

KOMPLEXE SYSTEME IN DER GEOMORPHOLOGIE

Richard DIKAU, Bonn*

mit 4 Abb. im Text

INHALT

<i>Summary</i>	125
<i>Zusammenfassung</i>	126
1 Einleitung	126
2 Geomorphologische Historizität.....	130
3 Skalenabhängigkeit geomorphologischer Systeme.....	131
4 Geomorphologische Systeme im Gleichgewicht.....	132
5 Geomorphologische Systeme im Nichtgleichgewicht	134
6 Adaptiver Kreislauf, Panarchie und Resilienz	139
7 Abschließende Bemerkungen	144
8 Literaturverzeichnis	147

Summary

Complex systems in geomorphology

The paper presented focuses on the potential contributions of geomorphology to the understanding of complexity in social-ecological systems. Based on the hypothesis that social-ecological systems are characterised by “complex behaviour” or by an “increase of complexity”, we suggest stepping up theoretical and empirical research on complex systems within the geomorphologic discipline. The author discusses categories of non-linear complexity in relation to the multi-scale character of the palimpsest of landforms. These categories include: geomorphologic history, scale dependency, equilibrium, non-equilibrium, sensitivity, path dependency, chaos, self-organisation, adaptive cycle, “Panarchy” and resilience. Finally, the social-ecological concept of “Panarchy” is analysed with respect to its adaptation to the geomorphologic systems approach. We advocate discussing in greater detail the specific complexity approaches of diverse social-ecological programmes within the framework of international complexity science.

* Prof. Dr. Richard DIKAU, Geographisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, D-53115 Bonn, Meckenheimer Allee 166; e-mail: rdikau@giub.uni-bonn.de, <http://www.giub.uni-bonn.de/>

Zusammenfassung

Der vorliegende Aufsatz konzentriert sich auf potenzielle Beiträge der Geomorphologie, die für ein Verständnis der Komplexität in sozialökologischen Systemen nötig sind. Auf Basis der Hypothese, dass sozialökologische Systeme durch „komplexes Verhalten“ oder „Komplexitätszunahme“ charakterisiert sind, schlagen wir vor, die theoretische und empirische Erforschung der Komplexität innerhalb der geomorphologischen Disziplin zu verstärken. Der vorliegende Aufsatz diskutiert Kategorien der nichtlinearen Komplexität in Verbindung mit dem multiskaligen Charakter des Palimpsests von Reliefformen. Diese Kategorien schließen ein: Geomorphogenese, Skalenabhängigkeit, Gleichgewicht, Nichtgleichgewicht, Sensitivität, Pfadabhängigkeit, Chaos, Selbstorganisation, adaptiver Kreislauf, Panarchie und Resilienz. Abschließend wird der Panarchie-Ansatz der Sozialökologie im Hinblick auf seine Anpassung für das Verständnis geomorphologischer Systeme begutachtet. Wir schlagen vor, die spezifischen Komplexitätsansätze unterschiedlicher sozialökologischer Programme im Kontext der internationalen Komplexitätswissenschaft zu diskutieren.

1 Einleitung

Der Wiener Workshop „Sozialökologische Interaktionsmodelle und Systemtheorien – Ansätze einer theoretischen Begründung interaktiver Projekte in der Geographie“ (8.–9. Juli 2005) war die Folgeveranstaltung des Bonner DFG-Rundgespräches im November 2004, dokumentiert in der von MÜLLER-MAHN & WARDENGA (2005) herausgegebenen Aufsatzsammlung. Darin habe ich zwei Argumentationslinien verfolgt (DIKAU 2005).

Einerseits werden Ansätze der geomorphologischen Systemtheorie und ihre Weiterentwicklung im Sinne der von PHILLIPS (2003) rezipierten komplexen, nichtlinearen Dynamik diskutiert. Andererseits werden Potenziale der geomorphologischen Forschung für sozialökologische Ansätze des „Drei-Säulen-Modells“ von WEICHHART (2005) erörtert. Diese Potenziale beziehen sich in erster Linie auf den von FISCHER-KOWALSKI & ERB (2003) vorgeschlagenen Ansatz der Kolonisierung physisch-materieller Systeme und auf Metabolismen zwischen physisch-materiellen Umweltsystemen und den mit ihnen gekoppelten sozioökonomischen Systemen. Geomorphologisch bedeutsame Forschungsthemen umfassen aus meiner Sicht deshalb

- den Sedimentfluss und -haushalt als Komponente biogeochemischer Metabolismen lokaler, regionaler und globaler Skalen,
- Böden und Sedimentspeicher als hybride Entitäten der Kolonisierung physisch-materieller Umweltsysteme sowie
- Böden und Sedimentspeicher als Archive für die historische und prähistorische Rekonstruktion derartiger Umweltsysteme.

Damit ist zwar ein analytischer Zugang der Geomorphologie zur sozialökologischen Forschung erkennbar und ein Beitrag zur Erforschung der Wechselwirkungen zwischen materiell-physischen und gesellschaftlichen Systemen im Sinne von WEICHHART (2005, Abb. 3) möglich, ein weitergehender epistemologisch-methodologischer Beitrag der Geomorphologie zur Entwicklung „interaktiver Projekte in der Geographie“ (MÜLLER-MAHN & WARDENGA 2005) ist damit noch nicht geleistet, was allerdings auch nicht einfach ist. Im physisch-materiellen Zugang zu Hybriden spiegelt sich ja ein Paradigma der Moderne in Form des dichotomischen Charakters von Natur bzw. Umwelt, die sich außerhalb des menschlichen Handelns befindet. Die Kolonisierung der Natur durch die menschlichen Gesellschaften hat jedoch, wie BECK et al. (1996, S. 14) feststellen, dazu geführt, dass sich die heutigen „Ökologieprobleme ... keineswegs als Angelegenheit der Umwelt begreifen lassen“, weil diese „Umwelt nicht mehr außerhalb des Zugriffs der Gesellschaft verbleibt, sondern von dieser völlig durchdrungen und umgestaltet wird“. Natürliches und Gesellschaftliches, so fahren die Autoren fort, sei derart miteinander verwoben, dass sich nicht mehr eindeutig klären lasse, was wem zuzurechnen sei. Die an Bio-Geosystemen arbeitenden Wissenschaften haben es also mit einer Natur als „Schauplatz menschlicher Eingriffe“ zu tun, die durch gesellschaftliche Aktivitäten erst geschaffen wurde (z.B. manipulierte Gene, chemische Giftstoffe, Atomwaffen) oder verändert worden ist (z.B. Zunahme der Erwärmung der Atmosphäre, Abnahme der Biodiversität, Zunahme der Häufigkeit von Wetterextremen, Zunahme der Fläche degradierter Böden). Derartige Hybride existieren seit die menschlichen Gesellschaften natürliche Systeme kolonisieren. In Mitteleuropa beginnt diese intensive Phase mit dem Übergang von der Jäger- und Sammlergesellschaft zur ackerbaulichen Gesellschaft des Neolithikums. Jedoch entwickelt sich eine neue Generation von Hybriden bzw. Systemzuständen erst mit dem Übergang der menschlichen Gesellschaften in die „Zweite Moderne“ (BECK et al. 2001, GIDDENS 1996) der letzten zwei bis drei Jahrzehnte, die, so BECK et al. (1996, S. 15), es nicht sicher erscheinen lassen, „... ob die Spezies Mensch überleben wird“ und die „Risiko“ zu einem grundlegenden Begriff in unserer Kultur machen. GIDDENS (1996, S. 146) verwendet für diese von der menschlichen Gesellschaft durchdrungene Natur den Begriff Umwelt. Umwelt ist „durch menschliche Eingriffe von Grund umgestaltete“ Natur, ist ihre „durchgehende Vergesellschaftung“. Das Neue an der „Vergesellschaftung der Natur“ der Zweiten Moderne ist nach GIDDENS (1996, S. 147), dass „eine Vielzahl einstmalig natürlicher Systeme“, wie z.B. das Klima der Erde, „Resultate menschlicher Entscheidungen geworden sind“, und „kein Versuch, die Natur wiederzubeleben, kann sie zu dem machen, was sie einmal war“ (S. 148).

Diese Ansätze werden in BECK & BONSS (2001) unter dem Begriff der „Modernisierung der Moderne“ weiterverfolgt. Mit Bezug auf die politische Dynamik einer globalen ökologischen Krise sehen BECK et al. (2001, S. 23) eine der Herausforderungen der Zweiten Moderne darin, dass es zunehmend schwieriger werde, Natur als eine neutrale, unendliche Ressource zu begreifen, und dass sich stattdessen zeige, dass „Natur kein beherrschbares Außen der Gesellschaft darstellt, sondern zum Innen gehört“. In einem weiteren Beitrag in BECK & BONSS (2001) beschäftigen sich HEYMANN & WENGENROTH (2001, S. 106) mit dem Versprechen der Natur- und Tech-

nikwissenschaften der Ersten Moderne, „die Herrschaft über die äußere und innere Natur sei durch Verwissenschaftlichung systematisch perfektionierbar und führe zu einer zunehmenden Berechenbarkeit der Welt sowie zu immer eindeutigeren rationalen Problemlösungen“. Dagegen erheben die Autoren die Hypothese, dass sich nunmehr herausstelle, dass „die moderne Strategie der Naturerkenntnis und -überwindung“ die Komplexität der Welt jedoch nicht vermindert, sondern beträchtlich erhöht habe. Eine Frage, die mit der gesellschaftlichen Kolonisierung, Hybridbildung bzw. Naturausbeutung und -umwandlung in Verbindung steht, ist nun, wie sich derartig veränderte bzw. neu geschaffene Phänomene in Zukunft entwickeln werden. Es geht damit um die Vorhersagbarkeit und Kontingenz von Systemstrukturen und -funktionen. Konkreter werden damit Problemstellungen der Berechenbarkeit und Kontrollierbarkeit technischer Systeme, der Komplexität und Komplexitätszunahme durch den gesellschaftlichen Kolonisierungsprozess und der Rückkopplungen kolonisierter Systeme auf die menschliche Gesellschaft aufgeworfen.

Im Kontext der seit 2001 durchgeführten Rundgespräche in der deutschsprachigen Geographie hatte der Wiener Workshop im Juli 2005 nun die Aufgabe, derartige Fragestellungen weiterzuerfolgen und speziell unter dem Gesichtspunkt systemtheoretischer Ansätze zu untersuchen. Es wurde diskutiert, ob die Systemtheorie für die „Schnittstellenforschung“ zwischen Physio- und Humangeographie eine ausreichende Diskursplattform bietet. Dass hier ein systemtheoretischer Zugang thematisiert werden sollte, ist aus der naturwissenschaftlichen Sicht des Autors naheliegend und begrüßenswert, da er einen expliziten Bezug zu aktuellen (m. E. paradigmatischen) Debatten in der Geomorphologie herstellen kann (DIKAU 2005). Sie betreffen Fragestellungen des Gleichgewichtes und des Nichtgleichgewichtes geomorphologischer Systeme sowie ihre Rekonstruktion und Vorhersagbarkeit. Weiters greift er Überlegungen und Diskurse auf, die in aktuellen Programmen und Konzepten der sozialökologischen Forschung stattfinden. Zahlreiche Aussagen zum Charakter natürlicher sowie kolonisierter Komponenten des Systems Erde kulminieren hier in der Hypothese ihrer Komplexität, Komplexitätsentwicklung und Komplexitätszunahme. Gekoppelte sozialökologische Systeme zeigen offensichtlich Verhaltensmuster, die auf eine nichtlineare komplexe Dynamik schließen lassen. In Auswahl und plakativ sei dazu auf die Arbeiten von HEYMANN & WENGENROTH (2001), GUNDERSON & HOLLING (2002), BERKES et al. (2003), FISCHER-KOWALSKI & ERB (2003), HAAG & MATSCHONAT (2003), NOWOTNY (2005a, 2005b) und BECKER & JAHN (2006) verwiesen. Bevor jedoch an diesen Problemstellungen mit ausreichender theoretischer Grundlage gearbeitet werden kann, muss einerseits ein Referenzrahmen im Verständnis des materiell-physischen Systems entwickelt werden. Die von GODELIER (1986) genannten Kategorien der materiellen Wirklichkeit differenzieren sich (1) nach dem Grad und Typ der Kolonisierung, (2) der irreversiblen Umwandlung und (3) des Nutzungstyps des natürlichen Systems. Ob Kolonisierung zur Komplexitätsentwicklung bzw. -zunahme führt, erfordert jedoch die Kenntnis des Charakters und des Status des präkolonisierten Systems, das heute allerdings weltweit kaum noch anzutreffen ist. Hier liegt ein analytisches Problem ersten Ranges vor, das es zwingend erforderlich macht, die historische und prähistorische Dimension der Umweltgeschichte, Paläoökologie, Archäologie und Historischen Humanökologie in die Ansätze der sozialökologischen Forschung einzubinden. Andererseits muss geprüft

werden, was in der Sozialökologie unter Komplexität verstanden wird und wie dieser Begriff im Rahmen der Wissenschaft komplexer Systeme rezipiert wird.

