreitung gefunden. Variationen und Weiterentwicklungen effizienter statistischer Analysemethoden schreiten fort und werden das zukünftige Methodenpotential erweitern. Statistische Grundprobleme vegetationsbezogener Datensätze werden durch entsprechende Programme zunehmend entschärft (*Jongman*, *ter Braak* und *van Tongeren* 1987 u.a.).

Im Gegensatz zu angloamerikanischen Methoden besaß die kontinentaleuropäische Pflanzensoziologie bei der Entwicklung moderner Software bereits standardisierte Aufnahme- und Auswertungsverfahren. Da zudem nicht mathematische Berechnungsverfahren, sondern qualitative Arbeitsweisen im Vordergrund standen, blieb der Einfluß computergestützter Verfahren geringer. Die nach der *Braun-Blanquet*-Methode erhobenen, mit größerer Subjektivität behafteten Daten sind für eine explorative statistische Analyse weniger prädisponiert. Die Konfrontation mit numerischen Methoden rief auf dem Kontinent jedoch un-

Bild 1. Montane Koniferenwälder im NW-Himalaya (Nanga Parbat-Gebiet) mit *Pinus wallichiana, Picea smithiana* und *Abies pindrow* im Oktober (*M. Nüsser*, 21.10.1992) / *Montane coniferous forests in the northwestern Himalaya (Nanga Parbat) in October*
'Striking contrasts' zwischen Sonn- und Schatthängen: Die hochstämmigen Koniferenwälder sind auf nordexponierte Hangpartien beschränkt, während die Sonnhänge von *Artemisia brevifolia*-Zwerggesträuch und eingestreuten *Juniperus excelsa*-Individuen besiedelt werden

terschiedliche Reaktionen hervor. Während die computerorientierten Ansätze in den Niederlanden, in Italien und in Frankreich auf Akzeptanz stießen und weiterentwickelt wurden, stand die Vegetationskunde im deutschsprachigen Raum numerischen Verfahren größtenteils ablehnend gegenüber. Die Verfechter der Schule von *Braun-Blanquet* und *Tüxen* zeigen bislang eine geringe Flexibilität im Umgang mit anderen Methoden. Die bisher einzige ausführliche Diskussion numerischer Verfahren führte *Frankenberg* (1982). An deutschen Universitäten werden numerisch-statistische Klassifikations- und Ordinationsverfahren kaum gelehrt.

In der Pflanzensoziologie werden EDV-Programme vor allem zur Formalisierung und Automatisierung der Tabellenarbeit bzw. zur numerischen Syntaxonomie eingesetzt. Die Vorteile des Computereinsatzes liegen auf der Hand: Enormer Zeitgewinn bei der Erstellung und Bearbeitung umfangreicher Tabellen, Vermeidung von Umschreibefehlern, rasche und vielfältige Auswertungsmöglichkeiten durch beliebige Auswahl und Kombination von Variablen und Methoden, eindeutige Definition der Methoden und exakte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, Auffinden von Trends und Strukturen in großen Datensätzen, Ausdruck publikationsreifer Tabellen und Diagramme. Darüber hinaus bestehen Möglichkeiten zum Aufbau vegetationskundlicher Datenbanken oder zur fundierteren floristischen Abgrenzung von Vegetationseinheiten.

Bild 2. Gleicher Geländeausschnitt wie *Bild 1* im Mai (M. Nüsser, 17.5.1994) / *Same terrain as described in photo 1 in May*

Während die reinen Sortierprogramme, die lediglich manuelle Auswertungsschritte automatisieren, ohne größere Vorbehalte empfohlen werden, bestehen andererseits schwerwiegende Bedenken gegen den zunehmenden Einsatz multivariater Verfahren bei der pflanzensoziologischen Datenanalyse. *Dierschke* (1994: 196ff.) weist nachdrücklich darauf hin, daß die Eigenerfahrung, die geistige Auseinandersetzung und Vertrautheit mit der Materie und der ständige Erkenntniszuwachs während der Einzelschritte der Tabellenbearbeitung keinesfalls durch computergestützte Verfahren ersetzbar sind. Bei der Automatisierung besteht die Gefahr von Informationsverlusten. Werden Feinstrukturen in den (Teil-)tabellen übersehen, sind Mängel in der weiteren Auswertung und Interpretation unweigerlich die Folge. Die Erfahrungen der Verfasser bestätigen den hohen Erkenntnisgewinn und ständigen Lerneffekt während der klassischen Tabellenarbeit.

Limitierungen des Computereinsatzes in der klassischen Pflanzensoziologie ergeben sich ferner dadurch, daß neben formalisierbaren Kriterien auch subjektive Bewertungen und Erfahrungen (art- u. gesellschaftsspezifische Bewertungen, unterschiedliche Anforderungen an Deckungsgrad, Homogenität und Homotonität) in die Tabellenarbeit eingehen, die nicht in computergerechte Regeln zu bringen sind. Statistische und vegetationskundliche Denkweisen stehen sich häufig unvereinbar gegenüber. Entgegen dem häufig geäußerten Argument der größeren Objektivität und Nachvollziehbarkeit computergestützter Verfahren wird das intuitive, subjektiv-wertende Vorgehen z.B. von *Dierßen* (1990: 185) als Vorteil gegenüber intersubjektiv-schematischen, numerischen Verfahren angesehen, da es im Hinblick auf eine Typisierung und Interpretation biologischer Objekte der Eigenart solcher Objekte besser gerecht zu werden scheint.

3. Methodische Ansätze zur Erfassung der Vegetationsverbreitung

Vor dem Hintergrund neuer Erfassungs- und Darstellungsmöglichkeiten durch Fernerkundung und digitale Bildverarbeitung werden Probleme der Vegetationskartierung im Hochgebirge überblicksartig dargestellt. Gerade in diesem Bereich haben moderne Methoden zu weitreichenden Modifikationen geführt. Grundsätzlich lassen sich bei der Fernerkundung *sensu lato* Differenzierungen nach der Art (Photographie, Scanner- und Radaraufnahmen), der spektralen Empfindlichkeit (z.B. sichtbares Licht, Infrarot) und der Position des Aufnahmesystems (terrestrisch, flugzeug- oder satellitengestützt) vornehmen. Die verschiedenen Sensorsysteme und Datenträger erfordern auf methodischer Ebene ein unterschiedliches Vorgehen, um zu gewünschten thematischen Interpretationen der Vegetationsverbreitung zu gelangen. Zu einem problemorientierten Verständnis müssen im folgenden auch einzelne technische Aspekte der Datenerfassung und -verarbeitung bei der terrestrischen Photographie und der Satellitenbildaufnahme angerissen werden.

