

ZUR ANWENDUNG QUANTITATIVER VERFAHREN
BEI GEOMORPHOLOGISCHEN UNTERSUCHUNGEN
DEUTSCHSPRACHIGER WISSENSCHAFTLER
IM ZEITRAUM 1970-1987

Ein kurzer Literaturbericht

Mit 5 Tabellen

WERNER SIEGBURG

Summary: The application of quantitative methods in geomorphological research by German-speaking scientists in the period 1970-1987: a brief report on the literature

For the purpose of studying the application of quantitative methods by German-speaking geomorphologists, a sample of 1,062 publications dated between 1970 and 1987 was taken and evaluated. The most significant results and conclusions are as follows:

1) Quantitative methods were applied in 10.04% of the geomorphological studies. This figure has certainly risen in comparison to earlier years. Such procedures are, however, much more common in certain non-German-speaking countries and in other geographical fields and subjects related to geography.

2) In 60.6% of all the statistical analyses simple univariate and bivariate methods were used, whereas multivariate procedures were applied in a mere 0.6-7% of the analyses, although geomorphological processes and forms are usually multicausal in origin and must be considered within the context of a complex system. Three examples taken from periglacial and slope morphology make it obvious that the application of quantitative procedures can lead to results which are beyond the scope of traditional methods. The relatively uncommon use of multiple statistics may partly be due to the present level of research, and partly to the fact that multivariate analyses, when involving a large number of data and variables, are only feasible with the aid of electronic data processing. On the other hand, however, a complex data analysis is aided by the availability of comprehensive software (i.e. statistical packages such as SPSS or SAS).

3) The proportion of quantitative studies varies considerably in the differing geomorphological fields. In general this depends more on the acceptance of statistical methods than on their applicability.

4) The application of quantitative statistics also varied with regard to the relief features studies. The corresponding percentages range between 0.5% and 34.1% (table 4). The traditional employment of semi-quantitative methods in the analysis of certain features, or the fact that some kinds of variables are easy to quantify, has obviously resulted in a greater popularity of statistical procedures, whereas in other cases the recording of data is considered too time-consuming and involves the employment of a large number of technical instruments.

1. Fragestellung

Quantitativ-statistische Verfahren stellen heute in vielen Ländern der Erde ein selbstverständliches und allgemein anerkanntes methodisches Instrumentarium geomorphologischer Analyse dar. AHNERT (1981) stellte bereits fest, daß die quantitativ-geomorphologische Forschung, die in der unmittelbaren Nachkriegszeit in den USA einsetzte und sich später zunächst auf Großbritannien und weitere Länder englischer Sprachtradition ausdehnte, seit Beginn der sechziger Jahre in besonders starkem Maße expandierte. Geomorphologen des deutschen Sprachraumes haben jedoch erst 10-15 Jahre später verstärkt von statistischen Methoden Gebrauch gemacht; dennoch besteht hier auch heute noch ein großer Nachholbedarf (vgl. AHNERT 1981), vor allem gegenüber anderen Teildisziplinen sowie den Nachbarwissenschaften der Geographie (z. B. der Hydrologie und Bodenkunde).

Diese Feststellungen gaben den Anlaß, die Anwendung quantitativ-statistischer Verfahren bei geomorphologischen Untersuchungen deutschsprachiger Wissenschaftler im Zeitraum 1970-1987 näher zu analysieren. Im speziellen wurde die Häufigkeit solcher Untersuchungen ermittelt und zwar

- a) in der Geomorphologie generell
- b) in bezug auf bestimmte Form- und Prozeßbereiche (z. B. fluviale oder äolische Formung) und
- c) hinsichtlich der Reliefmerkmalsgruppen (räumliche, habituelle, substantielle und genetische Merkmale) sowie anderer geomorphologisch relevanter Variablen (z. B. Schneegrenze).

In Anlehnung an AHNERT (1981) ist hier mit quantitativ-statistischer Methodik nicht jegliche Erfassung, Ansammlung von und Bezugnahme auf Zahlenwerte oder deren tabellarische und graphische Verarbeitung gemeint (z. B. in Korngrößen - Summenkurven, hypsometrischen Kurven, Zurundungsmorphogrammen oder sonstigen Histogrammen, Verlaufskurven, Zeitreihen etc.), sondern die zusätz-

liche *mathematisch-statistische Auswertung* der numerischen Daten. Die alleinige Berechnung allgemein üblicher Mittelwerte ohne eine Analyse der zugehörigen Häufigkeitsverteilung oder ohne gleichzeitige Bestimmung anderer Verteilungsparameter (wie z. B. Standardabweichung, Schiefe u. ä.) wird hier ebenfalls nicht als quantitatives Verfahren (im engeren Sinne) verstanden.

Insgesamt wurden 1062 Veröffentlichungen deutschsprachiger Autoren durchgesehen, die geomorphologische Themen, wenn nicht ausschließlich, so doch zumindest schwerpunktmäßig behandeln. Die Stichprobe beinhaltet alle entsprechenden Aufsätze und Abhandlungen der Jahre 1970–1987 in folgenden Zeitschriften und Schriftenreihen: *Catena*, *Die Höhle*, *Eiszeitalter und Gegenwart*, *Geomethodica*, *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, *Physische Geographie*, *Zeitschrift für Geomorphologie* (incl. Supplementbände), *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*. Weiterhin enthält sie diejenigen Arbeiten der Jahre 1980–1987, die in deutschsprachigen periodischen Publikationen erschienen und im geomorphologischen Sachkatalog des Geographischen Instituts der Universität Bonn verzeichnet sind. Schließlich wurden 12 weitere Arbeiten als willkürliche Auswahl in die Stichprobe integriert (Zeitraum: 1970–1987).

Die jeweiligen Abhandlungen bzw. Aufsätze wurden hinsichtlich der Verwendung quantitativer Methoden untersucht und ausgewertet; dabei galt eine Analyse bereits als quantitativ, wenn nur *ein* quantitativ-statistisches Verfahren zur Lösung einer Schwerpunktfrage angewandt wurde.

