

**UNTERSUCHUNGEN ZUR AKTUELLEN RELIEFENTWICKLUNG  
IN ALPINEN EINZUGSGEBIETEN MIT HILFE EINES  
GEOGRAPHISCHEN INFORMATIONSSYSTEMS**

**Dargestellt am Beispiel des Kesselbachtals  
im Vorkarwendel, Tirol**

Michael BECHT, München\*

mit 10 Abb. und 3 Tab. im Text

**INHALT**

1.	Einleitung .....	32
2.	Untersuchungen zur aktuellen Reliefentwicklung im Kesselbachtal .....	33
2.1	Das Kesselbach Einzugsgebiet .....	34
2.2	Auswahl der Testflächen .....	36
2.3	Räumliche Übertragung der Messungen von Testflächen auf Einzugsgebiete .....	40
3.	Aktuelle Reliefformung im Kesselbachtal .....	43
3.1	Fluviale Feststoffbilanz .....	43
3.2	Gravitativer Hangabtrag .....	46
3.3	Zur Herkunft der Feststoffe im Kesselbach .....	46
4.	Aktuelle Entwicklung der Talformen im Kesselbachgebiet .....	47
5.	Zusammenfassung .....	49
6.	Summary .....	49
7.	Literaturverzeichnis .....	49

\* PD Dr. Micheal Becht, Institut für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München,  
D-80333 München, Luisenstraße 37 II

## 1. Einleitung

Zur Geomorphologie der Hochgebirge der Erde liegen bereits eine Vielzahl von Untersuchungen vor (HÖLLERMANN 1964, HEUBERGER 1966, FISCHER 1967, DÜRR 1970 et al.). Die Formungsprozesse werden darin meist qualitativ beschrieben und oftmals einzelnen Höhenstufen zugewiesen (HÖLLERMANN 1976, HÖLLERMANN & POSER 1977, HAGEDORN 1980, KARRASCH 1977 et al.). Forschungsdefizite bestehen in Messungen der Stärke und Verteilung geomorphologischer Prozesse, worauf schon HAGEDORN (1979) hinwies und woran sich bis heute kaum etwas geändert hat. Aussagen über die aktuelle Reliefentwicklung sind nur auf der Basis umfangreicher Datenerhebungen möglich. Erst dann kann beurteilt werden, in welchem Umfang das heutige Erscheinungsbild der Hochgebirge durch rezente Prozesse geprägt wird oder aber als reliktsch anzusprechen ist.

Die Erfassung aktueller geomorphologischer Prozesse steht vor zwei Fragen:

1. Sind die Ergebnisse von Messungen, die sich über einen Zeitraum von wenigen Jahren erstrecken, repräsentativ für die rezente Formung?
2. Sind die Messungen auf kleinen Testflächen repräsentativ für alle Flächen in größeren Einzugsgebieten bzw. repräsentieren die Testflächen die Geofaktoren des Gebietes?

Die erste Frage kann nicht in jedem Fall positiv beantwortet werden. Es ist zu bedenken, daß mit zunehmender Größe des Untersuchungsgebietes der Einfluß extremer Abtragsereignisse – meist ausgelöst durch seltene Witterungsabläufe – zunimmt, da zwischen der Felsregion und den großen Tälern das Volumen temporärer Speicher ansteigt. Daraus folgt, daß Messungen des fluvialen Abtrags oder des Steinschlags auf Hangflächen schon nach einigen Jahren gute Hinweise auf die Größenordnung des aktuellen Abtrags geben, während etwa Messungen fluvialer Transporte in großen Talräumen stratigraphisch abgesichert werden sollten.

Die zweite Frage läßt sich durch den Einsatz Geographischer Informationssysteme (GIS) weitgehend beantworten. Dazu sind die Verteilungen der Geofaktoren in den unterschiedlichen Betrachtungsdimensionen zu analysieren und zu vergleichen. Es ist hierbei sinnvoll, die Überprüfung der Repräsentativität schon bei der Auswahl der Testflächen durchzuführen, da es später kaum möglich ist, etwa mit Hilfe einer Gewichtung von Geofaktoren oder Testflächen, Differenzen zwischen Testflächen und Einzugsgebieten auszugleichen. Dies liegt vor allem daran, daß die Wirkungsgefüge in der Natur, d.h. die komplexen physikalischen Prozeßabläufe, bisher weitgehend unbekannt sind.

Ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Kenntnisse über die Prozesse der aktuellen Reliefentwicklung ist es, Messungen, die bislang meist auf der Ebene

der Einzugsgebiete durchgeführt wurden (LEHRE 1981, DEDKOV & MOSZHERIN 1992, WALLING 1983, BECHT 1989), durch differenzierte Erfassung der Formung auf Testflächen innerhalb der Gebiete zu erweitern. Damit wird aus der "black box" eine "gray box", was nur den Beginn einer notwendigen weitergehenden Beschäftigung mit den Prozeßabläufen der Reliefentwicklung markiert.

Unter Beachtung dieser Einschränkungen können mit einem GIS Messungen von Testflächen auf Einzugsgebiete extrapoliert und aktuelle Reliefentwicklungen sowie potentielle Gefährdungen in Hochgebirgen abgeschätzt werden.

## **2. Untersuchungen zur aktuellen Reliefentwicklung im Kesselbachtal**

Die Messungen der Stärke aktueller geomorphologischer Formungen im Kesselbachtal haben zum Ziel, Zusammenhänge zwischen Hangentwicklung, Feststoffaustrag und möglicher Deposition in einem alpinen Einzugsgebiet zu untersuchen. Da eine vollständige flächenhafte Erfassung von Abtragsprozessen im Einzugsgebiet nicht geleistet werden kann, müssen die Messungen auf Testflächen konzentriert werden. Die Extrapolation des gemessenen Hangabtrags von kleinen Flächen auf das gesamte Einzugsgebiet ist nur unter der Voraussetzung sinnvoll, daß die naturräumliche Differenzierung der Geofaktoren im Einzugsgebiet auch durch die Testflächen erfaßt wird (siehe 2.2).

Eine räumlich-zeitliche Differenzierung der Stärke des Hangabtrags sowie der Formungsprozesse kann dazu beitragen, den Einfluß von Geofaktoren (z.B. Vegetation) auf Abtragsprozesse herauszuarbeiten, so daß Hinweise auf mögliche Folgen von Änderungen in Hochgebirgsökosystemen gegeben werden können.

Es liegen bisher nur wenige Untersuchungen zum Feststoffhaushalt alpiner Einzugsgebiete vor, die auch den Hangabtrag einbeziehen (OWENS & SLAYMAKER 1992, BOVIS 1978, WETZEL 1992). Die Ursachen dieses Defizits sind einerseits im hohen Arbeitsaufwand bei der Messung des kleinräumig zu differenzierenden Hangabtrags zu sehen, andererseits ist die Übertragung von Punkt (Testfläche) zu Fläche (Einzugsgebiet) auch in den vorliegenden Arbeiten nicht befriedigend gelöst. OWENS und SLAYMAKER (1992) finden in British Columbia besonders günstige Bedingungen für die Messung des Hangabtrags vor, da das erodierte Material aus kleinen Gebieten (Dimension Hektar) in Seen sedimentiert. Beim Vergleich mit den Messungen des Feststofftransportes in größeren Flüssen fehlt eine Überprüfung der Repräsentativität kleiner Testflächen für den Hangabtrag im Gesamtgebiet. Gravitative Hangformungen (Rutschungen, Lawinen), die die Seebecken nicht erreichen, bleiben unberücksichtigt, obwohl ihre Bedeutung für den Feststofftransport im Hochgebirge groß sein kann (BECHT 1994).

## 2.1 Das Kesselbach Einzugsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Vorkarwendel westlich des Achensees (vgl. Abb. 1), erstreckt sich über ein Höhenintervall von 952 bis 1.988 m ü.NN und weist eine Fläche von 8,09 km<sup>2</sup> auf. Aufgrund der Nähe zum nördlichen Alpenrand sind die mittleren Jahresniederschläge höher als in den Zentralalpen. Für den Pegel Dürrach im benachbarten Tal gelegen werden in der Normalperiode 1931-1960 im Mittel 1.818 mm/a angegeben (FLIRI 1975).