3.1 Terrestrische Photographie

Neben der direkten Kartierung bildet die photographische Dokumentation mit terrestrischen Aufnahmen die wichtigste Methode für flächenhafte Erfassungen der Hochgebirgsvegetation im Gelände. Für verschiedene Vegetationskarten aus dem Himalaya (*Troll* 1939b, *Miehe* 1991, *Schickhoff* 1994) stellen photographische Aufnahmen wichtige Datengrundlagen dar. Dabei werden die Photographien zumeist als Panoramen von hochgelegenen Standorten aufgenommen. Wegen der orographischen Charakteristik von Hochgebirgsräumen können trotzdem größere Geländebereiche häufig nicht eingesehen und daher nur als 'weiße Flächen' dargestellt werden. Mit dieser zwangsläufig unvollständigen Gelände- und Vegetationsaufnahme ist die Gefahr unzulässiger Analogieschlüsse zum Ausfüllen der unbekannten Bereiche verbunden. Ein wesentliches Problem dieser Aufnahmemethode in Gebirgsräumen besteht in der Extrapolation linienhafter Kenntnis entlang der Begehungsrouten in die flächenhafte Kartendarstellung. Zur Ergänzung der Zwischenräume zwischen den linearen Aufnahmen verweist *Troll* (1939b: 151) auf die Möglichkeit der 'Fernglasdiagnose', die i.w.S. auch eine Form der Fernerkundung darstellt. Hinzu kommen hochgebirgstypische Beschränkungen der Sichtverhältnisse (Bewölkung) als zusätzliche Limitierungen. Diese Probleme bedingen extensive Geländearbeit, um verläßliche Ergebnisse zu erzielen.

Ein weiteres Problem resultiert aus der Forderung nach flächentreuer Darstellung, da die zu kartierenden Vegetationsausschnitte entweder von hochgelegenen Übersichtsstandorten, von Gegenhängen oder aus den Tallagen betrachtet werden. Analog den flugzeuggestützten Schrägluftbildern ist mit der terrestrischen Schrägsicht eine projektive Verzerrung und eine Abnahme des Maßstabes vom Vorder- zum Hintergrund verbunden. Dazu treten die Verzeichnungsparameter der Kamera, so daß Aussagen zu den Flächengrößen einzelner Formationen aus 'normalen' (nicht mit Meßkammern aufgenommenen) Photographien nur schwer möglich sind, bzw. einer topographischen Grundlage als Ergänzung bedürfen. Dagegen bieten terrestrisch aufgenommene Stereo-Meßbilder die Möglichkeit zur photogrammetrischen Auswertung und quantitativen Erfassungen verschiedener Parameter.

Die vorliegenden, vom identischen Standort zur gleichen Tageszeit aufgenommenen terrestrischen 'normalen' Photographien (*Bild 1* und *2*) aus Oktober und Mai zeigen den gleichen Geländeausschnitt mit der für subtropische Hochgebirge typischen expositionsabhängigen Waldverteilung.

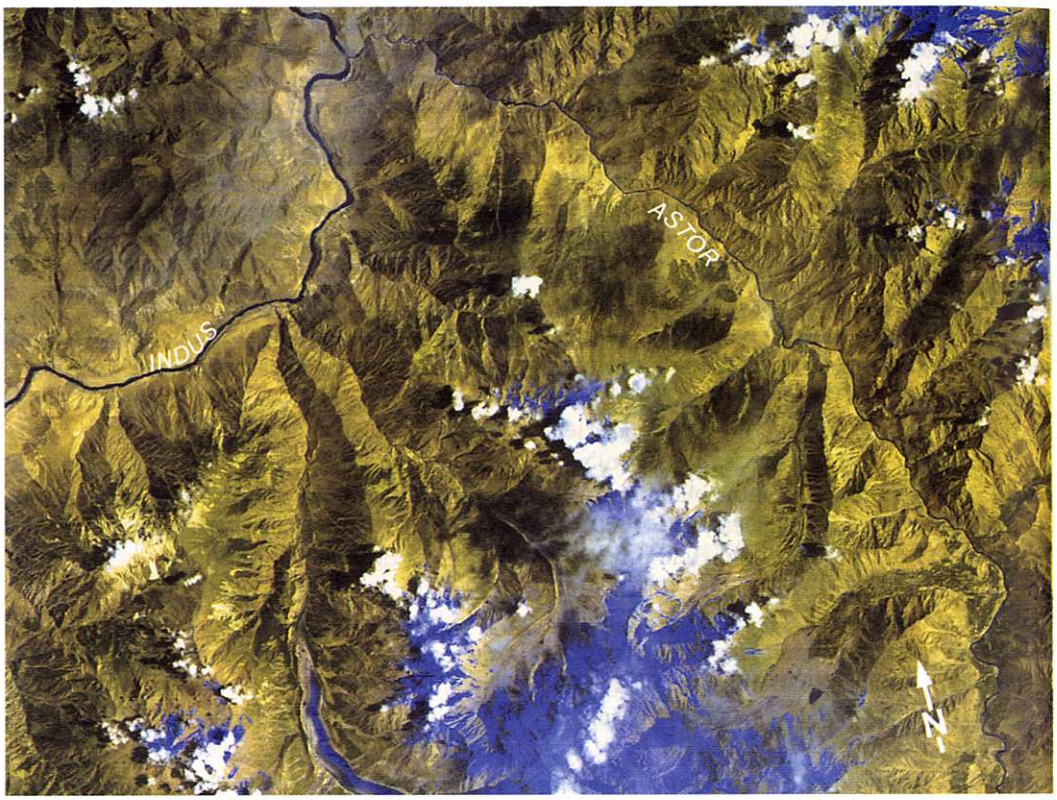
Dabei zeichnen sich im Bereich der feuchten Koniferenwälder jahreszeitlich stark variierende Schattenlängen als Folge unterschiedlicher Sonnenstände ab. Bei einer Kartierung der Formationen ergibt sich daraus kein weiteres Problem; die Verbreitung des Nadelwaldes kann in gleicher Weise aus einer visuellen Auswertung der Bilder abgeleitet und auf eine topographische Karte übertragen werden. Bei einer Schätzung des Deckungsgrades der Baumschicht besteht hingegen die Gefahr einer unterschiedlichen Beurteilung von Bestandsdichten und Phytomassen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, erweisen sich Begehungen der Bestände mit entsprechenden Strukturanalysen als unabdingbar. Auch bei Fragen nach der Art und Intensität anthropogener Einflüsse sowie dadurch bedingter Veränderungen der Wälder muß auf Messungen relevanter Bestandsparameter (z.B. Kronenradien, Baumhöhen) innerhalb repräsentativer Testflächen (*Schickhoff* 1995) zurückgegriffen werden.

