

Einfluß von terrestrisch-aquatischen Ökotonen auf den Wasser- und Stoffaustausch zwischen Umland und See

Winfried Kluge und Otto Fränzle

Synopsis

An ecotone is an interface between neighbouring ecosystems, characterised by specific structures and interactions. In the ecotone-related programmes of the long-term ecosystem research project "Bornhöved Lake Area" the fluxes of water, nutrients, and other substances from surrounding upland into a lake across an alder forest wetland is studied. This interface is characterised by hydromorphic soils, water level fluctuations in the lake and the associated aquifer, a variety of biotic and abiotic processes, and lateral and vertical gradients changing in time. The paper focuses on the interactions of hydrologic and hydrochemical conditions, the retention of nutrients, and the importance of choosing appropriate spatial and temporal scales. Wetland ecotones display a large variability, especially with regard to the impact on exchange of water and matter. A deeper understanding of these different subsystems and their manifold interactions requires both the application and the development of a set of models at different scales.

ecotones, wetlands, groundwater flow, material transition, nitrogen, modelling

1. Einleitung

Im Untersuchungsgebiet des FE-Vorhabens "Ökosystemforschung im Bereich der Bornhöveder Seenkette" in Mittelholstein kommen sowohl Wald- und Agrarökosysteme als auch limnische Ökosysteme im Verbund vor. Eine der charakteristischen Zielsetzungen dieses Vorhabens stellt die Aufklärung und Modellierung des abiotischen und biotischen Wirkungsgefüges an der Schnittstelle zwischen den terrestrischen und aquatischen Ökosystemen dar. Da die systematische Bearbeitung dieser Grenzbereiche zwischen den Ökosystemen, den Ökotonen, bisher auch international zu wenig Beachtung fand, bilden derartige Untersuchungen einen Schwerpunkt innerhalb des "MAN AND THE BIOSPHERE"-Programms (FRÄNZLE 1990, NAIMAN & DECAMPS 1990). Stellvertretend für ein umfassenderes Aufgabenspektrum konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf:

- die Wirkung des Wassers als unterirdisches Transportmedium im Grenzraum Uferzone,
- das hydrochemische Milieu im Ökoton Uferzone,
- Strategien zur Modellierung des unterirdischen Wasser- und Stoffaustausches zwischen Umland und See.

2. Zum Begriff des Ökotonen

In der Literatur wird der Begriff des Ökotonen nicht einheitlich verwendet. Je nachdem welche Ziele Geomorphologen, Standortkundler, Landschaftsökologen, Vegetationskundler oder Zoologen bei ihren Untersuchungen verfolgen, unterscheiden sich die Maßstäbe und Umweltvariablen, nach denen ökologische Systeme oder Landschaftselemente mit scharfen oder fließenden Übergängen ausgewiesen oder auch zusammengefaßt werden. Die folgende Definition orientiert sich an einer von HOLLAND (1988) vorgeschlagenen Formulierung, die über den hier behandelten Themenkreis hinaus versucht, den vielfältigen Wechselwirkungen zwischen terrestrischen und aquatischen Ökosystemen gerecht zu werden.

Ein Ökoton ist die Übergangszone (Grenzraum) zwischen benachbarten Ökosystemen oder Landschaftseinheiten, die sich bezüglich einer Reihe charakteristischer Merkmale oder Zustände voneinander unterscheiden. Die räumlichen Gradienten und die Dynamik dieser Merkmale sowie die Transferwiderstände der Übergangszone bestimmen die Intensität der biotischen und abiotischen Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Systemen. Für die Messung und Modellierung der Austausch- und Umwandlungsraten sind in Abhängigkeit von der räumlichen Variabilität und der zeitlichen Prozeßdynamik die Scales maßgebend, die die wesentli-

chen Merkmale oder Zustände sowie die Wasser-, Stoff- und Energiebilanzen im Grenzraum Ökoton in Verbindung zu den benachbarten Ökosystemen in vorzuziehender Genauigkeit beschreiben. Der hier bewußt verwendete Begriff "Scale" reicht über die häufig gebrauchte Übertragung ins Deutsche als Maßstab oder Skala hinaus. Unter einem Scale ist ein raumzeitlicher Betrachtungsmaßstab zu verstehen. Durch gezielte Filterung von Informationen sowohl bei experimentellen Studien als auch bei der Modellierung werden Prozesse, Strukturen und komplexe Wechselwirkungen adäquat beschrieben.