Die zentralen bewaldeten Teile des kesselartig nach Westen geöffneten Tales sind in den Kössener Schichten ausgebildet (Geologie nach MILLER 1992) und werden durch tief eingeschnittene Kerbtäler geprägt. Eine Steilstufe bildet den Übergang zu den aus jurassischen Kalken und Mergeln aufgebauten Hochlagen, die überwiegend weidwirtschaftlich genutzt werden. Die alpine Höhenstufe, die aufgrund der natürlichen Bedingungen in Gipfelnähe liegt, ist hier anthropogen abgesenkt.

Die pleistozäne Vergletscherung des Einzugsgebietes erreichte nach WOLF (1922) eine Höhe von 1.500-1.600 m ü.NN. Neben kleinen Karen im Bereich der östlichen Wasserscheide wurde die Vereisung durch Zuflüsse aus dem Karwendelgebirge verstärkt. Heute treten vor allem im Ostteil des Einzugsgebietes (Rethalmen, vgl. Abb. 2) an steilen Hängen, die durch kleine Kargletscher eiszeitlich

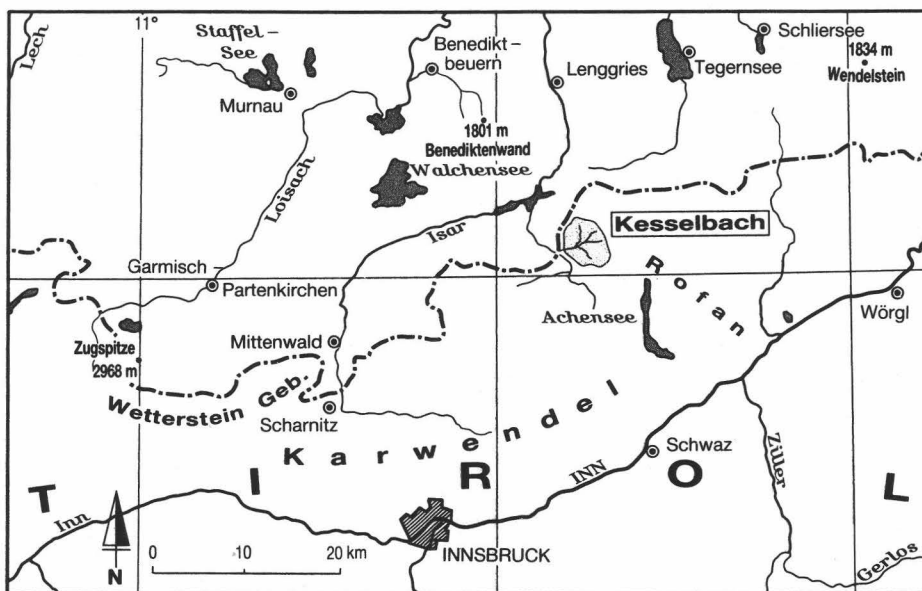


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes Kesselbach in den Nördlichen Kalkalpen

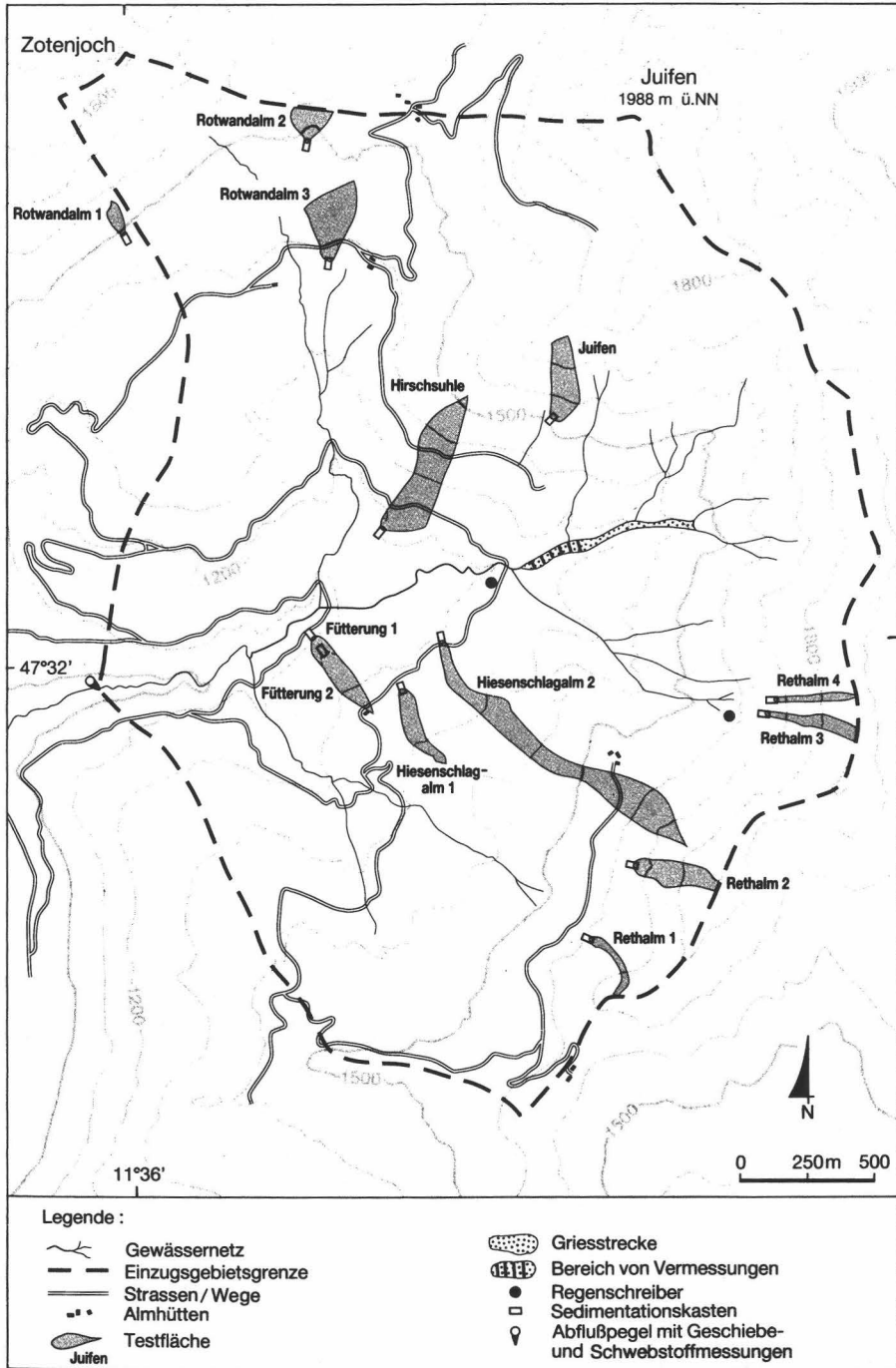


Abb. 2: Das Untersuchungsgebiet Kesselbach

versteilt wurden, auf Rotkalken und Aptychenschichten (Geländeneigung 25-35°) Blaiken auf. Flachere Hänge im Verbreitungsgebiet der Kössener Schichten (Geländeneigung 15-20°) weisen eine geschlossene Vegetationsbedeckung auf.

Die aktuelle Reliefformung geschieht im gesamten Einzugsgebiet des Kesselbaches durch fluvialen Abtrag in gelöster und partikulärer Form. An steilen Hängen kommt es verbreitet zu Lawinenabgängen, die besonders auf Blaikenhängen erodierend wirken. Episodisch gehen auf den gleichen Hängen Muren ab. Dabei werden Lockermaterialien, die hier mehrere Jahre deponiert sein können, im Verlauf von Starkregen talwärts transportiert.