3.2 Luftbilder

Als klassische Datenträger der Fernerkundung bieten panchromatische Luftbilder seit vielen Jahrzehnten über Grauton- und Texturunterschiede wesentliche Informationsquellen, die bei Vegetationskartierungen genutzt werden (zu den bekannten Methoden und Problemen der Luftbildinterpretation s. *Albertz* 1991). *Troll* (1939a) erläutert die Zweckmäßigkeit zusammenhängender Luftbildreihen für landschaftsökologische und vegetationsgeographische Gliederungen. Gerade bei Vegetationskartierungen werden seit ca. 30 Jahren verstärkt Farb-Infrarotluftbilder eingesetzt, da diese durch Erfassung der Wellenlängen des Nahen Infrarot die charakteristischen spektralen Eigenschaften von Vegetation aufzeichnen und damit eine bessere visuelle Differenzierung unterschiedlicher Gesellschaften (z.B. Laub- und Nadelwald), Arten (falls großmaßstäbig) sowie saisonaler oder schadspezifischer Veränderungen erlauben. In diesem Zusammenhang kommt den spektralen Eigenschaften der Vegetation, die auf den wellenlängenabhängigen Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften der einfallenden Sonnenstrahlung an den Pflanzenoberflächen und Grenzflächen in der Blattstruktur beruhen, eine wichtige Bedeutung zu. Eine detaillierte Abfolge von Bearbeitungsschritten zur Erstellung von Vegetationskarten mit konsequenter Einbindung von Luftbildern wird in der sog. ITC-Methode aus dem Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede vorgeschlagen (*Küchler* und *Zonneveld* 1988: 401-426). Auf weitere Aspekte flugzeuggestützter Fernerkundung kann hier nicht eingegangen werden.

3.3 Satellitenbilddaten

Satellitenbilder bieten synoptische Geländeüberblicke, die im Bereich regionaler Landschaftsgliederungen in den vergangenen Jahren neuartige Analyse- und Kartierungsmöglichkeiten eröffneten. Die satellitengestützte Fernerkundung bringt methodisch fundamentale Veränderungen der Darstellungs- und Interpretationsmöglichkeiten, d.h. Vegetationsgeographen und Ökologen entdecken zunehmend den Einsatz analoger und digitaler Fernerkundungsdaten. Dabei bildet das Wissen über ökologische Prozesse und vegetationsgeographische Aspekte die entscheidende Voraussetzung für alle Arten visueller und digitaler Bildinterpretationen. Andererseits stellen digitale und quantitative Analysen raumbezogener Datensätze völlig neue Anforderungen an Kartierung, Monitoring und Modellierung der Vegetation. Eine Sammlung neuerer Arbeiten zu diesem Themenkomplex legen *Walsh, Davis* und *Peet* (1994) vor, darin stellt *Goodchild* (1994) die methodischen Aspekte zusammen.



0 5 km

Bild 3. Farbkomposite eines Landsat-TM-Bildes (149/35) der Nordabdachung des Nanga Parbat vom 6.7.1990 (7,5,1 = RGB). Bildverarbeitung: *M. Nüsser / Colour composite of a Landsat-TM-image of the northern declivity of Nanga Parbat from July 1990*
Steile klimatische Gradienten zwischen der trockenen Talstufe des Indus (ca. 1100 m) und den Gletschern der nivalen Stufe (blau) sind primäre Voraussetzung für die Ausbildung der Vegetations-Höhenstufen. Wolken (weiß) und Wolkenschatten verdecken einzelne Bereiche

Die Eignung von Fernerkundungsdaten für die Vegetationskartierung in verschiedenen Maßstäben richtet sich v.a. nach der geometrischen und spektralen Auflösung der Aufnahmesysteme. Hintergrundinformationen zur satellitengestützten Fernerkundung liefern z.B. *Albertz* (1991), *Avery* und *Berlin* (1992) sowie *Lillesand* und *Kiefer* (1994). In den vergangenen Jahren entstanden Studien in verschiedenen Gebirgsregionen, die eine Diffe-

Bild 4. Verkleinerte Reproduktion der 'Vegetationskarte der Nanga Parbat-Gruppe (Nordwest-Himalaja)' Quelle: *C. Troll* 1939b / *Reduced reproduction of the 'Vegetation map of Nanga Parbat (NW-Himalaya)' by C. Troll (1939b)*
Die konventionelle Kartierung erlaubt eine feine Differenzierung der Vegetationseinheiten. Neben den Formationen, die sich durch farbige Flächensignaturen unterscheiden, sind lokal verbreitete Gehölzbestände durch aufgesetzte Zeichen ausgewiesen

INDUS
ASTOR
0
5 km

renzierung des Pflanzenkleides auf der Ebene von Formationen unter Anwendung von Fernerkundungssatelliten vornahmen (*Bartels* und *Ergenzinger* 1988, *Lal, Gulati* und *Bist* 1991, *Kühnen* und *Meurer* 1993, *Nüsser* 1994, *Braun* 1996). Ein generelles Problem vegetationsorientierter Anwendungen stellt der Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes dar, da primär ein charakteristisches Reflexionsspektrum der Vegetation gewährleistet sein muß. Im Vergleich zur konventionellen Vegetationskartierung stehen bei satellitengestützten Auswertungen aufgrund des Hochgebirgsreliefs verstärkt Probleme der geometrischen Entzerrung und Flächentreue sowie der Schlagschatten im Vordergrund. Hinzu treten bei der Interpretation Erschwernisse durch die atmosphärischen Bedingungen per se und durch Unterschiede zwischen einzelnen Höhenstufen (v.a. Wolkenbedeckung und Aerosolgehalt, z.B. Dunst in Talungen, Staubtransport in ariden Talstufen). Im folgenden werden Methoden der Klassifizierung digitaler Fernerkundungsdaten dargestellt und die damit in Hochgebirgen verbundenen Probleme an Beispielen erläutert. Probleme geometrischer Entzerrungen, der Berechnung von Vegetationsindices und andere digitale Transformationsverfahren werden hier nicht diskutiert.

Die Beispiele satellitengestützter Fernerkundung aus den subtropischen Hochgebirgsräumen Nanga Parbat (NW-Himalaya, Pakistan) und Amanus (SE-Türkei) zeigen ausschließlich Thematic Mapper-Daten (TM) des erdbeobachtenden Fernerkundungssatelliten Landsat-5. Dieser optisch-mechanische Multispektral-Scanner tastet das Gelände synchron in sieben verschiedenen elektromagnetischen Wellenlängenbereichen ab und zeichnet Reflexionsdaten der Erdoberfläche auf. Die Kanäle reichen vom sichtbaren Licht bis zum thermalen Infrarot. Mit einer Unterscheidung in 256 mögliche Grauwerte pro Bildelement (Pixel) ist eine hohe spektrale Auflösung gegeben. Die räumliche Auflösung des TM beträgt 30 m x 30 m pro Pixel. Neben dieser meßbaren Größe, die die Abbildungsfähigkeit des Aufnahmesystems beschreibt, sind die Erkennbarkeit (*detectability*) und die Ansprechbarkeit (*recognizability*) für die Interpretation von Bedeutung. Ein Problem resultiert aus der spektralen Signatur von Mischbeständen und Übergangsbereichen, die sich in Form sog. Mischpixel, hybriden Signalen mit Strahlungsanteilen unterschiedlicher Vegetationseinheiten ausdrücken. Durch extreme Reliefenergie wird dieser Effekt zusätzlich verstärkt.