Für die geomorphologische Wissenschaft muss die Hypothese des nichtlinearen komplexen Verhaltens sozialökologischer Systeme eine Beschäftigung mit der grundlegenden Frage nach sich ziehen, ob die Systeme der Reliefsphäre, also der Erdoberfläche, durch Prozesse fernab thermodynamischer Gleichgewichte oder durch lineares Gleichgewichtsverhalten charakterisiert sind. Einige Aspekte dieser Dichotomie sollen im vorliegenden Aufsatz diskutiert werden. Von Wichtigkeit ist, dass dabei eher grundlegende Aspekte des Denkens in Kategorien des Komplexen aufgegriffen werden sollen. Bemühungen um empirische Zugänge zur nichtlinearen Komplexität in Bio-Geosystemen sind beispielsweise von PHILLIPS (2003, 2006) und THORNES (1980, 1990) publiziert worden.

Eine von manchen Geomorphologen gegebene Antwort auf die Lösung einer Problemstellung besteht in der Behauptung, dass dies eine „Frage des Maßstabes“ sei. Wir vermuten, dass Gleichgewicht, Nichtgleichgewicht, Stabilität, Instabilität, Chaos oder Selbstorganisation skalenabhängige Systemeigenschaften darstellen. Sie emergieren und verschwinden bei Änderung des Skalenniveaus, in dem das System operiert. Unter Gesichtspunkten der gesellschaftlichen Kolonisierung eines geomorphologischen Systems (z.B. eines Flussbettes durch Mäanderdurchstich oder eines Hanges durch anthropogen verursachte Nutzungsänderung) ist es deshalb von entscheidender Bedeutung, in welcher Raum- und Zeitskala die Kolonisierung erfolgt und in welcher Raum- und Zeitskala das System reagiert. Ein Skalenkonzept der geomorphologischen Raumzeit ist daher von hoher Bedeutung für die Forschungskonzeption in der „Dritten Säule“. Der Autor hat dazu auf tradierte Ansätze der Geomorphologie, die die Grundlage systemtheoretischer Ansätze bilden können, mehrfach hingewiesen (DIKAU 1994, 1999, 2006a, 2006b). Der mehrphasig-polymorphe und polygenetische Charakter der Formen der Erdoberfläche erfordert demnach eine hierarchische Theorie einer zeitlich verorteten räumlichen Gefügetaxonomie und ein skalenbezogenes Methodenspektrum. Es wird behauptet, dass die Geomorphologie der raumzeitlichen Multiskaligkeit nur gerecht werden kann, wenn das methodische Spektrum im Sinne SCHUMMS (1991) sowohl komplementäre reduktionistisch-mechanistische als auch historisch-abduktive Ansätze einschließt (BAKER 1996, HARRISON 1999, RHOADS 2006). Die Letzteren sollen, wie FRODEMAN (1995, 2000) betont, mit großem Selbstbewusstsein gegenüber den ahistorisch-nomothetischen Wissenschaften vertreten werden. Die Skale, in der ein geomorphologisches System operiert, ist also von entscheidender Bedeutung, welche Wirkung eine gesellschaftliche Kolonisierung auf das System haben kann. Eine Verknüpfung des multiskaligen Charakters geomorphologischer Systeme (aber natürlich auch aller anderen kolonisierten Systeme der physisch-materiellen Welt) mit den Skalen des kolonisierenden gesellschaftlichen Systems ist daher von entscheidender analytischer Bedeutung.

Weiter wird in DIKAU (2006a) darauf hingewiesen, dass es unter Gesichtspunkten der geomorphologischen Theorieentwicklung nun ansteht, eine Verknüpfung der Theorie des nichtlinearen, komplexen Systemverhaltens mit der multiskaligen, mehrphasig-polygenetischen Theorie der Erdoberfläche zu erreichen. Einige der dringlichen Fragestellungen betreffen deshalb die folgenden Punkte:

- Effizienz des zyklischen oder episodischen Verhaltens externer Einflussvariablen einer Skale, z.B. des Klimas, auf die subskaligen Ebenen des geomorphologischen Systems
- Strukturelle Folgen systeminterner Organisationsprozesse (Selbstorganisation)
- Zeitlicher Wechsel von Systemgleichgewichten und Nichtgleichgewichten
- Komplexitätserzeugung und Reduktion von Resilienz („resilience reduction“) durch externe Störungen, z.B. durch die menschliche Kolonisierung.

Auf diese Fragestellungen soll im vorliegenden Aufsatz näher eingegangen werden.

2 Geomorphologische Historizität

Die Erdoberfläche bildet zwar die Grenzfläche zwischen bestimmten Sphären des Systems Erde, z.B. zwischen der Lithosphäre und der Atmosphäre, jedoch kann ihre aktuelle Struktur nicht einfach aus den aktuellen Prozessen des Systems Erde abgeleitet werden. Die Erdoberfläche besitzt eine Geschichtlichkeit, d.h. dass sie sich in historischen und prähistorischen Zeiten entwickelt hat und Merkmale dieser Geschichte in sich trägt. Diese Charakteristika umfassen sowohl die Geometrie und Topologie der Reliefform (Geomorphometrie) als auch das die Form aufbauende, geomorphologisch relevante oberflächennahe Material der Lithosphäre. Geomorphologische Historizität impliziert, dass Formungsprozesse einer bestimmten Raumzeit bereits abgeschlossen sein können, wobei ihr geomorphometrischer Ausdruck als Vorzeitform im heutigen Georelief erhalten geblieben ist. Das heutige Georelief kann somit ein mehr oder weniger stark entwickeltes Erbe bzw. Gedächtnis aus früheren Phasen der Formung enthalten, die dazu geführt haben, dass an einem Standort zeitlich sequenziell gebildete Formen angetroffen werden können. Sie bilden ein räumlich verschachteltes, hierarchisches Reliefformenmuster. Formungsprozesse in der Zielskale einer Untersuchung, z.B. der aktuellen Rillenbildung im Regolith eines Hanges (Zeitskale der Genese: Minuten bis Wochen), operieren somit im Kontext der höheren Raumskale, z.B. einem Talhang, dessen (pleistozäne) Genese allerdings nicht der aktuellen Zeitskale zugerechnet werden kann (vgl. Abb. 1).

Diese Eigenschaft geomorphologischer Systeme wird mit den Begriffen Mehrphasigkeit, Polymorphie und Polygenetik bezeichnet. Der phänomenologische Charakter des heutigen geomorphologischen Raumes ist somit ein verschachteltes und hierarchisch strukturiertes, polymorphes Reliefformenmuster als Ausdruck unterschiedlich alter, langer und effizienter Formungsprozesse, die bereits abgeschlossen sein können, wie z.B. die pleistozäne Vereisung Norddeutschlands, oder die immer noch andauern, wie z.B. die fluviale Akkumulation in einer Talau. Für dieses raumzeitliche Phänomen verwendete BÜDEL (1981) den Begriff der „Reliefgeneration“, CHORLEY et al. (1984) führen dafür den Begriff des „Palimpsest“ ein, ROHDENBURG (1971) spricht von „Intensitätsauslese“. Dieser Charakter geomorphologischer Phänomene kann nicht deutlich genug hervorgehoben werden, da er entscheidende Konsequenzen für den geomorphologischen Skalenansatz und die Methodik der Reliefanalytik hat.

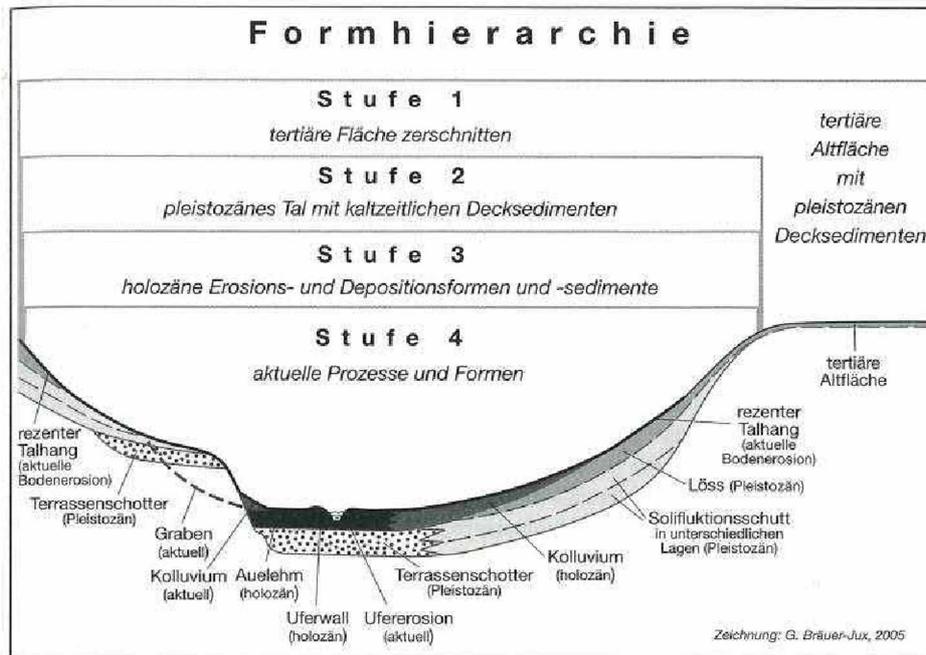


Abb. 1: Räumlich verschachteltes, hierarchisches Reliefformenmuster, das als Relief-generation bezeichnet wird

Das polymorphe Muster ist Ausdruck der mehrphasigen und polygenetischen Entwicklung der Reliefformen. Die tertiäre Altfläche, die in Resten erhalten geblieben ist und pleistozäne Decksedimente trägt (Stufe 1), wurde in der jüngeren Reliefentwicklungsphase des Pleistozäns zerschnitten (Stufe 2) und durch jüngere holozäne (Stufe 3) und aktuelle (Stufe 4) Prozesse und Materialien überformt. Auf diese Weise entstand ein Palimpsest von Reliefformen unterschiedlicher Geometrie, Topologie und stofflicher Zusammensetzung (nach DIKAU 2006b).

3 Skalenabhängigkeit geomorphologischer Systeme

Ein illustratives Beispiel für das Skalenphänomen in Geosystemen liefert PHILLIPS (1999, S. 131) anhand eines multiskaligen Schemas eines Einzugsgebietes mit den Objekten Messplot, Hang, Subeinzugsgebiet und Einzugsgebiet. Auf jeder Ebene der Hierarchie können skalenspezifische Systemeigenschaften und -variablen definiert werden:

Skale des Messplots: Materialeigenschaften, Formeigenschaften, Infiltrationskapazität, Niederschlagsintensität.

