E R D K U N D E

Band 47, Heft 1 Boss-Verlag, Kleve März 1993

RISSE IN DER GEOÖKOLOGISCHEN REALITÄT

Chaos und Ordnung in geoökologischen Systemen

Mit 12 Abbildungen

CHRISTA KEMPEL-EGGENBERGER

Summary: Cracks in geoecological reality: chaos and order in geoecological systems

Complexity provides the fundamental problem in modelling a geoecosystem. The problems discussed in this paper concern the methods of "traditional" complex site analysis with its conceptual model "Standortregelkreis", the basic tool within landscape analysis. Objects in question are transport and changeover of solutes in the test-area HFJ. First results show the schismatic character of geoecological reality as not being represented in the model.

The geoecological model discussed takes the theory of attaining steady states as a basis. Statistical characteristics and site balances help to approach this "normal" deterministic-mechanistic dynamic of geoecosystems here visualized in the regularity of seasonal cycles. Focusing events and scenarios offer an opposite reality. Discontinuity of solute transport and chaotic behaviour far from equilibrium are emphazised. Time series characteristics which obviously sign complexity make single events singular. A steady succession of phases with different correlation structure not being included in the model makes the real deposition situation and stability of the HFJ test-area uncertain.

Chaos theory established phase-space analysis, which is supposed to solve this methodical and real conflict of space and time. Even most simple two dimensional phase-space pictures constructed on HFJ datas show additional information on the complexity of solute transport. Serious data processing with phase-space techniques is believed to lead the deadlocked process-correlation model "Standortregelkreis" to a handy basis for a future simulation model to work with in geoecology.

1 Einleitung

Im Zeitraum 1986–91 wurden im Testgebiet HFJ (Hoher Faltenjura) Daten erhoben mit dem Ziel, ein geoökologisches Modell des Stoffumsatzes zu erarbeiten. Vorgegangen wurde nach dem Konzept der „Landschaftsökologischen Komplexanalyse", die in den letzten 20 Jahren von der Forschungsgruppe Geoökologie und Bodenerosion am Geographischen Institut der Universität Basel angewandt und weiterentwickelt wurde. Ein zentraler Arbeitsschritt der Landschaftsökologischen Komplexanalyse ist die „Komplexe Standortanalyse" mit dem Konzeptmodell „Standortregelkreis" (Abb. 1; LESER 1975, 1987, 1991; MOSIMANN 1984).

Ein nach wie vor aktuelles Anliegen ist die Überführung des statistisch-mathematisch gefüllten Standortregelkreises in eine geoökologisch realistische Simulationsstufe (LESER 1991). Die Regelkreise HFJ wurden auf der Datenbasis 1986–89 mit Bilanz-Werten gekennzeichnet und auf statistisch signifikante Funktions-Zusammenhänge reduziert. Versuchte Validierungen dieser Modellbasis anhand von Messungen und Feldbeobachtungen aus dem Jahr 1990 brachten hervor, daß zentrale Systemeigenschaften der „Geoökologischen Realität"[1], wie z. B. Belastbarkeit und Stabilität, so nicht erfaßt sind.

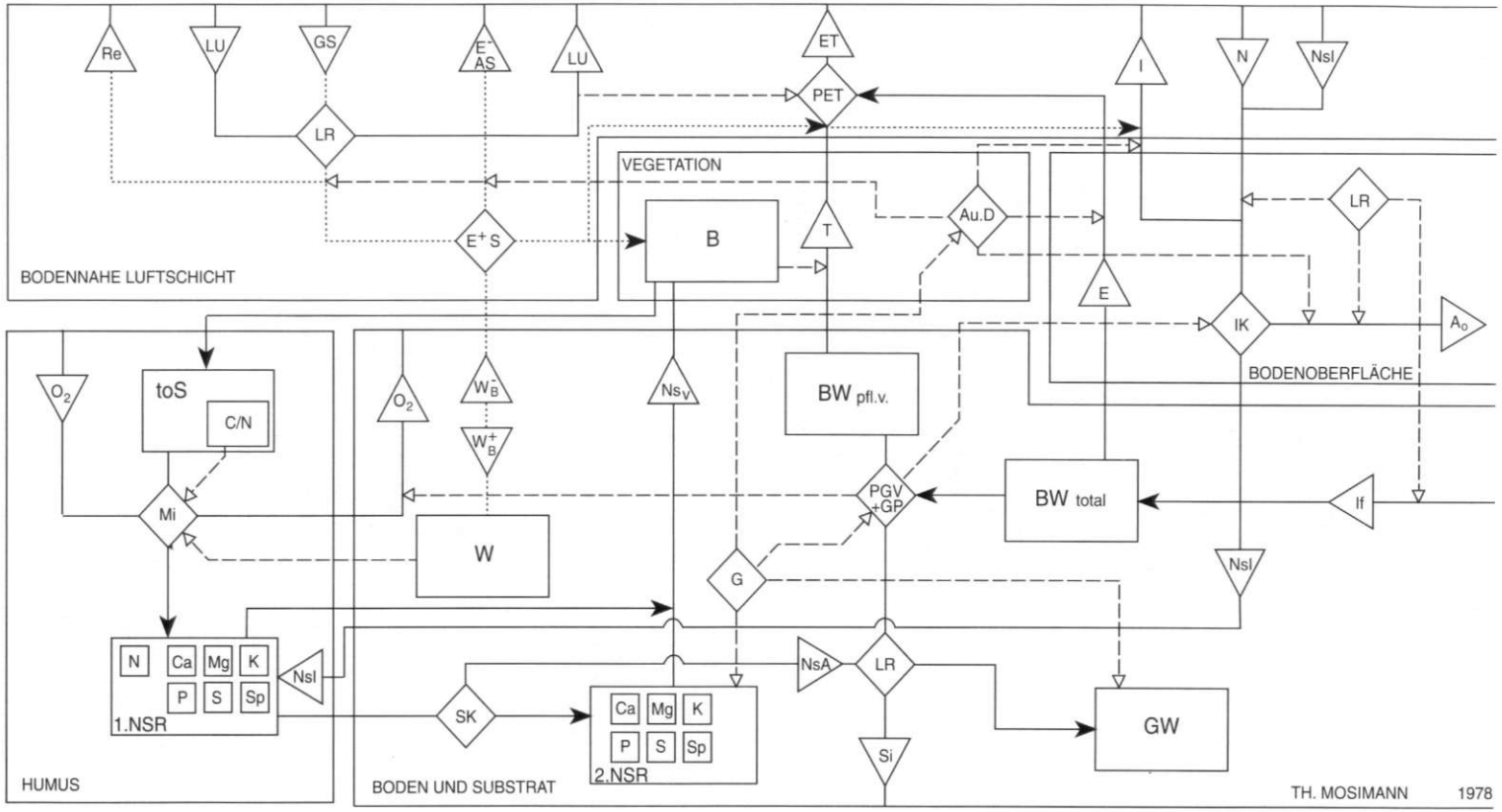
Die Hauptursache dieses Scheiterns wird von der Verfasserin darin gesehen, daß die Bedeutung des individuellen Einzelereignisses in seiner zeitlichen Abhängigkeit nicht berücksichtigt ist. So zeigt der Zeitverlauf von Variablen an Standorten, die wenig griffig als „relativ stabil" gegenüber der gemessenen Deposition eingestuft wurden, eigentümliche „Ausreißer-Muster". Solche Risse, die das System Stoffumsatz in verschiedene Phasen gliedert, sind denn auch der Anlaß zu diesem Aufsatz.

