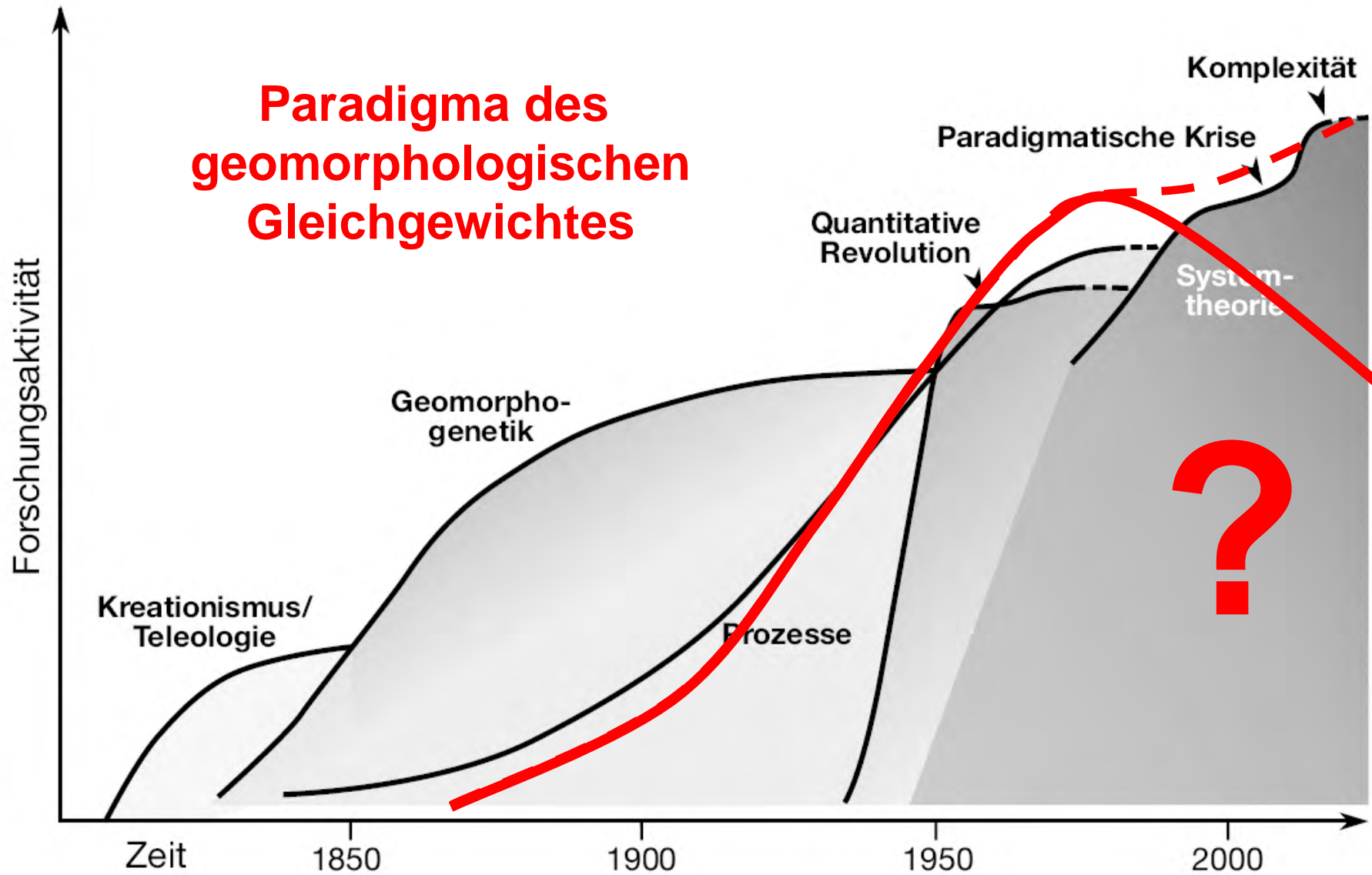


Vom geomorphologischen Gleichgewicht zu Nichtgleichgewichten und Komplexität ?

Thomas Hoffmann

Paradigma des geomorphologischen Gleichgewichtes



Gliederung

- Historisches zum Konzept des geomorphologische Gleichgewichtes
- Ahnerts Gleichgewichtsbegriff
- Komplexität, Nichtgleichgewichte:
 - Transient landscapes
 - Selbstorganisierte Kritizität
 - Implikationen, Konsequenzen
- Synthese



GILBERTs Report on the Geology of the Henry Mountains (1877)

“Erosion is most rapid where the resistance is least, and hence as the soft rocks are worn away the hard are left prominent. The differentiation continues until an **equilibrium** is reached through the law of declivities. When the ratio of erosive action as dependent on declivities becomes equal to the ratio of resistance as dependent on rock characteristics, there is **equality of action**“ (Gilbert 1877, S.113)

Konzept des graded rivers: “...a state in which there is neither (net) erosion nor deposition along the river...”

FIG. 36.—Mount Pennell, from the north.

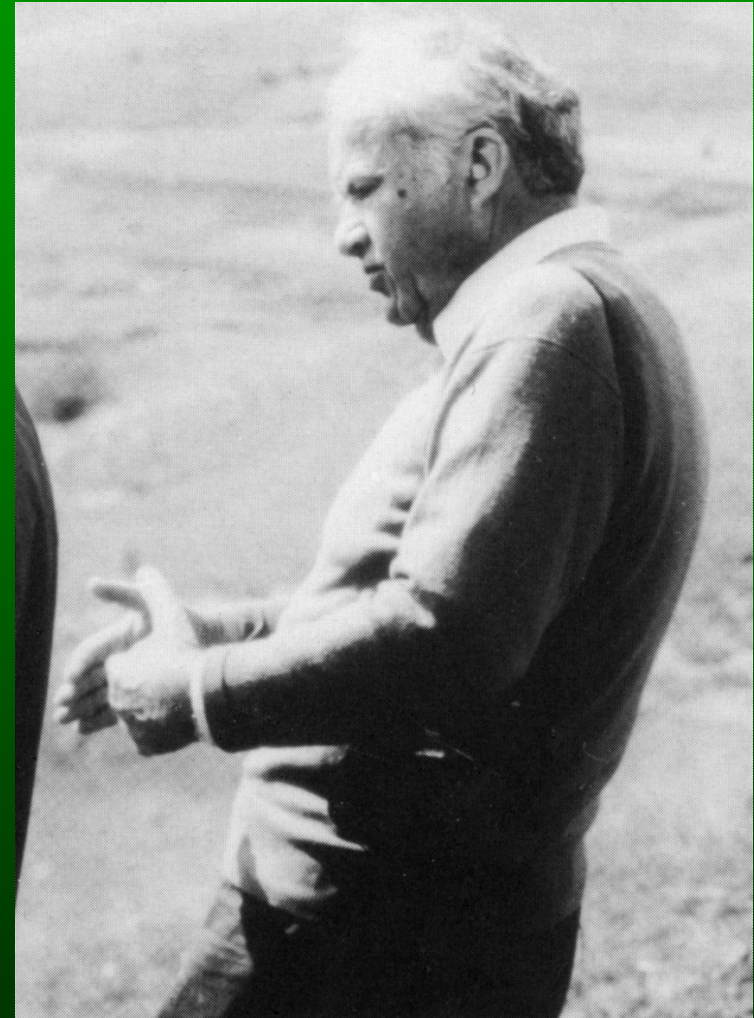
Arbeiten zum geom. Glgw

- Strahler, A.N., 1950. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. Part I. American Journal of Science, 248: 673-696.
- Mackin, J.H., 1948. Concept of the graded river. Geological Society of America Bulletin, 59: 463–512.
- Hack, J.T., 1960. Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. American Journal of Science, 258A: 80-97.
- Hack, J.T., 1975. Dynamic equilibrium and landscape evolution. In: W.N. Melhorn and R.C. Flemal (Editors), Theories of landform development. Allen & Unwin, London, pp. 87-102.
- Ahnert, F., 1954. Zur Frage der rückschreitenden Denudation und des dynamischen Gleichgewichtes bei morphologischen Vorgängen. Erdkunde, 8: 61-64.