3. Austausch zwischen Umland und See

Das Ökoton Uferzone stellt ein Feuchtgebiet mit hydromorphen Böden, großer räumlicher Variabilität der Standortverhältnisse und der Eigenschaften des Lebensraumes, hoher biologischer Produktivität mit Anreicherung von organischer Substanz sowie geringer Breite dar.

Der Wasser- und Stoffaustausch zwischen Umland und See erfolgt, wie in Abb. 1 schematisch dargestellt, in mehreren Ebenen: der Atmosphäre, dem Bestandesraum, der Bodenzone einschließlich Litoral mit Seeboden und den grundwasserführenden Schichten. Zur Aufklärung der Prozeßdynamik in der Bodenzone des Ökoton sind die lateralen Gradienten im Meter- bis Dekameterscale und die vertikalen Gradienten im Zenti- bis Meterscale maßgebend. Mit dem Übergang vom Bestandesraum zur Atmosphäre sowie von der Bodenzone zum Grundwasserleiter ist der Untersuchungsraum, um etwa eine Zehnerpotenz gegenüber den o. g. Vorgaben zu erweitern und reicht über die in Abb. 1 abgegrenzte Uferzone hinaus. Die zeitliche Dynamik überdeckt den weiten Bereich vom Sekunden- bis Stundenscale für die atmosphärischen Prozesse, vom Stunden- bis Wochenscale für die Bodenprozesse und vom Wochen- bis Jahresscale für die Vorgänge im Grundwasserleiter. Um den Untersuchungsaufwand zu begrenzen und Vereinfachungen bzw. Abstraktionen für die Modellbildung zu ermöglichen, sind räumliche und zeitliche Mittelbildungen unumgänglich. Sie dürfen jedoch die tatsächlichen, sich z. T. periodisch verändernden Austauschraten und Bilanzen nicht verfälschen.

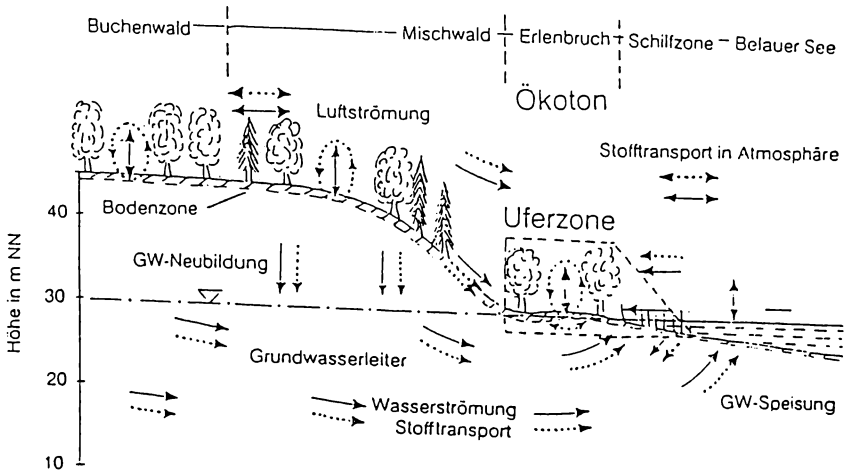


Abb. 1: Prinzip des Wasser- und Stoffaustausches zwischen Umland und See in verschiedenen Ebenen (stark schematisiert).

Die über die Atmosphäre mit dem Luftstrom eingetragene nasse und trockene Deposition ist vom Relief, der Hauptwindrichtung, der Struktur des Bestandes in der Uferzone und dessen Filterwirkung abhängig. Auch aus aerodynamischer Sicht unterscheiden sich die Einträge durch see- und landseitige Winde (BLUME & al. 1991).