2 Das Konzept HFJ: Problemstellung, Arbeitshypothese und statistische Reduktion

Das Testgebiet HFJ ist das 2,1 km² große Einzugsgebiet des Schwangbaches im schweizerischen Faltenjura, einem polygenetischen Kalk-Mittelgebirge. Es liegt 25 km südlich von Basel. Das Testgebiet greift in eine tektonisch komplizierte Faltenstruktur. Daraus resultieren (Abb. 2):

1. Topographische Asymmetrie: Eine quer durchs Einzugsgebiet verlaufende, bewaldete Kalkstufe ist das morphologische Kennzeichen des Testgebietes schlechthin. Sie trennt eine hochgestellte, in geologisch anstehenden Tonen und Mergeln verlaufende, exponierte Zone vom Hangbereich und Talausgang.

[1] Der Begriff „Geoökologische Realität" der Landschaft stellt nach LESER (1984, S. 24) die Geoökodynamik in den Vordergrund.



SPEICHER:

BW total	totaler Bodenwassergehalt
BW pfl.v.	pflanzenverfügbares Bodenwasser
GW	Grundwasserkörper am Standort
B	Biomasse
toS	tote organische Substanz
W	Bodenwärme
1.NSR	Humusnährstoffreservoir
2.NSR	Bodennährstoffreservoir
Sp	Spurenelemente

REGLER: ------▷

LR	Lage im Relief
G	Gründigkeit
Au.D	Art und Dichte der Vegetation
PET	potentielle Evapotranspiration
E^+S	standortverfügbare Strahlungsenergie
PGV+GP	Porengrössenverteilung und Gesamtporenraum
Mi	Mineralisierungsrate
IK	Infiltrationskapazität
SK	Sorptionskapazität
C/N	C/N-Verhältnis

PROZESS:

N	Niederschlag
I	Interzeptionsverlust
E	Evaporation
T	Transpiration
ET	Evapotranspiration
GS	Globalstrahlung
Re	reflektierter Strahlungsanteil
E^-AS	Energieverlust durch Ausstrahlung
LU	totaler Luftmassenumtausch
Nsl	Nährstoffinput
Ns A	Nährstoffauswaschung
Ns_V	Nährstoffaufnahme durch die Vegetation
A_o	Oberflächenabfluss
Si	Sickerwasser
If	Interflow
O_2	Bodenluftumsatz
W_B^+	Wärmestrom in den Boden
W_B^-	Wärmeabgabe in die Atmosphäre

·····➤ Umsatz von Energie
——➤ Umsatz von Stoffen

Abb. 1: Das Konzeptmodell „Standortregelkreis"
Quelle: Mosimann 1978, S. 357
The „Standortregelkreis" conceptual model

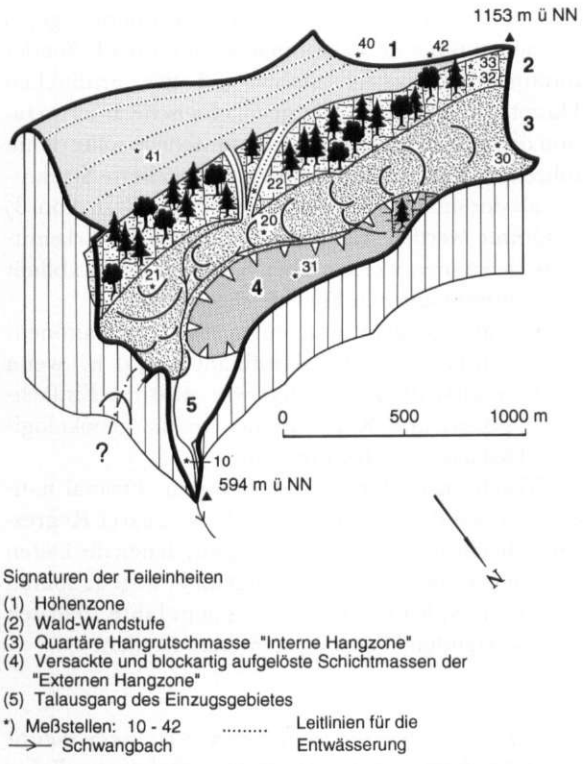


Abb. 2: Schematisiertes Blockbild des Testgebietes HFJ
Main features of the HFJ test area

2. Morphologische Heterogenität: Eine mächtige, solifluidal umgelagerte Rutschmasse baut die zentralen Hangzonen auf. In ihr sind die gesamte jurassische Stratigraphie und Verwitterungsrückstände von Bodenbildungen, die wahrscheinlich bis ins Tertiär zurückzuverfolgen sind, begraben.
3. Differenzierte Entwässerung: Geologische Schichtgrenzen sind nur für die Höhenzone die Leitlinien der Entwässerung. Die Heterogenität der Hangmassen resultiert in einer stark ausgeprägten Aufspaltung der Sickerfront in verschiedene Fließwege variabler Beteiligung.
4. Das Ausmaß der Verkarstung im geologischen Untergrund ist unbekannt.

Untersuchungsgegenstand ist Wasser als Stoffträger. Das Konzept wurde mit den Hypothesen angegangen, daß eine Beziehung zwischen Niederschlagsprozeß als Stoffeintrag und Stoffumsatz im Boden besteht und daß die räumliche Differenzierung dieser Beziehung Belastung, Belastbarkeit und Stabilität des Testgebietes beschreibt. Abbildung 3 zeigt die Übersetzung der Hypothesen in ein Regelkreis-Modell. Am Beispiel des Partialkomplexes Deposition (DEPO) wird gezeigt, wie die Vielfalt der Zusammenhänge nach dem Prinzip der Überschaubarkeit und Meßbarkeit der Elemente als Regelkreis-Struktur reduziert wurde.