Zur visuellen Interpretation der Satellitenbilder werden Farbkompositen aus den digitalen Daten erstellt. Das Ziel ist die Identifikation und Klassifizierung unterschiedlicher Vegetationsformationen, entweder direkt am Bildschirm oder auf Grundlage von Farbplots. Das Beispiel zeigt die Nordabdachung der Nanga Parbat-Gruppe im Satellitenbild (*Bild 3*) und in der klassischen Vegetationskarte *Troll*s (*Bild 4*).

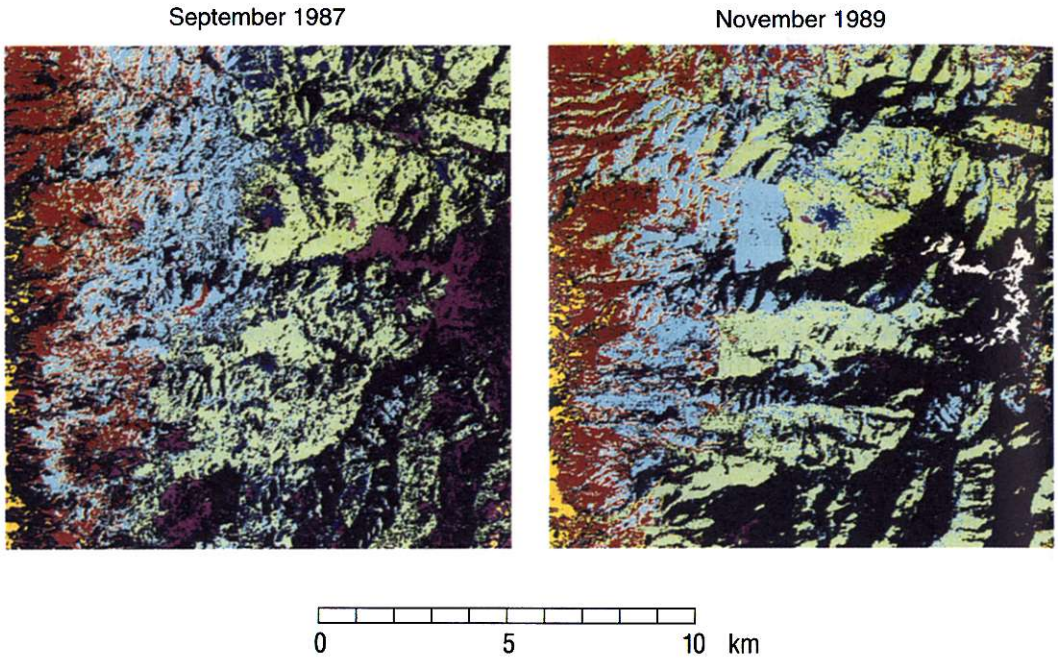
Bild 4 stellt die photographisch reproduzierte Karte *Troll*s (aufgenommen 1937, im Maßstab 1:50.000 publ. in 1939b) stark verkleinert dar. Der Vergleich beider Darstellungen zeigt, daß durch visuelle Interpretation der TM-Daten nicht die Differenziertheit der *Troll*schen Karte mit insgesamt 20, nach floristischen und physiognomischen Kriterien unterschiedenen Vegetationseinheiten möglich ist. Nur die fünf Vegetationsformationen *Troll*s ('Wüstensteppe, Artemisien-Steppe, feuchter Nadelwald, Birkengehölze, offene Gras-, Kraut- und Zwergstrauch-Bestände'), dort als farbige Flächensignaturen ausgewiesen, sind im TM-Bild ausscheidbar. Auch die Wahl anderer Kanalkombinationen sowie die im Rahmen weitergehender Anwendungen durchzuführenden geometrischen und atmosphärischen Korrekturen können diese Beschränkung nicht grundsätzlich ändern. Für den nördlich des Nanga Parbat gelegenen Hochgebirgsraum des Hunza-Karakorum legt *Braun* (1996) eine digitale Klassifizierung mit neun Vegetationsforma-

tionen vor. Dort wird auch eine Gegenüberstellung der digitalen Vegetationsklassifikation mit einer konventionellen Kartierung *Paffens* (*Paffen, Pillewizer* und *Schneider* 1956) im Hunza Karakorum vorgenommen (vgl. auch *Winiger* 1992: 404-405). Bei diesem Vergleich bietet die digitale Klassifizierung eine genauere Differenzierung der Vegetationsbedekkung.

Durch eine digitale Multispektral-Klassifizierung werden die einzelnen Bildelemente aufgrund ihrer spektralen Charakteristik in eine Anzahl individueller Klassen eingeteilt. Die spektralen Eigenschaften der Bildelemente ergeben sich aus den Grauwert-Daten in den einzelnen Kanälen (spektrale Signaturen). Die Kanäle können als Koordinatenachsen in einem n-dimensionalen Merkmalsraum (n = Anzahl der benutzten Kanäle) zur Multispektral-Klassifizierung definiert werden. Aufgrund ihrer Grauwerte gruppieren sich die Pixel zu Punktwolken in unterschiedlichen Bereichen dieses Merkmalsraumes. Da sich die Punktwolken in der Klassifizierungspraxis überschneiden, müssen zusätzliche Vorinformationen einbezogen werden, um verläßliche Ergebnisse zu erzielen. In die überwachte (*supervised*) Klassifizierung fließen diese Vorinformationen durch sog. Trainingsgebiete (*ground checks*) ein, von denen bekannt ist, welcher Objektklasse (Vegetationseinheit) sie angehören. Diese Referenzflächen werden im Gelände kartiert und in einem interaktiven Verfahren dem Rechner vorgegeben. Auswahl und Güte der Referenzflächen haben entscheidenden Einfluß auf das Klassifizierungsergebnis. Aufgrund der angesprochenen Problematik unterschiedlicher Einstrahlungsverhältnisse sollten Trainingsgebiete für gleiche Einheiten aus verschiedenen Expositionen zur Definierung separater Klassen dienen. Diese können nach durchgeführter Klassifizierung wieder zusammengefaßt werden.

Die überwachte Klassifizierung läßt sich in Training und Zuordnung gliedern. Das Training beinhaltet die Definition von Kriterien zum Erkennen spektraler Muster in den Datensätzen. Für die Klassen werden dem Rechner mehrere Referenzflächen vorgegeben, die spektral weitgehend homogen und repräsentativ für die abzugrenzenden Einheiten sind. Als Ergebnis entstehen Signaturensätze, die als statistische Kriterien für die Klassen dienen. Danach werden alle Pixel entsprechend definierter Bedingungen und eines gewählten Klassifizierungsalgorithmus den Klassen zugeordnet, bzw. bei mangelnder Zuordnungsmöglichkeit als 'unklassifiziert' definiert. Die unklassifizierten Bereiche entsprechen in gewisser Weise den 'weißen Flächen' bei der konventionellen Vegetationskartierung. Verbesserungen von Klassifizierungsergebnissen können durch nachträgliche manuelle Veränderungen auf Basis genauer Geländekenntnis (*Nüsser* 1994: 71) und durch GIS-orientierte Verfahren mit einer Eingabe zusätzlicher Parameter bei vorhandenen digitalen Geländemodellen und daraus abgeleiteten Hangneigungs-, Expositions- und Beleuchtungsmodellen erzielt werden (*Braun* 1996). Beispiele für die Möglichkeit des multitemporalen Satellitenmonitoring bietet *Kußerow* (1994).

