



universität
wien

Diplomarbeit

Titel der Diplomarbeit

„Energetische Ansätze in der Hochgebirgsgeomorphologie“

Verfasser

Andreas Schubert

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer.nat)

Wien, 2008

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt:

453 Geographie (Stzw)

Betreuer:

Univ. Prof. Dr. Lothar Schrott

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	3
2. GESCHICHTLICHER ÜBERBLICK ÜBER ENERGETISCHE ANSÄTZE IN DER PHYSISCHEN GEOGRAPHIE	5
2.1. KINETISCHE UND POTENTIELLE ENERGIE.....	8
3. GRUNDSÄTZLICHES ÜBER ARBEIT IM PHYSIKALISCHEN SINN	14
3.1 NEWTON'SCHE AXIOME.....	16
4 GEOMORPHOLOGISCHE ARBEIT ALS MÖGLICHKEIT VERSCHIEDENE EROSIONSPROZESSE MITEINANDER ZU VERGLEICHEN (BESONDERS IM HOCHGEBIRGE).....	19
4.1 GEOMORPHOLOGISCHE ARBEIT	20
4.2 BEISPIELE DER ANWENDUNG DES PRINZIPS DER GEOMORPHOLOGISCHEN ARBEIT AUS DER LITERATUR.....	25
5. DAS SYSTEMKONZEPT IN DER GEOMORPHOLOGIE.....	31
5.1 DIE VERFÜGBARE LEISTUNG FÜR GEOMORPHOLOGISCHE VERÄNDERUNGEN	35
5.2 DIE SONNENSTRAHLUNG.....	36
5.3 ATMOSPHÄRISCHE ENERGETIK.....	40
5.4 ROTATIONSENERGIE DES ERDE-MONDSYSTEMS.....	49
5.5 INTERNE ERDWÄRME	51
6. GEBIRGSGEOMORPHOLOGIE	53
6.1 KRITERIEN EINES HOCHGEBIRGES	54
6.2 4 HAUPTRELIEFTYPEN INNERHALB DER HOCHGEBIRGSSYSTEME.....	56
6.3 TYPOLOGIE DER GEBIRGSGEOMORPHOLOGIE.....	57
6.3.1 <i>Historische Gebirgsgeomorphologie</i>	57
6.3.2 <i>Funktionale Gebirgsgeomorphologie</i>	59
6.3.3 <i>Angewandte Gebirgsgeomorphologie</i>	63
7. BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES	64
7.1 GEOLOGIE DES WETTERSTEINGEBIRGES.....	67
7.2 DER TEKTONISCHE BAU	70
8 BESCHREIBUNG DER EINZELNEN SEDIMENTSPEICHER.....	71
8.1 SCHUTTHALDEN	71
8.2 SCHWEMMFÄCHER	72
8.3 FELSSTURZ/BERGSTURZ.....	72
8.5 MUREN	74
8.6 ERDFLIEßEN.....	75
8.7 KRIECHDENUDATION (VERSATZDENUDATION).....	75
9 VERGLEICH DER EINZELNEN EROSIONSVORGÄNGE BZW. SPEICHERTYPEN IM HINBLICK AUF GEOMORPHOLOGISCHE ARBEIT.....	77
9.1 GEOMORPHOLOGISCHE AKTIVITÄT IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	84
10. ZUSAMMENFASSUNG	88
11. QUELLENVERZEICHNIS	90
12. ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	93
13. TABELLENVERZEICHNIS	94

1. Einleitung und Zielsetzung

Energetische Ansätze in der Geomorphologie bzw. in der Physischen Geographie sind bisher nur in sehr kleinem Ausmaß zur Anwendung gekommen. Die Motivation für diese Arbeit leitet sich aus dem Engagement der SEDAG (Bündelprojekt „Sedimentkaskaden in alpinen Geosystemen“) und der mir, von Prof. Lothar Schrott gebotenen Möglichkeit mich mit dieser Thematik in Form einer Diplomarbeit auseinandersetzen.

Es wurde in einem kleinen alpinen Tal in den bayrischen Kalkalpen dem sog. Reintal die räumliche Verteilung der einzelnen Sedimentspeicher, ihre Mächtigkeiten sowie ihre Bedeutung im Bezug auf den paraglazialen Sedimentationszyklus untersucht. Im Anschluss daran wurden Daten über die verrichtete geomorphologische Arbeit berechnet, mit denen ich mich im Laufe dieser Arbeit noch auseinandersetzen werde. Durch Berechnung von Werten der geomorphologischen Arbeit besteht die Möglichkeit verschiedenste geomorphologische Prozesse zu vergleichen, was früher aufgrund unterschiedlicher Einheiten und Angaben nicht ohne weiteres möglich war. Schon im Jahre 1957 beschäftigte sich Jäckli im bündnerischen Rheingebiet mit energetischen Ansätzen. Bis zum Jahr 2000 folgten 12 weitere wissenschaftliche Arbeiten und Artikel, wobei es sich dabei um Arbeiten aus den unterschiedlichsten Bereichen der Geomorphologie handelt. Daran erkennt man sehr deutlich, dass energetische Ansätze ein weit gestreutes Anwendungsgebiet besitzen.

Die Aufsätze von Nel Caine aus den Jahren 1974 und 1976 nahmen dann als erste Bezug auf den Begriff der geomorphologischen Arbeit, der in den folgenden Jahren aber doch nur vereinzelt (Dietrich Barsch 1981, Nel Caine 1986, Jeff Warburton 1993, Gregory 2000) weiterverfolgt wurde. Dieser energetische Ansatz hat den Vorteil, dass verschiedene geomorphologische Prozesse zwischen unterschiedlichen Einzugsgebieten miteinander verglichen werden können. Obwohl es mittlerweile unbestritten ist, dass ein solcher Ansatz interessante Perspektiven eröffnet, wurde ein solcher nur vereinzelt aufgegriffen, wie schon vorher erwähnt von Nel Caine, aber auch Dietrich Barsch und Jeff Warburton.

Ziel dieser Arbeit ist es den aktuellen Wissensstand und verfasste Aufsätze im Bereich energetischer Ansätze aufzuzeigen, und im weiteren einen Ausblick auf mögliche zukünftige Anwendungsbereiche des energetischen Ansatzes zu geben. Es soll auch

versucht werden, mit den bereits berechneten Werten der geomorphologischen Arbeit aus dem Reintal verschiedenste Analysen durchzuführen, umso weitere neue Erkenntnisse zu erlangen.

2. Geschichtlicher Überblick über Energetische Ansätze in der Physischen Geographie

Um Energetische Ansätze in der Physischen Geographie besser zu verstehen ist es wichtig, kurz einen geschichtlichen Überblick, besonders wie das Verständnis der Menschen über die Variable Kraft in Beziehung zu unserer Natur war, zu geben.

Die naturräumliche Forschung im 16 bzw. 17 Jh. war der Auffassung, dass Wissenschaft das Ziel hatte, durch Erforschung des Planeten ihn für die Menschheit besser nutzbar zu machen.¹

Kraft brachte man immer in Beziehung zu menschlichen Aktivitäten, und den Auswirkungen die diese auf die Natur haben könnten. Der Kraft die von der Natur selbst ausgeht, wurde zu dieser Zeit noch weniger Beachtung geschenkt.

Für die Physische Geographie, die als vergleichsweise junge Wissenschaft gilt, war das Hauptanliegen in der ersten Hälfte des 20 Jh. die Erforschung der Entwicklung der Landschaften, d.h. durchwegs rein geomorphologische Themenbereiche.

Ab der Mitte des 20 Jh. wurden diese wissenschaftlichen Bestrebungen durch die sog. Quantitative Revolution (Übergang von einer idiographischen zu einer nomothetischen Wissenschaftstheorie²) ergänzt und es ergaben sich 6 Themenbereiche, die man aus den Arbeiten und Bestrebungen der einzelnen Physiogeographen ableiten konnte¹.

Ein erster Themenbereich beschäftigt sich mit der Entwicklung unserer Umwelt im Allgemeinen. Besonderen Aufschwung gab es durch die Entwicklung sehr genauer Datierungsmethoden¹. Der zweite Bereich schließt direkt an den ersten an, und erforscht die Prozesse, die in der Natur vorkommen¹.

In den späten 60er Jahren entwickelte sich der dritte Themenbereich, welcher sich mit den Einflüssen des Menschen auf die physische Umwelt beschäftigt.¹

Der vierte Bereich entstand aufgrund der Entwicklung des so genannten „system approach“³, und ging der Frage nach, ob er als Hauptparadigma der Physischen Geographie gelten könne.

¹ vgl. Gregory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S 1f

² vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Nomothetik> (Stand 9. Oktober 2008 15 Uhr 40)

³ vgl. Chorley, R.J., Kennedy, B.A., 1971. Physical Geography: A Systems Approach. Prentice-Hall International, London. 370 S.

Zusätzlich zu diesen vier Bereichen, entwickelten sich in den letzten Jahren noch zwei weitere Arbeitsbereiche.¹ Ein fünfter entstand durch wiederentdecktes Interesse an der Interpretation von zeitlichen Änderungen der physischen Umwelt. Dieses Interesse wurde zusätzlich noch durch neue konzeptuelle Methoden bzw. durch ein besseres Verständnis der Prozesse in unserer Umwelt verstärkt.¹ Ein sechstes Thema ist die verstärkte Entwicklung der angewandten Physischen Geographie.¹ Natürlich wurde immer gehofft, dass Physische Geographie Anwendung findet, aber die wirklich brauchbaren und anwendbaren Ergebnisse der Forschung waren eher zufällig. Aber jetzt werden sich Physiogeographen immer mehr bewusst, welchen Beitrag sie zu naturwissenschaftlicher Forschung bzw. zum Umweltmanagement leisten können¹. Physische Geographie ist jetzt an dem Punkt angelangt, wo man erkennt, dass es durchaus Vorteile hat einen gemeinsamen Ansatz herauszuarbeiten. Es ist schon möglich mit sechs vorherrschenden Themen zu arbeiten, aber man sollte versuchen, Verbindungen zwischen diese herzustellen. Möglicherweise ist die Entwicklung einer stärker zusammengeschlossenen Physischen Geographie die Möglichkeit die Umwelt der Erdoberfläche besser zu verstehen, und mehr öffentliches Interesse auf sich zu ziehen.¹

Es wird nun vorgeschlagen, dass Kraft (die Rate Arbeit zu verrichten) einen umfassenden Ansatz liefern könnte, und die zuvor genannten Themenbereiche erweitern könnte.¹ Besonders bei der Untersuchung der verschiedensten Prozesse, die in der Physischen Geographie mit den einzelnen Sphären, wie z.B. Atmosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre usw. in Verbindung gebracht werden, wäre es erwünschenswert einen Ansatz zu finden der für alle Bereiche gültig wäre, und über ein bloße Energiebilanz hinausgehen würde.¹

Wie schon in der Einleitung erwähnt ist die energetische Dimension in der Physischen Geographie bis heute im Vergleich zu anderen Bereichen sehr spärlich behandelt worden, aber dennoch hat es einige wichtige Beiträge zu diesem Thema gegeben. Die Abbildung auf der folgenden Seite gibt einen zeitlichen Überblick über bisher erschienene Publikationen, und die schraffierte Linie beschreibt die kumulative Summe der Werke.

¹ vgl. Gregory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 2f



Abb.1: Quelle: Gregory, 1987

Wenn man einen Rückblick auf Energetik innerhalb der Physischen Geographie vornimmt, wird deutlich, dass energetische Ansätze zuerst im Bereich der Meteorologie und Klimatologie Anwendung fanden. Durch die Energiebilanz konnte sich die Geographie dem Forschungsfeld der Atmosphäre annähern.¹

Eine Reihe namhafter Wissenschaftler nahm diesen Ansatz auch in ihre Arbeiten und Bestrebungen auf (F.K. Hare 1953, Budyko 1956).¹

In der Geomorphologie wurde der energetische Ansatz hauptsächlich auf spezifische und einzelne Problemstellungen angewandt. Leopold und Langbein (1962) und J.T. Andrews (1972) seien hier kurz erwähnt.¹

Einer der bedeutendsten Beiträge zur Anwendung des energetischen Ansatzes kam von Nel Caine 1976. Er versuchte die Physische Arbeit, die von verschiedenen Sedimentbewegungen in Colorado und in Schweden freigesetzt wurde in Joule auszudrücken.¹

Auf diesen wichtigen Aufsatz werde ich auch noch im weiteren Verlauf meiner Arbeit eingehen, da er ganz entscheidende Ansätze beinhaltet.

2.1. Kinetische und Potentielle Energie

Zum ersten Mal wurden die Begriffe von kinetischer und potentieller Energie von Leibnitz 1686 erwähnt, so richtig definiert wurden sie allerdings erst 1830 von Hamilton. Seither ist $PE + KE$ als die Hamilton'sche mechanische Energie bekannt.²

Thermodynamik:

Im frühen 19. Jahrhundert erkannte Sadi Carnot die physikalische Größe Arbeit, definiert als Kraft mal Weg, und auch Wissenschaftler wie Joule zeigten, dass man Wärme als Form von Energie ansehen musste, in welche mechanische Energie umgeformt werden könnte und umgekehrt. Carnots Arbeit war die Grundlage für die Thermodynamik und für das zweite thermodynamische Gesetz.¹

„Druck, Volumen, chemische Zusammensetzung und Temperatur sind die klassischen physiochemischen Parameter, im Hinblick auf die Definierung von makroskopischen

¹ vgl. Gregory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 8

² vgl. Gregory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 11

Systemen, und Thermodynamik ist die Wissenschaft von allen mit Energieumsetzungen verbundenen Vorgängen“¹.

Die klassische Thermodynamik verknüpft ausgehend von 3 grundlegenden Postulaten, den 3 Hauptsätzen der Thermodynamik, verschiedene, der Messung unmittelbar zugängliche Eigenschaften der Materie, wie Druck, Temperatur, Volumen, spez. Wärme oder geleistete Arbeit. Ihre Aussagen beziehen sich lediglich auf Gleichgewichte, geben also keine Auskunft, wie schnell diese Zustände erreicht werden.

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungssatz) ist, wie die übrigen Hauptsätze, auch nicht beweisbar, sondern die Formulierung von Erfahrungstatsachen und basiert z.B. auf der Beobachtung, dass sich die mechanische Energie, die man einer Flüssigkeit durch Rühren zuführt, in Form von Wärme wieder findet.² Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik macht Aussagen über die Richtung des freiwilligen Wärmeflusses und seine Folgen. Der 3. Hauptsatz ist der Wärmesatz, nach dem die Entropie von Reinstoffen im Gleichgewicht mit sinkender Temperatur gegen Null strebt.²

1865 begründete R.J.E. Clausius das Konzept der Entropie, eine makrophysikalische Zustandsgröße thermodynamischer Systeme, die technische Bedeutung für die Berechnung von Wärmekraftmaschinen (Wirkungsgrad besitzt).² Mit Hilfe der Entropie lässt sich der Teil der Wärmeenergie berechnen, der wegen seiner gleichmäßigen Verteilung auf alle Moleküle des Systems nicht in mechanische Arbeit umgesetzt werden kann.²

„Diese Entwicklungen des 19 Jh. wurden in der Erforschung unserer Umwelt in der Mitte des 20 Jh. bestätigt.“¹

¹Gregory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 11

²vgl Der große Brock Haus in zwölf Bänden (1980), achtzehnte völlig neu bearbeitete Auflage, Elfter Band STAD-VEJ, F.A. Brockhaus, Wiesbaden

2.2. Energetische Konzepte in der Geographie

So kam es schon vor einigen Jahrzehnten zu Überlegungen zu einer so genannten „Geography of energy“.¹ Linton (1965) meinte, dass Veränderungen in unserer Umwelt auf ein Verrichten von Arbeit zurückzuführen sind, und somit Energie verbrauchen.¹

Er identifizierte 4 Energiequellen:²

- Strahlungsenergie von der Sonne
- Energie aus dem Erdinneren
- Rotationsenergie der Erde
- Vitalenergie

Somit fand das Konzept von Watt und Kalorie Anwendung in der Physischen Geographie. Energieaustausch in der Atmosphäre, Energietransfers und Energieprozesse wurden in Zusammenhang gebracht. Die Erforschung der Energie wurde auf die Atmosphäre, Pflanzen- und Bodenbedeckung, Energieerhaltung und auf den Feuchtigkeitsaustausch angewandt. Auf der Suche nach vereinheitlichten Themen für Physio- und Humangeographie wurde auf Untersuchungen zur Energie zurückgegriffen.

In ihrem Buch „Energy basis for the man and nature“ stellten H.T. und E.C. Odum die Regel auf, dass alles auf Energie aufbaut, und dass Energieflüsse in Ökosystemen sowohl kulturelle als auch natürliche Komponenten beinhalten.² Zusätzlich zu Definitionen von Energie wie zum Beispiel Kraft als die Rate bei welcher Energie fließt, schlagen sie 3 Prinzipien von Energieflüssen in ihrem Buch vor:¹

- Gesetz der Energieerhaltung
- Gesetz der Verringerung der Energie
- Prinzip das Systeme, welche die Energie am besten verwerten, solche sind die überleben = Maximale Kraftprinzip bzw. minimale Kraftaufwandprinzip

Energetik wurde auf 3 Arten angewendet:³

¹vgl. Gregory; K.J. (1987) „The Power of nature – energetics in physical geography“, in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 5

²vgl. Gregory; K.J. (1987) „The Power of nature – energetics in physical geography“, in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 11

³vgl. Gregory, K.J. (2000). „The changing nature of Physical Geohraphy“, (Arnold, London) S.98f

- Operational
- Methodologisch
- Konzeptionell

In der operationalen Bedeutung wird Energie als Basisgröße aufgefasst, die verwendet wird, um die zeitlichen und räumlichen Größen von Ereignissen resultierend von ihren Anwendungen, zu erklären; die Wirkungsgrade ihrer Umformung; und ihre Anwendung für das Management der Physischen Umwelt.¹

In der Methodologischen Bedeutung wird Energetik als Instrumentarium verwendet, um Information über die Physische Umwelt in einer brauchbaren Weise zu gliedern. Die meist gebräuchliche Form ist hier die Energiebilanz.¹

Von Konzeptioneller Bedeutung spricht man, wenn Energieumwandlungen als Basis für Konzeptualisierung von Prozessen oder Zuständen verwendet werden, basierend auf allgemeinen Prinzipien von Kraftaufwand.¹

Energie kann als die Kapazität Arbeit zu verrichten angesehen werden. „Die Menge an verfügbarer Energie in einem bestimmten Teil unserer physischen Umwelt beeinflusst die Arbeit die verrichtet werden könnte, und somit auch die potentielle Kraft die verfügbar ist.“²

„Hierzu sollte man sich überlegen ob es möglich ist, Arbeit in Form von Joules (J) und Kraft in Form von Watt (W) für alle Aspekte des Umweltsystems auszudrücken. Solch eine Ausdrucksform könnte eine brauchbare standardisierte Möglichkeit liefern, um sich Energie im Umweltsystem vorzustellen.“³

Folgende Tabelle gibt einen kurzen Überblick über verschiedene Ereignisse mit ihren jeweiligen Werten in Joule. Die dritte Spalte gibt Auskunft darüber wie oft man den

¹ vgl. Gregory, K.J. (2000). "The changing nature of Physical Geohraphy", (Arnold, London) .S. 100

² Greogory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 18

³ Greogory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 19

Wert der sog. Wärmeverlustenergie der Erde multiplizieren müsste, um den jeweiligen Wert zu erhalten.

Table 1.4 Work in specific aspects of physical environment

World solar radiation	$15.5 \times 10^{21} \text{ J day}^{-1}$	3 263 158 ×
World internal energy lost	$2.74 \times 10^{18} \text{ J day}^{-1}$	5768 ×
Volcanic eruptions		
Krakatoa, Indonesia (1883)	$1.0 \times 10^{18} \text{ J}$	2105 ×
Mount St Helens, USA (1980)	$2 \times 10^{16} \text{ J}$	105 ×
Landslides		
Flims, Grisons, Switzerland (10 000 BC)	$3.5 \times 10^{17} \text{ J}$	737 ×
Huascaran, Peru (1970)	$2 \times 10^{15} \text{ J}$	4.2 ×
Thermal waste power of world		
1970	$4.75 \times 10^{14} \text{ J day}^{-1}$	1
2000	$27.48 \times 10^{14} \text{ J day}^{-1}$	5.8 ×

Abb.2: Quelle: Gregory, 1987

„Solche Vergleiche beinhalten natürlich eine gewisse Anzahl von Vermutungen, aber sie geben dennoch einen Überblick über die Größenordnungen der verfügbaren Energie und verrichteten Arbeit.“¹ „Man muss allerdings bedenken, dass es in der physischen Umwelt nicht immer leicht ist, Schätzungen über Arbeit und Kraft zu erhalten, da Arbeit die Beinhaltung der Distanz und deswegen die räumliche Dimension benötigt, und Kraft beinhaltet die zeitliche Dimension als Basis für die Berechnung verrichteter Arbeit per Zeiteinheit.“¹ Aus Schätzungen der weltweiten Energieflüsse war es möglich Diagramme zu erstellen, um sich ein Bild der Größenordnungen der einzelnen Energieflüsse zu machen. Daraus ist sofort ersichtlich, dass es große Unterschiede gibt. Als weltweit größte Energiequelle, sticht natürlich die Strahlungsenergie der Sonne hervor.²

Betrachtet man das Universum als Ganzes, so ist die Gravitation die vorherrschende Energieform, die bei weitem bedeutender als Wärme, Licht und Nuklearenergie ist.³ Wie schon vorher erwähnt, ist in unserem geomorphologischen System Solarstrahlung die primäre Energiequelle, die wiederum ein Produkt der Gravitationskräfte ist, welche die Kernfusion der Sonne aufrecht erhalten. Die Energie, die die Erde von der Sonne erhält ist beinahe konstant, allerdings variiert die Verteilung dieser Energie über der Erdoberfläche sehr stark.³ Die Sonne emittiert Strahlung in einem Wellenbereich, die man am besten mit einem perfekt strahlendem schwarzem Körper bei einer absoluten

¹ Gregory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S.20

² vgl. Gregory; K.J. (1987) "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S.20

³ vgl. Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.20f

Temperatur von 6000K vergleicht. Eine wichtige Rolle spielt die Atmosphäre als Temperaturregulator. Hätte die Erde keine Atmosphäre, und würde sie all die Strahlungsenergie der Sonne sofort wieder emittieren, würde auf der Erdoberfläche eine Temperatur von 255K (-18°C) herrschen.¹ Die tatsächliche Erdoberflächentemperatur beträgt allerdings 15°C, ein Produkt aus atmosphärischer Absorption und Rückstrahlung, der so genannte „Glashauseffekt. Man darf allerdings den Einfluss von steigendem CO² Gehalt und Wasserdampf der Atmosphäre nicht unterschätzen, die eine große Auswirkung auf die Erdoberflächentemperatur der Erde haben können.

„Solarstrahlung, großteils im sichtbaren und nahen Infrarotbereich, liefert ungefähr 99,9 % der Energie, die in unser geomorphologisches System zugeführt wird. Ca. 30 % der Solarstrahlung wird sofort wieder reflektiert, großteils durch Wolken. Einiges an reflektierter Energie wird in thermische Bewegung der Luft, Wasser und Mineralmoleküle als sensibler Wärmestrom umgewandelt. Sie erwärmen den Planeten, aktivieren chemische, physikalische und biologische Prozesse.

Der größte Teil wird als latente Wärme der Verdunstung durch das reichlich vorhandene Oberflächenwasser der Erde absorbiert, und wird als Wasserdampf in der Atmosphäre weitertransportiert, bis es zur Kondensation kommt.

Viele kleine Anteile der Energie werden direkt zu kinetischer Energie von Luft und Wassermassen umgewandelt, die wiederum konvektive und advective Strömungen in der Atmosphäre und Ozean hervorrufen, oder durch photosynthetisch aktive Pflanzen absorbiert werden. Nur ein kleiner Teil der Energie führt zu geomorphologischen Prozessen.“² Solarstrahlung ist der Hauptenergieträger für geomorphologische Vorgänge, trotzdem dürfen die anderen Quellen nicht vernachlässigt werden. Dazu gehören die Gravitations- und Trägheitskräfte die man in Verbindung mit der Masse und Bewegung der Erde, des Mondes, der Sonne und anderen Objekten unseres Sonnensystems bringt. Diese Kräfte machen sich auf unserer Erdoberfläche in Form von Gezeiten sowohl in der Lithosphäre, als auch der Hydrosphäre bemerkbar.¹

Ein Ziel der Geomorphologie ist es zu verstehen, wie die enorme Energie der solaren Strahlung in mechanische Arbeit, welche die Landoberfläche formt, umgewandelt wird.

¹ vgl. Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.23

² Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.22

3. Grundsätzliches über Arbeit im physikalischen Sinn

Nachdem ich schon einen kurzen Einblick über die weltweiten Energiequellen gegeben habe, ist es nun notwendig die physikalischen Prinzipien, und ihre Einflüsse auf die geomorphologischen Prozesse zu erläutern.

Wichtige Begriffe sind die sog. potentielle und kinetische Energie. „Sobald ein Objekt Arbeit verrichten kann besitzt es Energie. Somit kann z.B. ein Fluss Arbeit verrichten, indem er Geröll auf der Flusssohle mittransportiert. Kinetische Energie wird dadurch verbraucht, wobei das Geröll einen gewissen Widerstand gegen das Strömen des Flusses darstellt. Ein bewegter Geröllbrocken besitzt auch kinetische Energie, die man als das Produkt seiner Masse mit der Hälfte seiner Geschwindigkeit zum Quadrat ausdrücken kann.“¹

$$KE=1/2mv^2^1$$

Das Gegenstück zur kinetischen Energie ist die sog. potentielle Energie. Aufgrund der Gravitation besitzt jedes Objekt auf der Erdoberfläche potentielle Energie. Wird z.B. ein Felsbrocken hangabwärts bewegt, wird diese potentielle Energie frei.²

$$PE=mgh^2$$

Wobei m für die Masse des Körpers, g für die Erbeschleunigung ($9,81\text{m/s}^2$) und h für den vertikalen Abstand zwischen dem Objekt und dem tiefsten Punkt wohin es sich bewegen kann steht.²

Um richtig verstehen zu können was Kräfte bedeuten, muss man die 3 Grundeinheiten Masse, Länge und Zeit näher kennenlernen. Masse wird fälschlicherweise oft mit dem Gewicht gleichgesetzt, das allerdings von der Erdanziehungskraft abhängig ist, die wiederum nicht überall gleich groß ist. Die Masse eines Körpers ist daher das Maß des Widerstandes zur Bewegung desselben. Masse wird in kg gemessen, und ist z.B. auf dem Mond und der Erde gleich groß, auch wenn die Gravitation jeweils unterschiedlich ist.¹

Länge wird in Meter (m) gemessen, und Zeit in Sekunden (s). Daraus kann man die Geschwindigkeit (v) ableiten. Sie kann man auch als den Weg der in einer gewissen Zeit zurückgelegt wird beschreiben.

¹ Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). S.22

²vgl. Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). S.23

Arbeit wird verrichtet, wenn eine Kraft ihren Angriffspunkt verlagert. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Kraft und der zurückgelegten Distanz:¹

$$Arbeit = F * d^1$$

Die Einheit der Arbeit ist das Newton multipliziert mit der Einheit der Distanz (dem Meter), woraus sich der Newtonmeter oder ein Joule ergibt.¹ Unter einem Joule versteht man die Arbeit, die eine Kraft von einem Newton längs eines Weges von 1 Meter verrichtet.

Wichtige Arten von Kräften:¹

1. Körperkräfte, die durch einen Körper hindurch wirken, wie zum Beispiel die Gravitation.
2. Oberflächenkräfte, die ein massiver Körper auf einen anderen weitergeben kann.
3. Trägheitskräfte
4. Zentripedalkräfte
5. Corioliskraft, die aufgrund der Drehung der Erde entsteht.

In der Geomorphologie spielen Kräfte naturgemäß eine wichtige Rolle. „Wenn wir uns eine Landschaft in Bezug auf die Kräfte vorstellen, sind wir uns im Klaren, dass sie sich praktisch nie statisch verhalten wird, bzw. in einem Gleichgewicht sein wird. Im Gegenteil, es kommt immer wieder zu Erosionserscheinungen und zu Verlagerungen, wenn auch nicht immer und überall gleich stark. Die Schwierigkeit in der Geomorphologie liegt in der zeitlichen Veränderung der Raten der Prozesse, sprich die Sedimentationsraten die im Erdgravitationsfeld vor sich gehen. Die Erdgravitation kann man sich als Kraftfeld vorstellen, gegen das andere Kräfte wiederum wirken.