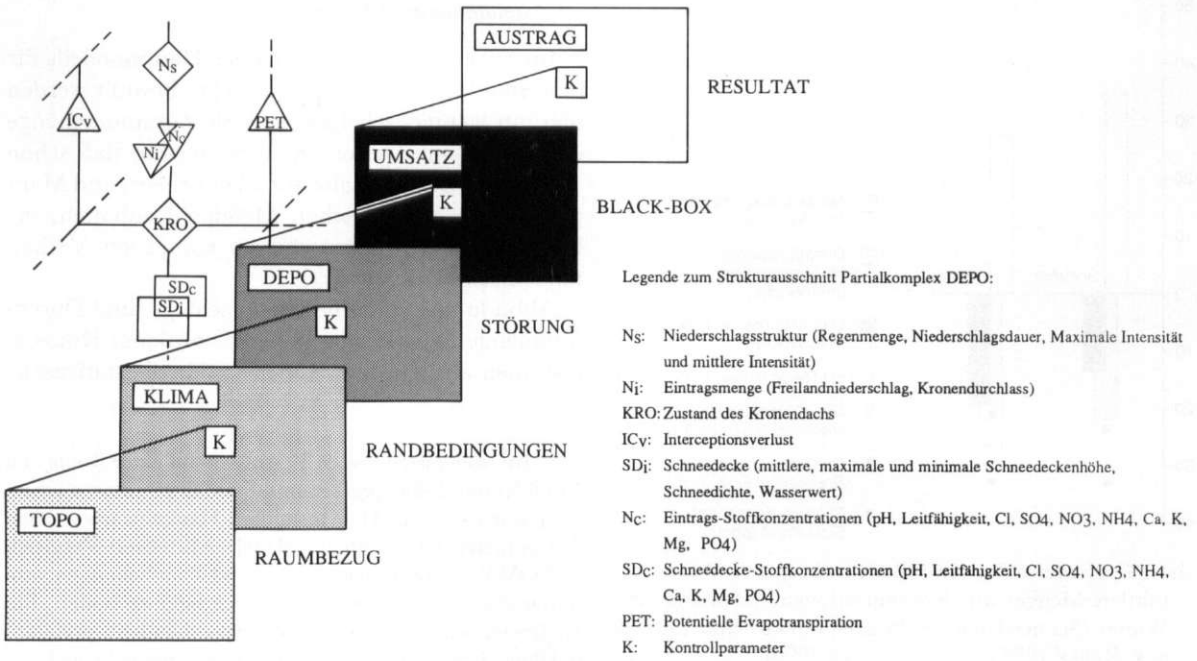


Abb. 3: Das Regelkreis-Konzeptmodell HFJ: Wasser als Stoffträger
The conceptual model of the HJF feedback system: transport and changeover of solutes

Es gibt grundsätzlich zwei Methoden, Regelkreise zu quantifizieren: 1. Physikalische Modelle mit numerischer Algorithmus-Approximation mittels Differentialgleichungen, oder 2. Statistische Modelle. Die Meßrealität HFJ schließt eine physikalisch-mathematische Datenverarbeitung von vornherein aus. Zu viele Bedingungen konnten nicht oder nur ungenau erfaßt werden – die unterschiedliche Rasterung der Partialkomplexe in Abbildung 3 zeigt den relativen Grad der erreichten Vollständigkeit und Qualität der Messungen zwischen White Box AUSTRAG am Ausgang des Einzugsgebietes und Black Box UMSATZ im Boden.

Ein Ziel bei der statistischen Verarbeitung der geoökologischen Datenflut war zu verhindern, daß mit Rücksicht auf die unzähligen Wechselwirkungen und Einzelsachverhalte das Resultat als unüberschaubare, kaum raumbezogene Reihung von zufällig signifikanten Einfach-Regressionen und Korrelationen dasteht. Deshalb wurde die statistische Modellstruktur in 3 formal und inhaltlich unterschiedliche Teile gegliedert:

1. Hauptmodelle: Nach einer qualitativen Vorauswertung wurden zentrale Regelkreisstrukturen mit multiplen Ansätzen für Sommer und Winter getrennt ganzheitlich angegangen. In der Regel handelte es sich aufgrund der Kollinearität der unabhängigen Variablen um eine Faktoranalyse mit anschließender multiplen Regressionsanalyse auf den ermittelten Hauptkomponenten. Die geoökologische Interpretation dieser übergeordneten Hauptmodelle sollte dahin führen, daß raumdifferenziert eng korrelierte Strukturen als dominante Kontrollparameter („K" in Abb. 3) bestimmt werden konnten. Damit sollten Erkenntnisse gewonnen werden über Stabilität und Labilität der wahrscheinlichen Fließgleichgewichte.

2. Lineare Einfachregressionen und Korrelationen: Wenn ein Hauptmodell signifikant war, d. h., wenn die Gesamtstruktur bestätigt war, wurden Einfachregressionen und Korrelationen in die geoökologische Diskussion aufgenommen.

3. Gleichungssysteme für Prognosen: Formal handelte es sich dabei meistens um Sets linearer Regressionsgleichungen. Die Gleichungen, denen die Daten des Zeitraumes 1986–1989 zugrunde liegen, sollten dazu dienen, Meßergebnisse aus dem Jahre 1990 den zu erwartenden Werten gegenüberzustellen.

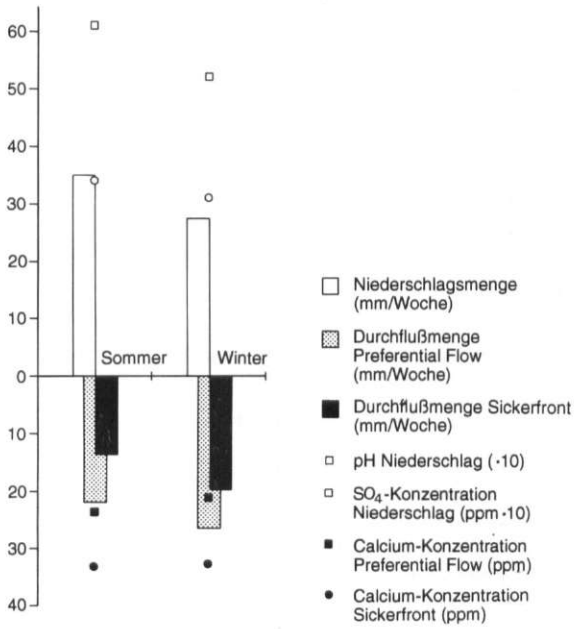


Abb. 4: Niederschlag und Bodenwasser bei Weide 20: mittlere Mengen und Konzentrationen im Sommer und Winter (Schneedaten der Winter 1986/87 und 1987/88 aus: Reber 1988 bzw. Dettwiler 1990)

Precipitation and soil water at Weide 20: average amounts and concentrations during summer and winter

3 Erste Resultate: der Antagonismus zwischen statistischem Fließgleichgewicht und der geoökologischen Bedeutung eines Ereignisses

3.1 Die „normale Dynamik": Jahreszeitlicher Wandel der Fließgleichgewichte als statistische Grundlage für eine Simulationsmodellierung

Im folgenden wird ein Teil des Hauptmodells für den Standort Weide 20 vorgestellt. Bewußt werden hier nur wenige, scheinbar triviale Zusammenhänge dargestellt, um weiter unten zu zeigen, daß schon „einfache" Sachverhalte mit allen Fehlern und Mängeln, die geoökologischen Meßdaten anhaften, die hier diskutierten Eigenschaften komplexer Verhaltensweisen beinhalten.

Abbildung 4 zeigt die Niederschlags- und Durchflußmengen zusammen mit den mittleren Konzentrationen ausgewählter Ionen[2]. Für die statistische

[2] Im Meßgarten Weide 20 wurden auf einer Breite von 8 m 6 Keramik-Saugkerzen unterhalb des humosen Oberbodens in ca. 20 cm Tiefe installiert. Hangabwärts wurden 3 Lysimeter eingegraben. Mittels Mittelwert-Vergleich (ANOVA) wurden nach den Modellvorstellungen von Skopp et al. (1981) verschiedene Fließregionen isoliert. Ein Lysimeter wurde so im schnell ansprechenden „preferential flow" bzw. Makroporenbereich, das andere in der langsamen „Sickerfront" bzw. im Mikroporenbereich angesiedelt.

