

BODENEROSIONSUNTERSUCHUNGEN AUF TESTPARZELLEN IM KALKHOCHGEBIRGE

Richard FELIX, München und Bernhard JOHANNES, Ramsau*

mit 5 Abb. und 1 Tab. im Text

INHALT

1.	Einleitung	76
2.	Die Gesamtbilanzen von Abfluß und Abtrag	78
3.	Die Abtragsmodelle	80
	3.1 Die Grundlagen der Modellierung	80
	3.2 Die Abtragsbereitschaft	81
	3.3 Die Interpretation der Abtragsmodelle	82
4.	Die Herkunft des Abtrags	87
5.	Zusammenfassung	90
6.	Summary	91
7.	Literaturverzeichnis	92

1. Einleitung

Zur Quantifizierung der Bodenerosion auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen der Flach- und Hügelländer liegen zahlreiche Untersuchungen vor (z.B. WISCHMEIER & SMITH 1965, AUERSWALD & SCHMIDT 1986). Demgegenüber sind Art und Ausmaß der Prozesse der Bodenerosion im Hochgebirge weitgehend unbekannt. Da die Umgestaltung der Landschaft durch den Menschen gerade im Hochgebirge deutlich zugenommen hat und der Gesamtabtrag auf steilen Flächen besonders hohe Beträge annehmen kann, sind Untersuchungen über den Einfluß menschl-

* Dr. Richard Felix, Thorwaldsenstraße 23, D-80335 München und Dipl.-Geogr. Bernhard Johannes, Am Forstamt 6, D-83486 Ramsau

cher Aktivitäten (Land- und Forstwirtschaft, Tourismus) auf die Prozesse der Bodenerosion von besonderer Bedeutung. Zur Quantifizierung dieser Abtragsprozesse wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) 1988 das Verbundprojekt "Bodenforschung im deutschen Alpenraum" beschlossen. In diesem Artikel werden die wichtigsten Ergebnisse des Teilprojektes Berchtesgaden (Arbeitsgruppe Prof. Dr. G. SOMMERHOFF, Geographisches Institut der Technischen Universität München) aus dem Abschlußbericht dieses Teilprojektes (FELIX & JOHANNES 1993) in den Meßjahren 1990 und 1991 zusammengefaßt. Die Messungen werden laufend fortgeführt.

Das Untersuchungsgebiet liegt innerhalb des Testgebietes *Jenner* (MaB-6-Projekt Berchtesgaden; ZWECKL & SPANAU 1986) an der Grenze zwischen dem Nationalpark Berchtesgaden und seinem Vorfeld. Das gesamte Gebiet gehört zur kalkalpinen Zone. Hauptgebirgsbildner sind wasserdurchlässige Gesteine der alpinen Trias (Dachsteinkalk, Karnisch-norischer Dolomit, Ramsaudolomit). Diese Ausgangsgesteine werden teilweise von mehr oder weniger mächtigen quartären Deckschichten (Moränen, Soliflukationsdecken, Hangschutt) überlagert. Alle Testparzellen liegen auf zwei verschiedenen vorwiegend almwirtschaftlich genutzten Verflachungszonen im Bereich der montanen (1.000 bis 1.300 m ü.NN) und der subalpinen Zone (1.500 bis 1.700 m ü.NN). Die übrigen Gebietsteile können gegenüber Abspülungsprozessen als erosionsstabil gelten (geschlossene Bewaldung der Steilstufen, gering mächtige Bodenbildung und Verkarstung in der alpinen Stufe).

Die Untersuchungen finden in der topologischen Dimension (Messung der Bodenerosion und ihrer Einflußparameter auf unterschiedlich genutzten Testparzellen) statt. Sie beschränken sich auf sommerliche Abspülungsprozesse (Bodenerosion durch flüssigen Niederschlag).

Die Auswahl der Testparzellen (vgl. Kapitel 2) muß alle zeitinvarianten Parameter berücksichtigen, die auf das Abtragungsgeschehen Einfluß nehmen können. Für Abspülungsprozesse sind dabei die Einflußfaktoren Mikrorelief, Vegetation und Nutzung von besonderer Bedeutung. Das Ziel der Untersuchungen besteht in einem Vergleich der einzelnen Testparzellen nach folgenden Gesichtspunkten:

1. Quantifizierung der Gesamtmengen von Oberflächenabfluß und Bodenabtrag (vgl. Kapitel 2).
2. Aufdeckung quantitativer Zusammenhänge zwischen Niederschlag, Oberflächenabfluß und Bodenabtrag (vgl. Kapitel 3).
3. Qualitative Beschreibung des Bodenabtrags im Vergleich zu den Böden auf den Testparzellen (vgl. Kapitel 4).

2. Die Gesamtbilanzen von Abfluß und Abtrag

Die gesamten Oberflächenabfluß- und Abtragsmengen von den ausgewählten acht Testparzellen im schneefreien Zeitraum beider Meßjahre sind in Abbildung 1 zusammengefaßt. Das Diagramm zeigt, daß die Testparzellen nach ihrer Erosionsstabilität in vier Gruppen eingeteilt werden können.

Die Parzelle *Wald* (1.118 m ü.NN, 577 m²) stellt ein natürlich abgegrenztes vollständig bewaldetes Einzugsgebiet mit forstlicher Nutzung dar. In dem nach WNW gerichteten Kerbtal ist auch bei Starkregen kaum Oberflächenabfluß feststellbar. Bei einem Interzeptionsverlust von ca. 30 % liegt die Infiltrationskapazität der gut durchlässigen Braunerden auch bei extremen Niederschlagsereignissen über der Intensität der Bestandsniederschläge.

Die zweite Gruppe umfaßt die vier kleinen almwirtschaftlich genutzten Parzellen *Königsbach* (1.207 m ü.NN), *Königstal* (1.589 m ü.NN), *Grat* (1.641 m ü.NN) und *Jenner-Süd* (1.554 m ü.NN). Bis auf die Parzelle *Grat* (301 m²; kleines Muldentälchen) handelt es sich um künstlich abgegrenzte Glatthänge mit knapp 200 m² Größe. Auf allen vier Testparzellen sind keine Schädigungen der Vegetationsdecke etwa durch Viehtritt oder Narbenversatz festzustellen. Böden (Rendzinen, flachgründige Braunerden), Deckschichten (Hangschutt, Jungmoränen)