Ziel der Untersuchungen war es, Materialtransporte durch flächenhaft verlaufende Abtragsprozesse (Lawinen, Muren) im Gesamtgebiet ereignisabhängig zu kartieren, zu vermessen und zu beproben. Die Erfassung der fluvialen Erosion erfolgte auf insgesamt 13 Testflächen (vgl. Abb. 2) mit einer Größe von jeweils wenigen Hektar, die durch natürliche Wasserscheiden begrenzt sind. Der Feststoffaustrag wurde in kleinen Sedimentationsbecken (Volumen 70 Liter) aufgefangen. Ein weiteres, oft nicht befriedigend lösbares Problem stellt die Messung des Feststoffaustrags aus dem gesamten Einzugsgebiet dar. Im Kesselbachtal konnte diese Schwierigkeit durch eine sehr fruchtbare Kooperation mit der Tiroler Wasserkraftwerke AG (TIWAG) gelöst werden. Die Abflüsse und Stofftransporte aus dem Kesselbachtal werden an einem Tiroler Wehr der TIWAG laufend registriert (zum Meßverfahren vgl. HOFER & KLEIN 1992).

## 2.2 Auswahl der Testflächen

Vor der Einrichtung von Testgebieten sollte die naturräumliche Ausstattung des Einzugsgebietes durch Kartierungen der Geomorphologie, Geologie, Vegetationsbedeckung, Böden, Hydrologie sowie von Nutzungen dokumentiert werden. Auf dieser Grundlage können dann die Testflächen so ausgewählt werden, daß etwa geomorphologische Prozesse auf unterschiedlichem Untergrund und bei differenzierter Vegetationsbedeckung getrennt erfaßt werden. Dies erfordert trotz des entstehenden Arbeitsaufwandes eine nicht zu geringe Zahl von Testgebieten.

Es wurde angestrebt, Einzelflächen auszuwählen, die hinsichtlich der naturräumlichen Ausstattung möglichst homogene Areale aufweisen. So wurden auf Kössener Schichten Almflächen und Waldflächen getrennt erfaßt, um den Einfluß der Vegetationsbedeckung auf den Abtrag zu charakterisieren. Um die Bedeutung des geologischen Untergrundes herauszuarbeiten, mußten Weideflächen auf Aptychenschichten vergleichend herangezogen werden. In die Auswahl der Flächen gehen bei Beginn der Untersuchungen subjektive (Fehl-)Einschätzungen der Bearbeiter über die tatsächliche Verteilung und Bedeutung geomorphologischer Prozesse ein, die in der Folge korrigiert werden müssen. Außerdem treten bei der Auswahl der Testflächen operationelle Kriterien (z.B. Zugänglichkeit) hinzu. Es

ist daher wichtig, die Verteilung der Geofaktoren auf den Testflächen und im Gesamtgebiet anzugeben, um die Repräsentativität kleiner Gebiete zu überprüfen.

Mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems wurde die hypsographische Verteilung der Testflächen (mittlere Höhe) im Kesselbachtal auf der Grundlage von Einzugsgebietskartierungen bzw. der Geländedaten des Österreichischen Bundesamtes für das Eich- und Vermessungswesen (50 m Rasterweite) berechnet (vgl. Abb. 3). Sie decken das Höhenintervall des Einzugsgebietes gut ab. Vor allem die Hochlagen sind etwas stärker durch Testflächen abgedeckt, was aufgrund geringer Vegetationsbedeckung, anthropogener Nutzung und kräftigerer geomorphologischer Formung auch gerechtfertigt erscheint. Vollständig bewaldete Hänge auf Kössener Schichten dominieren dagegen große Teile des Gebietes bis zu einer Höhe von etwa 1.400 m ü.NN. Aufgrund der Homogenität der Naturraumausstattung und geringer Formungsintensität wurden hier weniger Testflächen als in den Hochlagen eingerichtet. Die mittlere Höhe aller Testflächen liegt daher auch mit 1.538 m ü.NN etwas über dem Wert für das gesamte Kesselbachtal (1.458 m ü.NN).

Ein ähnliches Muster zeigt auch die Verteilung der mittleren Hangneigungen auf Testflächen im Vergleich mit den Hangneigungen im Kesselbachtal (vgl. Abb. 4). Wiederum sind die steilen Flächen der Gipfellagen überrepräsentiert, da hier kleinräumig mit großen Formungsunterschieden zu rechnen ist. Wichtig ist allerdings, daß auch die flacheren Hänge im Einzugsgebiet durch Testflächen erfaßt werden.

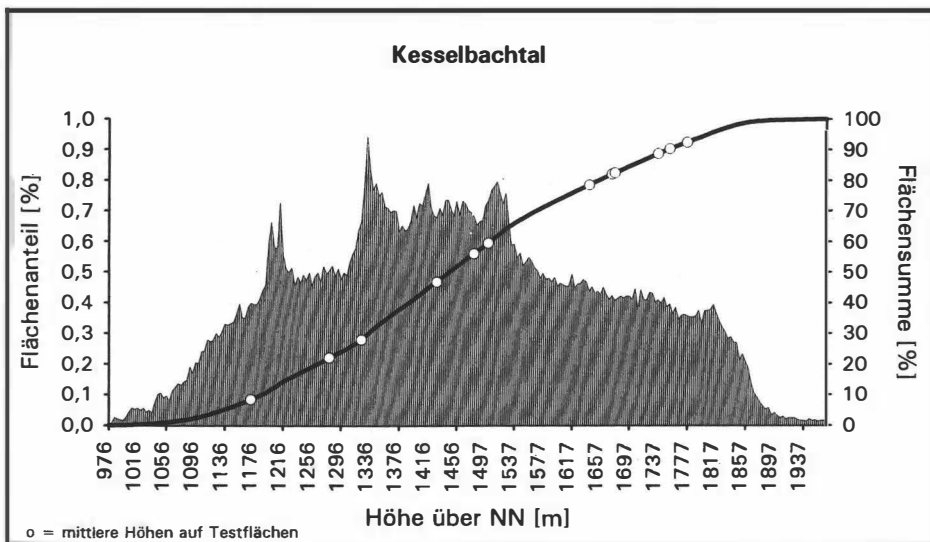


Abb. 3: Hypsographische Verteilung der Testflächen im Kesselbachgebiet

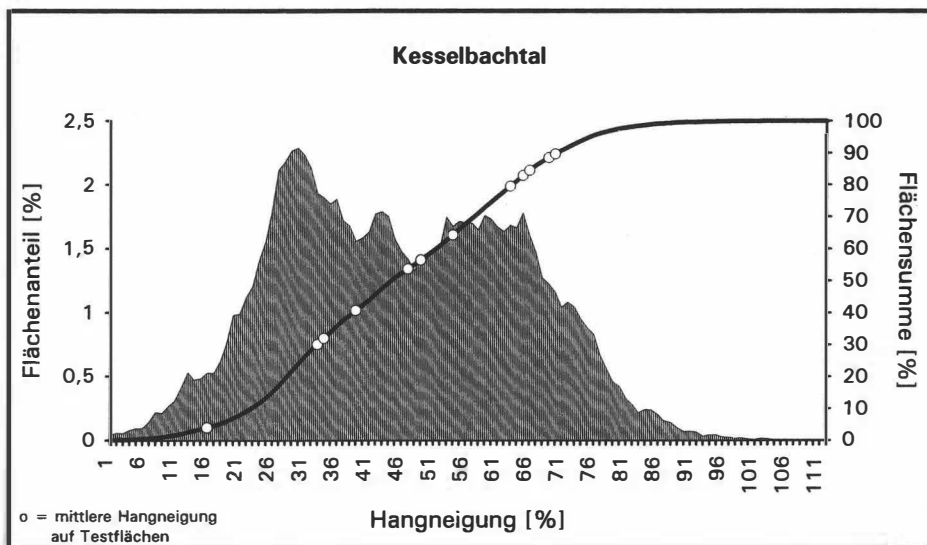


Abb. 4: Hangneigungen auf Testflächen und im gesamten Untersuchungsgebiet Kesselbach

Die Diagramme 5 bis 7 zeigen, daß die Testflächen auch das Spektrum der Expositionsklassen, der Vegetationsbedeckung sowie der geologischen Formationen im Einzugsgebiet sehr gut abdecken. Die ausgewählten Testgebiete repräsentieren hinsichtlich ihrer Naturraumausstattung gut das Einzugsgebiet des Kessel-

