



EROSION: BEDEUTUNG DER VORZEICHNUNG

EROSION: SIGNIFICANCE OF PREDESIGN

von A.E.SCHEIDEGGER & R.HANTKE

Zusammenfassung: "Erosions"erscheinungen verursachen Veränderungen und damit Schäden in Gebirgsregionen. Die Ursachen für die "Erosion" werden meist exogenen, nicht-tektonischen Vorgängen zugeschrieben, so die Talbildung (V-, U- Form), die Genese von Klusen und Schluchten, die Entstehung vieler glazialer Formen und die Ursachen von Massenbewegungen. In den meisten solchen Fällen kann jedoch eine tektonische, endogene Vorzeichnung nachgewiesen werden: Die richtige Deutung der Genese solcher Landschaftsformen ist für die Setzung von Schutzmassnahmen von fundamentaler Bedeutung.

Abstract: "Erosion" causes changes and therewith damage in mountain regions. The reasons for the occurrence of "erosion" are usually sought in exogenic, non-tectonic processes; this concerns e.g. the role of "erosion" in the formation of valleys (U-, V- form), the genesis of "kluses" and gorges, the origin of many glacial features and the causes of mass movements. However, a tectonic, endogenic predesign can be ascertained in most of these cases: The proper interpretation of the genesis of such features is for the establishment of safety measures of utmost importance.

1. Landschaftsveränderungen und ihre Ursachen

1.1 Grundsätzliches

Phänomenologisch ist eine Landschaft ein selbststrukturiertes, offenes System, dessen Entwicklung von wenigen, fundamentalen Prinzipien beherrscht wird, - vor allem vom Antagonismusprinzip. Dies sagt aus (SCHEIDEGGER, 1991), dass die heutige Erscheinungsform der Erdoberfläche das Resultat antagonistischer Wirkung von endogenen und exogenen Prozessen sei. Primär sind die

endogenen Prozesse: ohne Relief gibt es keine Erosion. Die Intensität der Prozesse (Hebung/Erosion) ist für das entstehende Relief charakteristisch. Ferner bewirken endogene Prozesse systematische, exogene zufallsmässige Orientationsmuster in den Oberflächenformen.

1.2 Endogene Prozesse: Tektonik

Die primär treibenden Kräfte für die Landschaftsentwicklung sind also die endogenen Prozesse, d.h. die Tektonik. Nicht nur kann ohne vorhergehende oder gleichzeitige tektonische Hebung keine Erosion stattfinden, sondern die Tektonik kontrolliert auch viele Oberflächenformen. Trotz der Evidenz tektonischer Vorzeichnung haben Geomorphologen oft den Ursprung mancher heutiger Landschaftsformen allein in exogenen Prozessen gesucht. So sollen Flüsse Schluchten durch sich hebende Gebirgszüge gesägt haben, indem sie ihren antezedenten Lauf beibehielten; Gletscher sollen Täler von einer V- zu einer U-Form erweitert haben, und Bergstürze und Murgänge sollen allein von exogenen Agentia verursacht werden. Trotz früherer Arbeiten der Autoren (SCHEIDEGGER & AI 1986; HANTKE 1991; HANTKE & SCHEIDEGGER 1993,1994) scheint es, dass die Bedeutung der tektonischen Vorzeichnung in der Landschaft immer noch unterschätzt wird.

1.3 Exogene Prozesse: Erosion/Denudation

Die exogenen Prozesse sind sekundär. Sie haben ihren Ursprung direkt oder indirekt in der Atmosphäre. Die Erosion wird im Alpengebiet vor allem von Wasser und Eis bewerkstelligt; Wind hat wenig Bedeutung. Neben der entsprechenden "fluvialen" und "glazialen" Erosion, können Hänge betrachtet und eine Theorie der "Hangerosion" (Erdschlipfe, Bergstürze) aufgestellt werden. Dabei muss beachtet werden, dass sowohl Erosions- wie Hebungsraten in humiden Bergregionen 0,1-5 mm/a betragen. Diese Raten entsprechen 0,1 - 5 km/Ma und zeigen, dass die Landschaft, wie wir sie erleben, nicht viel älter als einige Ma sein kann. Umweltschäden sind daher geologisch rezenten Ursprungs.