Ermittlung einer möglichen Sensibilität des Stoffumsatzes im Boden gegenüber der Deposition wurde aus dem Verhältnis der Summe der Säurebildner zu der Summe der Kationen der Parameter „Ionenstatus des Niederschlagswassers" gebildet. Bei Weide 20 wird dieser Ionenstatus im wesentlichen durch die Dynamik der Calcium- und Sulfatkonzentration im Niederschlag dominiert. Mit dem Hauptmodell für den Stoffhaushalt des Niederschlags wurden für Calcium und Sulfat signifikante Unterschiede in den Beziehungen zu ausgewählten Klimaparametern nachgewiesen[3]. Im Vorfeld des Hauptmodells „Standortdisposition" wurden nonparametrische Korrelationstabellen nach SPEARMANN aufgestellt, wobei die Konzentrationen der Ionen in der Bodenlösung mit externen (Ionenstatus, Niederschlagsmenge) und internen Faktoren (Durchflußmengen, Bodenfeuchte, Bodentemperatur) korreliert wurden. Folgende Teilresultate werden hier vorgestellt:

1. Die nach Sommer und Winter getrennt durchgeführten Korrelationen zwischen Wochenwerten der Niederschlags- und Durchflußmengen waren signifikant.
2. Zwischen Stoffhaushalt des Niederschlags und Konzentrationsentwicklung im Bodenwasser konnte kein signifikanter Zusammenhang ermittelt werden.

Die geoökologische Interpretation zielt dahin, daß der dominante Kontrollparameter für das Fließgleichgewicht zwischen Eintrag und Umsatz am Standort Weide 20 das Niederschlagsregime ist. Die Konzentrationsentwicklung in der Bodenlösung andererseits verhält sich stabil gegenüber der Säure-Belastung durch den Niederschlagsprozeß[4]. Bestimmend sind offensichtlich die sogenannten „Tailing-Effekte": Je weniger die Bereiche unterschiedlicher hydrodynamischer Eigenschaften kommunizieren, z. B. durch Austrocknung, desto mehr unterscheiden sich die stofflichen Eigenschaften der Bodenwasserbereiche, desto größer ist die stoffhaushaltliche Heterogenität (ROTH 1989).

Die in Hauptmodellen mit multiplen, linearen Ansätzen angegangenen Fließgleichgewichte ließen sich für einige Standorte geoökologisch interpretieren und als Regressionsgleichungen für Sommer und Winter formalisieren. Bald stellte sich jedoch heraus, daß nur wenige der Hauptmodelle signifikant waren. Auch Standortunterschiede in den ermittelten Funktionszusammenhängen ließen sich mit statistischen Tests kaum nachweisen. Außerdem erwies sich die geoökologische Interpretation des sehr häufig vorkommenden Resultats „nicht signifikant" als schwierig. Schließlich wurden die Meßergebnisse des Jahres 1990 den Werten gegenübergestellt, die nach den auf der Datenbasis 1986–1989 ermittelten Funktionszusammenhängen zu erwarten waren. Die Unvollständigkeit der Modellbasis wurde offensichtlich: Es zeigte sich, daß die zentrale Frage „wie funktioniert die Stabilität des Testgebietes, wo liegen die Grenzen der Belastbarkeit" unbeantwortet blieb.

3.2 Die „chaotische" Dynamik: Diskontinuität, Extremereignisse und labiles Ungleichgewicht auf der Ereignisebene

Ausschlaggebend für eine vertiefte Ereignisanalyse war die Beobachtung, daß sich die Geoökologische Realität vereinzelt in extremem Widerspruch zu der statistisch formulierten Modellbasis befand. Die Auflösung in Einzelereignisse zeigt denn auch, daß jedes Ereignis eine kleine komplexe Katastrophe ist, welche die vorhergehenden Katastrophen überlagert und fortwährend ändernde Bedingungen für alle Faktoren schafft. In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt der Daten aufgezeichnet, welche dem obigen Beispiel zugrunde liegen. Hier ist die Diskontinuität des Stoff-„flusses" die typische Eigenschaft: Das auffälligste Merkmal des Prozeßablaufs ist der irreguläre, abrupte Wechsel zwischen den Phasen „Wasser fließt" und „kein Massentransport". Dieser Aspekt führt über die Schwellenwertproblematik auch zur zentralen Frage nach der Stabilität des betrachteten Geoökosystems gegenüber der Belastung durch Niederschläge.

Zurück zum oben aufgeführten Beispiel zum angestrebten Fließgleichgewicht zwischen Eintrag und Umsatz im Boden beim Standort Weide 20. Abbildung 6 zeigt das Extremereignis „Regen-auf-Schnee". Vom 23.–31. März 1988 fällt eine beträchtliche, säurebelastete Regenmenge und verursacht die Abschmelzung der gesamten, belasteten Schneedecke. Das „normale", stabile Ionenverhältnis in der Bodenlösung der langsam fließenden Sickerfront bricht zusammen: Die Calciumkonzentration stürzt

[3] Das Modell berücksichtigt als unabhängige Variablen Strömungsverhältnisse in der Atmosphäre, Anzahl niederschlagsfreier Tage, Niederschlagsmenge, -dauer, -intensität und Frontart. Nach einer Faktoranalyse wurde für Calcium und Sulfat als abhängige Variablen auf 5 Hauptkomponenten eine multiple Regression durchgeführt. Mit multivariaten Tests wurden die Slopes der beiden Modelle verglichen.

[4] Dieses Resultat stimmt denn auch mit den Auswertungen der Bodenanalysen überein, wonach der Boden beim Standort Weide 20 in den Carbonat-Pufferbereich eingeordnet werden kann.