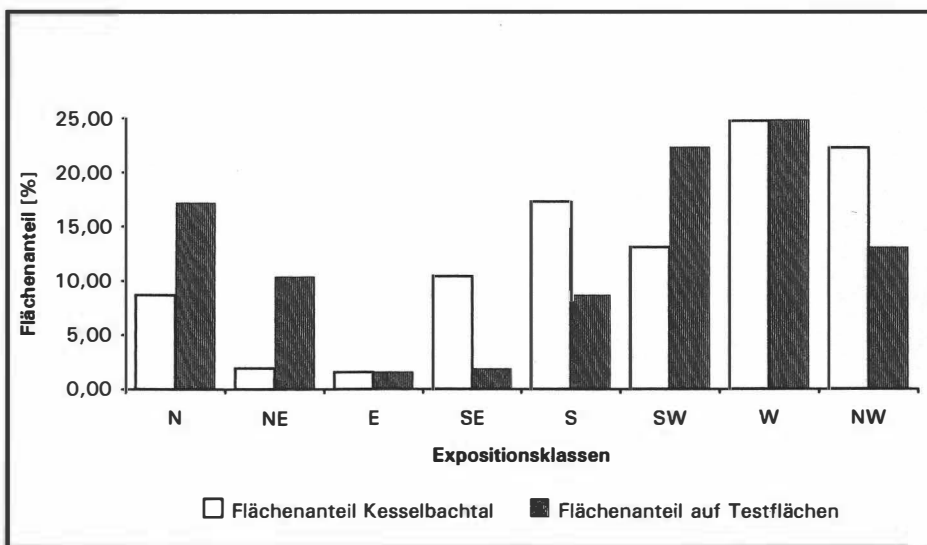


Abb. 5: Die Verteilung von Hangexpositionen auf Testflächen und im gesamten Einzugsgebiet des Kesselbaches



baches. Typische Kombinationen von Geofaktoren sind erfaßt, wobei aufgrund der endlichen Zahl Testflächen seltene Kombinationen mit geringen Flächenanteilen unberücksichtigt bleiben müssen. Während der Geländearbeiten ergab sich kein Hinweis auf Formungsprozesse, die nicht auch auf Testflächen quantifiziert wurden.

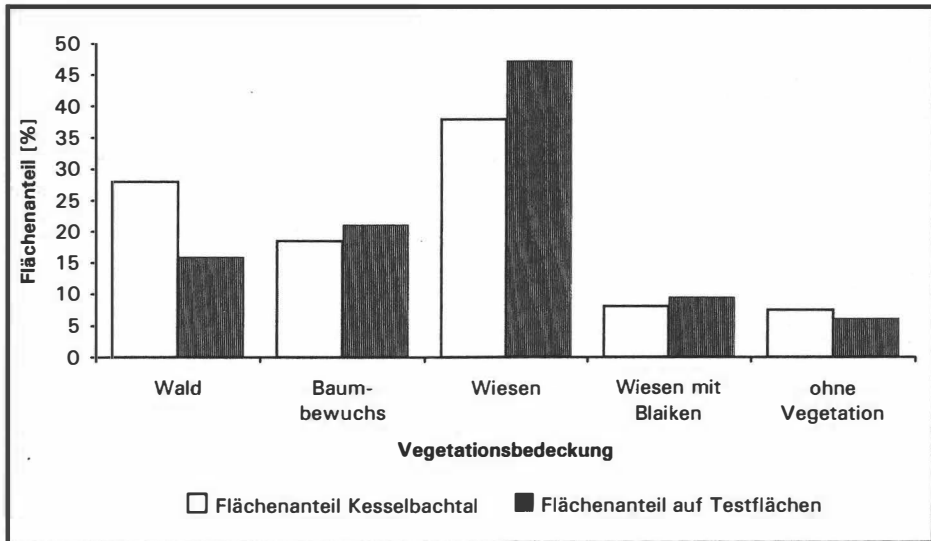


Abb. 6: Die Verteilung von Vegetationsbedeckungen auf Testflächen und im gesamten Einzugsgebiet des Kesselbaches

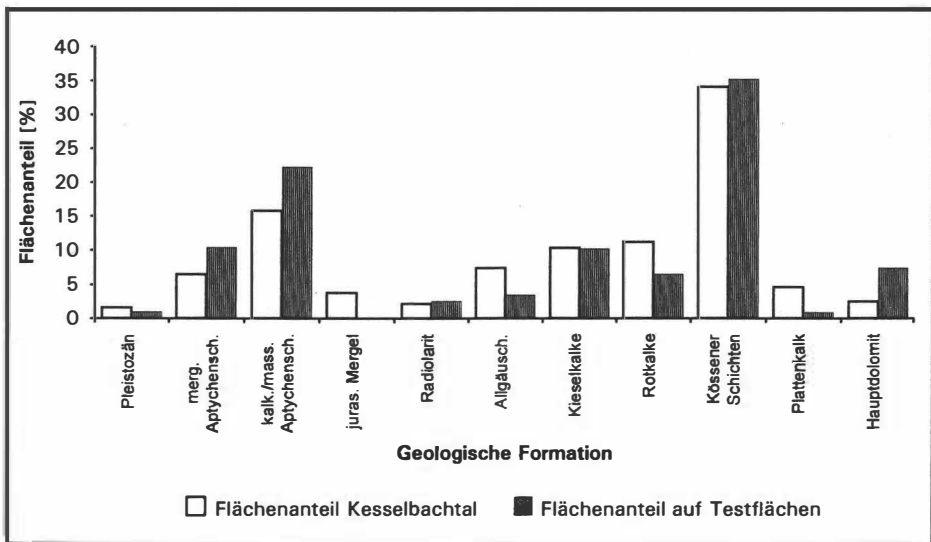


Abb. 7: Der Anteil geologischer Formationen auf Testflächen und im gesamten Einzugsgebiet des Kesselbaches

### 2.3 Räumliche Übertragung der Messungen von Testflächen auf Einzugsgebiete

Der angestrebten Übertragung der Meßergebnisse von kleinen Flächen auf das Gesamtgebiet liegt die Annahme zugrunde, daß Testflächen und übrige Einzugsgebietsflächen gleicher Geofaktorenkonstellation auch gleiche Abtragsraten liefern. Dies kann jedoch nur zutreffen, wenn

1. tatsächlich alle die Abtragsprozesse steuernden Faktoren erfaßt und für die Übertragung verwendet wurden und
2. die Größen (z.B. Höhenlage, Neigung, Vegetationsdichte etc.) einzelner Faktoren auf Testflächen und auf den für die Übertragung ausgewählten Hängen gleich sind. Diese Bedingungen können jedoch bei einer begrenzten Zahl von Testflächen nur angenähert erfüllt werden, so daß es notwendig ist, bei der Übertragung zu generalisieren.

Voraussetzung für die Bestimmung des Hangabtrags im Kesselbachtal sowie für den Vergleich zwischen Hangabtrag und Gebietsaustrag ist eine Flächengewichtung der auf kleinen Hangflächen durchgeführten Messungen. Mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems wurde die Verteilung der Geofaktoren auf den Testflächen (Vegetation, Geologie etc.) ermittelt (vgl. Tab. 1). Als weitere Unterscheidungs- und Abgrenzungskriterien zwischen den Flächen dienten die im Gelände kartierten und gemessenen geomorphologischen Prozesse, so daß letztlich die Testflächen durch charakteristische Kombinationen von Geofaktoren und geomorphologischen Prozessen gegeneinander abgegrenzt werden konnten.