2. Der Anteil quantitativ-geomorphologischer Untersuchungen im Zeitraum 1970–1987

Quantitativ-statistische Verfahren im obigen Sinne wurden in den Jahren 1970–1987 in 10,04% (= 109) der geomorphologischen Untersuchungen verwendet (vgl. Tab. 2). Obwohl keine Vergleichswerte vorliegen, kann angenommen werden, daß dies zwar gegenüber früheren Jahren eine Steigerung bedeutet, andererseits dürfte jedoch in vielen Ländern mit nicht deutscher Sprachtradition sowie in anderen Teildisziplinen und in den Nachbarwissenschaften der Geographie im gleichen Zeitraum und z. T. auch schon vorher in wesentlich stärkerem Maße von quantitativen Methoden Gebrauch gemacht worden sein. Eine unterschiedliche Rezeption quantitativer Verfahren innerhalb des beobachteten Zeitraums konnte anhand der Stichprobe nicht festgestellt werden.

Tab. 1: Die Häufigkeit einzelner statistischer Verfahren in geomorphologischen Untersuchungen. Abs.: Absolute Anzahl der Arbeiten, in denen die entsprechenden Verfahren angewandt wurden. Prozentangaben: Anteil dieser Arbeiten an der Gesamtsumme aller quantitativen Untersuchungen (incl. Mehrfachnennungen = 170).

(Die Angaben sämtlicher Tabellen beziehen sich ausschließlich auf geomorphologische Arbeiten deutschsprachiger Wissenschaftler, die im Zeitraum 1970–1987 publiziert wurden, und basieren auf der in Kapitel 1 beschriebenen Stichprobe).

The frequency of particular statistical methods in geomorphological investigations. Abs: absolute number of publications employing relevant methods. Percentages: proportion of these studies out of the total of all quantitative investigations (including recurring citations = 170)

(The data of all the tables refer exclusively to geomorphological studies by German-speaking researchers published in the period 1970–1987; they are based on the sample described in chapter 1).

Abk.	Statistische Verfahren	abs.	%
H	Häufigkeitsanalysen mit Berechnung entsprechender Parameter (\bar{x} , Me, Md, s, s^2 , V, g u. a.)	52	30,6
R, K	Einfache Regressions- und Korrelationsanalysen	51	30,0
T	Schätz- und Testverfahren	25	14,7
MR/K	Multiple Regressions- und Korrelationsanalysen (incl. partielle Regr. u. Korr.)	13	7,6
Fa	Faktorenanalyse (incl. Hauptkomponentenanalyse)	10	5,9
Cl	Clusteranalytische Verfahren	8	4,7
Tr	Trendflächenanalyse	1	0,6
Va	Varianzanalyse	1	0,6
So	Spezielle Kennwerte und Sonstiges	9	5,3
		<u>170</u>	<u>100,0</u>

Tab. 2: %-Anteil quantitativer Arbeiten an der Gesamtheit aller Untersuchungen eines Form- und Prozeßbereichs. Abs.: Anzahl der Untersuchungen eines Form- und Prozeßbereichs.

Percentage share of quantitative studies in the total of investigations into a field of process and form. Abs: number of investigations of any one field relating to process and form.

Abk.	Form- und Prozeßbereich	%	abs.
Gr	Gravitative Prozesse und Formen	33,3	15
Äo	Äolische Prozesse und Formen	25,5	48
Sp	Spülaquatische Prozesse und Formen (incl. Bodenerosion)	25,5	51
Ha	Hangmorphologie, Hangentwicklung	14,3	44
Pe	Gravitativ-kryogene Prozesse und Formen	12,8	96
Ma	Marine und limnische Prozesse und Formen	12,5	65
Lö	Lösungsprozesse und -formen	12,5	24
Gl	Glaziale Prozesse und Formen	9,1	247
	davon:		
	G11 glazialmorphologische Pr. u. Fo.	8,0	140
	G12 glaziologische Pr. u. Fo. (incl. Schneegrenze)	10,5	107
Fl	Fluviale Prozesse und Formen	7,4	124
Te	Tektogene und strukturbedingte Prozesse und Formen (incl. Vulkanismus)	6,7	46
De	Denudative Prozesse und Formen allgemein	6,1	33
Ve	Verwitterungsprozesse und -formen, Bodenbildung	4,5	115
Fo	Komplexe Formen (gesellschaften)	4,5	115
So	Sonstiges	5,1	39
		$\bar{x} = 10,04$	1062

Die Anwendung verschiedener statistischer Methoden dokumentiert Tabelle 1. Einfache uni- und bivariate Verfahren wurden am häufigsten, d.h. in 60,6% (30,6 + 30,0) aller statistischen Analysen verwendet. Eine zweite Gruppe bilden die Schätz- und Testverfahren mit einem bereits deutlich geringeren Anteil von 14,7%. Am wenigsten (in 0,6–7,6% der Fälle) wurde auf multivariate Methoden zurückgegriffen. Mag dieser Sachverhalt auch vielfältige Ursachen haben, so deutet er doch nicht auf eine nur beschränkte Anwendbarkeit solcher Verfahren in der Geomorphologie hin. Denn wie in anderen Wissenschaften ist zumindest die Mehrzahl oder eine Vielzahl der Forschungsobjekte sowohl in struktureller als auch in genetischer Hinsicht komplex bzw. multikausal, so daß mit voranschreitender Forschungsfront eine Zunahme mehrdimensionaler Betrachtungsweisen und Erklärungsmodelle und damit auch multivariater Verfahren zu erwarten ist.

Im übrigen mag jedoch überraschen, daß bivariate Regressions- und Korrelationsanalysen nahezu bei ebenso vielen Untersuchungen angewandt wurden wie die gängigen Häufigkeitsanalysen mit Berechnung entsprechender Parameter. Verstärkt finden die einfache Korrelations- und Regressionsrechnung u. a. in der Bodenerosionsforschung und Glaziologie Verwendung, so bei der Untersuchung des Feststoffabtrags bzw. des Gletscherhaushalts

oder der Schneegrenze und deren Abhängigkeit von einzelnen Steuergrößen (siehe z. B. SCHWERTMANN et al. 1983, HURNI 1979, GÜNTHER/WIDLEWSKI 1986, GROSS 1983).