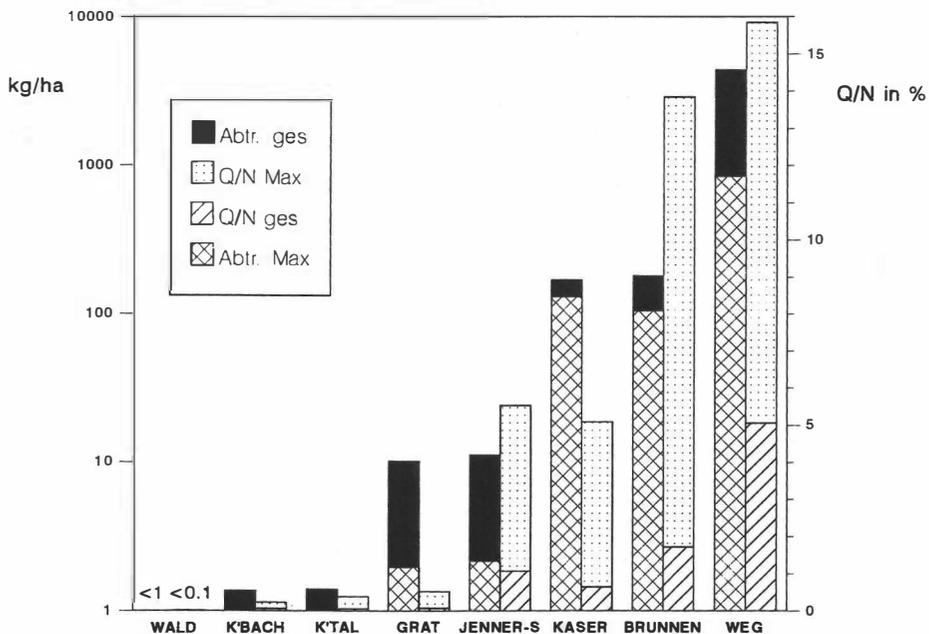


Abb. 1: Abfluß und Abtrag von den Testparzellen 1990 und 1991

und Ausgangsgesteine (Dolomitzersatz) sind dabei in aller Regel in hohem Maße wasserdurchlässig. Die kleinen Abtragswerte ($< 10 \text{ kg/ha}$) zeigen, daß almwirtschaftlich genutzte Hochgebirgsflächen als erosionsstabil gelten können, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind: Glatthänge ohne ausgeprägtes Mikrolief, wasserdurchlässiger Untergrund und Fehlen von Schädigungen der Vegetationsdecke. Dies gilt auch für sehr steile Standorte (*Königstal*: 33° !). Die erhöhten Abflußverhältnisse für *Jenner-Süd* sind auf den Einfluß von Hangzugwasser im Unterhang zurückzuführen.

Die dritte Gruppe umfaßt die natürlich abgegrenzten großen Testparzellen *Kaser* (1.619 m ü.NN; 2.977 m^2) und *Brunnen* (1.562 m ü.NN; 18.062 m^2). Beide Parzellen bestehen aus ausgeprägten, hierarchisch aufgebauten Grabensystemen, die größtenteils extensiv almwirtschaftlich genutzt werden. Während die Grabenhänge, Rücken und Grate meist dicht bewachsen sind, treten innerhalb der bis zu 5 m tief eingeschnittenen Gräben teilweise vegetationsfreie Flächen auf. Die deutlich höheren Abtragswerte (ca. 200 kg/ha) lassen sich darauf zurückführen, daß in diesen Gräben loses Material vorhanden ist, das bei Starkregenereignissen abgetragen werden kann. Im Falle der Parzelle *Kaser* ist dies der kleinsplittrige Dolomitzersatz der C_v -Horizonte, im Falle der Parzelle *Brunnen* feinkörniges, kolluviales Material, welches den A_h -Horizonten der Böden auf der Parzelle entspricht. Der hohe Anteil des Maximalabtrags am Gesamtabtrag zeigt, daß die Abspülungsprozesse bevorzugt an extreme Niederschlagsereignisse gebunden sind.

Kaser und *Brunnen* unterscheiden sich dagegen im Abflußverhalten: Während bei *Kaser* ein Teil des Abflusses in den von Gräben angeschnittenen Dolomitklüften versinken kann, dichten die Kolluvien bei *Brunnen* besser gegen den Untergrund hin ab. Dennoch sind die mittleren Abflußverhältnisse auch bei diesen Parzellen mit knapp 1% (*Kaser*) bzw. knapp 2% (*Brunnen*) noch sehr gering. In Extremfällen dagegen erreichen sie bei *Brunnen* immerhin ca. 14%. Eine große Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß die Bodenvegetation auf dem Unterhang der Parzelle *Brunnen* (6% der Gesamtfläche) durch weit verbreitete Trittschäden (Übernutzung) teilweise zerstört ist.

Die deutlich höchsten Werte für Abfluß und Abtrag ergeben sich für die Parzelle *Weg* (1.179 m ü.NN; 988 m^2). Obwohl die Parzelle keineswegs übermäßig steil ist (mittlere Hangneigung: 23°), liegt der Gesamtabtrag auf *Weg* (knapp 4.400 kg/ha in beiden Meßjahren) im Vergleich zu den intakten Weideparzellen um den Faktor 1.000 bis 10.000 höher. Diese hohen Werte lassen sich auf die drastischen Bodenverletzungen durch den Sommertourismus zurückführen. Etwa $1/3$ der Gesamtfläche der Parzelle ist dabei durch den serpentinartigen Wanderweg (13%), durch in Falllinie angelegte Wegabkürzer (11%), durch Weganrisse (1%) und durch künstliche Grabensysteme (9%) massiv anthropogen beeinflusst. Dieser hohe Anteil von vegetationsfreien Flächen führt zu deutlich höheren Abflußverhältnissen (Q/N im Mittel ca. 5%) und damit zu sehr hohen Abtragswerten.

Im Vergleich zu den durch künstliche Starkregensimulationen ermittelten hohen Werten ($Q/N > 15\%$) für den Oberflächenabfluß auf verschiedenen Weideparzellen im Gebirge (BUNZA & SCHAUER 1989) liegen die Abflußverhältnisse für alle Parzellen mit 0 bis 5% deutlich niedriger. Dies geht zum einen auf die hohe Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes auf den Parzellen zurück. Zum anderen werden die künstlich erzeugten extremen Niederschlagsintensitäten (80 bis 100 mm/h) wenigstens in den beiden Meßjahren auch nicht annähernd erreicht (max. Punktniederschlagsintensität: 45,9 mm/h).

Für den Abtrag geben AUERSWALD & SCHMIDT (1986) als "tolerierbare Bodenabträge landwirtschaftlicher Flächen" einen Wert von 1.000 kg/ha/Jahr für flachgründige Böden an. Wenngleich ein Vergleich problematisch ist – der Wert bezieht sich auf Ackerflächen im Hügelland – so kann man sagen, daß dieser Wert auf den Parzellen mit deutlichen Vegetationsschäden überschritten wird. Dies gilt für die Parzelle *Weg* und auch für die sehr große Parzelle *Brunnen*, wenn eine Flächengewichtung der Abtragsrate auf die geschädigten Parzellenbereiche beschränkt wird. Insgesamt zeigt die Abbildung 1 den hohen Einfluß des Mikroreliefs (Glatthänge/lineare Grabensysteme) und der nutzungsbedingten Vegetationsschäden auf den Gesamtabfluß und den Gesamtabtrag.

