

Analyse von Wasserpfaden und Stofftransformationen in Feuchtgebieten zur Bewertung der diffusen Austräge¹

Michael Trepel und Winfrid Kluge,

Ökologie-Zentrum der Christian Albrechts-Universität zu Kiel, Ohlshausenstr. 40,
24098 Kiel, mtrepel@ecology.uni-kiel.de

Einführung

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich mit der Unterzeichnung der HELCOM-Konvention, dem OSPAR-Abkommen sowie der EU-Wasserrahmenrichtlinie verpflichtet, die Stoffeinträge in Nord- und Ostsee zu reduzieren sowie mittelfristig einen guten ökologischen Zustand aller Oberflächengewässer (wieder) herzustellen. Während die Phosphorkonzentrationen in den größeren Flusssystemen und die Phosphoreinträge in die Meere seit dem Beginn der achtziger Jahren national wie international schrittweise vermindert wurden, verharren die Stickstoffkonzentrationen der Fließgewässer und die Stickstoffeinträge in die Meere auf einem ähnlich hohen Niveau (GRIMVALL et al. 2000). Trotz der großen Erfolge beim Kläranlagenbau und –ausbau hat sich die Nährstoffbelastung der vielen Kleingewässer im ländlichen Raum nur geringfügig verändert (JELINEK et al. 1999; SCHULZ 2000). Die Ursache ist im Fortbestehen der dominanten diffusen Einträge aus den vor allem landwirtschaftlich genutzten Flächen zu suchen. Zum Einen werden die Maßnahmen, die bei guter landwirtschaftlicher Praxis zur Reduzierung der von den grundwasserfernen Ackerflächen ins Grundwasser ausgetragenen Stickstoffüberschüsse geführt haben, wegen der Verweilzeiten des Wassers im Untergrund von 10 bis 100 Jahren nur mit entsprechender zeitlichen Verzögerung im Gewässer wirksam und zum Anderen tragen die überwiegend entwässerten und intensiv genutzten Talniederungen und Niedermoore noch immer zur beträchtlichen stofflichen Belastung der Gewässer bei (KLUGE et al. 2000). Die großen hydrologisch-stofflichen Retentionspotenziale, über welche die Talniederungen als Übergangszonen zwischen den grundwasserfernen Einzugsgebieten und den Gewässern im naturnahen Zustand verfügen, wurden in der Vergangenheit häufig unterschätzt (KLUGE et al. 2000; TÓTH 1999). Eine Reihe von Kenntnislücken, die insbesondere den Anteil des Grundwassers an den verschiedenen Abflusskomponenten, das komplexe hydrologisch-hydrochemische Wirkungsgefüge der Feuchtgebiete und die Wechselwirkungen zwischen den Landflächen und Gewässern betreffen, haben dazu geführt, dass die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen auf die Gewässerbeschaffenheit (z. B. Renaturierung oder Wiedervernässung von Teilflächen, Anlegen von Uferrandstreifen, naturnaher Rückbau von Gewässern) häufig überschätzt wurde. Das oft gegensätzliche Retentionsverhalten, das Feuchtgebiete bezüglich Stickstoff und Phosphor aufweisen, sowie die langen Zeiträume, die zur Wiederherstellung ökologisch intakter Systeme benötigt werden, erschweren die Prognose und Kontrolle der Effizienz von Maßnahmen zusätzlich. Dabei sind es gerade die für Feuchtgebiete charakte-

¹ korrigierter Nachdruck aus: KA - Wasserwirtschaft, Abwasser Abfall 49 (6): 807-815.

ristischen komplexen ökohydrologischen und raumzeitlich variablen Prozessstrukturen, die Messprogramme so aufwendig machen und welche die Modellierbarkeit einschränken (DALL'O' et al. 2001).

Da eine in sich geschlossene Übersicht zum Wasser- und Nährstoffhaushalt, die vom einzelnen Standort bis zum Landschaftsraum reicht, den Rahmen dieser kurzen Ausführungen sprengen würde, konzentrieren sich die folgenden Erläuterungen auf die Präsentation eines Pfad-Ansatzes, mit dem sowohl die spezifischen hydrologisch-hydrochemischen Strukturen als auch das Wirkprinzip von Maßnahmen zur Verminderung der Stoffausträge anschaulich beschrieben werden kann. Dabei besteht das Ziel, über die Analyse vor allem der lateralen Wasserpfade zwischen den grundwasserfernen Einzugsgebieten, den Feuchtgebieten und Gewässern alle wesentlichen ober- und unterirdischen Ein- und Austragspfade sowie die internen Transformationsraten von Stickstoff und Phosphor in gelöster und partikulärer Form stark vereinfacht, aber weitgehend systemadäquat zu beschreiben.