Grundlagen für die Auswahl der Trainingsgebiete bilden bei den vorliegenden Klassifizierungen aus einer Gebirgsregion des Amanus (*Bild 5*) Vegetationskartierungen aus dem DFG-Projekt LÖKAT *(Dr. H. Kehl)* sowie Farbkompositenbilder aus unterschiedlichen Kanalkombinationen, die dem Bearbeiter freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden. Die Endergebnisse werden von *Kehl* (1996) publiziert. Zur Sicherstellung der Güte wurden die Testgebiete mit Hilfe einer Kontingenzmatrix evaluiert, um sicherzustellen, wieviele Pixel innerhalb der definierten Areale aufgrund ihrer spektralen Charakteristik tatsächlich in die Klasse fallen bzw. einer anderen Klasse zugeordnet werden. Bei der digitalen Klassifizierung wurde v.a. versucht, verschiedene Waldgesellschaften zu trennen, die im vorliegenden Beispiel in der kollin-



Legende:

- unklassifiziert
- *Fagus orientalis*
- *Pinus nigra*
- *Quercus cerris, Carpinus orientalis*
- *Pinus brutia*
- Subalpine Triften und Almen
- Kulturland
- Schnee

Vegetationskartierung: *H. Kehl*
Bildverarbeitung: *M. Nüsser*

Bild 5. Bitemporaler Vergleich digitaler Vegetationsklassifizierungen im Amanus-Gebirge aus Landsat-TM-Daten (174/35) vom 15.9.1987 und vom 23.11.1989 / *Comparison of digital classifications in the Amanus mountains using Landsat-TM-data from September 1987 and November 1989* Das unterschiedliche Resultat der Klassifizierungen läßt Probleme multisaisonaler Auswertungen erkennen

tiefmontanen Stufe von *Pinus brutia,* in der mittelmontanen Stufe von *Quercus cerris-Carpinus orientalis*-Mischwald und in der mittel-hochmontanen Stufe von *Fagus orientalis* mit flächig eingestreuter *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* gebildet werden *(Kehl* 1996). Als zusätzliche Klassen wurden die Agrarkulturen der Küstenebene (im äußersten Westen des Satellitenbildausschnitts), die undifferenzierten Weidetriften, Almbereiche und subalpinen Matten sowie die Schneedecken (nur in der November-Szene) ausgewiesen. Die digitale Klassifizierung beider Datensät-

ze wurde nach Vorgabe der gleichen Trainingsgebiete und unter Anwendung des gleichen Algorithmus vorgenommen. Für den Vergleich wurden beide Satellitenbilder aufeinander entzerrt.

Im Vergleich der Klassifizierungen vom September 1987 und vom November 1989 zeigen sich Probleme multisaisonaler Auswertungen, die aus unterschiedlichen phänologischen Phasen der Vegetation und abweichenden Sonnenständen resultieren. Die saisonal verschiedenen Reflexionsspektren der Vegetation und die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen und Schattenlängen bedingen voneinander abweichende Klassifizierungsergebnisse. Dabei zeigen sich in den klassifizierten November-Daten homogenere Verteilungen der von *Fagus orientalis* und *Quercus cerris* dominierten sommergrünen Laubwälder. Die einheitlichere Spektralsignatur hängt offensichtlich mit dem fortgeschrittenen Laubfall zusammen. Daneben fallen in der November-Klassifizierung größere Vorkommen von *Pinus brutia* und die weiträumigere Ausweisung unklassifizierter Bereiche wegen ausgedehnterer Schattenbereiche auf. Die Kiefernarten *Pinus nigra* und *P. brutia* weisen in beiden Datensätzen ähnliche spektrale Signaturen auf. Offensichtlich werden die Schwarzkiefer-Vorkommen im nördlichen Bildbereich der September-Klassifizierung in den November-Daten der Klasse *Pinus brutia* zugeordnet. Der Unterschied in der Flächenbilanz der von *P. brutia* eingenommenen Areale zwischen beiden Klassifizierungen beträgt 60%. Die Klassifizierung der September-Daten weist größere Weidetriften und alpine Matten aus, die im November fast ausschließlich unklassifiziert bleiben (Schatten) bzw. wegen Schneefalls in den Hochlagen als separate Klasse ausgewiesen werden. Neben den genannten Unterschieden lassen sich weitere Abweichungen feststellen, die hier nicht weiter diskutiert werden. Die Größe des Zuordnungsfehlers ist in beiden Klassifizierungen unbekannt.

Das Problem der Genauigkeit von Vegetationsklassifizierungen mit TM-Daten wird in verschiedenen Arbeiten erörtert. In einem Testgebiet der Schweiz erzielen *Itten* et al. (1992: 43) nach Beseitigung bildbezogener Beleuchtungsunterschiede und atmosphärischer Korrekturen eine Klassifizierungsgenauigkeit von 90% für die Unterscheidung zwischen Wald und Nichtwald und von nur 62% für die Unterscheidung zwischen Laub-, Nadel- und Mischwald (vgl. auch *Darvishsefat* 1995). Die Autoren führen das Ergebnis auf die große Varietät verschiedener Laubwälder im Untersuchungsgebiet zurück. Bei einer Einteilung in sechs verschiedene Waldbedekkungsklassen in der Cascade Range (darunter drei unterschiedliche Altersklassen geschlossener Koniferenwälder) erreichen *Cohen, Spies* und *Fiorella* (1995: 737) eine Klassifizierungsgenauigkeit von 82% und weisen darauf hin, daß eine Erweiterung der Klassenanzahl die Genauigkeit des Ergebnisses entscheidend verschlechtert. Nach ihrer Meinung liegen die Gründe dafür primär in der spektralen und räumlichen Beschränkung der Landsat TM-Daten.

4. Schlußfolgerungen

Die grundlegenden Methoden der kleinräumigen, differenzierten Vegetationsanalyse wurden im Zuge der digitalen Revolution bei weitem nicht derart umfassend transformiert wie die Methoden der großräumigen Vegetationskartierung unter dem Einfluß moderner Fernerkundungssysteme. Computergestützte, numerisch-statistische Klassifikations- und Ordinationsverfahren haben vor allem zu einer ständig zunehmenden Automatisierung und Erweiterung der Auswertungsmöglichkeiten von Vegetationsdaten geführt und weniger zu prinzipiell neuen methodischen Ansätzen oder bedeutenden Erkenntnisgewinnen beigetragen.