3. Die Anwendung quantitativ-statistischer Verfahren in einzelnen Form- und Prozeßbereichen (Tabelle 2 und 3)

Der jeweilige Prozentanteil quantitativer Untersuchungen an der Gesamtheit der geomorphologischen Studien eines Form- und Prozeßbereichs geht aus Tabelle 2 hervor. Dabei ist zu beachten, daß die Anzahl der Arbeiten in den einzelnen Bereichen und somit auch die Verlässlichkeit der Prozentangaben variiert. Mit besonderer Vorsicht zu interpretieren sind die Werte der Forschungsgebiete „Gr“ und „Lö“ (Gravitative bzw. Lösungsprozesse und -formen), die insgesamt mit nur 15 bzw. 24 Untersuchungen vertreten sind.

Es wird jedoch sehr deutlich, daß sich die quantitativen Studien prozentual keinesfalls gleichmäßig auf die einzelnen Form- und Prozeßbereiche verteilen; die %-Angaben schwanken zwischen 4,5 und 33,3. Sieht man einmal von der Gruppe „Gr“ ab, so wurden quantitativ-statistische Verfahren insbesondere bei der Untersuchung äolischer (Äo) und spülaquatischer Prozesse und Formen (incl. Bodenerosion) ein-

Tab. 3: Der Prozentanteil eines statistischen Verfahrens (einer Verfahrensgruppe) an der Gesamtheit aller statistischen Analysen eines Form- und Prozeßbereichs. Bei mehrfacher Anwendung desselben Verfahrens innerhalb einer geomorphologischen Arbeit erfolgte nur eine Nennung. Abkürzungen: vgl. Tabelle 1 und 2.

The percentage share of a statistical method (a group of methods) in the total of all the statistical analyses of any one field of process and form. Abs: number of all the statistical analyses in the field of form and process under consideration. In cases where repeated applications of the same method occurred within one geomorphological study, it was mentioned only once. For abbreviations see tables 1 and 2.

Form-, Prozeß- bereich	statistische Verfahren								abs.
	H	R, K	MR/K	Tr	F	CL	T	So	
Gl1	42,9	21,4	-	-	-	14,3	14,3	7,1	14
Gl2	18,2	50,0	9,1	4,5	-	-	18,1	-	22
Sp	8,0	44,0	12,0	-	16,0	-	16,0	4,0	25
Pe	31,6	31,6	5,3	-	5,2	10,5	10,6	5,2	19
Fl	28,6	50,0	7,1	-	-	-	14,3	-	14
Ma	62,5	12,5	-	-	-	-	12,5	12,5	8
Äo	40,0	20,0	10,0	-	5,0	10,0	5,0	10,0	24
Gr	30,0	-	-	-	20,0	20,0	30,0	-	10
Lö	66,7	-	-	-	-	-	-	33,3	3
Te	34,0	66,0	-	-	-	-	-	-	3
De	-	66,7	33,3	-	-	-	-	-	3
Ve	20,0	60,0	-	-	-	-	20,0	-	5
Ha	38,5	23,1	7,7	-	-	-	30,7	-	13
Fo	57,1	14,3	14,3	-	-	-	14,3	-	7
So	-	50,0	-	-	-	-	-	50,0	2
									172

gesetzt (in 25,5% aller Fälle jeweils). In Studien des Bereiches „Äo“ ging es dabei in mehr als der Hälfte aller Fälle um die granulometrische Charakterisierung und Klassifizierung von Lössen bzw. Flug- und Dünenansanden sowie um die Orientierung der Dünenlängsachsen und ihre Veränderung (vgl. z. B. BESLER 1982, KLAMMER 1982, VOSSMERBÄUMER 1976 u. a.). Im Rahmen derartiger Untersuchungen wurde meist von häufigkeitsanalytischen Methoden einschließlich der Berechnung einzelner Verteilungsparameter Gebrauch gemacht (vgl. Tab. 3). Eine größere Varietät quantitativer Verfahren, u. a. auch multivariate Methoden, entdeckt man in Abhandlungen über chemische Eigenschaften äolischer Sedimente (Tonmineralbestand, Karbonatgehalt u. a.) und deren Beziehung zueinander sowie zur Körnung der Substrate (vgl. z. B. HÄDRICH 1975 und NIEDERBUDE 1976).

Die quantitativen Studien im Bereich „spülaquatische Prozesse und Formen (Sp)“ beschränkten sich fast ausschließlich auf den Themenkomplex „Bodenerosion“. In erster Linie wurden Variablen wie Quantität/Intensität des Bodenabtrags, Schwebetrags, Oberflächenabflusses, der Abfluß- bzw. Bodenabtrag bewirkenden Niederschläge, Grad der Bodenerosionsgefährdung u. a. in ihrer Abhängigkeit von Steuergrößen der verschiedenen Geokomplexe

(Geofaktoren) untersucht (s. o., vgl. etwa KELCH et al. 1977, SCHMITTNER 1979, KARL et al. 1985, BRÜCKNER 1987 u. v. a.). Darüber hinaus wurden u. a. die Beziehungen zwischen Feststoffaustrag und der Konzentration bestimmter Nährstoffe im Oberflächenabfluß quantitativ-statistisch erfaßt (vgl. z. B. MOLLENHAUER et al. 1985). Im Unterschied zum Bereich „äolische Prozesse und Formen“ dominierten in der Bodenerosionsforschung die einfachen (bivariaten) Korrelations- und Regressionsanalysen (Tab. 3), u. a. auch mit qualitativen Variablen (vgl. KELCH et al. 1977, Kontingenztafeln).

Ein relativ hoher Anteil quantitativer statistischer Untersuchungen war außer in den Bereichen „Gr“, „Äo“ und „Sp“ noch in den Forschungsgebieten „Hangmorphologie/Hangentwicklung (Ha)“, „gravitative (Gr)“, „marine und limnische (Ma)“, sowie „Lösungsprozesse und Formen (Lö)“ zu verzeichnen, obwohl die entsprechenden %-Werte (12,5-14,3) gegenüber denen der vorher erwähnten Gruppen (22,5-33,3) bereits deutlich abfallen.