Bei einem Felssturz zum Beispiel wird das herunterfallende Material durch die Gravitation gelenkt, aber andererseits geht wiederum Energie durch Reibung mit der Luft und beim Aufschlag mit dem Untergrund verloren.“² Kräfte besitzen also große Bedeutung bei geomorphologischen Prozessen.¹ In einem geomorphologischen System wird Arbeit verrichtet, indem Kräfte Widerstände verschiedenster Art überwinden.¹ Man könnte also meinen, die Untersuchung eines geomorphologischen

¹vgl. Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). S. 25f

²Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). S. 25f

Prozesses, besteht bloß aus der Lösung und Messung verschiedener Kräfte die gewissen Gesetzen der Mechanik gehorchen. Leider ist es nicht so trivial, aber dennoch können Geomorphologen durch Messungen ein besseres Verständnis für diverse Prozesse bekommen.¹

Die Änderung der Geschwindigkeit in der Zeit wird Beschleunigung genannt und hat die Einheit (m/s).

Kraft wird definiert als das Produkt von Masse und Beschleunigung ---- $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ die Einheit ist das Newton. Wenn eine Masse von 1 kg auf 1 m/s beschleunigt wird, benötigt man die Kraft von einem Newton.

3.1 Newton'sche Axiome

1. Axiom (Trägheitssatz): Ein Körper auf den keine Kraft wirkt, verhaart im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung.

2. Axiom (Grundgleichung der Mechanik, Bewegungsgleichung):

Kraft = Masse * Beschleunigung, $F = m \cdot a$

3. Axiom(Wechselwirkungsgesetz):

Kräfte treten immer paarweise auf. Sie sind gleich groß, aber entgegengesetzt orientiert.

Es kommt zu geomorphologischen Prozessen wenn geomorphologische Arbeit verrichtet wird. Hier sollte man sich zwei andere Konzepte in Erinnerung rufen, wenn man die Mechanik von geomorphologischen Prozessen untersucht. Nämlich die Effizienz und die Kraft, die man durch folgende Gleichung in Zusammenhang bringen kann:¹

Effizienz = brauchbarer Kraftoutput/Kraftinput (gewöhnlich als Prozentsatz angegeben). Kraft wird hier als die Rate Arbeit zu verrichten definiert und in Watt gemessen. Natürlich ist es nicht üblich von der Effizienz eines geomorphologischen Prozess zu sprechen, sondern man spricht meistens von Erosionsraten.¹

¹vgl. Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). S.26

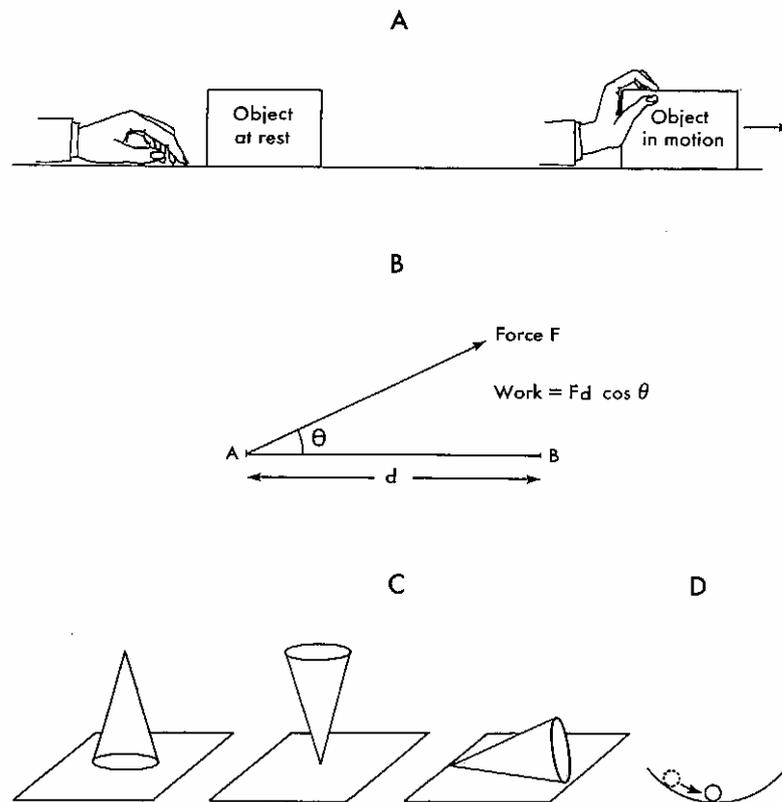


Abb.3: Quelle: Embleton C., Thornes, 1979

- A: erstes Newton'sches Gesetz. Der Klotz kann sich nur bewegen wenn eine Kraft auf ihn einwirkt bzw. wird nur Arbeit verrichtet wenn er sich bewegt.¹
- B: Arbeit wird verrichtet wenn ein Objekt eine Distanz d von A nach B zurücklegt und ist gleich mit $F \cdot d$. Falls die ausgeübte Kraft die Richtung des Winkels θ zu AB besitzt, so ergibt sich die Arbeit aus $Fd \cos \theta$.¹
- C: drei Fälle von Gleichgewicht: Der Kegel ist stabil wenn er auf seinem breiten Ende steht, instabil wenn er auf seiner Spitze steht, aber in neutralem Gleichgewicht wenn er auf der Seite liegt; kann aber durch Rollen bewegt werden, obwohl das Zentrum der Gravitation auf der selben Höhe über Grund bleibt.¹
- D: die Kugel in der Tasse bewegt sich von einer instabilen Position auf der Seite zu einer stabilen in der Mitte der Tasse. Dies zeigt uns, dass die Gleichgewichtsposition mit minimaler potentieller Energie übereinstimmt.¹

¹ vgl. Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). S. 24

1x1 der Energetik¹

Energieformen: Arbeit, potentielle E, kinetische E, Wärme

Arbeit: Kraft x Weg [J] [Nm]

Potentielle Energie: $E_{\text{pot}} = mgh$

Kinetische Energie: $E_{\text{kin}} = mv^2/2$

Wärme: E_{kin} der mikroskopischen Teilchen

Leistung: Arbeit pro Zeit [**1 W = N·m·s⁻¹ = J·s⁻¹**]

Entropie: Maß für fehlende Organisation eines Systems. Entropie nimmt zu, wenn Arbeit verrichtet wurde.

¹Vortrag Schrott, AK Geomorphologie, Bern 2.10.03

4 Geomorphologische Arbeit als Möglichkeit verschiedene Erosionsprozesse miteinander zu vergleichen (besonders im Hochgebirge)

„Viel Forschungsarbeit wurde in den letzten Jahren aufgewendet, um die Raten und Volumina der Erosion abzuschätzen. Das Problem liegt darin, dass viele Studien nicht verglichen werden können, besonders wenn den Sedimentbewegungen verschiedene Prozesse zugrunde liegen.“¹

Weiters bereitet es Schwierigkeiten verschiedene geomorphologische Prozesse zu vergleichen, wenn unterschiedliche Einheiten und Dimensionen zur Anwendung kommen.

Das Hauptproblem entsteht allerdings durch zwei andere Sachverhalte:

„Erstens ist es notwendig Erosionserscheinungen an den Hängen und im Flussbett so zu definieren, dass sie gegenseitig vergleichbar sind. (...) Fluvialer Transport wird üblicherweise als die Masse oder das Volumen des Sediments, das aus einem Flusseinzugsgebiet transportiert wird, ausgedrückt. (...)“

Im Gegensatz dazu werden Transportraten an den Hängen durch Geschwindigkeiten eines Tracermaterials über eine bestimmte Messstrecke wiedergegeben.

Die zweite Problemquelle liegt in der Natur von Speichereinflüssen in geomorphologischen Systemen. Viele Hangprozesse beinhalten nur interne Wechsel von Material, innerhalb des Hangsystems, und sind deswegen unterrepräsentiert in Studien, die den Sedimentfluss durch einen Flusskanal als den Hauptbestandteil der Erosion innerhalb des Einzugsgebietes ansehen.“¹ Solche Einflüsse verlangen eine Messbarkeit von Erosionstätigkeit, die sowohl für Hang- als auch Flusskanalprozesse anwendbar ist.

¹Caine, N (1976) "A uniform measure of subaerial erosion" Bull. Geol. Soc Am. 87: S. 137

4.1 Geomorphologische Arbeit

Nel Caine war einer der Vorreiter, die erkannten, dass die Anwendung von geomorphologischer Arbeit besonders zu Vergleichszwecken großes Potential besitzt. In einem Aufsatz von 1976 erwähnt er die ersten Überlegungen von Jäckli (1957) und Rapp (1960). Sie hatten schon früh eine Lösung für dieses Problem, sie wurde aber nur sehr zaghaft in kürzlich verfassten Arbeiten angewandt.¹

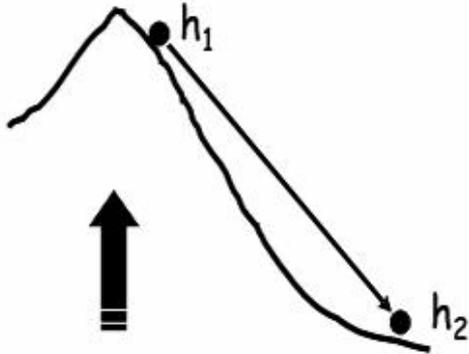
Um verschiedene geomorphologische Prozesse vergleichen zu können, verwendeten sie die Masse des transportierten Sediments über eine vertikale Distanz während einer gewissen Zeit. Als Resultat erhält man eine Definition von Erosion und Sedimenttransport als **geomorphologische Arbeit**.¹

Normalerweise beinhaltet die Erosion der Landschaft Bewegung des Sediments von der Höhe in die Tiefe, und ist somit physikalische Arbeit. Die Änderung der potentiellen Energie durch die Zeit wird angegeben als: $\Delta E = mg(h^1 - h^2)$, wobei ,m' die Masse des Sediments, ,g' die Gravitationskonstante (9,8 m/s) und ,h' die Höhe ist ($h^1 - h^2 =$ die Änderung der Höhe während des Zeitintervalls von Zeitpunkt 1 zu Zeitpunkt 2)¹ Die Erosionsrate (ist die Rate der Energieumwandlung durch die Zeit) wird als Kraft definiert und in Watt (1 W = 1J/s) angegeben.¹

¹ vgl. Caine, N (1976) "A uniform measure of subaerial erosion" Bull. Geol. Soc Am. 87: S. 137

Beispiel: Sedimentbudget (Jäckli, Rapp, Caine, Barsch, Vorndran, Warburton)

Geomorphologische Arbeit = ΔE_{pot}

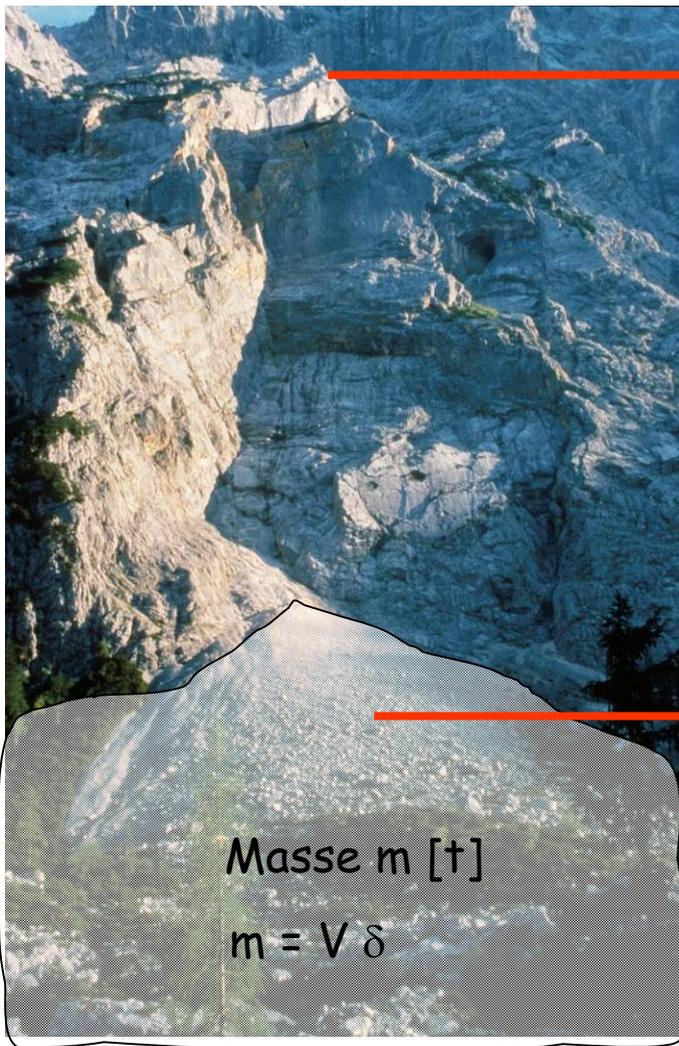


$$\Delta E_{\text{pot}} = m g (h_1 - h_2) \text{ [W, Js}^{-1}\text{]}$$

E = Arbeit

m = Masse

g = Gravitationsbeschleunigung



h_1

Δh

$$E = m g \Delta h$$

h_2

Masse m [t]

$$m = V \delta$$

Abb.4: Quelle: Vortrag Schrott, AK Geomorphologie, Bern 2.10.03

Der Unterschied zu Jäckli und Rapp besteht nur in der Einführung der Konstante g .¹ Abschätzung der Energieumformung bei geomorphologischen Prozessen wurde bereits bei fluviatilen und glazialen Studien durchgeführt (Leopold 1964, Andrews 1972). Allerdings befassten sich die Studien mit der verfügbaren Kraft für den Sedimenttransport im Transportmedium. Jetzt wird Kraft als Schätzer für Erosionsintensität angewendet, die Umwandlung von Energie aufgrund der Bewegung des Sediments.¹

„In einer Studie die sich zum Beispiel mit dem Sedimenthaushalt eines Flusses beschäftigt, sind die Terme der oben genannten Gleichung leicht zu bestimmen, sofern die Herkunft des erodierten Materials bekannt ist. Der Schätzwert von $h_1 - h_2$ ist der Unterschied in der Höhe zwischen dem Ort des Erosionsvorganges und dem Einzugsgebietsauslass, der willkürlich bestimmt werden kann. In einigen Fällen kann es vorkommen, dass man über die Quelle des Sediments nicht genau Bescheid weiß, hier verwendet man dann eine über das ganze Gebiet gewichtete mittlere Durchschnittshöhe des Einzugsgebiets.(...) Dort wo nur das Relief eines Einzugsgebietes bekannt ist, kann es notwendig sein die Medianhöhe als Schätzer für h_1 zu verwenden, obwohl dieser Wert höher als die mittlere Höhe sein wird. In allen Fällen berechnet man m als Produkt aus dem Volumen des Sediments und seiner Dichte. Für die meisten Untersuchungen die sich mit dem Abfluss im Fluss selber beschäftigen wird unsere Formel zu:

$$\Delta E = v\rho g (h_1 - h_2) * 10^3, ^1$$

wobei v für das Volumen des Sediments (Kubikmeter) und ρ für die Dichte (Megagramm/Kubikmeter) steht.

Beim Studium der Erosion auf den Hängen ist die Umrechnung von schon publizierten Daten zu einer Form die vergleichbar mit der ersten Gleichung ist nicht sehr einfach, aber man kann 2 Fälle festlegen: Der erste beinhaltet Partikel oder Tracergeschwindigkeiten und benötigt eine Schätzung der Tiefe und der Fläche des Bodens auf welcher die gemessene Geschwindigkeit angewendet werden kann. Daraufhin wird ein Volumen definiert und die Umwandlung der Masse erfolgt herkömmlich durch Multiplikation mit der Bodendichte.

¹ vgl. Caine, N (1976) "A uniform measure of subaerial erosion" Bull. Geol. Soc Am. 87: S. 137f

Der zweite Fall behandelt Sedimentabfluss quer über eine vorgegebene Länge, wobei die Dicke des bewegten Mantels üblicherweise direkt gemessen wird. Der Quotient aus Abfluss und Dicke gibt die mittlere Geschwindigkeit, und das Produkt der planimetrischen Fläche und Dicke gibt das Volumen des bewegten Abraumes. Die Masse wird wiederum durch Verwendung der Bodendichte (ρ) berechnet. In beiden Fällen wird die Geschwindigkeit oder Distanz der Bewegung entlang des Hanges gemessen, und muss durch den Sinus des Hangwinkels auf ihre vertikale Komponente zurückgeführt werden. Gleichung 1 wird demnach:

$$\Delta E = vpg (d \sin\theta), ^1$$

wobei d für die Hangdistanz (m) und θ für den Hangwinkel steht.“¹

Nel Caine nimmt auch Bezug auf eine von ihm durchgeführte Untersuchung in den Rocky Mountains in den Jahren 1970 bis 1974. Es handelte sich dabei um ein kleines Einzugsgebiet im Südwesten von Colorado mit einer Größe von 0,98 km².

Tab. 1

Prozess	Fläche (km ²)	Arbeit (j yr ⁻¹)	Leistung (w)
Oberflächenabtrag	0,32	4,54 * 10 ⁶	0,144
Solifluktion u. Bodenkriechen	0,77	3,39 * 10 ⁶	0,107
Muren	0,01	11,21 * 10 ⁶	0,355
Steinschlag	0,2	4,09 * 10 ⁶	0,13
Lawinen	0,02	0,04 * 10 ⁶	0,001
Lösungstransport	0,98	3,24 * 10 ⁶	0,102
Gesamt	0,98	26, 51 * 10⁶	0,841

Tab. 1: Quelle: Caine, 1976

Die Ergebnisse dieser Studie wurden mit anderen Untersuchungen verglichen.

¹ Caine, N (1976) "A uniform measure of subaerial erosion" Bull. Geol. Soc Am. 87: S. 138

Tab. 2

Prozess	San Juan Mountains	Skandinavien (Rapp, 1960)	andere Untersuchungen
Oberflächenabtrag	0,144	unbedeutend	0,002 (Caine, 1963)
Solifluktion	0,107	0,166	0,075 Owens (1969)
Muren	0,355	1,997	33,414 Curry (1966)
			51,078 Hutchinson (1970)
Steinschlag	0,13	0,405	0,102 Gardener (1970)
Lawinen	0,001	0,453	0,015 Caine (1969)
Lösungstransport	0,102	2,828	7,145 Douglas (1968)
			20,104 McPherson (1971)

Tab.2: Quelle: Caine, 1976

Der Vergleich mit der Studie von Rapp in Skandinavien ist einfach, man muss lediglich den unterschiedlichen Flächenmaßstab in Betracht ziehen, und die Erdbeschleunigung mit einbeziehen.¹ Der Vergleich zeigt, dass die Colorado Rockies im Augenblick als geomorphologisch inaktiv bezeichnet werden können.¹

„Ein Vergleich mit anderen veröffentlichten Schätzungen von Erosionsraten ist schwieriger, weil Vermutungen über das Sediment und das System in dem es sich bewegt, üblicherweise notwendig sind. (...) Aber trotz dieser Schwierigkeit bleibt der Wert einer solchen Auflistung für Vergleichszwecke erhalten. Es zeigt sich, dass für Prozesse die in einer quasi kontinuierlichen Weise vor sich gehen, wie zum Beispiel Bodenkriechen, kleine Steinschläge usw. die Rate der geleisteten Arbeit in dem Gebiet im südwestlichen Colorado sehr ähnlich mit anderen Gebieten ist. Für andere Prozesse wo der Unterschied eine Magnitude oder mehr beträgt, ist der Effekt einer positiven Korrelation zwischen Relief und Einzugsgebietsgröße offensichtlich.“²

¹ vgl. Caine, N (1976) "A uniform measure of subaerial erosion" Bull. Geol. Soc Am. 87: S. 138

² Caine, N (1976) "A uniform measure of subaerial erosion" Bull. Geol. Soc Am. 87: S. 139

4.2 Beispiele der Anwendung des Prinzips der geomorphologischen Arbeit aus der Literatur

J.T. Andrews:

Er stellte die Hypothese auf, dass Gletscherleistung eine lineare Funktion der Geschwindigkeit sei, und man Leistung als Approximat für die Abtragsintensität ansehen kann. Dabei wird die Größenordnung der gesamten Energie (W_T) eines theoretischen Gletschers mit gegebener Oberfläche (1 km²) geschätzt.¹ Hierfür wird eine Beziehung zwischen dem Massenverlust in der Höhe der Gleichgewichtslinie (ELA) und dem der Ablationsgradienten in Abhängigkeit von der Höhe aufgestellt.¹ Durch diese Vorgehensweise erhält man die Nettomasse im Ablationsgebiet, woraus man wiederum die mittlere Geschwindigkeit (U) im im Querschnitt (ELA) ableiten kann.¹ Dadurch erhält man die Summe der totalen Energie des Gletschers im Querschnitt (ELA), die zwischen 0,2 und 2 Watt liegt. Die tatsächliche Energie (W_E) des Gletschers ergibt sich nach der Größe der mittleren Geschwindigkeit (U), die durch das Gleiten am Untergrund bestimmt wird.¹

Daraus ergibt sich: W_E/W_T : 0,5 – 0,8 für temperierte Gletscher

0 - 0,2 für subpolare/polare Gletscher

Für die Nordhemisphäre konnte Andrews eine Karte der Massenverluste in der Höhe der Gleichgewichtslinie, ausgedrückt in Kalorien entwerfen.¹ Die Linien gleicher Massenverluste richten sich nach der geographischen Breite und der Kontinentalität.¹

¹ vgl. Andrews, J.T. „Glacier power, mass balances, velocities and erosion potential, Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 13, 1972, S. 1

Glacier power, mass balances, velocities and erosion potential

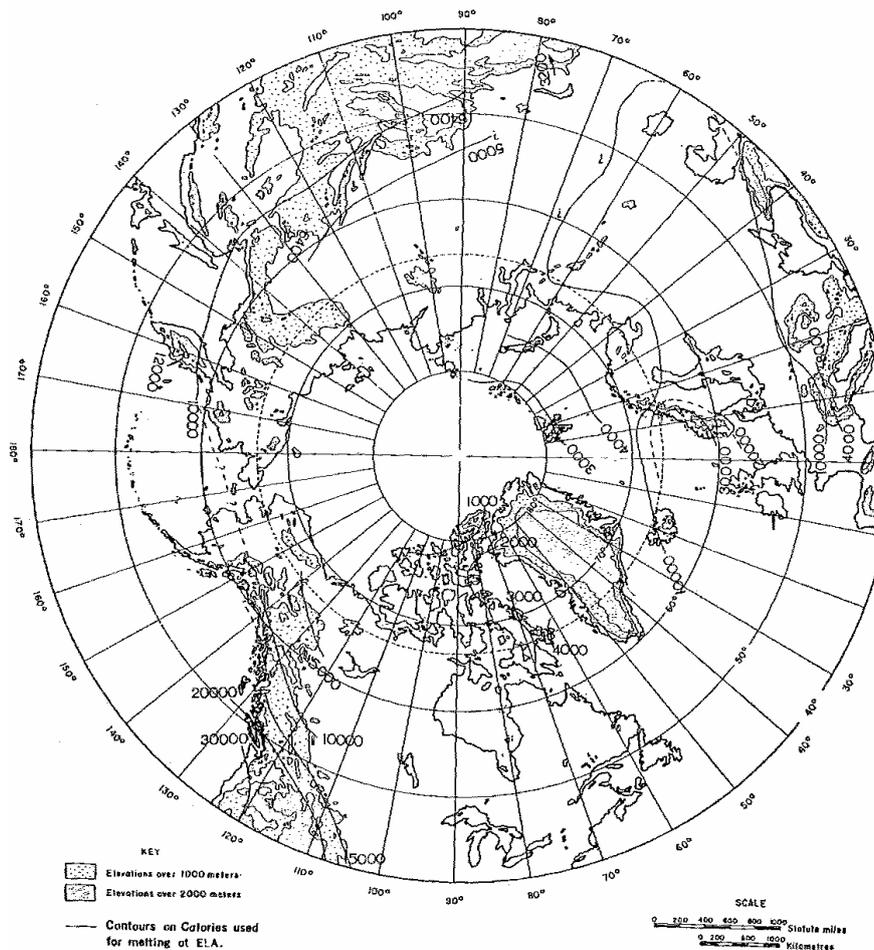


Abb.5: Quelle: J.T. Andrews, 1972

Jeff Warburton:

Sedimentshaushaltsprozesse in Form von Arbeit und Kraft auszudrücken, bietet einen guten Einblick in das Sedimentsystem.¹

Energetik in Kombination mit Sedimentbudget Untersuchungen können ein wertvolles Hilfsmittel sein, um die Wechselbeziehungen innerhalb eines Sedimentsystems besser zu verstehen.¹

Sedimentbudgets sind ein wichtiges Werkzeug um geomorphologische Systeme zu verstehen, da sie den Transport und die Speicherung des Sediments in der Landschaft quantifizieren. Allerdings werden im Großteil dieser Studien

¹ vgl. Warburton J. (1992) "Energetics of alpine proglacial geomorphic processes", Trans. Inst. Br. Geogr. NS. 18 S. 197

Sedimentflüsse einfach als Masse ($t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) ausgedrückt, mit geringer Betrachtung des eigentlichen Prozesses.

Jeff Warburton versuchte ein besseres Verständnis für Sedimentprozesse zu erlangen, indem er versuchte diese durch Energieterme (Arbeit und Leistung) auszudrücken. Dieser Ansatz ist besonders in gebirgigen Gegenden geeignet, da es hier ausreichend potentielle Energie für Erosion und Sedimenttransport gibt. Die Studie von Jeff Warburton wurde von 25 Mai bis 30 Juli 1987 durchgeführt und zwar in der Proglazialzone des Arollagletschers in Val d'Herens in der Schweiz.

Es wurden mithilfe der Formel:

$$\text{Arbeit} = mg (h_1 - h_2)^1,$$

(m...Masse, g...Erdbeschleunigung, $h_1 - h_2$...Höhenänderung zwischen 1 und 2)

Werte für Arbeit und Leistung (aus der Wirkungsdauer) für die jeweiligen Prozesse berechnet.

Man konnte 3 Grundprozesse im Bas Glacier d'Arolla Sedimentsystem unterscheiden:

- Hangprozesse
- Ein Subset von Moränen, Nebenflüssen und Erosion von den Steilhängen
- Subset von Prozessen im Hauptfluss

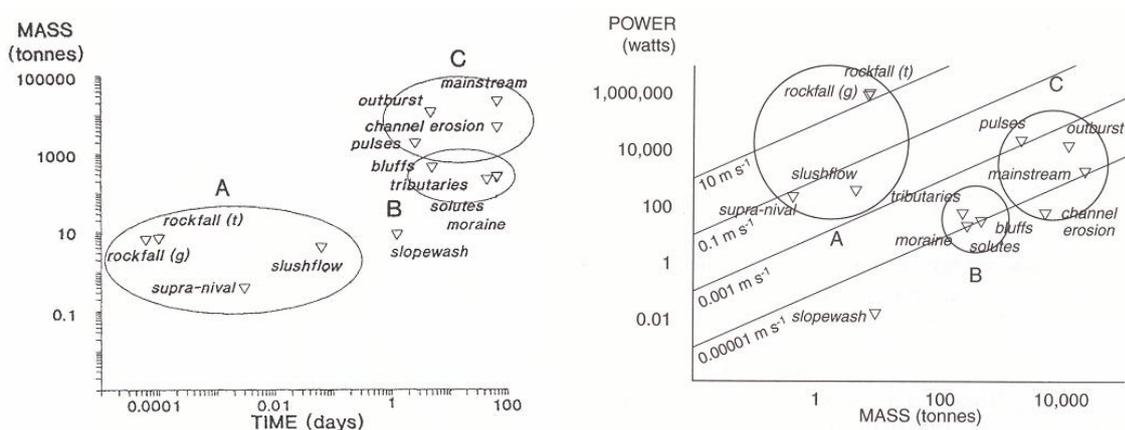


Abb.6: Prozesse im Bas Glacier d'Arolla Sedimentsystem
Quelle: J. Warburton, 1992

¹vgl. Warburton J. (1992) "Energetics of alpine proglacial geomorphic processes", Trans. Inst. Br. Geogr. NS. 18 S. 199

- geomorphologische Arbeit und Leistung streut über mehrere Magnituden
- Ableitung einer räumlichen Massen- und Energieverteilung im proglazialen Sedimentbudget.