Die effiziente Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie erfordert ein abgestuftes Vorgehen von der Erfassung der stofflichen Belastung von Flusseinzugsgebieten über die großräumige Ausweisung sensibler Flächen für Stoffeinträge oder Stofftransformation bis hin zur Wirkungsabschätzung von Managementmaßnahmen auf realen Flächen als Grundlage für deren Vorbereitung. Neben einer Verringerung der Stoffeinträge in die Landschaft durch eine verlustoptimierte Landbewirtschaftung steht dabei die Nutzung natürlicher hydrologischer und biogeochemischer Transformations- und Retentionsprozesse in den Feuchtgebieten im Vordergrund. Weil für die Vorbereitung und Umsetzung eines im Land Schleswig-Holstein im Entwurf vorliegenden Niedermoorprogramms kein geeignetes Modell zur Flächenauswahl und Effizienzabschätzung zur Verfügung stand, hat das Landesamt für Natur und Umwelt, Abteilung Wasserwirtschaft, das Ökologie-Zentrum der Universität Kiel mit der Entwicklung und Erprobung eines computergestützten Bewertungssystems beauftragt. Am Beispiel von Maßnahmen zur Wiedervernässung eines Flusstalniedermoors im Gebiet der oberen Eider in Schleswig-Holstein wird das dafür entwickelte Modell erläutert. Der zugrundeliegende Pfad-Ansatz orientiert sich an den realen Datenbeständen, die in den Ämtern und Verbänden weitgehend verfügbar sind, und liefert Entscheidungshilfen bei der Auswahl der zur Verminderung der diffusen Belastung geeigneten Flächen und ermöglicht eine Effizienzabschätzung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen. Die damit verbundenen Forschungsarbeiten zielen darauf ab, die diffusen Stoffeinträge in die Oberflächengewässer und damit letztendlich in Nord- und Ostsee zu reduzieren. Die Verbesserung der hydrochemischen Gewässergüte ist in Verbindung mit einer Verbesserung der Gewässermorphologie eine wichtige Voraussetzung für die Wiederbesiedlung der Fließgewässer mit gewässertypischen Biozönosen, die sowohl durch erhöhte Stoffkonzentrationen (Eutrophierung) als auch durch Maßnahmen der Gewässerunterhaltung in den letzten Jahrzehnten erheblich zurückgegangen bzw. ausgestorben sind (SAND-JENSEN et al. 2000).

2. Analyse der Wasser- und Stoffflüsse mit einem Pfad-Transformations-Ansatz

2.1 Hydrologische und hydrochemische Grundlagen

In Feuchtgebieten bieten sich, im Vergleich zum grundwasserfernen Einzugsgebiet und dem Gewässer selbst, relativ einfache und räumlich begrenzte Möglichkeiten, aktiv in die Fließwege der verschiedenen Wasserpfade einzugreifen. Die Einfachheit der Wasserregulierung in grundwasserbeeinflussten Niederungen gilt als eine der Ursachen für die nahezu flächendeckende Entwässerung und Trockenlegung der Landschaften Westeuropas. Den damit allgemein verbundenen erhöhten Stoffausträgen wurde lange Zeit eine zu geringe Aufmerksamkeit geschenkt. Viele Jahre hat sich die Forschung, nach Fachgebieten getrennt, mit der Untersuchung einzelner Feuchtgebietsstandorte oder einzelner Gewässer beschäftigt. Deutliche Erkenntnisfortschritte waren zu verzeichnen, als durch hydroökologische und systemhydrologische Sichtweisen der Einfluss der Feuchtgebiete auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Einzugsgebieten explizit nachgewiesen wurde (GROOTJANS et al. 1996; MITSCH & GOSSELINK 2000). Neben den Wasserbilanzen der Teilflächen liefert die Aufklärung der in Abb. 1 eingetragenen Wasserpfade den Schlüssel zum Verständnis der stofflichen Wechselwirkungen zwischen Landflächen, Feuchtgebieten und Gewässern.