Frank Ahnert

- **Funktionaler Zusammenhang zwischen Denudation, Relief und tektonischer Hebung**
 - Ahnert, F., 1970. Functional Relationships between Denudation, Relief, and Uplift in Large Mid-Latitude Drainage Basins. *American Journal of Science*, 268(3): 243-&.
→ 215 mal zitiert (zuletzt 2007) ([Web of Science](#))
 - Ahnert, F., 1984. Local Relief and the Height Limits of Mountain Ranges. *American Journal of Science*, 284(9): 1035-1055.
→ 40 mal zitiert ([Web of Science](#))
- **Pionier der numerischen Modellierung**
 - Ahnert (1964): Slope Retreat as a Function of Waste Cover Thickness - Some Preliminary Computer-Oriented Models. *Annals of the Assoc. of Am. Geogr.*, 54(3): 412-412.
 - Ahnert, F., 1987. Approaches to Dynamic Equilibrium in Theoretical Simulations of Slope Development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1): 3-15.
→ 44 mal zitiert ([Web of Science](#))



Ahnerts Gleichgewichts-Begriff

- **Dynamisches Gleichgewicht**
 - Im Sinne von C. Gilbert “...equalize work...”
 - GleichGEWICHT = Gleichheit von Gewichten/Kräfte
 - Gleichheit von Prozessraten / Massenbilanzen
 - Dynamisch: Selbstreguliert / negative Rückkopplung
 - Allen natürlichen Systeme mit negativer Rückkopplung zeigen Tendenz zum Gleichgewicht
- **Stationärer Zustand (steady state)**
 - Zeitunabhängigkeit von Prozesse + Formen
 - „Formkonstanz“ trotz Prozessrate > 0



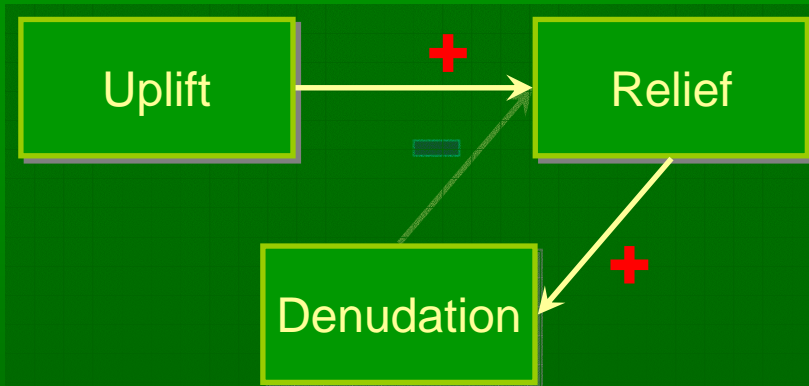
Ahnerts Gleichgewichts-Begriff

Vorteile

- Gleichgewicht ist messbar → datenbezogen
- Einfache, in sich logische Definition
- Möglichst nah an die Definitionen der Nachbarwissenschaften angelehnt
- Im Kern der Definition stehen:
 - Massen (Sedimente) → Prozesse
 - Formen (Relief)→ Zentrale Komponenten der Geomorphologie



Ahnerts Glgw.: globale Skale



→ Positiver, linearer Zusammenhang zwischen Relief und Denudation

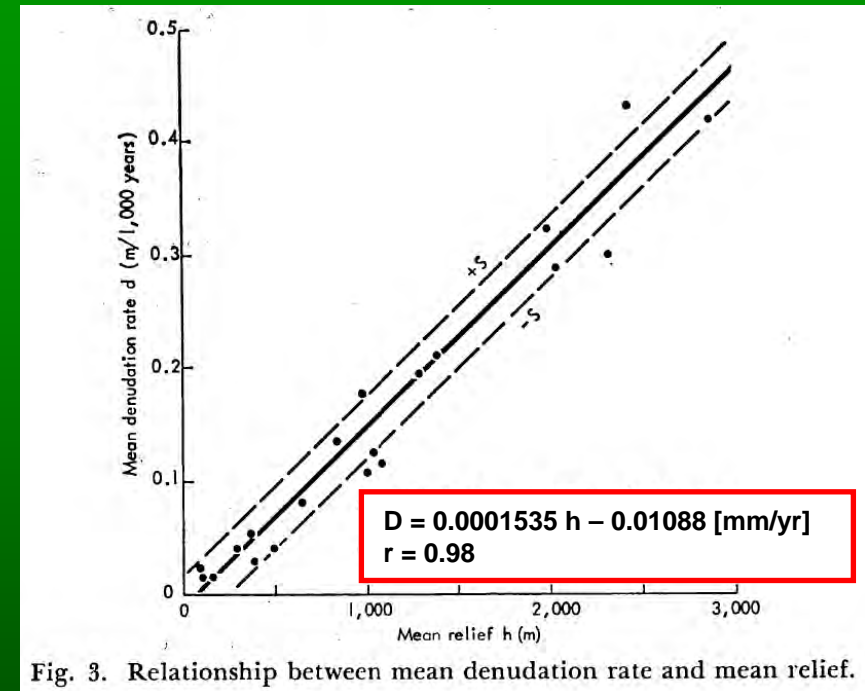
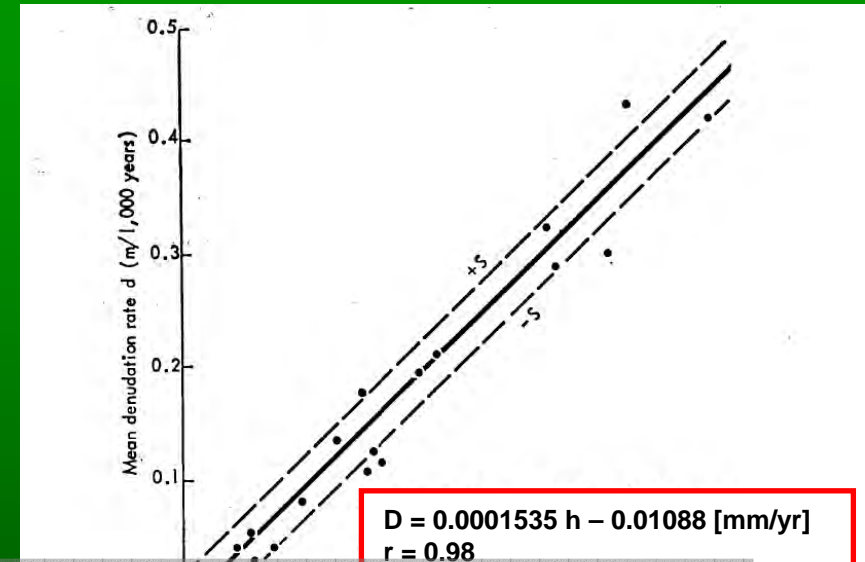
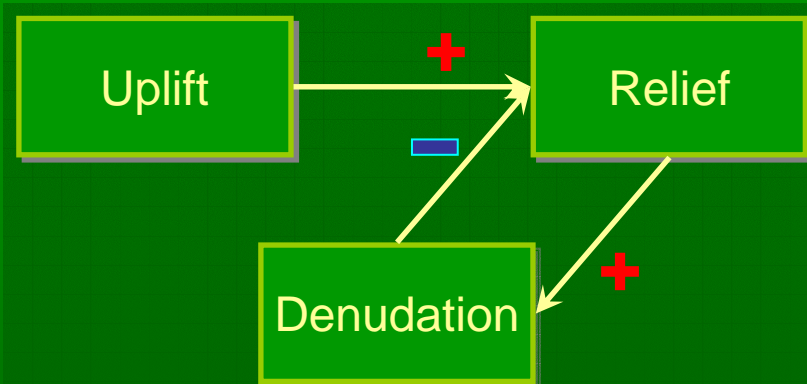


Fig. 3. Relationship between mean denudation rate and mean relief.

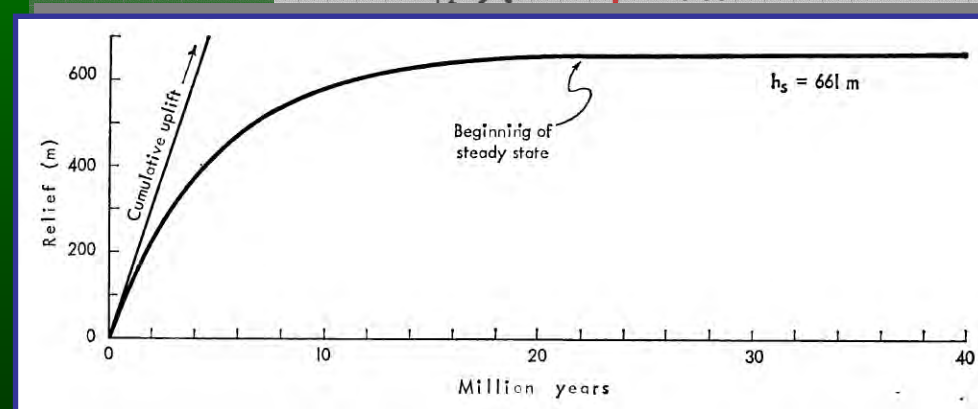
Ahnert, F., 1970. Functional Relationships between Denudation, Relief, and Uplift in Large Mid-Latitude Drainage Basins. American Journal of Science, 268(3): 243-&.