Für Abschätzungen zum lateralen Stoffeintrag an der Erdoberfläche sind landseitig der Oberflächenabfluß einschließlich der Erosionsfracht und seeseitig die Wasserspiegeländerungen bzw. die Überflutungsbreite, die Wellenhöhe und die Vegetation im Litoral von Bedeutung. Die Wirkung von Oberflächenabfluß und oberflä-

chennahem Abfluß (Interflow) kann dann vernachlässigt werden, wenn im Hangbereich gutdurchlässige Sedimente anstehen und in der Uferzone durchgängige Stauhorizonte fehlen. In der bodennahen Luftschicht und der Bodenzone unterliegen die kleinräumigen vertikalen und lateralen Austauschprozesse starken zeitlichen Veränderungen.

Der unterirdische Wasseraustausch zwischen dem Einzugsgebiet und dem See erfolgt in den gutdurchlässigen wassergesättigten Sedimenten der Grundwasserleiter. Die vertikale Profildurchlässigkeit bestimmt, ob die durchwurzelte Bodenzone im Uferbereich durchströmt oder als "Bypass" unterströmt wird. In den Sedimenten der Uferzone einschließlich denen des Seebodens, die im Sinne von Stagnationszonen nicht am konvektiven Austausch teilnehmen, herrscht diffusiver Stofftransport im Zenti- bis Dezimeterscale vor.

4. Hydrologische und hydrochemische Besonderheiten des Ökoton Uferzone

Anhand ausgewählter Untersuchungsergebnisse sollen die oben bereits getroffenen Aussagen belegt und ergänzt werden. Wie zum Wasserhaushalt im Erlenbruch in Abb. 2 dargestellt (weitere Informationen bei BLUME & al. 1991), werden die Wasserbilanzen und die Wasseraustauschprozesse in der Bodenzone des Erlenbruchs durch die Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration sowie die Schwankungen der Grund- und Seewasserstände bestimmt. Der Wasseraustausch der 1 bis 2 m tiefen Ufersande mit dem Grundwasserleiter und dem See wird durch halbdurchlässige limnische Bildungen erschwert. Überwiegt im Jahresmittel die landseitige Speisung des Sees, so können in Trockenperioden infolge der Evapotranspiration und bei hohem Seewasserstand auch zwischenzeitliche Umkehrungen der Strömungsrichtungen in der Nähe der Uferlinie auftreten. Der in Abb. 2 aufgezeigte Fall einer Uferzone mit linsenförmig eingeschlossen limnischen Ufersanden spiegelt nur einen der am Belauer See anzutreffenden hydrologischen Wasseraustauschtypen wider.