Numerische Klassifikationsverfahren haben sich in der Pflanzensoziologie bisher nicht

durchgesetzt. Sie lassen sich eher als zusätzliche Hilfsmittel zu traditionellen Arbeitsweisen charakterisieren. Nach zwei Jahrzehnten numerischer Syntaxonomie resümierten *Mucina* und *van der Maarel* (1989), daß gegenüber traditionellen Verfahren bisher kaum Fortschritte erzielt wurden (*Grabherr* 1985, *Wiegleb* 1986, *Hakes* 1994). Traditionelle Verfahren werden nach wie vor bevorzugt und mit Erfolg eingesetzt.

Moderne Ordinationsverfahren werden dagegen zunehmend, auch auf dem europäischen Kontinent, angewendet. Sie haben die Methodenvielfalt vergrößert und lassen für zukünftige Aufgaben der Vegetationsforschung, z.B. Zeitreihenanalysen multivariater Daten oder Probleme der räumlichen Skalierung, adäquate Lösungsmöglichkeiten erwarten (*Wildi* 1992, *Wiegleb* 1992). Darüber hinaus liefern numerisch-statistische Analysen essentielle Grundlagendaten für Folgeanwendungen (Modellierungen, Simulationen). Für den sinnvollen Computereinsatz bleiben breite Vegetationskenntnisse und darauf basierende kritische Überprüfungen der erzielten Ergebnisse unabdingbare Voraussetzung.

Die zu erwartenden Weiterentwicklungen der Fernerkundung mit zunehmender Einbindung in digitale Geländemodelle und Geoinformationssysteme sowie räumlich und spektral feiner auflösenden Sensoren wird zu weiteren Verbesserungen der Klassifizierungsgenauigkeit und zu detaillierteren Gliederungen führen. Dabei bildet der Aspekt des Monitorings und die Dokumentation von Veränderungen durch multitemporale Betrachtungen mit verschiedenen Aufnahmesystemen einen der wichtigsten Punkte weiterer Entwicklungen. Die generellen Voraussetzungen werden dabei auch zukünftig in adäquater *ground control* und der Präzision digitaler Geländemodelle liegen. Die Forderung nach möglichst genauer Geländekenntnis zur Interpretation und Evaluierung von digitalen Klassifizierungsergebnissen muß unbedingt aufrechterhalten bleiben, da ein genereller Engpaß im quantitativen und qualitativen Mangel an Geländedaten in räumlicher und zeitlicher Differenzierung besteht.

Allgemein läßt sich bei der computergestützten Verarbeitung raumbezogener Daten eine rapide wachsende Fülle hochspezialisierter Detailforschung feststellen, die in vielen Fällen einhergeht mit dem Verlust der Fähigkeit, Synthesen herzustellen. Daneben ist die Tendenz zu erkennen, daß quantitatives Messen zunehmend den qualitativen Ansatz verdrängt. Bei unreflektierter Anwendung birgt dies die Gefahr, ein Phänomen allein als Datenmenge zu erfassen und dabei die Ursachen für die Existenz des Faktums zu vernachlässigen (*Csaplovics* 1992: 191-192).

Die Grundlagenforschung entwickelt sich z.Z. stark in Richtung technischer Problemlösungen, während traditionelle Lösungsansätze in den Hintergrund treten. Zur Beantwortung aktueller wissenschaftlicher Fragen, z.B. wenn es um die Modellierung biotischer Systeme, um die Simulation von Vegetationsentwicklungen oder um globales Vegetationsmonitoring geht, reichen traditionelle Methoden der Vegetationsgeographie jedoch nicht mehr aus. Nur mit der digitalen Bearbeitung von Vegetationsdaten kommt man solchen Problemen entscheidend näher. Konventionelle und moderne Methoden haben jeweils Stärken und Schwächen. Zur Lösung drängender vegetationsgeographischer Probleme in Wissenschaft und Praxis sollten die Vorteile der unterschiedlichen Ansätze konstruktiv miteinander verknüpft werden.

Danksagung:
Die Bearbeitung der Satellitendaten wurde mit dem Bildverarbeitungssystem ERDAS am Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik - Fernerkundung - der FU Berlin (Arbeitsbereich Prof. Dr. *F.K. List*) durchgeführt. Dr. *H. Kehl* (Berlin) vom DFG-Projekt 'Landschaftsökologische Komplexanalyse im Amanus-Gebirge der Südost-Tür-

kei' (LÖKAT), TU-Berlin, Inst. f. Ökologie stellte die auf Grundlage von Vegetationskartierungen klassifizierten Satellitenbilder aus dem Amanus zur Verfügung. Prof. Dr. *E. Csaplovics* (Dresden), Prof. Dr. *M. Winiger* (Bonn) und zwei Gutachter gaben hilfreiche Kommentare zum Manuskript. Allen Genannten sei hiermit gedankt.

Anmerkung:

1 Die prinzipiell ähnlichen Methoden anderer Schulen (Skandinavien, Rußland) können hier unberücksichtigt bleiben, da sie im Hinblick auf ihre Überformung durch computergestützte Verfahren nicht anders zu beurteilen sind.

5. Literatur

Albertz, J. 1991: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Eine Einführung in die Fernerkundung. - Darmstadt

Avery, T.E. and *G.L. Berlin* 1992: Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation. 5th Ed. (formerly entitled: Interpretation of aerial photographs) - New York, Toronto

Bartels, M. und *P. Ergenzinger* 1988: Fernerkundung und ländliche Regionalplanung: Ressourcen im Ost-Aurès in Algerien. - DIE ERDE **119** (4): 283-294

Braun, G. 1996: Vegetationsgeographische Untersuchungen im NW-Karakorum (Pakistan). Kartierung der aktuellen Vegetation und Rekonstruktion der potentiellen Waldverbreitung auf der Basis von Satellitendaten, Gelände- und Einstrahlungsmodellen. - Bonner Geogr. Abh. **93**

Braun-Blanquet, J. 1928: Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. - Berlin

Bray, J.R. and *J.T. Curtis* 1957: An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. - Ecol. Monographs **27:** 325-349

Cohen, W.B., Spies, A. and *M. Fiorella* 1995: Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, USA. - Int. J. Remote Sensing **16** (4): 721-746

Csaplovics, E. 1992: Methoden der regionalen Fernerkundung. Anwendungen im Sahel Afrikas. - Berlin, Heidelberg, New York

Darvishsefat, A.A. 1995: Einsatz und Fusion von multisensoralen Satellitenbilddaten zur Erfassung von Waldinventuren. - Remote Sensing Ser. **24**

Dierschke, H. 1994: Pflanzensoziologie. Grundlagen und Methoden. - Stuttgart

Dierßen, K. 1990: Einführung in die Pflanzensoziologie (Vegetationskunde). - Darmstadt

Ellenberg, H. [4]1986: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. - Stuttgart

Ellenberg, H. und *D. Mueller-Dombois* 1967: Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the earth. - Ber. Geobot. Inst. ETH Stiftg. Rübel **37:** 21-55