Der größte Anteil quantitativer Studien in den zuletzt genannten Bereichen entfällt mit 14,3% (vgl. Tab. 2) auf das Forschungsgebiet „Hangmorphologie/Hangentwicklung“. In der Hauptsache handelt es sich hierbei um morphometrische Analysen. Als

räumliche Untersuchungseinheiten bei der Datenerfassung dienten Hangabschnitte unterschiedlicher Dimension und Homogenität (z. B. Fazetten oder Hangprofile) sowie Taleinzugsgebiete oder noch größere Raumeinheiten. Böschungs- bzw. Neigungswinkel und andere Hangformmerkmale, z. B. Konvexität, Konkavität, Stufen, Verebnungen, wurden in ihrer räumlichen/gebietlichen Differenzierung bzw. in ihrer (statistischen) Beziehung zu verschiedensten morphometrischen Variablen (wie etwa Längsgefälle der Tiefenlinien, Höhenlage, Exposition) und anderen Faktoren des Geosystems, z. B. Substrat- und Klimamerkmale, untersucht (vgl. z. B. VILLINGER 1967, HORMANN 1971, SOHLBACH 1978, BURGER 1982, SIEBURG 1987a). Als statistische Methoden kamen in erster Linie Häufigkeitsanalysen zum Einsatz; relativ oft wurde auch von statistischen Testverfahren Gebrauch gemacht (vgl. Tab. 3).

Im übrigen mag der relativ geringe Anteil quantitativer Studien in den Bereichen „Glaziologie (Gl2)“ und „Verwitterung/Bodenbildung (Ve)“ überraschen (10,5 bzw. 4,5%), da die pedologische und glaziologische Forschung schon seit längerem eine deutlich stärkere quantitative Ausrichtung besitzt als die Geomorphologie (jedenfalls soweit es den deutschen Sprachraum betrifft). Die vergleichsweise niedrigen %-Sätze beruhen wahrscheinlich darauf, daß in der vorliegenden Literaturstudie nur Untersuchungen mit eindeutig geomorphologischem Schwerpunkt berücksichtigt wurden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß quantitativ-statistische Verfahren in den verschiedenen Form- und Prozeßbereichen in sehr unterschiedlichem Maße angewandt wurden. Dies liegt m. E. nicht primär in einer spezifischen Verwendbarkeit solcher Methoden begründet, sondern in der unterschiedlichen Rezeption dieser Verfahren in den einzelnen Forschungsgebieten.

4. Die Anwendung quantitativ-statistischer Verfahren bei der Untersuchung einzelner Reliefmerkmale bzw. -merkmalsgruppen (Tabelle 4 und 5)

Die Anwendung quantitativ-statistischer Methoden wurde nicht nur in bezug auf einzelne Prozeßbereiche und davon abhängige Formen (gesellschaften) untersucht, sondern auch hinsichtlich verschiedener Reliefmerkmale, -merkmalsgruppen (-merkmalstypen) sowie bestimmter geomorphologisch relevanter Variablen (beziehungen). Die Ergebnisse sind den Tabellen 4 und 5 zu entnehmen.

Mehr als ein Drittel der quantitativen Analysen (34,1%, vgl. Tab. 4) behandelt den oberflächennahen Untergrund. Davon beschäftigt sich wiederum die Mehrzahl der Untersuchungen (11,9%) mit der Granulometrie von Feinsedimenten, häufig äolischer Sande und Lössen, zum Zwecke sedimentologischer Charakterisierung, Klassifizierung bzw. Typisierung, der Strukturierung von Sedimentationsräumen sowie der Rekonstruktion vorzeitlicher Windverhältnisse u. a. (vgl. z. B. BESLER 1976 u. 1982, SIEBERTZ 1982, WALDEMAR et al. 1982, FRANKENBERG/FRANKE 1983, MEYER 1983). Als statistische Verfahren überwogen dabei, wie auch insbesondere bei schottermorphometrischen Untersuchungen, wiederum die Häufigkeitsanalysen (mit 63,0 bzw. 78,6% der quantitativen Analysen der jeweiligen Gruppen, vgl. Tab. 5). Dies ist nicht verwunderlich, da bereits bei herkömmlicheren sedimentologischen Arbeiten semiquantitative verteilungsanalytische Verfahren wie die Erstellung von Kornsummenkurven, Zurundungsmorphogrammen u. ä. durchaus gängig sind oder gar routinemäßig erfolgen.

Neben dem Forschungsobjekt „oberflächennaher Untergrund“ standen bei quantitativen Untersuchungen die habituellen Reliefmerkmale mit einem Anteil von 27% (Tab. 4) im Mittelpunkt des Interesses. Es handelt sich dabei um die Gestaltvariablen Neigung, Wölbung, Exposition, Aufriß und Grundriß sowie um einfache Größenmerkmale wie Länge, Breite, Höhe, Tiefe oder Volumen. Sie bieten sich für eine statistische Bearbeitung an, da sie in der Mehrzahl leicht zu quantifizieren sind, zum großen Teil auch über kartometrische Verfahren. Als räumliche Einheiten der Datenerfassung dienten Untersuchungselemente unterschiedlicher Dimension und gefügetaxonomischer Ordnung, so z. B. Fazetten, Hangprofile oder Hangabschnitte (s. o.), darunter Halden und Bergsturzböschungen, sowie Tiefenlinien, Flußeinzugsgebiete oder auch Gletscher bzw. Gletscheroberflächen (siehe z. B. KLOSTERMANN 1970, BRÜCKL 1972, KLAMMER 1975, STINGL/HERRMANN 1976, SOHLBACH 1978, AHNERT 1982, MAISCH/HAEERLI 1982, BURGER 1982, DAMMSCHNEIDER 1983, SIEBURG 1987a). Als statistische Methoden dominierten Häufigkeitsanalysen sowie einfache Korrelations- und Regressionsrechnungen in nahezu gleichem Maße (31,0 bzw. 32,8%, vgl. Tab. 5).

Im Vergleich mit den Forschungsobjekten „habituelle Reliefmerkmale“ und „oberflächennaher Untergrund“ weist der Bereich „morphodynamische Prozesse“ mit 15,9% bereits einen deutlich geringeren Anteil quantitativer Analysen auf (Tab. 4). Dies mag zunächst überraschen, da gerade auch hier in

Tab. 4: %-Anteil quantitativer Untersuchungen einer Reliefmerkmalsgruppe bzw. einer Gruppe von Variablenbeziehungen (MV) an der Gesamtheit aller quantitativen Analysen. Abs.: Absolute Anzahl quantitativer Untersuchungen einer Kategorie.