Diese Untergruppen an Prozessen zeigen eine systematische räumliche Variation an Energetik in der Proglazialzone. Das hier untersuchte proglaziale Sedimentsystem beinhaltet Elemente der 3 Energiekaskaden, nämlich der debris-slope Kaskade, stream-channel Kaskade und der Talgletscherkaskade ¹. Aufgrund der Komplexität von Sedimentprozessen und Schwierigkeiten bei der Messung der verschiedenen Prozesstypen, wird eine verfeinerte Abschätzung der Energiemengen verhindert, und man kann daraus schließen, dass Energetik im mittleren Maßstabbereich wie zum Beispiel bei Sedimentbudgets am besten Anwendung findet.²

Prof. Dietrich Barsch – Heidelberg Ellesmere Island Expedition

Prof. Dietrich Barsch führte 1981 eine Untersuchung der Geomorphodynamik in einem arktischen Gebiet (Oobloyah-Tal) durch, wobei interessante Ergebnisse zu erwarten waren. Ziel der Arbeit war es einen Einblick über die Größenordnung der Prozesse und Vorgänge in den hohen Breiten zu erlangen, was allerdings durch die besonderen Umweltbedingungen erschwert wurde. Deswegen legte man auch Wert darauf zu betonen, dass eine Extrapolation der Ergebnisse auf die gesamte Arktis nicht möglich ist.³

Es wäre anzunehmen, dass in polaren Gebieten unter periglazialen Bedingungen die Aufbereitung und der Transport von Material weit intensiver als zum Beispiel in unseren gemäßigten Breiten wäre. Einige Verfechter dieser Theorie seien hier genannt: Büdel, French, Stäblein.

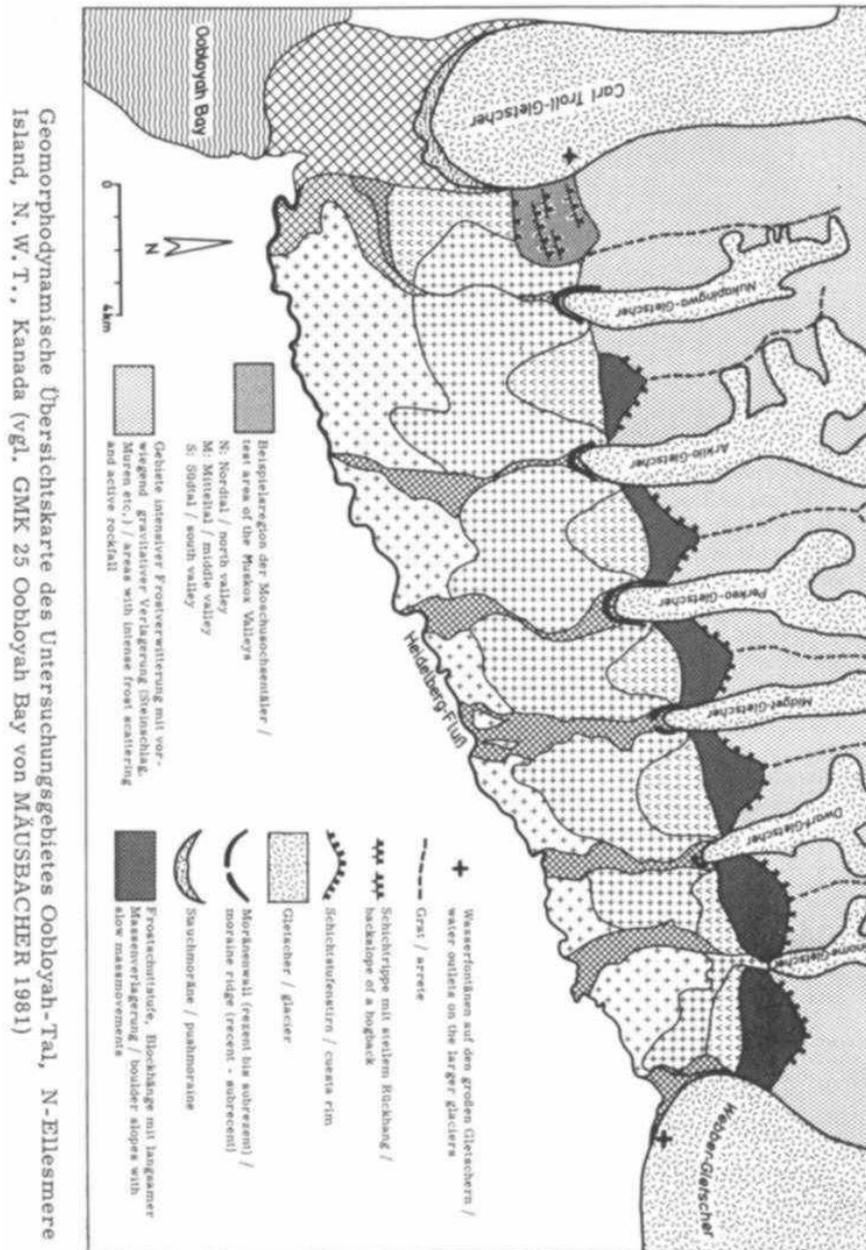
Prof. Barsch versuchte aktuelle geomorphologische Prozesse mit den dazugehörigen beteiligten Massen, sowie die horizontalen und vertikalen Transportstrecken abzuschätzen.

¹ vgl. Chorley, R.J., Kennedy, B.A., 1971. Physical Geography: A Systems Approach. Prentice-Hall International, London. S. 102

² vgl. Warburton J. (1992) "Energetics of alpine proglacial geomorphic processes", Trans. Inst. Br. Geogr. NS. 18 S. 197

³ vgl. Barsch, D. „Ergebnisse der Heidelberger Ellesmere Island Expedition“, Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 69, 1981, S. 125

Bei der Abschätzung stellte sich heraus, dass in Bezug auf die in Bewegung befindlichen Volumina, ein eindeutiges Übergewicht der Solifluktion festzustellen ist.



Fortsetzung Legende

- | | |
|--|---|
| <p>Bereiche überwiegender Mikrosolifluktion auf der Talbodenfläche und auf den Terrassenflächen des Heidelberg-Flusses bei stellenweise starker Umlagerung und intensiven Rutschungen an den Terrassenstufen bzw. längs aktiver fluvialer Unterschneidungszonen / areas dominated by micro-solifluction and sliding only along scarps</p> <p>Bereich rezenter glazifluvialer Aktivität / recent fluvio-glacial activity</p> <p>rezenter Sandur- (Carl Troll-Gletscher) und Delta-
bereich / recent sandur (Carl Troll Glacier) and
deltain plain</p> | <p>Bereiche verstärkter Abspülung und relativ starker gebundener Solifluktion (überwiegend Tundra) / areas (mainly tundra) with intense slope wash and important solifluction (gelifluction)</p> <p>Bereiche starker periglazialer Überformung vorwiegend in älteren glazialen Ablagerungen / areas strongly modified by periglacial processes (mainly "older" glacial deposits)</p> <p>Schwemmkegelterrassen des Nukapingwa- und Deltaterrassen des Heidelberg-Flusses / Fan-terraces of the Nukapingwa River and delta-terraces of the Heidelberg River</p> |
|--|---|

Abb.7: Quelle: Barsch, 1981

Was die Massenverlagerung betrifft, dann ergibt sich ein enormes Übergewicht der Flussarbeit über alle anderen Prozesse.¹ „Die Flüsse leisten 96 % des gesamten horizontalen Transports und 47 % des vertikalen Transports.“² Besondere Bedeutung besitzen auch die Steinschläge, besonders für den vertikalen Transport, was sich in einer Änderung der potentiellen Energie niederschlägt.¹

Ein interessanter Vergleich wird anschließend mit einer Untersuchung im bündnerischen Rheingebiet von Jäckli aus dem Jahre 1957 angestellt. In einem etwa 4300 km² großen, alpinen Einzugsgebiet wurden diese Werte ermittelt:

spezifische horizontale Massenverlagerung: 330 000 000 (m * t * km⁻² * a⁻¹)

spezifische vertikale Massenverlagerung: 3 700 000 (m * t * km⁻² * a⁻¹)

Im Vergleich dazu die Werte aus dem arktischen Einzugsgebiet:

spezifische horizontale Massenverlagerung: 900 000 (m * t * km⁻² * a⁻¹)

spezifische vertikale Massenverlagerung: 300 000 (m * t * km⁻² * a⁻¹)

¹ Barsch, D. „Ergebnisse der Heidelberger Ellesmere Island Expedition“, Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 69, 1981, S. 157f

² Barsch, D. „Ergebnisse der Heidelberger Ellesmere Island Expedition“, Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 69, 1981, S. 157

5. Das Systemkonzept in der Geomorphologie

„Alle physischen Phänomene können so aufgefasst werden, dass sie in Systemen organisiert sind, wobei ein System definiert ist als eine Sammlung von Objekten und den Beziehungen zwischen den Objekten. Es gibt nun geschlossene Systeme, die Grenzen besitzen über die hinweg kein Massen- bzw. Energieaustausch erfolgt; bei offenen Systemen gibt es diesen Fluss an Energie. Ein geschlossenes System muss sich zu einem stationären, zeitunabhängigen Gleichgewichtszustand hin ändern, gemäß dem zweiten Gesetz der Thermodynamik, wo die Verhältnisse der verschiedenen physischen Phasen konstant bleiben, die Menge an freier Energie (zum Beispiel chemische Energie, potentielle Energie der Lage) ist minimal, und die Entropie (Menge an Unordnung im System) ist maximal.

Ein offenes System auf der anderen Seite kann trotz des ständigen Hinzukommens und Verlassens von Material, ein dynamisches Gleichgewicht erreichen. (...)

Lediglich die einfachsten geomorphologischen Prozesse können als geschlossene Systeme untersucht werden.

Bestimmte Verwitterungsprozesse, wie zum Beispiel Lösung von Kalkgestein durch sauren Regen können durch Hinzugabe von bestimmten Mengen der Reaktionspartner in ein Reagenzglas nachgeahmt werden. Nach einiger Zeit der Beobachtung haben sich vorhergesagte Mengen neuer Stoffe geformt und sind in stabilem Gleichgewicht miteinander.

Frisch ausgebrochene Lava strahlt und leitet Wärmeenergie an seine Umgebung ab, bis der Temperaturgradient gleich null ist und die Masse erstarrt. Ab dann hört sie auf Wärme abzugeben. Selbst in diesen einfachen Beispielen ist es offensichtlich, dass natürliche Phänomene sehr viel komplexer sind als man aus diesen kurzen Aussagen ableiten könnte. Die komplette Erdoberfläche könnte man als offenes System ansehen (Chorley, 1962). Material kommt durch Tektonik bzw. Vulkanismus hinzu, mit einem zusätzlichem geringfügigem Nettoanstieg an Masse durch Meteoriteneinfall. Energie stammt von Solarstrahlung, Gravitation, Rotationsträgheit und interner Wärme. An der Oberfläche, unter Wasser und unter Eis auftretende Prozesse erodieren die Gesteinsstrukturen, und das erodierte Material wird wiederum anderswo abgelagert, normalerweise unterhalb des Meeresniveaus.“¹ „Es ist vorstellbar, dass es zu einem

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.19

Gleichgewichtszustand in diesem komplexen offenen System kommt, sodass sich die Form der Erdoberfläche nicht ändert, obwohl die Masse, aus der sie aufgebaut ist, sich ständig umlagert und ständig Energie verbraucht wird.

Man könnte eine Landschaft (ein „Geomorphologisches System“) mit einem rotierenden Brennofen, wie er zum Erzeugen von Zement verwendet wird, vergleichen. Einfache Rohmaterialien, hauptsächlich Kalkstein und Tonschiefer, werden in das obere Ende eines geneigten, rotierenden und erwärmten Zylinder gegeben. Die Stücke rotieren und werden auf ihrem Weg zum unteren Ende des Zylinders zermahlen. Durch die Wärme kommt es zu einer chemischen Reaktion und es entsteht aus dem Pulver das erwünschte Endprodukt, nämlich ein anderes Pulver das mit Wasser Calciumsilikat Minerale bildet, mit großer adhesiver Stärke.

Die Wärme wird nicht in dem neu gebildeten chemischen Gemisch gespeichert, sondern wird als Verlustenergie abgegeben, gemeinsam mit den mechanischen Reibungsverlusten. Mechanische Energie wird durch das Gravitationspotential und auch durch die kinetische Energie der Rotation bereitgestellt. Sobald der Nachschub an Rohmaterialien an den Nachschub an mechanischer und thermaler Energie angepasst ist, wird ein gewünschtes Produkt zu einer gewünschten Rate produziert. Falls der Materialfluss erhöht wird, muss auch die Energiezufuhr erhöht werden, damit das gewünschte Produkt zu einer gewünschten Rate produziert wird. (...)

Eine Landschaft über Meeresniveau ist dem Model des drehenden Brennofens sehr ähnlich. (...) Niederschläge spülen verwitterte Gesteine bergab Richtung Meer und Flüsse. Die Rate des Abfließens ist eine Funktion von klimatischen Variablen wie zum Beispiel Temperatur und Niederschlag, wobei der Gradient hauptsächlich durch Tektonik begründet ist. Die Intensität der chemischen und physikalischen Veränderung des transportierten Gerölls ist eine Funktion der Zeitdauer des Transports. Solange der Material,- und Energiefluss angepasst sind, bleibt das System in einem Gleichgewicht.“¹

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.20

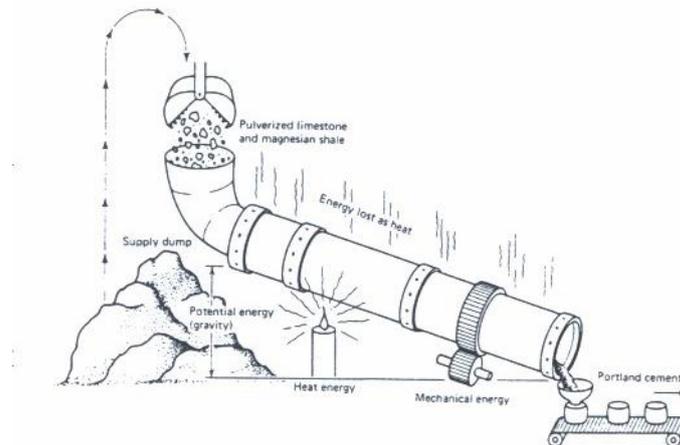


Abb.8: Rotierender Brennofen,
Quelle: Bloom, 1998

„Wenn man annimmt, dass der Einfüllstutzen des Brennofens auf dem Depot an Material aufliegt, der gleichzeitig für die Betonherstellung verwendet wird, so wird dieser während des Erzeugungsvorganges abgebaut und die Neigung des Brennofens verringert. Um gleichzeitig die Qualität des Zements aufrecht zu erhalten, muss die Hitze während des Brennvorganges verringert werden. Man muss dabei allerdings in Kauf nehmen, dass sich die Produktionsrate verringert. Bei ordentlicher Kontrolle kann so auch ein sehr schlecht aufgebautes System in einem Gleichgewicht bleiben, wenn auch auf längere Sicht gesehen die potentielle Energie des Systems zurückgehen würde. Gleiches gilt analog für Landschaften, die nicht durch geomorphologische Prozesse erneuert werden. (...)

Allgemein wird angenommen, dass die Masse der Erde konstant ist, wenn man den kontinuierlichen Zuwachs durch Meteoritenstaub und den sehr seltenen Einfluss größerer außerirdischer Einflüsse außer Acht lässt.

Grundsätzlich sollte es möglich sein, das Geoid als Grenze eines offenen Systems zu definieren und die Aufwärtsbewegungen von Gesteinsmaterial aufgrund von Tektonik und Vulkanismus, sowie die Abwärtsbewegung aufgrund von Tektonik und Erosion zu überwachen. (...) Das Studium des geomorphologischen Systems ist allerdings noch nicht soweit vorangeschritten, dass man solche Massebilanzen berechnen könnte.“¹

„Im Gegensatz zur Massebilanz des geomorphologischen Systems ist die Energiebilanz des geomorphologischen Systems sehr gut erforscht, dank der

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 20

Forschungsarbeit in den Nachbardisziplinen wie Biologie, Meteorologie, Astronomie und Geophysik.

Betrachtet man das Universum als Ganzes, so ist die Gravitation die vorherrschende Energieform, die bei weitem Wärme, Licht und Nuklearenergie übertrifft.“¹ Wie schon vorher erwähnt, ist in unserem geomorphologischen System Solarstrahlung die primäre Energiequelle, die wiederum ein Produkt der Gravitationskräfte ist, welche die Kernfusion der Sonne aufrecht erhalten. Die Energie, die die Erde von der Sonne erhält ist beinahe konstant, allerdings variiert die Verteilung dieser Energie über der Erdoberfläche sehr stark. Für die nächste Generation von Geomorphologen wird es sehr wichtig sein, die Energiepotentiale des Systems, das sie untersuchen wollen, besser zu verstehen.²

Die Menschheit, die in den vergangenen tausenden Jahren bedeutender geomorphologischer Mitgestalter wurde, verbraucht nun Energie in einer Größenordnung, wie sie bei Winden, den Tiden und geothermischer Wärme frei wird.² Wir verwenden 26% der Evapotranspiration der Erde um unseren Wasserbedarf zu decken, außerdem bearbeiten wir soviel Gestein, wie durch tektonische Prozesse regeneriert wird. Wir leben auf einer Landoberfläche, die von einem nuklearen Fusionsreaktor beleuchtet, und von einem thermalen Nuklearreaktor erwärmt und umgeformt wird. Wenn wir lernen die Energie der Kernfusion nutzbar zu machen, dann sind der Menschheit keine Grenzen bei der Veränderung unseres und anderer Planeten mehr gesetzt.²

¹ Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.20

² vgl. Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.22

5.1 Die verfügbare Leistung für geomorphologische Veränderungen

„Leistung ist als die Rate Arbeit zu verrichten definiert, oder als übertragene Energie pro Zeiteinheit. Übliche Einheiten sind Watt ($1 \text{ W} = 1 \text{ Joule/Sekunde} = 1 \text{ Newtonmeter/Sekunde}$) oder Pferdestärken ($1 \text{ PS} = 746 \text{ W}$).

Solarstrahlung, hauptsächlich im sichtbaren und nahen Infrarotbereich, liefert 99,97 % der Energie, die in das geomorphologische System eintritt. Ca. 30 % der Solarstrahlung wird sofort wieder reflektiert (hauptsächlich durch Wolken). Einiges der nicht - reflektierten Energie wird in thermische Bewegung der Luft, Wasser und Mineralmoleküle als sensible Wärme umgewandelt und erwärmt dabei den Planeten, aktiviert chemische, physikalische und biologische Reaktionen.

Der größte Anteil der Energie wird als latente Wärme der Verdunstung durch die unerschöpflichen Wassermengen auf der Erdoberfläche absorbiert und durch Wasserdampf in der Atmosphäre transportiert, bis sie durch Kondensation in den Wolken freigesetzt wird.

Kleine Anteile der Energie werden direkt in kinetische Bewegung der Luft und Wassermassen umgewandelt, und treiben dadurch konvektive und advective Strömungen in der Atmosphäre und den Ozeanen an, oder sie werden durch photosynthetisch aktive Pflanzen absorbiert.

Ein ganz kleiner Anteil der verfügbaren Energie treibt geomorphologische Prozesse an. All diese Energie wird schlussendlich ins All durch Rückstrahlung der mäßig erwärmten Erde zurückgegeben.

Solarstrahlung liefert Energie viel schneller als alle anderen Energiequellen zusammen, aber dennoch können diese anderen Energieformen nicht vernachlässigt werden.

Dazu gehören zum Beispiel die Gravitations,- und Trägheitskräfte im Zusammenhang mit der Masse und Bewegung der Erde, des Mondes, der Sonne und anderen Objekten des Sonnensystems, Kräfte die sich auf der Erde zum Beispiel durch die Tiden der Lithosphäre und Hydrosphäre äußern.“¹

Erwähnenswert sind auch katastrophale Ereignisse wie Meteoriteneinschläge, allerdings kann man die enorme Kraft dieser Ereignisse nur grob schätzen. Es ist aber unbestritten, dass sie auch imstande sind eigene Landformen zu schaffen und diverse

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.22

geomorphologische Prozesse zu beeinflussen. Eine Schwierigkeit bei der Evaluation der Kraft des geomorphologischen Systems an der Erdoberfläche ist, dass es keinen einfachen Weg gibt die Leistungsdichte oder ortsgebundene Energieaufwendung zu messen.¹

5.2 Die Sonnenstrahlung

„Ein Hauptziel der Geomorphologie ist es zu verstehen wie die gewaltige aber diffuse Energie der Sonnenstrahlung in mechanische Arbeit umgewandelt wird, die dann die Landschaft formt.“² Man kann sich den ganzen Vorgang mit Hilfe der sog. „Geomorphologischen Maschine“ die von Bloom 1969 eingeführt wurde, besser vorstellen. Dabei handelt es sich um eine Dampfmaschine, die von der Sonne angetrieben wird. Die Maschine treibt eine Reihe von verschiedenen Baugeräten an um die Landschaft abzubauen.¹

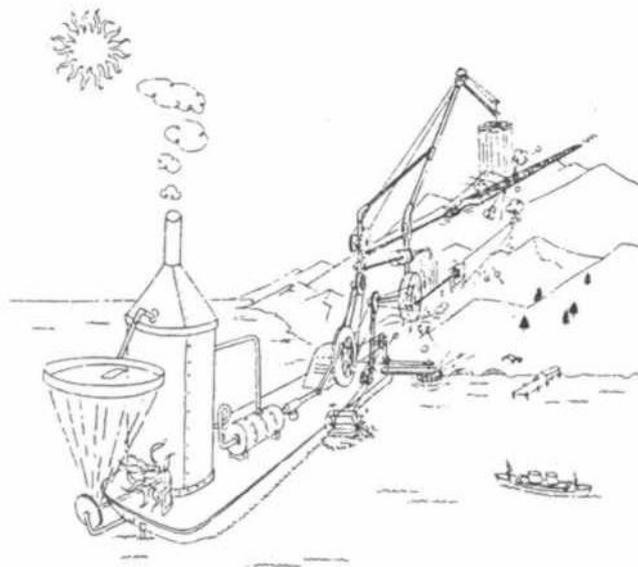


Abb.9: „Die Geomorphologische Maschine“

Quelle: Bloom (1998)

¹ vgl. Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.23f

² Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.23

„Die Analogie mit der Dampfmaschine ist gut, da die Phasenänderung in der unerschöpflichen Menge an Wasser auf der Erdoberfläche dafür verantwortlich ist, dass aus der Solarenergie auch tatsächlich signifikante mechanische Arbeit wird. Aber von noch größerer Bedeutung ist die Tatsache, dass die Solarstrahlung unseren Planeten in jenem Temperaturbereich hält, wo Wasser in fester, flüssiger und Dampfphase vorkommen kann.

Die Sonne emittiert Strahlung in einem Wellenbereich, die man am besten mit einem perfekt strahlenden schwarzen Körper bei einer absoluten Temperatur von 6000K vergleicht.“¹ Eine wichtige Rolle spielt die Atmosphäre als Temperaturregulator. Hätte die Erde keine Atmosphäre, und würde sie all die Strahlungsenergie der Sonne sofort wieder emittieren, würde auf der Erdoberfläche eine Temperatur von 255K (-18°C) herrschen. Die tatsächliche Erdoberflächentemperatur beträgt allerdings 15°C, ein Produkt aus atmosphärischer Absorption und Rückstrahlung, der so genannte „Glashauseffekt. Man darf allerdings den Einfluss von steigendem CO₂ Gehalt und Wasserdampf der Atmosphäre nicht unterschätzen, die eine große Auswirkung auf die Erdoberflächentemperatur der Erde haben können.²

Von großer Bedeutung für die Wärmebilanz ist die Bewölkung, aber leider ist ihre Rolle noch nicht komplett erforscht. Wolken absorbieren von der Erdoberfläche zurückgestrahlte langwellige Strahlung, aber sie reflektieren ebenso die einfallende Sonnenstrahlung. Der Nettoeffekt der Bewölkung ist möglicherweise eine geringfügige Abkühlung, wobei das nur eine Schätzung ist, und die Mengen an absorbierter und reflektierter Energie sind sehr groß.²

Ca. die Hälfte der Erde ist ständig von Wolken bedeckt, und der Nettoeffekt der Wolken wird als viermal so groß eingeschätzt wie der potentielle Effekt einer Verdopplung des atmosphärischen CO₂-Gehalts. Man kann mit großer Wahrscheinlichkeit behaupten, dass Veränderungen der weltweiten Bewölkung durch andere Klimaänderungen sehr große Rückkopplungseffekte zur Folge haben könnten.²

¹ Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.23

² vgl Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 23f

Terrestrische Wärmegradienten:

„Sonnenenergie wird in der unteren Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre ungleich absorbiert bzw. zurückgestrahlt, was komplexe thermische Gradienten zur Folge hat, die wiederum atmosphärische und ozeanische Zirkulation zur Folge haben und so klimatische Regionen auf der Erdoberfläche erzeugen.“¹

Breitengradabhängige Gradienten:

Der Großteil der Solarenergie wird auf der Erdoberfläche im Bereich der Tropen aufgenommen. Das hat mehrere Ursachen. „Erstens steht die Sonne in den Tropen immer sehr hoch, und die Reflektion ist am geringsten wenn die einfallende Strahlung in einem steilen Winkel auf die Oberfläche trifft. Zweitens beinhalten die Tropen große Ozeanflächen, welche die Wärmeaufnahme begünstigen. Drittens ist die Albedo in den Tropen viel geringer als im planetarischen Durchschnitt. Viertens ist die tropische Atmosphäre sehr bewölkt und feucht, und sie absorbiert daher sowohl einfallende Solarstrahlung, als auch zurückgestrahlte Wärme der Erde. Fünftens ist die Fläche zwischen aufeinander folgenden Breitenlinien in der Nähe des Äquators größer als bei den Polen. Auf einer Kugel liegen 50 % der Fläche innerhalb 30° nördlich und südlich des Äquators.

Aufgrund dieser Tatsachen wird in den niederen Breiten mehr Energie von der Sonne erhalten, als zurückgestrahlt wird. (...)

Die beiden Hemisphären unterscheiden sich etwas aufgrund unterschiedlich großer Land und Ozeanflächen, Albedo und Ozeanströmungen. Die kleineren Polgebiete beider Hemisphären sind Nettostrahler. Die überschüssige Wärme in den niedrigeren Breiten wird durch Winde und Ozeanströmungen befördert, und gleicht das Nettodefizit zwischen einfallender und hinausgehender Strahlung in den hohen Breiten aus.“¹

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.24

Höhenabhängige Gradienten:

„Die Atmosphäre ist für einfallende Solarstrahlung des sichtbaren und nahen Infrarotbereichs einigermaßen durchlässig, aber stark absorbierend in bestimmten Wellenlängen der hinausgehenden langwelligen Infrarot Strahlung von der Erde.

Daher wird der untere Teil der Atmosphäre von unterhalb erwärmt und wird mit warmer aufsteigender und kalter sinkender Luft konvektiv vermischt.