1.4 Systemtheorie und Chaos

Eine Landschaft kann somit als ein System betrachtet werden, wo die Tektonik den "Input" liefert und die Erosion den "Output" darstellt. Das System

strukturiert sich selbst in einen geordneten Zustand (sonst hätte es keine Dauer und eine Landschaft könnte überhaupt nicht beschrieben werden) auf einem seltsamen Attraktor am Rande des Chaos; es scheint ein Naturgesetz zu sein, dass jedes (beschreibbare) offene, nichtlineare System sich auf einem derartigen Attraktor selbst-strukturiert (KAUFFMAN 1993, SCHEIDEGGER 1995).

2. Das tektonische Umfeld

Es wird heute allgemein angenommen, dass alle endogen verursachten Erscheinungen einem als "Plattentektonik" bezeichneten Schema entsprechen. Danach wird die Erdoberfläche von etwa 7 Lithosphärenplatten gebildet; diese reichen bis zu 150 km Tiefe und gleiten über den weichen, tieferen Erdkörper, wobei sie sich gegeneinander verschieben. Bewegungen an den Plattengrenzen ziehen die Entstehung eines tektonischen Spannungsfeldes nach sich, das grossräumig bis in das jeweilige Platteninnere wirkt. Für eine Abschätzung seiner Wirkung in der Landschaft ist seine Bestimmung und Kenntnis von Nöten.

Als erstes bietet sich eine in-situ Bestimmung an. Am weitesten verbreitet sind Entlastungsmethoden: Dabei werden Verschiebungen gemessen, die entstehen, wenn ein Gesteinsstück (Bohrkern) aus dem Verband entfernt wird. Sind die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Materials bekannt, kann auf den ursprünglichen Spannungszustand zurückgeschlossen werden (HAST 1958).

Eine Bestimmung lässt sich auch aus Erdbebenherdlösungen erreichen: durch statistische Mittelung der Richtungen der P- und T- Achsen von Herdlösungen in einem Gebiet lässt sich die regionale Richtung ebendieser Hauptspannungen ermitteln (SCHEIDEGGER 1982).

Von Bedeutung ist die Bestimmung des lokalen tektonischen Spannungsfeldes aus den lokalen Kluffstellungen. Normalerweise finden sich in jedem Aufschluss drei Kluffscharen, deren Orientationen durch eine statistische Auswertung ihrer Stellungen bestimmt werden können (KOHLBECK & SCHEIDEGGER 1977). Meist genügen etwa 30 Messungen, um die Orientierungen der drei Kluffscharen an einem Aufschluss zu bestimmen. Von den dreien fallen meist 2 steil ein; eine liegt mehr oder weniger horizontal. Diese Schar entspricht der Lithologie; die steil-einfallenden Klüfte sind durch neotektonische Spannungen bedingt. Die nach den erwähnten Methoden ermittelten Spannungsgrössen stimmen im allgemeinen mit einander und mit den aus der

Plattentektonik vermuteten überein.

3. Fluviale Erosion

3.1 Talbildung und Längstäler

Täler werden oft immer noch als rein exogene Ausräumungsprodukte betrachtet. Sie verlaufen aber streng konform tektonischen Strukturen: folgen Mulden, aufgebrochenen Gewölben, Schichtköpfen, Deckenrändern, und durchbrechen Bergketten entlang von Verwerfungen (HANTKE 1991, S.19).

Neben offensichtlich hydrologischen Längstälern zwischen Bergketten tritt in den helvetischen Kalkalpen der östlichen Zentralschweiz ein Kombinationstyp auf: Beim Vorgeiten der Jurakerne der Druesberg-Decke, die als Höchturm-Schuppe über die Ortstock-Schuppe hinweg fuhr, verblieb auch ihre Unterlage, weiche Unterkreide-Gesteine der ursprünglich nördlicheren Axendecke, nicht verschont. An klaffender Längsstörung riss diese im W gegen die weite Quer-Depression, durch welche die Druesberg-Kreide mit den östlichen Zentralschweizer Klippen nach N vorgefahren ist, immer stärker auf. Seit der Platznahme der Decken vor 5 Ma stiess der Glattalp-Gletscher in Kühl- und Kaltzeiten von der Ortstock-Kette durch die vorgezeichnete Längsfurche und räumte das Lockergut der Schwächezone aus. Seither hat er in den tektonisch auseinander gerissenen wenig resistenten Gesteinen der untersten Kreide ein 300m tiefes Tal ausgehoben.