Percentage share of quantitative investigations of one group of relief characteristics, or a group of relationships among variables (MV) in the total of all the quantitative analyses. Abs: absolute number of quantitative investigations in a single category.

Abk.	Merkmale, Merkmalsgruppen, Variablenbeziehungen	abs.	%
La	Lagemerkmale, räumliche Verteilung von Formen davon:	18	7,9
LaH	Formenhäufigkeit, -verbreitung, -verteilung	10	4,4
LaO	Orientierung, Längsachsenausrichtung	5	2,2
LaS	Sonstige Lage- u. Positionsmerkmale	3	1,3
Hb	Habituelle (Relief)merkmale, davon:	61	27,0
HbVo	Formengröße, -volumen (incl. Volumenveränderung)	31	13,7
HbG	Reliefgestaltmerkmale	30	13,3
Su	Oberflächennaher Untergrund, Substrat, davon:	77	34,1
SuFe	- Granulometrie (Feinsedimente), Feinsedimentklassifikation	27	11,9
SuAb	- Abhängigkeit des Substrats von verschiedenen Steuergrößen	22	9,8
SuSc	- Schottermorphometrie	14	6,2
SuBe	- Beziehungen zwischen Substratvariablen	14	6,2
Pr	Morphodynamische Prozesse, davon:	36	15,9
PrIn	Intensität/Quantität morphodynamischer Prozesse	23	10,1
PrVo	Vorhersage morphodyn. Prozesse	7	3,1
PrH	Häufigkeit, Verbreitung morphodyn. Prozesse	4	1,8
PrS	Sonstiges	2	0,9
Sch	Schneegrenze	13	5,8
Kl	Beziehungen zwischen klimatischen Variablen	10	4,4
Al	Alter von Formen bzw. Substraten	7	3,1
KoBe	Komplexe Beziehungen verschiedenartiger Var.	3	1,3
FoEn	Formenentwicklung (Genese)	1	0,4
		<u>226</u>	

der jüngeren Vergangenheit nicht nur verstärkte Forschungsanstrengungen unternommen, sondern auch Messungen in teils größerem Umfang durchgeführt wurden (vgl. BARSCH 1982). Jedoch sind häufig gewisse Hemmnisse oder Schwierigkeiten mit quantitativ-statistischen Untersuchungen morphodynamischer Prozesse verbunden. Zum einen erfordern exakte, möglichst „flächendeckende“ Messungen einen adäquaten technisch-apparativen Aufwand; zum anderen wird häufig eine Datenbasis benötigt, die längere Zeiträume umfaßt, z. B. um weitgehend gesicherte Abtrags- und Sedimentationsraten berechnen oder entsprechende Zeitreihen und Vorhersagemodelle erstellen zu können.

Wie oben ausgeführt, behandelte die Mehrzahl der quantitativen Prozeßstudien die Bodenerosionsproblematik (vgl. Kap. 3 u. 4). Darüber hinaus befaßte man sich mit der Menge des Feststoffaustrags und der Sedimentfracht fließender Gewässer, mit

(Berg)sturzvolumen, Häufigkeiten von Rutschungen und deren Vorhersage, Horizontal- und Vertikalverschiebungen bei Blockgletschern, mit Denudations- und Akkumulationsraten im allgemeinen sowie Kausalabhängigkeiten der Intensität bzw. Quantität morphodynamischer Prozesse. Dabei wurden vorwiegend einfache Korrelations- und Regressionsverfahren angewandt; im übrigen waren auch statistische Tests in diesem Zusammenhang verhältnismäßig häufig (vgl. als Beispiele AHNERT 1970, GRIESSEIER/MAKOWSKI 1974, BARSCH/HELL 1975, NEULAND 1976, FLÜGEL 1982, LAMPE 1983).

5. Beispiele für die Anwendung multivariater Verfahren in der Geomorphologie

Die Angaben in Tabelle 2 zeigen, daß in der Geomorphologie im beobachteten Zeitraum relativ sel-

(diese „laden“ die Hauptkomponente hoch) auch untereinander enge statistische Beziehungen aufweisen und somit zu einem komplexen Faktor zusammengefaßt werden können. STINGL und HERRMANN (1976) haben die Hauptkomponentenanalyse vorwiegend zur Überprüfung der Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen angewandt. Es handelt sich hierbei um Formparameter der Strukturböden, deren Lageeigenschaften und substratbezogene Variablen (z. B. maximaler Durchmesser, Durchlässigkeit, Höhe NN u. a.). Dabei wurde festgestellt, daß alle Formeigenschaften der Steinringe bzw. -polygone sowie die Detritustiefe eine gemeinsame Hauptkomponente hoch laden und daher interkorreliert sind. Daß dieses Ergebnis keineswegs evident ist, wird von den Autoren besonders betont und begründet (a. a. O., S. 225).

Im Anschluß an die Hauptkomponentenanalyse wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, ein Verfahren, das eine Gesamtmenge von Untersuchungselementen (hier Steinringe/-polygone) mittels bestimmter Klassifikationsvariablen in Klassen/Typen/Gruppen aufteilt, so daß die Unterschiede zwischen den Gruppen maximal und innerhalb einer Gruppe minimal sind. Mit Hilfe der Clusteranalyse wurden zwei Gruppen von Strukturbodenformen gebildet: „... eine mit großen Durchmessern, Rahmentiefen, Rahmenbreiten und maximalen Kantenlängen der Rahmensteine und eine zweite, in der diese Variablen kleine Werte annehmen“ (a. a. O., S. 217). Ob die Existenz dieser beiden Typen nun vornehmlich den edaphischen Standorteigenschaften oder aber klimatischen Gegebenheiten zuzuschreiben ist, konnte mit Hilfe weiterführender Verfahren geprüft werden. So wurde u. a. mittels einer multiplen Diskriminanzanalyse festgestellt, daß die beiden vorgegebenen Strukturbodengruppen besser durch die Gesamtheit der edaphischen als durch die Lagemerkmale (Indikatoren des Klimas) getrennt werden können.