3. Die Abtragsmodelle

Durch die Erstellung der Abtragsmodelle sollen die Beziehungen zwischen Niederschlag, Bodenfeuchte, Abfluß und Abtrag auf den einzelnen Testparzellen geklärt und objektiv miteinander verglichen werden. Auf der Basis dieser Abtragsmodelle können dann die Wirkungen der zeitinvarianten Eigenschaften der Parzellen (S in Abb. 2) auf die Bodenerosion interpretiert werden.

3.1 Die Grundlagen der Modellierung

Die grundlegende Modellhypothese ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Modellierung selbst erfolgt über eine schrittweise multiple Regressionsanalyse. Dabei müssen alle statistischen Voraussetzungen für die Gültigkeit des gewählten Verfahrens sorgfältig überprüft werden.

Der Niederschlag ist die einzige Eingangsgröße (unabhängige Variable) innerhalb des Gesamtmodells. Aufgrund seiner hohen räumlichen Varianz gerade im Hochgebirge muß er an jeder Parzelle gesondert gemessen werden. Für die Modellierung von Oberflächenabfluß und Bodenerosion muß dabei die gesamte Niederschlagsstruktur, insbesondere die Intensitätsverteilung, in hoher zeitlicher Auflösung verfügbar sein (intensitätsäquidistante Auswertung etwa nach GIESECKE & MEYER 1986). Die Kenntnis der gesamten Intensitätsverteilung ist besonders für die Erstellung der Abflußmodelle $Q = f(N, BF)$ wichtig (FELIX & JOHANNES 1993).

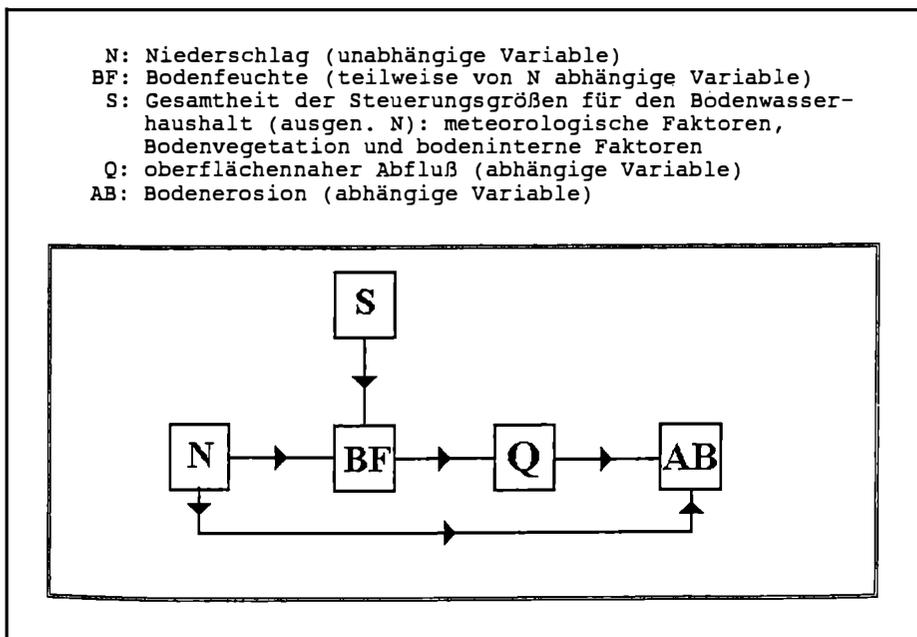


Abb. 2: Modellhypothese zur Quantifizierung der Bodenerosion

Der Bodenfeuchtezustand am Beginn eines Abtragsereignisses wird an jeder Parzelle mit Tensiometern gemessen. Diese Messungen sind in den skelettreichen Böden der Parzellen problematisch. Die Böden auf den Parzellen sind fast immer wassergesättigt, pF-Werte von 2,5 werden nur nach seltenen längeren Trockenperioden überschritten. Aufgrund der geringen Zeitvarianz ist es sinnvoll, den Bodenfeuchtezustand in den Modellen über die Niederschlagsvariablen NF und NFN (vgl. Tab. 1) zu berücksichtigen.

Die abhängigen Variablen Parzellenabfluß und -abtrag werden möglichst nach jedem abflußwirksamen Ereignis (vgl. Kapitel 3.2) zu vergleichbaren Zeitpunkten summarisch gemessen. Damit ergeben sich für die einzelnen Modellparameter (N, BF, Q, AB) in den beiden Meßjahren für alle acht Parzellen insgesamt 544 Meßperioden.

3.2 Die Abtragsbereitschaft

Für alle Parzellen gilt, daß Niederschlagsereignisse, die weder eine Ergiebigkeit von 10 mm noch eine Maximalintensität IMAX15 von 1,5 mm/15 min ("potentiell abflußwirksame Ereignisse" PNEZ) überschreiten, auch zu keinen nennenswerten Abfluß- und Abtragsbeträgen führen. Nur in 6% aller Meßperioden erfolgt ohne PNEZ meßbarer Abfluß, nur in 1,5% meßbarer Abtrag. In allen diesen Fällen ist Q und AB minimal.

Mit Ausnahme der Parzellen *Brunnen* und *Kaser* ist die Definition für PNEZ sehr trennscharf: Nur in 10% aller Meßperioden wird trotz PNEZ kein Abfluß gemessen. In allen diesen Fällen liegen die PNEZ-Werte knapp über den Definitionskriterien.

Die großen Testparzellen mit ausgeprägten Entwässerungssystemen (*Brunnen* und *Kaser*) weisen deutlich verringerte Abfluß- und Abtragsbereitschaft auf. Auf der Parzelle *Brunnen* führen nur N-Ereignisse, bei denen beide Definitionskriterien für PNEZ erfüllt sind, zu meßbarem Abfluß und Abtrag. Auf der Parzelle *Kaser* sind nur wenige N-Ereignisse mit langdauernd hohen Spitzenintensitäten ($\text{IMAX60} > 10 \text{ mm/60 min}$) abtragswirksam (vgl. Kapitel 3.3).

3.3 Die Interpretation der Abtragsmodelle

Während sich für alle acht Testparzellen trotz teilweise sehr geringer Abflußmengen signifikante Abflußmodelle $Q = f(N, BF)$ ergeben, gilt dies im Hinblick auf die Abtragsmodelle nur für die fünf Meßparzellen mit den größten Abtragswerten (vgl. Abb. 1). Bei den sehr geringen Abtragswerten der erosionsstabilen Parzellen *Wald*, *Königsbach* und *Königstal* handelt es sich also um zufällige Einspülungen in die Auffangtonnen, deren Quantität zum Teil auf die vorangegangene Tätigkeit von Bodenwühlern zurückzuführen ist. Die Abtragsmodelle der einzelnen Parzellen zeigen, daß der Abspülungsprozeß auf diesen Testflächen aufgrund ihrer zeitinvarianten Eigenschaften unterschiedlich interpretiert werden muß. Dies ergibt sich aus einem Vergleich der Art und der Signifikanzen (erklärte Varianzanteile) der in das Modell aufgenommenen abhängigen Variablen (vgl. Tab. 1). Aufgrund der kurzen Meßreihen sind die zeitlichen Trends mit ihren wechselnden Vorzeichen nicht interpretierbar.