Die niedrigste atmosphärische Ebene wird auch Troposphäre genannt und hat eine Stärke von 16 km in den Tropen und 8 km in der Nähe der Pole. Innerhalb der Troposphäre sinkt die Temperatur mit der Höhe mit einer Rate von $6,5^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$.“¹

Saisonale Gradienten; Land –Meer Kontraste:

Außerhalb der Tropen stehen Winter und Sommer für die saisonale Temperaturänderung.²

Innerhalb der Tropen wo die Temperaturen generell hoch sind, wird Saisonalität durch Niederschlagsmaxima und, -minima definiert, sodass Regenzeiten oder Monsune jährlich mit Trockenzeiten mit einer Dauer von einigen Monaten abwechseln.²

Temperaturgegensätze zwischen Land und Meer werden mit saisonalen klimatischen Schwankungen in Verbindung gebracht. Maritime Klimate sind durch gemäßigte tägliche und saisonale Temperaturgegensätze gekennzeichnet, da das in Übermaß verfügbare Wasser einen Wärmebuffer an latenter Wärme liefert. Die inneren kontinentalen Bereiche hingegen weisen teilweise große Temperaturgegensätze auf.²

Tägliche Temperaturschwankungen:

„In den meisten tropischen Regionen übersteigt die tägliche Temperaturspanne die jährliche. Tägliche Temperaturänderungen sind besonders markant für tropische Hochländer oder in subtropischen Wüsten.“¹

¹ Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S.25

² vgl Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 25

„In nicht Wüstengebieten ist die Nacht kühler als der Tag, aber durch Zurückstrahlung von der Atmosphäre wird die tägliche Schwankung vermindert.“¹

5.3 Atmosphärische Energetik

„Die Menschheit ist schon seit Jahrzehnten an ihrer Umwelt interessiert. Dieses Interesse entwickelte sich zur wissenschaftlichen Forschung zur Zeit der Renaissance, als unzählige ernsthafte Probleme des Planeten Erde und darüber hinaus entdeckt wurden. (...) Zur gleichen Zeit wurden die Veränderungen in der Atmosphäre entdeckt und tatsächlich, wenn auch nur an wenigen Orten, mit Hilfe von Instrumenten aufgezeichnet. Aber die relative Vergänglichkeit und schnellen Veränderungen von atmosphärischen Zuständen machte die Beobachtung keinesfalls einfach. Andererseits erhielt man durch verbesserte Wetterkunde genauere Vorhersagen, die für eine hauptsächlich ländliche Lebensweise von großer Bedeutung waren.“² Aufgrund der Schwierigkeit der Beobachtung von atmosphärischen Phänomenen tat sich die wissenschaftliche Beobachtung der Atmosphäre schwer im Vergleich zur physiographischen und biologischen Untersuchung der festen Erdoberfläche.³ Von einem theoretischen Standpunkt allerdings hat atmosphärische Forschung in allen Jahren klare Vorteile gegenüber seinen wissenschaftlichen Pendanten. Das Gemisch aus Gasen, das wir Luft nennen, verhält sich im Einklang mit den Grundgesetzen der Mechanik und Thermodynamik. Folglich kann man festhalten, dass Wetter und Klima, die sich größtenteils durch räumliche Ungleichheiten des Wärmegehalts, Masse und Bewegung der Luft ergeben, sich im Sinne dieser Grundgesetze erklären lassen. Die wichtigste Komponente von Mechanik und Thermodynamik ist natürlich die Energie. Deshalb kann man zusätzlich zu den mehr konventionellen Aspekten dynamischer Meteorologie die Beziehungen zwischen Kräften und Luftbewegungen abdecken, die gut etabliert energetischen Konzepte auf das atmosphärische Verhalten anwenden.³ „Die steigende Bedeutung der Wettervorhersage, die zum Großteil auf die beiden Weltkriege zurückzuführen

¹ Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 25

² Gregory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 33

³ vgl. Gregory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 33f

war, bedeutete, dass die Forschung von atmosphärischer Energetik etwas zurückblieb. Erst nach 1945 war die Wissenschaft soweit auch die nicht sofort anwendbaren Teile der Meteorologie zu erforschen. In den letzten 4 Jahrzehnten beschäftigte man sich intensiv mit Fragestellungen bezüglich atmosphärischer Energetik, was zu einem besseren Verständnis führte. (...)

„Energie ist die Kapazität Arbeit zu verrichten und Leistung ist die Rate in der Arbeit verrichtet wird. Rückblickend darauf, dass Wärme eine Form von Energie ist, kann man 3 Arten unterscheiden. Interne Energie aufgrund des Wärmegehalts eines Körpers, potentielle Energie aufgrund der Wirkung der Gravitation auf einen Körper und kinetische Energie durch Bewegung eines Körpers. In der Meteorologie handelt es sich bei dem Körper eben um eine Luftschicht oder um die ganze Atmosphäre. Die Arten von Energie werden auf verschiedenste Weise umgelagert, umgewandelt und gespeichert. Das Hauptproblem von atmosphärischer Energetik ist es, diese Änderungen in Erde-Atmosphäre-System zu erläutern.“¹

Erde-Atmosphäre-Raum

„Die Hauptquelle für Energie auf der Erde ist die Sonne. Die Energie erreicht die Erde als Strahlung mit nur kleinen Schwankungen, die immer noch den Ausdruck Solarkonstante rechtfertigen.“¹

Im Weltraum ist die Sonnenstrahlung nahezu konstant; auf der Erde schwankt sie im Laufe des Tages und der Jahreszeiten und variiert je nach Breitengrad und Witterung. Die Sonnenstrahlung, die in die Atmosphäre eindringt, verteilt sich dort auf verschiedenste Weise. Um den Strahlungs- bzw. Energiehaushalt zu analysieren, muss man zunächst zwischen 2 Ebenen unterscheiden: der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Teile der Strahlung gelangen nämlich nicht bis zur Erdoberfläche, sondern werden von der Atmosphäre reflektiert oder absorbiert. Beispielsweise wird die kurzwellige ultraviolette Strahlung bereits in der Ionosphäre abgefangen. Sie ionisiert dort die Atome. Aus der Differenz von Einstrahlung (Insolation) auf die Erde

¹Gregory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 34

und Ausstrahlung der Erde ergibt sich die Strahlungsbilanz, die im Wesentlichen den Energiehaushalt bestimmt.

Sichtbares Licht gelangt etwa zu einem Drittel direkt an die Erdoberfläche. Ein weiterer Teil wird von der Atmosphäre und den Wolken absorbiert oder reflektiert. Zusätzlich kommt es zu einer Streuung der Strahlung an den Luftmolekülen. Es kommt zu einer diffusen Strahlung aus der Atmosphäre und auch von den Wolken die, wie bereits erwähnt, Teile der Strahlung absorbiert haben. Letztlich erreicht etwa die Hälfte der Einstrahlung direkt oder indirekt den Erdboden. Es kommt zu einer Erwärmung der Erdoberfläche und damit natürlich auch zu einer langwelligen Wärmestrahlung. Diese wird jedoch nicht direkt wieder an den Weltraum abgegeben, sondern von der Atmosphäre als Gegenstrahlung reflektiert. Nur kleine Mengen werden sofort nach außen abgegeben und langfristig strahlt natürlich die Atmosphäre Energie in Form von Wärme ab. Am Ende wird in der Bilanz genau soviel Energie ausgestrahlt wie auch zugeführt wurde.¹

Innerhalb des Erde-Atmosphäre-Systems:

„Die Rundung, Drehung und der Winkel der Ekliptik der Erde ergibt deutliche räumliche und zeitliche Schwankungen beim Erhalt der Sonneneinstrahlung sogar auch an der Atmosphäre. Die Atmosphäre selbst verändert durch Absorption, Streuung und Reflexion diese Schwankungen. Wie schon aber besprochen, strahlen sowohl die Erde als auch die Atmosphäre langwellige Strahlen ab. Die Erdoberfläche absorbiert einen Strahlenfluss von 160 W m^2 und verliert tatsächlich nur 61 W m^2 . Daher erhält die Erdoberfläche einen positiven Nettostrahlungsfluss von ca. 100 W m^2 und dieser Überfluss verteilt sich auf alle Breitengrade. Im Gegensatz dazu absorbiert die Atmosphäre 63 W m^2 an kurzwelliger Strahlung verliert aber ungefähr 162 W m^{-2} an langwelliger Strahlung (abgezogener Nettotransfer durch Konduktion und Konvektion). So ergibt sich ein Defizit von ca. 100 W m^2 , das gleichmäßig über die Breitengrade verteilt ist. Das bedeutet nun, dass die Erdoberfläche Wärme an die Atmosphäre verlieren muss und einfache Hinzufügung der Atmosphären und

¹ vgl. Gregory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 36

Erdflüsse ergibt die breitengradabhängige Schwankung der Nettostrahlungsbilanz innerhalb des gesamten Erd-Atmosphäresystems. Diese Verteilung ist die tiefgreifendste der Meteorologie, weil sie die gesamte atmosphärische Zirkulation hervorruft. Ohne diese Zirkulation mit ihren Energietransfers und Energieumformungen würden die Breitengradienten vom Wärmegehalt und der Temperatur viel größer sein als man sie gegenwärtig findet.“¹

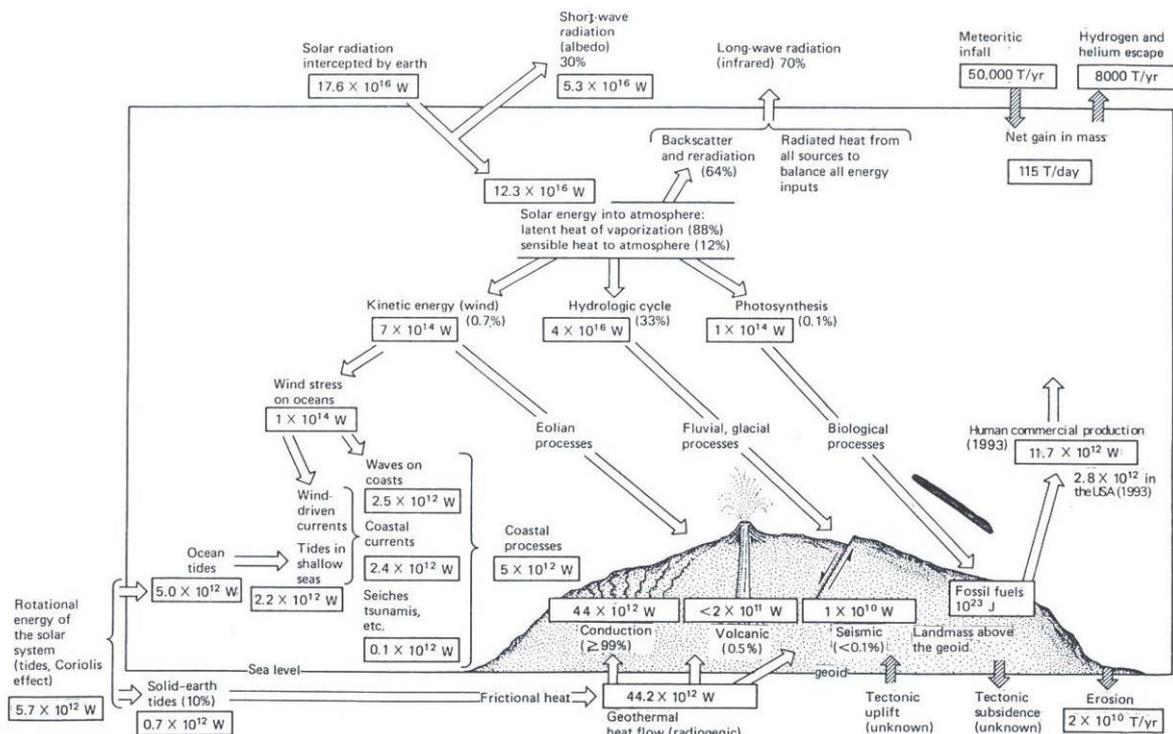


Abb.10: Energiebilanz, Quelle: Bloom 1998

¹Gregory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 37

Energieflüsse:

Es wird deutlich, dass im Erde-Atmosphäre System ein deutlicher Überschuss an Einstrahlung gegenüber Ausstrahlung in den niederen Breiten und ein Defizit in den höheren Breiten herrscht.¹ „Die Größe und die räumliche Konstellation des mittleren Nettostrahlungsungleichgewichts steht direkt im Bezug zu einem stark polwärts gerichteten Transport von Energie in der Atmosphäre und in den Ozeanen. Dieser Transport kann in 4 Kategorien unterteilt werden.“²

- durch sensiblen Wärmestrom
- potentielle Energie
- latente Wärme
- kinetische Energie

Die Mechanismen des Transports sind grundsätzlich zweifältig durch meridionale Zirkulation und durch Eddies. Letztere sind die Zyklone und Antizyklone, die ein sehr wichtiger Bestandteil des extratropischen Wetters und Klimas sind.¹

¹ vgl. Gregory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 38

² Gregory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 38

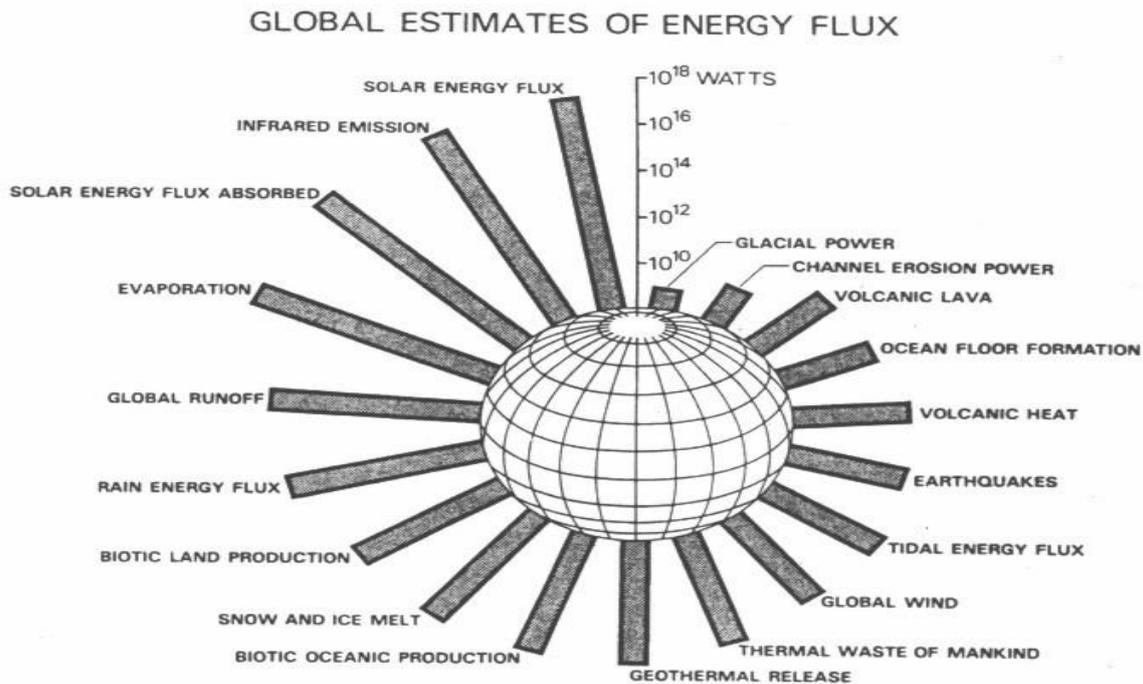


Abb.11: Globale Energieflüsse, Quelle: Gregory 1987

Energiespektrum:

„Obwohl die kinetische Energie der Atmosphäre nur ein kleiner Anteil des gesamten Energiegehaltes ist, sind die Bewegungen, die für sie typisch sind, das Kernstück der Meteorologie. Es ist seit langem klar, dass eine genaue Erkenntnis von Wetter und Klima vom Verständnis wie und warum sich Luft in der Atmosphäre bewegt, abhängt. Ein großer Schritt vorwärts zu einem besseren Verständnis war die stärkere Berücksichtigung des Maßstabs, was man durch theoretische wie empirische Standpunkte erreichen kann. Ein wichtiges empirisches Werkzeug ist das Varianzspektrum. Das erlaubt die Varianz einer räumlichen oder zeitlichen Serie aufzuschlüsseln, je nach Frequenz oder Wellenlänge. Wenn man von Varianz der Windgeschwindigkeit spricht, handelt es sich um eine Aussage über kinetische Energie. Demzufolge wurden in den letzten 3 Jahrzehnten einige Dutzend Geschwindigkeitsspektren konstruiert, die eine Beurteilung der Verteilung der kinetischen Energie in der Atmosphäre entsprechend ihrer Frequenz bzw. Wellenlänge erlauben. Alle Spektren zeigen große Maxima der Energie bei

Wellenlängen von mehreren tausend Kilometern und Laufzeiten von einem Tag bis zu einem Monat. In kleinen und kurzlebigen Systemen, fällt der Energiegehalt allerdings markant ab“.¹

ANGEWANDTE ASPEKTE:

Kraft aus der Atmosphäre:

„In den letzten Jahren wurde sich die Menschheit immer stärker über den steigenden Energiebedarf und über die steigenden Kosten an Energie für menschliche Aktivitäten bewusst. (...)

Die Atmosphäre hat 2 wichtige Energiequellen anzubieten: Windkraft und Solarenergie.“²

Windkraft:

Der Wind stellt eine gewaltige Menge an kinetischer Energie in der Atmosphäre dar, nämlich in der Größenordnung von 10^{20} J.³ Die Kraft des Windes wird folgendermaßen berechnet: Eine Masse der Luft m bewegt sich mit Geschwindigkeit v und hat die kinetische Energie $\frac{1}{2} mv^2$. Die Masse der Luft trifft auf eine Fläche A , normal zum Wind, in einer Sekunde ergibt sich δAv wobei δ die Dichte der Luft ist. Daher ergibt sich die kinetische Energie einer Masse Luft die auf die Fläche A in einer Sekunde trifft aus $\frac{1}{2} \delta Av^3$. Ein einheitlicher Wind der mit 10 ms^{-1} auf eine Fläche von 10 m^2 trifft, würde so ca. 6 KW erzeugen.³

Obwohl der Wirkungsgrad von Windkraftwerken noch nicht soweit ist wie in die Menschheit gerne hätte, beträgt er dennoch ca. 30 – 40%.³

¹ Greogory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 46

² Greogory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 47

³ vgl. Greogory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 47f

Solarenergie:

Besonders attraktiv ist natürlich die Möglichkeit Solarenergie direkt zum Erwärmen zu verwenden. Im Winter zum Beispiel können Raum,- und Wassererwärmung für häusliche Zwecke durchaus um die 1680 W benötigen. Um eine solche Energiemenge zu erzeugen, kann man horizontal verlegte Solarelemente verwenden (mit einem Wirkungsgrad von mindestens 50%) auf einer Fläche von ca. 160 m². Wenn man die Elemente so ausrichtet, dass die Sonnenstrahlen immer senkrecht einfallen, so kann man die gewonnene Energie jährlich um 60% steigern.¹

Menschlicher Einfluss auf die Energetik der Atmosphäre:

„Den Großteil seiner Geschichte war der Mensch der Gnade der natürlichen Elemente ausgeliefert, nicht zuletzt der Atmosphäre. Auch heute sind wir weit davon entfernt von der Natur unabhängig zu sein, aber immer bestrebt die Natur für sich zu nutzen, wie vorher erläutert. Allerdings hatte die menschliche Technologie in den letzten Jahren schädliche Auswirkungen auf die Umwelt, weswegen sich auch zunehmend die Wissenschaft mit diesem Thema beschäftigt.

Im Bezug auf die Energetik der Atmosphäre haben viele Effekte große Aufmerksamkeit erhalten: gasförmige Schmutzstoffe (besonders CO²), atmosphärische Schwebstoffe, Belastung durch Wärme und Veränderungen der Erdoberfläche.

CO² ist nur eine kleine Komponente der Atmosphäre, aber trotzdem spielt es eine wichtige Rolle im Temperaturhaushalt des Planeten. (...) Es absorbiert und emittiert langwellige Strahlung und ist eine Art Schutzmantel für die Atmosphäre.“² Allerdings ist es in den letzten Jahrzehnten zu einem starken Anstieg der CO² Konzentration in der Atmosphäre gekommen, was nachweisbar zu einer globalen Erwärmung führt. Man verwendet in diesem Bereich sehr genaue mathematische Modelle. Viele dieser Modelle nehmen als Voraussetzung den doppelten CO² Gehalt der Atmosphäre, und solche Berechnungen kommen teilweise zu Ergebnissen einer Erdoberflächenerwärmung von 1,5 bis 3°C.³ „Partikel in der Luft beeinflussen die

¹ vgl. Greogory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 48f

² Greogory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 48

³ vgl. Greogory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Greogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 49f

Energetik der Atmosphäre aufgrund ihrer Interaktion mit der Solar,- und der terrestrischen Strahlung. Natürlich gelangen auch auf natürlichem Weg verschiedene Materialien in die Atmosphäre (zum Beispiel: Vulkane), aber der Mensch hat vor allem lokal betrachtet zu einem Ausstoß von Schmutzpartikel beigetragen vor allem in städtischen Ballungszentren).¹

Im kurzwelligen Bereich der Solarstrahlung können Partikelschichten sowohl die globale Albedo, als auch die Absorption der Strahlung der Atmosphäre verändern. Bei einer Vergrößerung der Albedo könnte es zu einem Abkühlen des Planeten kommen. Wärmeverschmutzung oder die Emission von Abfallwärme ist sicher die am wenigsten gefährliche Bedrohung für den Planeten.¹

Die wichtigste Einflussgröße des Menschen für unseren Planeten ist dessen Fähigkeit die Erdoberfläche zu verändern.

Folgende Eigenschaften der Oberfläche beeinflussen auch die Energetik:¹

- Reflexionsvermögen (Albedo)
- Wärmekapazität und –leitfähigkeit
- Wasserverfügbarkeit
- Verfügbarkeit von Staub
- Aerodynamische Rauigkeit
- und Emissionsvermögen im Infrarotbereich

Veränderung einer dieser Eigenschaften beeinflusst die Aufteilung der Energie, manchmal kommt es zu einer Steigerung der Verluste, in den meisten anderen Fällen kommt es zu einer Veränderung der Verteilung und der Verwendung der Energie.¹

Wenige dieser Effekte wurden bisher auf seriöse Art und Weise abgeschätzt.¹

¹ vgl. Geogory; K.J. (1987) "Atmospheric Energetics", in Geogory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) S. 48f

5.4 Rotationsenergie des Erde - Mondsystems

„Jede Masse hat eine immanente Anziehung für jede andere Masse. Diese schwache Kraft, Gravitation genannt, ist eine spezifische Eigenschaft von Massen. Auch wenn die Eigenschaften von Gravitation undefiniert bleiben, wissen wir etwas über ihre Funktion. Gravitationskräfte zwischen zwei großen Objekten, die weit voneinander entfernt sind, verhalten sich so, als wäre die ganze Masse eines jeden Objektes auf das Zentrum der Masse bzw. Zentrum der Gravitation konzentriert. Da alle Objekte auf der Erdoberfläche kleine Massen im Vergleich mit der des Planeten haben, so sehen wir üblicherweise die Kraft der Gravitation als Tendenz eines frei fallenden Objektes an der Oberfläche, auf das Zentrum der Erde hin zu beschleunigen.

Objekte die sich in geraden Linien relativ zu den Sternen bewegen scheinen sich in der Nordhemisphäre nach rechts zu biegen und nach links in der südlichen Hemisphäre, für einen Beobachter der auf einem kreisförmigen Pfad von der Erdrotation mitbewegt wird. Dieser sogenannte „Corioliseffekt“ ist proportional zum Sinus der Breite und der Geschwindigkeit des Objektes.“¹ Die Gravitation ist die schwächste der vier bekannten Grundkräfte der Physik. Aufgrund ihrer unbegrenzten Reichweite und des Umstandes, dass sie sich nicht abschirmen lässt, ist sie dennoch die Kraft, die die großräumigen Strukturen des Kosmos prägt. Sie spielt daher in der Kosmologie eine entscheidende Rolle.

Die Gravitation zwischen zwei Körpern kann man mit dem Gravitationsgesetz von Newton beschreiben:

$$F = G \frac{m^1 * m^2}{r^2},$$

wobei G für die Gravitationskonstante ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N/m}^2/\text{kg}^2$), m^1 bzw. m^2 für die Massen und r für den Abstand der beiden Körper steht.²

Wasser, das als Regen oder Schnee auf die 29 % der Erdoberfläche fällt die über Meeresniveau liegen, tendiert dazu sich abwärts zurück zu den Ozeanen oder zu geschlossenen Depressionen aufgrund der Gravitation zu bewegen. Die wenigen Örtlichkeiten wo trockenes Land bis unter Meeresniveau reicht (Death valley, Kalifornien bei -86 m) sind Ausnahmen der Regel dass die Meereshöhe Grenze des

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 28

²vgl. Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). S.14

bergab fließenden Wassers ist. Die Tendenz des Wassers abwärts zu fließen, ist die Hauptursache für die meisten Erosionslandformen.“¹

Außerirdische Gravitation: die Gezeiten:

„Die Gravitationskräfte des Mondes, Sonne und nahe gelegener Planeten werden als Reibungskräfte in der Hydrosphäre und Lithosphäre der Erde aufgebraucht. (...) Gezeitenenergie ist ein wichtiger Faktor bei der Küste, und deswegen sind die Gezeiten auch am besten in der Meeresumwelt erforscht.“¹

Physikalische Erklärung:

Die physikalische Ursache der Gezeiten ist die Gezeitenkraft. Sie beruht darauf, dass die Gravitationskraft mit der Entfernung abnimmt. Die Anziehungskraft des Mondes ist auf der dem Mond zugewandten Seite der Erde wegen der geringeren Entfernung zum Mond größer, als auf der dem Mond abgewandten Seite. Durch die daraus resultierenden Kräfteverhältnisse ergeben sich an diesen beiden Stellen jeweils ein Gezeitenberg und in den Gebieten dazwischen Gezeitentäler. Mond und Erde bilden ein System mit einem gemeinsamen Schwerpunkt. Sowohl Mond als auch Erde kreisen beide um diesen Systemschwerpunkt. Da die Erde 81 Mal so schwer ist wie der Mond, befindet sich dieser Schwerpunkt noch im Inneren der Erde. Er ist 4740 km vom Erdmittelpunkt entfernt. Der Radius der Erde beträgt 6378 km. Die Erde führt die Bewegung um den Systemschwerpunkt als starres Ganzes aus. Durch diese kreisförmige Bewegung wird also eine identische Beschleunigung (und Fliehkräfte) in jedem einzelnen Punkt der Erde erzeugt. Das Gravitationsfeld des Mondes erzeugt für jeden Punkt der Erde eine entgegengesetzte Beschleunigung, so dass sich beide Beschleunigungen im Mittel aufheben. Durch dieses Gleichgewicht laufen Mond und Erde auf stabilen Bahnen. Das Mond-Gravitationsfeld übt allerdings nicht auf jeden Punkt der Erde die gleiche Beschleunigung aus. Auf der mondnahen Seite der Erde ist das Gravitationsfeld etwas stärker als die Fliehkraft, und es bildet sich der erste Flutberg. Etwa im Erdmittelpunkt heben sich beide Kräfte auf. Auf der mondfernen

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 28

Seite ist die Fliehkraft stärker als die Mondgravitation, und es bildet sich der zweite Flutberg.¹

5.5 Interne Erdwärme

„Das Innere der Erde ist heißer als das Äußere. Der Großteil der inneren Erdwärme wird durch radioaktiven Zerfall natürlicher Isotope wie Uran, Thorium und Kalium unter Mitwirkung von Rotations- und Gezeitenreibung, und einem ungewissen Anteil an ursprünglicher Wärme von der Erdentstehung, erzeugt. Obwohl dieser Anteil an Energie verglichen mit der Sonneneinstrahlung sehr klein zu sein scheint, stellt diese innere Wärme beinahe die gesamte Energie zur Verfügung, um die Tektonik und den Vulkanismus anzutreiben.“²

Der Anstieg der Temperatur mit der Tiefe ins Erdinnere ist der so genannte Geothermische Gradient. Ein typischer nahe der Erdoberfläche üblicher Gradient wäre ca. 20° bis 30°C/km.¹

„Die Energetik von geomorphologischen Prozessen versteht man besser in Form von thermischer Wärme, die vom Inneren der Erde zur Oberfläche fließt, als mit Hilfe des Temperaturgradienten innerhalb der Erde.“²

„Der Wärmefluss ist das Produkt des geothermischen Gradienten und der thermischen Leitfähigkeit der Gesteine, durch welche hindurch der Gradient gemessen wird, zuzüglich der transportierten Wärme durch konvektiven Flüssigkeitstransport. Die Rate des Energieflusses zur Erdoberfläche durch interne Wärme beträgt ungefähr $44 \cdot 10^{12}$ Watt, berechnet aus dem gemessenen Durchschnittswärmefluss auf den Kontinenten und in Ozeansedimenten.(...)Ungefähr 70 % des Wärmeflusses aus dem Erdinneren wird dazu verwendet um die absinkenden Platten der Lithosphäre in Subduktionszonen wieder zu schmelzen (...) Wie z.B. Eiswürfel in einem Glas Wasser kühlen diese schmelzenden Platten den umgebenden Mantel und verringern dadurch den geothermischen Wärmefluss zur Oberfläche über ihnen. Umgekehrt ist der geothermische Wärmefluss größer bei den Mittelozeanischen Rücken, dort wo neues Mantelmaterial aufsteigt.“²

¹ vgl. Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 28f

² Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 29

Viel Forschungsarbeit ist noch notwendig, aber man weiß bereits das Wärmeenergie und Geothermische Gradienten im Inneren der Erde, unterstützt durch Rotationskräfte und Gravitation, all die tektonische Aktivität in der Lithosphäre antreiben.