Hangskale: Summe aller Messplots – plus Bodenwasserdynamik, Grundwasserhydraulik, Hydraulik des Oberflächenabflusses.

Skale Subeinzugsgebiet: Summe aller Hänge – plus Hang-Talauen-Kopplung, Gerinnehydraulik.

Skale Einzugsgebiet: Summe aller Subeinzugsgebiete – plus Speichereffekte, Netzwerkrouting.

Wenn dieser Skalenhierarchie in Bottom-up-Richtung mit zunehmender Raumscale gefolgt wird, kann die höhere Skale einerseits durch die Summe der Komponenten der Subskale beschrieben werden. Im Sinne der Komplexitätstheorie müssen jedoch andererseits darüber hinaus in höheren Skalen neue Prozesse und Formstrukturen erkannt und berücksichtigt werden, die nicht aus den Prozessen und Eigenschaften der subskaligen Systeme abgeleitet werden können. Derartige Objekte und Eigenschaften bezeichnen wir als emergent. In der evolutionären Erkenntnistheorie wird darunter das Auftauchen neuer Systeme bzw. Systemeigenschaften und die Entstehung des Neuen in der Evolution verstanden (IRRGANG 2001).

Die von PHILLIPS (1999) vorgestellte Skalenkonzeption ist nicht neu und seit Jahrzehnten eine Problemstellung der hydrologischen Modellierung. Neu und konsequenzreich ist das mit „plus“ bezeichnete Hinzutreten von neuen Systemeigenschaften, deren Theorie, Empirie und Modellierung in der Geomorphologie allerdings noch nicht ausreichend vorangetrieben worden ist. Betrachten wir beispielsweise die holozänen Kopplungsprozesse zwischen den in Talauen frei mäandrierenden Flüssen und den Hängen der letzkaltzeitlichen Niederterrassen, so wird deutlich, dass die Mäandermigration eine raum-zeitlich variable Kopplung („connectivity“) von Gerinne und Hang verursacht hat. Gesteuert durch seine interne Dynamik oder durch externe Einflüsse, hat der freie Mäander in bestimmten Phasen des Holozäns bestimmte Bereiche der Niederterrassenböschung kontaktiert, andere jedoch nicht. Eine fluviale Hangunterschneidung und -erosion war jedoch nur in den gekoppelten Konfigurationen des Systems („configurational status“) möglich. Wie wir aus empirischen Studien zu Altmäandern in Talauen wissen, haben sich somit Kopplungs- und Entkopplungszustände durch das Talauensystem bewegt; sie sind raum-zeitlichen Trajektorien gefolgt. Die Sedimentfracht, die der Fluss trug und in die höhere Skale des Einzugsgebietes zu liefern im Stande war, wurde also durch seine Kopplungs- und Entkopplungsgeschichte beeinflusst. Ohne Zweifel ist ein derartiges Systemverhalten nicht aus den Eigenschaften der Mäander- oder Hangskale ableitbar und kann damit auch nicht einem Modellansatz des „upscaling“ unterzogen werden.

4 Geomorphologische Systeme im Gleichgewicht

Die von CHORLEY & KENNEDY (1971) in die Physische Geographie transformierte Allgemeine Systemtheorie beruht auf Konzepten des thermodynamischen Gleichgewichtes. Es basiert darauf, dass in einem System nach einer Veränderung der Randbedingungen oder einer systemexternen Störung durch die stabile Gleichgewichtsdynamik ein neues stationäres Gleichgewicht durch die Wirkung negativer Rückkopplungen erreicht wird. Die Systemveränderungen können zeitlich graduell oder episodisch ablaufen. Durch BRUNSDEN (1990, 1993) und AHNERT (1994) sind Gleichgewichtsansätze in der Geomorphologie ausführlich diskutiert worden. Auch die von CHORLEY & KENNEDY (1971) vorgeschlagene und durch SLAYMAKER (1991, S. 429) weiterverfolgte Klassifikation geomorphologischer Systemtypen beruht auf der Theorie des thermodynamischen

Gleichgewichtes (PHILLIPS 1999, DIKAU 2005). Die Geomorphologie folgte damit den naturwissenschaftlichen Gleichgewichtsparadigmen des 19. und 20. Jahrhunderts. Implizit oder explizit betrachtet daher der Geomorphologe ein geomorphologisches System in einem neuen Gleichgewicht, wenn die Reaktion des Systems auf einen externen Impuls abgearbeitet ist und ein neuer stationärer Gleichgewichtszustand erreicht wird (vgl. Abb. 2).

BRUNSDEN (1990) und BULL (1991) bezeichnen die einzelnen Phasen nach Eintreten der Störung als

- Reaktionszeit („reaction time“),
- Relaxationszeit („relaxation time“),
- Persistenzzeit („persistence time“) und
- Response-Zeit („response time“).

Die Persistenzzeit bezieht sich auf den neuen Gleichgewichtszustand, der sich allerdings auf einem veränderten Niveau, in Abbildung 2 eine veränderte Höhenlage der Talaue, ansiedeln kann. Wenn sich beispielsweise ein fluviales System in einem Gleichgewichtszustand befindet, wird eine Erhöhung des Abflusses aufgrund von Landnutzungs- oder Klimaveränderungen zu einer Reaktion des Gerinnes durch Einschnei-

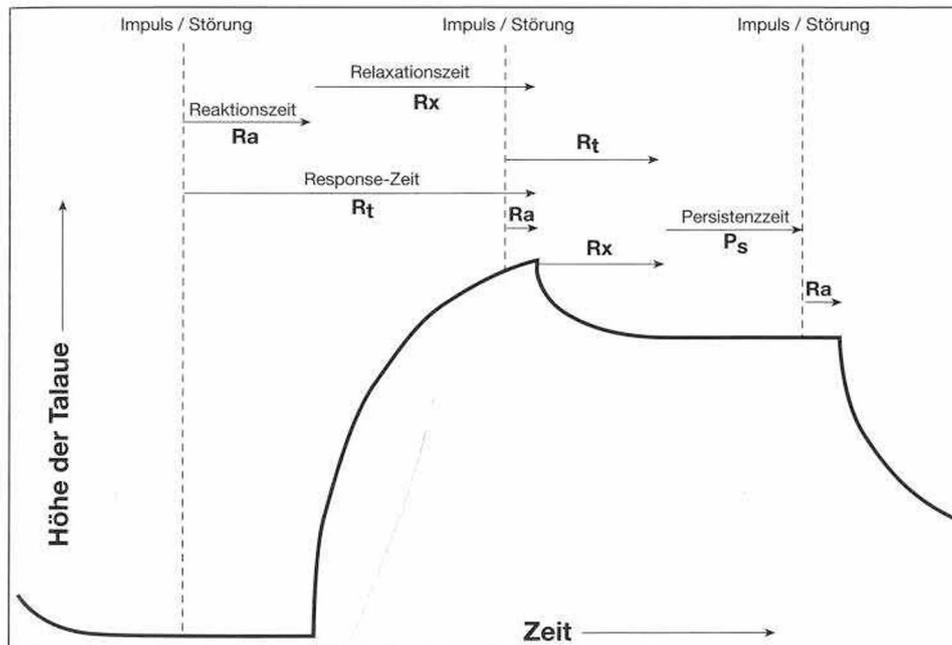


Abb. 2: Schematische Darstellung der Reaktion des geomorphologischen Systems einer Talaue auf externe Störungen

Das System befindet sich in einem thermodynamischen Gleichgewicht und kehrt nach der Störung durch negative Rückkopplungsprozesse wieder in einen Gleichgewichtszustand zurück (nach BULL 1991, verändert).

dung führen. Nach dem Ende der Einschneidung wird ein neuer stationärer Zustand des Systems erreicht, also ein neuer Gleichgewichtszustand, was bedeutet, dass sich die energetischen Eigenschaften des Fluids in einem stabilen Gleichgewicht mit den resistenten Kräften des Gerinnebettes befinden. Weiters impliziert diese Vorstellung, dass ein gleicher Einfluss an allen Lokalitäten des Systems eine gleiche Reaktion nach sich ziehen wird. Dadurch können Prognosemodelle angewendet werden, die den nomothetischen Ansätzen der physikalischen Prozessbeschreibung folgen.

5 Geomorphologische Systeme im Nichtgleichgewicht

„Geomorphic systems are dominantly nonlinear“. Mit dieser Hypothese setzt PHILLIPS (1992) Anfang der 1990er-Jahre eine Debatte in der anglo-amerikanischen Geomorphologie fort, die bereits durch SCHUMM (1973) in anderer Terminologie zwei Jahrzehnte zuvor eröffnet wurde. Diese Debatte führte zwar nicht zu einem Dammbuch bei den Modellen des thermodynamischen Gleichgewichtes, jedoch gewinnt die nichtlineare Dynamik zunehmend an Bedeutung und hat inzwischen in Lehrbüchern der Physischen Geographie und Geomorphologie Einzug gehalten (SCHUMM 1991, HUGGETT 1995, 2003, PHILLIPS 1999, HOLLOWAY et al. 2003, JOHNSTON & WILLIAMS 2003, GOUDIE 2004, STEINHARDT et al. 2005, CASTREE et al. 2005). Neben SCHUMM (1991) und PHILLIPS (2003, 2006) hat sich in Großbritannien vor allem John THORNES (1980, 1990) mit nichtlinearen Systemen beschäftigt und in den Beiträgen THORNES (2003a, 2003b) zusammengefasst.

Im Unterschied zu Gleichgewichtssystemen, die nach einer Relaxationszeit in einen neuen Gleichgewichtszustand zurückkehren, reagieren Nichtgleichgewichtssysteme völlig anders. Hier reagiert das System auf anhaltende kleine Störungen mit dynamischer Instabilität und, im Verhältnis zum Ausmaß der Störung, mit unverhältnismäßig großen und lang anhaltenden Reaktionen. Derartige Systeme zeichnen sich durch eine instabile Gleichgewichtsdynamik aus, d.h. sie besitzen eine chaotische Sensitivität. Gleichgewichtssysteme sind insofern prinzipiell vorhersagbar, als dass eine veränderte Randbedingung, beispielsweise in Form einer Klimaveränderung, zu einer gleichen Reaktion, z.B. einer Flußbetherhöhung im gesamten System, führt. In dynamisch instabilen Systemen können dagegen gleiche Einflüsse räumlich multiple Formen der Anpassung, d.h. Divergenz im Gesamtsystem, hervorrufen. Diese Systemreaktion bezeichnet SCHUMM (1991) als „complex response“.

5.1 Sensitivität

Die Sensitivität geomorphologischer Systeme wurde in zwei umfangreichen Aufsatzsammlungen von THOMAS & ALLISON (1993) und THOMAS (2001) behandelt. Wissenschaftshistorisch interessant ist, dass sich hier innerhalb von nur acht Jahren ein Wandel des Forschungsansatzes von einer Geomorphologie des Gleichgewichtes

(THOMAS & ALLISON 1993) zu einer Geomorphologie des Nichtgleichgewichtes (THOMAS 2001) vollzieht. Für ALLISON (1993) ist ein verbessertes Verständnis geomorphologischer Systeme im Rahmen der globalen Umweltveränderungen nur möglich, wenn der theoretischen und empirischen Bedeutung der Systemsensitivität eine weit stärkere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Sensitivität wird durch BRUNSDEN (1990) (1) als Variationsbreite der Optionen einer Reliefformveränderung verstanden (Veränderungsdivergenz – „divergence of change“) und (2) als Eigenschaft des Systems gesehen, externen Störungen („impulses“) zu widerstehen bzw. diese zu absorbieren. Die Bedeutung der Sensitivität für Ursache-Wirkungsbeziehungen sieht ALLISON (1993) darin, in welchem Ausmaß systemexterne Prozesse die Systemveränderung kontrollieren, beeinflussen und diktieren. Ein Erkenntnismangel wird in nicht ausreichendem Wissen über die Kopplung von Systemkomponenten bzw. Systemeigenschaften gesehen. Im Kern wird der Vorstellung gefolgt, dass das System unter Ausbildung eines neuen Gleichgewichtszustandes dann reagiert, wenn der externe Impuls die durch die Systemsensitivität bestimmten internen Schwellenwerte überschreitet.

