Landschafts-formen und Naturgewalten



Adrian E. Scheidegger

Titelbild
Naturgewalt: In Folge eines Ausbruches des 5300 m hohen Vulkans Nevado de Ruiz (Colombia) am 13. November 1985 wurde dessen Eiskappe grösstenteils sehr rasch abgeschmolzen. So ergossen sich riesige Wassermassen die Täler hinunter, welche Schlamm, Felsblöcke und Schutt mitrissen und dadurch zu gewaltigen vulkanischen Murgängen («Lahars») wurden. Die Stadt Armero wurde an jenem Tage verschüttet; in ihr kamen 22 000 Leute ums Leben. Das grosse Kreuz zeigt den ehemaligen Standort der Kirche an, die (Tausende) kleinen Kreuze wurden von Angehörigen an den Stellen der ehemaligen Heimstätten der Toten, unter denen sie begraben liegen, errichtet. Die Gegend bietet auch heute noch den Anblick totaler Verwüstung (Aufnahme des Verfassers vom 25. Februar 1988).

Cover photo
Forces of nature: As a consequence of an eruption of the Nevado de Ruiz, a 5300 m high volcano in Colombia, on 13 November 1985, the ice cap covering it was suddenly largely melted. This caused huge amounts of water to move down the mountain gullies, developing into mud and debris flows ("lahars"). The town of Armero was buried by such a lahar, causing the death of 22 000 people. The large cross in the photograph marks the former position of the cathedral, the small crosses were put up by the relatives of the victims at the former position of their homes where the dead lie buried. Even today the area presents an aspect of complete devastation (photo taken by author an 25 February 1988).

NEUJAHRSBLATT

herausgegeben von der

Naturforschenden Gesellschaft in Zürich

auf das Jahr 1989

191. Stück

1989

Orell Füssli Graphische Betriebe AG Zürich

Veröffentlichung
der
Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
im Anschluss an den Jahrgang 133 der
Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
als Heft Nummer 5

Redaktion: Prof. Dr. H.H. Bosshard, Im Stucki 5, 8450 Andelfingen

Ausgegeben am 31. Dezember 1988

ISSN 0379-1327

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Quellenangabe gestattet

Landschaftsformen und Naturgewalten

Adrian E. Scheidegger, Technische Universität, Wien

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 5
2 Endogene Prozesse 6
2.1 Plattentektonik 6
2.2 Endogene Prozesse 8
2.21 Tektonische Spannungen 8
2.22 Erdbeben 9
2.23 Vulkanische Erscheinungen 11
2.3 Rein endogen geformte Landschaften 12
2.31 Prinzip 12
2.32 Geomorphologische Folgen von Erdbeben 12
2.33 Vulkanische Landschaften 13
3 Exogene Prozesse 14
3.1 Response Theorie 14
3.2 Exogene Naturgewalten 15
3.21 Klassifizierung 15
3.22 Wasser 15
3.23 Schnee und Eis 16
3.24 Atmosphärische Prozesse 17
3.3 Rein exogen geformte Landschaften 19
3.31 Prinzip 19
3.32 Hydrologisch geformte Landschaften 19
3.33 Glaziallandschaften 20
3.34 Äolische Landschaften 22
4 Systemtheorie 24
4.1 Allgemeine Bemerkungen 24
4.2 Die morphologischen Grundprinzipien der Landschaftsentwicklung 25
4.21 Antagonismus 25
4.22 Instabilitätsprinzip 28
4.23 Catena-Prinzip 32
4.24 Selektionsprinzip 33
4.25 Synthese mit endogenen Einflüssen 36
4.3 Landschaftssysteme 36
4.31 Begriff eines Systems 36
4.32 Biologische Modelle 37
4.33 Thermodynamische Analogien 37
4.34 Innerer Stabilitätsverlust 38
4.35 Äussere Einflüsse 39
5 Schlusswort 39
6 Zusammenfassung 40
7 Summary: Landscape types and forces of nature 40
8 Literatur 41

1 Einleitung

Der Titel des vorliegenden Neujahrsblattes mag auf den ersten Blick etwas seltsam anmuten, insofern als die Verbindung von Landschaftsformen mit Naturgewalten nicht offensichtlich gegeben zu sein scheint: Im altgewohnten wissenschaftlichen Brauch wird die Theorie der Landschaftsformen gemeiniglich der Geographie (oder Geomorphologie) zugeordnet, also einer «beschreibenden» Naturwissenschaft – die Theorie der Naturgewalten –, man denke an Erdbeben, elektrische Gewitter etc. –, aber meistens der Physik (Geophysik oder Meteorologie), d. h. einer «exakten» Naturwissenschaft. In den Universitäten und Hochschulen finden sich so die Fachleute, die sich mit Geomorphologie, und diejenigen, die sich mit Naturgewalten befassen, nicht nur in verschiedenen Abteilungen, sondern oft gar in verschiedenen, vollkommen anders ausgerichteten Fakultäten. Die Verbindung von «Landschaftsformen» mit «Naturgewalten» ruft daher offensichtlich nach einer Erklärung.

Es ist nun so, dass das, was wir Menschen als Natur-«Gewalt» empfinden, in erster Linie an der Erdoberfläche wirksam ist – ganz einfach deshalb, weil die Erdoberfläche unseren Lebensraum darstellt. Diese Gewalten wirken aber nicht nur auf uns Menschen, sondern auch auf die Landschaften, welche sie verändern. Ganz bestimmte Landschaftsformen sind daher mit entsprechenden Naturgewalten verknüpft – und in dieser Sicht ist die Verbindung der Theorie der Landschaftsformen mit der der Naturgewalten zu sehen.

Die auf die Erdoberfläche wirkenden Kräfte und Prozesse haben zwei ganz verschiedene Quellen.

Zum ersten haben Prozesse, die im Erdinneren stattfinden, eine direkte Wirkung auf die Erdoberfläche: Die Erde ist eine Wärme-Kraftmaschine, die durch die beim Zerfall von radioaktiven Nukleiden in ihrem Inneren freigesetzte Wärmeenergie angetrieben wird. Der Wärmefluss bewirkt mechanische Effekte, wie die Verschiebung von ganzen Lithosphären«platten» und die Hebung von Gebirgszügen. Da die Erscheinungen in Prozessen im Erdinneren ihre Quellen haben, werden sie als «endogen» bezeichnet, nach dem griechischen Wort «endo» für «innen» und «genes» für «erschaffen, geboren».

Zum anderen stehen die Prozesse, die ausserhalb der (festen) Erde ihren Ursprung haben: hier bezieht man sich auf atmosphärische (in der Luft stattfindende) oder hydrologische (durch die Bewegung von Wasser oder seiner festen Form, Eis hervorgerufene) Wirkungen. Diese Prozesse werden als «exogen» (exo, griechisch «aussen») bezeichnet.

Sowohl die endogenen wie die exogenen Prozesse können sich je alleine als «Naturgewalten» manifestieren. So sind Erdbeben und Vulkanausbrüche rein endogenen Ursprungs: sie wirken auch direkt auf Landschaften durch die Auslösung grosser Verschiebungen oder durch den Aufbau von Vulkankegeln und Lavafeldern. Demgegenüber sind Wirbelstürme und Gewitter rein exogenen Ursprungs: auch sie können, wie in einem Feld von windgetriebenen Wanderdünen, direkt auf eine Landschaft wirken. Die meisten «Naturge-

walten» sind aber das Resultat einer Wechselwirkung von endogenen und exogenen Prozessen: Nach einer endogen bedingten Hebung von Gebirgszügen kommt es zu einer exogenen Folge («Response»): es bilden sich Tobel und Täler durch hydrologische Abtragung. Offensichtlich sind die endogenen Prozesse das Primäre: ohne die zuerst zu Reliefunterschieden führende Hebung kann es zu keiner Abtragung kommen. Man kann daraus aber keinen standardisierten Zeitablauf konstruieren: Hebung und Abtragung finden gleichzeitig statt, nicht zeitlich nacheinander, wie das einmal von W. M. Davis (1924) mit seiner Zyklentheorie (Annahme einer ursprünglichen Hebung, dann eine Folge von einem hochgebirgigen «Jugend-», einem rumpfgebirgigen «Reife-» und einem fast ebenen «Greisen»-Stadium) geglaubt worden war. Obwohl die endogene Hebung als das Primäre betrachtet werden muss, setzt die exogene Denudation (fast) gleichzeitig ein, und der Landschaftstypus wird einzig und allein durch die Intensität der Hebung/Abtragung bedingt. Man nennt das heute das «Prinzip des Antagonismus» in der Theorie der Landschaftsentwicklung. Es führt zu Massenbewegungen, die als «Naturgewalten» empfunden werden, wenn sie sich in Talzuschüben, Bergstürzen und Rüfenen äussern.

Es wird nun unsere Aufgabe sein, die Theorie der Landschaftsformen und Naturgewalten im Lichte des Antagonismus-Prinzipes zu betrachten. Eine Systematik der Landschaftsformen wurde übrigens vom Schreibenden in Buchform veröffentlicht (A. E. Scheidegger, 1987).

2 Endogene Prozesse

2.1 Plattentektonik

Die primären treibenden Kräfte für die Landschaftsentwicklung, wie auch für die Entstehung von Naturgewalten, sind endogene Prozesse. Während Jahrhunderten wurde über den Ursprung der die tektonischen Veränderungen bewirkenden Kräfte gerätselt; heute geht die gängige Lehrmeinung davon aus, dass die Antriebsenergie für die tektonischen Bewegungen aus dem Zerfall radioaktiver Stoffe stammt. In einer nicht eindeutig erklärten Weise wird die Zerfallsenergie über thermodynamische Vorgänge in mechanische Energie umgesetzt, die sich dann in den tektonischen Erscheinungen äussert.

Es wird heute allgemein angenommen, dass alle endogen verursachten Erscheinungen einem gemeiniglich als «Plattentektonik» bezeichneten Schema entsprechen.

In der Plattentektonik wird angenommen, dass die Erdoberfläche von etwa 7 Lithosphärenplatten (gr. lithos = Gestein) gebildet wird (Bild 1). Die Platten reichen bis zu einer Tiefe von etwa 150 km, an welcher Stelle sie vom Rest des Erdkörpers abgekoppelt sind; da das Material in jener Region weicher ist als darüber oder darunter, können die Lithosphärenplatten an dieser Stelle über den übrigen Erdkörper gleiten.

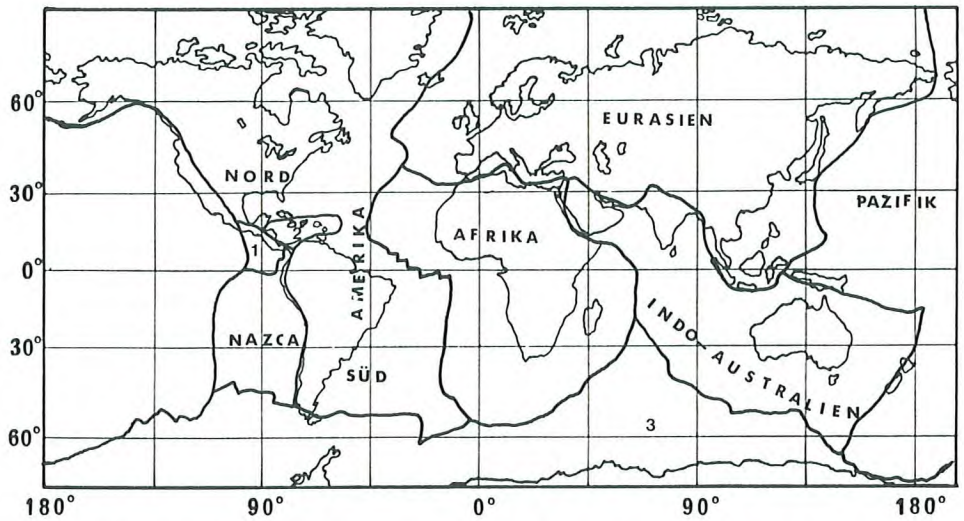


Bild 1 Lithosphärenplatten wie angegeben; dazu 1: Cocos, 2: Karibik, 3: Antarktis.

Fig. 1 Lithospheric plates as marked; in addition 1: Cocos, 2: Caribbean, 3: Antarctic plates.

Die Lithosphärenplatten verschieben sich gegeneinander. Wie schon oben angedeutet, werden die Verschiebungen durch einen thermomechanischen Prozess bewirkt; die Wärme kommt aus dem radioaktiven Zerfall gewisser Substanzen, aber über den genauen Mechanismus der Umsetzung von thermisch/radioaktiver in mechanische Energie besteht unter den Wissenschaftlern keine Einigkeit.

Da die Platten sich relativ zueinander bewegen, können sich prinzipiell 3 Bewegungszustände an den Plattenrändern ergeben: die Platten bewegen sich (a) auseinander, (b) gegeneinander, oder (c) aneinander vorbei.