Gebirgsbildende Kräfte:

„Um eine Masse von Sedimenten zu einem Gebirge zu heben, muß gegen die Gravitation gearbeitet werden. Allerdings benötigt die tektonische Hebung um den jährlichen Abtrag durch Erosion zu ersetzen nur $7 \cdot 10^9 \text{W}$ (Verhoogen, 1980, S. 8). Das ist um einige Größenordnungen weniger als bei Vulkanen und Erdbeben, und ein vernachlässigbarer Anteil des totalen geothermischen Wärmeflusses“¹

¹Bloom, L.A. "Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, S. 30

6. Gebirgsgeomorphologie

„Die letzten Jahrzehnte brachten ein steigendes Interesse an wissenschaftlicher Forschung im Bereich der Hochgebirge, eine Zeit in der auch der menschliche Einfluss auf diesen Umweltbereich stark gestiegen ist. Dieser Trend ist durch eine steigende Anzahl von Publikationen belegt, die sich mit dieser Materie auseinandersetzen (z.B.: *Artic and alpine research*, *Mountain research and development*, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie*).¹ Es ist nicht so einfach Gebirgsmorphologie zu definieren, weil auch sie die dichotome Struktur der Geomorphologie (*study of landforms bzw. study of geomorphic processes*) beinhaltet.²

„Jüngste Arbeiten beschäftigen sich größtenteils mit geomorphologischen Prozessen, um ein besseres Verständnis für die Landformen zu bekommen. Im Gegensatz dazu war die klassische Ansicht der Geomorphologie eher auf das Studium der Landformen, die Geschichte der Landschaften in die sie eingebunden sind, und auf der Suche nach Modellen der Reliefentwicklung ausgerichtet. Wichtiger Fakt ist, dass Landformen sehr selten das Produkt der Prozesse sind, die im Moment auf sie einwirken. Besonders in den Berggegenden ist der Gegensatz zwischen Landformen und den jetzt wirkenden Prozessen offensichtlich.“³

„Das zweite Problem bei der Definition von Mountain Geomorphology ist der Ausdruck Berg. Probleme dieser Art treten immer auf, wenn ein Gebiet nicht durch administrative Einheiten begrenzt ist.“³ Während die höchsten Gipfel im Himalaya und in den Anden natürlich zu den Hochgebirgen zählen, ist es bei kleineren Gipfeln und bei Hochplateaus schon nicht mehr so eindeutig. Die einzelnen Wissenschaftler haben hier meist ihre eigenen Definitionen. Interessant ist, dass es in der deutschsprachigen Literatur eine eindeutige Unterscheidung zwischen Hochgebirge, Gebirge und Mittelgebirge gibt.

¹ Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", *Mountain Res. Dev.*4: S. 287

² vgl. Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", *Mountain Res. Dev.*4: S. 288

³ Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", *Mountain Res. Dev.*4: S. 288

6.1 Kriterien eines Hochgebirges

Von einem geomorphologischen Standpunkt aus werden üblicherweise 4 Charakteristika herangezogen um ein bergiges Gebiet auszuweisen.¹

- Höhe
- Steiles Gefälle
- Felsiges Terrain
- Anwesenheit von Schnee und Eis

Andere wichtige Merkmale zum Verständnis der Morphologie der Berge:¹

- Bergländer sind intern verschieden und unbeständig, eine Unbeständigkeit die sich von ihrer Höhenlage, Relief und Exposition herleitet.
- Die meisten Gebirgssysteme zeigen pleistozäne Vergletscherung
- Viele Gebirgssysteme (besonders die Höchsten) sind auch heute noch tektonisch aktiv, wobei häufig die tektonische Hebung die Abtragung übertrifft
- Schließlich befinden sich viele Gebirgsregionen in einem metastabilen Zustand, der sie für Störungen besonders anfällig macht

„Berge und Hochgebirge wie die Alpen, Rocky Mountains und der Himalaya haben Landschaften, die durch das vertikale Relief gekennzeichnet sind. (...) Wegen ihrer Größe und ihren Einfluss auf das Leben und das Klima, gehören Bergsysteme zu den wichtigsten Landschaftsformen auf der Erde. Sie besitzen ein spezielles Relief, das eine lange Periode tektonischer – geologischer - geomorphologischer Entwicklung widerspiegelt. Aus diesem Grund werden Hochgebirgssysteme durch komplizierte geologische Strukturen charakterisiert, und mit intensiven Faltungen und Störungen in Verbindung gebracht (...) Kennzeichnend für Hochgebirge ist ebenfalls eine steile Topographie die durch Felswände und steile Hänge bestimmt ist(Neigungen von 35° bis 60°).“²

¹ vgl. Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", Mountain Res. Dev.4: S. 288

² Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", Mountain Res. Dev.4: S.289f

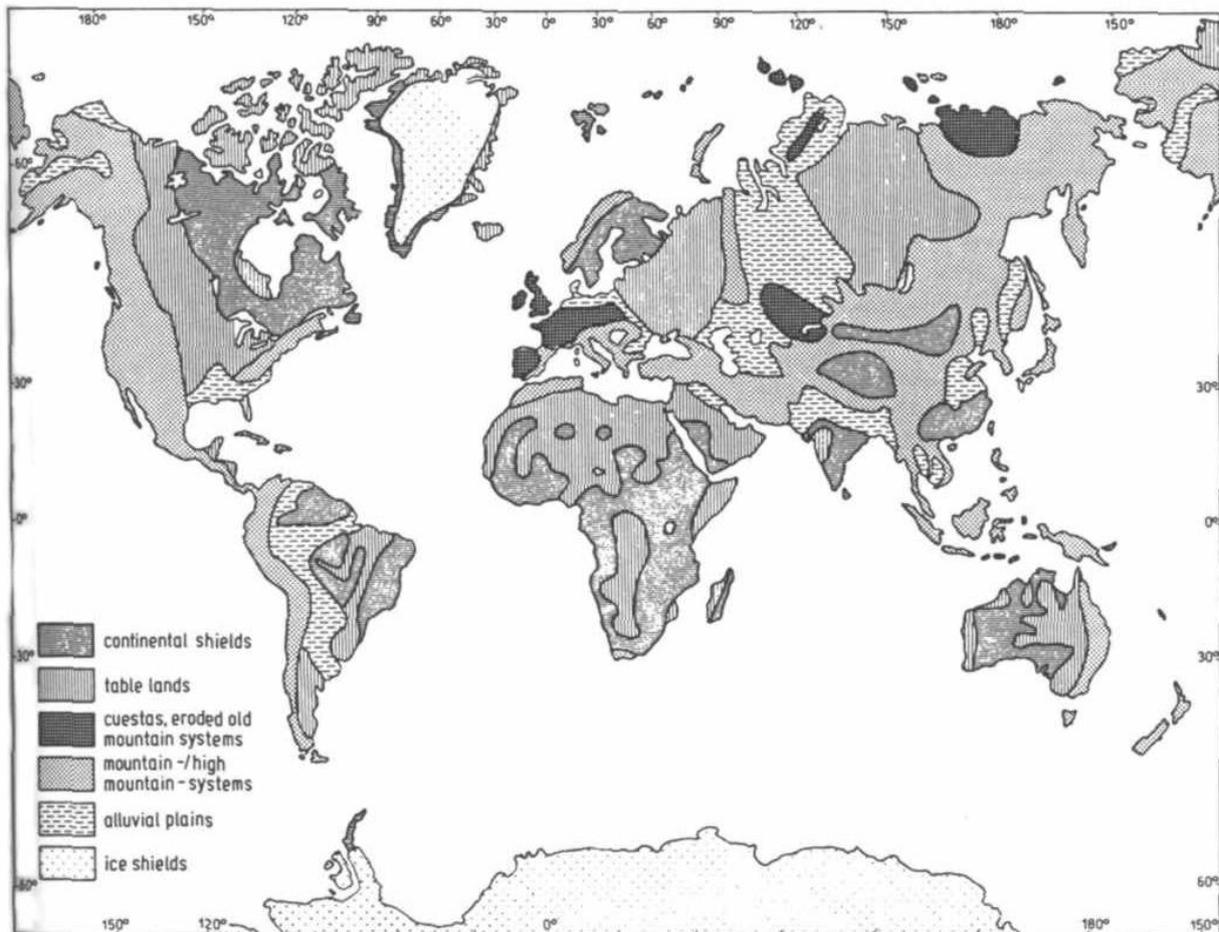


Abb.12: Die Reliefformen auf der Erdoberfläche, Quelle: Barsch, 1984

Man unterscheidet 2 Relieftypen:¹

- Alpen Typ
- Rocky Mountain Typ

Erst genannter zeichnet sich durch einen stärkeren Einfluss der Vergletscherung und somit durch stärkere glaziale Erosion aus. Der Rocky Mountain Typ ist nicht so sehr durch Vergletscherung gekennzeichnet, und er weist bedeutende Flächen von flachem Relief auf flachen Gipfeln auf.¹

„Das Relief im Hochgebirge zeigt häufig interne Störungen, so folgen auch die Haupttäler meist Störungslinien, die über weite Strecken verfolgt werden können. Die Zergliederung der Landschaft wurde für die Entwicklung von Hochgebirgen lange als

¹vgl. Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", Mountain Res. Dev.4: S. 291

bedeutend angesehen, und es wurde viel Mühe auf sich genommen um die fluviatile bzw. glaziale Arbeit auseinander zu halten.“¹

Es gibt natürlich noch andere charakteristische Eigenschaften von Bergregionen, die Bedeutung derer ist wiederum von der wissenschaftlichen Fragestellung abhängig. Aufgrund der großen Anzahl an Bergtypen und ,-formen könnte man viel Zeit aufwenden um zu einer allumfassenden Definition zu kommen, die allerdings nur schwer zu formulieren sein wird. Es gibt sicherlich bedeutendere Fragen und Umweltbelange im Gebirge, auf die sich die Geomorphologie konzentrieren sollte.

6.2 4 Hauptrelieftypen innerhalb der Hochgebirgssysteme

Barsch und Caine (1984) beschrieben 4 Hauptrelieftypen innerhalb der Hochgebirgssysteme:²

- Alpentyp
- Rocky Mountaintyp
- Polarberge
- Wüstenberge

Ersterer zeichnet sich durch einen stärkeren Einfluss der Vergletscherung und somit durch stärkere glaziale Erosion aus. Der Rocky Mountain Typ ist nicht so sehr durch Vergletscherung gekennzeichnet, und er weist wichtige Flächen von flachem Relief auf flachen Gipfeln auf.

Polarberge zeigen oft Hinweise von intensiver Vergletscherung, haben aber häufig nur einen lokalen Reliefunterschied von weniger als 1000m.

Wüstenberge erreichen oft nicht die Baumgrenze, und waren nur leicht vergletschert, wenn überhaupt dann nur während des Pleistozäns. Man könnte durchaus noch viele Zusätze zu den 4 oben genannten Haupttypen machen. Erwähnenswert ist sicherlich die Gruppe der Vulkanberge, die aufgrund ihrer besonderen Morphologie

¹ Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", Mountain Res. Dev.4:S.291

² vgl. Barsch, D. und Caine, N. (1984) "The nature of mountain geomorphology", Mountain Res. Dev.4: S.291

(kegelförmig), der verschiedenen vulkanischen Prozesse, und der Gefahr die sie eventuell für die Menschheit bedeuten, eine Sonderstellung einnehmen.

6.3 Typologie der Gebirgsgeomorphologie

„Eine einfache Typologie der Gebirgsgeomorphologie ist die Dreiteilung in historische, funktionelle und angewandte Gebirgsgeomorphologie und basiert auf der Klassifikation von Chorley (1978)“.¹

6.3.1 Historische Gebirgsgeomorphologie

„Sie beschäftigt sich mit der Entwicklung der Berge und Bergsysteme, sowohl über längere als auch kürzere Zeitskalen. Generell unterscheidet man zwischen jungen (känozoisches Alter) und älteren Bergen.“¹

Plattentektonik und bedeutende Abschnitte der Gebirgsentstehung:

Die Entstehung der Gebirge ist stark mit den Platten der Erdkruste und deren Bewegung verbunden. Es gibt 6 Hauptplatten (Pazifische, Eurasische, Indo-Australische, Antarktische, Afrikanische und Amerikanische) und 14 zumindest kleinere Platten.²

Plattenbewegungen werden durch die relative Bewegung zwischen der Lithosphäre und Asthenosphäre und durch Gradienten in der Dicke und Dichte der Lithosphäre hervorgerufen (Windley, 1995).²

Die Platten werden von drei Typen seismisch und tektonisch aktiver Grenzen begrenzt.²

- Konvergenzränder, einschließlich Subduktionszonen und kontinental – kontinental Kollisionszonen.
- Divergenzränder oder Spreizungszonen und
- Störungszonen

¹Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold S. 8.

²vgl. Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S. 9

Konvergenzränder treten dort auf wo 2 Platten miteinander kollidieren und eine auf die andere aufgleitet. Dort, wo kontinentale und ozeanische Platten sich nähern, bedeutet die größere Dichte der ozeanischen Platte, dass sie abtaucht. Konvergenzränder sind die Regionen mit der größten Verkürzungs- und höchsten Scherbewegung auf der Erdoberfläche. Sie werden häufig in einem Atemzug mit einem Maximum an seismischer Aktivität und den schwersten Erdbeben genannt.¹

Es gab 3 Hauptgebirgsbildungsphasen deren Auswirkungen auf die heutige Landschaft tief greifend sind. Die Alpenbildung war die letzte große Phase der Gebirgsbildung und passierte während des Mesozoikums bzw. Känozoikum.¹

Auf der größten Maßstabebene ist es üblich zwischen jungen Gebirgsgürteln, die während des Känozoikums entstanden sind, aktiven Plattenrändern, die der Lithosphäre zugeordnet werden, und zwischen Bergen auf passiven Kontinentalrändern zu unterscheiden. Der Großteil der Literatur der letzten 40 Jahre, der sich mit Gebirgsbildung beschäftigte, konzentrierte sich auf aktive Ränder, wo versucht wurde, mittels Kollision und Subduktion die Berge und ihre innere Struktur zu erklären.¹

Die Hauptgebirgssysteme an den Plattengrenzen sind immer noch aktiv, was bedeutet, dass sie sich gegenwärtig noch durch Plattensubduktion und Plattenkollision verformen. Die letzten Beispiele für solche Gebirgssysteme sind das alpin - himalayische – tibetanische, und das Zirkum – pazifische- orogenische System.¹

Die Entstehung der Alpen begann vor rund hundert Millionen Jahren in einem Gebiet, in dem sich vorwiegend Sedimente aus dem Erdmittelalter (Jura) und aus dem Alttertiär an der Oberfläche befanden. Im Jungtertiär vor 45 Millionen Jahren kamen Faltung und Hebung zum Höhepunkt. Das Jungtertiär ist also die eigentliche Entstehungszeit der Alpen. Dabei dauerte die kompressive Gebirgsbildungsphase, auch hochorogenes Stadium genannt, ca. 35 -45 Mio. Jahre.² Während dieser Phase trafen zwei Lithosphärenplatten (die europäische und die afrikanische) aufeinander. Bei dieser Kollision wurden durch Subduktion die unteren Schichten der europ. Platte tief in die Asthenosphäre gepresst, während die südliche Platte sich über sie schob. Beim Aufeinandertreffen kam es zur Faltung der Deckschichten mit Deckenüberschiebung. Dieser Prozess hält heute noch an, wobei sich die Hebung mit

¹ vgl. Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.9f

² vgl. Geologische Bundesanstalt (1999), „Rocky Austria – Eine bunte Erdgeschichte von Österreich“, S. 44

einer Rate von 0,5 mm pro Jahr im Ausklingen befindet.¹ Die Erdkruste wurde und wird bei diesem Prozess gestaucht, verfaltet, in die Höhe gewölbt und auch in die Tiefe gepresst.

Die heutige Form der Alpen ist darüber hinaus stark durch Eiszeiten geprägt worden. Viermal wurden die Gebirge durch einen Eispanzer fast völlig eingehüllt. Gletscher schoben sich talwärts und formten tiefe Trogtäler, sowie spitze Felsgräte – das typische Bild der Hochgebirgsregionen.

Im Aufbau unterscheidet man die West-, Ost- und Südalpen.

6.3.2 Funktionale Gebirgsgeomorphologie

„Funktionale Gebirgsmorphologie beinhaltet eine Beurteilung der Prozesse, Raten und räumlicher und zeitlicher Muster der Erosion und Ablagerung. Die Analyse der Prozessgefüge sollte idealerweise eine Betrachtung der Kopplung von Hebung und Erosion beinhalten. Bisher scheiterten allerdings viele geomorphologische Modelle bei dem Versuch diese Kopplung zu modellieren. In Gebirgsregionen ist eine solche Modellierung zwingend erforderlich, da gerade hier sowohl Hebungs,- und auch Erosionsraten sehr hohe Werte erreichen und die Kopplung beider Prozesse noch entscheidender ist als im Flachland.“²

Um Hochgebirgssysteme besser zu verstehen schlägt Caine ein Prozesssystem mit 4 Einheiten vor:³

- Gletschersystem
- Grobsedimentsystem
- Feinsedimentsystem
- Geochemisches System

Die verschiedenen Systeme haben verschiedene Kontrollorgane, Reaktionen und Aktivitätsstufen. Die Systeme schließen sich nicht gegenseitig aus im Bezug auf die

¹ vgl. Geologische Bundesanstalt (1999), „Rocky Austria – Eine bunte Erdgeschichte von Österreich“, S. 44

² Owens P., Slaymaker O. (2004) „Mountain Geomorphology“-Arnold. S.13

³ vgl. Owens P., Slaymaker O. (2004) „Mountain Geomorphology“-Arnold. S.13

Prozesse die in Ihnen vor sich gehen, und die räumlichen und zeitlichen Maßstäbe über welche die Prozesse erfolgen, aber diese Klassifikation liefert einen geeigneten Rahmen um Gebirgsgeomorphologische Prozesse zu charakterisieren, und um Stoffflüsse im Gebirgssystem zu untersuchen.¹

Gletschersystem:

Dieses System findet man im Allgemeinen in den höchsten Erhebungen, obwohl es auch Situationen gibt wo Gletscher ins Meer fließen. Das Vorkommen von Wasser in der Form von Schnee und Eis ist wichtig für die Erosion, den Transport von Sediment und für die Zulieferung von fließendem Wasser (besonders in der Zeit des Schmelzens).¹

In vergletscherten Gebieten (solche die heute noch aktive Gletscher aufweisen) ist das Gletschersystem die vorherrschende Einflussgröße auf die Erosionsaktivität.¹ Caine zeigt, dass Denudationsraten im vergletscherten Gebiet weit höher sind als im nicht vergletscherten Einzugsgebiet.¹ Welche Rolle Gletscher tatsächlich bei der Erosion der Landoberfläche spielen, ist noch immer nicht geklärt. Hinzukommt, dass widersprüchliche Beziehungen zwischen flussspezifischen Sedimentertrag (Sedimentmenge pro Flächeneinheit pro Zeiteinheit; $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) und der prozentuellen Gletscherbedeckung bestehen.¹ Das rührt zum einen daher, dass der prozentuelle Anteil des vergletscherten Gebietes ein schlechtes Maß für glaziale Aktivität und Sedimentproduktion ist. Zusätzlich wird eine genaue Form der Beziehungen zwischen Gletscherbedeckung, glazialer Erosion und Sedimentertrag durch das Ausmaßes der Hang – Gletscher – Gerinne Verknüpfung und durch kurzzeitige Speichereffekte in der Proglazialzone erschwert. Die Wichtigkeit der Proglazialzone für die Kontrolle des Sedimentertrages, indem sie entweder als Sedimentfalle oder als Sedimentquelle wirkt, wurde für alpine vergletscherte (Warburton 1990, 1999, Harbor und Warburton 1993) und für arktische Gebirgsbecken dokumentiert.¹ Wenn auch nicht explizit Teil des Gletschersystems, so kann man auch Permafrost in den Bergen hier erwähnen (Boden mit Temperaturen unter 0°C für mehr als 2 Jahre).

„In der Tat ist das gesamte kryosphärische System (beinhaltet Schnee und Eis, das Gletschersystem und Permafrost in den Bergen) aufgrund seiner Abhängigkeit von

¹vgl. Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.13f

den Schmelzbedingungen sehr empfindlich Änderungen der Umweltbedingungen gegenüber. Daher ist auch der Zeitpunkt, die Rate und Größe der Reaktion von geomorphologischen Prozessen und Materialflüssen innerhalb verschiedener Komponenten des kryosphärischen Systems streng vom Zeitpunkt des Schmelzens von Eis und Schnee abhängig.“¹

Das System der grobkörnigen Sedimente:

„Dieses System umfasst den Transfer von grobkörnigem Sediment zwischen den Kliffs und Felswänden und den Ablagerungsorten, die von ihnen gespeist werden. Dieses System kann in das Gletschersystem einleiten, es kann aber auch ein geschlossenes System sein. Steinschläge, Landrutschungen, Lawinen und Muren sind Beispiele, die dieses System antreiben. (...) Solche Prozesse liefern grobkörniges Sediment zu den Flussläufen, dadurch verbinden sie Berghänge und Kanäle und höher gelegene mit tiefer gelegenen Bereichen.

In der Folge ist die Sedimentfracht bei Gebirgsflüssen am höchsten. Denn besonders steile Oberläufe, mit einem reichlichen Angebot an grobkörnigem Sediment kombiniert mit hohen Fließgeschwindigkeiten aufgrund des starken Gefälles, ergeben ideale Bedingungen.“¹

Das System der feinen Sedimente:

„Dieses System ist eher ein offenes System. Inputs können sowohl autochton (innerhalb des Beckens) und allochton (außerhalb des Beckens) sein. Autochtone Quellen beinhalten Verwitterungsprodukte und Oberflächenerosion von Böden und ungeeinigten Material.“²

„Allochtoner Inputs beinhalten regionalen aeolischen Staubbiederschlag. Allochtoner Staubbiederschlag in den alpinen und subalpinen Zonen vieler Gebirgsketten kann als wichtiger pedogener und geomorphologischer Prozess angesehen werden (Birkelrad 1973, Kotarba 1987, Litaor 1987).“³

¹Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.15

²Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.16

³Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.18

„Es ist interessant, dass, während solche Inputs reichlich feine Sedimente für anschließende Wiederverteilung durch Erosion und fluviatile Prozesse liefern, sie auch helfen können um das Muttergestein von an der Erdoberfläche auftretenden Verwitterung zu schützen (Owens und Slaymaker, 1997).“¹ Wichtig ist es auch zu erkennen, dass aeolische Prozesse eine wichtige Rolle beim Erodieren, Transportieren und Ablagern feiner Sedimente in Bergen mit limitierten Vegetationsbedingungen spielen.

„Dedkov und Moszherin (1992) beschreiben 2 entgegengesetzte maßstabsabhängige Beziehungen zwischen spezifischen Sedimentertrag und Einzugsgebietsfläche.“¹ Bei der ersten ist spezifischer Sedimentertrag positiv mit der Einzugsgebietsfläche verknüpft. Dieser Fall tritt hauptsächlich in gebirgigen Gegenden mit Waldbedeckung auf, wodurch die Hangerosion minimal ist und die Kanalerosion das Sedimentsystem dominiert. Die Sedimentfracht ($t\ km^{-2}$) ist proportional zum Abfluss und daher nimmt der Sedimentertrag mit der Einzugsgebietsgröße zu.²

Bei der zweiten Beziehung ist der spezifische Sedimentertrag indirekt proportional zu größer werdender Einzugsgebietsfläche. Dieser Fall tritt meist in gebirgigen Gebieten mit schlecht ausgebildeter Vegetationsdecke, hoher Oberflächenerosion und mechanischer Denudation auf, ebenso auch in Waldgebieten mit menschlichem Einfluss.²

In solchen Becken dominieren Hangprozesse. Da es bessere Gelegenheiten für Ablagerung bei steigender Transportdistanz gibt, so nimmt der spezifische Sedimentertrag mit steigender Fläche ab, obwohl eventuell die absolute Sedimentfracht steigt.²

Das geochemische System:

„Im Allgemeinen sind chemische Denudationsraten niedriger als gleichwertige Werte für mechanische Denudation, wie zum Beispiel bei Flusssedimenten.“ Trotzdem, seit den Pionierarbeiten von Rapp (1960) in der Gegend um Kärkevage in Nordskandinavien, erkannte man die Bedeutung des Geochemischen Systems bei Materialflüssen. Es ist eng verknüpft mit Verwitterung durch Lösung, mit Nivation und

¹Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.18

²vgl. Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.18

Flussprozessen. Das Muttergestein, die Oberflächengeologie und die Ablagerungen, in Verbindung zu den physischen Charakteristika eines Beckens wie Größe und Relief, üben einen großen Einfluss auf die Art von Geochemischen Reaktionen und daher auch auf die Geochemischen Flüsse aus (Sueker et al. 2001).

Zum Beispiel haben Gebiete mit darunter liegendem granitischem Gestein generell niedrigere Raten an chemischer Verwitterung als Gebiete mit Sedimentgestein (Bluth und Kump, 1994). Die Kontaktzeit zwischen Wasser (auch mit Schnee und Eis) und Materialquellen, und daher die Verweilzeit des Wassers innerhalb eines Beckens, sind ebenfalls von Bedeutung für die Kontrolle der Intensität der Verwitterung und von Lösungsflüssen innerhalb und aus dem System heraus. Steigerungen der Temperatur, der Vegetationsbedeckung und die Dicke von abgelagerten und unkonsolidiertem Sedimenten dürften die Wichtigkeit des Geochemischen Systems an tiefer gelegenen Orten erhöhen (Drever und Zobrist, 1992).“¹

6.3.3 Angewandte Gebirgsmorphologie

„Eine Beurteilung und ein Verständnis geomorphologischer Prozesse im Gebirge wird deswegen immer wichtiger, da sich der Lebensraum der Menschen immer mehr ausbreitet, und auch gebirgige Gegenden in Anspruch nimmt. Ein Verstehen der Auswirkungen der Gesellschaft auf geomorphologische Prozesse wie auch umgekehrt wird angestrebt.“²

¹Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.19

²Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. S.20

7. Beschreibung des Untersuchungsgebietes

„Das Reintal liegt im nördlichen Teil der bayrischen Alpen, nahe der deutsch-österreichischen Grenze. Das Becken liegt im „Wettersteingebirge“ und entwässert die nord-östliche Flanke des Zugspitzmassivs, wo sich der höchste Berg der deutschen Alpen, die Zugspitze (2962m), befindet. Aufgrund des vorherrschenden Kalkgesteins, findet man den typischen Kartformenschatz und unterirdische Entwässerung. Das Untersuchungsgebiet ist hochalpines Gebiet mit mehreren Gipfeln über 2700 m und einer Fläche von 17km².“¹

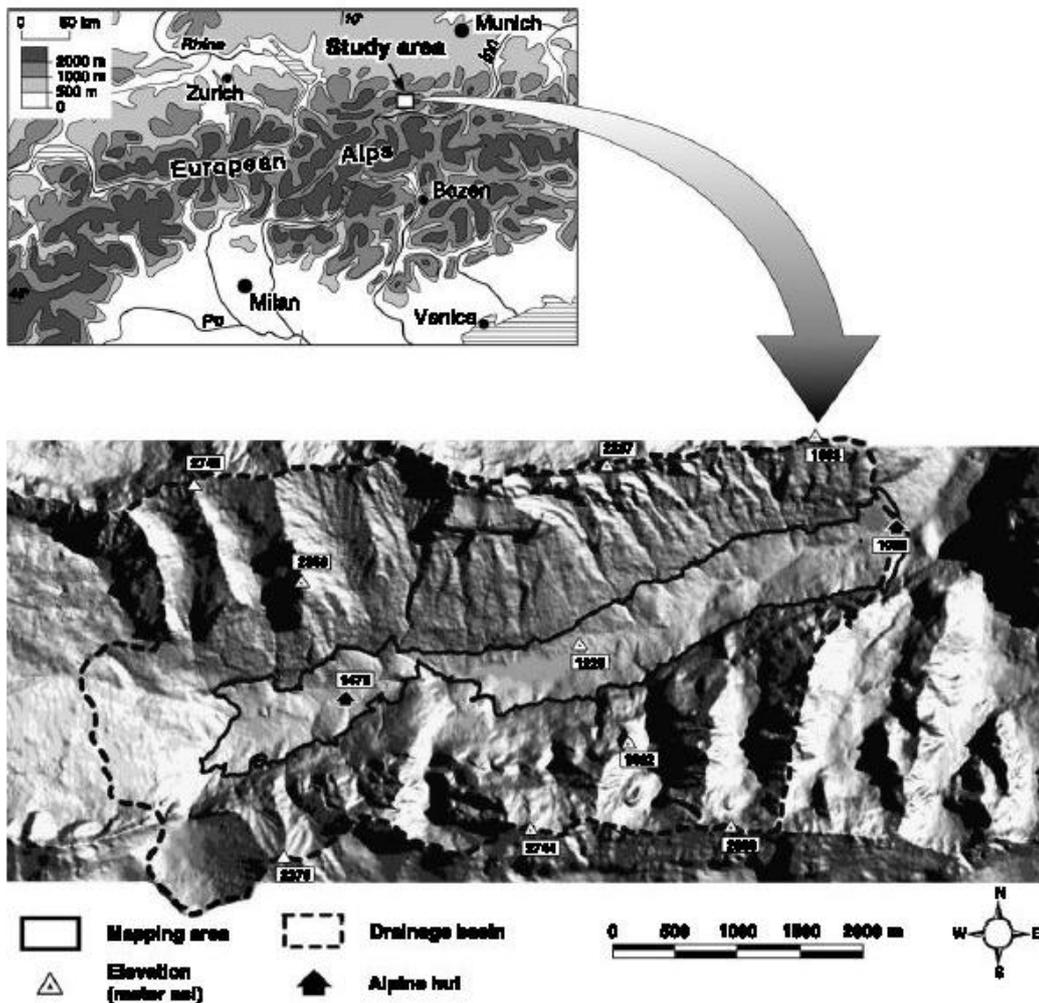


Abb.13: Das Untersuchungsgebiet im Reintal
Quelle: Schrott et. al., 2002

¹Schrott L., Hufschmidt G., Hankammer M., Hoffmann T., Dikau R.(2003) „Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin“, Reintal, Bavarian Alps, Germany.- Geomorphology (in press). S.47