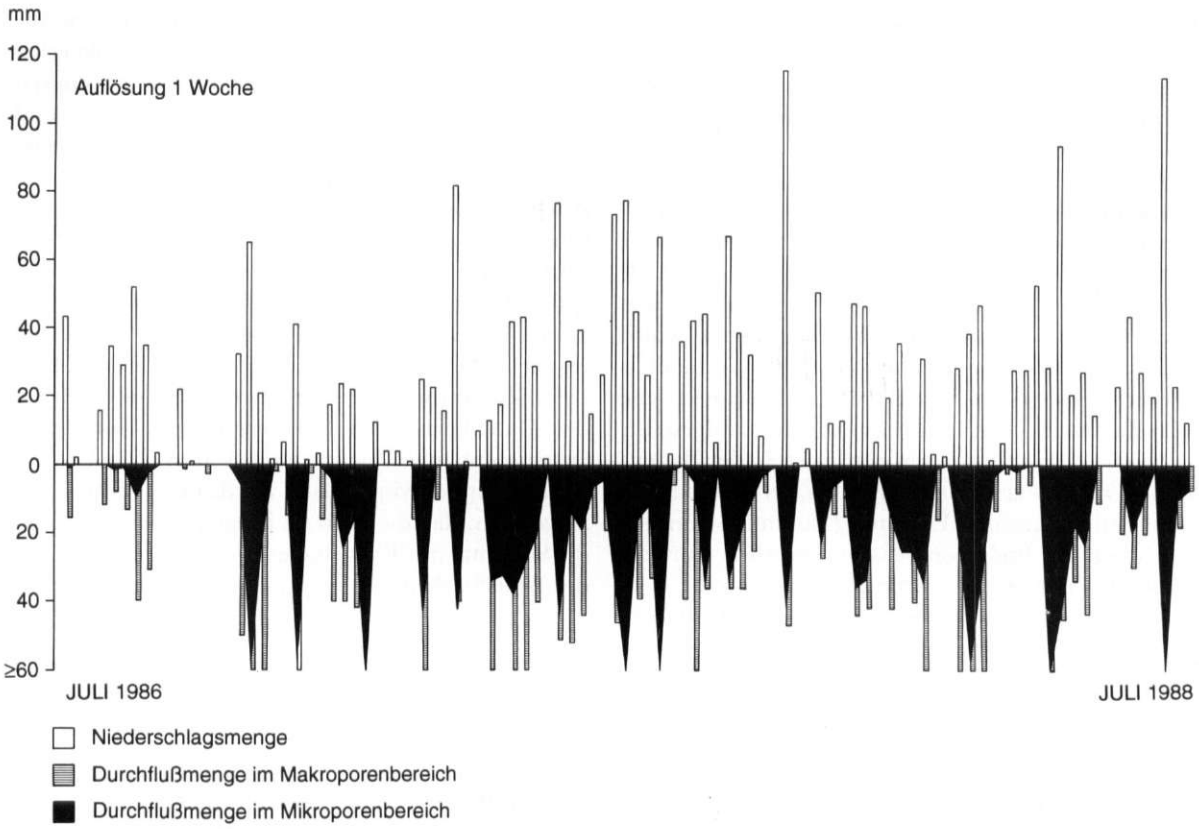


Abb. 5: Diskontinuität des Niederschlags- und Infiltrationsprozesses bei Weide 20
Discontinuity of precipitation and infiltration at Weide 20

ab bei gleichzeitigem Anstieg der Anionen starker Säuren. Geoökologisch interpretiert stellt dieses Ereignis einen Systemkurzschluß dar: Der Regler Austauschkapazität der Bodenmatrix wird „abgehängt", das System ist labil. In kurzer Zeit fließen große Mengen (säure)belasteten Wassers ungepuffert in den Vorfluter ein und aus dem Testgebiet hinaus.

Abbildung 7 zeigt eine Szene beim Standort Mischwald 22. Hier wurden höchste Niederschlag-

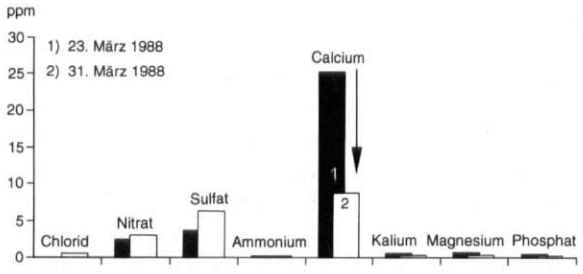


Abb. 6: Kurzschluß im Umsatz-System während eines Regen-auf-Schnee-Ereignisses bei Weide 20
Short-circuit during rain-on-snow at Weide 20

Belastungen und Stoffumsätze im Boden gemessen. Im statistischen Hauptmodell ist der Zusammenhang zwischen Deposition und Calcium-Umsatz im Boden nicht signifikant. Nach einer ergiebigen, aber im Freiland unbelasteten Herbststurmphase mit anschließender trocken-kalter Stabilisierung bricht der Winter ein mit Schneefällen bis in die Niederungen. Die Umsatzbedingungen im Kronendach ändern sich sprunghaft. Die Säuren und das Leaching-Produkt Kalium im Kronen-Durchlaß steigen an. Auch die Ionenzusammensetzung in der Bodenlösung verändert sich markant. Die Prozesse, die hier im einzelnen ablaufen, sind unklar und chaotisch[5].

[5] Es ist klar, daß mit den Meßwerten, wie sie hier vorliegen, Chaos i. e. S. nicht nachgewiesen bzw. stochastisches Verhalten nicht ausgeschlossen werden kann. Dazu müßten die chemischen Meßwerte, die hier als wöchentliche Stichprobe vorliegen, u. a. in dichterem Intervall vorliegen. Die Einführung des Begriffes Chaos an dieser Stelle soll darauf hinweisen, daß chaotische Verhaltensweisen eine wahrscheinliche Erklärung der Funktionsabläufe sind.

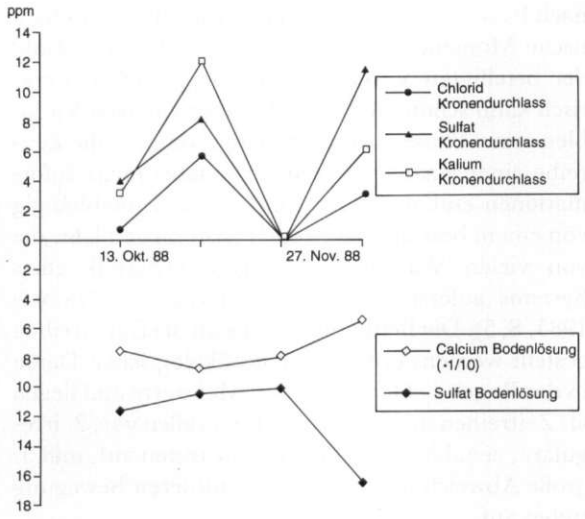


Abb. 7: Input-Schock und Bodenwasserreaktion beim Standort Mischwald 22

Input shock and soil water response at Mischwald 22

Beide Szenen sind an Standorten registriert, wo mit dem statistischen Hauptmodell kein signifikanter Zusammenhang zwischen Säure-Eintrag und Calcium-Umsatz im Boden nachgewiesen werden konnte. Bei beiden Szenen reißt eine Phase scheinbar zufälliger Verteilung der Werte um einen Mittelwert ab, und das System erhält kurzfristig eine neue geoökologische Eigenschaft. Schnell wurde erkannt, daß eine nach Szenarien sortierte statistische Analyse nicht seriös durchführbar ist:

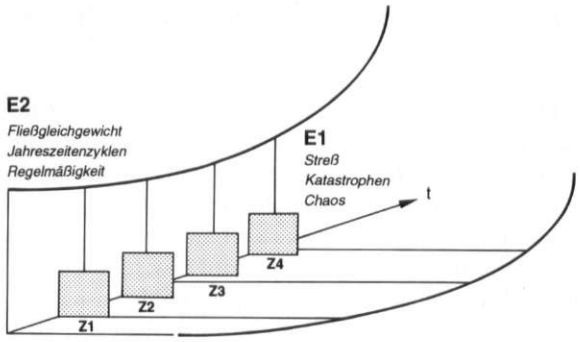
- Die Datasets sind viel zu klein.
- Es ist unmöglich, die Daten mit einem der üblichen Verfahren auch nur annähernd in eine Normalverteilung, die ja von den meisten statistischen multivariaten Methoden gefordert wird, zu transformieren.
- Gerade bei einer Szenarienanalyse, wo es um kritische Raten, Schwellenwerte und die Nachweisbarkeit chaotischen Verhaltens geht, fällt ein Meßfehler und/oder ein Ausfall entscheidend ins Gewicht und führt zu einer Fehlinterpretation.