Wenn sie sich auseinander bewegen, entsteht primär ein Graben, in welchem sekundär Material aus dem Erdinneren heraufquillt. Dieses baut eine Schwelle auf: Es entstehen die mittelozeanischen Rücken.

Wenn sich die Platten gegeneinander bewegen, findet eine Subduktion der einen unter die andere statt: es entsteht ein Tiefseegraben. Weiters kann sich im Oberflächenmaterial eine Stauchung ereignen, welche zur Hebung und Auffaltung von Hochgebirgen führt: auf diese Weise wird die Entstehung z. B. der Anden, der Alpen und des Himalaya erklärt.

Wenn sich die Platten aneinander vorbei bewegen, entstehen gewaltige Scherungen. Eine der bekanntesten ist die San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien. Falls noch eine Scharnierwirkung mit der Scherung verbunden ist, können ebenfalls hohe Gebirge entstehen: Das soll der Ursprung der neuseeländischen Alpen sein.

Das System der Plattentektonik wurde vor etwa zwanzig Jahren entwickelt. Als Erklärung der tektonischen Vorgänge steht es heute ziemlich konkurrenzlos da. Man muss allerdings beachten, dass gewisse Aspekte der Plattentektonik recht hypothetisch sind: solange sie aber nicht zu Widersprüchen führen, können sie zumindest als Arbeitsvorgaben akzeptiert werden.

2.2 Endogene Naturgewalten

2.21 Tektonische Spannungen

Die gewaltigen Verschiebungen der tektonischen Platten – es handelt sich um Zentimeter pro Jahr – erzeugen Spannungen in den Randzonen, die sich in das Platteninnere fortsetzen. Die Existenz dieser Spannungen kann durch in situ-Spannungsmessungen direkt nachgewiesen werden. Hierzu werden Dehnungsstreifen am Ende eines Bohrloches befestigt (meist in der Wand einer Bergwerksstrecke unter Tag); diese werden anschliessend mit einem Kernbohrer überbohrt und samt anschliessendem Gesteinskern gezogen. Die Veränderung der Länge der Messstreifen bei der Entlastung erlaubt es, wenn die elastischen Parameter des Gebirges bekannt sind, die ursprünglich im Gebirge auf den Kern wirkenden Spannungen zu bestimmen.

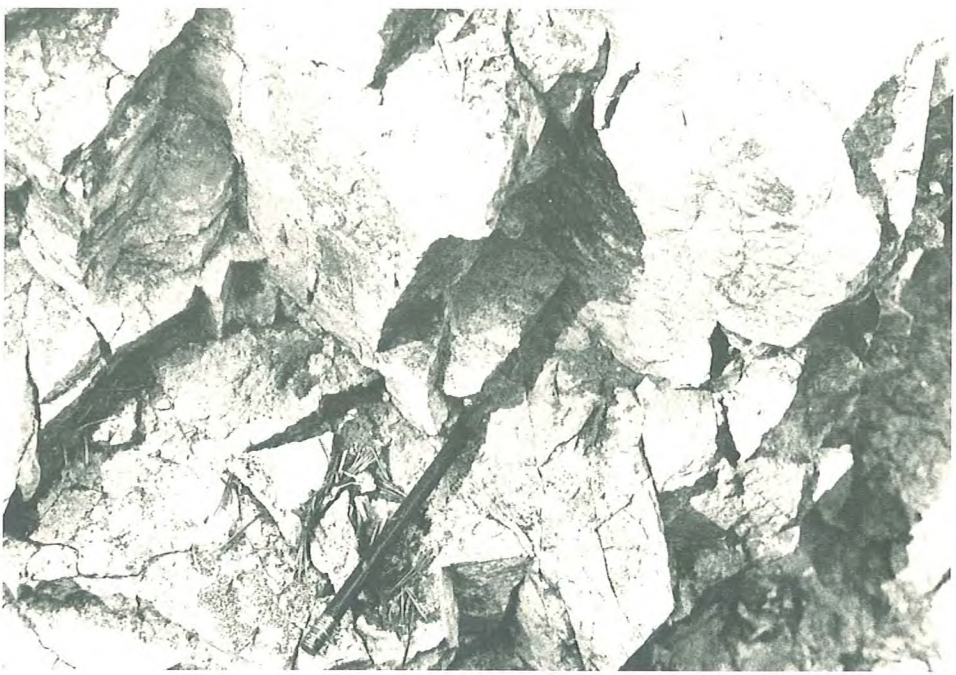


Bild 2 Klüfte im Kalk bei Bleiberg/Kärnten. Man beachte die 3 Scharen.

Fig. 2 Joints in limestone near Bleiberg, Carinthia. Note the 3 sets!

Eine weitere Möglichkeit zum (fast) direkten Nachweis der tektonischen Spannungen bietet sich durch die Untersuchung der Orientierungen von Gesteinsklüften an. Jeder Aufschluss ist nämlich von kleineren und grösseren Klüften (Bild 2) durchsetzt, die als Scherflächen des neotektonischen (d.h. gegenwärtigen) Spannungsfeldes gedeutet werden. In der Tat findet man an einem Aufschluss gewöhnlich, wenigstens statistisch gesehen, drei Scharen von Kluftstellungen, von denen zwei vertikal sind; diese entsprechen den Scherlinien des tektonischen Spannungsfeldes. Die dritte Schar liegt mehr oder weniger horizontal und ist offensichtlich lithologisch (d.h. durch Gesteinseigenschaften wie Schieferung oder Sedimentation) bedingt. Aus der Orientierung der vertikalen Kluftscharen kann demnach auf die Richtung der Scherlinien und entsprechend auf die Hauptspannungsrichtungen des Spannungsfeldes geschlossen werden. Bei weltweiten Studien des Autors (A. E. Scheidegger 1985) hat sich ergeben, dass die Hauptspannungsrichtungen des neotektonischen Spannungsfeldes über mit den Plattenausdehnungen vergleichbare Distanzen konstant sind. In Europa (einschliesslich der Schweiz) liegt die Hauptdruckrichtung NW-SE. Änderungen gibt es nur an Störzonen, wie z. B. an der periadriatischen Naht.

Die tektonischen Spannungen manifestieren sich nicht nur in kleinräumigen Erscheinungen, wie in Klüften, sondern können offensichtlich zu gewaltigen Naturkatastrophen Anlass geben. In erster Linie stehen da die durch die seismische (Erdbeben) Naturgewalt bedingten Phänomene; man darf aber auch die vulkanischen Ereignisse nicht vergessen.

2.22 Erdbeben

Die in Erdbeben freigesetzten Naturgewalten gehören zu den gefürchtetsten Erscheinungen. Erdbeben können nicht nur grosse Städte mit entsprechenden Verlusten in Sekunden zerstören (Bild 3), sondern auch beträchtliche Veränderungen in der Landschaft verursachen (vgl. Kap. 2.3). In der Tiefsee können Erdbeben gewaltige Wellen auslösen, die sich auf die Küsten zubewegen (Tsunamis).

Die Ursache eines Erdbebens wird in einem bruchartigen Vorgang in der Erde angenommen. Wenigstens der Anfang eines Erdbebenschockes kann zeitlich und örtlich als einer punktförmigen Quelle («Herd») entspringend betrachtet werden; im weiteren Ablauf der Schockbewegung wird allerdings ein grösseres Gebiet (Herdregion) einbezogen, das in Horizontalrichtung eine Ausdehnung von Hunderten von Kilometern erreichen kann. Die Herde von Erdbeben wurden bis zu einer Tiefe von ca. 600 km gefunden, liegen aber meistens näher der Erdoberfläche, im Extremfall an ihr selbst. Die gefürchteten Verschiebungen an der Erdoberfläche werden von den Herdvorgängen nur mittelbar erzeugt: die im Herd freigesetzte Energie pflanzt sich durch die Erde fort und bewirkt beim Auftreffen auf die Erdoberfläche eine Oberflächenbewegung. Schäden werden vor allem durch die horizontalen Beschleuni-

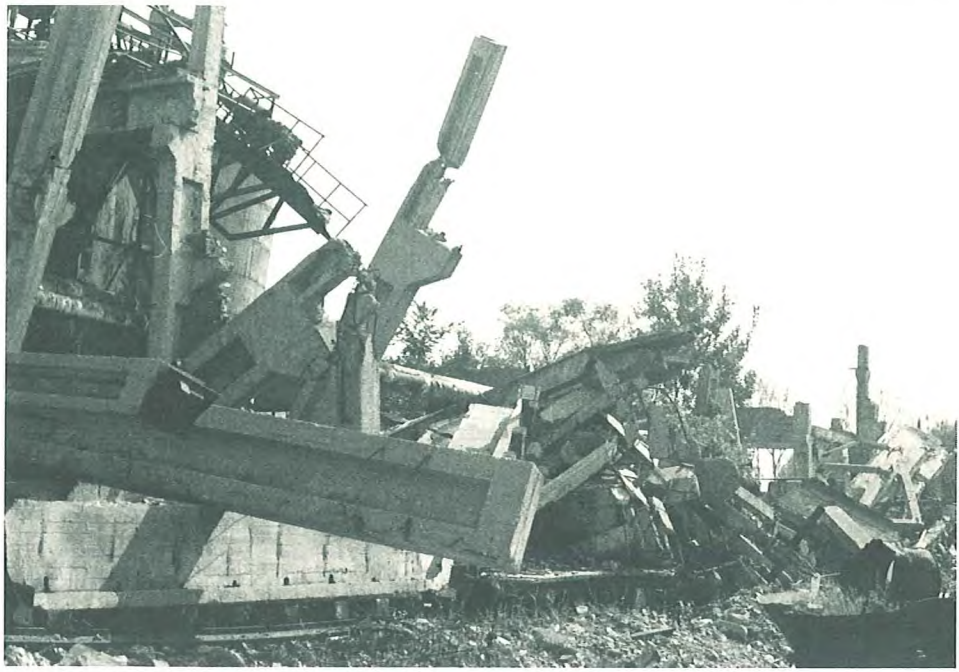


Bild 3 Zerstörung der Stadt Tangshan in China am 28. Juli 1976 durch ein Erdbeben (M= 7,8).

Fig. 3 Destruction of the city of Tangshan in China, on 28 July 1976 by an earthquake (M = 7.8).

gungen des Bodens verursacht, die die Erdbeschleunigung übersteigen können. Die Oberflächenbewegung ist im allgemeinen desto intensiver, je näher man sich beim Herd befindet: lokale Umstände bewirken allerdings, dass diese Regel nicht absolut gilt.

Zur Erklärung des Herdmechanismus hat sich ein Modell einer Art von Scherbruchvorgang sehr bewährt. Es ist zwar ganz klar, dass ein der naiven Vorstellung eines «Bruches» (etwa in einem Gesteinshandstück) entsprechender Vorgang in den beobachteten Herdtiefen nicht existieren kann (da die Reibung zwischen den Bruchflächen grösser wäre als die Scherfestigkeit des Materials), doch passt die Annahme einer Scherung in Ebenen, die die mittlere Hauptspannung enthalten und die grösste und kleinste Druckspannung im Herdpunkt halbieren, genau den an den Erdbebenstationen registrierten Welleneinsätzen von Erdbeben (A. E. Scheidegger, 1963). Eine derartige Orientierung von «Bruch»-Ebenen im Spannungshauptachsensystem entspricht ungefähr der, die in der gewöhnlichen Bruchtheorie von O. Mohr (1928) postuliert wird. Da in der Erde ein «gewöhnlicher» Bruch, wie oben erwähnt, nicht stattfinden kann, muss es sich allerdings um irgendeinen (im Detail noch unbekannten) Instabilisierungsvorgang entlang der Scherlinien des Spannungsfeldes in Herdnähe handeln. Umgekehrt ist es möglich, von den (aus seismi-

schen Registrierungen abgeleiteten) Herdmechanismen auf die Orientierung des tektonischen Spannungsfeldes zu schliessen. Es ist von Interesse zu bemerken, dass sich die aus Erdbebenmechanismen abgeleiteten Hauptspannungsrichtungen an den Plattengrenzen und im Platteninneren mit den aus Kluftstellungen abgeleiteten decken.

Erdbebenherde treten an den Rändern der tektonischen Platten gehäuft auf. Diese Tatsache weist darauf hin, dass die Grundursache der Erdbeben in den Plattenbewegungen zu suchen ist: Im Gefolge der letzteren wird die Scherfestigkeit des Materials gelegentlich überschritten – es bildet sich eine bruchartige Instabilität, ein Erdbeben.

2.23 Vulkanische Erscheinungen

Eine weitere endogen verursachte Naturgewalt äussert sich in vulkanischen Erscheinungen. Hierher gehören nicht nur die bekannten feuerspeienden Berge, sondern auch alle anderen offensichtlich thermischen Erscheinungen, wie Geysire (spritzende heisse Brunnen) und einfache Thermalquellen.