Das Becken ist durch steile Felswände und durch verschieden gut entwickelte Schutthalden charakterisiert. Weiters gibt es aufgrund von Aufstauungen durch Felsstürze einige natürliche geschlossene Sedimentsenken.¹ Die Dämme erzeugten größere Überschwemmungsbänke („Hintere Gumpe“) und einen dauerhaften See („Vordere Gumpe“). Im Untersuchungsgebiet kann man viele verschiedene Sedimentprozesse mit den dazugehörigen Speichertypen wie z.B. Schutthalden, -kegel, Murkegel, Ablagerungen von Steinschlägen, Schwemmfächer und Alluvionen feststellen.¹ Die frühere Vergletscherung ist anhand der Überreste von Moränen der letzten Vergletscherung entlang des Talbodens zu erkennen.¹

Das Einzugsgebiet zeigt uns eine typische Landformenansammlung einer Sedimentkaskade, und kann grob in 3 Subsysteme unterteilt werden, die wiederum durch Prozesse verknüpft und durch Regulatoren beeinflusst sind (z.B. Hangwinkel, Hanglänge).¹

Subsystem I beinhaltet mehr als 82 % (14 km²) der Fläche des Untersuchungsgebietes, aber aufgrund der Dominanz von steilen Felswänden (> 45°) kommt hier nur ein kleiner Teil des abgelagerten Sediments vor. Im Gegensatz dazu bedecken Subsystem II und III als die Hauptakkumulationsgebiete nur 3 km² (18 %) des Untersuchungsgebietes.¹

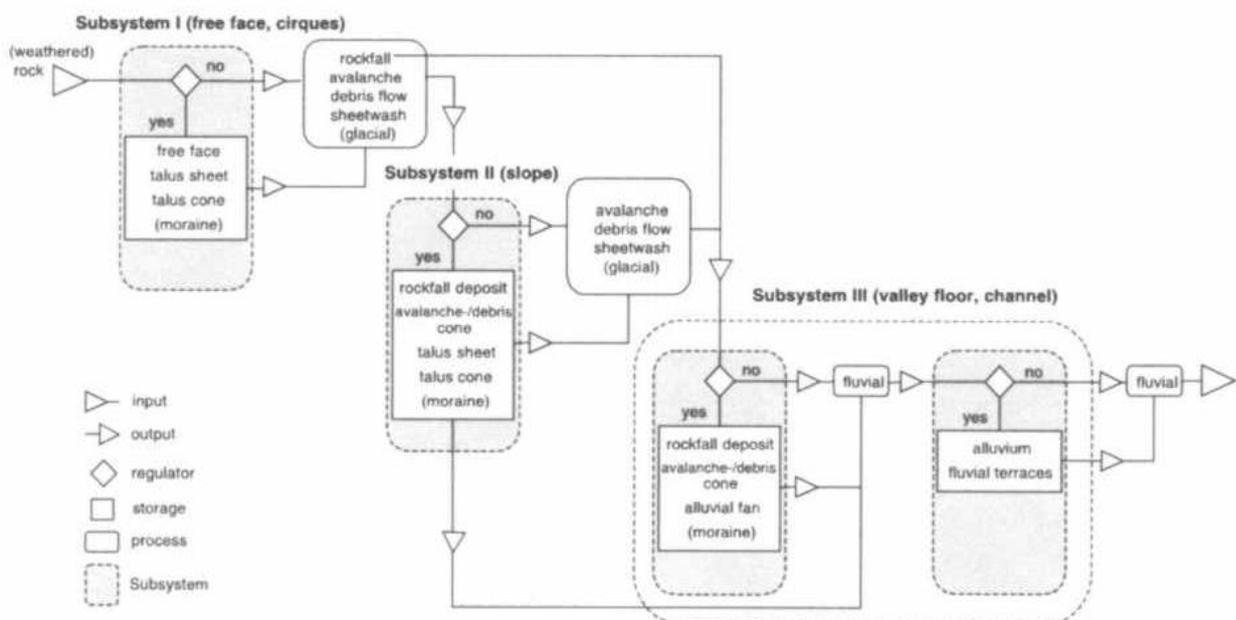


Abb.14: Sedimentkaskade im Reintal

Quelle: Schrott et al., 2002

¹ vgl. Schrott L., Hufschmidt G., Hankammer M., Hoffmann T., Dikau R. (2003) „Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin“, Reintal, Bavarian Alps, Germany.- *Geomorphology* (in press). S.49

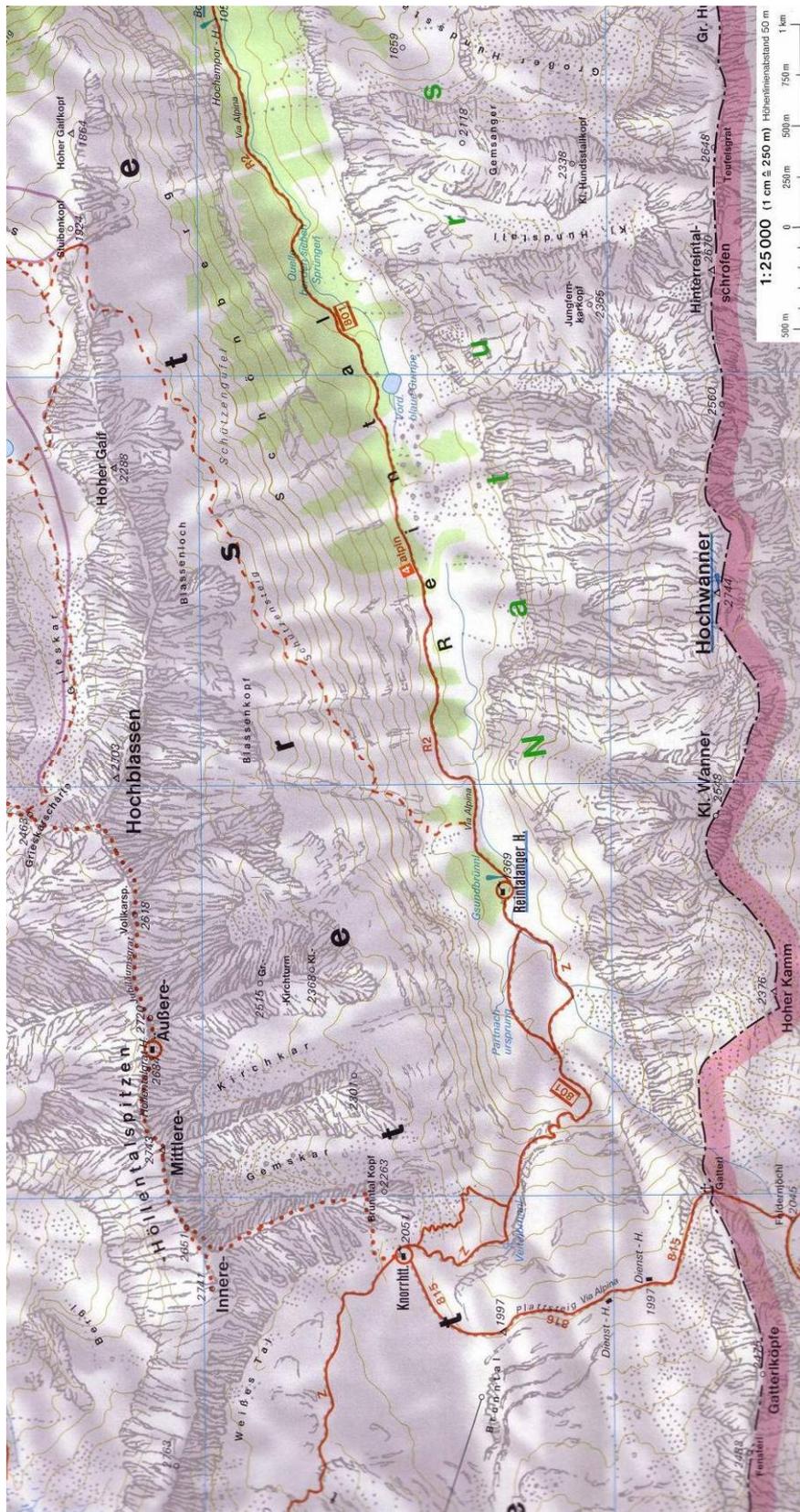


Abb.15: Topographische Karte des Reintals M = 1: 25.000

Quelle: Ausschnitt aus der Wanderkarte: Garmisch-Partenkirchen-Wettersteingebirge-Werdenfelser Land (Verlag Freytag-Berndt & Artaria KG)

7.1 Geologie des Wettersteingebirges

Das Wettersteingebirge gehört zu den Kalkhochalpen, wobei die höchsten Gipfel zwischen 2200 und knapp 3000 m Seehöhe liegen. Den Gipfelbildner der höheren Berge bildet der so genannte Wettersteinkalk. Es zeigt sich ein hochalpines Landschaftsbild mit steilen Wänden, wobei es im Bereich von Verebnungen zu Verkarstungen kommt.¹ Die Zugspitze bildet mit 2962 m den höchsten Gipfel Deutschlands. „Von ihr gehen drei Gebirgskämme aus, die das Gebirge gliedern:“²

- „Nach Nordosten zieht der Waxensteinkamm über die Riffelwandspitze (2626 m) zum Waxenstein (2272 m).
- Nach Osten verläuft der Jubiläumsgrat über die innere Höllentalspitze (2743 m) zum Hochblassen (2707 m) und weiter im Norden zur Alpspitze (2628 m). Sie gilt als das Wahrzeichen von Garmisch-Partenkirchen.
- Der Wettersteinhauptkamm im Süden und Südwesten beinhaltet die Staatsgrenze zwischen Deutschland und Österreich.“²

Zwischen Jubiläumsgrat und Wettersteinhauptkamm, im Reintal, fließt die Partnach. Sie wird aus den Schmelzwässern von Nördlichem und Südlichem Schneeferner gespeist, die durch den Karstkörper der Zugspitze abfließen und an der Karstquelle „Partnach-Ursprung“ wieder zu Tage treten.³

¹ vgl. Gabriele Hufschmidt (2002) "GIS-gestützte Modellierung von Sedimentspeichern als Komponenten eines alpinen Geosystems (Reintal, Bayrische Alpen) S.52.

² Hirtreiter, G., (1992) "Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen im Wettersteingebirge und seiner Umgebung". Münchener Geographische Abhandlungen Reihe B, S.12

³ vgl. Hirtreiter, G., (1992) "Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen im Wettersteingebirge und seiner Umgebung". Münchener Geographische Abhandlungen Reihe B, S.12

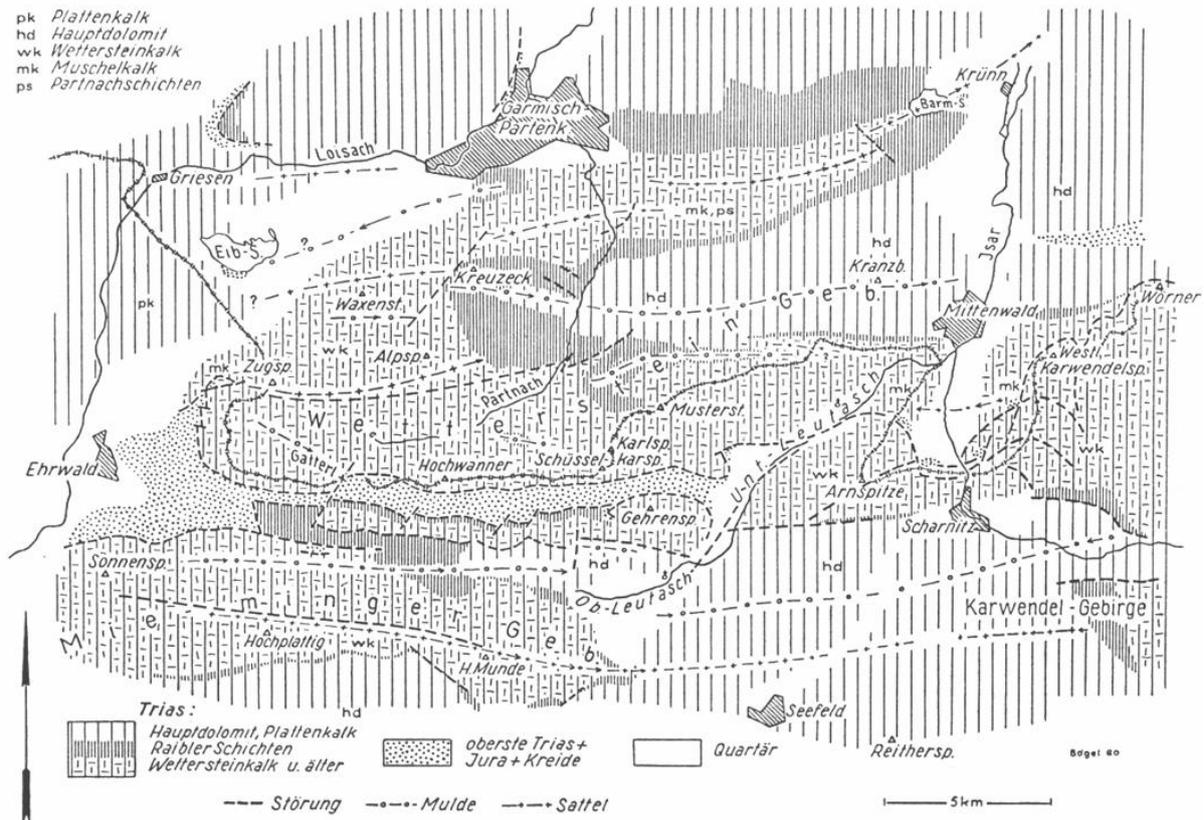


Abb.16: Geologie des Wettersteingebirges

Quelle: Hirtleiter, 1992

Die Gesteinsfolge:

Am Aufbau des Wettersteingebirges und seiner Umgebung beteiligen sich Trias-, Jura- und Kreideformation, wobei die Gesteine der Trias die weitaus größte Verbreitung aufweisen.¹ „Die Trias beginnt in den nördlichen Kalkalpen mit einem Konglomerat, dem so genannten Berrucano. (...) Darüber folgen die Gesteine der sinthischen Stufe, der Buntsandstein und die Werfener Schichten. (...) Ebenso wie der Berrucano sind die bunten Sandsteine, Quarzite und Tonschiefer, die man als Buntsandstein zusammenfasst, festländischer Herkunft. Von Innsbruck aus ist der

¹Bögel, H. (1960) „Tektonische Übersicht des Wettersteins“ in: Führer zur Exkursion C II anlässlich der Tagung der Dt. Geol. Ges. in Bad Tölz, Geol. Inst. TH München S.21

Buntsandstein am Südfuß des Karwendels an der Färbung gut zu erkennen. Die gleichaltrigen Werfener Schichten finden sich ebenfalls im Karwendel.“¹

„Die nunmehr durchgehend marine Schichtenfolge der Trias beginnt mit der anisischen Stufe. Zu unterst finden sich hier die Reichenhaller Schichten, die allerdings nur spärlich vertreten sind. Erst der darüberliegende alpine Muschelkalk weist im Wetterstein- und Mieminger Gebirge weite Verbreitung auf und wird bis zu 600 m mächtig.“² „Die beste Beobachtungsmöglichkeit bietet die Partnachklamm, die eine sattelförmige Muschelkalkaufwölbung durchschneidet. Über dem Muschelkalk folgen zwei gänzlich verschiedene Gesteinsarten, beide gehören der ladinsischen Stufe an. Es handelt sich um Wettersteinkalk einerseits und die Partnachschichten andererseits. (...) Die Erscheinung, dass Gesteine verschiedener Ausbildung gleichzeitig nebeneinander zur Ablagerung kommen, findet man häufig. Man spricht dann von unterschiedlicher Facies. Der Wettersteinkalk, welcher bekanntlich ein wichtiger Gipfelbildner in den bayrisch-tirolischen Kalkalpen ist (nahezu sämtliche Gipfel des Wettersteins, der Mieminger, des Karwendels und des Kaisergebirges sind aus ihm aufgebaut), ist ein durchwegs heller, oft massiger Kalk, dessen Bankung, soweit überhaupt erkennbar, oft nur aus der Ferne zu sehen ist. Er wird bis zu 1200 m mächtig.“² Häufig kann man im Wettersteinkalk Röhren von Kalkalgen finden, gelegentlich- besonders an der Westseite des Zugspitzmassivs, auch Ammoniten. Diese Funde lassen daraus schließen, dass der Wettersteinkalk in Form von Riffen entstanden ist.³

„Die Gesteinsfolgen der Trias lassen trotz tektonischer Bewegungen aller Art in unserem Gebiet ihren ursprünglichen Verband im Großen und Ganzen noch erkennen. Die nunmehr folgenden Schichten des Jura und der Kreide sind dagegen nirgends mehr in ihren früheren Zusammenhang mehr erhalten, sondern vielmehr zwischen die mächtigen Kalkmassen der Trias eingequetscht und z.T. von diesen überschoben. Von wenigen unbedeutenden Vorkommen abgesehen, beschränken

¹Bögel, H. (1960) "Tektonische Übersicht des Wettersteins" in: Führer zur Exkursion C II anlässlich der Tagung der Dt. Geol. Ges. in Bad Tölz, Geol. Inst. TH München S.22

²Bögel, H. (1960) "Tektonische Übersicht des Wettersteins" in: Führer zur Exkursion C II anlässlich der Tagung der Dt. Geol. Ges. in Bad Tölz, Geol. Inst. TH München S.23

³vgl. Bögel, H. (1960) "Tektonische Übersicht des Wettersteins" in: Führer zur Exkursion C II anlässlich der Tagung der Dt. Geol. Ges. in Bad Tölz, Geol. Inst. TH München S.23

sich die Schichten des Jura und der Kreide (auch kurz als Jungschichten zusammengefasst) auf einen schmalen Streifen am West- und Südfuß des Wettersteingebirges.

Der Jura ist vertreten durch bunte Kalke, fleckige Kalke und Mergel, in denen sich nicht selten Ammoniten finden. (...) Die Gesamtmächtigkeit des Jura dürfte 200 m nicht überschreiten, also ein krasser Gegensatz zu der viel mächtigeren Trias.“¹

7.2 Der tektonische Bau

„Die Ablagerungen von Sedimentgesteinen erfolgen im großen und ganzen, wenigstens soweit es sich um marine Sedimente handelt (und dies ist in unserem Gebiet der Fall), in der Weise, dass sich auf dem Meeresboden Schicht für Schicht übereinanderlegt, wobei sich der Meeresgrund etwa in demselben Maße absenkt, wie die Sedimente zunehmen. So können unter Umständen mehrere tausend Meter mächtige flachliegende Gesteinspakete zustande kommen. Nach ihrer Verfestigung bleibt jedoch die ursprünglich flache Lagerung nur in seltenen Fällen erhalten. Vielmehr werden die Gesteinsmassen gehoben, verstellt, zu Sätteln und Mulden gefaltet, zerbrochen und gegeneinander bewegt, ja sogar übereinander geschoben. So kommt die Erscheinung zustande, dass jüngere Gesteine direkt neben älteren liegen, oder das Schichtfolgen auf den Kopf gestellt werden, d.h. das Älteste liegt oben, das Jüngste unten. Solche Vorgänge spielen in den Alpen eine wichtige Rolle. (...) Quert man das Mieminger und Wettersteingebirge von Süden nach Norden, so durchschreitet man eine ganze Reihe von kompliziert gebauten Sätteln und Mulden.“²

¹Bögel, H. (1960) "Tektonische Übersicht des Wettersteins" in: Führer zur Exkursion C II anlässlich der Tagung der Dt. Geol. Ges. in Bad Tölz, Geol. Inst. TH München S.24

²vgl. Bögel, H. (1960) "Tektonische Übersicht des Wettersteins" in: Führer zur Exkursion C II anlässlich der Tagung der Dt. Geol. Ges. in Bad Tölz, Geol. Inst. TH München S.26

8. Beschreibung der einzelnen Sedimentspeicher

8.1 Schutthalden

Losgelöster Schutt stürzt von Felshängen herunter, und bildet am Fuße der Felswand eine sog. Schutthalde. Sie kann aus den verschiedensten Korngrößen bestehen, aus groben Blöcken und Steinen bis hin zu Sand und feinstem Gesteinsmehl. Aufgrund der größeren Kinetischen Energie und größeren Masse der gröberen Bestandteile, gelangen diese beim Sturz weiter abwärts. Im Gegensatz dazu sammeln sich die feineren Bestandteile entsprechend im oberen Bereich der Schutthalde.¹

„Eine Schutthalde hat einen maximalen Böschungswinkel, der von der inneren Reibung der Schutthaldenbestandteile bestimmt wird. Diese Reibung ist abhängig von der Form und der Größe der Bestandteile und von der Intensität der Durchfeuchtung. Wird dieser Böschungswinkel überschritten, kommt die Schutthalde in Bewegung, bis sich in flacherem Gelände eine neue Schutthalde mit geringerem Neigungswinkel aufbaut. Von der Beschaffenheit der Gesteinstrümmer ist auch die Form und Entwicklung einer Schutthalde insgesamt abhängig. Granite oder Gneise bilden steile Blockhalden wohingegen im Schiefer meist kleinere, plattige Gesteinsbruchstücke vorherrschen. Im Kalk und insbesondere im Dolomit ist das Material der Schutthalden meist feinkörnig, grusig und reicht weit in die Wände hinauf.“²

Oft wird in der Literatur auch der Begriff „Talus“ (lat. für Sprungbein bzw. Fußknöchel, Pl.: Tali), verwendet.

Schutthalden finden sich als Ergebnis oben genannter Prozesse häufiger in Hoch- als in Mittelgebirgen, da hier mechanische Verwitterungsprozesse wie Frostsprengung infolge der extremen Klimabedingungen von größerer Bedeutung sind. Die Schuttfächer können eine Fläche von mehreren hundert Metern und Mächtigkeiten von über 10 Metern erreichen.

¹ vgl. Hartmann T., Stahr A. (1999), „Landschaftsformen und Landschaftselemente im Hochgebirge“. Springer 1999, 389 S. 77

² Hartmann T., Stahr A. (1999), „Landschaftsformen und Landschaftselemente im Hochgebirge“. Springer 1999, 389 S. 77

8.2 Schwemmfächer

Dabei handelt es sich um eine dreieckförmige fluviale Akkumulationsform. Sie bildet sich, wenn ein mit groben Geröllen beladener Fluss, meist beim Austritt aus dem Gebirge in eine Ebene, an Gefälle und damit an Transportkraft verliert.¹ Besonders günstige Bedingungen für die Entstehung von Schwemmfächern sind dort gegeben, wo durch physikalische Verwitterung ausreichend Material zur Verfügung gestellt wird, das wiederum durch die schwankende Wasserführung abtransportiert werden kann.²

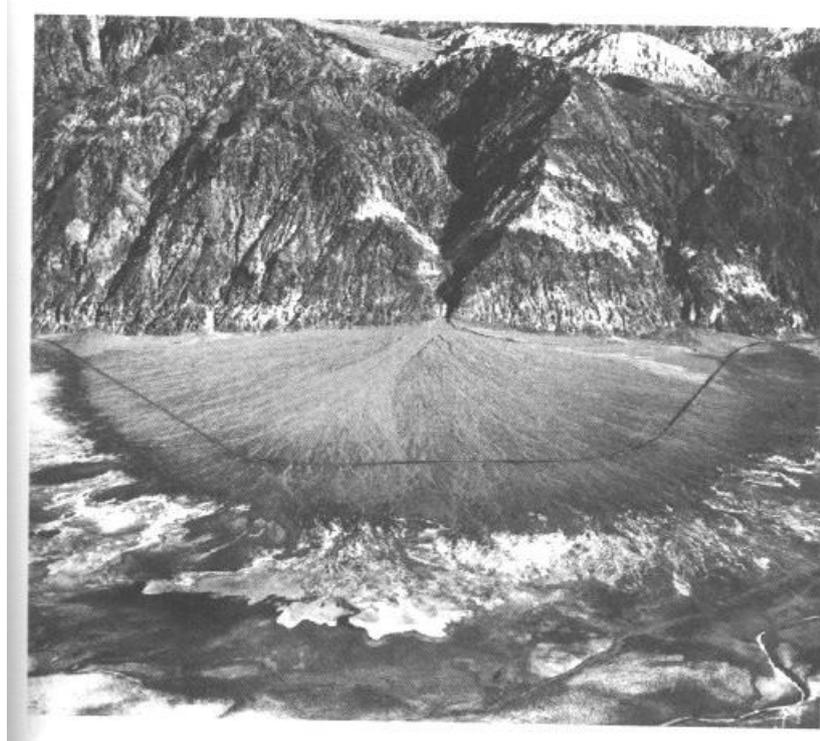


Abb.17: Schwemmfächer, Quelle: Bloom, 1998

8.3 Felssturz/Bergsturz

Felsstürze entstehen an steilen Felswänden, in denen Gesteinspartien durch Verwitterungsprozesse ihre Verbindung zum anstehenden verloren haben, und dann der Schwerkraft folgend, aus der Wand herausbrechen.³

¹ Blume H., (1991) „Das Relief der Erde“ Enke 1991, S. 56

² vgl Baumhauer R., Geomorphologie (2006) „Geomorphologie“ WBG 2006, S. 64

³ Blume H., (1991) „Das Relief der Erde“ Enke 1991, S. 22.

Es gibt keine deutliche Abgrenzung zwischen Fels,- und Bergsturz, wobei man sich unter Bergsturz eher ein größeres Ereignis als wie unter Felssturz vorstellt.

Bezüglich der Bergstürze ist zu erwähnen, dass die Voraussetzungen für Ihre Entstehung oft schon lange vor dem Ereignis selbst geschaffen werden, und der Bergsturz selbst meist nur das Schlussereignis einer länger andauernden Entwicklung ist.¹ Oft sind es geologische Schwächezonen wie z.b.: Klüfte oder Zerrüttungszonen im Fels, wo sich Gesteinsmassen lösen können, und in der Folge herunterstürzen können.¹

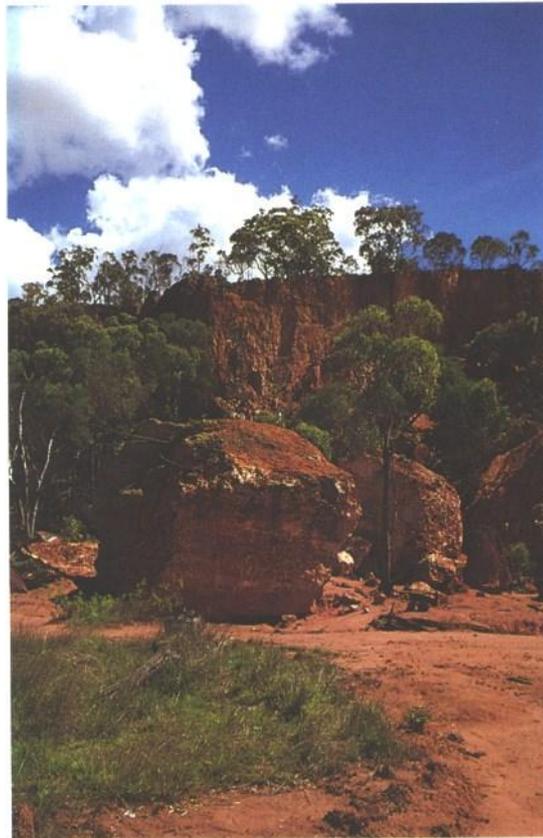


Abb.18: Felssturz in Queensland, Australien

Quelle: Blume, 1991

¹ vgl. Geomorphologischer Lehrpfad am Fuße der Zugspitze, Projektseminar am Institut für Geographie und Regionalforschung(2004), Leitung: Prof. Lothar Schrott; S.5

8.5 Muren

„Unter Muren versteht man wassergetränkte Schuttströme , die sich mit großer Geschwindigkeit entweder kontinuierlich oder schubartig hangabwärts bewegen. Sie entstehen, wenn eine Schuttakkumulation bei steilem Gefälle einen hohen Anteil an Feinmaterial enthält, dessen Poren sich nach starken Niederschlägen oder im Zuge der Schneeschmelze mit Wasser füllen. Tritt schließlich positiver Porenwasserdruck auf, bewegt sich die Mure als breiige Schuttmasse talwärts. Am Hangfuß können sich Murkegel bilden, kegelförmige Akkumulationen aus schlecht sortiertem und ungeschichtetem Murenschutt. Im Gegensatz zu den wasserungesättigten Rutschungen werden bei Muren die feinen Partikel, aufgrund der mit der abnehmenden Fließgeschwindigkeit geringer werdenden Transportkraft, weiter transportiert als die groben“.¹

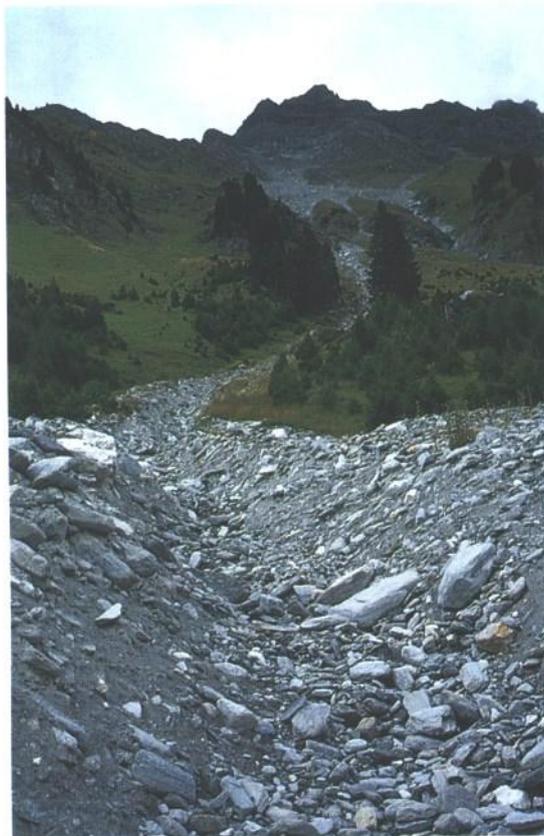


Abb.19: Mure, Quelle: Blume, 1991

¹Baumhauer R., Geomorphologie (2006) „Geomorphologie“ WBG 2006, S. 53.