Demgegenüber wird in der Aufsatzsammlung „Landscape sensitivity in time and space“ (THOMAS 2001) die Sensitivität von „landscapes“¹⁾ überwiegend in systemtheoretischen Kategorien der nichtlinearen Komplexität behandelt. Auch hier wird auf die bahnbrechenden Arbeiten von SCHUMM (1991) verwiesen, in denen Sensitivität als die Neigung eines geomorphologischen Systems definiert wird, auf geringfügige externe Störungen zu reagieren. Bei THOMAS (2001) wird der dynamische Charakter von Bio-Geosystemen hervorgehoben, die nicht nur durch die gekoppelten bio- und geogenen Komponenten charakterisiert sind, sondern als Masse- und Energiespeicher angesehen werden, die durch Prozesse des Wachstums, des Zerfalls, des Flusses und der Transformation verändert und erhalten werden. Unter diesen Gesichtspunkten wird die Sensitivität gekoppelter Bio-Geosysteme als bedingte („conditional“) Instabilität betrachtet mit der Möglichkeit schneller und irreversibler Veränderungen, die von Störungen durch die das System kontrollierenden externen Umweltprozesse verursacht werden. Weiterhin wird ein Sensivitätstyp thematisiert, bei dem geringste Fluktuationen externer Störungen zu Veränderungen des Gesamtsystems führen können. Derartige Instabilitäten werden als chaotisches Systemverhalten bezeichnet und bilden ein Merkmal der nichtlinearen Komplexität. Als weitere Kriterien und Systemeigenschaften für die Beschreibung der Systemsensitivität benennt THOMAS (2001):

- Selbstorganisation und selbstorganisierte Kritizität („self-organized criticality“; vgl. BAK 1996, PHILLIPS 1999, HERGARTEN 2002);
- Veränderung des Systemstatus („system state“) nach Überschreiten von Schwellenwerten (Statusänderung bezeichnet einen gravierenden Wechsel der Systemdynamik und bedeutet beispielsweise, dass ein fluvialer Akkumulations- in einen fluvialen Erosionsprozess umschlägt);

¹⁾ Auf eine Übersetzung des Begriffs „landscape“ in den Begriff „Landschaft“ wird hier bewusst verzichtet, um nicht in den Strudel einer Grundsatzdebatte zu geraten. Unter „landscape“ versteht THOMAS (2001, S. 83) „complexes of rocks, superficial deposits, soils, plants and animals, together with the landform itself“ und meint damit ein Bio-Geosystem, das aus gekoppelten biotischen und abiotischen Komponenten besteht.

- Zunahme der Komplexität in Bio-Geosystemen im Verlauf ihrer zeitlichen Entwicklung;
- räumlich und zeitlich variable Sensitivität von Bio-Geosystemen (damit ist z.B. das bekannte Phänomen gemeint, dass nur Teilbereiche eines Hanges rutschen können, aber auch, dass gleich große, jedoch zeitlich sequenzielle Niederschläge nicht immer einen Rutschungsprozess nach sich ziehen müssen; vgl. SCHUMM 1991, S. 82).

Zusammengefasst wird festgestellt, dass ein geomorphologisches System durch raum-zeitlich variable Sensitivitäten in einem vierdimensionalen Kontext charakterisiert ist.

5.2 Pfadabhängigkeit

Die zeitlich variable räumliche Konfiguration („configurational status“) des Systems ist das Ergebnis irreversibler Prozesse der Systementwicklung. Unter geomorphologischen Gesichtspunkten wird die Systemkonfiguration aus Komponenten gebildet (Reliefformen, Reliefelemente, Relieffacetten), die geomorphometrisch (geometrisch und topologisch) beschrieben werden können, wie z.B. Flussnetze, die Kaskadenstruktur von Sedimentkörpern (Quellen und Senken), Kiesbänke in Gerinnen, Toposequenzen oder Hangcatenen. Bei der Entwicklung des Systems werden diese Komponenten geomorphometrisch verändert und bilden damit jeweils neue Rahmenbedingungen für das zeitlich nachfolgende Prozessgefüge. Sie beschreiben die Pfadabhängigkeit („path dependence“) der Systementwicklung. Das System strebt nach diesem Ansatz nicht mehr einem Gleichgewichtszustand zu, sondern entwickelt sich (evolviert) entlang von Trajektorien, welche die Richtung der raum-zeitlichen Systementwicklung bezeichnen. Im Grunde wird mit dieser Theorie das aktualistische Axiom der Geowissenschaften hinterfragt, das besagt, dass direkte Rückschlüsse von heutigen Formungsprozessen der Erdoberfläche in die Vergangenheit möglich sind. Die Pfadabhängigkeit besagt weiterhin, dass die Veränderung eines geomorphologischen Systems als Reaktion auf ein externes Ereignis (z.B. der Einfluss von Klima und Gesellschaft) von der Geschichte des Systems und damit von der jeweiligen Konfiguration, auf die das Ereignis trifft, abhängig ist („history matters“). Die analytische Rekonstruktion einer derartigen Systemgenese wird damit erheblich erschwert, da die variable Raumkonfiguration für jeden Zeitschritt bzw. für jede Zeitscheibe rekonstruiert werden muss, was hohe Anforderungen an geeignete Proxydaten und an die rekonstruktive Modellierung stellt.

5.3 Chaos

Systeme, die sensitiv auf geringste Fluktuationen externer Störungen reagieren, werden als chaotisch instabil bezeichnet. Derartige Systeme hängen empfindlich von ihren Anfangsbedingungen ab und sind in zeitlich längeren Skalen nicht vorhersagbar. Bereits Henry POINCARÉ konnte Ende des 19. Jahrhunderts anhand des Dreikör-

perproblems zeigen, dass in physikalischen Systemen (z.B. einem Doppelpendel) chaotisch instabile Trajektorien (Bewegungsbahnen) auftreten können, deren Verlauf von geringsten Abweichungen der Anfangsbedingungen abhängen (für eine ausführlichere Diskussion vgl. KÜPPERS 1996, MAINZER 2004). Dieses als Schmetterlingseffekt bezeichnete Phänomen (kleine Ursache, große Wirkung) wird durch die nichtlineare Dynamik des komplexen Systems verursacht. Derartige Systeme befinden sich fernab thermodynamischer Gleichgewichte in instabilen Zuständen.

Chaos scheint, wie PHILLIPS (2006) behauptet, in Erdoberflächensystemen ein weit verbreitetes Phänomen zu sein, wobei das chaotische Verhalten nicht immer und nicht überall anzutreffen und in geomorphologischen Systemen empirisch nicht einfach nachzuweisen sei. Aus analytischen Gründen schlägt PHILLIPS (2006) daher vor, geomorphogenetische Erklärungen eher über Ansätze der Formenkonvergenz und -divergenz zu entwickeln, die auch in anderen Reliefentwicklungsmodellen Anwendung finden (vgl. BREMER 1989 oder THOMAS 1994). Konvergenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass, bewirkt durch die lange Konstanz formbildender („formative“) Prozesse, im Laufe von Jahrmillionen seit dem Erdzeitalter des Tertiärs aus unterschiedlichsten Initialbedingungen und Prozesstypen flächenhafte Klimaxformen konvergieren („equifinality“), die durch Reliefreduzierung und Einebnung gekennzeichnet sind. Im Gegensatz dazu führt Formungsdivergenz zur relativen Relieferhöhung, d.h. zur Einschneidung, und damit, so THOMAS (2001), zur Erhöhung der räumlichen Komplexität. Mit dieser Dichotomie werden zwei Gleichgewichtsbestrebungen des geomorphologischen Systems in Verbindung gesetzt, wobei Konvergenz ein Gleichgewichts- und Divergenz ein Nichtgleichgewichtsverhalten dokumentieren soll. Das Letztere sei durch historische Kontingenzen, mehrfache potenzielle Entwicklungspfade sowie durch instabile Systemzustände gekennzeichnet. Divergenz entstehe durch die Wirkungen kleinster initialer Bedingungen bzw. kleinster Störungen, deren Effekte im Laufe der Geomorphogenese nicht nur aufrechterhalten, sondern beschleunigt werden. Aus diesem Kontext einer divergierenden Reliefentwicklung ergeben sich folgende Schlussfolgerungen (PHILLIPS 2006):

- Systemstörungen kleiner Magnitude können zu unverhältnismäßig großen Systemreaktionen führen.
- Kurz andauernde Störungen können unverhältnismäßig lang anhaltende Systemreaktionen nach sich ziehen.
- Empirische Befunde von Form- und Materialveränderungen im geomorphologischen System (z.B. Sedimentarchive oder Altflächen) brauchen nicht ein Hinweis auf entsprechende Magnituden von Umweltveränderungen (z.B. des Klimas) oder von externen Einzelereignissen der Störung sein.
- Geomorphologische Systeme können über verschiedene Reaktionstrajektorien bzw. Formen der Anpassung („modes of adjustment to changes“) verfügen.

Die letzte Schlussfolgerung ist für die geomorphologische Forschung von hoher Bedeutung, da sie impliziert, dass die hohe Variabilität kleinskaliger Systemeigenschaften zur Divergenz der Reliefentwicklung in höheren Raumskalen führen kann.

5.4 Selbstorganisation und Synergetik

In komplexen Systemen bewirkt die nichtlineare Dynamik jedoch nicht nur chaotisches Verhalten, sondern kann auch durch Selbstorganisation zur Ordnung, d.h. zu geordneten Strukturen, führen. PRIGOGINE & STENGERS (1981, S. 21) wählen dafür die Bezeichnung dissipative Strukturen, „um die paradoxe Rolle von dissipativen Vorgängen bei ihrer Entstehung hervorzuheben“. Unter Dissipation versteht die klassische Thermodynamik, dass ein offenes Gleichgewichtssystem laufend Energie in Form von Wärmeenergie verliert. Als Beispiel kennen wir die gedämpfte Schwingung eines physikalischen Pendels, bei der die Reibung dem System Energie entzieht. In offenen Nichtgleichgewichtssystemen dagegen entsteht Stabilität, also eine dissipative Struktur, durch den Energie- und Materialaustausch mit der Außenwelt des Systems. Das bedeutet, dass aus ungeordneten Zuständen des komplexen chaotischen Systems wohl organisierte raum-zeitliche Strukturen gebildet werden. Zu erklären sind diese Prozesse durch systeminterne Zirkelkausalitäten zwischen Systemelementen, bei denen die Wirkung einer Ursache als neue Ursache einer folgenden Wirkung auftritt. Entscheidend ist, dass sich die Elemente selbstständig zu funktionsfähigen und wohl geordneten höherskaligen Objekten zusammenfügen. PRIGOGINE & STENGERS (1981) und PRIGOGINE (1992) haben diese in ihrer Tragweite bahnbrechenden Systemeigenschaften an zahlreichen Beispielen aus der Physik, Chemie und Biologie erläutert.