Vulkanische Tätigkeit findet sich in denselben Gegenden gehäuft, wie die Gebirgszüge und die Erdbebenherde: an den Plattenrändern. Sie muss daher wiederum als Folge der endogen bedingten Plattenbewegungen betrachtet werden. Die Ursache eines Ausbruches entspricht dem «Bierflascheneffekt»: Wenn der Flaschendeckel entfernt wird, sinkt der Druck in der Flasche; in der Flüssigkeit gelöste Gase treten aus und der Inhalt überschäumt. Ähnlich stellt man sich die Vorgänge in einem Vulkanschlot vor. Den auslösenden Druckabfall kann man sich durch einen durch die Plattenbewegung bewirkten Bruch entstanden denken.

Ein Vulkanausbruch zeigt sekundäre Folgen: Lava (geschmolzenes Gestein) fliesst aus, Bomben (grosse geschmolzene Materialbrocken, die während des Fluges solidifizieren) und «Asche» (entsprechend kleinere Teilchen) werden ausgeworfen; Gaswolken (u. U. mit glühenden «Aschen»teilchen) werden ausgestossen. Das Wasser in einem Kratersee kann auslaufen oder ein Gletscher kann durch die Vulkanhitze plötzlich schmelzen und sich zu einer gewaltigen Mure («Lahar») entwickeln, wie das z. B. bei dem Ausbruch des Nevado del Ruiz in Kolumbien am 13. November 1985 der Fall war (ca. 25 000 Tote, siehe Titelbild).

Da nahe der Erdoberfläche ein Temperaturgradient von etwa 25° C/km (und mehr) existiert (das weiss man z. B. aus Erfahrungen in Bergwerksschächten), ist geothermische Aktivität nicht schwer zu erklären: sie tritt da gehäuft auf, wo der Untergrund durch tektonische Aktivität aufgelockert ist.

So sind die vulkanischen Erscheinungen wieder im Rahmen der Plattentektonik zu verstehen, bei der sie als sekundäre Folge zu betrachten sind.

2.3 Rein endogen geformte Landschaften

2.31 Prinzip

Die oben besprochenen endogenen Prozesse formieren gewisse Landschaften von sich aus, ohne dass dabei der antagonistische «Response» der exogenen Prozesse viel Einfluss hat. Man spricht daher von «endogenen» Landschaften. In der Reihenfolge der vorigen Abschnitte diskutieren wir vorerst die geomorphologischen Effekte grosser Erdbeben und anschliessend diejenigen der vulkanischen Erscheinungen. Es sind vor allem die letzteren, welche landschaftsbildend gewirkt haben, so dass man gar von «vulkanischen Landschaften» spricht.

2.32 Geomorphologische Folgen von Erdbeben

Die Wirkung von Erdbeben auf Landschaften ist meistens die Folge der Auslösung von gewaltigen Hangrutschungen, welche ganze Landschaften und Flussläufe betreffen. Direkte Verschiebungen an Bruchlinien, die sich bei Erdbeben ereignen, drücken sich weiter in der Morphologie einer Region aus (cf. N.S. Ai et al., 1987).

Die Auslösung der Hangrutschungen wird durch die horizontalen Bodenbewegungen des Erdbebens bewirkt. Die Trägheitskräfte in der Hangmasse erzeugen ein in der Stabilitätsrechnung zusätzlich zu berücksichtigendes Drehmoment: bekanntlich müssen in einem beschleunigten System zu den tatsächlich wirkenden Kräften noch die sogenannten D'Alembertschen Trägheitskräfte beigefügt werden, welche der Beschleunigung entgegengerichtet und im Betrag gleich der bewegten Masse mal die Bodenbeschleunigung sind. So wird durch die Bodenbeschleunigung das Kräftegleichgewicht in einer Böschung verändert und die Standfestigkeit beeinträchtigt: es ereignet sich eine Hanggleitung. Die von Erdbeben ausgelösten geomorphologischen Veränderungen in einem seismisch aktiven Gebiet (d.h. erdbebeninduzierte Hangrutschungen) können oft über Jahrhunderte zurück verfolgt werden, was umgekehrt wieder die Möglichkeit gibt, die Erdbebengeschichte eines Gebietes, in dem schriftliche Aufzeichnungen fehlen, zu rekonstruieren. Dies kann im Hinblick auf die Bestimmung der Erdbebenhäufigkeit in der Vergangenheit und damit im Hinblick auf die Bestimmung des zukünftigen Erdbebenrisikos eines Gebietes von grosser Bedeutung sein. Die Methode wurde vor allem in solchen Ländern wie etwa Nordamerika angewandt, wo schriftliche Aufzeichnungen höchstens 500 Jahre alt sind. Sie wurde in China, wo Aufzeichnungen Tausende von Jahren zurückreichen, im Felde verifiziert.

In speziellen Fällen bewirken Erdbeben beträchtliche Oberflächendiskontinuitäten. Von einem Erdbeben, das am 16. Dezember 1920 in Haiyuan (Ninxia, China) stattfand, resultierte eine 215 km lange Verwerfung mit sinistralen Verschiebungen von bis zu 8 m (N.S. Ai et al., 1987). Derartige Versetzungen äussern sich in S-Kurven in Wasserläufen.

2.33 Vulkanische Landschaften

Als nächste «rein endogen» geformte Gebilde betrachten wir die vulkanischen Landschaften.

Solche Landschaften setzen sich aus als spezifisch «vulkanisch» erkennbaren Formen zusammen, als da sind: Vulkankegel, Lavafelder, Aschenschichten, Einsturzkessel («Caldera») usw.

Beginnen wir mit den Vulkankegeln. Es handelt sich einfach um Anhäufungen von Auswurfmaterial. Die Hangneigung ist durch den selbsttragenden Böschungswinkel einer losen Schüttung bestimmt. So entwickelt sich eine Kegelform. Der Kegel kann aber nur so hoch sein, als dass die Scherspannung am Sockel die Scherfestigkeit des Materials nicht überschreitet. Die Scherspannung ist nach den Gesetzen der inneren Reibung der Druckspannung proportional, so dass sich auch für die letztere eine Limite ergibt. Der Sockel eines Vulkans muss also breiter werden, als einem konstanten Böschungswinkel entsprechen würde, damit die Grenzdruckspannung nicht überschritten wird. Es ist bekannt (Eiffelturm!), dass eine konstante Druckspannung, die dem Gewicht der überlagernden Masse dividiert durch den Querschnitt entspricht, dann erreicht ist, wenn die Profillinie des Gebildes durch eine Exponentialfunktion ausgedrückt wird. Ein Vulkan hat daher oben die Form eines Kegels mit einem breiter werdenden Sockel.

Als Nächstes betrachten wir Lavafelder. Was bei dem Fliessen der Lava erstaunt, ist, dass sie sich über riesige Distanzen erstrecken kann. Es lässt sich aber nachweisen, dass die Abkühlung und damit der Fliessfähigkeitsverlust eben doch sehr langsam erfolgt, so dass sich ein 25 m mächtiger Lavastrom ohne weiteres 300 km weit bewegen kann: man kann die entsprechenden dynamischen Gleichungen aufstellen und lösen und erhält dann dieses Resultat (siehe A. E. Scheidegger, 1975, p. 63). So lässt sich die Entstehung von gewaltigen Lavafeldern, wie man sie z. B. vom Columbia Plateau (Washington, USA) her kennt, erklären.

Die in vulkanischen Landschaften anzutreffenden Aschenfelder sind äolische (durch Wind- und Gaswirkung erzeugte) Ablagerungen. Die Partikel fallen nach den Gesetzen des Lufttransportes aus und sind in Lagen der Grösse nach sortiert. Es können sich auf diese Weise auch Kreuzschichtungen bilden. Wirbel erzeugen Blaslöcher, die als Mulden in der Landschaft erscheinen.

Schliesslich entsteht eine «Caldera», wenn die Lava aus einem Magmareservoir unter einem Vulkanzentrum ausgetreten ist: durch den Massenentzug entsteht ein Einbruch in der Überlagerung unter dem Einfluss des Eigengewichtes, so dass eine kessel(«Caldera»-)förmige Vertiefung gebildet wird. Die Fortpflanzung des Massenentzuges in Form einer Senkung an die Oberfläche wird durch eine Diffusionsgleichung beschrieben (A. E. Scheidegger, 1975, p. 67).

Die erwähnten vulkanischen «Formen» bilden, in Summe, das Charakterbild einer «vulkanischen Landschaft» (Bild 4).



Bild 4 Sekundäre Folgen eines Vulkanausbruches: Lavastrom auf Teneriffa (eine Bucht wurde aufgefüllt). Vulkanische Landschaft!

Fig. 4 Secondary consequence of a volcanic eruption: lava flow on Tenerife (a bay was filled); volcanic landscape.

3 Exogene Prozesse

3.1 Response-Theorie

Die exogenen Prozesse, die sich in Wasser-, Wind- und Eiswirkung in der Landschaft ausdrücken, werden aktiv, sobald topographische Höhenunterschiede bestehen. Da die letzteren in erster Linie (primär) von endogenen Prozessen verursacht werden, spricht man von einem «Response» (Antwort) der exogenen Agentia darauf. Die ursprünglich treibende Kraft der exogenen Prozesse ist die Sonneneinstrahlung auf die Erde, die unterschiedliche Erhitzung und damit Verdunstung von Wasser verursacht, verbunden mit der Schwerkraft, welche Fliess- und damit Transporterscheinungen bewirkt.

Wir haben schon erwähnt, dass endogene und exogene Prozesse gemäss dem Antagonismusprinzip gleichzeitig stattfinden, obwohl die ersteren «primär» sind. Ein dynamisches Gleichgewicht besteht, wenn gewisse Beziehungen zwischen charakteristischen Parametern erfüllt sind. Sobald einer dieser

Parameter geändert wird, verschiebt sich der Gleichgewichtszustand. So gibt die Landschaft einen «Response» (Antwort) auf jeden Prozess, der einen der Parameter ändert (E. H. T. Whitten, 1964). Die vertiefte Untersuchung von Prozess- und Response-Modellen führt in die allgemeine Systemtheorie, die im nächsten Kapitel (4) betrachtet werden wird.

Im Moment ist es unsere Aufgabe, die rein exogene Wirkung (für gegebene Reliefstrukturen von Landschaften) zu besprechen.

3.2 Exogene Naturgewalten

3.21 Klassifizierung

Die exogenen Vorgänge werden, wie erwähnt, durch Sonnenwärme und Schwerkraft angetrieben. Sie sind entweder durch das Fliessen von Wasser, durch die Bewegung von Eis oder durch Erscheinungen in der Luft bestimmt. In dieser Reihenfolge sollen nun vorerst die entsprechenden Naturgewalten besprochen werden, bevor wir dann zu einer Betrachtung der durch diese hervorgerufenen Landschaften übergehen.

3.22 Wasser

Beginnen wir mit dem Wasser. Seine grösste Verbreitung findet es in den Weltmeeren, wo es aber als Landschaftsbildner und Naturgewalt nur an den Küsten in Erscheinung tritt. Hier sind es der Wellengang und die küstennahe Meeresströmung, welche von Bedeutung sind. Der gegen die Küste brandende Wellengang stellt eine dieselbe verändernde Naturgewalt dar, besonders während Springfluten und Winterstürmen. Die küstennahe Strömung ist meistens der Küste parallel und verändert die Wasserlinie.

Die Hauptgewalt des Wassers äussert sich in Gerinnen, seien dies Flüsse oder Bäche. Bei den Flüssen wird die Naturgewalt des Wassers vor allem durch die periodische Erscheinung von Hochwässern evident. Das Eintreten dieser Ereignisse wird vorwiegend mit statistischen Methoden untersucht. So wird aus einer Datumsliste von Hochwasserereignissen eine mittlere Wiederkehrzeit für die letzteren errechnet, welche etwa der Planung von Schutzmassnahmen zu Grunde gelegt werden kann.

In kleineren Berggerinnen (Tobeln) führen Hochwässer zu Schutt- und Schlammschwällen, die als «Murgänge» oder «Rüfenen» bezeichnet werden. Für die Entstehung derartiger Ereignisse ist dabei nicht nur die abfliessende Wassermenge wesentlich, sondern auch das Vorhandensein von entsprechenden Schuttanhäufungen in den Tobeln. Die letzteren sind eine Folge der normalen Verwitterung an den Gehängen entsprechend dem Antagonismusprinzip der Landschaftsentwicklung. Murgänge können daher grundsätzlich nicht verhindert werden; man kann höchstens versuchen, durch Verbauungen die schubartigen Massenbewegungen zeitweilig aufzuhalten und dann langsam erfolgen zu lassen.