3.2 Longitudinale Talprofile

Tektonische Ereignisse können das longitudinale Profil eines Flusses beeinflussen. So wurden z.B. die Katarakte des Nils durch die Intrusion von Tiefengesteinen in den umgebenden Fels verursacht. Diese qualitative Aussage kann durch numerischen Vergleich von echten Flussprofilen mit theoretisch bei "reiner Erosion" zu erwartenden erhärtet werden. "Normale" exogene longitudinale Flussprofile haben eine exponentielle oder logarithmische Form (SCHEIDEGGER 1991, S. 208-209); es gibt jedoch meist "Knick-Punkte", deren Entstehung oft einer geomorphischen Instabilität zugeschrieben wurde. Die "klassische" Theorie besagt jedoch, dass kein Gleichgewicht bei einem Knickpunkt möglich ist und dass dieser daher strom-aufwärts wandern und schliesslich verschwinden muss (SCHEIDEGGER 1991, S. 209). Daher können "stabile" Knickpunkte nie durch ("exogene") Flusswirkung allein erzeugt werden: MAITI (1980) hat Flussprofile im

Tarai Distrikt von West-Bengalen am Fusse des Himalayas detailliert numerisch analysiert; er zeigte, dass keines der theoretischen Profile auf die gemessenen Daten passt. Die Knickpunkte entsprechen Schichtköpfen; zudem ist die Quellenregion überhöht, was nur durch eine sich im Gange befindliche Hebung des Himalaya erklärt werden kann.

3.3 Quertäler

Vielerorts, so im Schweizer Jura und in den Alpen, durchqueren Flüsse Bergzüge in Schluchten und "Klusen". Die übliche Lehrmeinung besagt, dass diese Flüsse "antezedent" (d.h. vorgängig) zur Hebung der Bergrücken waren und sich während der Hebung einer Bergkette in diese "einsägten" (STAUB 1934; (BRUNNER 1909, S.163 bezüglich der "Klusen" im Jura; LABHART 1991 bezüglich der Aareschlucht in den Alpen). Die alte *Antezedenztheorie* ist aber unhaltbar. Hierzu ist die Erosionsleistung zu gering, da die hydraulische Sohlscherkraft nur von der Ordnung von 100 kPa (MAGILLIGAN 1992), die Scherfestigkeit des Gesteins aber von der Ordnung von 10 MPa, also 100 mal grösser (SCHEIDEGGER 1982 S.188-189) ist, so dass ein Fluss sich nie in Fels einsägen kann. HANTKE (1991, p.257) hat bemerkt, dass die Wasserführung der entsprechenden Flüsse viel zu gering ist, als dass sie Klusen und Schluchten während der Hebung hätten ausräumen können. Sodann ist die Orientation des Entwässerungsnetzes eines Einzugsgebietes eines Flusses nicht zufällig: im allgemeinen zeichnen sich bei den Flussegmenten zwei Richtungsscharen ab. Dabei stimmen die Tal- und Fluss-Richtungen mit denen der Klüfte überein (SCHEIDEGGER & AI 1986). Für die Aareschlucht hatte schon MÜLLER (1938) Kluft-Systeme gefunden, welche parallel verlaufen; eine Beobachtung, die weiter untersucht und bestätigt wurde (HANTKE & SCHEIDEGGER 1993, 1994): Klusen und Schluchten verdanken ihre Entstehung oft kompliziert verlaufenden Durchscherungen, Knicken in Faltenachsen und Blattverschiebungen. Dabei nützten die Wässer Schwächezonen und räumten den Schutt aus.

4. Glaziale Erosion

4.1 Allgemeines

Als Nächstes wenden wir uns den glazialen Erosionsformen zu: der angeblichen U-Form und Übertiefung der Glazialtäler und der Genese der

Alpenrandseen. Die Orientationsstruktur der "glazialen" Entwässerung hat eine ähnliche Ursache wie die der fluvialen Einzugsgebiete (SCHEIDEGGER & AI 1986).