5.2 Hangneigungsuntersuchungen mittels Faktorenanalyse und multipler Regression

Gefragt wird nach den Ursachen der Hangneigungsdifferenzierung innerhalb eines kleinräumigen Reliefausschnitts, der in Fazetten („homogen“ nach Neigung und Exposition) aufgegliedert wurde (Dollendorfer Hardt im Siebengebirge, vgl. SIEGBURG 1987a). Da aufgrund der gegebenen Randbedingungen anzunehmen ist, daß die Böschungswinkelunterschiede multikausal sind, wird für jede Fazette eine größere Zahl morphometrischer, substratbezogener

und expositions-klimatischer Variablen erfaßt, die potentiell zur Hangneigung in Beziehung stehen.

Mit Hilfe einer Hauptachsenfaktorenanalyse (vgl. ÜBERLA 1968, Abschnitt 6.1) können 39 Parameter auf 9 Faktoren reduziert werden, die 85,2% der Gesamtvarianz der Ausgangsvariablen „erklären“. Aufgrund ihrer Zusammensetzung lassen sich diese Faktoren unter morphogenetischen Gesichtspunkten als Indikatoren (potentieller) reliefbildender Steuergrößen interpretieren: Beispielsweise besitzt Faktor 1 folgende Ladungen größer als 0,8 (die Ladungen entsprechen den Korrelationen der Ausgangsvariablen mit dem jeweiligen Faktor):

- Jahresstrahlungssumme (in 1000 cal/cm²)
- Abweichung von der Südexposition (in Neugrad)
- Expositionsspezifische Resistenz gegen lateralerosive Abtragung unter periglazialen Bedingungen (Rangziffer)
- Jahresmittel der Bodentemperatur (°C)

So wird deutlich, daß dieser Faktor z. B. bestimmte Elemente des Expositions-klimas beinhaltet.

Ein großer Vorteil besteht darin, daß die Faktoren bei orthogonaler Rotation (vgl. BAHRENBERG/GIESE 1975) untereinander nicht korreliert sind. Aufgrund dessen können sie problemlos als *unabhängige* Variablen in eine *schrittweise multiple Regression* eingebracht werden; durch diese wird ermittelt, in welchem Maße jeder einzelne Faktor zur Differenzierung der Hangneigung im Untersuchungsgebiet beiträgt. Insgesamt konnten rund 80% der kleinräumigen Neigungsvarianz erklärt werden, wobei auf folgende 6 Faktoren allein ein Anteil von 76,2% entfiel:

Faktor	Erklärte Hangneigungsvarianz (in %)
F 1	6,9
F 3, F 8	32,3
	14,7
	47,0
F 4	6,7
F 5	6,9

	gungswiderstand des Anstehenden)	
F 6	Hydrographie 2 (indiziert durch Vorfluterlängsgefälle u. a.)	8,7

Die aufgeführten Prozentanteile zeigen, daß die zeitliche Differenzierung der großräumig wirkenden Reliefaktoren (Makroklima und -tektonik im Pleistozän), deren Effekte in der betreffenden Studie leider nicht getrennt werden konnten, fast für die Hälfte der kleinräumigen Hangneigungsvarianz des Untersuchungsgebiets verantwortlich ist. Von den lokalen Faktoren waren die örtlichen Unterschiede des Vorfluterlängsgefälles, d. h. die hierdurch hervorgerufene Varianz der fluvialen Erosionsenergie, der wirksamste Faktor der Hangentwicklung. Interessant war im übrigen auch, daß die doch beträchtlichen petrographischen Unterschiede (Basalt, Tonschiefer, Trachyttuff, tertiäre Tone u. a.) sich nur in relativ beschränktem Maße (siehe F 5) auf die Hangformung ausgewirkt haben. Die hier vorliegenden Ergebnisse sind morphogenetisch aufschlußreich und hätten allein mit Hilfe herkömmlicher geomorphologischer Arbeitsweisen nicht erzielt werden können.

5.3 Untersuchungen zur Talgenese mit Hilfe partieller Korrelationsanalysen

Bei Untersuchungen zur Talasymmetrie im Raum Bonn (vgl. SIEGBURG 1987b) wurde die Frage aufgeworfen, ob die expositionsabhängigen Unterschiede der Insolation, d. h. die differierenden Strahlungswerte gegenüberliegender Talhänge, eine Entstehung klimabedingter Asymmetrien bewirkt oder zumindest begünstigt haben (vgl. POSER u. MÜLLER 1951, KARRASCH 1970).

Zur Lösung dieser Problemstellung wurden u. a. die Asymmetriegrade (nach KARRASCH 1970) von 54 repräsentativen Talquerprofilen mit den Jahres- bzw. Frühjahrsmittelwerten der Bodentemperatur des jeweiligen Steilhanges (nach KERNER 1891, zitiert nach KARRASCH 1970) korreliert. Die einfache Produktmoment-Korrelation ergab mit $r = 0,31$ jeweils einen schwach positiven Zusammenhang, allerdings mit hoher Signifikanz ($p = 0,01$). Dies führte zu der Schlußfolgerung, daß in 99% aller Fälle von einer Beziehung zwischen den Variablen „Bodentemperatur“ und „Asymmetriestärke“ auszugehen ist.

Obdieser Zusammenhang kausal interpretiert werden kann, war jedoch zunächst nicht sicher, da nach-

weislich und offensichtlich noch andere Variablen den Asymmetriegrad beeinflussen (wie z. B. Tal-längsgefälle, Ursprungsentfernung u. a.), die aufgrund ihrer räumlichen Differenzierung rein formal, d. h. zufällig, ebenfalls mit den Bodentemperaturen der Steilhangauslage korrelieren. Somit bestand die Möglichkeit, die statistische Beziehung zwischen Exposition und Asymmetriestärke nur als Scheinkorrelation aufzufassen.