Schliesslich ist beim Wasser auch noch die Kapazität zur flächenartigen Überflutung ganzer Landstriche zu beachten. In dieser Hinsicht stellt es eine Naturgewalt dar, welche ganze Gegenden verändern kann. Gewaltige prähistorische Überflutungen haben sich z. B. in den «Scablands» von Washington (V. R. Baker und D. Nummedal, 1978) oder in der Baldakatj Region von Lappland (D. A. Elfström, 1987) ereignet. Wir werden bei der Diskussion «exogener Landschaften» noch auf diese Fälle zurückkommen.

3.23 Schnee und Eis

Wenn Wasser gefriert, wird es zu Eis. Der Gefrierprozess beginnt in Kristallisationskernen, aus denen sich kleine, hexagonale Kristalle bilden. Im flüssigen Wasser (See, Meer) bilden diese sogleich eine feste Schicht, die obenauf schwimmt, da die Dichte der festen Phase (Eis) geringer ist als die des flüssigen Wassers.

Falls sich das Wasser aus Dampf in der Atmosphäre kristallisiert, bilden sich Einzelkristalle oder Klümpchen von solchen, welche in der Form von «Schneeflocken» langsam zur Erde schweben, da das Eis dichter ist als die Luft. Der Schnee akkumuliert sich an der Erdoberfläche zu einer Schneedekke: die einzelnen Schneeflocken türmen sich zunächst einfach aufeinander, wobei grosse Zwischenräume entstehen; mit zunehmender Dicke drückt sich aber der Schnee durch das Eigengewicht in sich selbst zusammen, so dass die Porosität abnimmt. Wenn es noch in den Schnee hineinregnet oder Wasser durch Schmelzen der Oberfläche infolge von Sonneneinstrahlung oder durch Druckwirkung entsteht, dringt dieses in den Porenraum des Schnees ein und kann zu einem Prozess der Rekristallisation führen, welcher allmählich den Schnee zu massivem Eis verwandelt. So entsteht «Gletscher»-Eis aus «Firn»-Schnee.

Eis, obwohl in einem «festen» Aggregatzustand, bildet keinen «starren» Körper: unter der Wirkung von Scherspannungen fliesst es, und zwar nach recht komplizierten, noch nicht vollständig bekannten Gesetzen. In erster Näherung kann man es als eine «plastische» Substanz (etwa wie Zahnpasta) ansehen; in Wirklichkeit gehorcht es aber einer nichtlinearen Beziehung zwischen der Scherspannung und der Dehnungsrate. Ein Gletscher fliesst daher wie ein «Strom» dahin (cf. A. E. Scheidegger, 1970).

Sowohl Schnee wie auch Eis kann sich als Naturgewalt äussern.

Von einer Schneedecke ist bekannt, dass sie instabil werden und als Lawine zu Tal sausen kann. Alljährlich fallen in Gebirgsländern immer wieder Touristen und Sportler solchen Lawinen zum Opfer, von denen mehrere Typen, wie Schneematschlawinen (L. J. Onesti, 1985; E. Hestnes, 1985), Nassschneelawinen, Schneebretter und Staublawinen unterschieden werden (cf. A. E. Scheidegger, 1975). Die Lawinendynamik ist eine eigene Wissenschaft, für deren Erforschung es besondere Institute, wie das Eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung Weissfluhjoch-Davos, gibt.

Auch Eis kann sich als «Naturgewalt» manifestieren. Wir haben oben gese-

hen, dass Eisströme, sog. Gletscher, normalerweise langsam (mit Geschwindigkeiten von 0,7–3 km pro Jahr) dahinfliessen. Sie können aber plötzlich in viel schnellere Bewegungen geraten, welche Geschwindigkeiten bis zu 20 m/Tag erreichen. Solche Phasen werden Vorstösse, englisch «Surges», genannt und führen oft zu Gletscherabbrüchen und Eislawinen. Durch ein solches Ereignis wurden am 30. August 1965 bei Mattmark im Wallis 88 Arbeiter, die dort an der Errichtung eines Staudammes beschäftigt waren, getötet. Das Unglück wurde von B. Brockamp et al. (1967) in einem öffentlich zugänglichen Gutachten eingehend untersucht. Die Mechanik der Gletschervorstösse ist auch heute noch nicht ganz klar; die zur Katastrophe führenden Instabilitäten können im Spannungsfeld, im Temperaturfeld oder in der Reibung am Gletscherbett ihren Ursprung nehmen. Der eigentliche Abbruch wird dann natürlich durch den vom Gletschervorstoss erzeugten Überhang der Eismasse ausgelöst. Die Dynamik der Eislawinen ist der der Schneelawinen und Bergstürze nicht unähnlich, doch kommt noch dazu, dass das Eis, wenn es in tiefere Lagen verstösst, schmilzt und dann zu einer Murenkatastrophe führen kann. Die ganze Problematik wurde von J.C. Alean (1984) eingehend behandelt.

3.24 Atmosphärische Prozesse

Schliesslich sind als letzte exogene Naturgewalten die atmosphärischen Prozesse zu besprechen. Diese umfassen, ausser der gewöhnlichen Windwirkung, auch Gewitter, Tornados, Orkane und grossräumige Zyklonen.

Die gewöhnliche Windwirkung äussert sich in der Verfrachtung von Staub, Bodenpartikeln und Sand. Dadurch ereignet sich Abtragung (Bodenerosion) an der einen, Ablagerung an einer anderen Stelle. Instabilitätserscheinungen führen zur Bildung von Rippeln und Dünen; diese sind die Bausteine «äolischer» (Aiolos, Gott des Windes bei den alten Griechen) Landschaften (siehe unten).

Gewitter sind zwar atmosphärische Erscheinungen, sind aber mit Bezug auf Landschaften nur selten von Bedeutung: meistens gehen Sie mit beträchtlichem Niederschlag einher, welcher dann zu Murgängen und Hochwässern führt (vgl. Abschnitt 3.22). Als Naturgewalt ist auch die sich in Blitzen äussernde elektrische Entladung einzustufen. Die Blitzelektrizität ist Teil des natürlichen elektrischen Stromkreises, welcher schon bei Schönwetter vorhanden ist. Im Normalfall geht der Aufbau eines Blitzkanals unter Bildung eines gestaffelten Vorblitzes von der Wolke aus zum Boden vor sich; die eigentliche Entladung erfolgt dann von unten nach oben, wenn der Vorblitz unten angekommen ist. In selteneren Fällen erfolgt der Vorgang umgekehrt (Hauptschlag von oben nach unten). Die durch Blitze angerichteten Schäden (Bild 5) entstehen hauptsächlich durch die hohen Ströme, durch welche geringe Beschädigungen an Felsen angerichtet (J. Norin, 1986) sowie Waldbrände ausgelöst werden können. Letztere haben eine bedingte geomorphologische Bedeutung durch erhöhte Erosionsbereitschaft des Waldbodens nach dem Waldbrand.



Bild 5 Blitzschaden an einem Baum bei Bischofszell TG.

Fig. 5 Lightning damage on a tree near Bischofszell TG.

Wenn wir uns nun den Tornados, Orkanen und Zyklonen zuwenden, ist zu beachten, dass es sich in allen diesen Fällen um atmosphärische Wirbel handelt: anders ist jeweilen nur die Dimension. Die kleinräumigsten Erscheinungen sind die Tornados, in welchen in einer «Windhose» von kleinem Durchmesser (100 m–1500 m) hohe Energien konzentriert sind. Bei den meisten Tornados ist die Bodenberührung nur etwa 100 m lang, bei katastrophalen kann sie aber mehrere Kilometer betragen. Die Windgeschwindigkeiten können 120 m/sec, die Druckdifferenzen zwischen dem Zentrum der Windhose und der umgebenden Luft 3kPa erreichen, was die grosse beobachtete Schadenswirkung der Tornados erklärt. Geomorphologisch sind sie aber kaum von Bedeutung.

Grössere Wirbel als die der Tornados werden durch Orkane (Taifune) repräsentiert. Dies sind grossmassstäbige atmosphärische Wirbel, die in geographischen Breiten von etwa 30 N und S entstehen und sich dann in höhere Breiten (N und S) begeben. Das Zentrum («Auge») kann über 20 km im Durchmesser erreichen, die Windgeschwindigkeit 60 m/sec übersteigen. Wiederum stellen diese Wirbel eine beträchtliche «Naturgewalt» dar, die in Folge der hohen Windgeschwindigkeiten und der bedeutenden damit verbundenen Niederschläge Schaden erzeugen kann, aber ohne direkte geomorphologische Bedeutung ist. Höchstens können sekundär durch Hochwässer in Tälern und Wellengang an Küsten Landschaftsveränderungen erfolgen.

Die grössten atmosphärischen Wirbelsysteme werden durch die Zyklonen mit den assoziierten Frontensystemen dargestellt. Obwohl in ihnen sehr viel Energie enthalten ist, ist die letztere so diffus, dass keine direkten Wirkungen empfunden werden. Sie bestimmen aber den Wetterablauf in den «gemässigten» Zonen, und damit langfristig deren Klima, welches natürlich auch wieder die in diesem Zusammenhang charakteristische «humide» Landschaftsentwicklung nach sich zieht.

3.3 Rein exogen geformte Landschaften

3.31 Prinzip

Wiederum bilden die oben besprochenen Prozesse gewisse Landschaften, ohne dass der antagonistische «Response» der gegenteiligen Naturkraft viel Einfluss hat. Im vorliegenden Fall spricht man daher von (rein) «exogenen Landschaften». In der Reihenfolge der vorigen Abschnitte diskutieren wir vorerst die geomorphologischen Folgen hydrologischer Ereignisse und anschliessend Effekte von Schnee und Eis (glaziale Landschaften) sowie von Wind (äolische Landschaften). Die Systematik solcher Landschaften wurde vom Schreibenden in einem Buche dargestellt (A. E. Scheidegger, 1987).

3.32 Hydrologisch geformte Landschaften

Beginnen wir mit den geomorphologischen Wirkungen des Wassers. Die wohlbekannte Bildung von Tälern mit ihren charakteristischen Formen geschieht allerdings nicht rein exogen, sondern als «Response» zu den geodynamisch bedingten Gebirgsbildungen. Als «rein» exogen sind daher in erster Linie die in Folge von gewaltigen Wasserkatastrophen resultierenden Landschaftsformen zu betrachten, wie sie schon weiter oben kurz erwähnt wurden.

So befindet sich im Nordwestteil des Staates Washington der USA ein riesiges «Schorfland» (Scabland), welches nach Meinung von V. R. Baker und D. Nummedahl (1978) durch eine Reihe von katastrophalen Überflutungen, die vor 10000 bis 20000 Jahren stattfanden, erzeugt wurde. Zu dieser Zeit existierte um Missoula herum ein riesiger Gletschersee, der mehrmals ausgelaufen sein soll. Dabei wären gewaltige Talwege, z. B. das Grand Coulee von Washington, auserodiert worden, die heute trocken liegen (Bild 6). Andere Forscher glauben allerdings, dass gerade das Grand Coulee durch eine temporäre Diversion des Columbia Flusses, die längere Zeit anhielt, gebildet wurde. Nichtsdestoweniger handelt es sich bei den «Scablands» jedenfalls um eine «rein exogen», nämlich hydrologisch erzeugte, spektakuläre Landschaft.

Eine ähnlich spektakuläre Landschaft, welche durch eine katastrophale Überflutung erzeugt wurde, befindet sich im schwedischen Lappland (A. Elfström, 1987). Diese ist durch das Vorhandensein grosser Felsbrocken charakterisiert, die offensichtlich durch gewaltige Wasserschwälle hertransportiert worden waren. Diese Schwälle ereigneten sich wohl durch das plötzliche Ausfliessen von durch Eisbarrieren aufgestauten Schmelzwasserseen während des

Ausklingens der letzten Eiszeit (A. Elfström, 1983). Die gewaltige Verfrachtungskapazität einzelner grosser Wasserschwälle ist vielerorts zu sehen. A. Elfström (1987) hat eine ganze Reihe von Ereignissen in einer Tabelle aufgelistet. Der Wasserschwall kann, ausser vom Nachgeben von Eisdämmen, auch vom Auslaufen eines vulkanischen Kratersees oder vom Bersten einer Bergsturzmasse herrühren. Bild 7 zeigt ein typisches, von einem solchen Ereignis herrührendes Blockfeld.

Im übrigen ist die Wirkung des Wassers auf Landschaften überall zu sehen. Wie aber schon oben erwähnt, ist diese Wirkung eher als Teil der gesamten Landschaftsentwicklung nach dem Antagonismusprinzip als «rein exogener Prozess» zu interpretieren.

3.33 Glaziallandschaften

Rein exogen durch Gletscher geformte Landschaften findet man in solchen Gebieten, die während der letzten Eiszeit von Eis bedeckt waren. Gerade in der Schweiz findet man viele Beispiele dieser Art; ein grosses Werk, das sich der Beschreibung und Interpretation schweizerischer (und benachbarter) Glaziallandschaften widmet, wurde von R. Hantke (1978–1983) verfasst.