4.2 Glaziale U- versus fluviale V-Täler

Die Lehrmeinung, dass glazial "erodierte" Täler U-förmig, "fluvial" erodierte aber V-förmig seien, geht mindestens bis auf DAVIS (1909), wenn nicht weiter, zurück. Seit jener Zeit ist diese Meinung in praktisch jedes Lehrbuch über Physische Geologie und Geomorphologie eingeflossen. Es muss aber beachtet werden, dass Klüfte für das transversale Profil *sowohl fluvialer als auch* glazialer Täler verantwortlich sind. In den Schweizer Alpen finden sich viele V-förmige glaziale Täler. HANTKE (1991, S.41 ff.) gibt Beispiele, die dies bezeugen, so das ernerische Reusstal, die Täler der jungen Aare (Berner Alpen), der Maggia und der Verzasca (Ticino). Es besteht kein Zweifel, dass Erosion durch fließendes Eis einen nachhaltigen Einfluss hat. Einige durch Eis ausgeschürfte Täler in Skandinavien haben in der Tat eine U-Form; doch hatten die Gletscher auf dem alten Schild schon in den Kühlzeiten des mittleren und jüngeren Tertiärs, also 10 mal länger Zeit, um aufzuräumen. Die Seitentäler sind ebenfalls tektonisch vorgezeichnet und durch seitliche und subglaziäre Schmelzwässer ausgeräumt worden. Weiter stehen die Talflanken in flach-liegenden Karbonatgesteinen fast senkrecht und der Schutt am Talboden simuliert eine U-Form. In solchen Fällen ist das Talprofil offensichtlich tektonisch vorgezeichnet, da rein glaziale Erosion die Formen nicht erklären kann (GERBER 1945): Die Ursachen der Morphologie sind "tektonische Lineamente", Brüche und Klüfte. Daher wurde die erosive Wirkung von fließendem Eis generell überschätzt: nicht alle V-Täler sind fluvialen und nicht alle U-Täler sind glazialen Ursprungs.

4.3 "Übertiefung" durch glaziale Erosion

Die "Übertiefung" von Alpentälern und Alpenrandseen soll durch glaziale oder fluviale Prozesse erfolgt sein (HOLMES 1944, S. 224). Ihre Auffüllung durch fluviale Prozesse kann ausgeschlossen werden, da das Material meist glazialen Ursprungs ist (SCHLÜCHTER 1987). Die Annahme, dass glaziale oder fluviale Erosion für die Auskolkung solcher Täler verantwortlich ist, führte am 24. Juli 1908 zum Unglück beim Bau des Lötschbergtunnels im Berner Oberland: Wasser-

haltige Kiesmassen wurden 160 m unter der gegenwärtigen Talsohle angetroffen; der resultierende Wassereinbruch war für eine Schicht von Arbeitern im Tunnel tödlich (LABHART 1991, S.126). Die Existenz von losem Kies in einer solchen Tiefe war (und ist) im Lichte der Theorie, dass ein Gletscher oder ein Fluss das Tal ausgekolkt habe, unvorstellbar. Die primären Mulden und Spalten verdanken ihre Existenz nicht der Erosion, sondern tektonischen Prozessen. Dies gilt für die "Übertiefung" der Alpenrandseen (HANTKE 1991, S.117).

4.4 Rundhöcker

Rundhöcker wurden meist als das Resultat von ungleichmässiger, instabiler Erosion durch einen Gletscher an seinem Bett interpretiert. Sie zeigen einen glatt-gehobelten "Rücken" gegen die Flussrichtung des Eises, während die "Lee"-Seite steiler abfällt;- wiederum erkennt man eine treppenartige Serie von Steilabfällen und Simsen infolge des Herausfallens von Kluft-Quadern (HOLMES 1944, S.217). Tektonisch bedingten Klüften kommt daher eine Hauptrolle in der Vorzeichnung von Rundhöckern zu: diese sind nicht allein durch eine Instabilität in der Gletschererosion entstanden (HANTKE 1991, S. 51).