Trotz der relativ geringen Abtragsmengen ergeben sich für die Parzellen *Grat* und *Jenner-Süd* mit erklärten Varianzanteilen von knapp 80% hochsignifikante Abtragsmodelle. Der Abtrag von der Parzelle *Grat* hängt dabei in erster Linie vom Gesamtabfluß Q ab, der seinerseits im Abflußmodell signifikant von der gesamten Niederschlagsmenge N abhängig ist. Während die Bodenerosion somit bei *Grat* über die verschiedenen N/Q -Ereignisse als ein eher kontinuierlich ablaufender Vorgang angesehen werden kann, ergeben sich bei *Jenner-Süd* nur nach langdauernden hohen Spitzenintensitäten des Niederschlags (IMAX60) hohe Abtragswerte. Dies läßt sich auf den besonders dichten Vegetationsschluß innerhalb der Parzelle *Jenner-Süd* zurückführen. Hier können nur sehr intensive Niederschläge die Bodenaggregate zerstören und transportfähige Teilchen schaffen, die dann durch besonders hohe Abflußspitzen (vgl. auch Abb. 1!) abgeschwemmt werden können. Besonders auffallend ist der gegenläufige Einfluß der Bodenfeuchte in den beiden Abtragsmodellen. In Übereinstimmung mit *Kaser* und *Weg* nimmt die Erosionsstabilität bei *Jenner-Süd* mit abnehmenden Bodenwassergehalt zu (NF: -). Diese Korrelation läßt sich aus dem Zusammenwirken der Auffüllung des

Parzelle	Modellvariable	FZ	VZ	V (%)
<i>Grat</i>	Q	44	+	44,7
	NFN		-	62,4
	Z90		-	77,2
	NF		+	79,3
<i>Jenner-Süd</i>	IMAX60	20	+	63,3
	NF	(nur 1991)	-	79,8
<i>Kaser</i>	IMAX60	15	+	76,6
	NF		-	87,7
<i>Brunnen</i>	Q	28	+	64,0
	Z9091		+	72,8
	Z90		-	77,0
<i>Weg</i>	Q	50	+	69,4
	IMAX15		+	81,5
	Z9091		-	84,4
	Z91		+	86,4
	NF		-	88,1
Q:	Abfluß (mm)			
IMAX15:	Spitzenintensität in mm/15 min			
IMAX60:	Spitzenintensität in mm/60 min			
NF:	Niederschlagsfreie Zeit vor dem Abtragsereignis (h)			
NFN:	Niederschlag im Zeitraum vor dem Abtragsereignis (nicht abflußwirksame N-Ereignisse; mm)			
Z90 (91):	Zeittrend innerhalb der Meßjahre 1990 bzw. 1991			
Z9091:	Zeittrend zwischen 1990 und 1991			
Alle Variablen (außer Trends) logarithmisch transformiert				

Tab. 1: Die Abtragsmodelle auf den einzelnen Testparzellen
 Abhängige Variable: Abtrag (kg/ha)
 FZ: Anzahl der abtragswirksamen Meßperioden (1990+1991)
 VZ: Vorzeichen der Koeffizienten (Regressionsgleichung)
 KV: Kumulierte Anteile der erklärten Varianzen (%)

Bodenwasserspeichers und der Abnahme der Planschwirkung des Niederschlags bei geringer Bodenfeuchte erklären (JUNG & BRECHTEL 1980). Im Falle der Parzelle *Grat* wirkt jedoch eine zunehmende Befeuchtung des Bodens (NF: +; NFN: -) dem Abtrag entgegen. Dieser Zusammenhang könnte auf die speziellen Bodenverhältnisse auf der Gratparzelle zurückgeführt werden: Hier ist bei schütterer Vegetation neben feinem Dolomitzersatz auch stark humoses, torfähnliches A_h -Mate-

rial in Form sehr kleiner Aggregate auf der Bodenoberfläche vorhanden. Eine erhöhte Vorfeuchte könnte bewirken, daß die sehr feinen mineralischen Komponenten adhäsiv an größere Aggregate gebunden werden und damit weniger abtragsgefährdet sind. In jedem Fall zeigen die Abtragsmodelle, daß der Einfluß der Bodenfeuchte auf den Abtrag je nach den speziellen Bodeneigenschaften unterschiedlich bewertet werden muß.

Auch die Abtragsmodelle der beiden großen Parzellen *Brunnen* und *Kaser*, die durch ausgeprägte Grabensysteme gekennzeichnet sind, unterscheiden sich deutlich voneinander. Im Vergleich zu allen anderen Parzellen ergibt sich für *Brunnen* ein besonders schlechter Zusammenhang mit der Gesamtheit der unabhängigen Einflußfaktoren: Nur 64% der Varianz des Abtrags werden durch den Abfluß Q erklärt, Niederschlags- und Vorfeuchteparameter spielen im Modell keine Rolle. Die Streuung der Residuen des Abtrags in der AB/Q -Korrelation ist demzufolge bei *Brunnen* besonders hoch (vgl. Abb. 3).