So ist es bekannt, dass zu mehreren Malen Gletscher aus den Alpen entlang der Haupttäler bis weit ins Mittelland vorstiessen. Die augenfälligsten Spuren der Gletscher im Voralpenland entstammen primär der letzten («Würm»-)Eiszeit, die vor ungefähr 13 000 Jahren ihr Ende nahm. In einer Diskussion der von den Gletschern bedingten Morphologie muss beachtet werden, dass der Untergrund (im schweizerischen Voralpenland: relativ weiche Molasse, eine verfestigte Masse von Flussschutt, die am Fusse der wachsenden Alpen abgelagert wurde) durch glaziale und periglaziale Wirkungen modifiziert wurde, wobei man die Lage der Landschaft mit Bezug auf den Gletscher in Betracht ziehen muss.

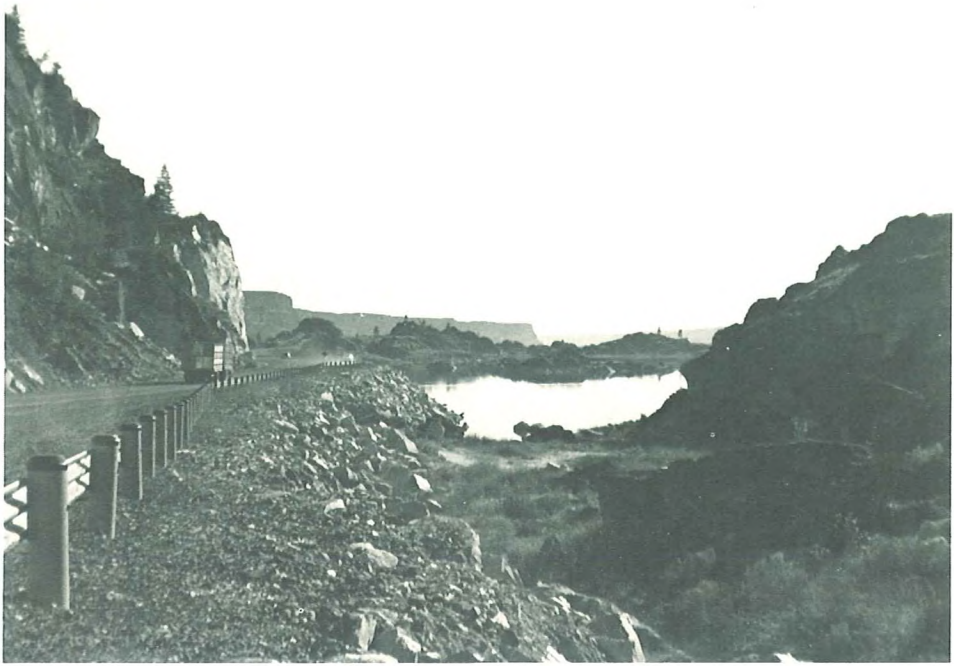
In der Landschaft ausserhalb des Gletschers tritt der Untergrund zu Tage, welcher durch periglazialen Abfluss modifiziert wurde, so dass sich Köpfe aus Härtlingen bildeten. An den Hangpartien verursachte die Frostaktion eine zerfliessende Morphologie, die sich in weichen Solifluktionsformen äussert (Bild 8). Die Härtlingsflächen wurden unruhig – wellig herausfluidisiert. Die Täler sind oft asymmetrisch: der Sonnenhang hat mehr Gefrier- und Tau-Zyklen durchgemacht und wurde daher flacher als der Schattenhang mit weniger solchen Zyklen.

Bild 6 Grand Coulee, Wash. USA. ▶

Fig. 6 Grand Coulee, Wash. USA.

Bild 7 Durch Wasserschwälle verursachtes Blockfeld (Armero, Dept. Tolima, Colombia). ▶

Fig. 7 Rocky blocks on a flood plain (Armero, Dept. Tolima, Colombia).





Die Landschaft am Gletscherrand ist durch Moränenablagerungen geprägt, welche als ein Wirrwarr von Wällen abgelagert wurden und damit Gewässer aufstauen. Viele kleine Mittellandseen (Soppensee im Luzernischen bei Willisau, die Seen bei Amsoldingen im Bernischen, Bergsee am Chlausen ob Horgen etc.) wurden auf diese Weise gebildet. Demgegenüber sind aber die Wannen der grossen Alpenrandseen, wie Zürich- und Bodensee, zwar von Gletschern ausgekolkt worden, doch lagen in diesen Fällen vorbestehende tektonische Gräben vor.

Schliesslich wurde die Landschaft unter dem Gletscher vollkommen vom letzteren überprägt. Bild 9 zeigt den Ruswiler Berg im Luzernischen, einen Molassehügel, der vollkommen durch den darüber hinweg fliessenden Gletscher bedeckt und geformt wurde.

So finden sich im schweizerischen Mittelland exogene glaziale Landschaften aller Art. Der Untergrund ist, wie erwähnt, in der Schweiz relativ «weich» (Molasse); im Hartgestein (z. B. im kanadischen Schild) sind die Formen, die unter dem Eis geformt wurden, schroffer. Im kleinräumigen Massstab unterscheidet man Bildungen entlang und unter Gletschern, die zwar Landschaftsbestandteile sind, deren Klassifizierung und Interpretation aber eine eigene Disziplin darstellen.

3.34 Äolische Landschaften

In der Wüste ist in erster Linie der Wind das wichtigste exogene Agens, welches landschaftsbestimmend ist. Daher werden die Wüstengebiete gemeiniglich als «äolische Landschaften» bezeichnet, obwohl eigentlich die Wirkung von gelegentlichen, dafür aber heftigen Regengüssen nicht zu vernachlässigen ist. Windwirkungen gibt es allerdings nicht nur in Wüsten, sondern überall dort, wo durch Luftströmungen Sand und Staubpartikel leicht aufgewirbelt, verfrachtet und wieder abgelagert werden. Unter anderem ist dies oft in Strandgebieten der Fall, wo der Wellengang die Gesteinspartikel so zerkleinert hat, dass sie der Windwirkung zugänglich werden.

Die geomorphologische Wirkung des Windes zeigt sich hauptsächlich in der Bildung von Dünen: Anhäufungen von Sand, die nicht stationär bleiben, sondern wandern. Die Wanderung geschieht in der Weise, dass ständig durch den Wind Sand von der Luv-Seite der Anhäufung auf ihre Leeseite verfrachtet wird. Derselbe Vorgang ereignet sich übrigens auch im Schnee bei der Bildung von Anhäufungen, Wächten und Blaslöchern. Die Theorie der Dünendynamik wurde von R. A. Bagnold (1941) eingehend erläutert.

Bild 8 Durch Frostaktion verursachte zerfliessende Morphologie an einem Hang bei Gunterswil LU. ▶

Fig. 8 Gently curved morphology caused by frost action on a slope near Gunterswil, Lucerne.

Bild 9 Ruswiler Berg (LU), ein von einem eiszeitlichen Gletscher überprägter Molassehügel. ▶

Fig. 9 Ruswil mountain (Lucerne); molasse hill sculptured by an ice-age glacier.





Einzelne Dünen stellen noch keine Landschaften dar, doch sind sie Bestandteile von solchen. Die grossen Dünenfelder der Sahara sind bekannt; weniger bekannt sind äolische Stranddünenlandschaften, wie sie sich zum Beispiel am Michigansee in den USA entwickelt haben (Bild 10).



Bild 10 Michigan Dünen (Mich., USA).
Fig. 10 Michigan dunes (Mich., USA).

Solche Dünenlandschaften kann man wohl rechtens als «rein exogen» bezeichnen. Der Transport und die Ablagerung des Sandes geschieht allein durch das Spiel der Winde über der sich verändernden Erdoberfläche.

4 Systemtheorie

4.1 Allgemeine Bemerkungen

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist eine Landschaft das Resultat der antagonistischen Wirkung von endogenen und exogenen Prozessen. Der Antagonismus äussert sich zunächst in der Wirkung einer Reihe von fundamentalen Prinzipien in der Landschaftsentwicklung, die durch Verallgemeinerung («induktiv») aus rein morphologischen Beobachtungen erkannt werden konnten.

In der Folge ist es dann möglich, die Landschaftsentwicklung (und die Naturgewalten) im Sinne der allgemeinen Systemtheorie zu interpretieren. So kommt es zur Einführung eines Vokabulars, welches dem der Thermodynamik entspricht (Ergodenhypothese, Entropie etc.), obwohl es sich nur um Analogien, nicht um eine echte Entsprechung handelt. Neulich wurde ein Symposium im Rahmen der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik über diesen Fragenkomplex abgehalten (A. E. Scheidegger und M. J. Haigh, 1988).

4.2 Die morphologischen Grundprinzipien der Landschaftsentwicklung

4.21 Das Antagonismusprinzip

Das fundamentalste morphologische Prinzip der Landschaftsentwicklung ist nach dem früher Gesagten das Antagonismusprinzip: Aufbau und Abbau finden gleichzeitig statt, Aufbau durch «endogene» (tektonische), Abbau durch «exogene» (atmosphärische) Prozesse.

Als weitere Charakterisierung der beiden Typen von Prozessen wurde aus vielen Beobachtungen erkannt, dass die Wirkung der tektonisch-endogenen Prozesse systematisch (nicht aleatorisch – zufallsmässig) ist; sie produzieren gleichmässige Wirkungen über grosse Gebiete. Das hängt damit zusammen, dass die Ursache der endogenen Prozesse in der Plattentektonik liegt, welche sich grundsätzlich auf Regionen von der Dimension der Lithosphärenplatten, d.h. auf Tausende von Kilometern, bezieht.

Demgegenüber ist die Wirkung der exogenen Prozesse prinzipiell aleatorisch, d.h. zufällig, was wieder mit ihrer Natur etwas zu tun hat: die meteorologischen Vorgänge sind stochastisch und hauptsächlich durch die statistische Theorie der (atmosphärischen und hydrodynamischen) Turbulenz beschrieben, deren charakteristische Dimension sich höchstens im Meterbereich befindet, was in einer Landschaft grösserer Ausdehnung als stochastische Variabilität erscheint.

Die grundsätzlich verschiedene statistische Natur der exogenen und endogenen Wirkungen kann dazu verwendet werden, den Ursprung angetroffener geomorphologischer Formen aus ihrem statistischen Charakter abzuleiten: Systematische Züge sind endogen, unsystematisch-aleatorische aber exogen bedingt.

So kann die Frage nach der Ursache der Rezession eines Hanges durch ein Rillensystem (Bild 11) gestellt werden: ist sie rein exogen bedingt, oder hat sie endogene Vorzeichnung? Die Analyse eines Rillensystems bezüglich seines statistischen Charakters muss auf topologischen Betrachtungen fussen. Man hat bemerkt, dass in solchen Rillensystemen ein topologisches Gesetz



Bild 11 Rillensystem an einem Hang: Abraumhaufen einer Tagbauoperation für Kohle bei Danville, Illinois USA.

Fig. 11 Gully system on a heap of coal mine tailings near Danville (Ill., USA).

herrscht. Man bezeichnet die «Ordnung» eines Rillensegmentes mit 1,2 . . . gemäss dem in Bild 12 gezeigten Schema. Dann kann man die Zahl N der Segmente der Ordnung n im Rillennetz bestimmen. Es stellt sich dann ein erstaunliches Gesetz heraus, welches von Horton entdeckt wurde: Die Zahlen N bilden eine geometrische Folge mit dem Faktor 1/3,5; $N_n = 3{,}5\ N_{n+1}$.

Dieses Gesetz ist, wie sich gezeigt hat, die Folge der vollkommenen topologischen Zufallsmässigkeit der Netzformen. Man kann für das Kollektiv aller möglicher Konfigurationen mit einer gegebenen Zahl von Enden den «Erwartungswert» für N_1, N_2 ... berechnen, dann folgt das Hortonsche Gesetz. Das Kollektiv aller möglichen Konfigurationen mit 5 Enden (Quellen) ist in Bild 13 gezeigt; die Zahl der Möglichkeiten wächst sehr rasch mit der Zahl der Enden, aber heutige Computer erlauben sichere Monte-Carlo-Schätzungen der Erwartungswerte. Dass das Hortonsche Gesetz herauskommt, beweist, dass die Rillen «zufallsmässig» verknüpft sind, und daher, nach dem allgemeinen Prinzip, rein exogen verursacht sind.