Auch die systemtheoretische Konzeption der „Synergetik“ von H. HAKEN (1981) basiert auf Phänomenen der Selbstorganisation komplexer Systeme fernab thermodynamischer Gleichgewichte. Ausgehend von der Theorie des optischen Lasers, erklärt der Ansatz das Zusammenwirken von Komponenten oder Subsystemen, wie z.B. Atome eines Laserstrahles, Moleküle in chemischen Reaktionen oder Moleküle in Flüssigkeiten, zu makroskopischen Strukturen, wenn die äußeren Systemeinflüsse (Kontrollparameter) verändert werden. Bei der Bénard-Zelle (vgl. HAKEN 1981) erfolgt in einer Wasserschicht durch Temperaturerhöhung eine Konvektionsströmung, die bei einem kritischen Wert der Temperaturdifferenz eine sprunghafte qualitative Ordnung der Bewegung der gesamten Flüssigkeit nach sich zieht. Es entstehen makroskopische Bewegungsrollen, die aus orthogonaler Sicht die Form eines Bienenwabemusters zeigen. Diese Strukturbildung ist so zu verstehen, dass sich in einer Flüssigkeit, die sich als Gesamtsystem in einem thermodynamischen Gleichgewicht befindet (mikroskopisches „graues“ Chaos), bei Änderung der externen Kontrollparameter (hier Energiezufuhr durch Temperaturerhöhung) eine Instabilität in Richtung eines Nichtgleichgewichtes aufbaut. Das System wird chaotisch, hochgradig komplex und damit sensitiv für zufällige Fluktuationen externer Einflüsse, was eine Verringerung der Adaptionfähigkeit an den Gleichgewichtszustand bedeutet. Mit anderen Worten: Durch das Verlassen des Gleichgewichtszustandes wird eine Erhöhung der Sensitivität des Systems im oben diskutierten Sinne bewirkt. Ab einer kritischen Schwelle der Energiezufuhr erfolgt ein qualitativer Sprung in die makroskopische Ordnungsstruktur. Dabei werden immer mehr Moleküle der Flüssigkeit in die Bewegungsrichtung einbezogen. Diesen Vorgang nennt HAKEN (1981) „Versklavung“. Die Entstehung der makroskaligen Struktur aus dem molekularen Chaos wird in der Synergetik als Emergenz bezeichnet. Das System reagiert mit Selbstorganisation, um die zunehmende Komplexität bewältigen zu kön-

nen. Wird die externe Energiezufuhr weiter erhöht, wird die stabile Systemdynamik in Form der Makrostruktur wieder zerstört, die Bénard-Zelle löst sich auf, das System wechselt wieder zurück in das Chaos, d.h. in die turbulente, ungerichtete Bewegung der Moleküle. Dieser qualitative Übergang von einer emergierten Struktur in das Chaos wird als „Phasenübergang“ bezeichnet.

Im Sinne der Beschreibung der Komplexität der Phasen dieses Systems wird deutlich, dass aus einer hochgradig komplexen dynamischen Instabilität eine makroskalige Komplexitätsreduktion emergiert. In der Nähe des qualitativen Sprunges, d.h. des Instabilitätspunktes, verklärt in einer Top-down-Wirkung die Dynamik der Makrostruktur die Dynamik der Mikroebene. Das bedeutet, dass das Verhalten des Gesamtsystems nicht aus einer Bottom-up-Theorie der Wechselwirkung der Elemente des Systems erklärt werden kann, sondern erst durch die Dynamik ihrer Wechselwirkungen. Auch die Synergetik wurde für die Erklärung anderer naturwissenschaftlicher Phänomene erfolgreich herangezogen, etwa für die autokatalytische chemische Reaktion, die Mustererkennung oder für die Erklärung neurologischer oder ökologischer Prozesse (HAKEN & HAKEN-KRELL 1992, MAINZER 2004). Geomorphologische Anwendungen liefern PHILLIPS (1999) und FAVIS-MORTLOCK (2004). Die synergetische Systemkonzeption wird darüber hinaus als brauchbarer Ansatz für die interdisziplinäre Diskussion und für humanwissenschaftliche Systemkonzepte angesehen (KRIZ 1999). Diese Entwicklungslinie führt über das Autopoiesis-Konzept von MATURANA & VARELA (1980) zur Theorie sozialer Systeme von Niklas LUHMANN (1984), über die in diesem Band an anderer Stelle berichtet wird (EGNER 2006).

6 Adaptiver Kreislauf, Panarchie und Resilienz

Im Rahmen der Diskussion forschungsperspektivischer Aspekte der nichtlinearen Komplexität haben sich jüngst zwei deutungsmächtige Geomorphologen zu einem heuristischen Ansatz geäußert, der in der anglo-amerikanischen Ökologie entwickelt worden ist. Dieser Ansatz wird in zwei neueren Publikationen im Hinblick auf seine Brauchbarkeit für die Erklärung geomorphologischer Systeme des Gleichgewichtes und Nichtgleichgewichtes diskutiert (THORNES 2003a, SLAYMAKER 2006). Da dieser Ansatz auch für die Humangeographie und besonders für Forschungen zur „Dritten Säule“ interessant erscheint, soll er hier kurz beschrieben werden.

Basierend auf Arbeiten von HOLLING (1973), ist in dem internationalen Konsortium „The Resilience Alliance“ ein Konzept gekoppelter sozialökologischer („social-ecological“) Systeme entwickelt worden, das in der Sammlung von GUNDERSON & HOLLING (2002) zusammengefasst wird. Darin beschreiben HOLLING et al. (2002) und HOLLING & GUNDERSON (2002) mit dem Begriff des adaptiven Kreislaufes („adaptive cycle“) zeitliche Struktur- und Funktionsveränderungen von gekoppelten sozialökologischen Systemen als Ergebnis der internen Systemdynamik und externer Störungen. Das als „Panarchie“ („Panarchy“) bezeichnete Konzept basiert auf Ansätzen der Populationsdynamik ökologischer Systeme und den zwei grundlegenden Besiedlungsstrategien in

Biotopen, der *r*-Strategie und der *K*-Strategie. Die empirischen Untersuchungsobjekte der Gruppe umfassen Seen, Ozeane, Feuchtgebiete, Wälder, Savannen und Weideökosysteme (vgl. WALKER et al. 2006).

Der adaptive Kreislauf durchläuft vier Phasen. Ihre Entwicklung wird in Form eines Möbiusbandes wiedergegeben (vgl. Abb. 3), das ja eine zweidimensionale Fläche darstellt, die nur eine Seite besitzt. In der ersten Phase „*r*“ (*r*-Strategie – „exploitation“) findet aufgrund hoher Reproduktionsraten von Pionierpflanzen eine schnelle Besiedlung von Ruderalstandorten statt. Das Ökosystem weist hier eine hohe Resilienz auf. In einer darauf folgenden Phase „*K*“ (*K*-Strategie – „consolidation“) erreicht das Ökosystem die Kapazitätsgrenze (Klimaxphase). Durch Konkurrenzdruck und ökologischen Wettbewerb schwächt sich das Nettowachstum ab, das System verliert Resilienz und wird verwundbarer für externe Störungen. Die beiden Phasen *r* und *K* werden als Vorwärtsschleife der Systementwicklung bezeichnet. Eine Störung des Systems, z.B. durch Feuer, Sturm oder Krankheiten, kennzeichnet die Phase „ Ω “ („release“), in der die Systemstruktur in kurzer Zeit kollabiert, allerdings auch neue Möglichkeiten der Systementwicklung eröffnet werden („creative destruction“). In der darauf folgenden Reorganisationsphase „ α “ („reorganisation“) kann sich das Ökosystem neu organisieren, beispielsweise durch freigesetzte Nährstoffe, Kohlenstoff oder Energie,

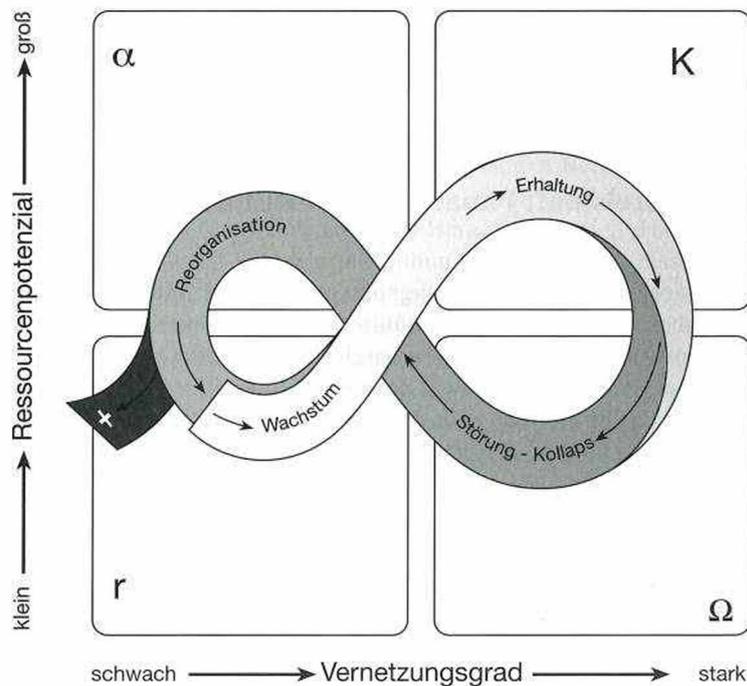


Abb. 3: Der adaptive, sich erneuernde Kreislauf („adaptive renewal cycle“) von HOLLING & GUNDERSON (2002, verändert) beinhaltet vier Phasen der Systementwicklung. Der dunklere Teil des Möbiusbandes bezeichnet die Rückwärtsschleife des Kreislaufes

oder (in Abb. 3 durch ein „x“ markiert) den Kreislauf verlassen und gegebenenfalls in ein weniger produktives oder organisiertes System versetzt werden. Die beiden letzten Phasen werden als Rückwärtsschleife des adaptiven Kreislaufes bezeichnet. Aus der α -Phase kann unter Umständen ein neuer Kreislauf entstehen, d.h. eine neue Waldpopulation heranwachsen. Ob und wie der Kreislauf wieder aufgenommen wird, hängt entscheidend von den Prozessen der α -Phase ab. Wie GUNDERSON & HOLLING (2002) ausführen, durchlaufen zahlreiche adaptive Ökosysteme diese vier Phasen. FOLKE (2006) sieht in diesem Ansatz einen entscheidenden Vorteil, da das Verhalten des Systems hier sowohl durch Instabilitäts- als auch durch Stabilitätsphasen gekennzeichnet werden könne. Der Ansatz zielt darauf ab, dass in bisherigen konventionellen Maßnahmen des Ressourcenmanagements lediglich die r - und K -Phase berücksichtigt würden, indem die Klimaxvegetation als Endstadium der Entwicklung gesehen wird, wobei die (kreative) Destruktions- und Reorganisationsphase, so behaupten die genannten Entwickler des Ansatzes, fast immer ignoriert worden sei. Zerstörung sei also ein Teil von Entwicklung. Perioden gradueller Veränderungen und Perioden sehr schneller Veränderungen befinden sich in einem koexistenten Verhältnis und müssten deshalb als komplementär betrachtet werden.