Stickstoff wird überwiegend in gelöster Form als Nitrat transportiert und gelangt über zahlreiche wasserbürtige Fließwege in die Oberflächengewässer. Die verstärkte Denitrifikation des Nitrats bei reduzierendem Milieu im Feuchtgebiet bestimmt die Retentionswirkung. Phosphor wird vorwiegend in einer an Boden und Humuspartikel gebundenen Form transportiert, als Haupteintragspfade werden Bodenerosion und Direkteinleitungen angesehen. Untersuchungen über diffuse Phosphoreinträge über den Grundwasser- und Drainagepfad zeigen, obwohl selten durchgeführt, dass die über diese Fließwege eingetragenen Mengen bei zukünftigen Maßnahmen nicht mehr zu vernachlässigen sind (BEAUCHEMIN et al. 1998; SIMARD et al. 1999).

Eine mittelfristig erfolgversprechende Reduzierung sowohl der Stickstoff- als auch der Phosphor-Konzentrationen in den Oberflächengewässern ist nur durch ein an die jeweiligen Eintragspfade und deren Retentionspotenziale geknüpftes Management im Sinne eines integrierten Gewässerschutzes möglich. Ein Management von grundwassernahen Niederungen zur Verbesserung des Stoffrückhaltes zielt ab

- (I) auf eine Verminderung der Drain- und Grabenabflüsse, den Wasserrückhalt im Feuchtgebiet und eine Erhöhung der Verweilzeiten des Wassers in der Niederung,
- (II) auf eine Verminderung der Mineralisationsraten und damit der feuchtgebietsinternen Stoffausträge,
- (III) eine Erhöhung der hydrochemischen Transformationsprozesse insbesondere der Denitrifikation,
- (IV) die Sedimentation von Schwebstoffen und Partikeln in überfluteten Flächen und
- (V) eine Verminderung der direkten erosiven Einträge bei Starkregenereignissen.

Dabei sollte berücksichtigt werden, dass mit der Wiedervernässung auch negative Folgewirkungen verbunden sein können. Das betrifft zum Einen einen möglichen Anstieg des Direktabflusses von vernässten Flächen durch erhöhten Sättigungsabfluss, zum Anderen besteht die Gefahr des Anstiegs der Ammoniumkonzentrationen, der Rücklösung von Phosphor und deren Austrag über verschiedene Abflusspfade sowie des potenziellen Anstiegs der Emission klimarelevanter Spurengase (MITSCHE & GOSSELINK 2000; KADLEC 1999; ROULET 2000). Die Ursachen für das divergierende Verhalten von Phosphor und Stickstoff liegt in den unterschiedlichen hydrochemischen Bindungsformen und Austragspfaden begründet.

Ein Management, das auf die Erhöhung der Stoffretention und die Verminderung der diffusen Stoffausträge abzielt, ist nur bei genauer Kenntnis der individuellen, räumlichen Einbindung von Feuchtgebieten in die Landschaft möglich.