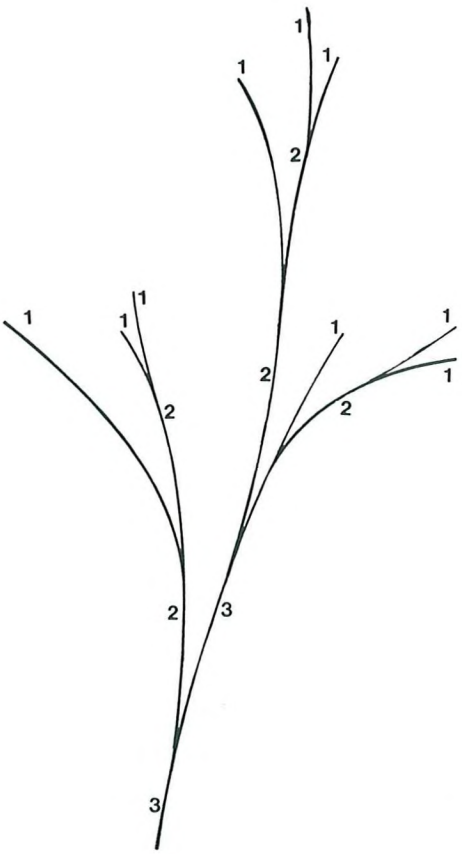


Bild 12 Strahlersche Definition der Ordnung von Flusssegmenten.

Fig. 12 Strahler's definition of stream orders.

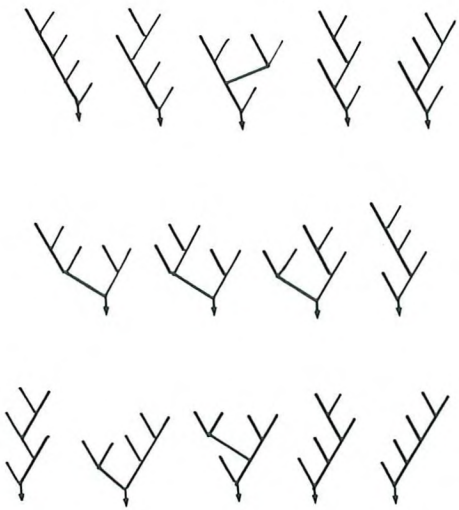


Bild 13 Die 14 möglichen Konfigurationen für ein Flussnetz mit 5 Quellen.

Fig. 13 The 14 possible configurations of bifurating arborescences with 5 free ends.

Zum Abschluss wollen wir noch ein Beispiel einer endogenen Wirkung zeigen (nach A.E. Scheidegger, 1980). Wir wenden uns wieder einem Flussnetz zu. Betrachten wir das Einzugsgebiet des Hinterrheins in der Schweiz (Bild 14). Man hat sofort das Gefühl, dass es sich bei der Orientierung der Flusssegmente nicht um eine «aleatorische» Verteilung handle. Um das nachzuprüfen, muss man erst einmal Richtungen definieren, was am besten durch «Rektifizierung» der Segmente (Verbindung der freien Enden und Knoten durch gerade Linien) geschieht (Bild 15). Dann kann man ein Polardiagramm für die gewichteten (nach Länge) Richtungen zeichnen (Bild 16). Dabei wird sofort klar, dass zwei bevorzugte Flussrichtungen bestehen, die Verteilung also nicht «zufallsmässig» sein kann. Die Flussrichtungen sind durch tektonische Kräfte bestimmt, nämlich durch das Streichen der Hauptachse der Alpenfaltung.

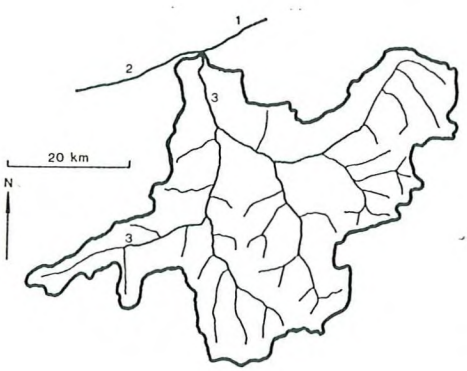


Bild 14 Schema des Einzugsgebietes des Hinterrheins (GR), nach A.E. Scheidegger, 1980.

Fig. 14 Catchment area of the Posterior Rhine (Grisons); after A.E. Scheidegger, 1980.

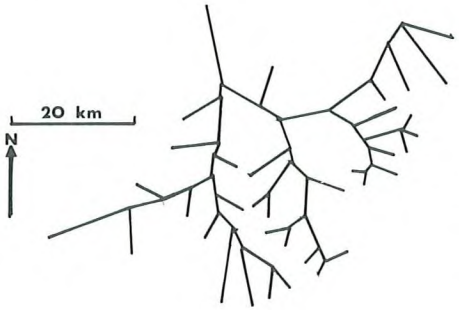


Bild 15 Rektifiziertes Schema des Einzugsgebietes des Hinterrheins, nach A.E. Scheidegger 1980.

Fig. 15 Rectified catchment area of the Posterior Rhine (after A.E. Scheidegger, 1980).

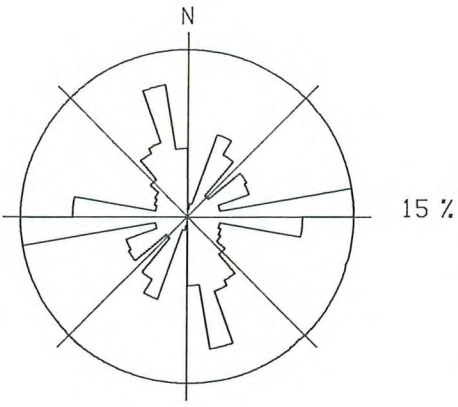


Bild 16 Polardiagramm der Flussrichtungen im Einzugsgebiet des Hinterrheines, nach A.E. Scheidegger, 1980.

Fig. 16 Polar diagram of river segments in the catchment area of the Posterior Rhine (after A.E. Scheidegger, 1980).

4.22 Das Instabilitätsprinzip

Das Antagonismusprinzip beschreibt wesentliche Züge der Landschaftsentwicklung. Es steht aber nicht alleine da. Die gegensätzliche Wirkung von endogenen und exogenen Prozessen bewirkt nämlich eine grundsätzliche Instabilität der Landschaft.

Unter dem «Instabilitätsprinzip» versteht man zwei Dinge.

Zuerst einmal bemerkt man, dass viele individuelle Landschaftselemente nicht permanent sind, obwohl ihr genereller Charakter permanent erscheint. Das bekannteste Beispiel dieser Art ist die Mäandrierung: Obwohl der statistische Aspekt eines Mäanders gegeben ist, sind die einzelnen Schlaufen instabil.

Zweitens bemerkt man einen weiteren Aspekt der «Instabilität»: Nicht nur sind die einzelnen Landschaftselemente «impermanent», sondern sie entfernen sich vom Gleichgewicht: Ein gerader Fluss wird gekrümmt, ein flacher Hang wird terrassiert, ein Karstloch wird grösser: Die Abweichung von der Uniformität nimmt daher immer grundsätzlich zu.

So ist es eine bekannte Tatsache, dass Täler in Gebirgsregionen Stufen aufweisen. Wir werden auf diese Tatsache auch noch im Zusammenhange mit einem weiteren fundamentalen Prinzip der Landschaftsentwicklung, dem sog. «Catena-Prinzip», zurückkommen. An dieser Stelle wollen wir nur darauf hinweisen, dass man die Stufenform dadurch erklären kann, dass jeder Knickpunkt sich zu verstärken tendiert: Jede Stufe neigt also dazu, sich selbst zu «akzentuieren». Die Stufenform der Täler ist somit eine direkte Folge des Instabilitätsprinzips.

Eine Folge der Stufenbildung der Täler ist die Bildung von Böden und Engstellen, da die flachen und steilen Strecken mit der Weite des Tales korreliert sind. Eine Kleinstform dieses Phänomens ist in der Folge von Pfützen und raschfliessenden Strecken an einem Bach zu sehen (Bild 17).

Eine weitere Auswirkung des Instabilitätsprinzips ist aus dem transversalen Profil von Tälern ersichtlich: Gemeiniglich erkennt man darin eine Folge von «alten» Flussterrassen. Der Fluss kerbte sich progressiv in das vorherige Alluvium ein. Meistens hat man lithologische Ursachen für die Entstehung von Terrassen angenommen. Man kann aber für das Terrassenphänomen auch eine rein stochastische Ursache angeben: Jede zufällige Eintiefung tendiert dazu, sich zu akzentuieren, und daher bildet sich nach dem Instabilitätsprinzip ein neues Niveau.



Bild 17 Sequenz von Pfützen und raschfliessenden Strecken an einem Bach (Rosenbach im Wienerwald).

Fig. 17 Sequence of riffles and pools in a brook (Rosenbach, Vienna Woods, Austria).



Bild 18 Quelltuffterrassen bei Kollbrunn im Zürcher Oberland.

Fig. 18 Spring tufa terracettes near Kollbrunn (Zürich).

Die Wirkung des Instabilitätsprinzipes zeigt sich auch in Kleinstformen, wie z. B. Quelltuffterracetten unterhalb einer Quelle (Bild 18): Wenn das Wasser aus einer Quelle austritt, verliert es progressiv Kohlensäure und damit Lösungsfähigkeit für Kalk. Damit schlägt sich Kalk als Tuff nieder, und zwar würde das in einer einförmigen Lage geschehen, wenn das Instabilitätsprinzip nicht wirksam wäre: Der Kohlensäureverlust ist grösser auf den Tuffanhäufungen, weil dort die Wasserschicht dünner und grösserer Bewegung ausgesetzt ist; damit ist die Kalkablagerungsrate auf den schon vorhandenen Anhäufungen grösser als darum herum, und es bildet sich eine Folge von Terracetten.

Als weiteres Beispiel betrachten wir Erosionskessel. Im Hochgebirge sind diese als «Kare» bekannt (Bild 19), wobei meistens eine Gletschertätigkeit als deren Ursache angesehen wird. Solche «Kare», d.h. Erosionskessel, gibt es aber auch in Gebieten, wo niemals Gletscher waren. Daher muss man solche Kessel wiederum ganz einfach als Auswirkung des Instabilitätsprinzips der Geomorphologie ansehen: Die maximale Erosionsrate besteht immer an der steilsten Stelle eines Kessels, der sich daher von selbst «ausräumt».

Dasselbe gilt für die Entstehung von Lösungslöchern; in Karstgebieten werden sie gewöhnlich als «Dolinen» bezeichnet; (Bild 20): Wenn einmal ei-



Bild 19 Hochkar am Hochkönig, Land Salzburg, Österreich.

Fig. 19 Glacial cirque on the slope of the Hochkönig, Salzburg Province, Austria.

Bild 20 Doline am Schwialppass (Wäggitalseite, SZ).

Fig. 20 Doline near the Schwialppass (Wäggital, Schwyz).



ne Öffnung besteht, fliesst natürlich mehr Wasser hinein und hindurch, die Lösungstätigkeit ist verstärkt und die Öffnung vergrössert sich.

Man kann also mit Bezug auf das Instabilitätsprinzip zusammenfassend sagen:

a) Die jeweilige Morphologie der Erde ist das Resultat einer antagonistischen Wirkung von endogenen (aufbauenden) und exogenen (abbauenden) Prozessen.

b) Die exogenen Prozesse sind zufallsmässig und instabil: sie wirken dort am stärksten, wo durch stochastische Schwankungen eine Abweichung von Gleichförmigkeit entstanden war.

c) Die Instabilitäten können natürlich nicht unbegrenzt wachsen, sondern es wird irgendwann ein Sättigungseffekt erzielt.

Die theoretische Begründung wird durch die Taylorsche Analyse der dynamischen Gleichgewichte gegeben: Wenn die Abweichung vom Gleichgewicht die Abweichungsrate verstärkt, so wächst die Abweichung exponentiell; im gegenteiligen Falle klingt sie exponentiell ab. Die Abweichungen von der Uniformität in der Landschaft sind grundsätzlich instabil.

4.23 Das Catena-Prinzip

Das Instabilitätsprinzip ist verwandt mit einem weiteren fundamentalen geomorphologischen Prinzip: Dem Catena-Prinzip (A.E. Scheidegger, 1986).

Der Begriff «Catena» wurde ursprünglich in der Bodenkunde verwendet: Es wurde nämlich bemerkt, dass an Hängen immer wieder ganz bestimmte Folgen (lat. Catenae) von Böden vorkommen. Diese Bodentypen sind mit ihrer «topographischen» Lage am Hang verbunden.

In der Landschaftskunde ist die Typisierung von Böden von wenig Interesse. Es wurde aber beachtet, dass die Lage eines Hangsegmentes an einer bestimmten Stelle einer Bodencatena nicht nur einen Einfluss auf den Bodentypus hat, sondern auch auf die Morphologie des Segmentes. Daher wurde der Begriff «Catena» von der Bodenkunde auf die Geomorphologie übertragen: An Hängen und in Einzugsgebieten besteht das Prinzip, dass sich ganz bestimmte Folgen (Catenas) von morphologischen Elementen immer wieder wiederholen.

Das Grundschema einer Catena wird durch eine einfache Folge von Phänomenen dargestellt, die immer und immer wieder in einer Landschaft anzutreffen sind. Sie ist am besten an einem einfachen Hang zu sehen.