Im gewählten Beispiel (vgl. Tab. 1) werden durch die Testflächen Rethalm 2 und Rotwandalm 1 Hangflächen, die überwiegend durch Lawinen geformt werden, erfaßt. Dies bedeutet nicht, daß weitere Prozesse (z.B. fluviale Erosion) fehlen, aber sie besitzen im Vergleich zu Lawinen geringere reliefformende Wirkungen. Da der Abtrag an der Fläche Rethalm 2 jedoch wesentlich stärker als bei Rotwandalm 1 war, wurden Lawinenhänge nochmals differenziert nach dem geologischen Untergrund. Die damit gefundene Abgrenzung erfolgt nicht automatisch, sondern auf der Grundlage der Ergebnisse der Geländearbeiten. Aufgrund geringerer Vegetationsbedeckung hätte man sogar einen höheren Abtrag an der Rotwandalm erwarten können. Das Ziel weitergehender Arbeiten muß hier sein, die zunächst beschreibende Analyse in kausale Beziehungen zu überführen.

Hänge, die im Verbreitungsgebiet der Aptychenschichten liegen, aber nicht durch Lawinen sondern durch fluviale Erosion geformt werden, müssen durch eine weitere Testfläche (Juifen, vgl. Tab. 1) repräsentiert werden. Nach dem beschriebenen Verfahren wurden alle Testflächen analysiert und gegeneinander abgegrenzt. Als Ergebnis werden unterschiedliche Klassen des Hangabtrags im Kesselbachtal gebildet und jeweils einer Referenzfläche (Testfläche) zugeordnet (vgl. Tab. 2).

<b>Rethalm 2</b>				
	<i>arithm. Mittel</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Standardabw.</i>
Höhe ü.M. (m)	1.777	1.649	1.883	259
Gefälle (%)	69,3	26,2	84,5	14,2
<i>Flächenanteile:</i>				
Vegetation	89% Wiese/Wald	9% Wiese	2% ohne Veg.	
Geomorphologie	100% Lawinen			
Geologie	84% mass Aptych.	9% Jura-Mergel	7% Kieselkalk	
Expositionskl.	100% Westen			
<b>Rotwandalm 1</b>				
	<i>arithm. Mittel</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Standardabw.</i>
Höhe ü.M. (m)	1.673	1.496	1.842	92
Gefälle (%)	66,2	24,4	78,8	8,0
<i>Flächenanteile:</i>				
Vegetation	48% Wiese/Wald	4% Wiese	2% Wiese	46% ohne Veg.
Geomorphologie	100% Lawinen			
Geologie	89% Hauptdol. 11% Plattenkalk			
Expositionskl.	100% Südosten			
<b>Juifen</b>				
	<i>arithm. Mittel</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Standardabw.</i>
Höhe ü.M. (m)	1.643	1.512	1.742	66
Gefälle (%)	69,9	36,4	90,1	13,4
<i>Flächenanteile:</i>				
Vegetation	91% Wiese/Wald	6% Wiese/ohne Veg.	3% ohne Veg.	
Geomorphologie	99% fluv. Erosion	1% Bodenkriechen		
Geologie	100% mass Aptych.			
Expositionskl.	73% Süden	24% Südwesten	3% Westen	

Tab. 1: Verteilung der Geofaktoren auf den Testflächen Rethalm 2, Rotwandalm 1 und Juifen (Kesselbachtal)

<b>Kl. Charakteristika der Flächen</b>	<b>Flächanteil im Kesselbachtal in ha (%)</b>	<b>Referenzfläche</b>	<b>Geomorphologische Prozesse*</b>
1 Gerinneerosion	29,38 (3,6)	Hirschsuhle	fluviale Erosion in Kerbtälern
2 Bodenkriechen unter Wald	308,31 (38,1)	Fütterung 2	fluviale Erosion in muldenförmigen Rinnen
3 Viehtrittschäden** Almen < 1.400 m ü.NN	65,06 (8,1)	Hiesenschlagalm 1	fluviale Erosion in Rinnen Narbenversatz dr. Viehtritt
4 Viehtrittschäden, Almen Kössener Sch., Plattenk. Rotkalk, > 1.400 m ü.M.	83,46 (10,3)	Rotwandalm 2 Rotwandalm 3	fluviale Erosion in Rinnen Narbenversatz dr. Viehtritt
5 Lawinen, Hauptdolomit Plattenkalk, Kössen.Sch.	29,15 (3,6)	Rotwandalm 1	Lawinen, geringe fluviale Erosion in Rinnen
6 Wiese mit Wald, alle geol. Klasse außer den in Klasse 5 genannten	24,17 (3,0)	Rethalm 2	Lawinen, fluviale Erosion, Muren
7 Wiese mit Blaiken mass. Aptychensch., Exposition, N	18,77 (2,3)	Juifen	fluviale Erosion in Rinnen
8 Wiese mit Blaiken, Kieselkalk, Radiolarith, Mergel, mass. Aptychen.	82,81 (10,2)	Rethalm 4	Muren, Lawinen, fluviale Erosion in Rinnen
9 Wiese mit Blaiken, merg. Aptychensch.	47,56 (5,9)	Rethalm 3	fluviale Erosion in Rinnen, Lawinen
10 Viehtrittschäden, Almen > 1.400 m ü.NN, alle Geol.- Klassen außer Köss.Sch., Plattenkalk, Rotkalk, Endmoränenabl.	112,49 (13,9)	Rethalm 1	fluviale Erosion in Rinnen,
11 Moorgebiete	3,18 (0,4)	ohne Abtrag	
12 Rutschungen	4,44 (0,6)	Fütterung 1 Hiesenschlagalm 2	fluviale Erosion aus Rutschungsbereichen

\*): Die Reihenfolge der genannten Prozesse entspricht ihrer Bedeutung für die rezente Hangformung auf den Testflächen

\*\*): Viehtrittschäden auf Almflächen mit weitgehend geschlossener Vegetationsdecke im Gegensatz zu Wiesen mit Blaiken, auf denen der Grasbewuchs große Lücken aufweist

Tab. 2: Klassen des Feststoffabtrages von Hangflächen im Kesselbachtal

Die oben angesprochene Generalisierung ist auch in der Einteilung der Abtragsklassen sichtbar (vgl. Tab. 2). So steht die Testfläche Rethalm 2 als Referenzfläche für vorherrschende Formung durch Lawinen auf Aptychenschichten und Kieselkalken (vgl. Tab. 1), aber auch für alle übrigen geologischen Formationen, die nicht durch Klasse 4 (Referenzfläche Rotwandalm 1) erfaßt sind. Es handelt sich hier nur um sehr kleine Flächen, die nicht durch eigene Testflächen erfaßt sind. Sie umfassen 10% der überwiegend durch Lawinen geformten Areale. Der mit der Zuordnung zur Referenzfläche Rethalm 2 zu erwartende Fehler bei der Bestimmung des Hangabtrags im Kesselbachtal ist daher gering.

Mit Hilfe des GIS werden alle Hangflächen des Gesamtgebietes den Referenzflächen zugeordnet, indem überprüft wird, welche Geofaktoren und Formungsprozesse an einem Hang zusammenwirken. Die Referenzflächen sind für unterschiedlich große Flächenanteile des Kesselbachtals repräsentativ, was aufgrund der hypsographischen Verteilung oder der Hangneigungen auf Testflächen zu erwarten war (vgl. 2.2). So werden die zentralen bewaldeten Hänge in den unteren Höhenstufen (38,1% Flächenanteil am Gesamtgebiet, vgl. Tab. 2) durch die Testfläche Fütterung (Höhe 1.106-1.247 m ü.NN) repräsentiert. Hohe Abtragsraten von Testflächen können aufgrund geringer Flächenanteile im Kesselbachtal (z.B. Klasse 12 in Tab. 2) für die Bestimmung des Hangabtrags im Gesamtgebiet von geringer Bedeutung sein.

Aufgrund der flächengewichteten Übertragung des auf den Testflächen gemessenen Abtrags mit dem GIS wird der Hangabtrag im gesamten Untersuchungsgebiet bestimmt, so daß im Vergleich mit dem gemessenen Gebietsaustrag Angaben zur Feststoffbilanz bzw. zur Herkunft der Feststoffe und damit zur aktuellen Reliefentwicklung gemacht werden. Die Auswertungen können auf der Basis von Einzelereignissen und unter Verwendung von Mittelwerten (Monate, Jahre) durchgeführt werden.