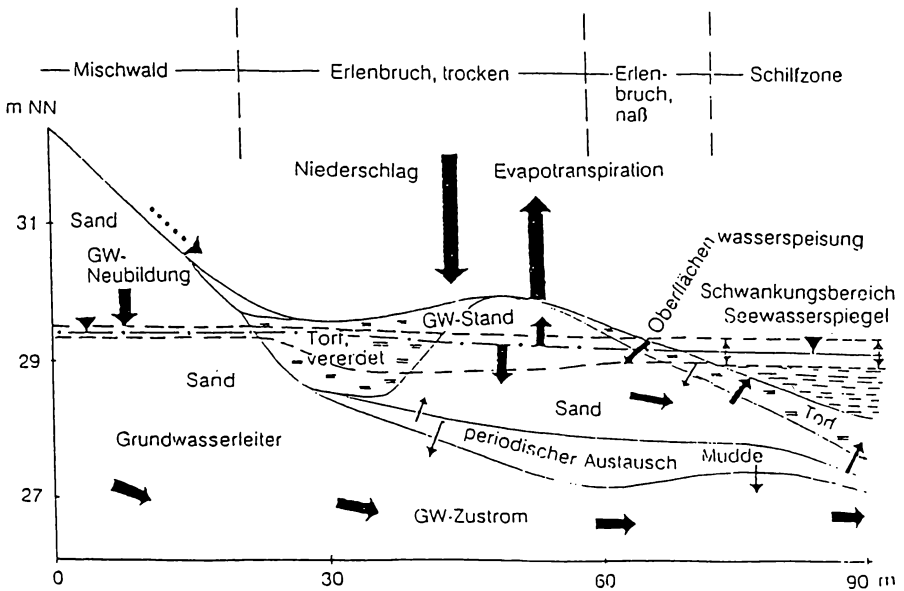


Abb. 2: Wasserhaushalt im Erlenbruch am Westufer des Belauer Sees. Fläche der Pfeile ist ausgetauschten Mengen proportional; für 1989 gilt: Freilandniederschlag 820 mm, aktuelle Evapotranspiration 700 mm, Grundwasserspeisung 120 mm, spezifischer Grundwasserzustrom pro m Uferlinie ca. $50 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{m})$, 90% des dem See zuströmenden Grundwassers wurde im landseitig angrenzenden Einzugsgebiet gebildet.

Der Abbau der in den hydromorphen Böden der Uferzone angereicherten organischen Substanz ist vom hydrochemischen Milieu abhängig und wirkt gleichzeitig auf dieses zurück (THURMAN 1985). Das hydrochemische Milieu wird durch die Parameter pH-Wert, Redoxpotential, Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit und Temperatur charakterisiert. Bei der hydrochemischen Abgrenzung der Uferzone hat die Unterscheidung von Zonen mit aerobem und anaerobem Milieu anhand des Sauerstoffgehaltes und Redoxpotentials besonderen Stellenwert.

Die Abnahme des Redoxpotentials im Porenwasser der gesättigten Bodenzone zwischen Hangfuß und Uferlinie ist in Abb. 3 dargestellt. Die kleinräumigen Veränderungen der limnischen Ufersedimente innerhalb eines 150 m langen und im Mittel 30 m breiten Uferstreifens und die komplizierten Wasseraustauschprozesse bedingen die hohe räumliche Variabilität des Eh-Wertes. Die ebenfalls große zeitliche Variabilität innerhalb eines Jahres wird in Abb. 3 durch die eingetragenen Minimal- und Maximalwerte wiedergespiegelt. Als mögliche Ursachen treten vor allem extreme hydrologische Situationen wie Starkregen und Überflutungen oder Trockenperioden mit negativer klimatischer Wasserbilanz sowie die jährlichen Veränderungen von Temperatur und Vegetation auf.

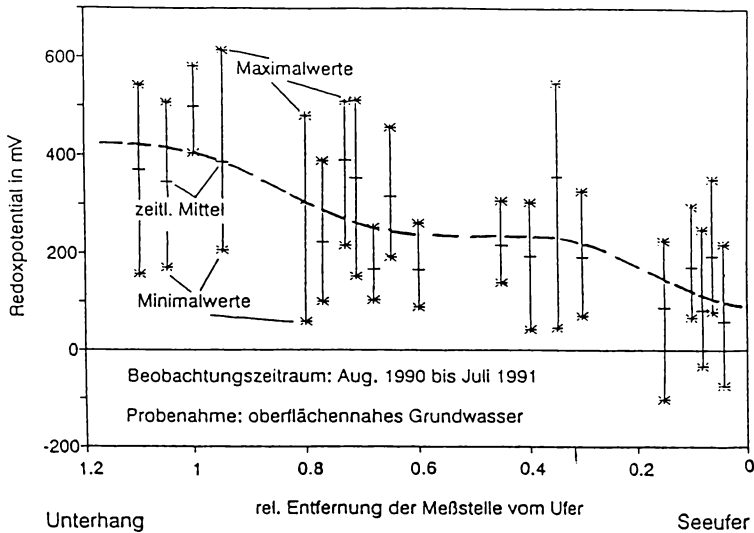


Abb. 3: Mittelwerte und jährlicher Schwankungsbereich des Redoxpotentials im Porenwasser der oberflächennahen gesättigten Bodenzone eines Erlenbruchs.