Ahnerts Glgw.: globale Skale



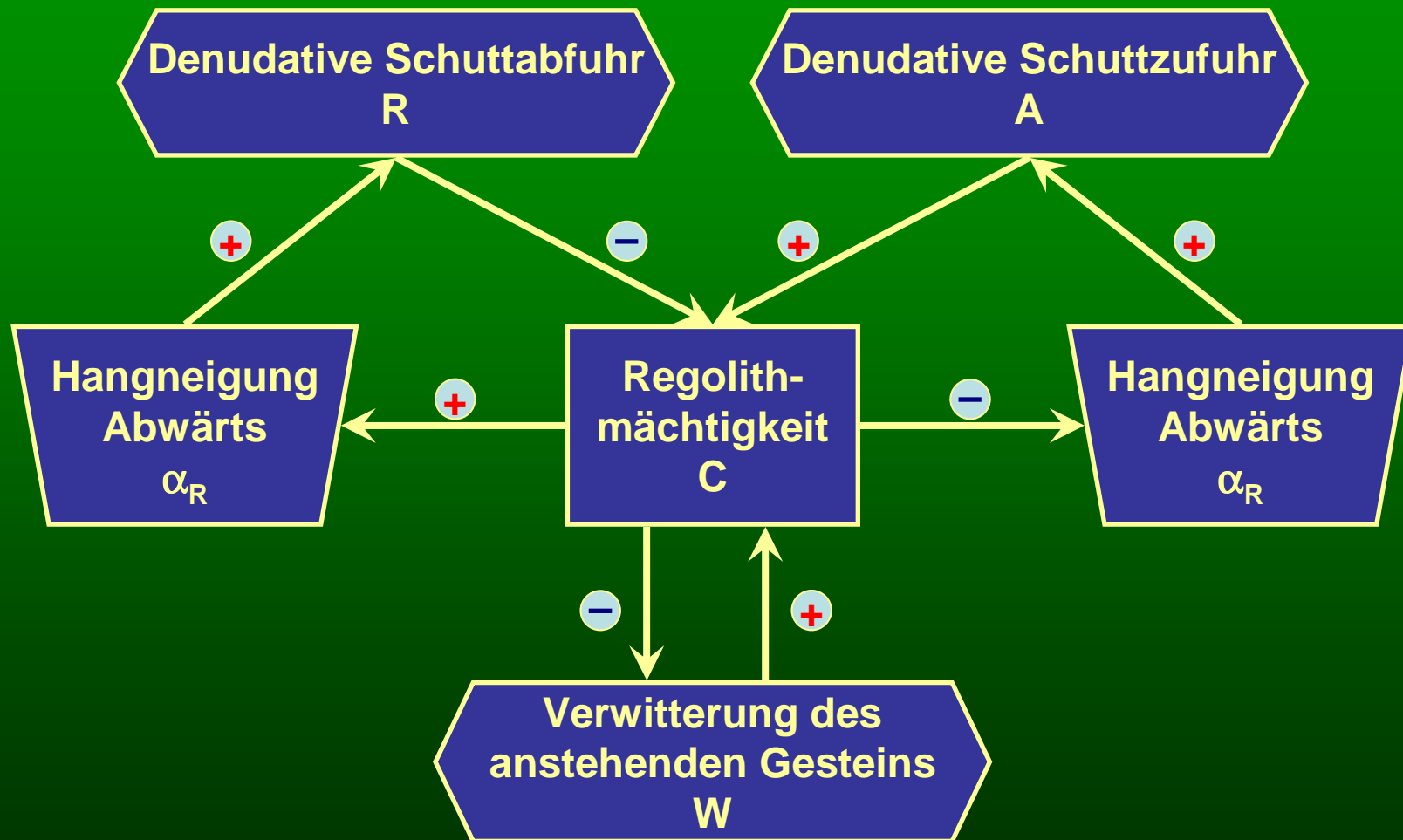
Negative Rückkopplung

- max. Höhe der Gebirge
 - Stationärer Zustand (steady state)
- Unwahrscheinlich da erst nach 20 Mio. Jahre

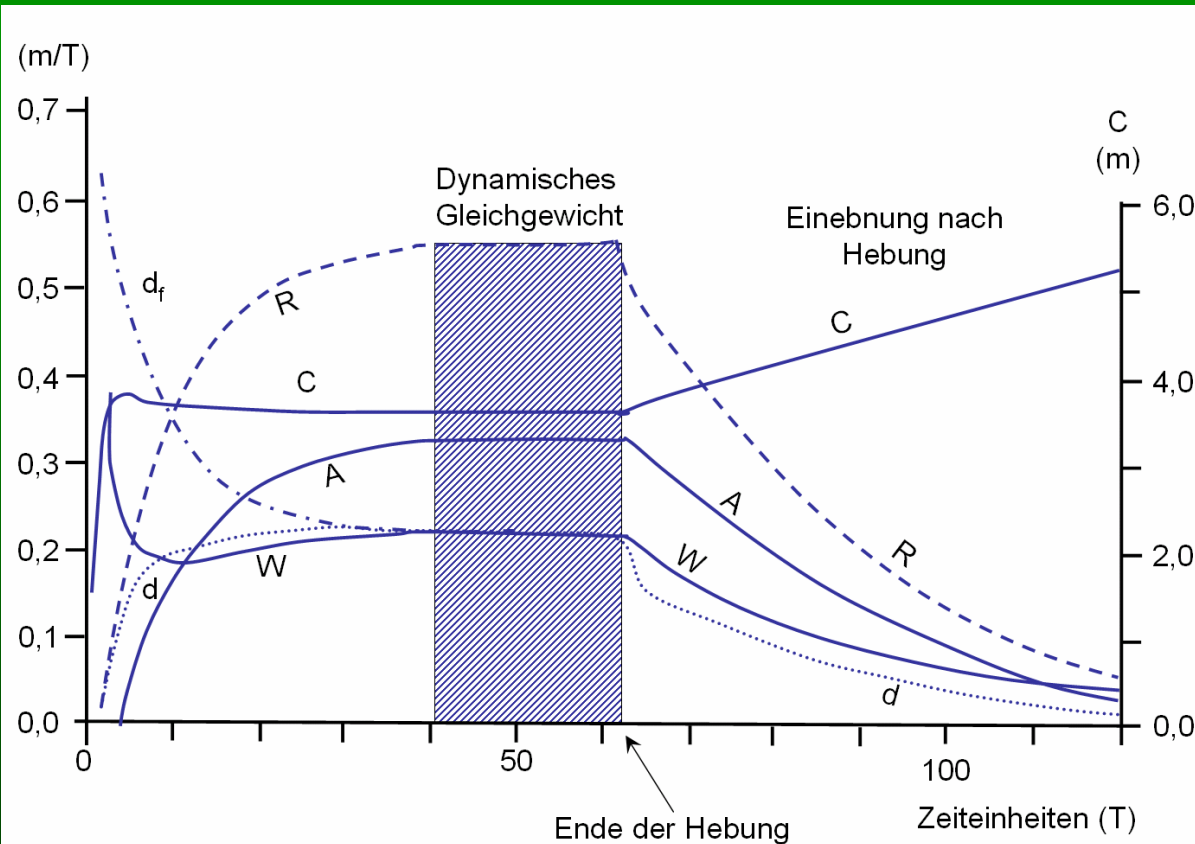


Ahnert, F., 1970. Functional Relationships between Denudation, Relief, and Uplift in Large Mid-Latitude Drainage Basins. American Journal of Science, 268(3): 243-&.

Ahnerts Glgw.: lokale Skale



AHNERTs Glgw.: lokale Skale



Ahnert (1994)

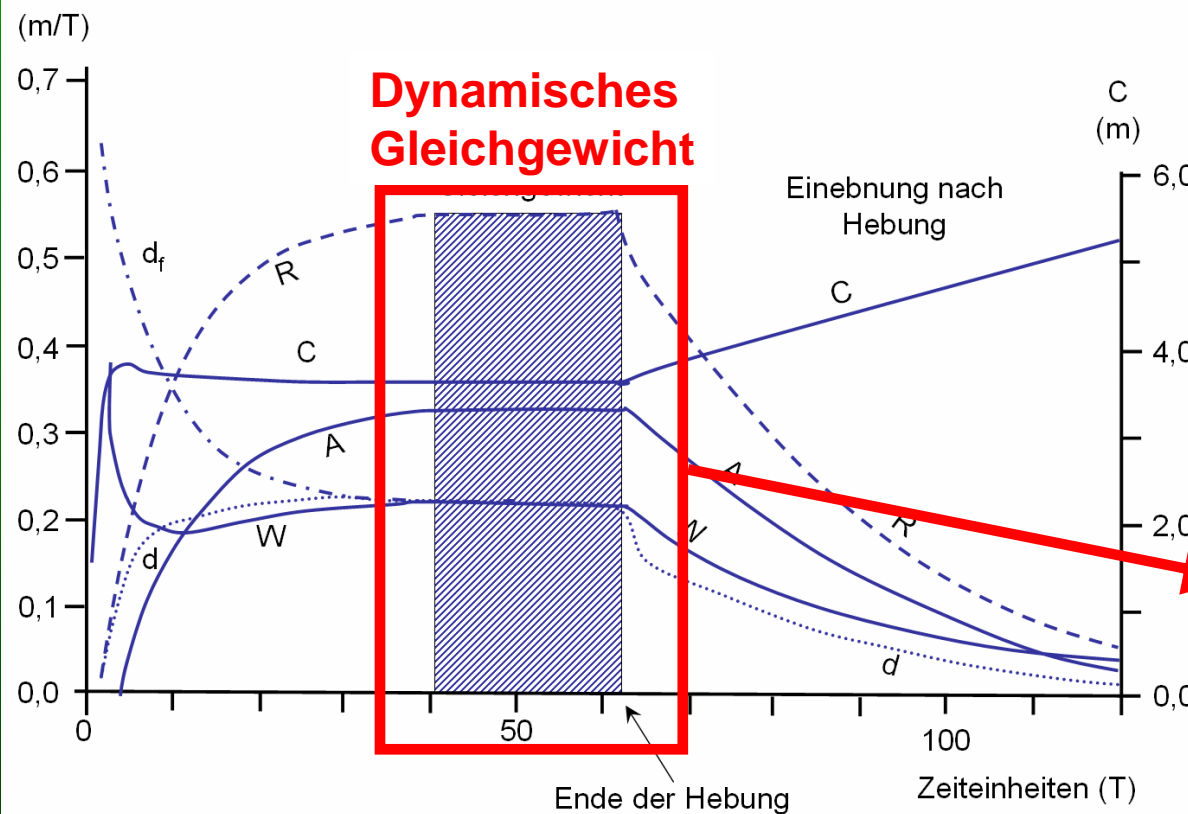
Dyn. Glgw.:

$$\frac{dC}{dt} = W + A - R = 0$$

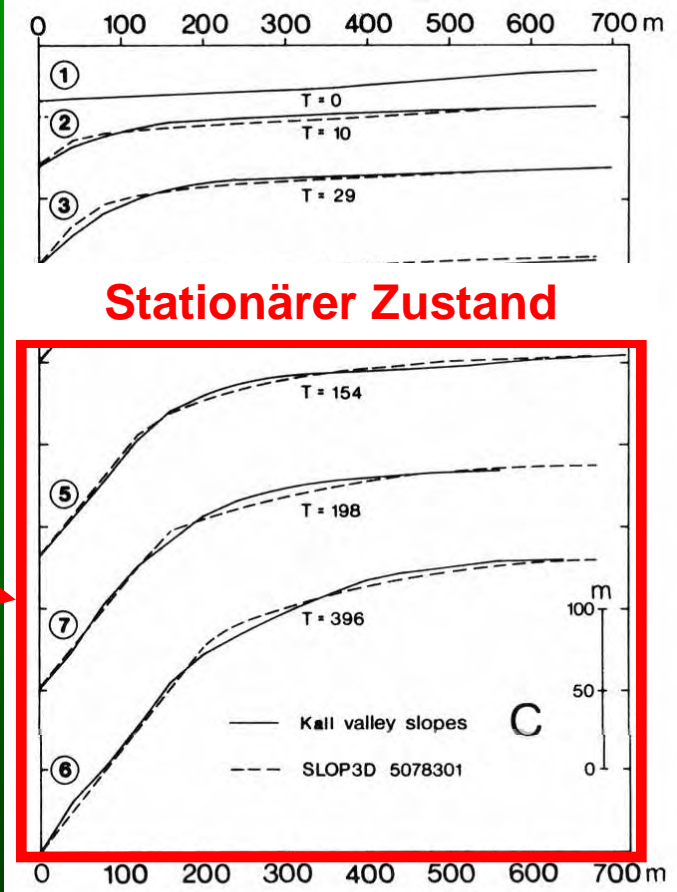
W = Verwitterung
 A = Denudative Schutzzufuhr
 R = Denudative Schuttabfuhr
 C = Regolithmächtigkeit



Ahnerts Glgw: Hang-Skale



Ahnert (1994)



Ahnert (1987)

Fehlende Erosionsmessung auf langfristigen Zeitskalen, schlechte Chronologie
 → nur indirekte Kalibrierung des Modells möglich

Kalibration: Bodenproduktion

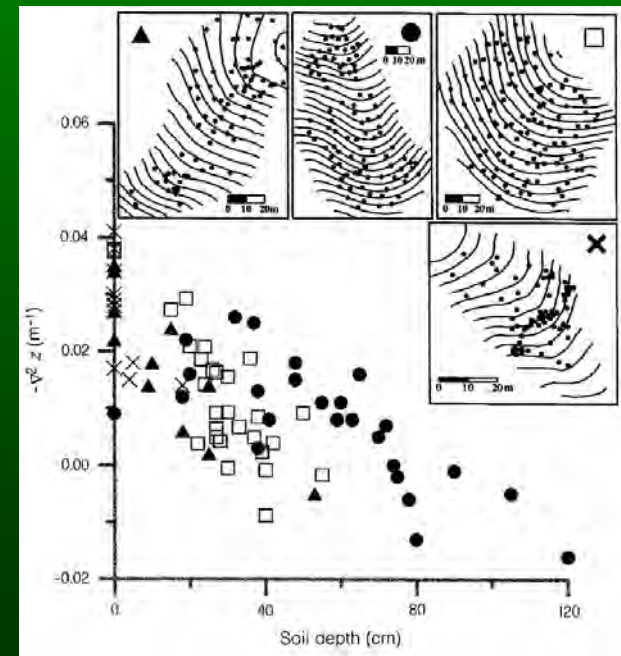
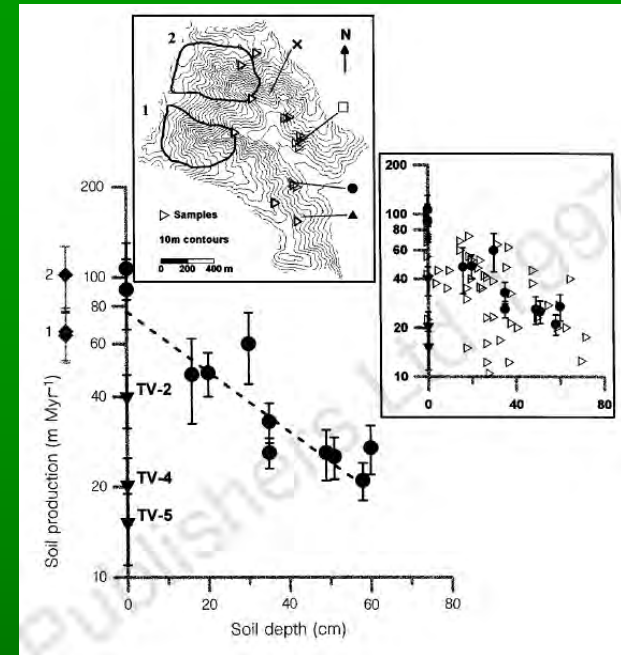


Stationarität + Bodenproduktion

- Messung der Bodenproduktion mittels ^{10}Be und ^{24}Al
 - Bodenproduktion abh. von Bodenmächtigkeit h

$$\frac{\partial e}{\partial t} = 77 \pm 9 e^{-0,023 \pm 0.005 h}$$

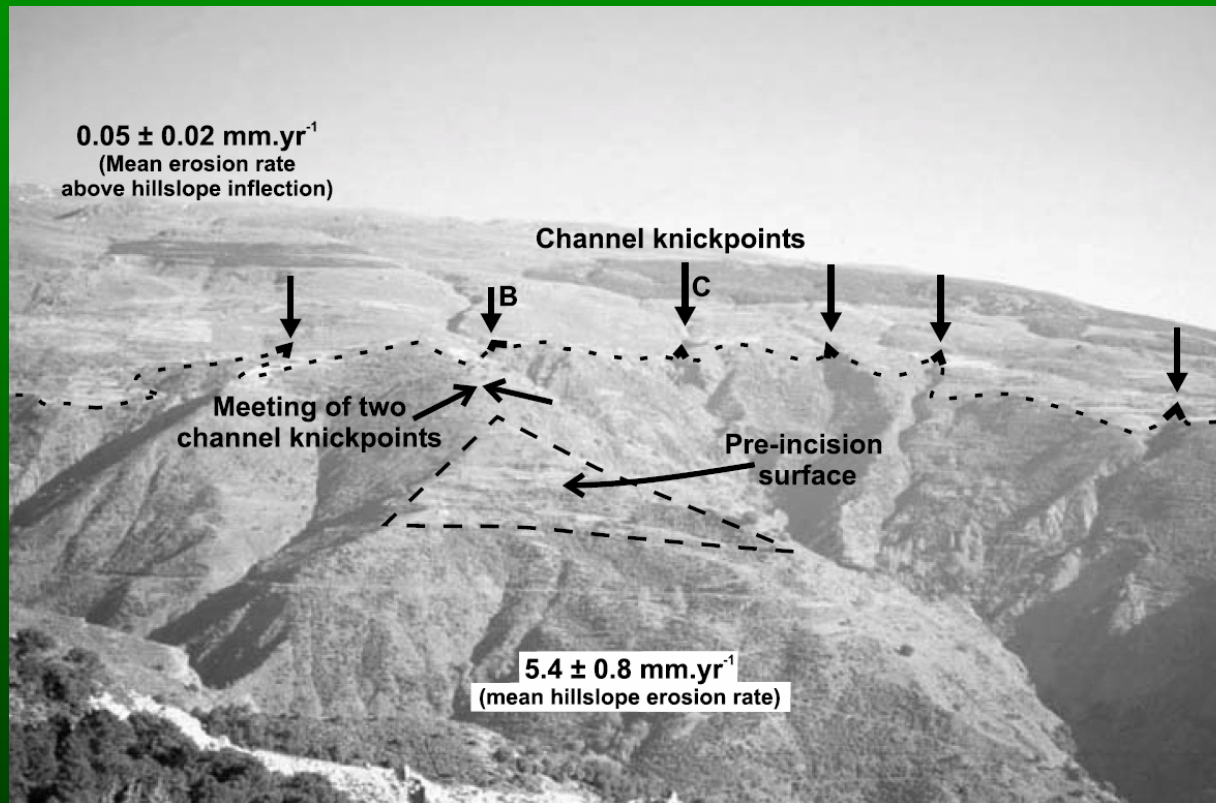
- Bodenmächtigkeit abh. von Wölbung
- Stationärer Zusammenhang zwischen Bodenproduktion u. -mächtigkeit
- Relief → nicht stationäre



Heimsath et al. (1997, Nature)

Kalibration: Erosionsraten auf langen Zeitskalen (^{10}Be)