Damit bleiben Systemzustände, wie sie oben beschrieben wurden, mit dem Prozeß-Korrelationsmodell „Standortregelkreis" ungeklärt. Wahrscheinlich signalisieren gerade die Zustände, die jenseits der Konfidenzintervalle liegen, die für das Verständnis des raumzeitlichen Funktionierens von Niederschlagprozeß und Stoffumsatz wichtigsten Informationen. Sie sind mit Sicherheit Ausdruck der Komplexität, der in jedem geoökologischen Modell zusammen mit dem Raumbezug zentrale Bedeutung zukommen sollte.

4 Die Phasenraum-Analyse geoökologischer Daten: Möglichkeiten und Grenzen der Modelle im Testgebiet HFJ

Das Konzept-Modell „Standortregelkreis", seine Füllung zum Prozeß-Korrelationsmodell und zur Raum-Kennzeichnung ist als nachvollziehbare Basis in der Geoökologie unverzichtbar. Die Qualität der Resultate, die das Konzept der Landschaftsökologischen Komplexanalyse hervorbringt, wird aufgrund des technischen Fortschrittes sprunghaft ansteigen: Eine verbesserte Datenqualität wird nicht nur den Einsatz schärferer statistischer Testverfahren, sondern in zunehmendem Maße physikalisch-mathematische Simulationsmodelle einzelner Variablen hervorbringen.

Bei der Datengrundlage HFJ wäre eine Optimierung in diesem Sinne sicher wünschenswert; das Problem, das hier diskutiert wird, würde aber nicht gelöst: Modelle, die auf der Komplexen Standortanalyse basieren, gehen die Komplexität nach den Regeln der allgemeinen Geosystemlehre mit einem mechanistisch-deterministischen Ansatz an: Geoökologische Systeme streben a priori ein Fließgleichgewicht an, das quantifiziert werden kann. Man geht davon aus, daß die Wirkung momentaner Ungleichgewichte im Tagesgang grundsätzlich mittels der systeminternen Regelmechanismen ausgeglichen wird. Man geht weiter davon aus, daß dieses Fließgleichgewicht aus einer zeitlich definierten Meß-Stichprobe ermittelt werden kann und daß damit die Dynamik für einen beliebigen Zeitpunkt prognostizierbar ist. Auch die Stabilität und die Belastbarkeit eines Geosystems werden ausschließlich aus Eigenschaften eines (hypothetischen) Fließgleichgewichtes ermittelt (Klug u. Lang 1983). Deshalb findet auch das zwar dokumentierte, aber kurzfristige Einzelereignis in seiner zeitlichen Autokorrelation als Ausdruck der Systemstabilität in der Geoökologie keine Beachtung. Dem Zeitreihencharakter, der den Stoffumsatz in der Untersuchung HFJ als auto- und/oder prozeßkorrelierte Phasen abspielt, und dem Wechsel zwischen diesen stabilen „normalen" Phasen und den „sensiblen" Ausreißern als Signalen einer komplexen Stabilität werden keine Rechnung getragen. Deshalb erklären statistische Modelle, wie sie oben vorgestellt wurden, den Stoffumsatz im heterogenen Einzugsgebiet HFJ, seine Belastbarkeit und Stabilität nicht genügend und bilden keine realistische Modellbasis. Bei einem Modell HFJ müßte als zentraler Eingang die Abfolge der individuellen, einmaligen Einzelereignisse stehen (Abb. 8: Z_1, Z_2, $Z_3 \ldots Z_n$). Die in jahreszeitlichen Zyklen ermittelte „normale", regelhafte Dynamik eines wahrschein-



Legende zur Grafik:
Z_1, Z_2, Z_3, ... Z_n: Zustandsabfolgen
E_1: Skalierungsebene 1 (Ereignisebene)
E_2: Skalierungsebene 2 (Jahreszeitenzyklen)

Abb. 8: Das Modell HFJ: der Antagonismus verschiedener Skalierungsebenen als realer und methodischer Konflikt (nach einer Idee von H. Leser 1990)

The HFJ model: antagonisms of scaling as a real and methodical problem

lichen Fließgleichgewichts sollte als Fernwirkung nur die Rahmenbedingungen stellen. Die methodisch antagonistischen Skalierungsebenen (Abb. 8: E_1 und E_2) müssen mindestens gleichwertig sein. Auf jeden Fall sollte das Einzelereignis in erster Linie aufgrund seiner (einmaligen) Wirkung und erst in zweiter Linie aufgrund seiner Wahrscheinlichkeit innerhalb der Stichprobe taxiert werden.

In der Physik fand die Tatsache, daß alle dynamischen, nichtlinearen Systeme Bereiche mit fraktalen Strukturen und chaotischem Verhalten aufweisen, mit der Chaostheorie ein eigenes Untersuchungsgebiet (Schuster 1989). Auf der Suche nach der „Ordnung", die der chaotischen Dynamik zugrunde liegt, entwickelten die Physiker und Mathematiker Methoden, um die typischen Formen der Komplexität der betrachteten Systeme zu analysieren. Für die Geoökologie, die sich auch mit offenen, nichtlinearen, dynamischen Systemen befaßt, drängen sich die Erkenntnisse aus der Chaostheorie geradezu auf. Die Geoökologie hat sogar den Vorteil, daß im Untersuchungsgegenstand Landschaft die Komplexität als fraktale Heterogenität sichtbar ist.

Vorgeschlagen wird hier die Anwendung des Analyseverfahrens im Phasenraum. Theoretisch ist ein Phasenraum ein vieldimensionaler Raum, der von allen Variablen, die die Dynamik einer betrachteten Variablen beeinflussen, aufgespannt wird. Je länger der Betrachtungszeitraum ist, desto mehr nähert sich die Abbildung einem Permanentregime, dem Attraktor. Aus Phasenraumbildern können nach Packhard et al. (1980) Eigenschaften wie chaotische Momente, Kopplungsarten und Mindestzahl der beteiligten Variablen abgelesen werden. Praktisch kann schon die Meßreihe einer einzigen Variablen einen Phasenraum definieren, da „. . . die Zeitreihe einer einzigen Variablen weitaus mehr Informationen enthalten kann und . . . sich unabhängig von einem bestimmten Modell dazu nutzen läßt, die von vielen Variablen abhängige Dynamik eines Systems ‚auferstehen' zu lassen" (Nicolis u. Nicolis 1985, S. 5). Die Bedingungen, die an die Datenreihen gestellt werden, erfüllen die geoökologischen Daten in der Regel: 1. Die Daten sind Meßwerte und liegen als Zeitreihen mit konstanten Intervallen vor, 2. irreguläre, zeitabhängige Phänomene treten auf, und 3. große Abweichungen von einer mittleren Bewegung treten auf.