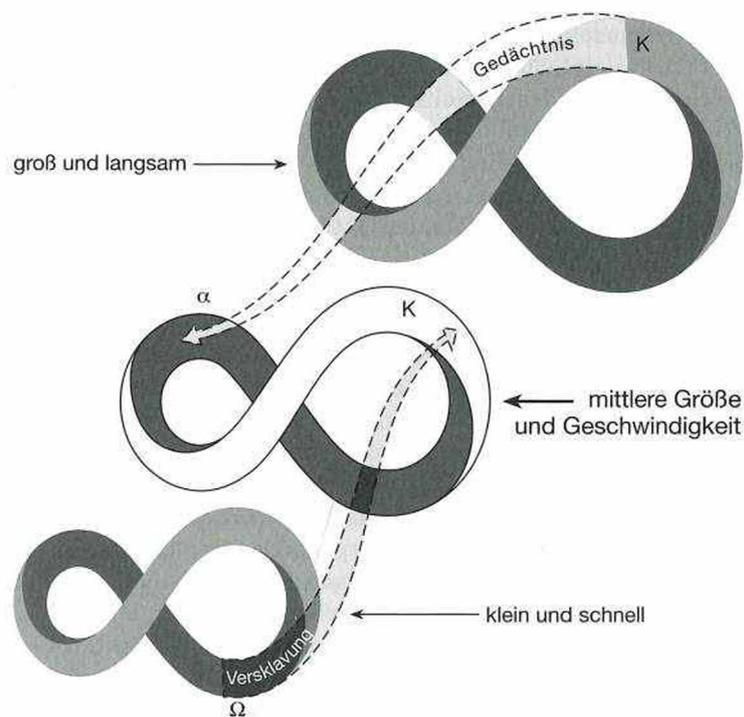


Abb. 4: In unterschiedliche Raum- und Zeitskalen verschachtelte adaptive Kreisläufe. Die funktionale Kopplung zwischen den Kreisläufen bewirkt gegenseitige Störungen bzw. Erneuerungen und Reorganisationsmöglichkeiten der Systeme über kaskadenartige Wirkungsketten (nach HOLLING & GUNDERSON 2002, verändert)

Das von SLAYMAKER (2006) auf das Skalenphänomen von geomorphologischen Sedimenttransportprozessen in Einzugsgebieten übertragene Konzept des adaptiven Kreislaufes hebt besonders auf die Skalenkopplungen der Zyklen ab (vgl. Abb. 4). In der Ökologie sind derartige Skalenbetrachtungen nicht neu. Sie gehen bis in die 1980er-Jahre auf die Arbeiten an hierarchischen Strukturen in Ökosystemen von ALLEN & STARR (1982) sowie von O'NEILL (1988) zurück und beruhen auf dem Ansatz der hierarchischen Skalierung der Dynamik des Kreislaufes durch eine geschachtelte Hierarchie unterschiedlicher Raum- und Zeitskalen. Die Zyklen sind über Skalen gekoppelt, d.h. dass funktionale Interaktionen zwischen langsamen und großen Strukturen mit schnellen und kleinen Strukturen beziehungsweise Prozessen auftreten. So bildet beispielsweise eine Baumkrone die kleinste und schnellste Skale eines Waldsystems, der gesamte regionale Waldbestand die größte und langsamste Skale und die hektargroße Brandfläche die mesoskalige Ebene des Systems. Der Begriff „Panarchie“ beinhaltet, dass zwischen den Skalen sowohl Top-down- als auch Bottom-up-Wechselwirkungen bestehen. Daraus folgt, dass die Dynamik eines Systems nicht verstanden werden kann ohne Berücksichtigung der Dynamik der oberhalb und unterhalb angesiedelten Systeme. Empirische Beispiele für die Anwendung dieses Ansatzes in der sozialökologischen Forschung finden sich in GUNDERSON & HOLLING (2002).

Für die hier behandelte Frage nichtlinearer Komplexität ist die Vermutung nahe liegend, dass die Instabilitäten und Stabilitäten der Schleifen durch Prozesse und Strukturen verursacht werden, die aus anderen Raum- und Zeitskalen des Systems stammen können, was in Abbildung 4 dargestellt wird. So kann beispielsweise die Ω -Phase des subskaligen, schnellen Systems als Störung die K -Phase des langsameren, mesoskaligen Systems versklaven,²⁾ d.h. gegen diese „revoltieren“ („revolt connection“). Die Skalenkopplung zwischen der K -Phase des langsamsten, makroskaligen Systems mit der Reorganisationsphase α des mesoskaligen Systems realisiert sich über das Gedächtnis der höheren Skale („remember connection“), das beispielsweise durch ihre genetische Diversität bestimmt ist.

Genau diese prozessuale Kopplung zwischen unterschiedlichen Skalen hat SLAYMAKER (2006) in seinen Ausführungen zur geomorphologischen Anwendung des adaptiven Kreislaufes im Sinn. Die kleinen und schnell wirkenden Prozesse der Subskale stehen in funktionaler Verbindung mit dem mesoskaligen System, das wiederum im Kontext des Gedächtnisses der höheren Skalen operiert. Ob sich geomorphologische Systeme, ähnlich wie ökologische Systeme, in adaptiven Kreisläufen entwickeln und der Panarchie-Ansatz für ein Verständnis geomorphologischer Phänomene anwendbar ist, bedarf unbedingt weiterer Diskussionen. SLAYMAKER (2006) sieht in Skalenkopplungen geomorphologischer Systeme ein hochbrisantes Forschungsfeld, allerdings bisher auch wenig Fortschritte in seiner theoretischen und empirischen Bearbeitung. Im Sinne der oben diskutierten Emergenz bei selbstorganisierter chaotischer Instabilität erhält der Ansatz allerdings eine wichtige Aussage, auf die THORNES (2003a) hingewiesen hat.

²⁾ Der Begriff „Versklavung“ wird aus dem oben diskutierten synergetischen Ansatz von HAKEN (1981) übernommen, der damit allerdings etwas anderes, nämlich eine Top-down-Eigenschaft bei der Selbstorganisation chaotischer Systeme, beschreibt.

In der Rezeption des Panarchie-Ansatzes legt THORNES (2003a) einen Schwerpunkt auf die geomorphologische Zeitkonzeption, die THORNES & BRUNSDEN (1977) bereits Mitte der 1970er-Jahre entwickelt haben. Weiters hat THORNES (1980, 1990) mehrere Arbeiten zur nichtlinearen Komplexität in fluvialen Systemen sowie gekoppelten biologischen und geomorphologischen Systemen publiziert. Er kritisiert am Beispiel wasserbaulicher Gewässerrenaturierungen, der Tragfähigkeit von Weideökosystemen sowie landwirtschaftlicher Managementpraktiken in den winterfeuchten Subtropen Europas ihre impliziten und expliziten Annahmen stabiler Systemgleichgewichte. Diese vereinfachte Sicht der Systemdynamik führe, so THORNES (2003a), zu einer falschen Bewertung der Vorhersagbarkeit des zukünftigen Verhaltens derartiger Systeme, die heute nicht mehr haltbar sei. Der Ansatz des adaptiven Kreislaufes von GUNDERSON & HOLLING (2002) lege dagegen nahe, dass von menschlichen Aktivitäten beeinflusste Systeme, wie z.B. durch Bodenerosion betroffene Weidewirtschaftssysteme, in hohem Maße durch nichtlineares Verhalten gekennzeichnet seien. Dies bedeute beispielsweise, dass langsam und schleichend ablaufende Prozesse (hohe Frequenz, geringe Magnitude), wie z.B. die Bodenerosion durch Wasser, plötzlich ein damit gekoppeltes höherskaliges System irreversibel schädigen oder zerstören können. „The theories [des Gleichgewichtes, RD] ignore the possibility that the slow erosion of key controlling processes can abruptly flip an ecosystem or economy into a different state that might be effectively irreversible“ (GUNDERSON & HOLLING 2002, S. xxii). Es findet also ein Qualitätssprung im Sinne des oben diskutierten Verhaltens chaotischer Instabilität statt.

Auf die bisherige Argumentation angewendet, hat eine Skalenkopplung von Gleichgewichts- und Nichtgleichgewichtssystemen somit entscheidende Konsequenzen für das Systemverhalten. So kann beispielsweise in fluvialen Sedimenttransportsystemen ein Ereignis geringer Magnitude der Mikroskala, wie z.B. ein Uferabbruch oder die Aufschüttung einer Kiesbank, zu einer nicht prognostizierbaren Reaktion hoher Magnitude in der instabil-chaotischen Mesoskala des Flusses führen. In diesem Fall wäre die Resilienz („resilience“) der Mesoskala zu gering, um die mikroskalige Störung zu absorbieren. Die Ausprägung der Resilienz hat damit im Konzept des adaptiven Kreislaufes eine zentrale Stellung (HOLLING 1973).

BERKES et al. (2003) definieren Resilienz als Systemeigenschaft und -verhalten im Falle einer Störung mit folgenden Eigenschaften:

- 1) die Größe einer Systemveränderung unter Bewahrung der gleichen Kontrollmechanismen für Systemfunktion und -struktur;
- 2) eine Systemveränderung, die innerhalb des gleichen Attraktorraumes im gleichen Systemstatus verbleibt (im oben diskutierten Beispiel der Bénard-Zelle beschreibt der Attraktor den Phasenraum, den das dynamische System in seinen unterschiedlichen Erscheinungsformen einnehmen will);
- 3) der Grad bis zu dem das System zur Selbstorganisation fähig ist;
- 4) das Vermögen eines Systems, eine Lern- und Anpassungsfähigkeit an Störmechanismen aufzubauen oder zu vergrößern.

Damit beschreibt Resilienz die Fähigkeit eines Systems, eine Störung zu absorbieren oder zu puffern, ohne dass im System grundlegende Änderungen seiner funktionalen Charakteristika eintreten (FOLKE 2006, WALKER et al. 2006). Wenn ein Ökosystem eine hohe Resilienz aufweist, kann es den adaptiven Kreislauf mehrfach durchlaufen, ohne zu kollabieren. Von besonderer Bedeutung ist der Störungstyp, der im Falle von Ökosystemen nicht nur natürliche Ursachen wie Waldbrände oder Insektenbefall umfasst, sondern gesellschaftliche Kolonisierungen beinhaltet, wie z.B. den Ressourcenverbrauch von Wasser, Boden und Biodiversität oder die Umweltverschmutzung. Die Reaktion eines Ökosystems auf den Ressourcenverbrauch, z.B. in Form der Bodendegradation, und die Reaktion der Gesellschaft auf die Veränderungen in den Ökosystemen, z.B. eine Verarmung durch verminderte Bodenproduktivität, bilden ein gekoppeltes dynamisches System, das adaptive Verhaltensmuster aufweist (GUNDERSON & HOLLING 2002). BERKES et al. (2003) wenden damit den Begriff der Resilienz auch auf gekoppelte sozialökologische Systeme an. Sie weisen auf die besondere Bedeutung der oben genannten Charakteristika (2) und (3) hin, da der Grad der Resilienz ein zentrales Element davon ist, wie Gesellschaften auf Veränderungen der physisch-materiellen Welt reagieren. Das Anpassungsvermögen der unterschiedlichen hierarchischen Ebenen einer Gesellschaft wird durch die Resilienz ihrer Institutionen und der natürlichen Systeme, von denen sie abhängen, begrenzt. Je größer die gesellschaftliche Resilienz, desto größer ist ihre Fähigkeit, Schocks und Störungen zu absorbieren und sich an die Veränderung anzupassen. Ob sich dieser aus der ökologischen Forschung abgeleitete Resilienzansatz als tragfähig erweist, die sozioökonomische „Säule“ an die sozialökologische „Schnittstelle“ anzukoppeln, kann durch den Autor allerdings nicht beurteilt werden und sollte unbedingt Bestandteil der Fortsetzung unserer interdisziplinären Debatte sein.

7 Abschließende Bemerkungen

„Ein weiterer Punkt, der mich immer fasziniert hat, betrifft die Frage, was passiert, wenn es zwei komplexe Systeme miteinander zu tun bekommen, wenn sie gekoppelt oder in Interaktion treten und nicht die Fähigkeit haben, die Komplexität des anderen im eigenen System zu duplizieren“. Mit dieser interessanten Frage von LUHMANN (2002, S. 178) sollen abschließend einige Problemstellungen aufgeworfen werden, die eine Basis für die Weiterführung unserer Diskussionen über Komplexität in sozialökologischen Interaktionsmodellen bilden könnten. Eine Teilantwort gibt LUHMANN (2002, S. 178) selbst, indem er feststellt, dass selbst vollständig determinierte (!) komplexe Systeme sich in einer Weise gegenseitig beeinflussen, „die unvorhersehbar ist“. Durch diese Aussage, aber auch durch die LUHMANN'sche Definition von Komplexität gestützt (LUHMANN 2002), vermute ich, dass hier ein Komplexitätsbegriff verwendet wird, der sich von der oben diskutierten naturwissenschaftlichen Begrifflichkeit unterscheidet. Trotz meiner bescheidenen Einsichten in die Tiefen der LUHMANN'schen Systemtheorie erscheint es mir, als ob LUHMANN Komplexität im naturwissenschaftlichen Sinne als

lineares Phänomen betrachtet (falls eine derartige Sinnzuschreibung überhaupt zulässig ist). So definiert LUHMANN (2002, S. 173) Komplexität klassisch mit den Begriffen Element und Relation und mit der Annahme, dass „mit der Zahl der Elemente die möglichen Relationen zwischen ihnen überproportional, nämlich in geometrischer Progression zunehmen“. Weiters wird jedoch festgestellt, dass daraus die Konsequenz erwachse, „dass von einer bestimmten Größenordnung ab nicht mehr jedes Element mit jedem anderen verknüpft werden kann und man deshalb Relationen nur noch selektiv herstellen kann“ (S. 173). Darin zeige sich dann eine Schwelle, ab der „einfache Komplexität“ in „komplexe Komplexität“ umschlage (S. 174).