Rio Torrente, Sierra Nevada, Spanien



100m Hebung in 1 Mio. a

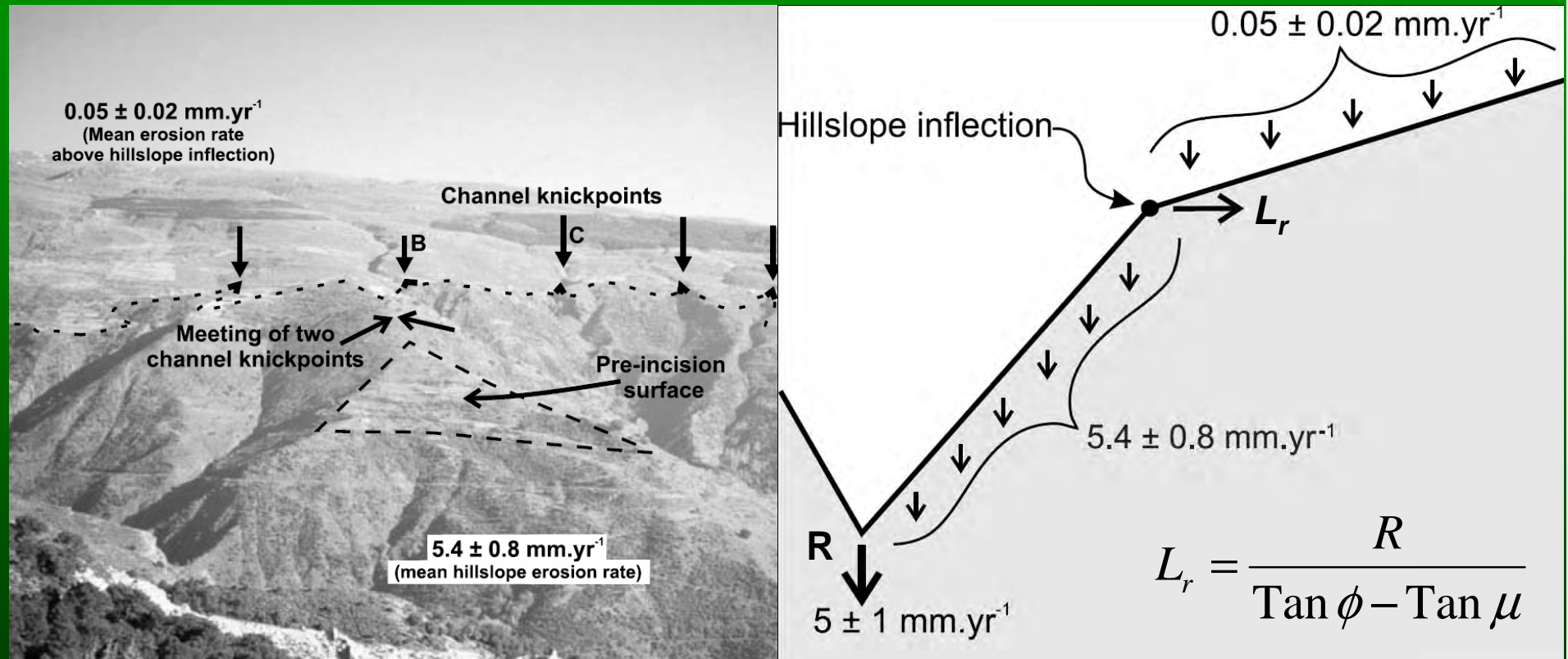
1. Junges, steiles Relief
→ krit. Hangneigung
2. Altes (vererbt), gering
geneigtes Relief
→ Knickpunktverlagerung

Messung der Erosions-
raten mittels ^{10}Be

- Gerinne
- Junge Hänge
- Alte Hänge

Anwendung ^{10}Be

Rio Torrente, Sierra Nevada, Spanien



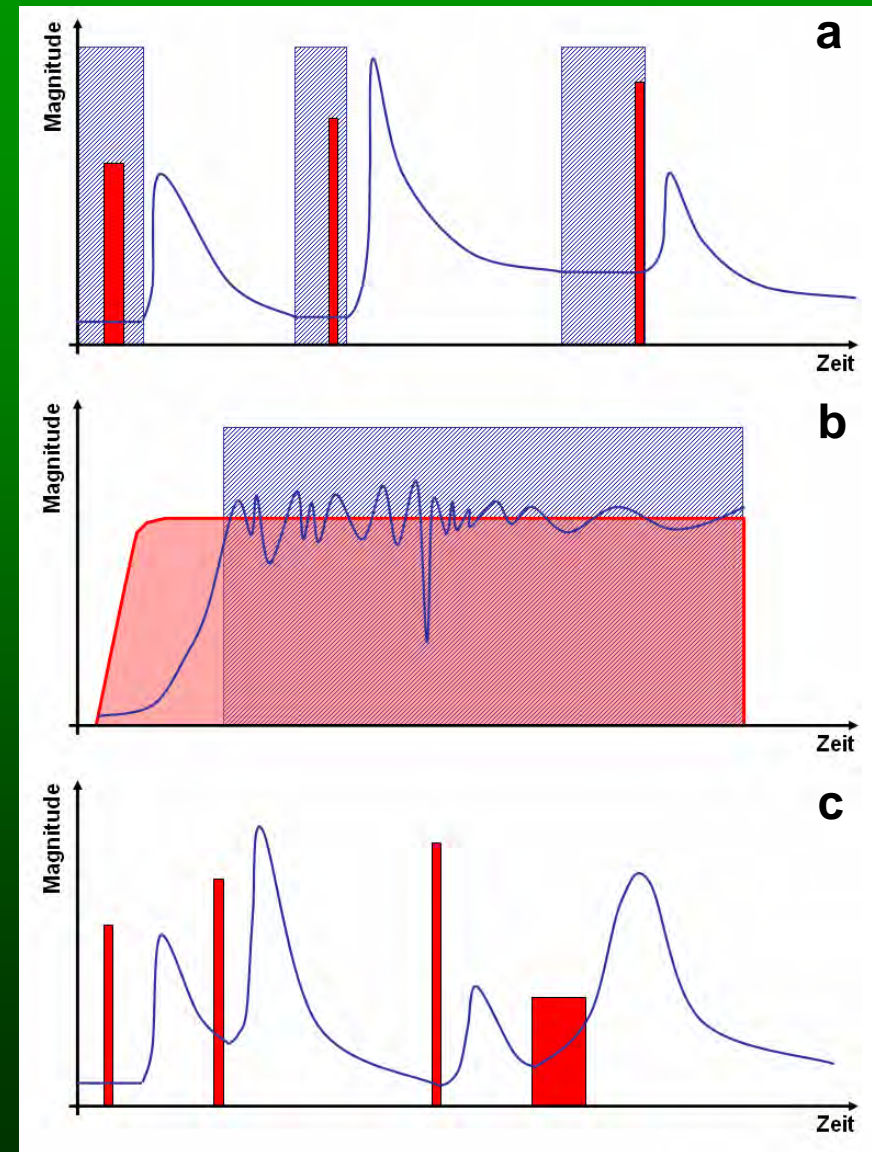
Gleichgewicht und Zeit

- Systemexterne Störung
 - Frequenz und Magnitude
 - Kontinuität des Prozesses
- Systeminterne Reaktion
 - Räumliche Skale
 - Prozessrate
 - Responsezeit

a. Impulse: Wiederkehrrate $>$ Responsezeit

b. Kontinuierlicher Prozess: Prozessdauer $>$ Responsezeit

c. Impulse: Wiederkehrrate $<$ Responsezeit



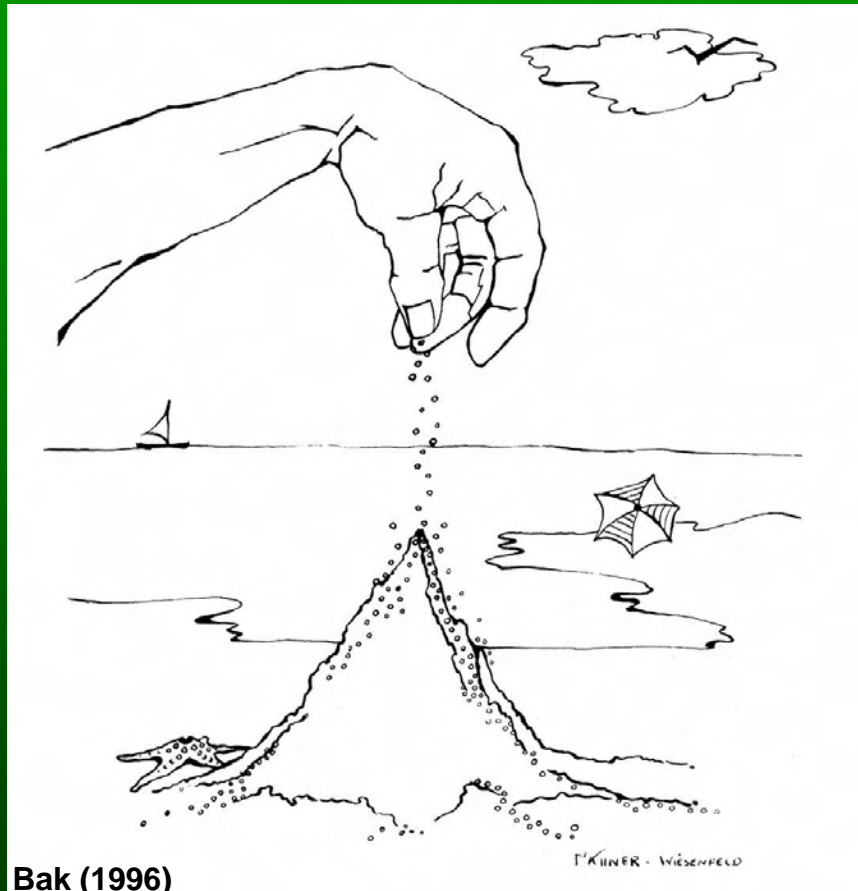
Das ENDE des Gleichgewichtes?