Einen Ausweg aus dieser Unsicherheit bot die partielle Korrelationsanalyse. Sie erlaubt es, die Korrelation zweier Variablen von den Einflüssen weiterer Steuergrößen zu bereinigen, indem diese sozusagen „konstantgehalten“, d. h. deren Effekte rechnerisch eliminiert werden. Auf diese Weise wurde die Beziehung zwischen dem Asymmetriegrad und dem Bodentemperaturmittel des Steilhanges von den Wirkungen folgender 4 Variablen bereinigt:

- Tal-längsgefälle (%)
- Ursprungsentfernung (m)
- Taltiefe (m)
- Morphologische Härte des Gesteinsuntergrundes (Rangziffer)

Nach Ausschaltung der betreffenden Effekte ergab sich ein partieller Korrelationskoeffizient, der mit $r = 0,39$ eine hohe Signifikanz ($p = 0,003$) aufwies. Somit konnte ein nicht formaler Zusammenhang wahrscheinlich gemacht werden. Das positive Vorzeichen des Koeffizienten zeigt an, daß sich mit zunehmender Bodentemperatur des Steilhanges die Talasymmetrie in der Tendenz ebenfalls verstärkt. Aus diesem Befund wiederum läßt sich leicht ein Insolationseinfluß bei der Entstehung asymmetrischer Täler ableiten.

6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Zur Untersuchung der Rezeption quantitativ-statistischer Verfahren bei geomorphologischen Studien deutschsprachiger Wissenschaftler wurde eine Stichprobe von 1062 Veröffentlichungen der Jahre 1970–1987 durchgesehen und ausgewertet. Als wesentliche Ergebnisse und Folgerungen können festgehalten werden:

1. In 10,04% der geomorphologischen Untersuchungen wurden quantitativ-statistische Verfahren angewandt. Dies bedeutet gegenüber früheren Jahren sicherlich eine Steigerung. Jedoch dürften solche Methoden in manchen Ländern nicht-deutscher Sprachtradition bzw. auch in anderen Teildisziplinen und in den Nachbarwissenschaften der Geographie wesentlich häufiger sein.

2. In 60,6% aller statistischen Analysen wurden einfache uni- und bivariable Verfahren benutzt, wesentlich seltener (0,6–7,6%) waren demgegenüber multivariate Methoden, obwohl auch geomorphologische Prozesse und Formen meist multikausal zu begründen und in komplexe Systemzusammenhänge einzuordnen sind. An drei Beispielen aus den Bereichen „Periglazialmorphologie“ und „Hangforschung“ wurde deutlich, daß die Anwendung solcher Verfahren zu Forschungsergebnissen führen kann, die bei ausschließlichem Einsatz traditioneller Methoden kaum zu erzielen bzw. nicht operationalisierbar sind. Die relativ geringe Rezeption multipler Statistikprozeduren mag z. T. auf den gegenwärtigen Forschungsstand zurückgeführt werden, zum anderen jedoch auch auf die Tatsache, daß multivariate Analysen bei einer breiten Datenbasis mit entsprechender Variablenanzahl praktisch nur mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen möglich sind. Andererseits liegen jedoch benutzerfreundliche und anwenderorientierte Programmpakete (z. B. SPSS, SAS) vor, die eine komplexe Datenanalyse wesentlich erleichtern.
3. Der Anteil quantitativ-statistischer Untersuchungen variiert beträchtlich in den verschiedenen geomorphologischen Form- und Prozeßbereichen. Dies hängt im allgemeinen nicht mit einer spezifischen Verwendbarkeit, sondern mit der unterschiedlichen Rezeption solcher Verfahren zusammen, die häufig auch dem methodischen Stand im jeweiligen Forschungsbereich entspricht.
4. Quantitative Verfahren kamen auch in bezug auf die einzelnen Reliefmerkmale bzw. -merkmalgruppen in unterschiedlichem Maße zum Einsatz. Die betreffenden Prozentanteile schwanken zwischen 0,5 und 34,1% (Tab. 4). Diese Varianz kann teilweise auf fördernde methodische Traditionen bzw. leichte Quantifizierbarkeit der Variablen einerseits sowie hohen technisch-apparativen und zeitlichen Aufwand bei der Datengewinnung andererseits zurückgeführt werden.

Literatur

- AHNERT, F.: Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large mid-latitude drainage basins. In: *American J. of Science* 268, 1970, 243–263.
- : Über die Beziehungen zwischen quantitativen, semi-quantitativen und qualitativen Methoden in der Geomorphologie. In: *Z. Geomorph. Suppl.-Bd.* 39, 1981, 1–28.
- : Untersuchungen über das Morphoklima und die Morphologie des Inselberggebietes von Machakos, Kenia. In: AHNERT, F. et al. (Hrsg.): *Beiträge zur Geomorphologie der Tropen. Catena Suppl.-Bd.* 2, 1982, 1–72.
- BAHRENBURG, G. u. GIESE, E.: *Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie.* Stuttgart 1975.
- BARSCHE, D.: Experimente und Messungen in der Geomorphologie. In: *Z. Geomorph. Suppl.-Bd.* 43, 1982, 1–4.
- BARSCHE, D. u. HELL, G.: Photogrammetrische Bewegungsmessungen am Blockgletscher Murtel i. Oberengadin, Schweizer Alpen. In: *Z. f. Gletscherkde. und Glazialgeol.* 11, 1975, 111–142.
- BESLER, H.: Wasserüberformte Dünen als Glied in der Landschaftsentstehung der Namib. In: *Geographica* 1, 1976, 83–106.
- : The north-eastern Rub' al Khali within the borders of the United Arab Emirates. In: *Z. Geomorph.* 26, 1982, 495–504
- BRÜCKLE, E.: Zusammenhänge zwischen topographischen, elastischen und plastischen Größen von Gletschern. In: *Z. f. Gletscherkde. u. Glazialgeol.* 8, 1972, 107–112.
- BRÜCKNER, C.: Untersuchungen zur Bodenerosion auf der Kanarischen Insel Hierro. *Bonner Geogr. Arb.* 73, 1987.
- BURGER, D.: Reliefformung und Hangentwicklung im Gebiet zwischen Sayn und Wied. *Kölner Geogr. Arb.* 42, 1982.
- DAMMSCHNEIDER, H.-J.: Morphodynamik, Materialbilanz und Tidewassermengen der Unterelbe. *Berliner Geogr. Stud.* 12, 1983.
- FLÜGEL, W.-A.: Untersuchungen zum mineralischen Feststoffaustrag eines Lößeinzugsgebietes am Beispiel der Elsenz, Kleiner Odenwald. In: *Z. Geomorph. Suppl.-Bd.* 43, 1982, 103–120.
- FRANKENBERG, P. u. FRANKE, B.: Zur Landschaftsentwicklung des südlichen Rheinhessischen Tafel- und Hügellandes bei Gundersheim. In: *Ber. z. dt. Landesk.* 57, 1983, 117–142.
- GRIESESEIER, H. u. MAKOWSKI, J.: Radiometrische Messung der Sinkstoffkonzentration in natürlichen und künstlichen Wasserläufen bzw. Wasserbehältern. In: *Z. Geomorph.* 18, 1974, 190–211.
- GROSS, G.: Die Schneegrenze und die Altschneelinie in