8.6 Erdfließen

„Bewegt sich eine wassergetränkte Masse aus feinkörnigem Bodenmaterial oder Verwitterungsschutt hangabwärts, so spricht man von Erdfließen. Voraussetzung ist das zumindest kurzfristige Auftreten von positivem Porenwasserdruck, der zum Überschreiten der Fließgrenze führt und damit die hangabwärts gerichtete Bewegung ermöglicht. Erdfließen tritt unter feuchtgemäßigten Klimabedingungen vor allem gegen Ende des Winters und zu Beginn des Frühjahrs auf. Zum einen ist dann das Wasserangebot hinreichend hoch (Schneesmelze), zum anderen wurde das Bodengefüge durch wiederholte Frostwechsel so aufgelockert, dass die Wassersättigung schnell erreicht werden kann. Ein durch Erdfließen in Bewegung geratener Hang weist verschiedene Form- und Materialbereiche auf. Im oberen Teil findet sich als Begrenzung die konkave Abrisskante mit anschließendem Abrissgebiet. Da die obersten Bodenschollen häufig in einer gewissen Rückwärts-Rotation abgleiten, finden sich hier slumpähnliche Formen. Hangabwärts schließt sich die Bewegungs- oder Fließzone an, die schließlich in die Fließzunge übergeht.“¹

8.7 Kriechdenudation (Versatzdenudation)

„Die langsame Hangabwärtsbewegung von Lockermaterial wird Bodenkriechen genannt. Kriechbewegungen können, speziell in stark tonigem Substrat, kontinuierlich als eine sehr langsame Art des viskosen Fließens erfolgen oder sie können durch wiederholte Expansion und Kontraktion des Materials hervorgerufen werden. Wenn Bodenwasser gefriert, führt dieses zu einer Volumenzunahme der obersten Bodenschicht, wobei die Ausdehnung senkrecht zum Hang vollzieht und damit der Schwerkraft folgend hangabwärts bewegt. Oberflächennahe Bodenpartikel werden dabei weiter hangabwärts transportiert als tiefer liegende, da die Frosteinwirkung mit zunehmender Tiefe geringer wird. Diese Art der Denudation ist besonders in Klimaten mit ausreichend feuchten Böden und häufigen Frostwechseln wirksam.“²

¹Baumhauer R., Geomorphologie (2006) „Geomorphologie“ WBG 2006, S. 52

²Baumhauer R., Geomorphologie (2006) „Geomorphologie“ WBG 2006, S. 54.

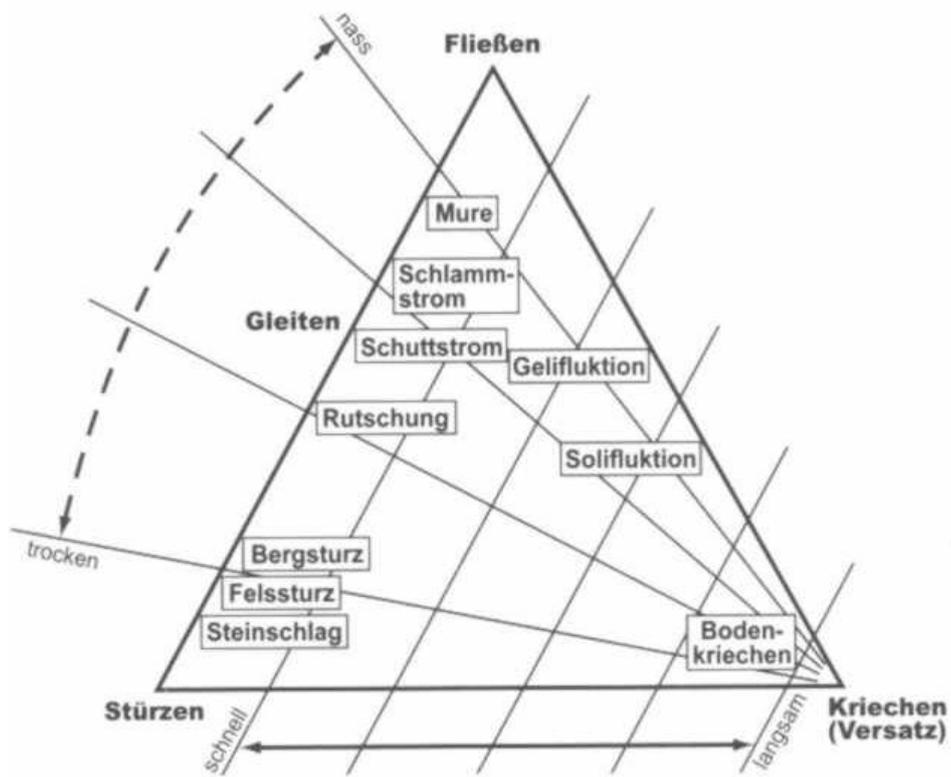


Abb.20: Typisierung von Massenbewegungen

Quelle: Baumhauer, 2006

9. Vergleich der einzelnen Erosionsvorgänge bzw. Speichertypen im Hinblick auf geomorphologische Arbeit

Sedimentspeichertypen im Reintal, Bayerische Alpen

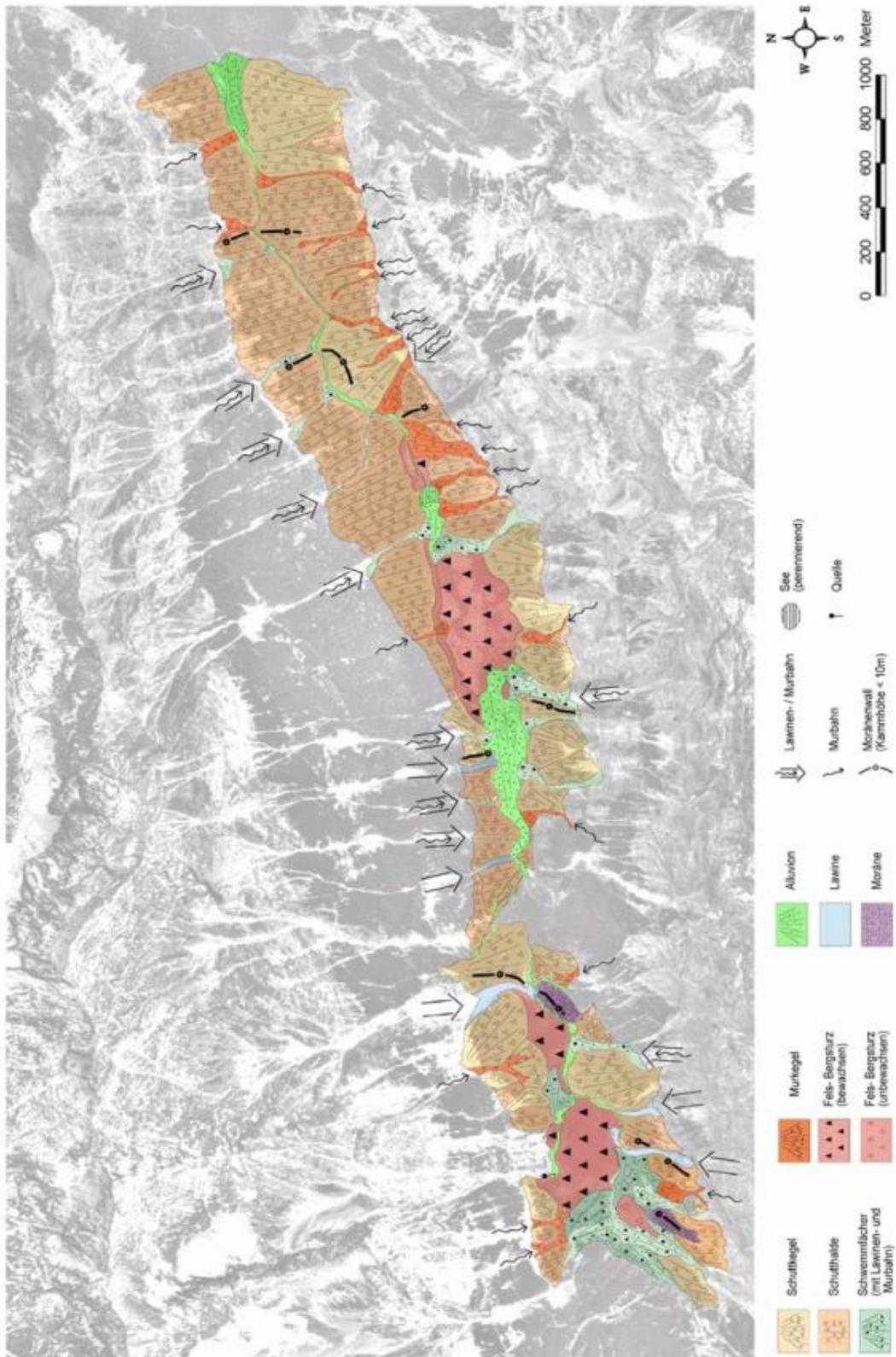
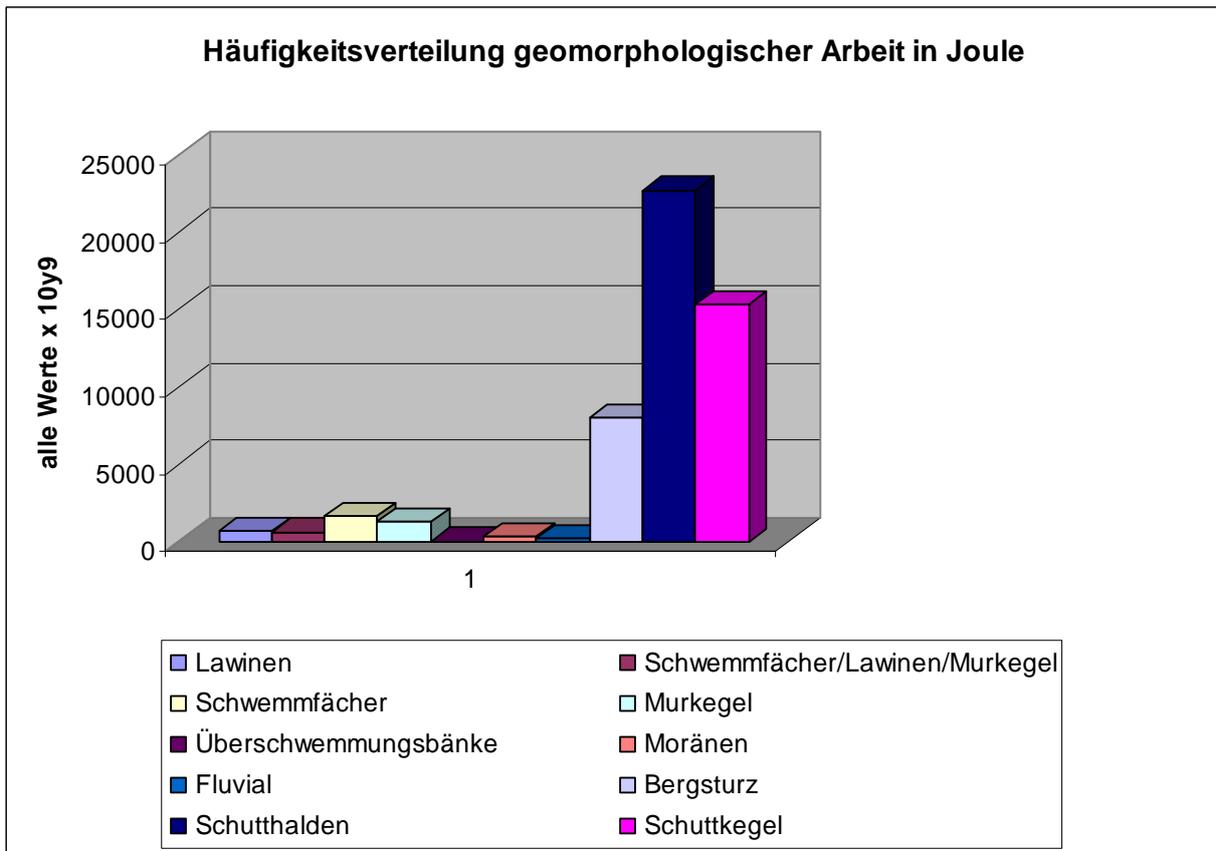


Abb.21: Grafische Darstellung der einzelnen Sedimentspeichertypen im Reintal

Quelle: Schrott et al., 2003



Tab. 3 (eigene Darstellung)

Diese Abbildung gibt einen Überblick, über die Verteilung der geleisteten geomorphologischen Arbeit im Untersuchungsgebiet des Reintals. Es ist auf den ersten Blick ersichtlich, dass Schutthalden und Schuttkegel den größten Anteil an geleisteter geomorphologischer Arbeit ausmachen. Allerdings ist diese Tatsache nicht verwunderlich, da Schutthalden und Schuttkegel zusammen 67% der Hänge des Talbodens bedecken. Die weitere Reihenfolge lautet Fels- und Bergstürze, Schwemmfächer, Murkegel, Ablagerungen von Lawinen, Moränen und Überschwemmungsbänken.

Bemerkenswert im Zusammenhang mit dieser Graphik ist, dass derzeit nur auf einem Fünftel der Fläche des Untersuchungsgebietes Sedimenttransport zu beobachten ist, und ein Großteil der Sedimentspeicher vom geomorphologischen System entkoppelt ist.¹

¹Schrott L., Niederheide A., Hankammer M., Hufschmidt G., Dikau R. (2002) „Sediment storage in a mountain catchment: geomorphic coupling and temporal variability“, Reintal, Bavarian Alps, Germany.-Z. Geomorph. N.F., Suppl. 127: 175-196

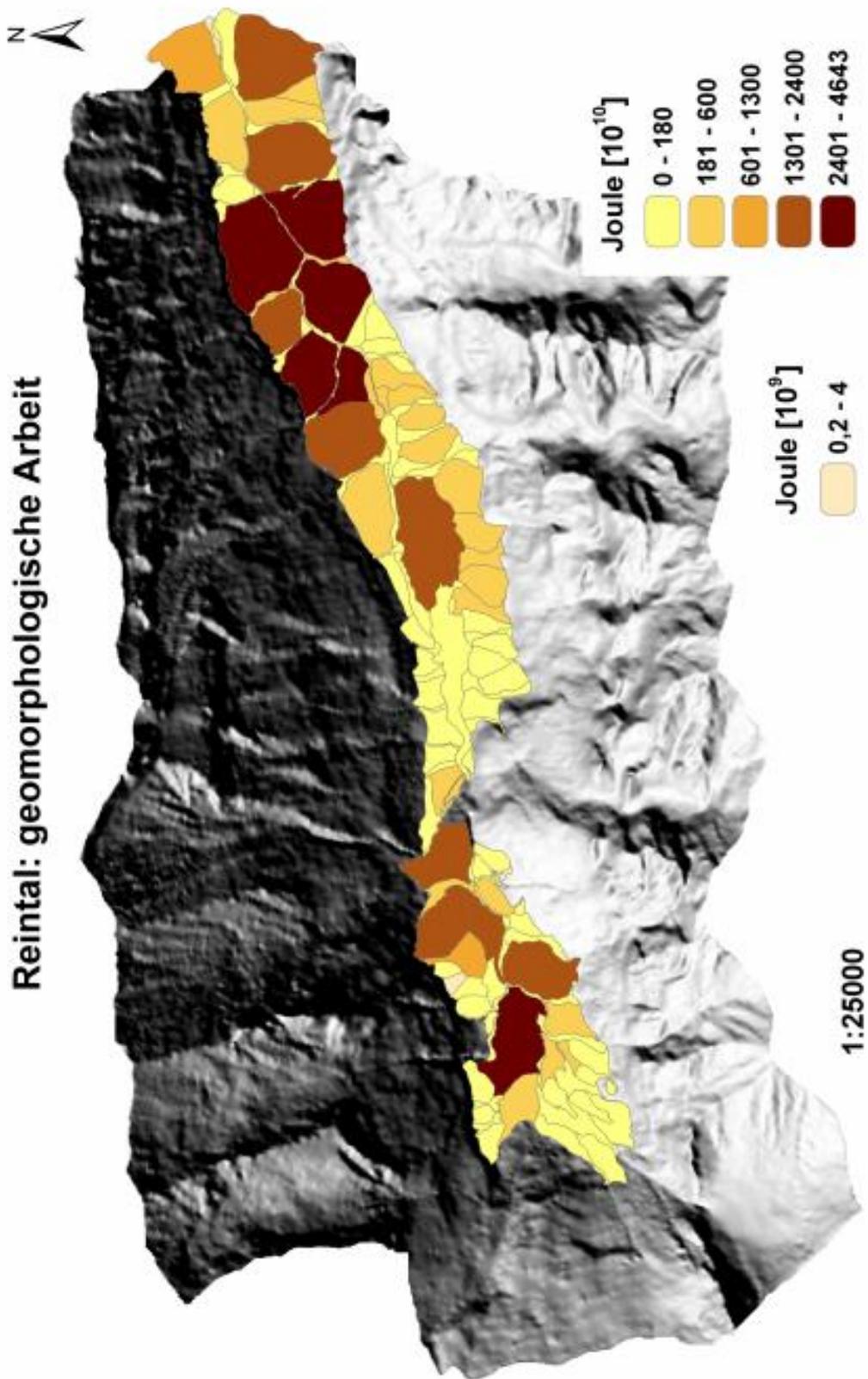
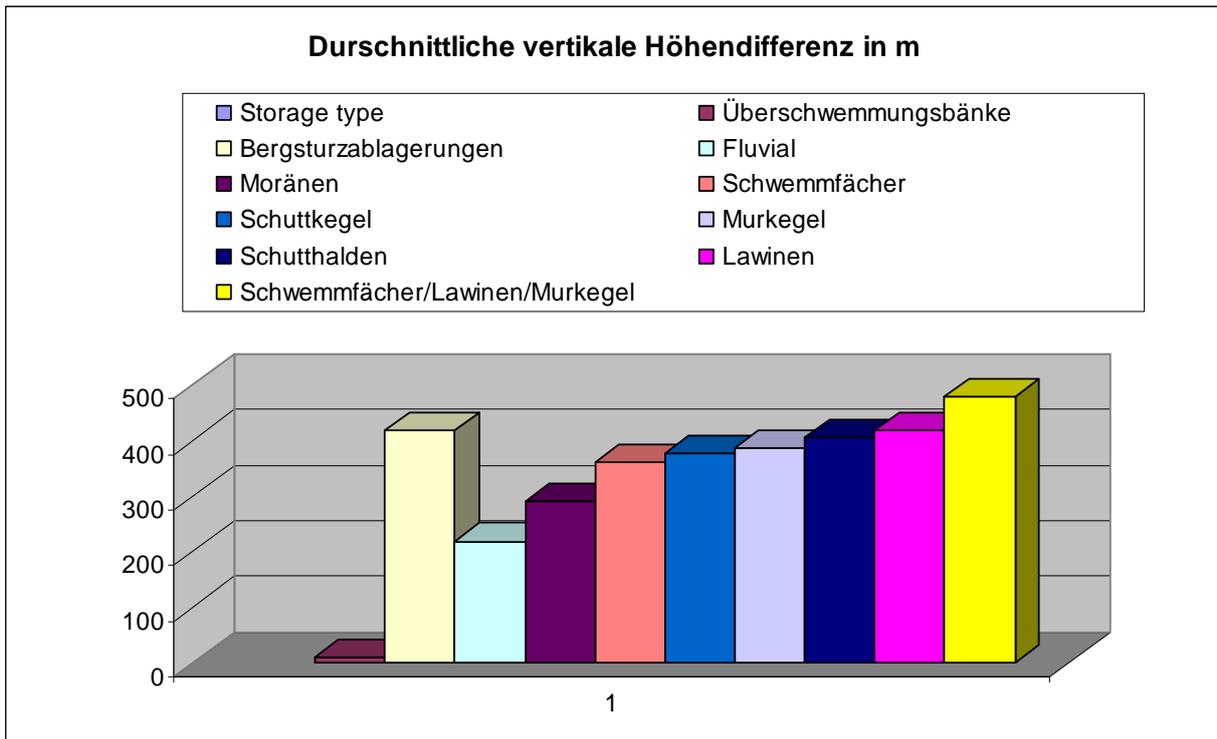


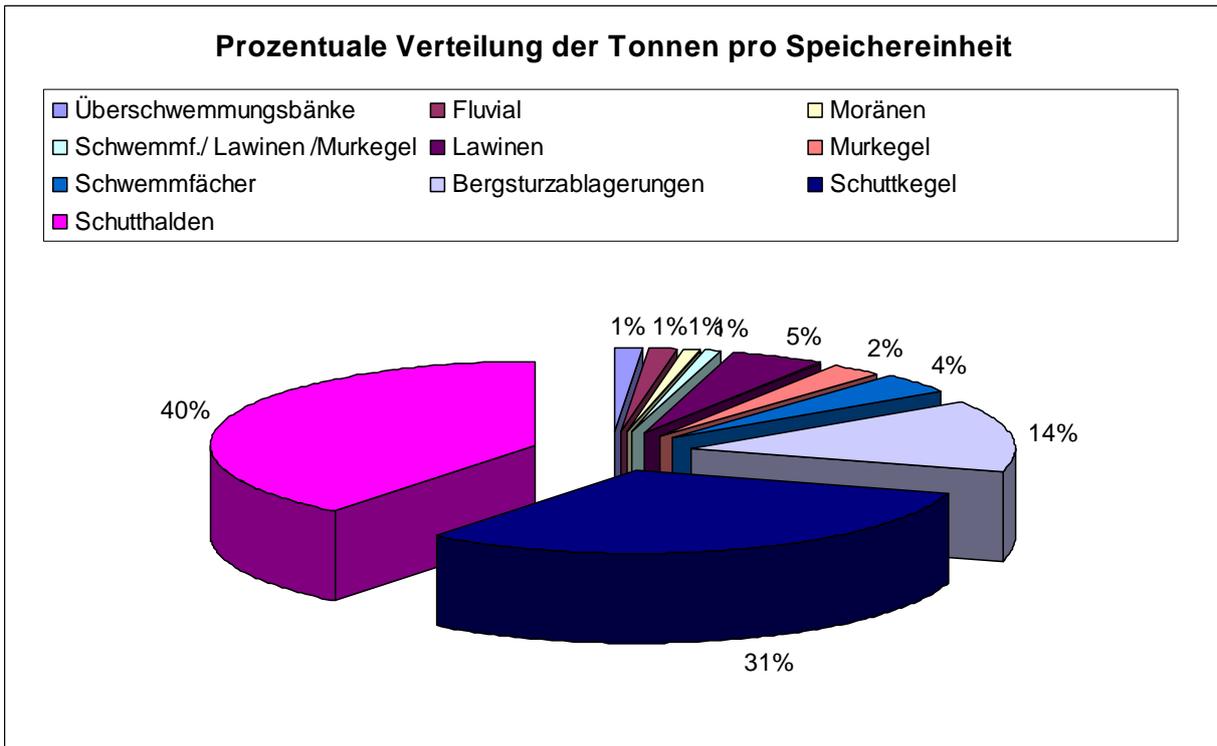
Abb.22: Entwurf: L. Schrott, Kartographie: G. Hufschmidt



Tab. 4 (eigene Darstellung)

Wichtige Informationen liefert dieses Diagramm, die eine Aufstellung über die durchschnittliche Höhendifferenz der einzelnen Speichertypen liefert. Die Höhe ist deswegen sehr interessant, da sie direkt in die Formel $\Delta E = mg(h^1-h^2)$ zur Berechnung der geomorphologischen Arbeit eingeht.

Die höchste durchschnittliche Höhendifferenz weist dabei die Speichereinheit Schwemmfächer/Lawinen/Muren auf. An zweiter Stelle folgen Felsstürze, gefolgt von Lawinenablagerungen, Schutthalden und Murkegeln.



Tab. 5 (eigene Darstellung)

Diese Graphik zeigt ganz deutlich, welche übergeordnete Stellung Schutthalden und Schuttkegel in der Sedimentkaskade des Reintals einnehmen. Die beiden machen zusammen 71 % der gesamten Speichermenge aus, gefolgt von 14% aus Bergstürzen, 5% aus fluvialer Tätigkeit, 4% werden in Schwemmfächern gespeichert, und 2% in Murkegeln. Die restlichen Speichereinheiten machen jeweils nur mehr 1% an der Gesamtspeichermenge aus.

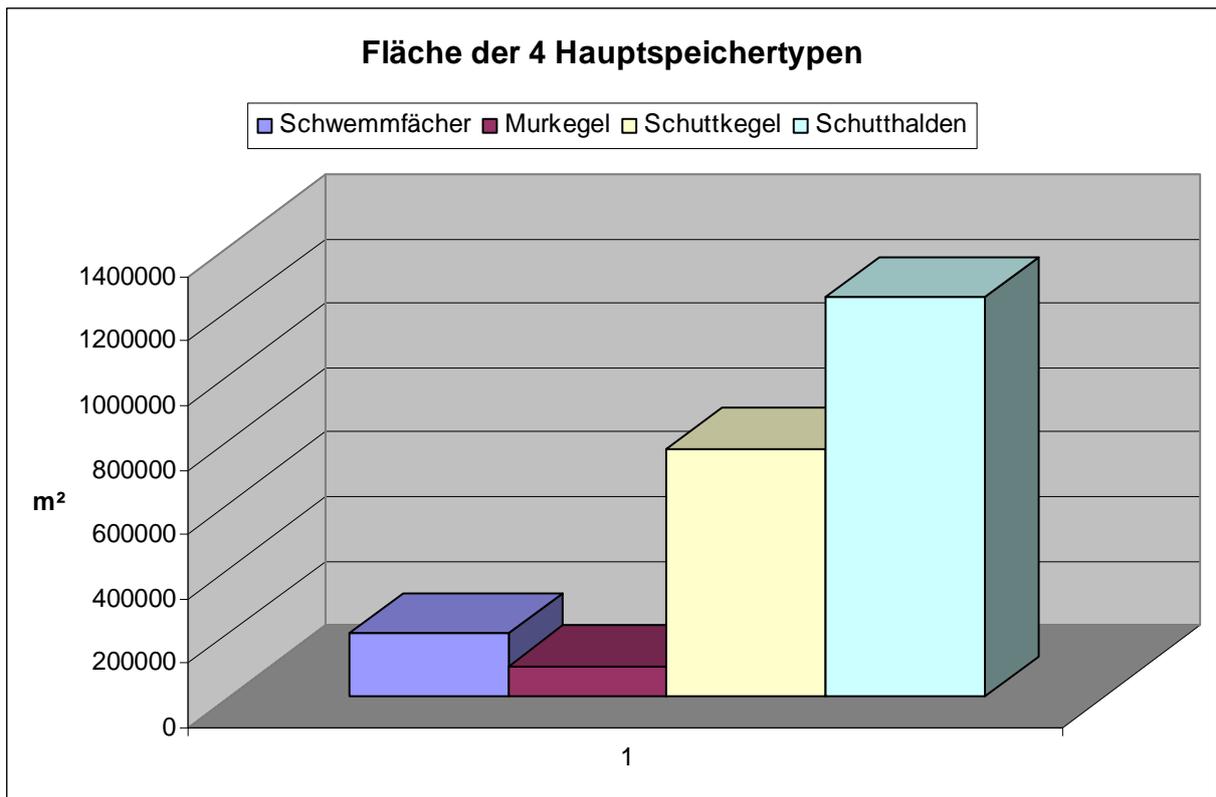


Abb.6: eigene Darstellung

Auch in dieser Grafik, die die Fläche der 4 Hauptspeichertypen des Reintals graphisch darstellt, sieht man ganz deutlich, dass Schutthalden und Schuttkegel die größte Fläche aller Speichertypen einnehmen. Mit 1,2 Mio. m² haben Schutthalden vor den Schuttkegeln mit 770 tsd. m², den Schwemmfächern mit 197 tsd. m² und den Murkegeln mit 95 tsd. m², die größte Flächenausdehnung aller Speichertypen im Reintal.