Komplexität, Nicht-Linearität, Chaos

- Phillips (1992): “Geomorphic Systems“ Proceedings of the 23rd “Binghamton Symposium“
- Betonung des Verhalten geomorphologischer Systeme fort vom Gleichgewicht
- Existenz von
 - Nicht-Glgw. (Non-Equilibrium)
 - Ungleichgewicht (Dis-equilibrium)
 - Multiple Gleichgewichte
- Nicht-Linearität / Schwellenwerte
- Feedbacks
- Selbstorganisation und selbstorganisierte Kritizität
- Emergenz



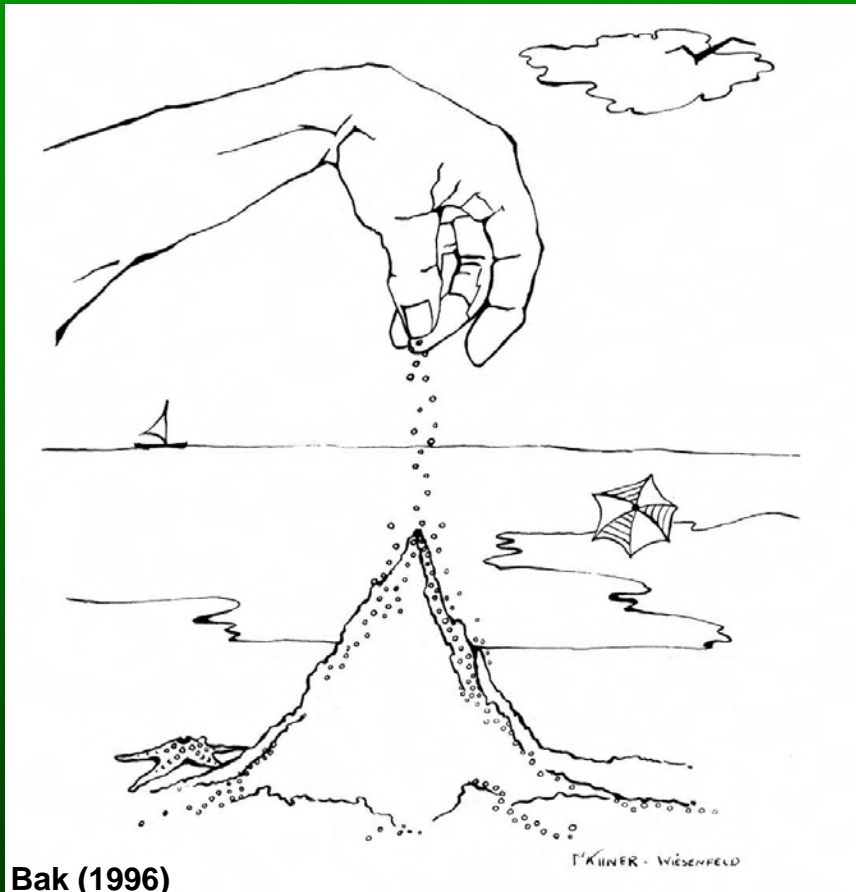
Selbstorganisierte Kritizität (SOC)



1. Forum für Geomorphologie, Bayreuth, 29. Sept. 2007
Vom geomorphologischen Gleichgewicht Frank Ahnerts zu Nichtgleichgewichten und Komplexität ?



Selbstorganisierte Kritizität (SOC)



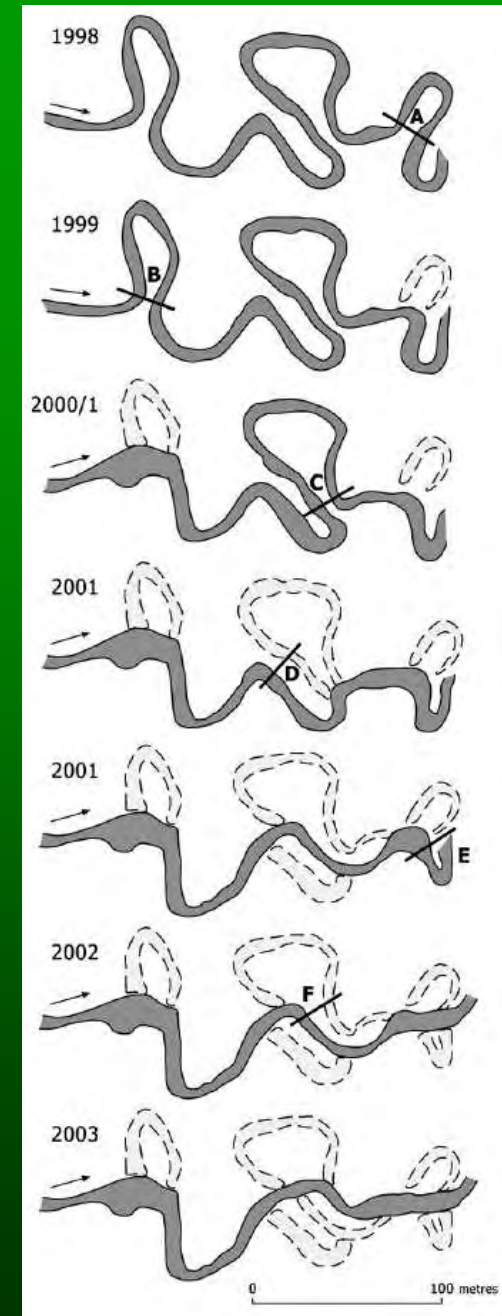
1. Offene Systeme: Energietransfer
2. Große Anzahl von Freiheitsgraden (viele Teilchen, Systemkomponenten)
3. Existenz eines kritischen Zustandes innerhalb dessen Systeme fluktuieren
4. Interner Mechanismus mittels dessen Systeme kritischen Zustand einnehmen
5. Kleiner Trigger → gr. Bandbreite der Wirkungsmagnitude
6. Frequenz-Magnitude folgen Potenzgesetz

Problem der Diagnose

→ Kriterien sind notwendig aber nicht hinreichend

SOC im fluvialen System

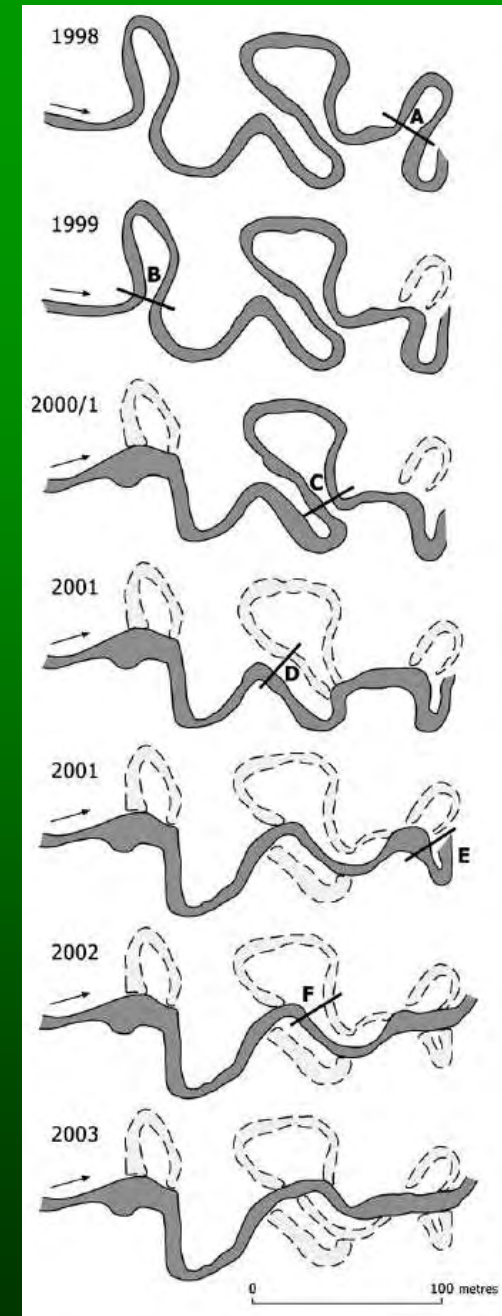
1. Kritischer Zustand:
mäandrierender Fluss hoher
Sinuosität
2. Trigger: Mäanderdurchbruch
→ Erhöhung der Transportenergie
→ Kettenreaktion: weitere
Mäanderdurchbrüche



Hooke (2003)