Das wohl komplexeste „Resultat" des Stoffumsatzes HFJ liefert der Vorfluter beim Ausgang des Einzugsgebietes. Schon die Frage „woher kommt das Wasser" brachte mehr zusätzliche Fragen als Antworten. In den Vorfluter gehen alle Fließwege und Umsatzprozesse bis in den unbekannten verkarsteten Untergrund ein. Variable Beteiligung der unterschiedlich ausgestatteten Teileinheiten, Verdünnung durch Neuwassereinspeisung, Konzentration durch Wasserentzug, Mischphänomene beim Zusammenfluß von Fließarmen unterschiedlicher Ionenzusammensetzung sowie die zeitliche Verzögerung sind nur die wichtigsten Faktoren. Abbildung 9 zeigt die Calcium-Konzentrationsentwicklung an der Pegelstelle als Phasenraumdarstellung. Deutlich hebt sich in dem asymmetrischen Gebilde ein Bereich ab, der als dichte Punktwolke beschrieben werden kann. Hier kann die Dynamik als „normal" angenommen werden, dem Gaussschen Rauschen ähnlich; sie repräsentiert die Stabilität des Fließgleichgewichts

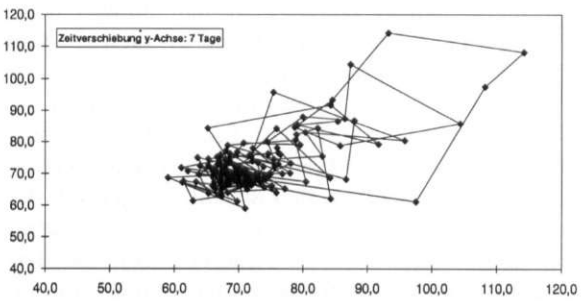


Abb. 9: Die Calcium-Konzentration (ppm) des Vorfluters beim Ausgang des Einzugsgebietes im Phasenraum

Calcium concentrations of catchment outputs as a phase space picture

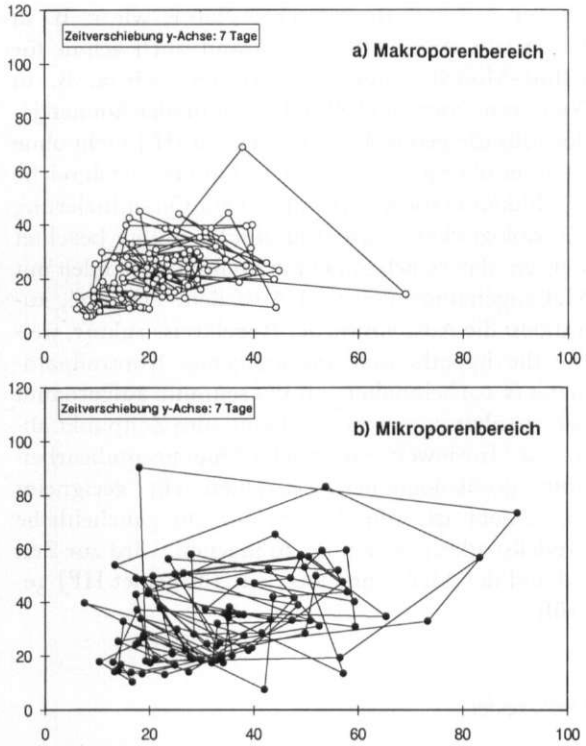


Abb. 10: Die Calcium-Konzentration (ppm) des Oberflächennahen Bodenwassers bei Weide 20 im Phasenraum

Calcium concentrations of soil waters at Weide 20 as phase space pictures

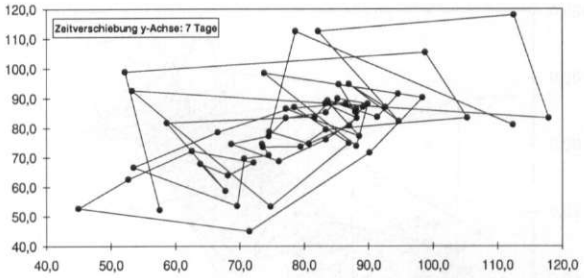


Abb. 11: Die Calcium-Konzentration (ppm) des Oberflächennahen Bodenwassers bei Mischwald 22 im Phasenraum

Calcium concentrations of soil waters at Mischwald 22 as a phase space picture

zwischen Stoffein- und -austrag aus dem Einzugsgebiet. Immer wieder brechen die Werte in Schlaufen aus: Kritische Raten werden überschritten.

Dem gegenübergestellt sind die Phasenraumbilder der Calcium-Konzentrationsentwicklung in der Bodenlösung Weide 20 im Teileinzugsgebiet Schwang, der quartären Hangrutschmasse (Abb. 10a, b). Datengrundlage sind wieder die dem Massen- bzw. dem Mikrofließbereich zugeordneten Lysimeterproben. Vor allem im Mikroporenbereich läßt sich nur noch undeutlich ein Schwerpunkt mittleren oder Gaussschen Verhaltens erkennen. Offensichtlich wird die der langsam fließenden Zone zugeordnete Meßstelle immer wieder labilisiert bzw. beeinflußt durch eindringendes Frischwasser aus benachbarten Sättigungszonen. Es stellt sich heraus, daß die Regionenbezeichnungen dahingehend modifiziert werden müßten, daß z. B. die Mikrofließregion besser als leicht labilisierbare Übergangsregion mit Sickerfrontcharakter bezeichnet werden sollte. Die Phasenraumportraits in Abbildung 10 zeigen zwar Unterschiede, Lage und Symmetrie im Koordinatensystem sind jedoch ähnlich; damit können sie der gleichen Teileinheit zugeordnet werden. Stark hebt sich dagegen das Portrait der Calcium-Konzentration in der Bodenlösung beim Standort Mischwald 22 ab (Abb. 11). Das Teileinzugsgebiet Schwangwald ist die stoffliche Schnittstelle in der Wandstufe (Abb. 2). Hier fließt zumindest ein Teil des in der Höhenzone an den Schichtgrenzen zirkulierenden Karstwassers in die interne Hangzone ein. Das Bild wird dominiert durch große, irreguläre Abweichungen von einem hochangelegten Mittelwert.

Werden nun Abbildung 10 und 11 über Abbildung 9 gelegt, zeichnet sich die qualitativ unterschiedliche Beteiligung der Räume ab (Abb. 12: gestrichelte Linien). Indizien möglicher „Schwachstellen" der Stabilität bzw. Belastbarkeit des Fließgleichgewichtes des Testgebietes sind: 1. Die Teileinheit Schwang liefert kritisch hohe Raten ungepufferten Wassers, 2. die Teileinheit Schwangwald liefert kritisch hohe Calcium-Konzentrationen.