### **3. Aktuelle Reliefformung im Kesselbachtal**

#### **3.1 Fluviale Feststoffbilanz**

Für die Jahre 1990-1992 des Untersuchungszeitraumes kann der fluviale Hangabtrag auf Testflächen mit dem Gebietsaustrag gemessen am Pegel Kesselbach verglichen werden (vgl. Abb. 8). Die Differenzen zwischen den einzelnen Testflächen mit unterschiedlicher Gebietsausstattung sind im Vergleich zum Gebietsaustrag gering. Dieser übersteigt den fluvialen Hangabtrag um mehrere Größenordnungen. Die Testflächen auf flach geneigten Hängen im Bereich der Kössener Schichten (Fütterung 2, Rotwandalm 2 und 3, vgl. Abb. 2) weisen gemeinsam mit Rotwandalm 1 im Hauptdolomit geringste Erosionsraten auf.

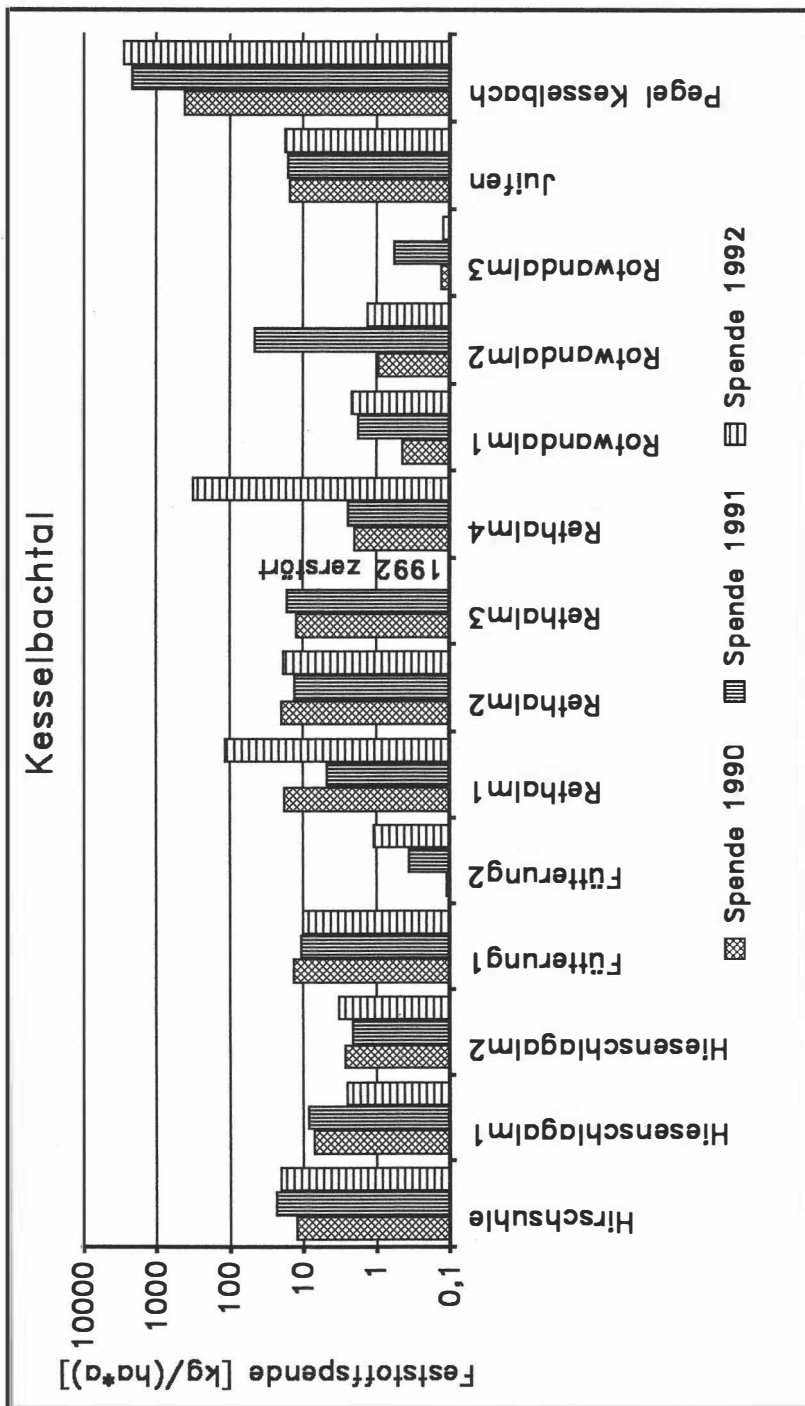


Abb. 8: Feststoffabtrag von Testflächen und Gebietsaustrag aus dem Kesselbachtal

Die flächengewichtete Übertragung der Messungen auf das gesamte Einzugsgebiet (vgl. Tab. 3) mit dem GIS belegt den geringen Anteil des Hangabtrags am Gesamtaustrag des Kesselbaches. Es werden aber auch Unterschiede zwischen den Beobachtungsjahren deutlicher als in Abbildung 8. Der fluviale Hangabtrag im Jahr 1992 übersteigt den der Vorjahre um den Faktor 10. Einerseits trat im Frühjahr starke Formung durch Lawinen auf, so daß große Mengen Lockermaterial für den nachfolgenden fluvialen Transport bereitgestellt wurden. Andererseits war auch die Abspülung nach Starkregen im Sommer 1992 kräftiger als in den Vorjahren.

Da auch 1992 der Hangabtrag weit unter dem Gebietsaustrag liegt, muß nach den Ursachen dieser Differenz, d.h. der Herkunft der im Kesselbach transportierten Feststoffe, gefragt werden. Denudativer Hangabtrag kann zu starker Feststoffzufuhr in die Täler und Gerinne führen, so daß der Sedimenttransport durch Mitnahme gravitativ zugeführten Materials stark ansteigt. Eine andere Erklärung bietet sich, wenn man von kräftiger linearer Erosion in den Tälern ausgeht, so daß durch Einschneidung und Lateralerosion Feststoffe mobilisiert werden.

Klasse	fluvialer Abtrag [kg/ha*a]		
	1990	1991	1992
1	0,46	0,87	0,74
2	0,04	0,14	0,42
3	0,58	0,71	0,21
4	0,06	2,47	0,08
5	0,02	0,07	0,08
6	0,60	0,40	0,56
7	0,36	0,37	0,42
8	0,21	0,26	33,29
9	0,76	0,99	1,07*
10	2,57	0,69	16,13
11	0	0	0
12	0,05	0,04	0,04
Hangabtrag $\Sigma$	5,71	7,01	53,04
Gebietsaustrag	426,4	2.207,8	2.854,5
Anteil Hangabtrag (%)	1,3	0,3	1,9

\*) : Anlage zerstört, Werte von Vergleichsstation Juifen übernommen

Tab. 3: Fluvialer Feststoffabtrag von Hängen im Kesselbachtal nach Übertragung der Messungen auf Testflächen (Anteil der Klassen aus Tab. 2 am Gesamtbetrag im Einzugsgebiet)

### 3.2 Gravitativer Hangabtrag

Im Einzugsgebiet des Kesselbaches tritt flächenhaft wirkende, gravitative Hangformung vor allem durch Lawinentätigkeit und Murgänge auf. Nachdem in den Jahren 1990 und 1991 praktisch keine Lawinen und Muren beobachtet wurden, ereigneten sich im Frühjahr 1992 mehrere Lawinenabgänge vor allem im östlichen Talbereich an den Rethalmen (vgl. Abb. 2). Aufgrund von Kartierungen und Probenahmen (BECHT 1994) konnte die Menge transportierter Lockergesteine im Kesselbachtal auf etwa 8.000 t (= ca. 10.000 kg/ha) abgeschätzt werden. Während dieser Ereignisse wurden die Meßeinrichtungen auf den Testflächen an den Rethalmen beschädigt oder sogar zerstört (Rethalm 3).