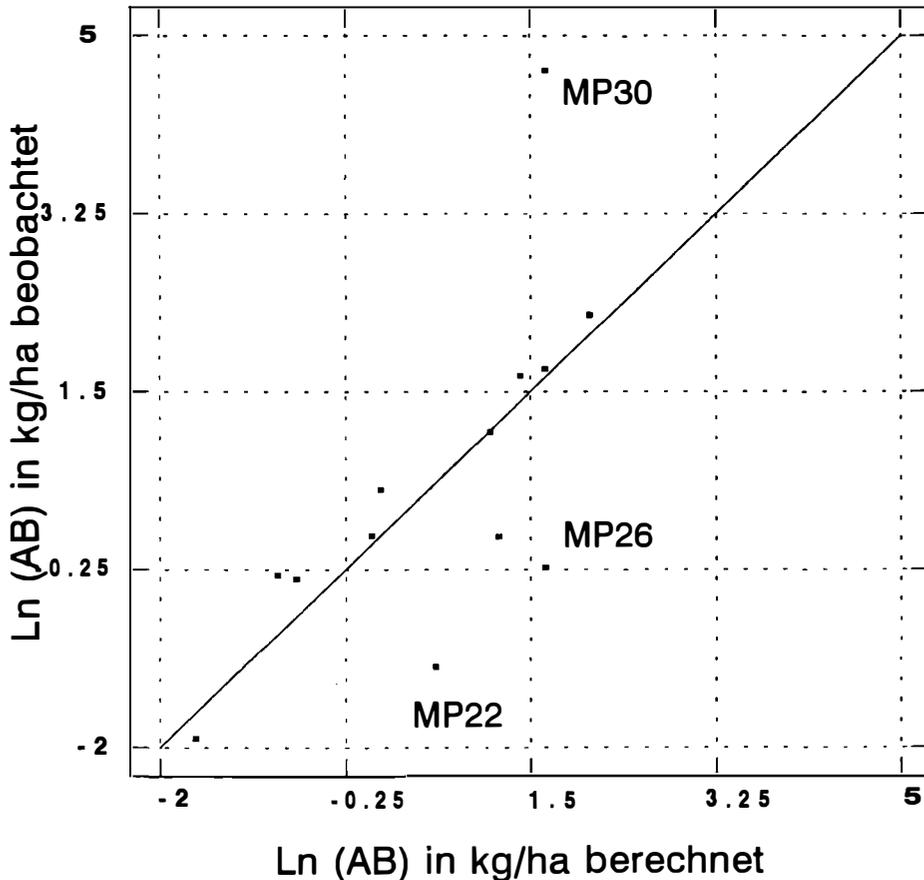


Abb. 3: Streudiagramm der Abtragsregression *Brunnen* 1991

Extreme Abweichungen ergeben sich dabei für die Meßperioden 26 und 30 (MP26 und MP30; 1991). Die geringen Meßwerte des Abtrags in MP26 gehen auf anhaltende Niederschläge mit relativ kleinen Maximalintensitäten (IMAX30 = 4,5 mm/30 min) zurück. Als Folge davon dürften die Abflußspitzen niedrig gewesen sein, so daß es zu keinem hohen Austrag kam. MP30 zeigt die Komplexität der Abfluß- und Abtragsbildung an einem besonders markanten Beispiel: Die vorausgegangenen Meßperioden MP28 (N = 202 mm; IMAX30 = 15,1 mm/30 min) und MP29 (N = 43 mm; IMAX30 = 42,1 mm/30 min) beinhalten extrem ergebnisreiche und intensive Niederschläge, die im Anschluß an MP29 zu schweren Erosionsschäden auf der benachbarten Forststraße führten. Infolge der Zerstörung der Meßeinrichtung können für den Abfluß und den Abtrag der MP29 keine sinnvollen Meßwerte angegeben werden. In MP30 induzierte ein kurzes und wenig ergebnisreiches, aber intensives Ereignis (N = 14 mm; IMAX30 = 13,7 mm/30 min) extreme Abtragsmengen. Dieser Extremwert kann darauf zurückgehen, daß durch die Extremniederschläge in MP28 und MP29 große Massen an abspülbarem Material bereitgestellt wurden. Das Beispiel der MP30 zeigt, daß in Einzelfällen auch die Bedingungen vorausgegangener Meßperioden für die Abtragsbildung entscheidend sein können. Die Meßperiode 29 zeigt, daß auf der Parzelle *Brunnen* extreme Niederschlagsereignisse nicht mehr meßbare Abtragsraten bewirken können, die im Einzelfall höher sein können als der gesamte Abtrag in einer Meßsaison. Da als Abtragsherde hauptsächlich die stark durch Viehtritt geschädigten Flächen im unteren Parzellenbereich in Frage kommen, werden durch MP29 die negativen Folgen der Übernutzung von Weideflächen dokumentiert.

Auf der Parzelle *Kaser* sind nur langandauernde intensive Niederschläge besonders abfluß- und abtragswirksam (vgl. Kapitel 3.2). Mit knapp 77% wird ein sehr hoher Varianzanteil des Abtrags durch IMAX60 erklärt. Im Gegensatz zu *Brunnen* werden auf der Parzelle *Kaser* durch die Grabensysteme offene Dolomitklüfte angeschnitten. Nur bei hohen Abflußspitzen kann das in den Gräben liegende lose Material die Auffangtonnen erreichen.

Der Abtrag auf der Parzelle *Weg* weist mit einem erklärten Varianzanteil von knapp 90% den besten Zusammenhang mit den unabhängigen Variablen auf. Im Gegensatz zu allen anderen Parzellen gehen dabei ausgewählte Parameter für alle Einflußgrößen des Modells (N, BF und Q in Abb. 2) signifikant in die Regressionsfunktion ein. Die Tatsache, daß zwischen den einzelnen unabhängigen Variablen keine Multikollinearitäten bestehen, bedeutet, daß nur für die Parzelle *Weg* das Gesamtmodell der Abbildung 2 gültig ist.

Der höchste Varianzanteil (knapp 70%) wird durch den Abfluß Q erklärt. Die Wege und vor allem die Wegabkürzungen wirken dabei als Leitbahnen für den Oberflächenabfluß. Auf diesen verdichteten Flächen liegt hauptsächlich durch den Wanderbetrieb gelockertes, loses Bodenmaterial, das mit steigendem Abfluß zunehmend abgespült werden kann.

Relativ hohe zusätzliche Varianzanteile (12%) werden durch die Maximalintensität IMAX15 erklärt. Im Gegensatz zu *Jenner-Süd* und *Kaser* (IMAX60) sind dabei bereits kurze Intensitätsspitzen abtragswirksam. In Übereinstimmung mit der hohen Fallzahl der Regressionsgleichung ($n = 50$) können dabei bereits relativ wenig ergiebige und gering intensive Niederschläge zur Bereitstellung von abtragbarem Lockermaterial führen. Das Abtragsmodell *Weg* verdeutlicht die Komplexität der Bodenerosion auf anthropogen stark geschädigten Flächen: Die Abtragsbildung erfolgt demnach aus einer Überlagerung der Einflußfaktoren Oberflächenabfluß (kinetische Energie, Transportmedium) und Niederschlagsintensität (Prall- und Planschwirkung). Durch die Kombination von Abfluß- und Abtragsmodellen ergeben sich unter Einbeziehung der Koeffizienten der einzelnen Regressionsgleichungen quantitative Abschätzungen der Bodenerosion auf den Parzellen in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (vgl. Abb. 4). Auf ungeschädigten Weideflächen (*Jenner-Süd*, *Grat*) erfolgt selbst bei ergiebigen Niederschlägen nur geringer Bodenabtrag. Demgegenüber liegt der Abtrag als Folge der anthropogenen Schädigungen der Vegetationsdecke auf den Parzellen *Brunnen* und *Weg* bei kleinen Niederschlagshöhen um 1 bis 2 und bei großen Niederschlagshöhen um 2 bis 3 Zehnerpotenzen höher. In dem Grabensystem der Parzelle *Kaser* erfolgen höhere Abfluß- und Abtragsbeträge nur bei besonders ergiebigen Niederschlägen.