Frankenberg, P. 1982: Vegetation und Raum. Konzepte der Ordinierung und Klassifizierung. - Paderborn-München-Wien-Zürich

Goodall, D.W. 1954: Vegetational classification and vegetational continua. - Angew. Pflanzensoz. **1:** 168-182

Goodchild, M.F. 1994: Integrating GIS and remote sensing for vegetation analysis and modeling: methodological issues. - J. Vegetation Science **5** (5): 615-626

Grabherr, G. 1985: Numerische Klassifikation und Ordination in der alpinen Vegetationsökologie als Beitrag zur Verknüpfung moderner 'Computermethoden' mit der pflanzensoziologischen Tradition. - Tuexenia **5:** 181-190

Grisebach, A. 1838: Über den Einfluß des Klimas auf die Begrenzung der natürlichen Floren. - Linnaea **12**

Hakes, W. 1994: On the predictive power of numerical and Braun-Blanquet classification: an example from beechwoods. - J. Vegetation Science **5:** 153-160

Hill, M.O. and *H.G. Gauch* 1980: Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. - Vegetatio **42:** 47-58

Humboldt, A.v. 1807: Ideen zu einer Geographie der Pflanzen nebst einem Naturgemälde der Tropenländer. - Tübingen

Itten, K.I., P. Meyer, T. Kellenberger, Rl. Leu, S. Sandmeier, P. Bitter and *K. Seidel* 1992: Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of alpine regions. - Remote Sensing Ser. **18**

James, F.C. and *C.E. McCulloch* 1990: Multivariate analysis in ecology and systematics: Panacea or Pandora's box. - Ann. Rev. Ecol. Syst. **21:** 129-166

Jongman, R.H.G., C.J.F. ter Braak and *O.F.R. van Tongeren* 1987: Data analysis in community and landscape ecology. - Wageningen

Kehl, H. 1996: Eine landschaftsökologische Komplexanalyse des Amanus-Gebirges (SE-Türkei). - Habilitationsschrift TU Berlin (in Vorbereitung)

Klink, H.J. und *R. Glawion* 1982: Die natürlichen Vegetationsformationen der Erde. Ausdruck des ökologischen Potentials der Räume. - Geogr. Rdsch. **34** (10): 461-470

Klink, H.J. und *E. Mayer* 1983: Vegetationsgeographie. - Braunschweig

Küchler, A.W. and *I.S. Zonneveld* (eds.) 1988: Vegetation mapping. - Handbook of Vegetation Science **10**

Kühnen, A. und *M. Meurer* 1993: Landnutzungs- und Vegetationskartierung mit Hilfe satellitengestützter Fernerkundung im Südtiroler Martell-Tal. - Geoökodynamik **14** (4): 213-224

Kußerow, H. 1994: Quantitative und qualitative Erfassung von Vegetationsänderungen. Ein Beispiel aus dem Südsahel Malis. - DIE ERDE **125** (1): 35-56

Lal, J.B., A.K. Gulati and *M.S. Bist* 1991: Satellite mapping of alpine pastures in the Himalayas. - Int. J. Remote Sensing **12** (3): 435-443

Leser, H. [3]1991: Landschaftsökologie. - Stuttgart

Lillesand, T.M. and *R.W. Kiefer* [3]1994: Remote sensing and image interpretation. - New York

Miehe, G. 1990: Langtang Himal. Flora und Vegetation als Klimazeiger und -zeugen im Himalaya. A prodromus of the vegetation ecology of the Himalayas. Mit einer kommentierten Flechtenliste von Josef Poelt. - Diss. Bot. **158**. - Berlin-Stuttgart

Miehe, G. 1991: Die Vegetationskarte des Khumbu Himal (Mt. Everest-Südabdachung) 1:50.000. Gefügemuster der Vegetation und Probleme der Kartierung. - Erdkunde **45**: 81-94

Mucina, L. and *E. van der Maarel* 1989: Twenty years of numerical syntaxonomy. - Vegetatio **81:** 1-15

Mueller-Dombois, D. and *H. Ellenberg* 1974: Aims and methods of vegetation ecology. - New York

Mueller-Dombois, D.,M.A. Little and *T. van der Hammen* 1986: Manual of methods for mountain transect studies. - IUBS, Paris

Müller-Hohenstein, K. 1986: Methodische Probleme vegetationskundlichen Arbeitens in semiariden Räumen am Beispiel des Nordjemen. - Geomethodica **11**: 109-143

Nüsser, M. 1994: Vegetation und Landnutzung im östlichen Aurès (Algerien). Untersuchungen in einem nordafrikanischen Gebirgsraum mit Methoden regionaler Fernerkundung. - DIE ERDE **125** (1): 57-74

Paffen, K.H., W. Pillewizer und *H.J. Schneider* 1956: Forschungen im Hunza-Karakorum. - Erdkunde **10**: 1-33

Peppler, C. 1988: TAB - Ein Computerprogramm für die pflanzensoziologische Tabellenarbeit. - Tuexenia **8:** 383-406

Schickhoff, U. 1993: Das Kaghan-Tal im Westhimalaya (Pakistan). Studien zur landschaftsökologischen Differenzierung und zum Landschaftswandel mit vegetationskundlichem Ansatz. - Bonner Geogr. Abh. **87**

Schickhoff, U. 1994: Die Verbreitung der Vegetation im Kaghan-Tal (Westhimalaya, Pakistan) und ihre kartographische Darstellung im Maßstab 1:150.000. - Erdkunde **48** (2): 92-110

Schickhoff, U. 1995: Verbreitung, Nutzung und Zerstörung der Höhenwälder im Karakorum und in angrenzenden Hochgebirgsräumen Nordpakistans. - Petermanns Geogr. Mitt. **139** (2): 67-85

Schmithüsen, J. [3]1968: Allgemeine Vegetationsgeographie. - Berlin

ter Braak, C.J.F. 1986: Canonical correspondence analysis; a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. - Vegetatio **65:** 3-11

Troll, C. 1939a: Luftbildplan und ökologische Bodenforschung. Ihr zweckmäßiger Einsatz für die wissenschaftliche Erforschung und praktische Erschließung wenig bekannter Länder. - Zeitschr. Ges für Erdk. Berlin **74**: 241-298

Troll, C. 1939b: Das Pflanzenkleid des Nanga Parbat. Begleitworte zur Vegetationskarte der Nanga Parbat-Gruppe (Nordwest-Himalaja) 1:50.000. - Wiss. Veröff. Dt. Mus. für Länderk. Leipzig, N.F. **7**: 149-193

Troll, C. 1975: Vergleichende Geographie der Hochgebirge in landschaftsökologischer Sicht. - Geogr. Rdsch. **27:** 185-198

Tüxen, R. 1937: Die Pflanzengesellschaften Nordwestdeutschlands. - Mitt. Flor.-Soziol. Arbeitsgem. Nieders. **3:** 1-170