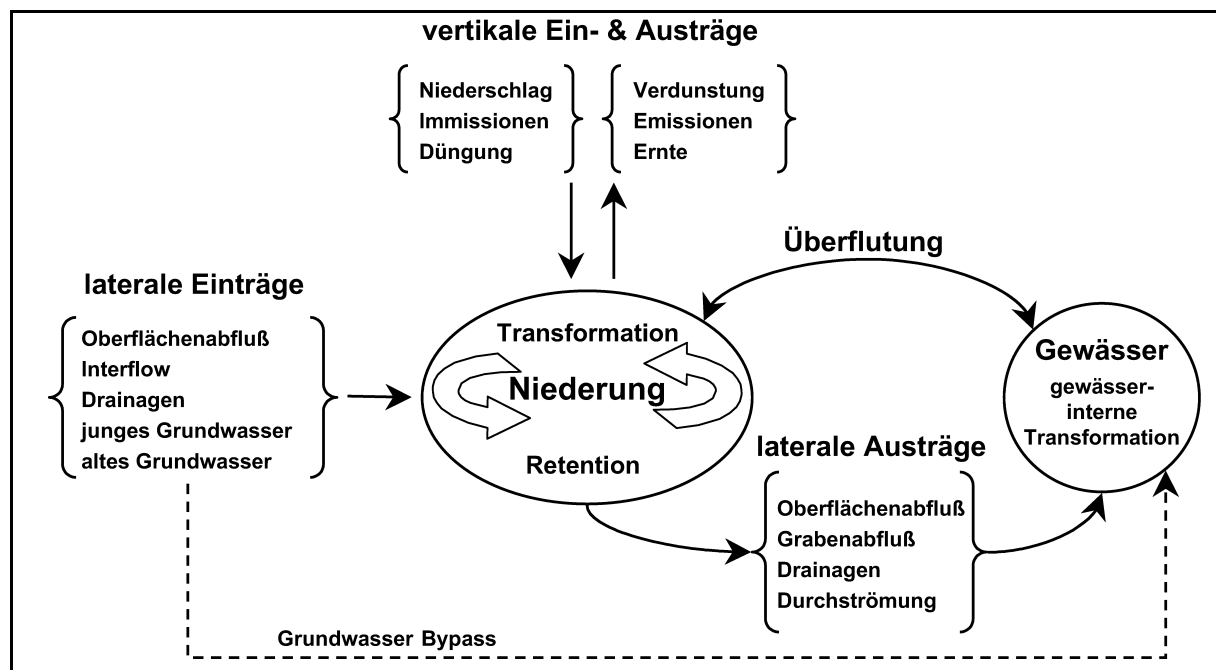


Abb. 1: Wasseraustausch und räumliche Interaktionen zwischen grundwasserfernem Einzugsgebiet, Feuchtgebiet und Gewässer als Basis für den Pfad-Transformations-Ansatz.

Das Pfad-Transformations-Konzept betrachtet Feuchtgebiete als Schnittstellen (Ökotone) zwischen terrestrischen und aquatischen Ökosystemen, in denen in Abhängigkeit von den Feuchteverhältnissen semi-terrestrische oder semi-aquatische Ökosysteme vorherrschen (Abb. 1). In der Landschaft führen die geomorphologischen und klimatischen Verhältnisse zu räumlich und zeitlich variablen hydrologischen und hydrochemischen Bedingungen, in deren Zusammenspiel sich komplexe Niederungslandschaften ausbilden. Die Transformations- und Retentionspotenziale von Feuchtgebieten werden wesentlich von der Lage des

Feuchtgebiets im Einzugsgebiet, den hydrogeologischen Anströmungsverhältnissen sowie der Feuchtgebietsgröße bestimmt.

Die zuströmenden Eintragspfade lassen sich unterteilen in:

- lateral zufließende Wassermengen, differenzierbar in:
 - Landoberflächenabfluss von angrenzenden Hängen,
 - Interflow von angrenzenden Hängen,
 - Zufluss über Hangdrainagen,
 - Zufluss von oxischem, vorwiegend jungem Grundwasser,
 - Zufluss von anoxischem, vorwiegend altem Grundwasser,
 - Zufluss von Grundwasser aus tiefer liegenden grundwasserführenden Schichten,
- Wasserspeisung durch Niederschlagsüberschuss in der Niederung,
- Fließgewässerzufluss aus vorgelagerten Feucht- und Einzugsgebieten (Überflutung).