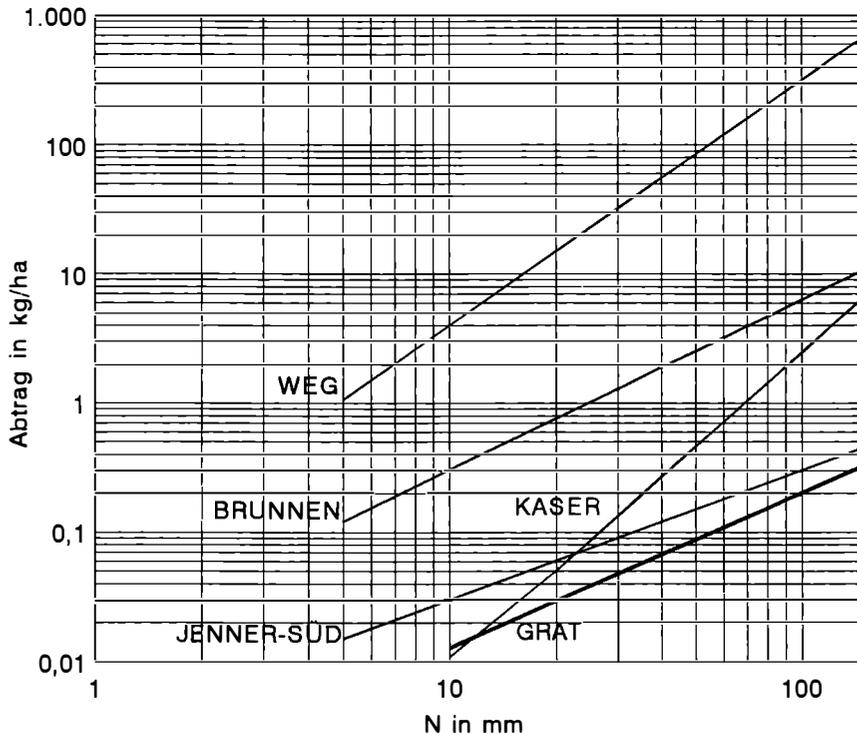


Abb. 4: Der Parzellenabtrag als Funktion der Niederschlagshöhe

4. Die Herkunft des Abtrags

Auf den fünf Parzellen mit höheren Abtragsmengen (vgl. Abb. 1) wurde das gesamte Erosionsgut nach der Korngrößenzusammensetzung (KGZ) und nach dem Chemismus analysiert. Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Analysen mit den entsprechenden Verhältnissen der Böden in situ (FLEISCHMANN 1990, FORSTER 1991) ermöglicht eine Beantwortung der Frage nach der Herkunft des erodierten Materials innerhalb der einzelnen Parzellen.

Ein Vergleich der KGZ des Abtrags auf den relativ erosionsstabilen Weideparzellen *Grat* und *Jenner-Süd* (vgl. Abb. 5 a, b) mit den Böden in situ (Rendzina bzw. Rendzina-Braunerde) zeigt, daß das Erosionsgut durch deutlich geringere Tonanteile ($T < 0,002$ mm) und deutlich höhere Sandanteile (fS, mS, gS: 0,063 bis 2 mm) gekennzeichnet ist. Der geringe Tonanteil des Abtrags erklärt sich aus dem hohen Humusgehalt der Böden, der bei Anwesenheit von $CaCO_3$ zusammen mit dem tonigen Kalklösungsrückstand zu stabilen Ton/Humus-Komplexen führt. Die KGZ des Abtrags zeigt die selektive Abspülung des weniger bindigen bzw. geringer aggregierten Bodenmaterials in der Sandfraktion.

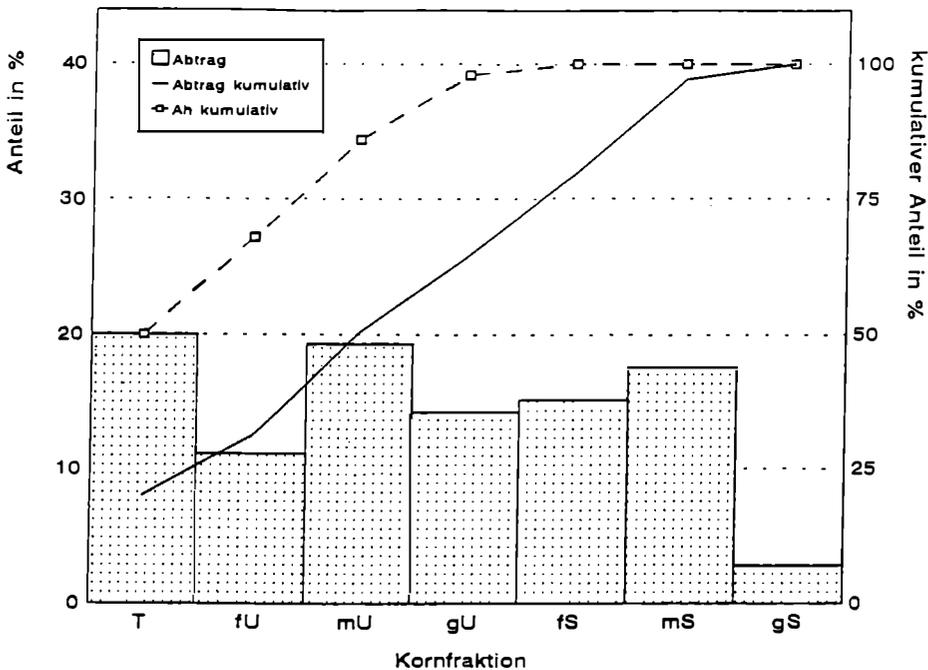


Abb. 5 a: Mittlere Korngrößenverteilung des Abtrags und der Böden in situ auf den Parzellen – a) *Grat*; b) *Jenner-Süd*; c) *Kaser*; d) *Brunnen*; e) *Weg*