Die Folge ist:

a) Eine Eluvialregion, wo Sammlung von Wasser, Erosion und Auswaschung von Material stattfinden; die Morphologie ist die eines flachen Plateaus mit Abriss.

b) Eine Kolluvialregion, wo die Materialtransportrate hoch und die Hangstrecke steil ist.

c) Eine Alluvialregion, wo am flachen Hangfuss hauptsächlich Ablagerung und Aufschüttung stattfinden.

Obiges ist das Grundschema einer Catena. Das Catena-Prinzip besagt, dass die ganze Landschaft aus Catenaelementen zusammengesetzt ist, von welchen jedes aus einer Folge von einem flachen (oben), einem steilen (Mitte) und einem weiteren flachen (unten) Segment besteht.

Beispiele für Catenae findet man viele. So ist bekannt, dass ein Wildbach ein flaches Einzugsgebiet mit Abriss, eine steile Schluchtstrecke und schliesslich einen flachen Schuttkegel aufweist.

Wir haben die Stufenform der Alpentäler schon im Zusammenhang mit dem Instabilitätsprinzip erwähnt. Wir sehen nun, dass diese Stufenform auch aus dem Catena-Prinzip folgt.

Die Catenafolge ist nicht nur auf Wassererosionserscheinungen beschränkt. Sie findet sich in jeder Art von Massentransport, z. B. in einer Schutthalde: «Eluvium» (Sammelgebiet) oben, «Kolluvium» (Transportregion) in der Mitte, «Alluvium» (Auslauf) unten.

Man kann sich fragen, wie das Grundschema der Catena mechanisch erklärt werden kann. Dies kann nach ähnlichen Gesichtspunkten wie beim Instabilitätsprinzip erfolgen: Wenn man annimmt, dass die Erosionsrate mit dem topographischen Gradienten zunimmt, ergibt sich das Catena-Prinzip von selbst: Je steiler ein Hang, desto rascher wandert er rückwärts; die flachen Böden oben und unten bleiben dagegen länger bestehen.

Man kann die obigen Gedankengänge auch durch mathematische Formeln ausdrücken, es ergibt sich eine nichtlineare Differentialgleichung, deren Lösungsschar in Bild 21 gezeigt ist. Man sieht deutlich die Ausbildung der Catena.

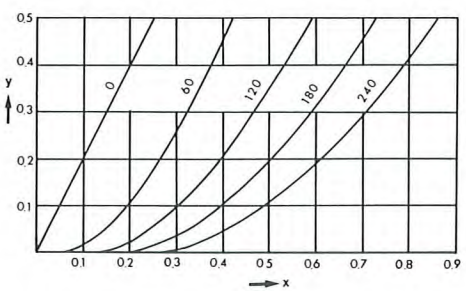


Bild 21 Lösungsschar der Differentialgleichung der Hangentwicklung (zeitliche Sequenz); nach A.E. Scheidegger, 1986.

Fig. 21 Sequence of solutions of the nonlinear differential equation of slope recession (after A.E. Scheidegger, 1986).

4.24 Das Selektionsprinzip

Zusätzlich zu der rein stochastischen Natur der exogenen Prozesse besteht eine gewisse «Zielstrebigkeit» ihrer Wirkung. Diese wird durch das «Selektionsprinzip» festgehalten.

Das Selektionsprinzip, welches ursprünglich von dem Schweizer Geomorphologen E. Gerber (1969) formuliert wurde, besagt, dass die Verwitterungs- und Erosionsprozesse vorgängig so geschehen, dass statisch stabile Formen selektioniert werden. Dabei sind die Spannungen, gegen welche die Formen stabil sind, die Eigenspannungen (oder Bauspannungen), nicht etwa äussere

tektonische Spannungen. Die natürlichen Formen in der Landschaft sind also die, die unter ihrem Eigengewicht am stabilsten sind.

Die augenscheinlichsten Formentypen in der Natur, die das Selektionsprinzip bezeugen, sind die verschiedenen Formen von «Pfeilern», «Bastionen» und «Türmen» in Gebirgsgegenden (Bild 22).

Eine der charakteristischsten Formen sind die Dreiecksgipfel in den Alpen, wie wir das am Matterhorn sehen. Schematisch ist die Situation in Bild 23 illustriert. Die Kanten der Dreiecke agieren offensichtlich als «Streben» für das Gebilde, die Fazetten sind Ausbruchsflächen.

Rundformen sind in Gebirgen ebenfalls recht stabil. Sie existieren in zwei Arten: als konkave oder als konvexe Gebilde. In diese Kategorie fallen auch die schon früher besprochenen Kare, die also nicht nur allein durch das Instabilitätsprinzip bedingt, sondern auch bevorzugt selektioniert sind.

Ein Spezialfall von Rundformen sind Kopfgirlanden: Die Köpfe sind die «Stützen» eines Plateaus, wie das schematisch in Bild 24 dargestellt ist. In der Natur findet sich diese Erscheinung z. B. am Nordabhang des Tafeljuras in der Schweiz (Bild 25).

Schliesslich möchte man noch eine mechanische Begründung für das Selektionsprinzip geben.

Die «Turmform» entspricht in etwa der des Eiffelturmes in Paris. Wie schon erwähnt, wurde letzterer als statisch günstigste Form konstruiert. Sie ist offensichtlich die stabilste und wird daher in der Selektion bevorzugt.



Bild 22 Torsäule im Hochköniggebiet, Land Salzburg, Österreich.

Fig. 22 Torsäule in the Hochkönig area, Salzburg Province, Austria.

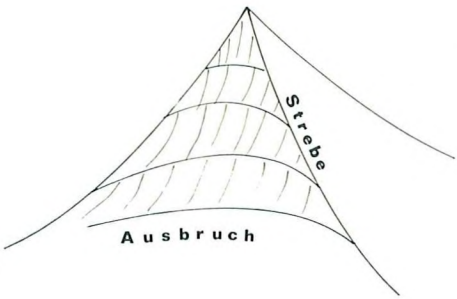


Bild 23 Schema eines Dreieckgipfels.

Fig. 23 Schema of a triangular peak.

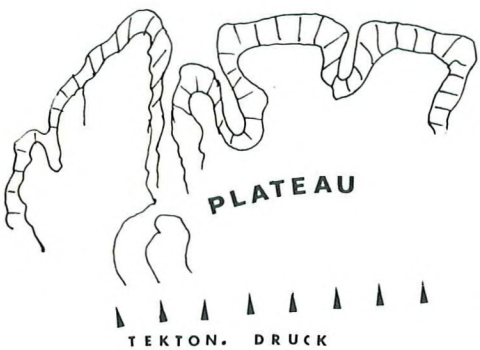


Bild 24 Schema der Bildung von Girlanden an einem Plateau.

Fig. 24 Schema of the formation of garlands at the edge of a plateau.

Bild 25 Girlanden am Nordhang des Jurapla teaus, Chästel bei Effingen AG.

Fig. 25 Garlands of Heads on the northern slope of the Jura Mountains, Chästel near Effingen, Argovie.



Man kann ähnliche Betrachtungen auch mit Finite-Elemente-Rechnungen nachvollziehen und kommt dann auf eine Bestätigung des Selektionsprinzipes.

4.25 Synthese mit endogenen Einflüssen

Die obigen fundamentalen Prinzipien beschreiben die exogenen Vorgänge in der Landschaftsentwicklung. Es ist aber klar, dass die endogenen Kräfte auch einen Einfluss haben. Man kann zeigen, dass die grossräumige Anordnung von Landschaftselementen oft durch endogene Vorgänge vorgezeichnet ist. Einen solchen Fall haben wir schon bei den Talanlagen gesehen. Andere Fälle ergeben sich in der Anordnung von Massenbewegungen an Hängen, in der Bildung von Strukturelementen wie Klüften im Fels, in der Anordnung von Vulkanketten und in den sogenannten «Tektonischen Landformen» (vgl. Kap. 2.3).

4.3 Landschaftssysteme

4.31 Begriff eines Systems

Die oben besprochenen aus der Beobachtung abgeleiteten Prinzipien der Landschaftsentwicklung haben dazu geführt, eine Landschaft grundsätzlich als offenes System zu betrachten, welches sich unter «normalen» Bedingungen in einem dynamisch stationären Zustand befindet (cf. A.E. Scheidegger und M.J. Haigh, 1988).

Zur Definition eines «Systems» benötigt man grundsätzlich

a) Eine Menge von Elementen mit gewissen «Attributen» (wie Hangneigung, Mäanderkrümmung, Entwässerungsdichte)

b) Eine Wechselwirkung zwischen diesen Attributen

c) Eine Wechselwirkung zwischen den «Attributen» und der Umgebung (daher ist das Landschaftssystem «offen», nicht in sich geschlossen).

In einem Landschaftssystem «fliesst» (im übertragenen Sinne) Masse und Energie durch die Elemente: Der Eingang (input) geschieht durch die Sonnenenergieeinstrahlung und durch tektonische Aktivität, der Ausgang (output) wird durch die Abstrahlung von Wärmeenergie ins All und den Transfer von Masse bis auf die niedrigste Erosionsbasis, meistens das Meer, bewerkstelligt. In einem solchen einfachen System kann es zu Rückkoppelungsschleifen kommen, welche das Grosssystem kurzschliessen, so dass Teilsysteme entstehen: Man denke z.B. an die Teilschleife des Wasserkreislaufes auf dem Lande (Evaporation von einem Wald aus, Wolkenbildung darüber, Niederschlag in denselben Wald), der innerhalb des grossräumigen Wasserkreislaufes vom Meer zu den Wolken und wieder zum Meer (Niederschlag, teilweise auf dem Land, Transport davon durch Flüsse ins Meer) stattfindet. Die Annahme, dass eine Landschaft ein offenes System ist, ist im Grunde nichts anderes als eine Neuformulierung des Antagonismusprinzips.

4.32 Biologische Modelle

Die Betrachtung von Landschaften als Systeme führt natürlicherweise zu einer Analogie mit Lebewesen: Auch das Leben ist Ausdruck eines dynamischen Gleichgewichtes zwischen einem Energie-Eingang und -Ausgang. Auf dieser Analogie beruhte schon die Zyklentheorie von W.M. Davis (1924), nach der eine Landschaft Stadien von Jugend über Reife zum Alter durchläuft; – die aber, wie schon oben erwähnt, im Lichte der Erfahrungstatsachen nicht mehr haltbar ist.

Die Analogie von Landschaftsformen mit Populationen von Lebewesen hat auch zu einer entsprechenden Wachstumstheorie geführt, nach der diese Formen (z. B. die Komplexität eines Flussnetzes) wie eine Population «allometrisch» (die Wachstumsrate des Systems ist der Zahl der Elemente proportional), also exponentiell wächst. Viele geomorphologische Formen wachsen in der Tat in exponentieller Weise, doch folgt ein derartiges Verhalten auch aus dem Instabilitätsprinzip (vgl. Kap. 4.2).

Die Analogie der Landschaftsentwicklung mit der Entwicklung von Lebewesen ist daher bestenfalls nur sehr oberflächlich.

4.33 Thermodynamische Analogien

Besser sind Analogien der Landschaftsentwicklung mit thermodynamischen Begriffen.

So ist die Gültigkeit eines Ergodenprinzips eine Konsequenz der Existenz eines stationären dynamischen Gleichgewichtes. Damit ist gemeint, dass in langen Zeiträumen alle statistisch möglichen Konfigurationen eines Systems durchlaufen werden: man kann Zeitmittelwerte durch augenblickliche «Ensemble»-Mittelwerte ersetzen. Dieses Vorgehen kann auch durch den Satz, «die Gegenwart ist Schlüssel zur Vergangenheit», ausgedrückt werden. Leider ist auch dieser Satz nur bedingt richtig, denn die Rahmenbedingungen (z. B. das Klima) haben sich im Laufe der Jahrmillionen eben nicht stationär verhalten.

Die thermodynamische Analogie gilt also nur in solchen Zeiträumen, in denen die Vorgänge als (statistisch) stationär betrachtet werden können. Unter solchen Umständen ist aber bekannt, dass die resultierenden Konfigurationen durch Extremalprinzipien beschrieben werden können. So hat W.B. Langbein (1964) gezeigt, dass ein «Prinzip der geringsten Varianz» auf die «wahrscheinlichste» Konfiguration von Landschaftsvariablen führt, was sich wiederum darin ausdrückt, dass ein Entropie-Analog einem Maximalwert zustrebt. Es wird eben auch in einer Landschaft, wie in der statistischen Thermodynamik, ein Zustand der grössten Wahrscheinlichkeit, das ist auch der Zustand der grössten Unordnung, angestrebt. Auf diese Weise wurden Mäanderzüge in Flüssen (das ist der wahrscheinlichste Talweg zwischen zwei Punkten, wenn in jedem Flusssegment eine gewisse Wahrscheinlichkeit für eine Ablenkung von der Geraden besteht, infolge von zufallsverteilten Hindernissen, wie etwa

Baumstämmen, Steinen etc.), die Konfiguration von Flussnetzen (vgl. Kap. 4.21 dieser Arbeit) und viele andere charakteristische Züge von Landschaften erklärt.