Die Gehalte der gelösten Stickstoffspezies in der oberflächennahen Grundwasserzone/gesättigten Bodenzone verändern sich vom Unterhang eines Mischwaldes über die Uferzone bis zum See (Abb. 4). Die in der Uferzone erhöhten Ammonium- und geringen Nitrat-Gehalte stehen im Einklang mit den Tatsachen, daß sich das thermodynamische Gleichgewicht bei einem pH-Wert um 6 und einem Redoxpotential von kleiner 350 mV vom Nitrat zum Ammonium verschiebt (FEDER 1986) und Denitrifikation vor allem im anaeroben Milieu wirkt (NIEDER & al. 1989). Die Differenz zwischen Nitrat-, Ammonium- und Gesamtstickstoff ist auf den gelösten organischen Stickstoff zurückzuführen.

Die Wirksamkeit der Uferzone als Nährstoff- bzw. Stickstoffsенke für das mit dem Grundwasser aus dem Einzugsgebiet zum See transportierte Nitrat kann nicht allein anhand verminderter Stickstoffgehalte im oberflächennahen gesättigten Bereich (wie in Abb. 4) entschieden werden. Nur Bilanzen, die sowohl alle wesentlichen konvektiven Stoffinputs und -outputs zur Uferzone sowie die komplexen, mikrobiell beeinflussten Stoffumwandlungen in der Uferzone in Abhängigkeit von den vertikalen Gradienten der hydrochemischen Verhältnisse berücksichtigen, erlauben fundierte Aussagen. Für die in Abb. 2 dargestellten hydrologischen Verhältnisse gilt, daß das dem See zuströmende Grundwasser infolge einer zwischengelagerten Muddeschicht die oberflächennahen limnischen Sande unterströmt. Die wesentlichen, als Nährstoffsенke wirkenden Umwandlungsprozesse verlagern sich demzufolge dorthin, wo das Grundwasser durch das Seesediment dem See zuströmt (SANTSCHI & al. 1990).

Die Vielfalt möglicher hydrologischer Austauschtypen sowie die Komplexität hydrologischer, hydrochemischer und mikrobieller Prozesse erfordern den verstärkten Einsatz von Modellen bei der Aufklärung des Einflusses des Ökoton Uferzone auf den Wasser- und Stoffaustausch zwischen Umland und See.

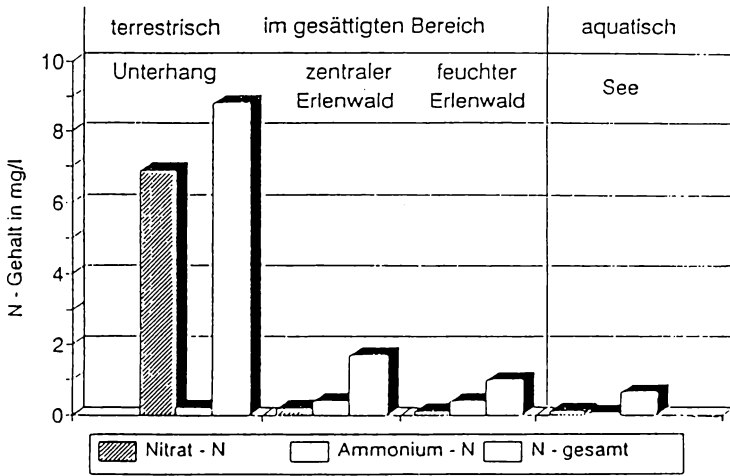


Abb. 4: Stickstoffgehalte im Porenwasser der oberflächennahen gesättigten Bodenzone eines Erlenbruchs (Aug. bis Okt. 1990).

5. Modellierung in mehreren Stufen

Um einen effektiven Erkenntnisfortschritt bei der Aufklärung des Einflusses der Uferzone auf den Wasser- und Stoffaustausch zwischen Umland und See zu garantieren, wird im Projekt "Bornhöveder Seenkette" eine frühzeitige enge Verzahnung von Meßprogrammen und Modellierung verwirklicht. Nach den bisher gewonnenen Erfahrungen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, bei der Modellierung in folgenden Stufen vorzugehen:

- Entwicklung von Konzeptmodellen für den Wasser- und Stoffhaushalt, um die Prozeßlogik der zu untersuchenden Ökotope zu systematisieren, zu verstehen und Meß- und Modellierungsaufgaben aufeinander abzustimmen.
- Anwendung kommerziell angebotener Wasser- und Stofftransportmodelle (IGWMC 1991), die auf einer gesicherten Theorie partieller Differentialgleichungen beruhen (KINZELBACH 1987), um die Prozeßdynamik vom Scale des Einzugsgebiets bis zur Ökotongröße hinab zu untersuchen, den Einfluß des Wassertransports auf die Stoffbilanzen aufzuklären sowie Transit- und Stagnationskompartimente mit einer charakteristischen inneren Prozeßdynamik auszuweisen. Beispiele sind in BLUME & al. (1991) dargestellt.
- Entwicklung oder Übernahme von Teilmodellen für die Stoffumwandlungen, um für den Aufbau komplexerer Ökotonmodelle austauschbare Modellmodule mit kalibrierten Parametersätzen zur Verfügung zu haben und Meßprogramme effektiver zu gestalten.
- Entwicklung und Validierung vereinfachter Box-Bilanzmodelle für den gekoppelten Wasser- und Stoffaustausch für standortkundlich-hydrogeologisch repräsentative Uferabschnitte, um die komplexe Prozeßdynamik abzubilden, Modellexperimente und räumliche Übertragung sowie Wasser- und Stoffbilanzen für die Uferzone trotz großer räumlicher und zeitlicher Variabilität zu ermöglichen.
- Szenariomodelle für den gesamten Uferbereich des Sees zur Prognose der Folgewirkungen von Nutzungsveränderungen und zur Abschätzung des Einflusses globaler Klimaveränderungen auf die Ökologie des Sees.

Alle diese Modellstufen sind in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Mittelungsniveaus (Scales) angesiedelt, unterscheiden sich in der Zielstellung sowie im Grad der Abstraktion bzw. Vereinfachung von den in der Natur tatsächlich anzutreffenden Verhältnissen, erfordern scalerepräsentative, konsistente Parametersätze und sind nur bedingt übertragbar.

6. Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Der unterirdische konvektive Stoffaustausch zwischen Umland und See setzt sowohl die Strömung von Wasser als Transportmedium als auch durchlässige Schichten voraus. Der diffusive Stofftransport ist lediglich im Zenti- bis Dezimeterscale von Interesse und kommt vor allem in Sedimenten mit geringer Durchlässigkeit und an Kompartimentgrenzen - wie dem Sediment-Wasser-Kontakt am Seeboden - zur Geltung.

In der oberflächennahen Uferzone und mit Einschränkung auch im Seesediment überwiegen zyklische Prozesse mit innerjährlich wechselnder Strömungsrichtung, hohen Gradienten und einer komplexen, mikrobiell geprägten Prozeßdynamik. Mit zunehmender Tiefe und Entfernung von der Uferlinie verringert sich die räumliche Variabilität und zeitliche Dynamik der hydrologischen Verhältnisse und des hydrochemischen Milieus, eine Angleichung der Verhältnisse an die hydrogeologische Situation im landseitigen Einzugsgebiet überwiegt. Die im Ökoton Uferzone ablaufenden Prozesse können daher nur in Verbindung mit den umgebenden Ökosystemen bzw. den jeweiligen Wasser- und Stoffinputs sowie Stoffoutputs scaleübergreifend untersucht und modelliert werden.

Als Saumbiotop reduziert die Uferzone den direkten Nähr- und Schadstoffeintrag durch die Landwirtschaft oder den Oberflächenabfluß in den See (STEINMANN 1991). Wegen der erhöhten Evapotranspiration von Feuchtgebieten und der häufig geringen Breite von Uferstreifen ist der Anteil der Grundwasserspeisung in der Uferzone am gesamten Wasserzustrom aus dem Einzugsgebiet allgemein gering.

Die in der Bodenzone häufig zu verzeichnenden lateralen Gradienten der Nährstoff- und Schadstoffkonzentrationen erlauben keinen direkten Rückschluß auf die tatsächliche Filterwirkung und die Umsetzungsraten des unterirdischen Stoffaustausches zwischen Umland und See. Das hydrochemische Regime wird vor allen vom mittleren Grundwasserflurabstand und hydrologischen Extremereignissen in Form von Starkniederschlägen und Überflutungen beeinflusst.