Diese Aussage erscheint auf den ersten Blick banal. Zurück zu der gewünschten Modellbasis (Abb. 8), welche das Ungleichgewicht auf der Ereignisebene als Eingangsgröße im Fließgleichgewicht der Jahreszeitebene erkennt: Mit der Phasenraum-Abbildung ist zumindest eine Form gefunden, welche beide Skalierungsebenen gleichwertig und sichtbar integriert. Im Gegensatz zum eher schwierig geoökologisch zu interpretierenden multiplen Regressionsmodell, das für die gleiche Fragestellung aufgestellt wurde, bekennt die Dynamik schon bei erster Beschreibung der Symmetrien und der Lage der Schwerpunkte im Koordinatensystem dieser sehr einfachen, zweidimensionalen Phasenraumbilder geoökologisch Farbe im Ablauf und Wechsel verschiedener Phasen. Auch der Raumbezug – hier: die Zuordnung der

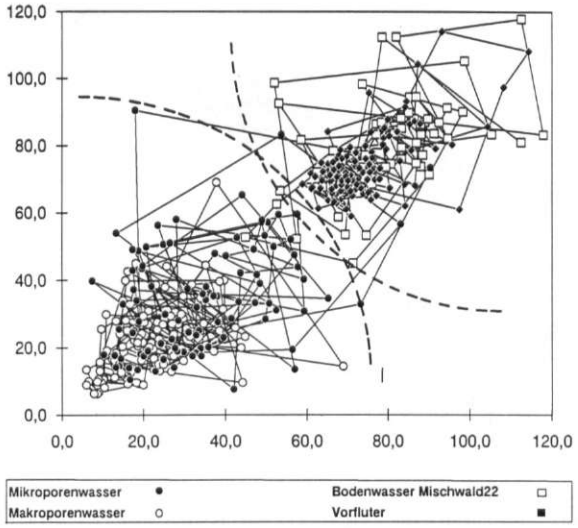


Abb. 12: Qualitativ unterschiedliche Beteiligung zweier Teileinzugsgebiete als Überlagerung der Phasenraum-Bilder

Variable contributing areas as an overlay of phase space pictures

Standorte zu Teileinheiten, welche in den Vorfluter des Einzugsgebietes eingespeist werden - scheint überschaubar.

Die Grundsatzfrage, ob die Geoökologische Komplexität, wie sie sich als reale Landschaft präsentiert, überhaupt als ganzheitliches Simulationsmodell abgebildet werden kann, hat damit nicht ihre Schärfe verloren. Das angestrebte Modell soll ja von der beschreibenden Kennwert-Eigenschaft herkömmlicher Standortregelkreis-Modelle mit einer als Wortmodell aggregierten Häufung getrennter Statistiken und Simulationen einzelner Zusammenhänge an einzelnen Standorten wegführen. Ein Simulationsmodell ist als naturwissenschaftliches Modell aber immer ein technisches Konstrukt, das auf dem Prinzip von Falsifizierung/Verifizierung beruht. Komplexität bedeutet aber immer wieder widersprüchliches Raum-Zeit-Verhalten. Auf die Fragestellung HFJ zugeschnitten bedeutet dies, daß einem Ereignis immer auch Einmaligkeit anhaftet: Scheinbar als gleich oder ähnlich gewerkte Konstellationen können in ihrer unendlichen Empfindlichkeit gegenüber den Anfangsbedingungen gegensätzliche Resultate hervorbringen.

Die konkrete Problemstellung an dieser Stelle lautet: Wie sollen die Phasenraum-Informationen in ein Modell im Sinne von Abbildung 8 eingebaut werden? Ein erster Schritt ist die Quantifizierung der Phasenraumbilder. Mögliche Techniken sind Thema zahlreicher Aufsätze theoretischer Natur, wie z. B. in Packhard et al. (1980); sie sind auch schon für Klima-Modelle angewandt worden, wie z. B. in Nicolis u. Nicolis (1985). Die Methoden können jedoch für die geoökologischen Daten HFJ nicht ohne weiteres übernommen werden. Für eine erfolgreiche Modifikation solcher Techniken zur Quantifizierung geoökologischer Phasenraumbilder müßte beachtet werden, daß es sich um kurze Meßreihen handelt mit Meßungenauigkeiten und Ausfällen. Das Ziel, zumindest die Ausschnitte der Regelkreisstruktur, welche die hypothetisch angegangenen Kontrollparameter (s. o.) beinhalten, als Phasenraum aufgespannt berechenbar zu machen, scheint zum Zeitpunkt absehbar. Inwieweit eine solche Phasenraumbearbeitung geoökologischer Zeitreihen ein geeignetes Instrument ist, um die gewünschte ganzheitliche Modellstruktur rechenbar zu machen, wird zur Zeit anhand der Meßreihen aus dem Testgebiet HFJ geprüft.

Danksagung

Danken möchte ich an dieser Stelle Prof. Dr. Hartmut Leser, Dr. Daniel Schaub und Dipl-Geogr. Jürg Hosang (Geographisches Institut, Universität Basel) für die Durchsicht des Manuskriptes und für Vorschläge und Hinweise. Danken möchte ich auch Frau Lena Baumann für die Reinzeichnung der zahlreichen Abbildungen.

Literatur

Dettwiler, K.: Die Schneedecke als Wasser- und Stoffspeicher im Geoökosystem. Entwicklung und Anwendung einer Methodik im Einzugsgebiet des Schwangbaches zur Erfassung der Ein- und Austräge (Winter 1987/1988). Lizentiatsarbeit am Geographischen Institut. Basel 1990.

Klug, H. u. Lang, R.: Einführung in die Geosystemlehre. Darmstadt 1983.

Leser, H.: Das physisch-geographische Forschungsprogramm des Geographischen Instituts der Universität Basel in der Regio Basiliensis. In: Regio Basiliensis XVI, 1975, S. 55-78.

- : Das 9. „Basler Geomethodische Colloquium": Umsatz- und Bilanzierungsprobleme bei topologischen Geoökosystemforschungen. In: Geomethodica 9, 1984, S. 5-29.

- : Geoökosystemforschung in der Basler Region. In: Regio Basiliensis XXVIII, 1987, S. 151–161.
- : Landschaftsökologie. 3. Auflage. Stuttgart 1991.

Mosimann, T.: Der Standort im landschaftlichen Ökosystem. Ein Regelkreis für den Strahlungs-, Wasser- und Nährstoffhaushalt als Forschungsansatz für die Komplexe Standortanalyse in der topologischen Dimension. In: Catena 5, 1978, S. 351–364.

- : Landschaftsökologische Komplexanalyse. Wissenschaftliche Paperbacks Geographie. Stuttgart 1984.

Nicolis, C. u. Nicolis, G.: Gibt es einen Klima-Attraktor? In: Physikalische Blätter 41/1, 1985, S. 5–9.

Packhard, N. H. et al.: Geometry from a time series. In: Physical Review Letters 45/9, 1980, S. 712–716.

Reber, S.: Methoden zur Erfassung des Winterniederschlags und der Schneedeckenparameter sowie deren Anwendung und Aussagemöglichkeiten innerhalb von geoökologischen Arbeiten am Beispiel des Einzugsgebietes Hoher Faltenjura im Winter 1986/1987. Lizentiatsarbeit am Geographischen Institut der Universität. Basel 1988.

Roth, K.: Stofftransport im wasserungesättigten Untergrund natürlicher, heterogener Böden unter Feldbedingungen. Dissertation ETH Zürich. Zürich 1989.

Scherrer, S.: Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und Abfluß, Abflußbildung und Stoffaustrag des Einzugsgebietes HFJ im Faltenjura mit besonderer Berücksichtigung der Vorfluter-Chemodynamik der extremen Abflußsituationen. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität. Basel 1990.

Schuster, H. G.: Deterministic Chaos. An Introduction. Weinheim 1989.

Skopp, J. et al.: Solute Movement in Structured Soils: Two-Region Model with Small Interaction. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 45, 1981, S. 837–843.

SMA: Täglicher Wetterbericht der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt Zürich 1986–1989.