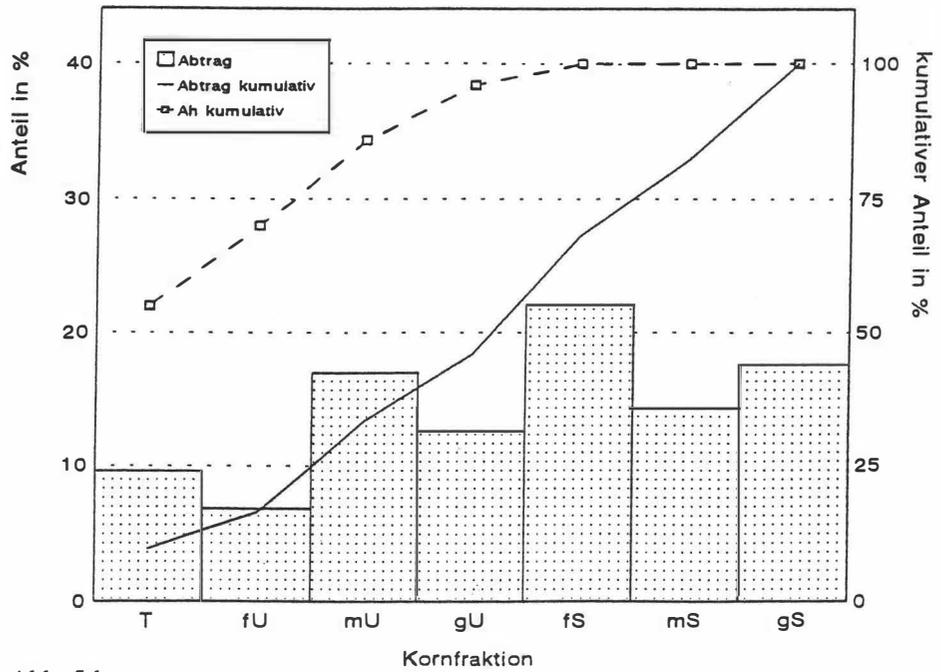


Abb. 5 b

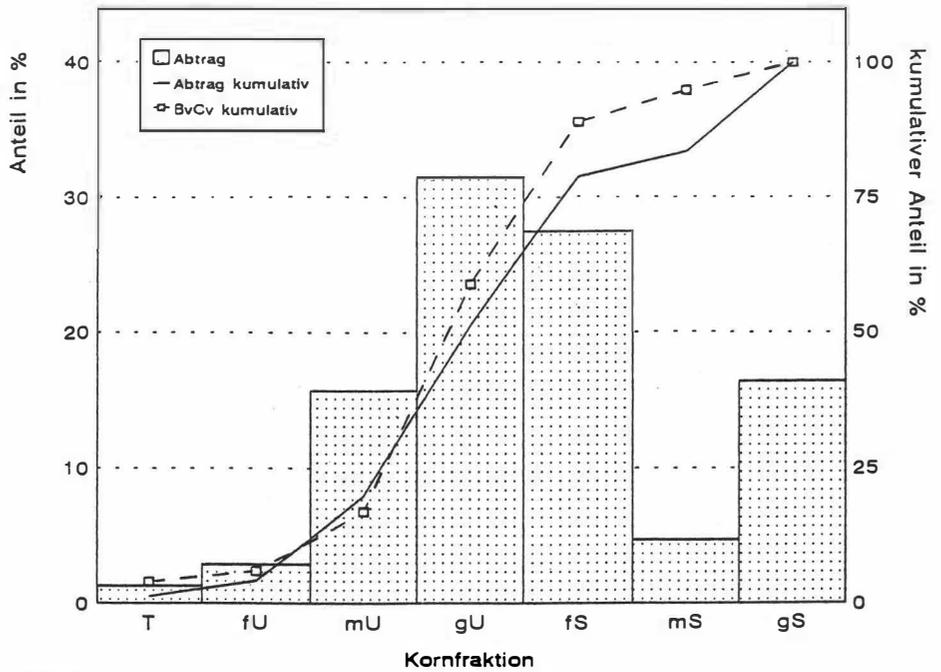


Abb. 5 c

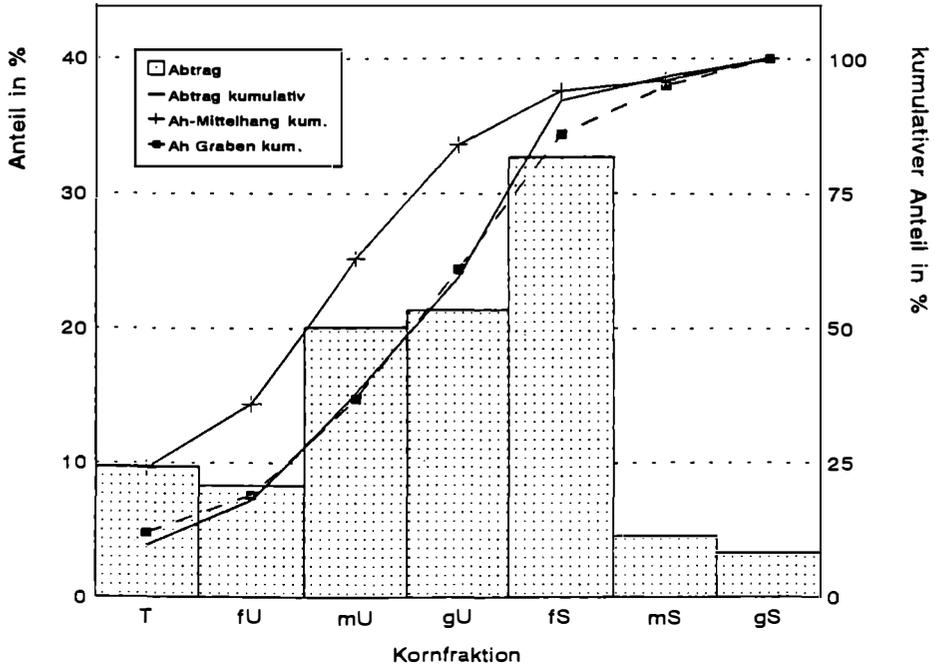


Abb. 5 d

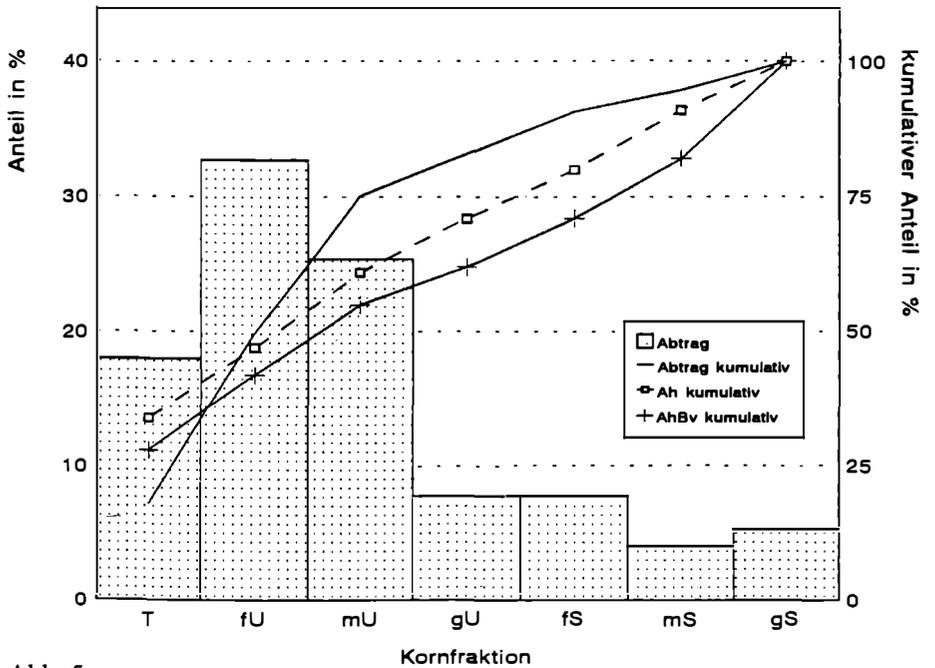


Abb. 5 e

Im Gegensatz zu *Jenner-Süd* und *Grat* weisen die KGZ des Abtrags auf *Kaser* und *Brunnen* über alle Fraktionen hinweg eine hohe Ähnlichkeit mit den KGZ der angenommenen Abtragsherde auf (vgl. Abb. 5 c, d). Auf diesen Teilflächen mit geschädigter Vegetationsbedeckung können Niederschlag und Abfluß unmittelbar am Ausgangsgestein (B_v - C_v -Horizonte der Parzelle *Kaser*) oder am ungeschützten Boden (A_h -Horizonte der Parzelle *Brunnen*) ansetzen, wodurch deren erosive Wirksamkeit erheblich verstärkt wird. Abbildung 5 d zeigt, daß der Abtrag auf der Parzelle *Brunnen* hauptsächlich innerhalb der Entwässerungsgräben stattfindet.