5. Hang-Erosion

5.1 Allgemeines

Vielfach wurde auch die Ursache von Massenbewegungen rein "erosionalen" Prozessen zugeschrieben: Derartige Bewegungen sind aber Teil der normalen Landschaftsentwicklung; die ständig stattfindende Hebung wird durch exogen "verursachte" Massenbewegungen kompensiert. Die primäre Ursache der Massenbewegungen ist somit die tektonische Hebung, selbst die darauffolgende "Erosion" zeigt viele Züge einer tektonischen Vorzeichnung.

5.2 Stabilität am Rande des Chaos

Die Existenz eines kritischen Böschungswinkels an Schutthalden zeigt, dass sich der entsprechende Hang am Rande des Chaos befindet. Während an regulären Hangstufen eine gleichmässige Entwicklung stattfindet (SCHEIDEGGER 1991), bewirken kleine Kerben im Profil eine Instabilität (SCHEIDEGGER 1994, 1995); diese nämlich rasch tiefer, bis eine kritische Tiefe erreicht ist und eine Rutschung stattfindet. So bewirkt eine minimale Änderung der

Anfangsbedingungen (z.B. die Einführung einer Kerbe), ein vollständig anderes Langzeitverhalten. Solches ist für Systeme am Rande des Chaos charakteristisch. Die dem Beispiel zu Grunde liegende reguläre Hangstufe wurde als *a priori* gegeben angenommen; sie befindet sich am Rande des Chaos und ist daher das Resultat eines Prozesses von Selbst-Strukturierung: Die Zahl der Rutschungen in einem gegebenen Zeitintervall ist (bei konstanter Massenzuwachs-Rate) als Funktion ihrer Grösse einem Exponentialgesetz (die Frequenz einer Rutschung einer gegebenen Grösse ist umgekehrt-proportional zu ihrer Grösse hoch einem gewissen Exponenten) unterworfen;- eine bekannte Charakteristik selbst-strukturierter offener Systeme.

5.3 Tektonische Vorzeichnung

Während die Auslösung einer Hangrutschung durch eine exogene Wirkung auf ein komplexes System bewirkt wird, so sind dennoch Ort und Mechanik (so die Orientationsstruktur) tektonisch vorgezeichnet. In diesem Zusammenhange verweisen wir auf Studien von Hangrutschungen in Beziehung zur Orientation der neotektonischen Hauptspannungen;- letztere bestimmt aus Klufforientierungen, wie sie aus vielen Gebieten der Welt berichtet wurden (SCHEIDEGGER & AI 1986): Die Massenbewegungen sind natürlich hangabwärts gerichtet, in der Falllinie der Flanken der Täler. *Natürliche* Täler verlaufen aber parallel zum Streichen prävalenter Kluffscharen (siehe oben); diese entsprechen nach unserer Interpretation Scherlinien des neotektonischen Spannungsfeldes. Wir verweisen auf Massenbewegungen am Graukogel bei Badgastein in Salzburg, Österreich, über die schon an einer Interpraevent Tagung berichtet wurde (HAUSWIRTH & SCHEIDEGGER 1980). Dies gilt allerdings nicht für *künstliche* Einschnitte: Dann finden Rutschungen vorwiegend an Flächen statt, die normal zur grössten neotektonischen Hauptspannung erzeugt wurden. Die Stabilität am Objekt ist reduziert und Rutschungen entstehen öfter, als wenn der Einschnitt parallel zur grössten Druckrichtung verläuft.

6 Schlussfolgerungen

Landschaften sind offene, nichtlineare, komplexe Systeme. Sie befinden sich mehr oder weniger in einem dynamischen Gleichgewicht; d.h. ihr Phasenpunkt befindet sich auf einem seltsamen Attraktor am Rande des Chaos. Letzterer kann

durch zum Teil kleine Störungen chaotisch werden, dann ereignet sich eine THOM'sche (1972) Katastrophe. Der Input in das System (Masse und Energie) wird durch die Tektonik (Hebungen!) geliefert; diese bewirkt systematische Orientierungsmuster. Der Output wird durch den zufallsmässigen (random) Abbau, d.h. Denudation und Erosion verkörpert. Die Tektonik ist das Primäre, und es ist daher nicht verwunderlich, dass sie für die Physiographie wichtiger ist (Vorzeichnung!). Die Denudation (Erosion) folgt der Hebung; die vorgezeichneten tektonischen Muster werden dabei nicht verändert. Schluchten wurden daher nicht in Felsgestein eingesägt, und antezedente Flüsse pausen ihre alten Läufe nicht in die moderne Landschaft durch, sondern folgen der tektonischen Vorzeichnung. Dies gilt auch für Rutschungen, die an den Flanken der Flusstäler stattfinden.