Im Sommer folgten nach heftigen Gewitterschauern (gemessene Spitzenintensität 39,9 mm/30 min) Murgänge, die ebenfalls auf das Gebiet der Rethalmen konzentriert waren. Insgesamt wurden etwa 750 t Feststoffe transportiert (= ca. 930 kg/ha). Charakteristisch für Muren am Hang und für Lawinen ist es, daß ein großer Teil des Lockermaterials nicht die Tiefenlinie und damit die perennierenden Gerinne erreicht, sondern schon am Unterhang wieder abgelagert wird. Ein weiterführender Transport ist nur dann möglich, wenn die Feststoffe im Einflußbereich fluvialer Rinnen lagern. Der überwiegende Teil des Mur- und Lawinenschuttes wird aber dauerhaft sedimentiert und bildet die bekannten Halden und Kegelformen aus.

Der Vergleich zwischen fluvialen Hangabtrag und der Formung durch Muren und Lawinen im Kesselbachtal zeigt, daß gravitativ-denudative Prozesse größere geomorphodynamische Wirkungen am Hang besitzen als die vergleichsweise unbedeutende fluviale Erosion. Dies trifft auch dann noch zu, wenn man die größeren Rekurrenzintervalle von Muren und Lawinen berücksichtigt. Aufgrund langjähriger Messungen der Schneedeckenentwicklung im Lainbachgebiet (Entfernung ca. 20 km) ist der Winter 1991/92 durch außergewöhnlich große Schneerücklagen im Frühjahr mit der Folge von Lawinenabgängen gekennzeichnet. Es ist mit einer Wiederkehrperiode von etwa 20-30 Jahren zu rechnen. In ähnlicher Größenordnung ist die murauslösende Niederschlagsintensität einzuordnen.

### 3.3 Zur Herkunft der Feststoffe im Kesselbach

Als Erklärung für hohe Feststoffausträge aus dem Kesselbachtal können gravitative Hangformungen aber nur dann herangezogen werden, wenn bei Hochwassern mit Sedimenttransport nachgewiesen wird, daß das Liefergebiet der fluvial transportierten Feststoffe im Bereich der Lawinen- und Murablagerungen (Rethalmen) liegt.

Messungen der Feststoffführung im Kesselbach während eines kräftigen Landregens (51 mm/26 h) ergaben, daß die Feststoffkonzentration im Kesselbach unmittelbar unterhalb der Rethalmen noch gering war, was mit den an den Testflächen parallel gemessenen Abtragsraten übereinstimmt. In der flußabwärts folgenden 1,5 km langen Laufstrecke im zentralen Teil des Kesselbachtals nimmt der



Abfluß um 40% zu, die Feststofftransporte steigen aber um 400%. Dies trifft auch auf die Abflüsse aus dem nördlichen Talbereich (Rotwandalmen, vgl. Abb. 2) zu. Damit kann belegt werden, daß der überwiegende Teil der Feststoffe nicht von den Hängen stammt, sondern aus den großen Gerinnen selbst aufgenommen wird, die sich hier tief in die anstehenden Kössener Schichten eingeschnitten haben. Auch die an den Testflächen in diesem Teil des Einzugsgebietes gemessenen Feststoffkonzentrationen lagen alle unter denen der Vorfluter.

Zweifel bleiben hinsichtlich der Bedeutung langsamer gravitativer Hangbewegung, die über einen Zeitraum von wenigen Jahren nicht nachweisbar sind. Hangunterschneidungen durch Lateralerosion können diese Massenbewegungen zumindest verstärken oder sogar auslösen. CHORLEY et al. (1984) nehmen für humide Mittelbreiten 1-2mm/a Hangbewegung an. Kriechbewegung sind danach fünf- bis zehnmal wichtiger als Flächenspülungen in vollständig bewachsenen Regionen. Diese Aussage trifft sicherlich auch für das Untersuchungsgebiet zu, da Flächenspülung auch bei extremen Niederschlagsintensitäten in den Alpen kaum auftritt und keine geomorphologische Bedeutung besitzt (BECHT 1991). Über den Einfluß von Kriechprozessen auf die Feststoffführung im Kesselbach sagt dies noch nichts aus. Es bleibt zunächst festzustellen, daß die Kartierungen keinen Hinweis auf starke Hangbewegungen ergaben. Ein Nachweis über Stärke und Verbreitung langsam verlaufender flachgründiger Hangbewegungen kann erst durch langfristig angelegte Meßkampagnen erbracht werden.

#### **4. Aktuelle Entwicklung der Talformen im Kesselbachgebiet**

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, daß die im Landschaftsbild des Kesselbachgebietes heute dominierende Kerbtalform aufgrund starker Feststoffaufnahmen infolge Erosion im Gerinne rezent weitergebildet wird. Vor allem im Unterlauf ist daher ein konvexes Hangprofil (vgl. Abb. 9) entwickelt, während die starke Schuttfuhr durch Muren und Lawinen im Oberlauf zu geringeren Eintiefungen des Kesselbaches führen. Im Längsprofil (vgl. Abb. 10) zeigt sich hier eine Verflachung, in der eine kleine Schuttakkumulation (Gries) liegt. Die Hänge im Bereich der Rethalmen sind wenig linear zerschnitten, da denudative Abtragsprozesse dominieren.

Im Kesselbachgebiet werden in den Gerinnen derzeit nur kleine temporäre Feststoffdeponien aufgebaut, da die fluvialen Transporte in den Bächen nicht nur ausreichen, das Lockermaterial zu transportieren, sondern außerdem zu erodieren.

Vergleicht man die Untersuchungsergebnisse aus dem Kesselbachtal mit Messungen am Alpenrand oder in den Zentralalpen (BECHT 1994), dann ist festzustellen, daß mit Abnahme der Niederschläge vor allem die Höhe des Feststoffaustrags zurückgeht. So kommt es in Einzugsgebieten der Zentralalpen mit geringem Gletscheranteil überwiegend zu Akkumulation im Gebiet selbst. Die Täler wer-

den langsam mit Schutt angefüllt, worauf schon POSER (1954) aufgrund von Beobachtungen im Zemmgrund hinwies. Einen Sonderfall stellen Einzugsgebiete großer Gletscher dar, da der starke sommerliche Schmelzwasserabfluß keine Deposition in den Gerinnen zuläßt.

## Dank

Der Autor möchte der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die gewährte finanzielle Förderung danken. Der Dank gilt aber auch der Tiroler Wasserkraftwerke AG sowie den Bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltungen für die großzügige Unterstützung der Arbeiten. Ohne die tatkräftige Hilfe von Studierenden wären die umfangreichen Arbeiten nicht durchführbar gewesen.

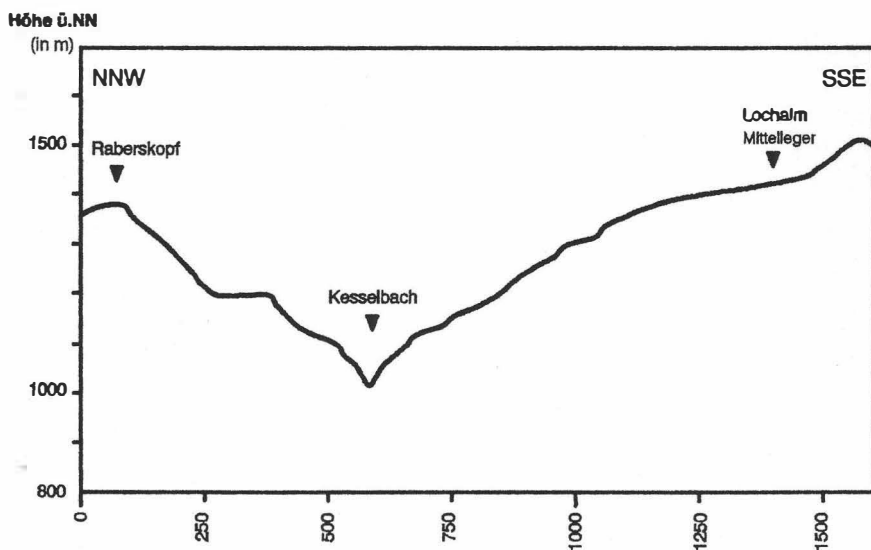


Abb. 9: Querprofil durch das Kesselbachtal (Verlauf der Profillinie N-S)