- den österreichischen Alpen. *Innsbrucker Geogr. Stud.* 8, 1983.
- GÜNTHER, R. u. WIDLEWSKI, D.: Die Korrelation verschiedener Klimatelemente mit dem Massenhaushalt Alpiner und Skandinavischer Gletscher. In: *Z. f. Gletscherkde. u. Glazialgeol.* 22, 1986, 125-147.
- HÄDRICH, F.: Zur Methodik der Lößdifferenzierung auf der Grundlage der Carbonatverteilung. In: *Eiszeitalter u. Gegenwart* 26, 1975, 95-117.
- HORMANN, K.: Morphometrie der Erdoberfläche. *Schr. d. Geogr. Inst. d. Univ. Kiel*, 36, 1971.
- HURNI, H.: Semien-Äthiopien: Methoden zur Erfassung der Bodenerosion. In: *Geomethodica* 4, 1979, 151-182.
- KARL, J. et al.: Oberflächenabfluß und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen. In: *DVWK Schriften* 71, 1985, 37-102.
- KARRASCH, H.: Das Phänomen der klimabedingten Reliefasymmetrie in Mitteleuropa. *Göttinger Geogr. Abh.* 56, 1970.
- KELCH, G. et al.: Über den Bodenabtrag im Kampenwandgebiet - Versuch einer quantitativen Erfassung der Zusammenhänge zwischen Bodenabtrag und den Faktoren Höhenlage, Exposition, Hangneigung, Muttergestein und Bodennutzung. In: *Z. Geomorph., Suppl. Bd.* 28, 1977, 134-147.
- KLAMMER, G.: Beobachtungen an Hängen im tropischen Regenwald des unteren Amazonas. In: *Z. Geomorph.* 19, 1975, 273-286.
- : Die Paläowüste des Pantanal von Mato Grosso und die pleistozäne Klimageschichte der brasilianischen Randtropen. In: *Z. Geomorph.* 26, 1982, 393-416.
- KLOSTERMANN, H.: Zur geomorphologischen Kennzeichnung kleiner Einzugsgebiete. In: *Petermanns Geogr. Mitt.* 114 (4), 1970, 241-260.
- LAMPE, R.: Zur Abschätzung rezenter Sedimentationsraten in Flachseen, dargestellt am Beispiel des Schmachter Sees/Rügen. In: *KLIEWE, H. et al. (Hrsg.): Das Jungquartär und seine Nutzung.* Gotha, 1983, 66-71.
- MAISCH, M. u. HÄBERLI, W.: Interpretation geometrischer Parameter von Spätglazialgletschern im Gebiet Mittelbünden, Schweizer Alpen. In: *Phys. Geogr.* 1, 1982, 111-126.
- MEYER, H.-H.: Untersuchungen zur Landschaftsentwicklung des Stauchendmoränenzuges Kellenberg - Hoher Sühn. *Jahrbuch Geogr. Ges. Hannover* 1983.
- MOLLENHAUER, K. et al.: Oberflächenabfluß und Stoffabtrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen - Untersuchungsergebnisse aus dem Einzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre. In: *DVWK Schriften* 71, 1985, 103-184.
- NEULAND, H.: A prediction model of landslips. In: *Catena* 3, 215-230.
- NIEDERBUDE, E.-A.: Die regionale Unterscheidung von Lössen des Jungwürms durch Körnung und Tonmineralegenschaften unter Anwendung multivariater Methoden. In: *Eiszeitalter u. Gegenwart* 27, 1976, 121-133.
- POSER, H. u. MÜLLER, T.: Studien an den asymmetrischen Tälern des Niederbayrischen Hügellandes. *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, math.-phys. Kl. IIB*, 1, 1951.
- SCHMITTNER, K.-E.: Starkregensimulation - Schwebeaustrag/Abtrag (SE-Spanien). In: *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie* 5, 1979, 41-43.
- SCHWERTMANN, U. et al.: Erfahrungen mit Methoden zur Abschätzung des Bodenabtrags durch Wasser. In: *Geomethodica* 8, 1983, 87-116.
- SIEBERTZ, H.: Die Bedeutung des Feinheitsgrades als geomorphologische Auswertungsmethode. In: *Eiszeitalter u. Gegenwart* 32, 1982, 81-91.
- SIEGBURG, W.: Großmaßstäbige Hangneigungs- und Hangformanalyse mittels statistischer Verfahren. *Bonner Geogr. Abh.* 75, 1987a.
- : Talasymmetrie in der Umgebung von Bonn. In: *Decheniana* 140, 1987b, 204-217.
- SOHLBACH, K.: Computergestützte geomorphologische Analyse von Talformen. *Göttinger Geogr. Abh.* 71, 1978.
- STINGL, H. u. HERRMANN, R.: Untersuchungen zum Strukturbodenproblem auf Island, Geländebeobachtungen und statistische Auswertung. In: *Z. Geomorph.* 20, 1976, 205-226.
- ÜBERLA, K.: *Faktorenanalyse.* Berlin, 1968.
- VILLINGER, H.: Statistische Auswertung von Hangneigungsmessungen im Tibesti-Gebirge. In: *Berliner Geogr. Abh.* 5, 1967, 51-66.
- VOSSMERBÄUMER, H.: Granulometrie quartärer äolischer Sande in Mitteleuropa - ein Überblick. In: *Z. Geomorph.* 20, 1976, 78-96.
- WALDEMAR, A.: Granulometrische und pollenanalytische Untersuchungen an Siltablagerungen in einem Aufschluß in Ellikon a. Rh./ZH. In: *Phys. Geogr.* 1, 1982, 237-242.