Die plötzliche und schnelle Veränderung eines Systems durch die Potenzierung seiner Prozesse, der Systemkollaps durch die Zerstörung seiner Strukturen und Funktionen, die Transformation des Systemstatus durch kleinste Fluktuationen oder der qualitative Umschlag eines Systemgleichgewichts in ein Nichtgleichgewicht und zurück in ein Gleichgewicht beschreiben Komponenten der Dynamik des Systems Erde, also physisch-materieller Systeme, die durch nichtlineare Komplexität gekennzeichnet sind. Eine Problemstellung der Erdsystemwissenschaften (SCHELLNHUBER & WENZEL 1998, EHLERS & KRAFFT 2006) betrifft deshalb die Frage, ob und mit welcher Zeitverzögerung die durch die Klimaveränderung angetriebene Aktivierung von „Kippschaltern“ im planetarischen System (Schmelze der grönländischen Eismasse, Kollaps des Amazonas-Regenwaldes, Störung des indischen Monsuns) auch in terrestrisch-sedimentären Erdoberflächensystemen (EOS) eintreten wird. Nichtlineare, abrupte Systemveränderungen behauptet auch die Millennium Ecosystem Assessment (2005, S. 1) in ihrem zweiten Befund: „Second, there is established but incomplete evidence that changes being made in ecosystems are increasing the likelihood of nonlinear changes in ecosystems (including accelerating, abrupt, and potentially irreversible changes) that have important consequences for human well-being“. Eine für die geomorphologische Forschung wichtige Problemstellung ist in diesem Zusammenhang darin zu sehen, wie derartige nichtlinear-abrupte Veränderungen der biotischen Komponenten von Ökosystemen mit den geomorphologischen Komponenten rückgekoppelt sind. Hier liegt meines Erachtens eine Perspektive von bio-geomorphologischen Aufgabenfeldern der Disziplin, die es zu stärken gilt.

In der human- und sozialökologischen Forschung wird der Begriff der Komplexität uneinheitlich verwendet, sodass es mir oftmals unklar bleibt, auf welche grundlegenden Kategorien der Komplexitätstheorie Bezug genommen wird. Es erscheint mir daher notwendig, die Ergebnisse und Aussagen des Wiener Workshops in Folgeveranstaltungen um die Themen Komplexität und Kontingenz noch stärker zu gewichten. In einer vergleichenden Diskussion von Geographie und Humanökologie charakterisiert beispielsweise WEICHHART (2004, S. 297) in beiden Disziplinen eine „ganzheitliche Problemwahrnehmung“ mit dem Begriff „Komplexitätsanspruch“ sowie mit der Aussage, dass beide Fächer „mit der erheblichen Gefahr konfrontiert“ seien, „an der Komplexität ihrer Erkenntnisobjekte zu scheitern und in die Falle unangemessener Reduktionismen zu tappen“. Welche Form von Komplexität gekoppelter sozialökologischer Systeme gemeint ist, wird allerdings nicht deutlich. In der Diskussion der Beziehungen zwischen physisch-materieller und sozialer Welt und im Hinblick auf die Gefahren des reduktionistischen Determinismus drückt WEICHHART (2003, S. 22) den

Wunsch der Sozialwissenschaften aus, „das aus den Naturwissenschaften so geläufige Schema eines eindeutigen und determinierten Ursachenzusammenhanges“ auszuschließen. Zweifellos existierten Rückwirkungen zwischen beiden Systemen, jedoch wirke die physisch-materielle Welt nicht „unmittelbar und zwingend auf die soziale Welt ein“, sondern nur in einem bestimmten sozial definierten Kontext. Weiters verweist WEICHHART (2003, S. 23) auf die „grundsätzliche Kontingenz menschlichen Tuns“ und damit auf die Kontingenzbegriffe der Philosophie. Aus der expliziten Sicht der Komplexitätstheorie wird hier vermutlich einem linearen Ansatz der Kopplung beider Systeme gefolgt, da ja in komplexen Systemen keine „kausalen Wechselwirkungen“ im Sinne des reduktionistischen Naturalismus existieren. Dagegen weisen Systeme mit interner Komplexität Kontingenzen auf, das heißt, dass in ihnen, wie KRIEGER (1996, S. 28) erläutert, eine „offene Möglichkeit oder Undeterminiertheit“ existiert. In der Interaktionsforschung der Sozial- und Humanökologie werden Aussagen zur Komplexität als zentrale Eigenschaft gekoppelter Systeme verwendet. HABERL (1999, S. 504) fordert ein Paradigma, das die Komplexität natürlicher und gesellschaftlicher Systeme respektiert und Wechselwirkungen zwischen ihnen zulässt. Der Ansatz des Umwelthistorikers SIEFERLE (1997a, 2002) basiert darauf, dass sowohl der Übergang der Jäger- und Sammlergesellschaften in die Agrargesellschaften vor etwa 8000 Jahren als auch die „große Transformation“ der Agrikulturgesellschaft in die Industriegesellschaft ab dem ausgehenden 18. Jahrhundert zur Komplexitätszunahme der gekoppelten Systeme geführt hat. Diese Komplexitätszunahme sei verbunden mit dem Auftreten dauerhafter Instabilität (z.B. durch konkurrierende Parasiten), Fragilität (z.B. durch künstlich erzeugte Sukzessionsstufen der Nutzpflanzen), Ablösung der „r-Strategie“ durch geringer resiliente „K-Strategien“ (z.B. durch den Getreideanbau) oder durch die Illusion einer rationalen Planbarkeit der „totalen Landschaft“ in der Transformationsära der Moderne, die durch „hohe Mobilität und Komplexität“ (S. 221) gekennzeichnet sei. SIEFERLE (1997b) gibt auch Hinweise auf die „höhere Komplexität differenzierterer Gesellschaften“ und auf die grundlegenden Leistungen des sozial-kulturellen Systems, Komplexität durch „eine Ökonomie des sozialen Handelns“ zu reduzieren (S. 46).

Die Konzeptionen und Theorieversuche der sozialökologischen Forschergruppe um M. FISCHER-KOWALSKI, die am Wiener Workshop mitgewirkt hat, basieren auf den Ansätzen der Kolonisierung natürlicher Systeme und des gesellschaftlichen Stoffwechsels (Metabolismus) (FISCHER-KOWALSKI et al. 1997, FISCHER-KOWALSKI & ERB 2003, FISCHER-KOWALSKI 2004). Den interagierenden gesellschaftlichen und natürlichen Systemen werden in diesen Ansätzen, wie HABERL (1999) feststellt, komplexe, autopoietische Eigenschaften und Verhaltensweisen zugesprochen. Allerdings wird aus den genannten Publikationen der Komplexitätsbegriff des natürlichen Systems nicht deutlich. In ihrem Aufsatz zum gesellschaftlichen Stoffwechsel im Raum und der Suche nach einem sozialwissenschaftlichen Zugang zur biophysischen Realität entwickeln FISCHER-KOWALSKI & ERB (2003) eine sozialmetabolische Perspektive, die in physisch-materieller Hinsicht auf die großen Transformationen des globalen Energiesystems, der globalen Güterflüsse und der globalen Umwelt hinausläuft. Wie oben dargestellt, wird andererseits in globalen Erdsystemen die Möglichkeit nichtlinearer Kippschalter erörtert, die zu abrupten Veränderungen der physisch-materiellen

Systeme führen können. Es ist daher von hohem Interesse, die sozial-metabolischen Konsequenzen derartiger Systementwicklungen zu erörtern. Um in den Worten von FISCHER-KOWALSKI & ERB (2003, S. 282-283) zu bleiben, wäre es somit wichtig, auf sozialökologischer Seite einen Komplexitätsbegriff zu haben, der „epistemologisch und analytisch griffig die Interaktionen zwischen dem sozialen und dem naturalen Systemzusammenhang darzustellen“ in der Lage ist. Diese Fragestellung könnte eine lohnende Thematik bei der Fortsetzung unserer geographischen Rundgespräche bilden. Wie in den Ausführungen dieses Aufsatzes deutlich werden sollte, ist dabei die hohe Bedeutung der Historizität der physisch-materiellen Umwelt, d.h. der Umweltgeschichte, einzubeziehen. Hier gilt es, der „historischen Blindheit“ mancher Natur- und Sozialwissenschaften zu begegnen.

8 Literaturverzeichnis

- AHNERT F. (1994), Equilibrium, scale and inheritance in geomorphology. In: *Geomorphology*, 11, S. 125-140.
- ALLEN T.F.H., STARR T.B. (1982), *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*. Chicago.
- ALLISON R.J. (1993), The sensitivity of landscapes. In: THOMAS D.S.G., ALLISON R.J. (Hrsg.), S. 1-5.
- BAK P. (1996), *How nature works: the science of self-organized criticality*. New York.
- BAKER V.R. (1996), Hypotheses and geomorphological reasoning. In: RHOADS B.L., THORN C.E. (Hrsg.), *The Scientific Nature of Geomorphology*, S. 57-85. Chichester.
- BECK U., BONSS W. (Hrsg.) (2001), *Die Modernisierung der Moderne*. Frankfurt a.M.
- BECK U., BONSS W., LAU C. (2001), Theorie reflexiver Modernisierung – Fragestellungen, Hypothesen, Forschungsprogramme. In: BECK U., BONSS W. (Hrsg.), S. 11-59.
- BECK U., GIDDENS A., LASH S. (1996), *Reflexive Modernisierung*. Frankfurt a.M.
- BECKER E., JAHN T. (2006), *Soziale Ökologie – Grundzüge einer Wissenschaft von den gesellschaftlichen Naturverhältnissen*. Frankfurt a.M.
- BERKES F., COLDING J., FOLKE C. (2003), *Navigating Social-Ecological Systems. Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge.
- BREMER H. (1989), *Allgemeine Geomorphologie*. Berlin.
- BRUNSDEN D. (1990), Tablets of stone: toward the Ten Commandments of Geomorphology (= *Zeitschrift f. Geomorph.*, N.F., Suppl.-Bd. 79), S. 1-37.
- BRUNSDEN D. (1993), The persistence of landforms (= *Zeitschrift f. Geomorph.*, N.F., Suppl.-Bd. 93), S. 13-28.
- BÜDEL J. (1981), *Klima-Geomorphologie*. Berlin.
- BULL W.B. (1991), *Geomorphic Responses to Climate Change*. Oxford.
- CASTREE N., ROGERS A., SHERMAN D. (Hrsg.) (2005), *Questioning Geography*. Blackwell, Malden.
- CHORLEY R.J., KENNEDY B. (1970), *Physical Geography. A Systems Approach*. London.
- CHORLEY R., SCHUMM S.A., SUGDEN D.E. (1984), *Geomorphology*. London.
- DIKAU R. (1994), Computergestützte Geomorphographie und ihre Anwendung in der Regionalisierung des Reliefs. In: *PGM*, 138, S. 99-114.
- DIKAU R. (1999), The need for field evidence in modelling landform evolution. In: HERGARTEN S., NEUGEBAUER H. (Hrsg.), *Process modelling and landform evolution (= Lecture Notes in Earth Sciences, 78)*, S. 3-12. Berlin.