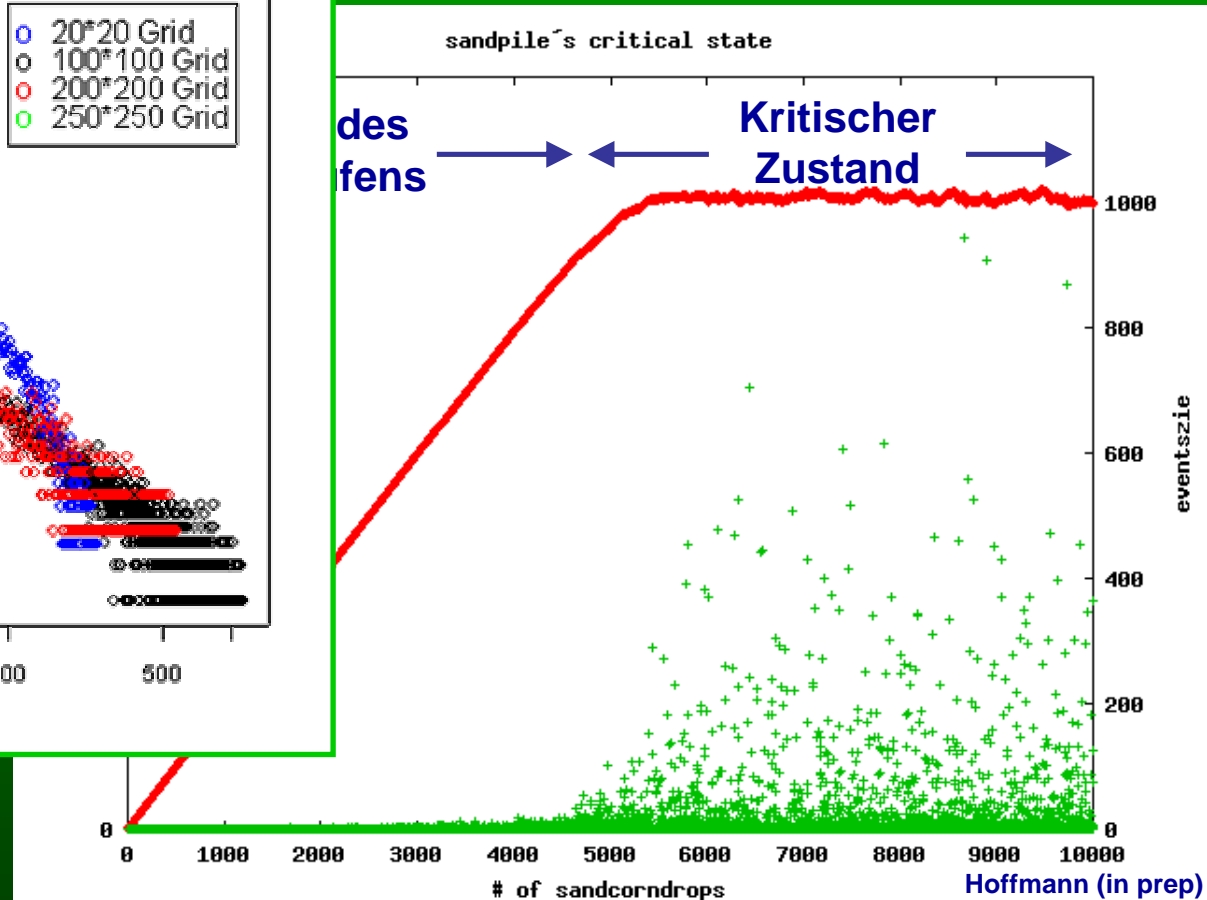
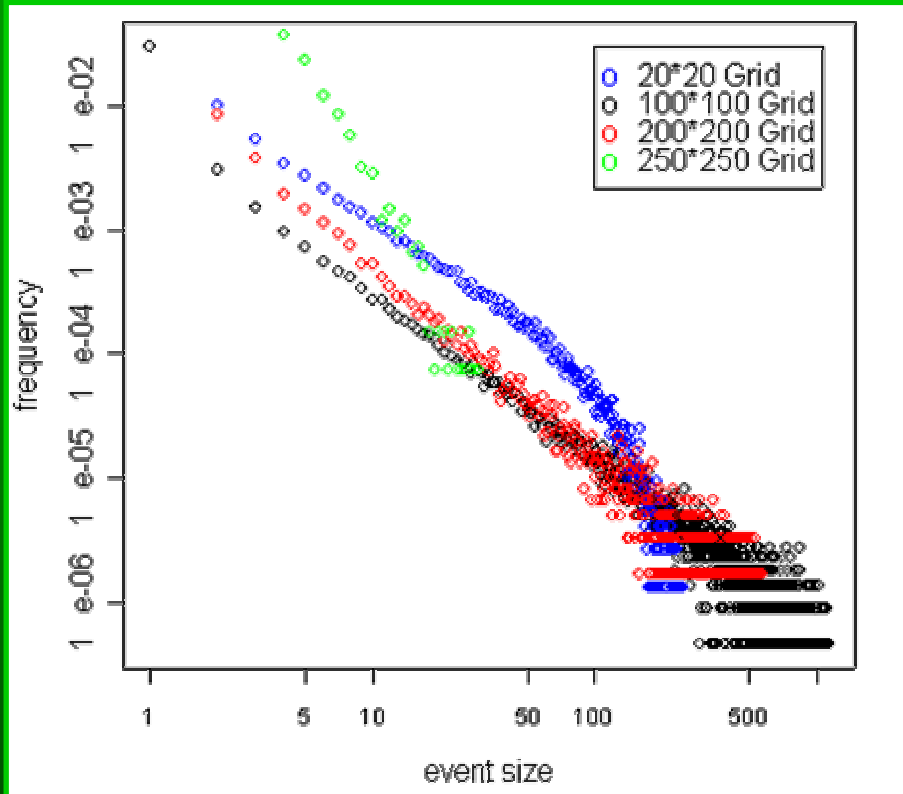
SOC Konsequenzen

1. Gr. Variabilität des Austrags
→ unabhängig von Energieeintrag
1. Unvorhersagbarkeit des Systemverhaltens
→ Nur statistische Eigenschaften lassen sich vorhersagen
2. Lokale Stratigraphie (Austrag) beschreibt interne Prozessdynamik
3. Holistischer Ansatz notwendig



Hooke (2003)

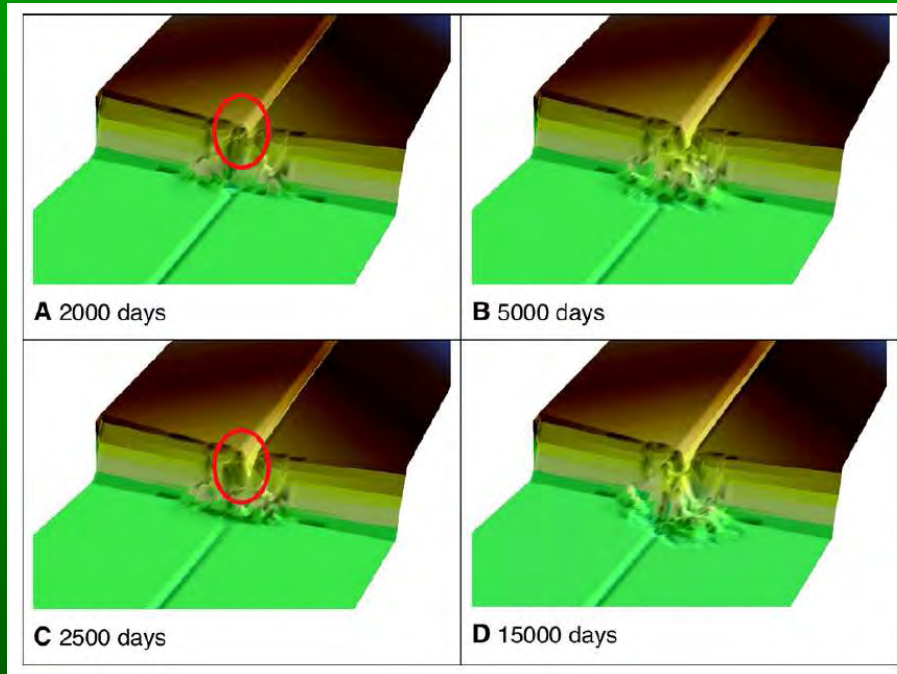
SOC und dyn. Glgw: Sandhaufen



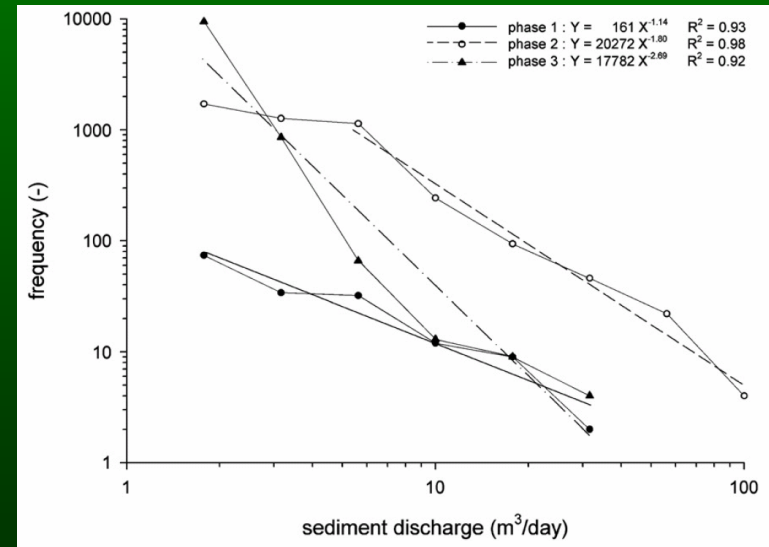
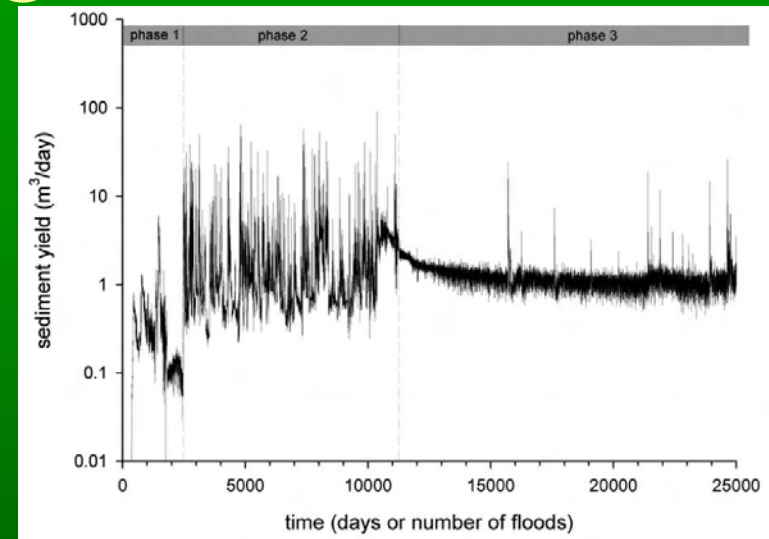
Im kritischen Zustand befinden sich Systeme im dyn. Gleichgewicht
→ Über längere Zeitskalen ist der Output = Input