Bei hydraulischer Verbindung zwischen Seeboden und Grundwasserleiter wird das im unterirdischen Einzugsgebiet gebildete Grundwasser über die gesamte grundwasserführende Mächtigkeit, aber bevorzugt in gut durchlässigen Schichten ausgetauscht.

Für die Simulation des Einflusses der Uferzone auf den Austausch von Wasser und bestimmter Stoffspezies (z. B. Nitrat) zwischen Umland und See ist die Anwendung theoretisch fundierter, kommerziell angebotener Modelle zu empfehlen. Zur Modellierung der vielfältigen biotisch und abiotisch geprägten Stoffaustausch- und Umwandlungsprozesse in der Uferzone eignen sich - wie eigene Erfahrungen belegen - komplexe, auf Mittelwerten basierende und relativ einfache strukturierte Box-Bilanzmodelle, die anhand spezieller Meßprogramme zu validieren sind.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch das BMFT und das Land Schleswig-Holstein gefördert. Von folgenden Mitarbeitern des Projektzentrums Ökosystemforschung wurden dankenswerterweise Informationen zur Verfügung gestellt: Dr. J. Piotrowski, Dr. G. Schernewski und T. Spranger.

Literatur

- BLUME, H.-P., FRÄNZLE, O., KAPPEN, L., NELLEN, W., WIDMOSER, P. & B. HEYDEMANN, 1991 (Hrsg., i. p.): Ökosystemforschung im Bereich der Bornhöveder Seenkette. Arbeitsbericht 1988-1991. - Projektzentrum Ökosystemforschung der Universität Kiel.
- FEDER, G. L., 1986: Hydrogeologic Controls on Nitrogen Species in Ground and Surface Water - IAHS Publ. no. 156: 163-170.
- FRÄNZLE, O., 1990: Ökosystemforschung und Umweltbeobachtung als Grundlagen der Raumplanung - UNESCO Programme on Man and the Biosphere, Deut. Nationalkomitee, MAB Mitt. 33: 26-39.
- HOLLAND, M. M., 1988: SCOPE/MAB technical consultations on landscape boundaries. Report of a SCOPE/MAB workshop on ecotones - Biology International. Special Issue 17: 47-106.
- IGWMC, 1991: Software Catalog. - International ground water modelling center Delft, TNO Inst. of Applied Geoscience.

- KINZELBACH, W., 1987: Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. Oldenbourg Verlag München, Wien: 317 S.
- NAIMAN, R. J. & H. DECAMPS, (ed.), 1990: The Ecology and Management of Aquatic-Terrestrial Ecotones - Man and the Biosphere Series, Vol. 4, The Parthenon Publishing Group, Casterton Hall: 316p.
- NIEDER, R., SCHOLLMAYER, H. & H. ZAKOSEK, 1989: Die Rolle der Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Böden (eine Literaturanalyse) - Z. f. Kulturtechnik und Landentw. 30: 345-355.
- SANTSCHI, P., HÖHENER, P., BENOIT, G. & M. B. BRINK, 1990: Chemical processes at the sediment-water interface. - Marine Chemistry, 30: 269-315.
- STEINMANN, F., 1991: Die Bedeutung von Gewässerrandstreifen als Kompensationszonen im Grenzbereich zwischen landwirtschaftlichen Nutzflächen und Gewässern für die Immobilisierung der löslichen Fraktionen von Stickstoff und Phosphor aus der gesättigten Phase. - Diss. Univ. Kiel: 242 S.
- THURMAN, E. M., 1985: Organic geochemistry of natural waters. - Kluwer Acad. Publ. Group, Dordrecht Boston Lancaster: 490 S.

Adresse

Dr. Winfrid Kluge
Prof. Dr. Otto Fränze
Projektzentrum Ökosystemforschung
Christian-Albrechts-Universität
Schauenburger Str. 112

W-2300 Kiel 1

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1992

Band/Volume: [21_1992](#)

Autor(en)/Author(s): Fränzle Otto, Kluge Winfrid

Artikel/Article: [Einfluß von terrestrisch-aquatischen Ökotonen auf den Wasser- und Stoffaustausch zwischen Umland und See 401-407](#)