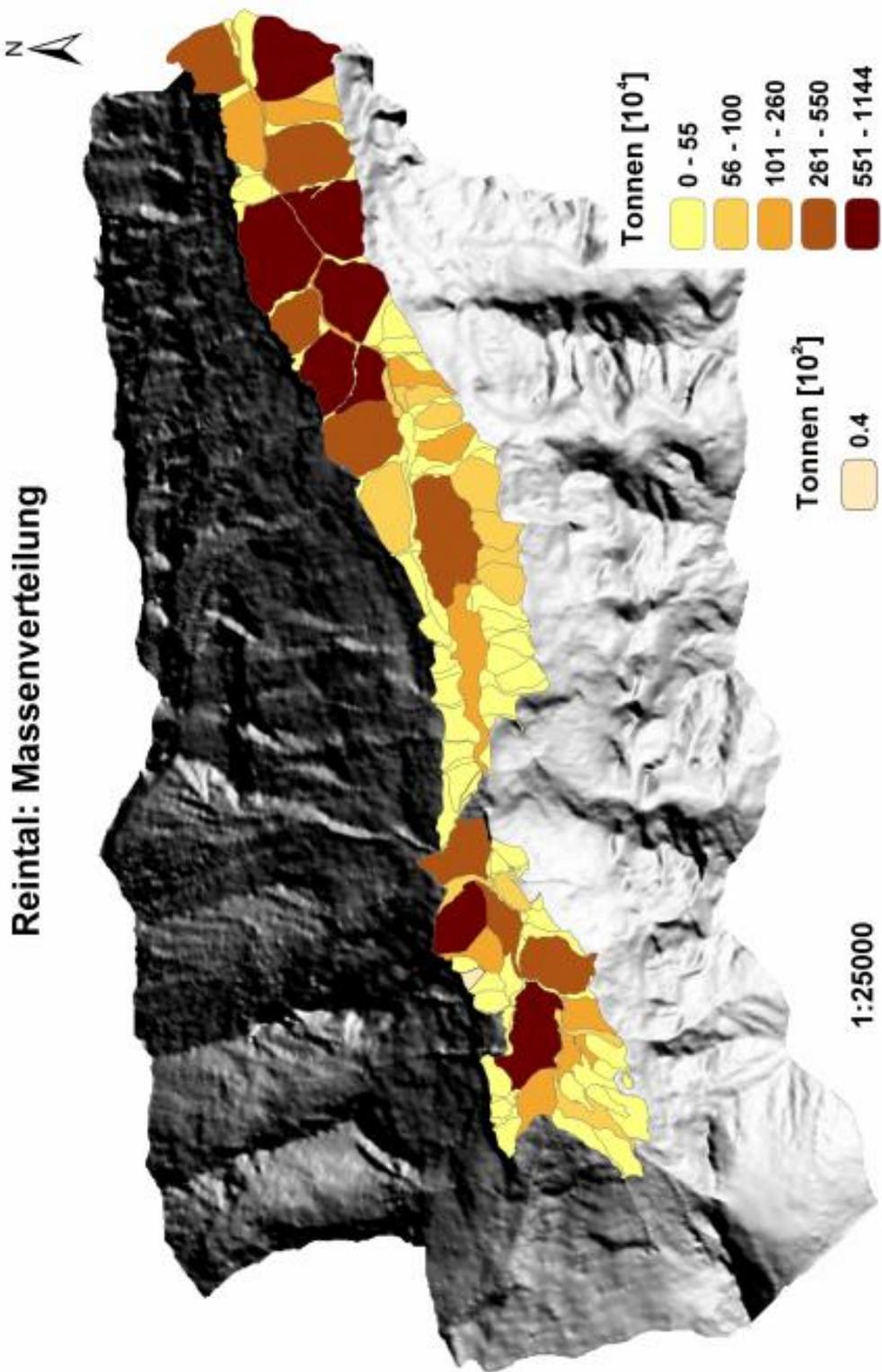


Abb.23: Entwurf: L. Schrott, Kartographie: G. Hufschmidt

9.1 Geomorphologische Aktivität im Untersuchungsgebiet

Während mehrerer ausgedehnter Kartierungen im Gelände in den Jahren 2000 und 2001, wurden verschiedenste Methoden angewandt, um die räumliche und zeitliche Analyse der Sedimentspeicherung im Reintal herauszuarbeiten.

Geomorphologische Kartierung dient hierbei als wichtige Datengrundlage und Quelle an Information. Die erstellte Karte enthält mehr als 126 Sedimentspeichertypen, die wiederum für Anwendungen in ArcView digitalisiert wurden und in 8 Hauptkategorien klassifiziert wurden. Beim erstellen der Karte war einerseits die Feldarbeit maßgebend, wie auch Interpretation von Orthofotos. Besondere Bedeutung wurde auf den Status der Aktivität der einzelnen Sedimentspeicher gelegt. Hierbei konnte man 4 verschiedenen Klassen an Aktivität unterscheiden:¹

- Keine Aktivität: Vegetationsbedeckung zwischen 90 und 100%, kein Hinweis auf geomorphologische Beeinflussung seit Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten.¹
- Niedrige Aktivität: Vegetationsbedeckung variiert zwischen 20 und 90%, und es gibt keine Hinweise auf einen kürzlichen geomorphologischen Einfluss. Aber vereinzelte, isolierte Felsbrocken auf alpinen Wiesen bzw. deutlich sichtbare Lawenbahnen(Schäden an Wäldern) deuten auf geomorphologische Aktivität hin.¹
- Mittlere Aktivität: Vegetationsbedeckung variiert zwischen 5 und 20%, und es gibt keine maßgebende Veränderung der Landschaft innerhalb der 2 jährigen Beobachtungszeit. In einigen Teilen des Tales aber, sind doch einige Effekte von geomorphologischen Prozessen gut erhalten.¹
- Hohe Aktivität: Vegetationsbedeckung variiert zwischen 0 und 5%, und während der Beobachtungszeit, veränderten sich die Landformen ständig durch geomorphologische Prozesse (z.b.: Steinschläge), die wiederum Erosion bzw. Ablagerung von Sediment zur Folge hatten.¹

Folgende Abbildung gibt einen schönen Überblick über die einzelnen Sedimentspeichertypen, die unterschiedliche geomorphologische Aktivität und die verschiedenen Prozesse im Reintal.

¹ vgl. Schrott L., Niederheide A., Hankammer M., Hufschmidt G., Dikau R. (2002) „Sediment storage in a mountain catchment: geomorphic coupling and temporal variability“, Reintal, Bavarian Alps, Germany.-Z. Geomorph. N.F., Suppl. 127: S. 180

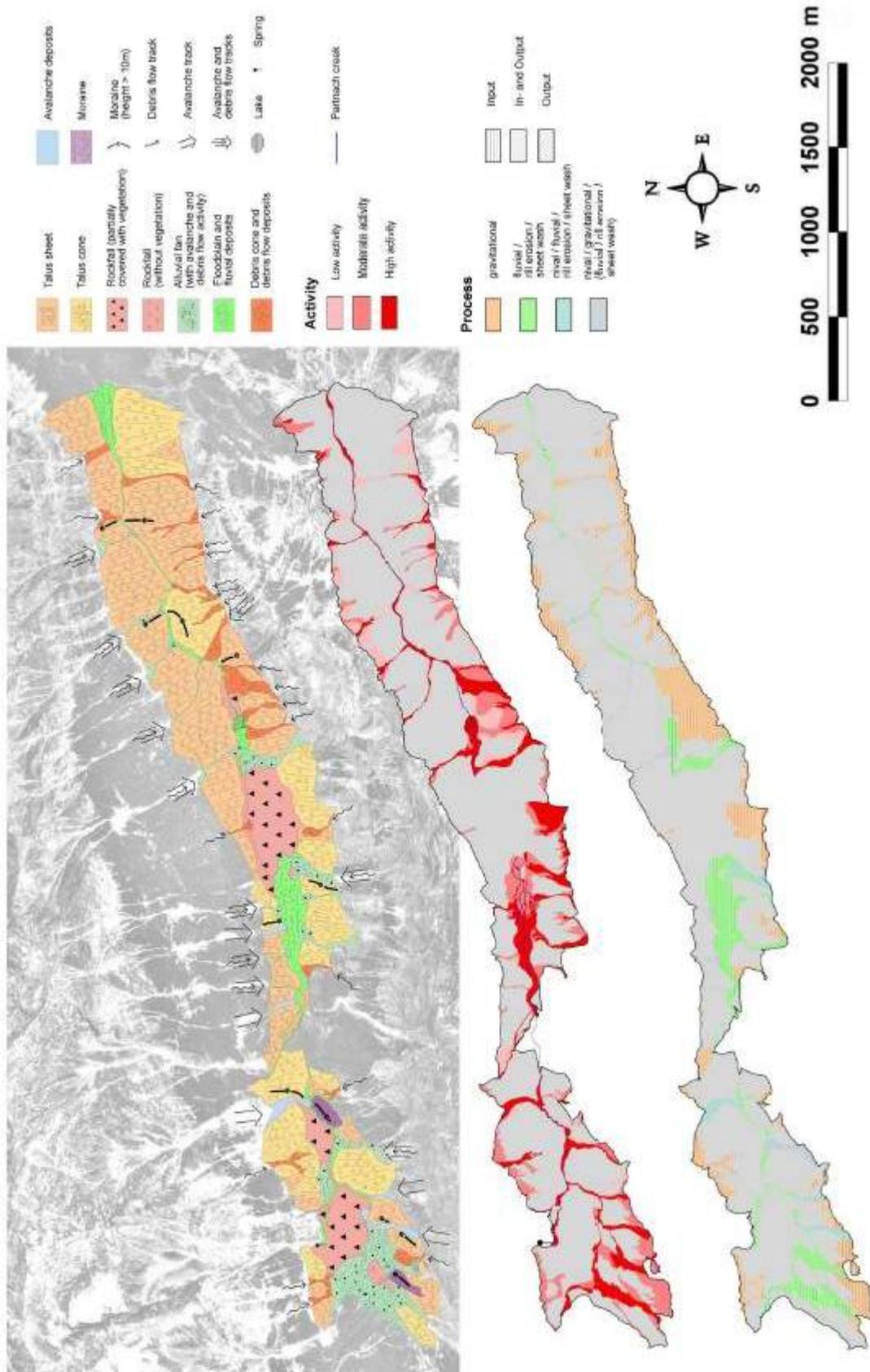
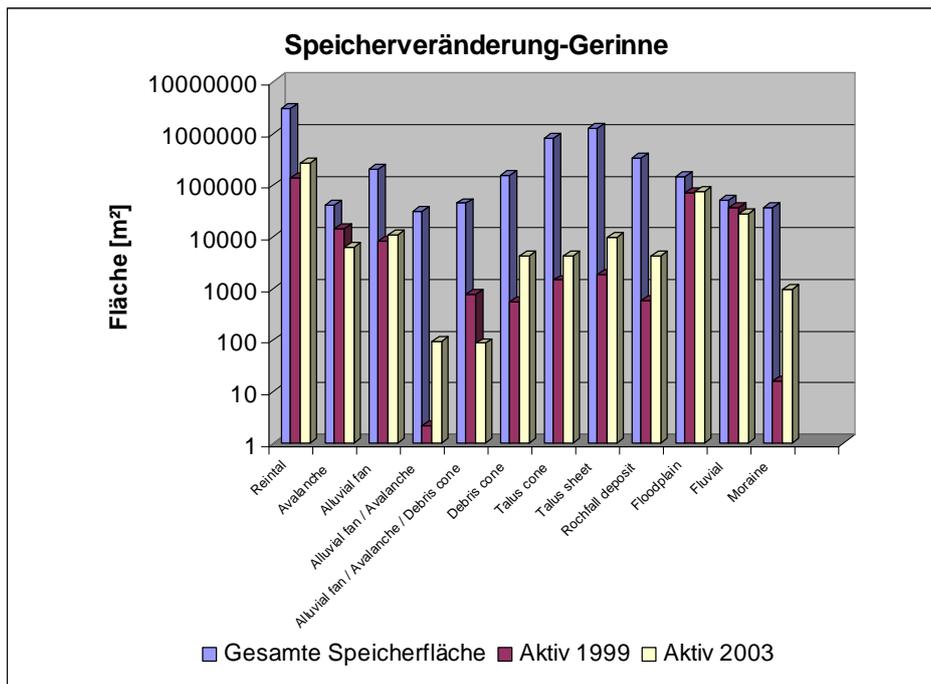


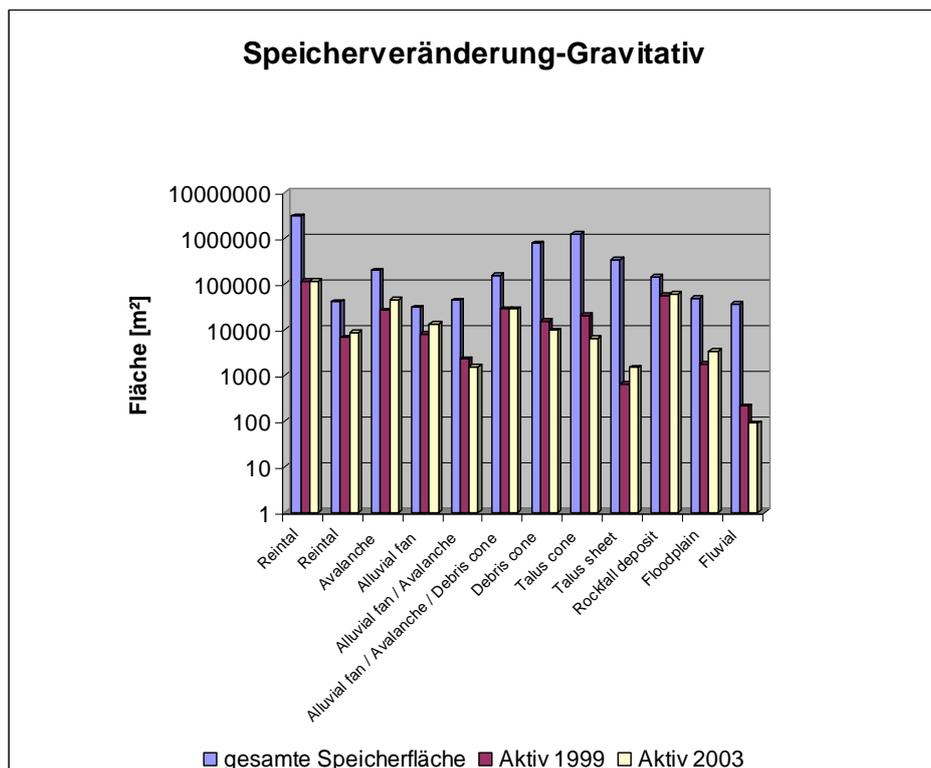
Abb.24: Speichertypen, Prozesse und Geomorphologische Aktivität im Reintal

Quelle: Schrott et al., 2003



Tab.7: Speicherveränderung Gerinne (eigene Darstellung)

Bei der Speicherveränderung durch Gerinneaktivität ist ersichtlich, dass im Jahr 2003 eine doppelt so große Fläche (267804,9m²) als im Jahr 1999 (133902,5m²) geomorphologisch aktiv war.



Tab.8: Speicherveränderung Gravitativ (eigene Darstellung)

Betrachtet man die gesamte Speicherfläche so ergeben sich bei der Veränderung durch gravitative Prozesse in den Jahren 1999 und 2003 ähnliche Werte (133902,5 bzw.: 117922,2).

10. Zusammenfassung

Wie schon in der Einleitung zu meiner Arbeit erwähnt, sind energetische Ansätze und das Prinzip der geomorphologischen Arbeit bisher nur von einem kleinen Kreis von Wissenschaftlern angewendet und debattiert worden. Nel Caine erkannte als einer der ersten, wie mächtig energetische Ansätze sein können, und stellte damals schon mit Hilfe des Prinzips der geomorphologischen Arbeit, Vergleiche mit seiner Untersuchung in den Rocky Mountains in den Jahren 1970 bis 1974 z.B. mit der Studie von Rapp in Skandinavien aus 1960 an. Natürlich mussten die Vergleichsergebnisse immer mit einem kritischen Auge betrachtet werden.

In jüngster Vergangenheit wurde ein energetischer Ansatz besonders zur Sedimentbudgetanalyse, wo er interessante Vergleiche zwischen geomorphologischen Prozessen und zwischen unterschiedlichen Einzugsgebieten ermöglicht, angewendet, so u.a. von Dietrich Barsch und Jeff Warburton¹.

Als aktuellstes Projekt, dass sich mit der Thematik intensiv beschäftigt ist das Sedag-Projekt (Sedimentkaskaden alpiner Geosysteme) zu erwähnen. Eine Arbeitsgruppe untersuchte das alpine Einzugsgebiet des Reintals aufbauend auf Messungen der unterschiedlichsten Einzelprozesse um ein komplexes Modell der Sedimentkaskaden zu entwickeln, womit wiederum die aktuelle Landschaftsentwicklung beschrieben werden könnte.

Große Datenmengen wurden erhoben, mit denen auch ich mich in dieser Arbeit beschäftigte.

Nach vielen Auswertungen und einigen fertigen Publikationen kann man durchaus ein Resumee über die Bedeutung und Möglichkeiten des energetischen Ansatzes in der Prozessgeomorphologie ziehen.

Es bestehen viele Erwartungen und Hoffnungen über die Anwendungsmöglichkeiten energetischer Ansätze:

- Hypothese1: Energetische Ansätze sind integrierend im Sinne einer systemanalytischen Betrachtung²

¹ vgl. Schrott L., Hufschmidt G., Hankammer M., Hoffmann T., Dikau R. (2003) „Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin“, Reintal, Bavarian Alps, Germany.- Geomorphology (in press). S.45-63

² vgl. Vortrag Schrott, AK Geomorphologie, Bern 2003

- Hypothese 2: Energetische Ansätze ermöglichen Vergleiche unterschiedlicher Prozesse, Einzugsgebiete und Systeme¹
- Hypothese 3: Energetische Ansätze ermöglichen neue Erkenntnisse zu Prozess-Form Beziehung¹

Diese drei Hypothesen konnten nicht ganz widerspruchsfrei bestätigt werden. Als sehr nützlich könnte sich die bessere Vergleichbarkeit unterschiedlicher Einzugsgebiete und Systeme erweisen, wobei man allerdings eingestehen muß, das durchaus auch konventionelle Einheiten wie m/a oder m/km^2 ähnliches leisten.¹

Auch die erhoffte erleichterte Vergleichbarkeit versch. Einzugsgebiete erweist sich als nicht so einfach, denn diese wird besonders durch unterschiedliche Zeiträume, Messverfahren und Einzugsgebietsgrößen erschwert.

Zur 3 Hypothese ist zu sagen, dass man durch verbesserte Prozessmodellierungen z.B. Reichweiten von Felsstürzen besser vorhersagen könnte. Allerdings ist es sehr schwer die Distanzen der vertikalen Massenverlagerung, und die Massen selbst zu berechnen. Außerdem sind zusätzlich die horizontalen Massenverlagerungen zu berücksichtigen.¹

Abschließend kann man behaupten, dass der energetische Ansatz besonders im Bereich der Modellierung als nützliches Werkzeug Anwendung finden sollte. Aber nur unter der Bedingung, dass die einzelnen Variablen der energetischen Grundgleichung mit einer maximalen Fehlergröße von bis zu 20% bestimmt werden können. Bei zunehmender Einzugsgebietsgröße sollte unbedingt auch die horizontale Distanz der Massenverlagerung berücksichtigt werden.¹

¹vgl. Vortrag Schrott, AK Geomorphologie, Bern 2003

11. Quellenverzeichnis

Andrews, J.T. „Glacier power, mass balances, velocities and erosion potential, Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 13, 1972, 1-17

Barsch, D. „Ergebnisse der Heidelberger Ellesmere Island Expedition“, Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 69, 1981, 123-161

Barsch, D. und Caine, N. (1984) “The nature of mountain geomorphology“, Mountain Res. Dev.4: 287-296

Barsch, D. und Jakob M. (1998) „Mass transport by active rockglaciers in the Khumbu Himalaya, Geomorphology 26, 215-222

Baumhauer R., Geomorphologie (2006) „Geomorphologie“ WBG 2006, 145 S.

Bloom, L.A. “Geomorphology (1998) – A systematic analysis of late cenozoic landforms, Chapter 2, 19 - 31

Blume H., (1991) „Das Relief der Erde“ Enke 1991, 140 S.

Bögel, H. (1960) “Tektonische Übersicht des Wettersteins” in: Führer zur Exkursion C II anlässlich der Tagung der Dt. Geol. Ges. in Bad Tölz, Geol. Inst. TH München S. 21-28

Caine, N. (1976) “A uniform measure of subaerial erosion” Bull. Geol. Soc Am. 87: 137-140

Chorley, R.J., Kennedy, B.A., 1971. Physical Geography: A Systems Approach. Prentice-Hall International, London. 370 S.

Der große Brock Haus in zwölf Bänden (1980), achtzehnte völlig neu bearbeitete Auflage, Elfter Band STAD-VEJ, F.A. Brockhaus, Wiesbaden

Embleton C. und Thornes J. (1979) "Process in Geomorphology", (Edward Arnold). p. 17-38

Gabriele Hufschmidt (2002) "GIS-gestützte Modellierung von Sedimentspeichern als Komponenten eines alpinen Geosystems (Reintal, Bayrische Alpen) 110 S.

Geologische Bundesanstalt (1999), „Rocky Austria – Eine bunte Erdgeschichte von Österreich“, 63. S.

Gregory, K.J. (2000). "The changing nature of Physical Geography", (Arnold, London) 363 S.

Gregory; K.J. (1987), "The Power of nature – energetics in physical geography", in Gregory K. J., Energetics of physical environment (John Wiley and Sons, Chichester) pp. 1-31

Hartmann T., Stahr A. (1999), „Landschaftsformen und Landschaftselemente im Hochgebirge“. Springer 1999, 389 S.

Hirtlreiter, G., (1992) "Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen im Wettersteingebirge und seiner Umgebung". Münchener Geographische Abhandlungen Reihe B, B 15.

Jackli, H. (1956) „Gegenwartsgeologie des bundnerischen Rheingebietes; ein Beitrag zur exogenen Dynamik alpiner Gebirgslandschaften“, Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie Nr. 36

Jordan P. und Slaymaker O. (1991) "Holocene sediment production in Lillooet River Basin, British Columbia: A sediment budget approach, Geographique physique et Quaternaire, 1991, vol. 45, n°1, p. 45-57

Owens P., Slaymaker O. (2004) "Mountain Geomorphology"-Arnold. 313 S.

Rapp, A. (1960) "Recent developments of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, Northern Scandinavia", *Geografiska Annaler* 42: 71-200

Schrott L., Hufschmidt G., Hankammer M., Hoffmann T., Dikau R. (2003) „Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin”, Reintal, Bavarian Alps, Germany.- *Geomorphology* (in press). S.45-63

Schrott L., Niederheide A., Hankammer M., Hufschmidt G., Dikau R. (2002) „Sediment storage in a mountain catchment: geomorphic coupling and temporal variability”, Reintal, Bavarian Alps, Germany.-*Z. Geomorph. N.F., Suppl.* 127: 175-196

Hoffmann T., Schrott L. (2003) „Determining sediment thickness of talus slopes and valley fill deposits using seismic refraction – a comparison of 2D interpretation tools,-*Z. Geomorph. N.F., Suppl.* 132: 71-87

Schrott L., Adams T. (2002) „Quantifying sediment storage and Holocene denudation in an Alpine basin, Dolomites, Italy,-*Z. Geomorph. N.F. , Suppl.* 128: 129-145

Schrott L., Götz J., Geilhausen M., Morche D. (2006) „Spatial and temporal variability of sediment transfer and storage in an alpine basin (Reintal valley, Bavarian Alps, Germany), *Geographica Helvetica*, Jg. 61, Heft 3: 191-200

Warburton J. (1992) "Energetics of alpine proglacial geomorphic processes",*Trans. Inst. Br. Geogr. NS.* 18 197-206

Online – Quellen:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Nomothetik> (Stand 9. Oktober 2008 15 Uhr 40)

12. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Überblick über Publikationen mit energetischem Inhalt	7
Abbildung 2 verrichtete geomorphologische Arbeit bei diversen Ereignissen	12
Abbildung 3 Newton'sche Gesetze	17
Abbildung 4 Prinzip der geomorphologischen Arbeit	21
Abbildung 5 Karte der Massenverluste	26
Abbildung 6 Prozesse im Bas Glacier d'Arolla Sedimentsystem	27
Abbildung 7 Übersichtskarte Oobloyah-Tal	29
Abbildung 8 Rotierender Brennofen	26
Abbildung 9 Die geomorphologische Maschine	36
Abbildung 10 Energiebilanz	43
Abbildung 11 Globale Energieflüsse	45
Abbildung 12 Reliefformen der Erdoberfläche	55
Abbildung 13 Das Untersuchungsgebiet im Reintal	64
Abbildung 14 Sedimentkaskade im Reintal	65
Abbildung 15 Topographische Karte des Reintals	66
Abbildung 16 Geologie des Wettersteingebirges	68
Abbildung 17 Schwemmfächer	72
Abbildung 18 Felssturz	73
Abbildung 19 Mure	74
Abbildung 20 Typisierung von Massenbewegungen	76
Abbildung 21 Grafische Darstellung der einzelnen Sedimentspeichertypen im Reintal	77
Abbildung 22 Reintal: Geomorphologische Arbeit	79
Abbildung 13 Reintal: Massenverteilung	83
Abbildung 14 Speichertypen, Prozesse u. geomorphologische Aktivität im Reintal	85

13.Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Untersuchung Nel Caine in den Rocky Mountains	23
Tabelle 2 Vergleich der Studie Nel Caines mit anderen Untersuchungen	24
Tabelle 3 Häufigkeitsverteilung geomorphologischer Arbeit in Joule	78
Tabelle 4 Durchschnittliche vertikale Höhendifferenz in Meter	80
Tabelle 5 Prozentuale Verteilung der Tonnen pro Speichereinheit	81
Tabelle 6 Fläche der Hauptspeichertypen	82
Tabelle 7 Speicherveränderung Gerinne	86
Tabelle 8 Speicherveränderung Gravitativ	86

Persönliche Angaben:

Name: Andreas Schubert
Geburtsdatum: 22.06.1978
Geburtsort: St.Pölten/NÖ
Staatsbürgerschaft: Österreich
Familienstand: ledig
Eltern: DI Karl und Roswitha Schubert
Geschwister: 1 Bruder

Schulische Ausbildung:

1984 – 1988 Volksschule Markersdorf/Haindorf
1988 – 1996 BRG St.Pölten Josefstraße
1996 – 1997 Präsenzdienst
WS 1997 Landschaftsplanung BOKU Wien
Seit SS 1998 Geographie Diplomstudium Universität Wien

Beruflicher Werdegang:

seit 2007 Firma Zieritz & Partner ZT Gmbh
Ziviltechnikergesellschaft für Architektur, Bauwesen,
Kulturtechnik & Wasserwirtschaft

Berufliche Weiterbildung:

2007 AutoCAD Stufe I – WIFI St.Pölten
2008 Seminar –Grundlagen der Schallmesstechnik
Firma LB – acoustics Messgeräte GmbH