Die KGZ des Abtrags auf der Parzelle *Weg* stimmt mit den KGZ der einzelnen Bodenhorizonte (A_h und A_h - B_v -Horizonte der Rendzina-Braunerden) kaum überein. Der Bodenabtrag stammt nicht von den Flächen mit ungestörter Bodenentwicklung, sondern von den stark verdichteten Wegeflächen. Das auf diesen Wegen liegende lose Material (Fehlen eines stabilen Bodengefüges bzw. Einzelkorngefüge) ist in Abhängigkeit vom Abfluß korngrößenselektiven Abspülungsprozessen unterworfen (vgl. Abb. 5 e). Am mobilsten sind dabei die Fraktionen Fein- und Mittelschluff. Im Gegensatz zu den Bodenhorizonten (jeweils 27% im A_h und im A_h - B_v) machen diese Fraktionen 57% des Gesamtabtrags aus. Diese Korngrößen sind einerseits klein genug, um auch bei geringer Schleppkraft des Abflusses transportfähig zu sein. Andererseits sind sie jedoch zu groß, um aufgrund physikalisch/chemischer Wechselwirkungen größere Aggregate bilden zu können. Die Korngrößenanalyse zeigt die erhöhte Abtragsanfälligkeit der Schluff-Fraktion bei fehlender bzw. stark gestörter Gefügeentwicklung. Diese wiederum ist auf die Anlage der Wanderwege und den Wanderbetrieb zurückzuführen.

Die Ergebnisse der chemischen Analysen des Abtrags (Karbonatgehalt, Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff und Gesamtstickstoffgehalt) stimmen mit den Korngrößenanalysen gut überein (FELIX & JOHANNES 1993). Beide bestätigen die Interpretation der Abtragsmodelle.

5. Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung verfolgt drei Ziele:

1. Quantifizierung der Bodenerosion (sommerliche Abspülungsprozesse) im Kalkhochgebirge
2. Modellierung der Bodenerosion über die Einflußfaktoren Niederschlag, Bodenfeuchte und Abfluß
3. Analyse der Herkunft des erodierten Materials

Zur Quantifizierung der Bodenerosion wurden acht Testparzellen eingerichtet. Die Parzellen mit geschlossener Vegetation (Wald- und Weideparzellen) erwie-

sen sich als erosionsstabil. Große Beträge für Abfluß und Abtrag wurden für die Testflächen gemessen, in denen durch intensive Almwirtschaft (Schäden durch Viehtritt) oder durch den Sommertourismus (Verdichtung des Bodens durch Wanderwege und Abkürzungen) Teilflächen mit deutlich geschädigter Vegetation entstanden sind.

Die Zusammenhänge zwischen Abtrag, Abfluß, Niederschlag und Bodenfeuchte wurden mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse untersucht. Die Beziehungen zwischen Abtrag, Abfluß und Niederschlag (Ergiebigkeit und Intensitätsverlauf) sind in der Regel sehr eng. Je nach den zeitinvarianten Parzelleneigenschaften variieren die Abfluß- und Abtragsmodelle hinsichtlich der Güte der Zusammenhänge und der Anzahl und der Charakteristik der aufgenommenen Einflußgrößen. Die chemische Analyse und die Korngrößenverteilung des Abtrags bestätigen die Ergebnisse der Abtragsmodelle.

6. Summary

Richard Felix and Bernhard Johannes: Research into Soil Erosion on Test-Plots in Calcareous High Mountains

The research presented here aimed at

1. a quantification of soil erosion (splash erosion),
2. a modelling of the soil erosion as influenced by rainfall, soil moisture and run-off and
3. an analysis of the origin of eroded material.

In order to quantify soil erosion eight test-sites were delimited in the Jenner test-area (Nationalpark Berchtesgaden). Plots with a dense vegetation cover (forest and pasture) were not eroded, but with those with damaged vegetation resulting from intensive alpine farming (footmarks of cattle) or summer tourism (compaction of soil along hiking-trails and short-cuts) large amounts of run-off and soil erosion were measured.

The correlations between soil erosion, run-off, rainfall and soil moisture were examined by means of a multiple regression analysis, with those between soil erosion, run-off and rainfall (amount of rainfall and changing intensity) usually being significant. Invariable characteristics of the test-sites determine the significance of correlations and the number and kind of factors of influence.

A comparison between the grain size distributions of eroded material and of soils in situ demonstrates the origin of soil erosion. A study of grain size distributions and a chemical analysis confirms the validity of the models of soil erosion.

7. Literaturverzeichnis

- AUERSWALD K., SCHMIDT F. (1986), Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern. Karten zum flächenhaften Abtrag durch Regen (= GLA Forschungsber., 1). München, Bayerisches Geol. Landesamt.
- BUNZA G., SCHAUER T. (1989), Der Einfluß von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluß bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der Bayerischen Alpen (= Informationsber., 2). München, Bayerisches Landesamt f. Wasserwirtschaft.
- FELIX R., JOHANNES B. (1993), Untersuchungen der Beziehungen zwischen Niederschlag, Oberflächenabfluß und Bodenerosion auf unterschiedlich genutzten Hochgebirgsstandorten. Abschlußbericht "Bodenforschung im Deutschen Alpenraum", Teilprojekt Berchtesgaden. München (unveröff.).
- FLEISCHMANN C. (1990), Arbeitsgruppe Bodenphysik, Zwischenbericht zum BMFT-Verbundvorhaben "Bodenforschung im deutschen Alpenraum".
- FORSTER J. (1991), Bodenkundliche Beschreibung der Testparzellen im Jennergebiet. Zwischenbericht zum Verbundvorhaben "Bodenforschung im deutschen Alpenraum".
- GIESECKE J., MEYER H. (1986), Digitales Meßwert-Erfassungssystem für Punktniederschläge. In: Wasserwirtschaft, 76, Heft 10.
- JUNG L., BRECHTEL R. (1980), Messungen von Oberflächenabfluß und Bodenabtrag auf verschiedenen Böden der Bundesrepublik Deutschland (= DVWK-Schr., Heft 48).
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1965), Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. In: Agricultural Handbook, Nr. 282. Washington D.C.
- ZWECKL J., SPANDAU L. (1986), Untersuchungen zu Abtragsformen und Bodenschäden im Testgebiet Jenner. In: Ökosystemforschung Berchtesgaden. MaB-6-Projekt. München-Weißenstephan.