Im thermodynamischen Modell einer Landschaft entspricht die Kote (über Meer) eines Punktes in der Landschaft der Temperatur in der Thermodynamik. Daher folgt für die nichtstationäre Entwicklung eines Landschaftsreliefs genau dieselbe Ficksche Diffusionsgleichung wie für die nichtstationäre Entwicklung einer inhomogenen Temperaturverteilung: In einem offenen System werden Hügel («Temperaturspitzen») bis zum Basisniveau der Erosion («absoluten Nullpunkt») abgetragen, es sei denn, es finde ein Input von Masse (thermodynamisches Analogon: Wärmeenergie) durch tektonische Hebung statt. In einem geschlossenen System findet ein Höhenausgleich (vgl. Temperaturausgleich) statt. Der stationäre Zustand einer Landschaft entspricht dem bekannten Carnot-Prozess in der Thermodynamik.

Das thermodynamische Modell kann auch auf die statistische Thermodynamik ausgedehnt werden. Auf diese Weise wurde in der Kartographie eine «Entropie» S seiner Landschaft als Summe von Wahrscheinlichkeiten p_i des Auftretens von Höhen i in der Boltzmannschen Weise für geschlossene Systeme definiert (V.I. Sukhov, 1967; M. Zdenkovic-Lechthaler, 1977)

$$S = \Sigma \quad p_i \log p_i$$

Man hat es dabei aber grundsätzlich mit der Analogie zu einem geschlossenen System zu tun, so dass der Durchfluss von Masse und Energie durch die Landschaft nicht zum Ausdruck kommt. Das Endziel eines geschlossenen Systems besteht stets im Ausgleich, was auch der Erfahrung mit geschlossenen Landschaften (z. B. einer isolierten Hochebene, wie dem Altiplano del Peru) entspricht: Die Löcher werden aufgefüllt, die Hügel abgetragen.

4.34 Innerer Stabilitätsverlust

Ein innerer Stabilitätsverlust ereignet sich dann, wenn die stochastischen Fluktuationen der Variablen zu Zuständen führen, die sich nicht ausgleichen: wenn also eine positive Rückkoppelung zwischen Betrag der Abweichung und Tendenz zur Abweichung besteht. Im Prinzip handelt es sich dabei um die statistische Begründung des phänomenologisch erkannten «Instabilitätsprinzips» (Kap. 4.22).

Ein interessanterer Fall ereignet sich aber dann, wenn kleine Änderungen von gewissen Parametern zu vehementen Übergängen in den Response-Parametern führen. Fälle dieser Art aus der Physik wurden neulich in einem Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Zürich von E. Brun (1986) besprochen. In der Geomorphologie sind Übergänge von «strömendem» zu «reissendem» Abfluss in Gewässern etc. bekannt. Dabei ist zu beachten, dass es zweierlei Arten von solchen «Schwellenübergängen» gibt.

Die erste solche Art tritt auf, wenn für gegebene Werte eines Parameters (der als «Kontrollparameter» bezeichnet werden soll) multivalente Werte eines Response-Parameters existieren. Die Werte des Response–Parameters liegen, für verschiedene Werte des Kontrollparameters, auf Kurven, die aber Falt- und Umkehrpunkte besitzen. Wenn ein solcher erreicht ist, *muss* der Response-Wert auf einen anderen Zweig der Response-Kurve springen: das sind die berüchtigten Schwellenwerte, die zu Katastrophen führen (R. Thom, 1972).

Die zweite Art von Stabilitätsverlust erfolgt, wenn ein Kontrollparameter mehrere kritische Werte (Bifurkationspunkte) besitzt, bei denen sich die Systemstruktur spontan ändert. Weitere kleine Änderungen des Kontrollparameters führen zu weiteren Bifurkationen, die hierarchisch geregelt sind und durchlaufen werden, bis sich stationär bleibende Unregelmässigkeiten einstellen, die man als «Chaos» bezeichnet (vgl. E. Brun 1986).

Für die Geomorphologie ist vor allem die erste Art von Instabilisierung wichtig: «Schwellenwerte» für das «Umschlagen» von einem Regime in das andere werden allenthalben angetroffen, so vor allem bei Flussläufen, Mäanderbildung, Küstenformen (von Strand zu Felsküste!) etc.

4.35 Äussere Einflüsse

Schliesslich darf die Instabilisierung eines Landschaftssystems durch äussere Einflüsse nicht vernachlässigt werden.

Diese Einflüsse bestehen darin, dass ein Kontrollparameter «von aussen her» geändert wird. Je nach Standpunkt ist schon die plötzliche Überflutung der Scablands (Kap. 3.32) ein «äusseres» Ereignis, oder aber erst der Einschlag eines Meteoriten. Meistens wird man in diesem Zusammenhang aber an menschliche Tätigkeiten denken. Die Besiedelung, Abholzung und Beweidung der Alpengebiete während der letzten 5000 Jahre fällt in diese Kategorie. Aus den Response-Beziehungen kann die Wirkung solcher Tätigkeiten abgeschätzt werden, welche katastrophal sein kann.

5 Schlusswort

Ich habe versucht zu zeigen, dass Landschaftsformen und Naturgewalten Ausdruck derselben Prozesse sind: diese resultieren vom Wechselspiel der aufbauenden endogen-tektonischen und der abbauenden exogen-atmosphärischen Vorgänge.

Im Normalfall ist eine Landschaft der Ausdruck eines Gleichgewichtes zwischen den wirkenden Kräften. Kleine Verschiebungen in den Parametern bringen meistens nur graduelle Veränderungen im Landschaftsbild hervor. Unter Umständen können aber ganz beträchtliche plötzliche Veränderungen die Folge sein; dann werden die besagten Prozesse als «Naturgewalten» empfunden.

Naturgewalten betreffen den Menschen. Man fürchtet sie, und steht ihnen oft hilflos gegenüber. Wenn man sich aber dessen bewusst ist, dass diese Gewalten, ja auch die durch sie verursachten Katastrophen, Teil der normalen Erdentwicklung sind, kann man sich um ein Verständnis ihrer Wirkung und ihres Ablaufes bemühen. Dann wird es möglich werden, mit den Naturgewalten zu leben, ohne durch sie vollkommen überrascht zu werden. Sehr oft lassen sich dann wenigstens, wenn auch nicht Sachschäden, so doch Opfer an Leib und Leben verhindern.

Zum Abschluss mag noch erwähnt werden, dass die in diesem Neujahrsblatt dargestellten Untersuchungen zum Teil vom Schreibenden in Zusammenarbeit mit Eduard Gerber aus Schinznach und Walter Kyburz aus Zürich gewonnen wurden. Beide waren, nun leider verstorben, Mitarbeiter der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich. Viele der Auslandsreisen wurden im Rahmen von Kulturaustauschen mit Entwicklungsländern von der österreichischen Regierung unterstützt; die einschlägigen Forschungen über Massenbewegungen vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich, zuletzt unter Projekt Nr. P 5591.

6 Zusammenfassung

Die Arbeit zeigt die Ursache der Landschaftsentwicklung, die in der Wirkung von natürlichen Prozessen liegt, die oft von Menschen als «Naturgewalten» empfunden werden. Grundsätzlich wirken zwei Typen von Prozessen: die endogenen, die ihren Ursprung in der Tektonik haben, und die exogenen, deren Ursprung in der Atmosphäre liegt. Die antagonistische Wechselwirkung dieser zwei Arten von Prozessen produziert sowohl Landschaften wie auch Naturkatastrophen.

Es werden zuerst Landschaften und Naturgewalten, die primär endogenen Ursprungs sind, besprochen, und anschliessend diejenigen, die primär exogen bedingt sind.

Schliesslich führt die Synthese der beiden Arten von Prozessen auf die allgemeinen Prinzipien der Landschaftsentwicklung, die in einer «Systemtheorie» der Landschaften und Naturgewalten kulminiert.

7 Summary: Landscape types and forces of nature

The paper traces the development of landscapes which lies in the operation of natural processes; the latter appear to mankind as "forces of nature". Principally, two types of processes are active: the endogenic ones originating in the interior of the Earth, and the exogenic ones originating in the atmosphere. The antagonistic action of these two types of processes produce both, landscapes and natural catastrophes.

First, those landscapes are discussed which are primarily of endogenic origin, then, those that are primarily conditioned by exogenic processes.

Finally a synthesis of the two types of processes leads to the general principles of the theory of landscape development, which culminates in a "system theory" of landscapes and forces of nature.

8 Literatur

Ai, N., Liu, B., Zhou, J. (1987): Great earthquakes and their geomorphological effects. Z. Geomorph. Suppl. *63,* 159–165.

Alean, J.C. (1984): Untersuchungen über Entstehungsbedingungen und Reichweiten von Eislawinen. Mitt. Vers.-Anst. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH-Zürich *74,* 1–217.

Bagnold, R.A. (1941): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, 265 p., Methuen, London.

Baker, V.R., Nummedal, D. (1978): The Channel Scabland (Field Guide), 186 p., NASA, Washington.

Brockamp, B., Lliboutry, L., Müller, L. (1967): Gletscherabbruch Mattmark. Sachverständigen-Gutachten über die Eislawine von 30. August 1965; erstattet an das Instruktionsgericht Visp. 147 S. (öffentliches Dokument).

Brun, E. (1986): Ordnungs-Hierarchien, Neujahrsblatt der Natf. Ges. Zürich, 188. Stück, 40 S.

Davis, W.M. (1924): Die erklärende Beschreibung von Landformen. 565 p., Teubner, Leipzig.

Elfström, A. (1983): The Baldakatj boulder delta, Lapland, Northern Sweden, Geogr. Annales *65 A* (3–4), 201–225.

Elfström, A. (1987): Large boulder deposits and catastrophic floods; a case study of the Baldakatj area, Swedish Lapland, Geogr. Annales *69A* (1), 101–121.

Gerber, E. (1969): Bildung von Gratgipfeln und Felswänden in den Alpen, Z. Geomorph. Suppl. *8,* 94–118.

Hantke, R. (1978–1983): Eiszeitalter: Die jüngste Erdgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete, 3. Bde: Vol. 1, 468 S. (1978), Vol. 2, 703 S. (1980), Vol. 3, 730 S. (1978). Ott Verlag, Thun.

Hestnes, E. (1985): A contribution to the prediction of slush avalanches. Ann. Glaciol. *6,* 1–4.

Langbein, W.B. (1964): Geometry of river channels. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. 1964, HY2, 301–312.

Mohr, O. (1928): Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik. 3. Aufl. W. Ernst, Berlin.

Norin, J. (1986): Geomorphological effects of lightning. Z. Geomorphologie *30* (2), 141–150.

Onesti, L.J. (1985): Meteorological conditions that initiate slushflows in the Central Brooks Range, Alaska. Ann. Glaciol. *6,* 23–25.

Scheidegger, A.E. (1963): Erdbebenherdmechanismen, Vierteljahrsschr. Natf. Ges. Zürich *108,* 169–180.

Scheidegger, A.E. (1970): Theoretical Geomorphology, 2 nd ed. 435 p., Springer, Berlin.

Scheidegger, A.E. (1975): Physics of Natural Catastrophes, 289 p. Elsevier, New York.

Scheidegger, A.E. (1980): Alpine joints and valleys in the light of the neotectonic stress field. Rock Mech. Suppl. *9,* 109–124.

Scheidegger, A.E. (1985): The significance of surface joints. Geophys. Surveys *70,* 259–271.

Scheidegger, A.E. (1986): The catena principle in geomorphology. Z. Geomorph. *30* (3), 257–273.

Scheidegger, A.E. (1987): Systematic Geomorpholgy, 285 p. Springer, Wien.

Scheidegger, A.E., Haigh. M.J. (ed. 1988): Dynamic system approach to natural hazards. Proc. of a Symposium held on Aug. 21; 1987 in Vancouver, Canada. Z. Geomorph. Supplementband *67,* 113 p.

Sukhov, V.I. (1967): Information capacity of a map entropy Geodezija i Aerofotosemka 1967 (4), 212–215.

Thom, R. (1972): Stabilite structurelle et morphogenese, Benjamin, Reading MA.
Whitten, E.H.T. (1964): Process and response models in geology. Bull. Geol. Soc. Amer. *75*, 455–464.
Zdenkovic-Lechthaler, M. (1977): Entropija topografskikh karata. Informat. Yugosl. *9*, 1–4, 9–38.

Prof. Dr. A.E. Scheidegger, Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Abteilung Geophysik. Technische Universität, Wien, Gusshausstrasse 27–29/128, A-1040 Wien.