- DIKAU R. (2005), Geomorphologische Perspektiven integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie. In: MÜLLER-MAHN D., WARDENGA U. (Hrsg.), S. 91-108.
- DIKAU R. (2006a), Oberflächenprozesse – ein altes oder ein neues Thema? In: *Geographica Helvetica*, 61, 3, S. 170-180.
- DIKAU R. (2006b), Ursachen von Mehrphasigkeit. In: GEBHARDT H. et al. (Hrsg.), *Geographie – Physische Geographie und Humangeographie*. Heidelberg, Elsevier.
- EGNER H. (2006), Autopoiesis, Form und Beobachtung – moderne Systemtheorie und ihr möglicher Beitrag für eine Integration von Human- und Physiogeographie. In: *Mitt. d. Österr. Geogr. Ges.*, 148, S. 92-108.
- EHLERS E., KRAFFT T. (2006), *Earth System Science in the Anthropocene*. Heidelberg.
- FAVIS-MORTLOCK D. (2004), Self-Organization and Cellular Automata Models. In: WAINWRIGHT J., MULLIGAN M. (Hrsg.), *Environmental Modelling. Finding Simplicity in Complexity*, S. 349-369. Chichester, Wiley.
- FISCHER-KOWALSKI M. (2004), Gesellschaftliche Kolonisierung natürlicher Systeme. Arbeiten an einem Theoriversuch. In: SERBSEER W. (Hrsg.), *Humanökologie. Ursprünge – Trends – Zukünfte*, S. 308-325. Münster.
- FISCHER-KOWALSKI M., ERB K. (2003), Gesellschaftlicher Stoffwechsel im Raum. Auf der Suche nach einem sozialwissenschaftlichen Zugang zur biophysischen Realität. In: MEUSBURGER P., SCHWAN T. (Hrsg.), S. 257-285.
- FISCHER-KOWALSKI M. et al. (Hrsg.) (1997), *Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur*. Amsterdam, Verlag Fakultas.
- FOLKE C. (2006), Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. In: *Global Environmental Change*, 16/3, S. 253-267.
- FRODEMAN R. (1995), Geological reasoning: Geology as interpretative and historical science. In: *GSA Bull.*, 107, S. 960-968.
- FRODEMAN R. (Hrsg.) (2000), *Earth Matters*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- GIDDENS A. (1996), Leben in einer posttraditionalen Gesellschaft. In: BECK U., GIDDENS A., LASH S. (Hrsg.), S. 113-337.
- GODELIER M. (1986), *The Mental and the Material: Thought, Economy and Society*. London.
- GOUDIE A. (Hrsg.) (2004), *Encyclopedia of Geomorphology (2 Bde.)*. London.
- GUNDERSON L.H., HOLLING C.S. (Hrsg.) (2002), *Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington DC.
- HAAG D., MATSCHONAT G. (2003), Paradigmen zur Repräsentation und zum Management komplexer Systeme: Simulationsmodelle und neue Formen der Wissensproduktion. In: BALZER I., WÄCHTER M. (Hrsg.), *Sozial-ökologische Forschung – Ergebnisse der Sondierungsprojekte aus dem BMBF-Förderschwerpunkt*, S. 409-327. München.
- HABERL H. (1999), Kolonisierung der Landschaft: Landnutzung und gesellschaftlicher Stoffwechsel. In: SCHNEIDER-SLIWA R., SCHAUB D., GEROLD G. (Hrsg.), *Angewandte Landschaftsökologie – Grundlagen und Methoden*, S. 491-509. Heidelberg.
- HAKEN H. (1981), *Erfolgsgeheimnisse der Natur. Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken*. Stuttgart, DVA.
- HAKEN H., HAKEN-KRELL M. (1992), *Erfolgsgeheimnisse der Wahrnehmung. Synergetik als Schlüssel zum Gehirn*. Stuttgart, DVA.
- HARRISON S. (1999), The problem with landscape. In: *Geography*, 84, S. 355-363.
- HERGARTEN S. (2002), *Self-Organized Criticality in Earth Systems*. Heidelberg.
- HEYMANN M., WENGENROTH U. (2001), Die Bedeutung von „tacit knowledge“ bei der Gestaltung von Technik. In: BECK U., BONSS W. (Hrsg.), S. 106-121.
- HOLLING C.S. (1973), Resilience and stability of ecological systems. In: *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, S. 1-23.

- HOLLING C.S., GUNDERSON L.H. (2002), Resilience and adaptive cycles. In: GUNDERSON L.H., HOLLING C.S. (Hrsg.), S. 25-63.
- HOLLING C.S., GUNDERSON L.H., LUDWIG D. (2002), In quest of a theory of adaptive change. In: GUNDERSON L.H., HOLLING C.S. (Hrsg.), S. 3-24.
- HOLLOWAY S.L., RICE S.P., VALENTINE G. (Hrsg.) (2003), Key Concepts in Geography. London.
- HUGGETT R.J. (1995), Geoecology. An Evolutionary Approach. London.
- HUGGETT R.J. (2003), Fundamentals of Geomorphology. London.
- IRRGANG B. (2001), Lehrbuch der Evolutionären Erkenntnistheorie. München.
- JOHNSTON R., WILLIAMS M. (Hrsg.) (2003), A Century of British Geography. Oxford.
- KRIEGER D.J. (1996), Einführung in die allgemeine Systemtheorie. München.
- KRIZ J. (1999), Systemtheorie für Psychotherapeuten, Psychologen und Mediziner. Wien.
- KÜPPERS G. (Hrsg.) (1996), Chaos und Ordnung. Formen der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft. Stuttgart.
- LUHMANN N. (1984), Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie. Frankfurt a.M.
- LUHMANN N. (2002), Einführung in die Systemtheorie. Heidelberg.
- MAINZER K. (2004), Thinking in Complexity. Heidelberg.
- MATURANA H., VARELA F. (1980), Autopoiesis and Cognition. Boston, Reidel.
- MEUSBURGER P., SCHWAN T. (Hrsg.) (2003), Humanökologie. Ansätze zur Überwindung der Natur-Kultur-Dichotomie (= Erdkundl. Wissen, 135). Stuttgart.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005), Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC., Island Press.
- MÜLLER-MAHN D., WARDENGA U. (Hrsg.) (2005), Möglichkeiten und Grenzen integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie (= Forum IFL, 2). Leipzig.
- NOWOTNY H. (2005a), The Increase of Complexity and its Reduction: Emergent Interfaces between the Natural Sciences, Humanities and Social Sciences (= Theory, Culture and Society, 22, 5), S. 15-31. London, Sage Publ.
- NOWOTNY H. (2005b), Unersättliche Neugier. Innovation in einer fragilen Zukunft. Berlin.
- O'NEILL R.V. (1988), Hierarchy theory and global change. In: ROSSWALL T., WOODMANSEE R.G., RISSER P.G. (Hrsg.), Scales and Global Change: The temporal variability in biospheric and geospheric processes (= Scope, 35), S. 29-45. Chichester, Wiley.
- PHILLIPS J.D. (1992), The end of equilibrium? In: Geomorphology, 5, S. 195-201.
- PHILLIPS J.D. (1999), Earth Surface Systems. Oxford.
- PHILLIPS J.D. (2003), Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems. In: Progress in Physical Geography, 27, S. 1-23.
- PHILLIPS J.D. (2006), Deterministic chaos and historical geomorphology: A review and look forward. In: Geomorphology, 76, S. 109-121.
- PRIGOGINE I. (1992), Vom Sein zum Werden – Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften. München.
- PRIGOGINE I., STENGERS I. (1981), Dialog mit der Natur. Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens. München.
- RHOADS B.L. (2006), The Dynamic Basis of Geomorphology Reenvisioned. In: Ann. Assoc. of Amer. Geogr., 96, S. 14-30.
- ROHDENBURG H. (1971), Einführung in die klimagenetische Geomorphologie. Gießen.
- SCHELLNHUBER H.-J., WENZEL V. (1998), Earth System Analysis – Integrating Science for Sustainability. Heidelberg.
- SCHUMM S.A. (1973), Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems. In: MORISAWA M. (Hrsg.), Fluvial geomorphology: Proc. of the Fourth Annual Geomorphology Symposium, Binghamton, New York, S. 299-310.

- SCHUMM S.A. (1991), *To Interpret the Earth – Ten Ways to Be Wrong*. Cambridge.
- SIEFERLE R.P. (1997a), *Rückblick auf die Natur – Eine Geschichte des Menschen und seiner Umwelt*. München.
- SIEFERLE R.P. (1997b), Kulturelle Evolution des Gesellschafts-Natur-Verhältnisses. In: FISCHER-KOWALSKI M. et al. (Hrsg.), S. 37-53.
- SIEFERLE R.P. (2002), Unsicherheit, Risiko und Ruinvermeidung. In: WINIWARTER V., WILFING H. (Hrsg.), *Historische Humanökologie – Interdisziplinäre Zugänge zu Menschen und ihrer Umwelt*, S. 151-196. Wien, WUV-Facultas.
- SLAYMAKER O. (1991), Mountain geomorphology: a theoretical framework for measurement programmes. In: *Catena*, 18, S. 427-437.
- SLAYMAKER O. (2006), Towards the identification of scaling relations in drainage basin sediment budgets. In: *Geomorphology*, 80, S. 8-19.
- STEFFEN W. et al. (Hrsg.) (2002), *Challenges of a Changing Earth*. Proc. of the Global Change Open Science Conf., Amsterdam, 10-13 July 2001 (= IGBP Book Series). Heidelberg.
- STEINHARDT U., BLUMENSTEIN O., BARSCH H. (2005), *Lehrbuch der Landschaftsökologie*. Heidelberg, Elsevier Spektrum Akad. Verlag.
- THOMAS D.S.G., ALLISON R.J. (Hrsg.) (1993), *Landscape Sensitivity*. Chichester.
- THOMAS M.F. (1994), *Geomorphology of the Tropics*. Chichester.
- THOMAS M.F. (2001), Landscape sensitivity in time and space – an introduction. In: *Catena*, 42, (= *Catena Special Issue on Landscape Sensitivity*), S. 83-98.
- THORNES J.B. (1980), Structural instability and ephemeral channel behaviour (= *Zeitschrift f. Geomorph.*, N.F., Suppl.-Bd., 39), S. 136-152. Stuttgart.
- THORNES J.B. (1990), The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes. In: THORNES J.B. (Hrsg.), *Vegetation and Erosion*, S. 41-53. Chichester.
- THORNES J.B. (2003a), Time: Change and Stability in Environmental Systems. In: HOLLOWAY S.L., RICE S.P., VALENTINE G. (Hrsg.), S. 131-150.
- THORNES J.B. (2003b), Geographers and environmental change. In: JOHNSTON R., WILLIAMS M. (Hrsg.), S. 505-519.
- THORNES J.B., BRUNSDEN D. (1977), *Geomorphology and Time*. London.
- WALKER B. et al. (2006), A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems. In: *Ecology and Society*, 11, 1, 13 – <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art13/>
- WEICHHART P. (2003), Gesellschaftlicher Metabolismus und Action Settings. Die Verknüpfung von Sach- und Sozialstrukturen im alltagsweltlichen Handeln. In: MEUSBURGER P., SCHWAN T. (Hrsg.), S. 15-44.
- WEICHHART P. (2004), Gibt es ein humanökologisches Paradigma in der Geographie des 21. Jahrhunderts? In: SERBSER W. (Hrsg.), *Humanökologie. Ursprünge – Trends – Zukünfte*, S. 294-307. Münster.
- WEICHHART P. (2005), Auf der Suche nach der „dritten Säule“. Gibt es Wege von der Rhetorik zur Pragmatik? In: MÜLLER-MAHN D., WARDENGA U. (Hrsg.), S. 109-136.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 2006

Band/Volume: [148](#)

Autor(en)/Author(s): Dikau Richard

Artikel/Article: [Komplexe Systeme in der Geomorphologie 125-150](#)