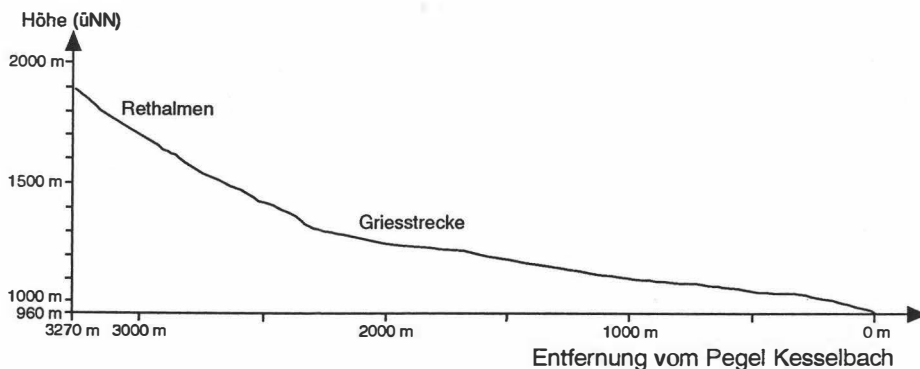


Abb. 10: Längsprofil durch das Kesselbachtal

## 5. Zusammenfassung

Im Einzugsgebiet des Kesselbaches (Vorkarwendel) werden aktuelle geomorphologische Prozesse auf Testflächen an alpinen Hängen gemessen. Die Auswahl der Flächen sowie die Überprüfung ihrer Repräsentativität für das Gesamtgebiet erfolgt mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems. Durch den Vergleich des Hangabtrags mit dem Gebietsaustrag werden Erkenntnisse über den Sedimenthaushalt gewonnen. Voraussetzung dafür ist, daß der auf Testflächen gemessene Hangabtrag mit dem GIS flächengewichtet auf das Einzugsgebiet übertragen wird. Die rezente Formung am Hang wird dominiert durch gravitative Prozesse (Lawinen, Muren), die die Tiefenlinien nur selten erreichen. In den Gerinnen der Täler tritt starke Erosion auf, die dazu führt, daß in der Feststoffbilanz der Gebietsaustrag den Hangabtrag um mehrere Größenordnungen überwiegt. Die Kerbtäler werden aktuell kräftig weitergebildet.

## 6. Summary

**Michael Becht: Research into the Current Development of the Landscape of an Alpine Catchment Area Using a Geographical Information System. The Example of the Kesselbach Valley in the Vorkarwendel, Tyrol**

Current geomorphic processes were monitored on small test sites on Alpine slopes in the catchment area of the Kesselbach. The test sites were selected by means of a GIS in order to assure their representativeness for the whole drainage basin. By comparing the amount of slope erosion with the sediment yield of the catchment area of the Kesselbach additional information about the sediment budget was obtained. As a prerequisite a GIS-based projection of the recorded slope erosion data for the test sites for the entire catchment area was necessary based on the surface classification of the test sites. At present processes on the slopes are predominantly gravitational (avalanches, debris flows). They rarely reach the valley floor. Fluvial erosion in the channels is marked. Therefore, the sediment yield exceeds the slope erosion by several orders of magnitude. The processes that have led to the formation of V-shaped valleys are still active.

## 7. Literaturverzeichnis

- BECHT M. (1989), Suspended sediment load yield of a small alpine drainage basin in Upper Bavaria. In: Catena, Suppl.-Bd. 15, S. 329-342.
- BECHT M. (1991), Auswirkungen und Ursachen von Katastrophenhochwassern in kleinen, alpinen Einzugsgebieten. In: Zeitschr. f. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 89, S. 49-61.
- BECHT M. (1994), Untersuchungen zur aktuellen Reliefentwicklung in alpinen Einzugsgebieten. Habilitationsschrift, Fakultät f. Geowiss. d. Univ. München.

- BOVIS M.J. (1978), Soil loss in the Colorado Front Range: Sampling design and areal variation. In: Zeitschr. f. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 29, S. 10-21.
- CHORLEY R.J., SCHUMM S.A., SUGDEN D.E. (1984), Geomorphology. London, New York.
- DEDKOV A.P., MOSZHERIN V.I. (1992), Erosion and sediment yield in mountain regions of the world. In: IAHS, Nr. 209, S. 29-36.
- DÜRR E. (1970), Kalkalpine Sturzhalde und Sturzschuttbildungen in den westlichen Dolomiten. In: Tübinger Geogr. Stud., Heft 37. Tübingen.
- FISCHER K. (1967), Erdströme in den Alpen. In: Mitt. d. Geogr. Ges. München, Bd. 52, S. 231-246. München.
- FLIRI F. (1975), Das Klima der Alpen im Raume Tirol (= Monogr. z. Landeskunde Tirols, Folge 1). Innsbruck.
- HAGEDORN J. (1979), Klimabedingte Relieftypen und aktuelle Formungsregionen der Erde. In: 42. Deutscher Geographentag Göttingen. Tagungsber. u. wiss. Abh., Wiesbaden 1980, S. 50-64.
- HAGEDORN J. (1980), The mountain periglacial zone and its morphological lower limits. In: Zeitschr. f. Geomorph. N.F., 36, S. 96-103.
- HEUBERGER H. (1966), Gletschergeschichtliche Untersuchungen in den Zentralalpen zwischen Sellrain und Ötztal. In: Wiss. Alpenver., Heft 20. Innsbruck.
- HÖLLERMANN P.W. (1964), Rezente Verwitterung, Abtragung und Formenschatz in den Zentralalpen am Beispiel des oberen Suldentales (Ortlergruppe). In: Zeitschr. f. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 4. Berlin.
- HÖLLERMANN P.W. (1976), Probleme der rezenten geomorphologischen Höhenstufung im Rahmen einer vergleichenden Hochgebirgsgeographie. In: Tagungsber. u. Wiss. Abh. 40. Deutscher Geographentag Innsbruck 1975, S. 61-75. Wiesbaden.
- HÖLLERMANN P.W., POSER H. (1977), Grundzüge der räumlichen Ordnung in der heutigen periglazialen Höhenstufe der Gebirge Europas und Afrikas. In: Abh. d. Akad. d. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. 3, 31, S. 333-354.
- HOFER B., KLEIN W. (1992), The diversion system Bächentalbarrage/captation Kesselbach of the Achensee power plant. In: Münchener Geogr. Abh., Bd. B16, S. 49-58. München.
- KARRASCH H. (1977), Die klimatischen und aklimatischen Varianzfaktoren der periglazialen Höhenstufe in den Gebirgen West- und Mitteleuropas. In: Abh. d. Akad. d. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl. 3, 35, S. 310-327.
- LEHRE A.K. (1981), Sediment budget of a small California Coast Range drainage Basin. In: Int. Association of Hydrological Sciences, Publ. No. 132, S. 123-140.
- MILLER H. (1992), Geologische Karte des Kesselbachgebietes. Zusammenfassung von Diplommkartierungen am Inst. f. Allgem. u. Angew. Geologie der LMU, München, unveröff.
- OWENS P.H., SLAYMAKER O. (1992), Late Holocene sediment yields in British Columbia. In: IAHS, 209, S. 147-154.
- POSER H. (1954), Die Periglazial-Erscheinungen in der Umgebung der Gletscher des Zemmgrundes (Zillertaler Alpen). In: POSER H. (Hrsg), Studien über die Periglazial-Erscheinungen in Mitteleuropa (= Göttinger Geogr. Arb., Bd. 15), S. 125-180.
- WALLING D. (1983), The sediment delivery problem. In: Journ. Hydrology, 69, S. 209-237.
- WETZEL K.-F. (1992), Abtragungsprozesse an Hängen und Feststoffführung der Gewässer. Dargestellt am Beispiel der pleistozänen Lockergesteine des Lainbachgebietes (Benediktbeuern/Obb.). In: Münchener Geogr. Abh., Bd. B17. München.
- WOLF H.v. (1922), Beiträge zur Kenntnis der eiszeitlichen Vergletscherung des Achenseegebietes in Tirol. München.