LITERATUR

- BRUNNER, H., 1909. Die Schweiz. Neuenburg: Attinger
- DAVIS, W.M., 1909. Geographical Essays. Boston: Ginn
- GERBER, E., 1945. Lage und Gliederung des Lauterbrunnentales und seiner Fortsetzung bis zum Brienersee. Mitt. Aarg. Naturf. Ges., 22:165-184
- HANTKE, R., 1991. Landschaftsgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete. Thun: Ott
- HANTKE, R., & SCHEIDEGGER, A. E., 1993. Zur Genese der Aareschlucht. Geogr. Helv. 48(3):120-124
- HANTKE, R., & SCHEIDEGGER, A.E., 1994. Klusen und verwandte Formen im Schweizer Jura. Geogr. Helv. 49(4):157-164
- HAST, N., 1958. The Measurement of Rock Pressure in Mines. Stockholm: Sveriges Geol. Undersökn.
- HAUSWIRTH, E. K. & SCHEIDEGGER, A. E., 1980. Tektonische Vorzeichnung der Hangbewegungen im Raume von Badgastein. Interpraevent 1980, 1: 159-178
- HOLMES, A., 1944. Principles of Physical Geology, 1st Edition. London: Nelson
- KAUFFMAN, S.A., 1993. The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution. Oxford: Oxford University Press
- KOHLBECK, F. K. & SCHEIDEGGER, A. E., 1977. On the theory of the evaluation

- of joint orientation measurements. *Rock Mechanics* 9: 9 - 25
- LABHART, T. P., 1991. *Geologie der Schweiz*. Thun: Ott
- MAGILLIGAN, F. J., 1992. Thresholds and spatial variability of flood power during extreme floods. *Geomorphology* 5: 373-390
- MAITI, G.S., 1980. Quantitative analysis of the Jaldhaka Basin. *Indian J. Landscape Syst.*, 3(1-2): 58 - 66
- MÜLLER, F., 1938. Das Gebiet der Aareschlucht, p. 42-47 In: "Geologie der Engelhörner, der Aareschlucht und der Kalkkeile bei Innertkirchen (Berner Oberland)", *Beitr. z. Geol. Karte der Schweiz N.F.* 74: I-X, 1-55
- SCHEIDEGGER, A.E., 1982. *Principles of Geodynamics*, 3d ed. Berlin: Springer
- SCHEIDEGGER, A.E., 1991. *Theoretical Geomorphology*, 3d Ed. Berlin: Springer
- SCHEIDEGGER, A.E., 1994. Hazards: Singularities in geomorphic systems. *Geomorphology* 10: 19-25
- SCHEIDEGGER, A.E. 1995. Ordnung am Rande des Chaos - ein neues Naturgesetz. *Österr. Z. für Vermessung und Geoinformation. In Press*
- SCHEIDEGGER, A.E. & AI, N.S., 1986. Tectonic processes and geomorphological design. *Tectonophysics*, 126: 285-300
- SCHLÜCHTER, C. 1987. Talgenese im Quartär - eine Standortbestimmung. *Geogr. Helv.*, 42(2):109-115
- STAUB, R., 1934. Grundzüge und Probleme alpiner Morphologie, *Denkschr. Schweiz. Naturf. Ges.*, 69(1): 1-183
- THOM, 1972. *Stabilité Structurelle et Morphogénèse*: Reading, Pa.: Benjamin

Adressen der Autoren:

A.E.SCHEIDEGGER

Abt. Geophysik, TU Wien, A-1040 WIEN, Österreich

R.HANTKE

früher Geologisches Institut, ETH-Zentrum, CH-8091 ZÜRICH; jetzt
Glärnischstr.3, CH-8712 STÄFA, Schweiz