Variabilität um das Gleichgewicht hochgradig nichtlinear

SOC und dyn. Glgw: CAESAR



Phase 1: Aufbau des Schwemmfächers
Phase 2: Gleichgewicht mit
Angekopplung an den
Schwemmfächer
→ Stärkstes SOC-Verhalten
Phase 3: Gleichgewicht mit
entkoppelten Schwemmfächer



Coulthard & Van de Wiel (2007)

Synthese I

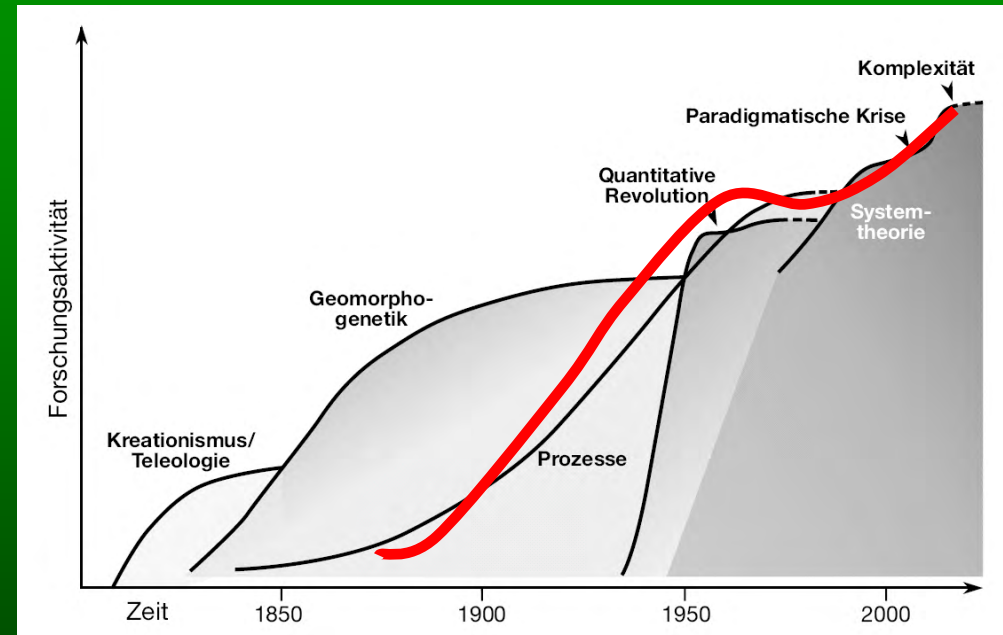
Vom geomorphologischen Glgw. zu
Nichtgleichgewichten und Komplexität ?

- Dyn. Glgw. + stationärer Zustand selten erreicht
- Ahnert: Tendenz geomorphologischer Systeme zum dyn. Glgw.
 - universelles Prinzip
 - Nicht alle Teile eines Systems sind Chaotisch, Komplex und Nichtlinear
 - Gleichgewichts-Komplexitäts-Dualismus (Physik: Welle-Teilchen-Dualismus)

Synthese II

Das Paradigma des geomorphologischen Glgw. im Aufwind

- Konzeptionelle und numerische Arbeiten Ahnerts
- Definition des Glgw. nach Ahnert
→ messbar
- Neue Mess- und Simulationstechniken



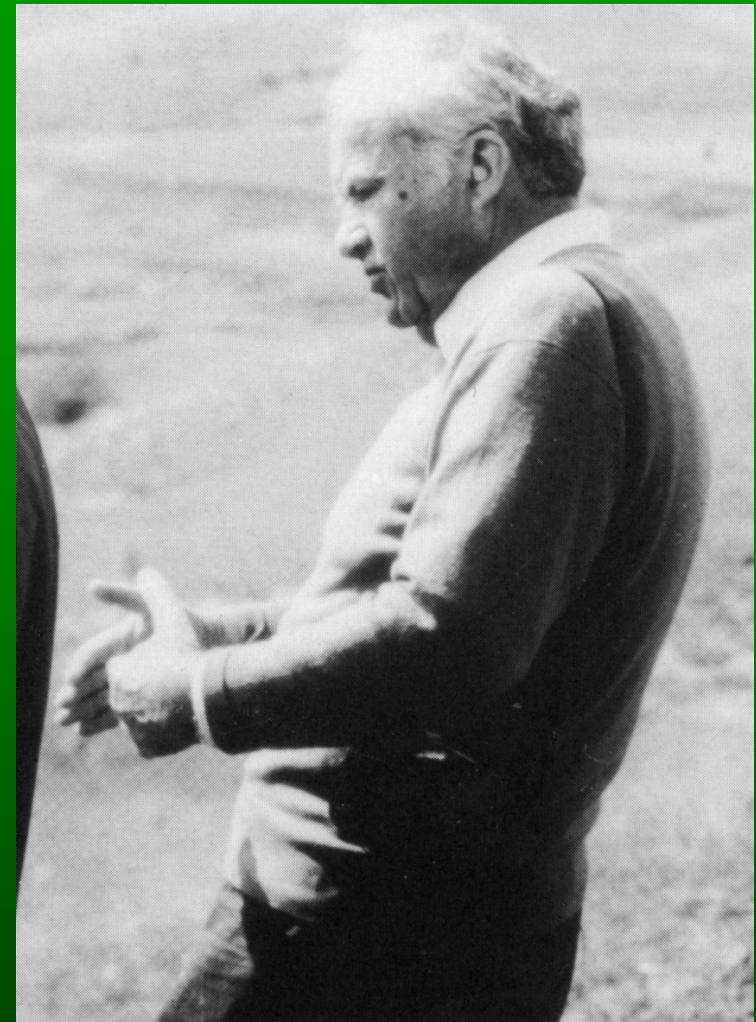
Dikau (2006)



1. Forum für Geomorphologie, Bayreuth, 29. Sept. 2007

Vom geomorphologischen Gleichgewicht Frank Ahnerts zu Nichtgleichgewichten und Komplexität?

Vielen dank für Ihre Aufmerksamkeit!!!



Mein Besonderer Dank gilt:
Richard Dikau, Andreas Lang, Lothar Schrott, Thomas Glade, Jan Otto, Michael
Krautblatter, Peter Houben, Jürgen Wunderlich, Andreas Zimmermann, Liam
Reinhardt, Mark Macklin, „Die Jungen Geomorphologen“, der DFG

Literatur

- Ahnert, F., 1954. Zur Frage der rückschreitenden Denudation und des dynamischen Gleichgewichtes bei morphologischen Vorgängen. *Erdkunde*, 8: 61-64.
- Ahnert, F., 1970. Functional relationship between denudation, relief and uplift in large mid-latitude drainage basins. *American Journal of Science*, 268: 243-263.
- Ahnert, F., 1984. Local relief and the height limits of mountain ranges. *American Journal of Science*, 284: 1035-1055.
- Ahnert, F., 1987. Approaches to Dynamic Equilibrium in Theoretical Simulations of Slope Development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1): 3-15.
- Ahnert, F., 1994. Equilibrium, Scale and Inheritance in Geomorphology. *Geomorphology*, 11(2): 125-140.
- Bak, P., 1996. *How nature works: the science of self organized criticality*. Springer-Verlag, New York.
- Gilbert, G.K., 1877. *Report on the Geology of the Henry Mountains, Washington*.
- Coulthard, T.J. and Van De Wiel, M.J., 2007. Quantifying fluvial non linearity and finding self organized criticality? Insights from simulations of river basin evolution. *Geomorphology*, 91: 216-235.
- Dikau, R., 2006. Komplexe Systeme in der Geomorphologie. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 148: 125-150.
- Hack, J.T., 1957. *Studies of Longitudinal Stream Profiles in Virginia and Maryland*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 294-B.
- Hack, J.T., 1975. Dynamic equilibrium and landscape evolution. In: W.N. Melhorn and R.C. Flemal (Editors), *Theories of landform development*. Allen & Unwin, London, pp. 87-102.
- Heimsath, A., Dietrich, W.E., Nishiizumi, K. and Finkel, R.C., 1997. The soil production function and landscape equilibrium. *Nature*, 388: 358-361.
- Hooke, J., 2003. River meander behaviour and instability: a framework for analysis. *Transactions of the Institute of British Geographers (New Series)*, 28: 238-253.
- Mackin, J.H., 1948. Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin*, 59: 463–512.
- Phillips, J.D., 1992. The end of equilibrium? *Geomorphology*, 5: 195-201.
- Reinhardt, L.J., Bishop, P., Hoey, T.B., Dempster, T.J. and Sanderson, D.C.W., 2007. Quantification of the transient response to base-level fall in a small mountain catchment: Sierra Nevada, southern Spain. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 112: F03S05, doi:10.1029/2006JF000524, 2007.
- Strahler, A.N., 1950. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. Part I. *American Journal of Science*, 248: 673-696.