Walsh, J., F.W. Davis und *R.K. Peet* (eds.) 1994: Applications of remote sensing and geographic information systems in vegetation science. - J. Vegetation Science **5** (5): 609-756

Werner, W. und *D. Paulißen* 1991: Programm VEGBASE. Datenbank der Zeigerwerte und deren Auswertung mit dem Personalcomputer. - In: *Ellenberg, H., H.E. Weber, R. Düll, V. Wirth, W. Werner* und *D. Paulißen*: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. - Scripta Geobotanica **18:** 238-248

Whittaker, R.H. 1967: Gradient analysis of vegetation. - Biol. Review **49:** 207-264

Whittaker, R.H. (ed.) 1973: Ordination and classification of communities. Handbook of Vegetation Science **5**

Wiegleb, G. 1986: Grenzen und Möglichkeiten der Datenanalyse in der Pflanzenökologie. - Tuexenia **6:** 365-378

Wiegleb, G. 1992: Explorative Datenanalyse und räumliche Skalierung - eine kritische Evaluation. - Verh. Ges. f. Ökologie **21:** 327-338

Wildi, O. 1986: Analyse vegetationskundlicher Daten. Theorie und Einsatz statistischer Methoden. - Veröff. Geobot. Inst. ETH Stiftg. Rübel **90**

Wildi, O. 1992: Rolle und Perspektiven statistischer Analytik in der Pflanzenökologie. - Verh. Ges. f. Ökologie **21:** 339-346

Wildi, O. and *L. Orloci* 1990: Numerical exploration of community patterns. - The Hague

Winiger, M. 1992: Gebirge und Hochgebirge. Forschungsentwicklung und -perspektiven. - Geogr. Rdsch. **44:** 400-408

Zusammenfassung: Traditionelle Methoden der Vegetationsgeographie im Wandel - Potentiale und Limitierungen der digitalen Verarbeitung vegetationsbezogener Datensätze

Computergestützte Verfahren haben in den letzten Jahrzehnten einen nachhaltigen Einfluß auf traditionelle Methoden der Vegetationsgeographie ausgeübt. Ansätze zur Gliederung und Ordnung der Vegetation wurden vor allem durch die Entwicklung multivariater statistischer Analysemethoden modifiziert. Numerisch-statistische Klassifikations- und Ordinationsverfahren haben die Methodenvielfalt sowie die Auswertungsmöglichkeiten von Vegetationsdaten beträchtlich erweitert. Der Einsatz multivariater Verfahren hat sich in der traditionellen Pflanzensoziologie bisher jedoch nicht durchsetzen können. Dagegen finden moderne Ordinationsverfahren im Rahmen gradientenanalytischer Fragestellungen zunehmend weitere Verbreitung. Im Bereich der Vegetationskartierung haben moderne Methoden der Fernerkundung und der digitalen Bildverarbeitung von Satellitenbildern zu neuartigen Erfassungs- und Darstellungsmöglichkeiten geführt. Bezüglich der Anwendbarkeit in Hochgebirgsräumen ergeben sich hier gewisse Limitierungen, die in erster Linie durch Probleme der geometrischen Entzerrung und Flächentreue sowie durch Schlagschatten und Wolkenbedeckung hervorgerufen werden. Verstärkte Einbindung von digitalen Geländemodellen und Geoinformationssystemen sowie höher auflösende Sensoren lassen zukünftig verbesserte Klassifizierungsgenauigkeiten und differenziertere Ergebnisse erwarten. Detaillierte Vegetations- und Geländekenntnisse bleiben unabdingbare Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz dieser Technologien. Die digitale Verarbeitung vegetationsbezogener Datensätze kann entscheidend zur Lösung drängender vegetationsgeographischer Probleme beitragen.

Summary: Traditional methods of vegetation geography in transition - Potentials and limitations of the digital processing of vegetation data

Computer-aided techniques have exerted a substantial influence on traditional methods of vegetation geography in the last decades. Approaches to the classification and ordination of vegetation data were modified in particular by the development of multivariate data analysis. Numerical classification and ordination techniques considerably extended the methodical variety and improved the treatment of vegetation data. However, within traditional phytosociology the use of multivariate statistics has not yet gained acceptance. By contrast, modern ordination methods are increasingly becoming more widespread within the scope of gradient analysis. As far as vegetation mapping is concerned, modern remote sensing techniques and digital image processing (e.g. satellite imageries) have resulted in a new type of data collecting, handling and representation. Regarding the applicability in high mountain environments, certain

restrictions are caused by problems of geometric correction and accuracy, by shadow areas and cloud cover. Increased integration of digital terrain models and geographic information systems as well as high resolution sensors will further improve classification accuracy and enable more differentiated results. But detailed knowledge of vegetation and extensive ground truthing are indispensable prerequisites for the appropriate use of these technologies. Digital processing of vegetation data can play a vital role in solving current problems in vegetation geography.

Résumé: Changement des méthodes traditionnelles de la géographie de végétation. Potentiel et limites des analyses numériques de données concernant la végétation

Durant les dernières décennies, des techniques appuyées par l'informatique ont exercé une influence durable sur les méthodes traditionnelles de la géographie de végétation. Des points de départ pour la classification et l'ordre de la végétation ont été modifiés, particulièrement par le développement de méthodes d'analyse statistiques à plusieurs variables. Des techniques de classification et d'ordination numériques-statistiques ont aggrandi considérablement la multiplicité des méthodes ainsi que les possibilités d'interprétation de données de végétation. Mais jusqu'aujourd'hui l'emploi de techniques statistiques à plusieurs variables n'a pas pu se faire valoir dans la phytosociologie traditionnelle. Par contre, des techniques d'ordination modernes, dans le cadre des problèmes gradient-analytiques, s'emploient de plus en plus. En ce qui concerne la cartographie de la végétation, des méthodes modernes de télédétection et de traitement numérique d'images-satellite ont abouti à des possibilités nouvelles d'appréhension et de représentation. Concernant l'emploi dans les hautes montagnes, il y a de certaines limites qui, avant tout, sont dues à des problèmes de redressement et d'exactitude géométriques ainsi qu'à des ombres et des couches de nuages. Une intégration renforcée de modèles numériques de terrains et de systèmes d'information géographique ainsi que des capteurs de plus en plus dévéloppés ont pour conséquence qu'on peut s'attendre, dans quelque temps, à une précision de classification plus grande et à des résultats plus différenciés. Des connaissances de la végétation et du terrain plus détaillées resteront la condition indispensable pour l'emploi raisonnable de ces technologies. Le traitement numérique de données concernant la végétation peut contribuer d'une façon décisive à la solution de problèmes végétaux-géographiques urgents.

Dipl. Geogr. *Marcus Nüsser* und *Dr. Udo Schickhoff*, Geographisches Institut der Universität Bonn, Meckenheimer Allee 166, D-53115 Bonn

Manuskripteingang: 08.01.1996
Annahme zum Druck: 06.02.1996