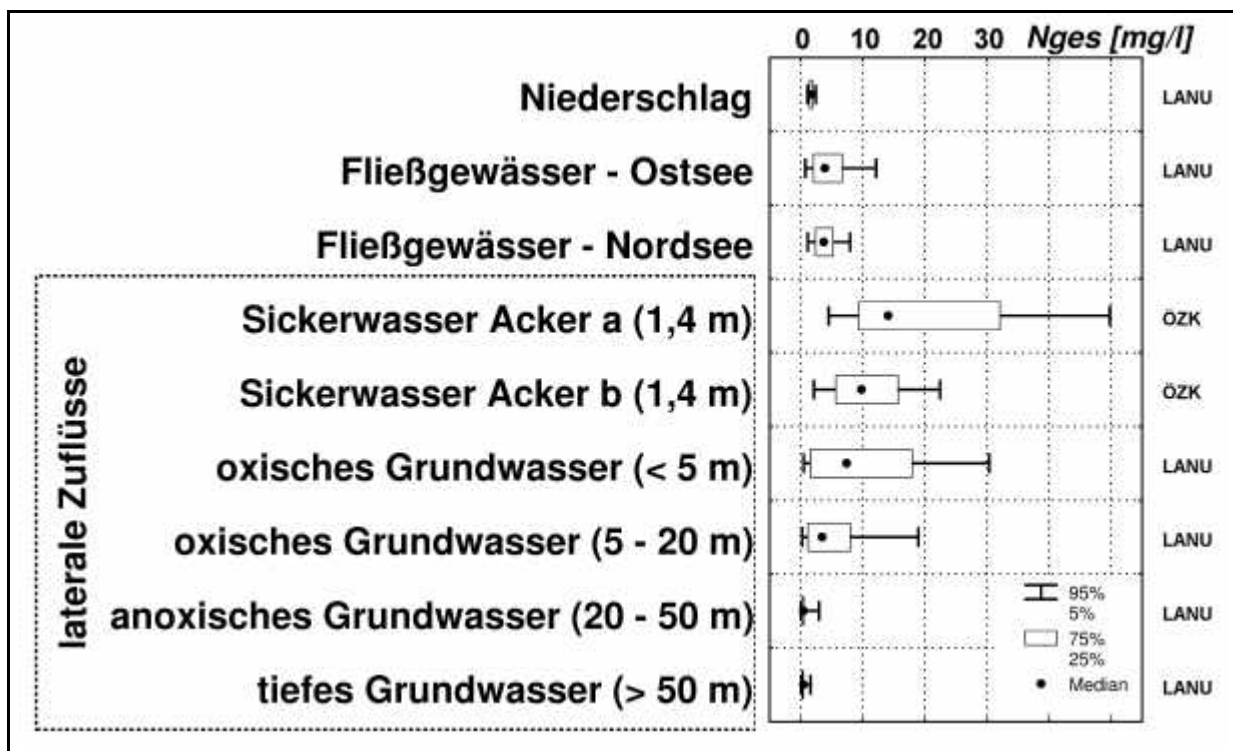


Abb. 2: Statistische Verteilung der Gesamt-Stickstoffkonzentration von Wässern in Schleswig-Holstein als Ergebnis einer zusammenfassenden Auswertung verschiedener Gewässergüte-Messprogramme des Landesamtes für Natur und Umwelt, differenziert nach der Filtertiefe und ergänzt um Daten zur Sickerwasserqualität zweier benachbarter, unterschiedlich bewirtschafteter Äcker am Belauer See (TREPPEL & KLUGE 2001).

Die hydrochemischen Verhältnisse im Feuchtgebiet bewirken eine Transformation bzw. eine Retention der eingetragenen bzw. freigesetzten Stoffe, so dass im günstigen Fall die über unterschiedliche Austragspfade abfließenden Stofffrachten in der Summe im Vergleich zu den eingetragenen Stoffmengen geringer sind. Die einzelnen Eintragspfade unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlich langen Verweilzeiten, des spezifischen hydrochemischen Milieus und der dabei möglichen Stofftransformationen deutlich in ihren Stickstoffkonzentrationen (Abb. 2). Die Stickstoffkonzentrationen sind besonders in den oberflächennahen Wässern und bei kurzen Verweilzeiten hoch. Gleichzeitig haben diese Wässer aufgrund unterschiedlicher Bodeneigenschaften, Nutzungsintensitäten und variierender Witterungsverhältnisse aber auch die breiteste Streuung der Stoffkonzentrationen. Mit zunehmender Probenahmetiefe im Grundwasserleiter nehmen die Stickstoffkonzentrationen ebenso wie die Streuung der Messwerte ab.

Das lateral zufließende Wasser eines Feuchtgebietes ist hydrochemisch immer ein Mischprodukt unterschiedlicher Wässer. Besonders hohe Stoffeinträge sind von schnellen Eintragspfaden - wie Oberflächenabfluss, Interflow, Hangdrainagenzufluss und dem oxischen, vorwiegend jungen Grundwasserzuflüssen - zu erwarten. Eine Quantifizierung der Mischungsanteile ist unter anderem über Isotopenanalysen in Verbindung mit geohydrologischer Modellierung möglich. Die hydrologischen und hydrochemischen Verhältnisse eines Feuchtgebietes ergeben sich zunächst aus den Mischungsverhältnissen der über die einzelnen Eintragspfade eingetragenen Wasser- und Stoffmengen. Beispielsweise sind Hochmoore rein Regenwasser gespeist, in Quellmooren erfolgt der quantitativ bedeutsamste Wasserzufluss über den lateralen Grundwasserpfad und in Überflutungsmooren über zufließendes Flusswasser.

Im Feuchtgebiet fließen die eingetragenen Wasser- und Stoffmengen über unterschiedliche Austragspfade hin zum Gewässer. Die Austragspfade unterscheiden sich hinsichtlich der physikalischen und hydrochemischen Bedingungen, insbesondere der Fließgeschwindigkeit und der Potenziale für biochemische Abbauprozesse.

Über die unterschiedlichen Transformationspotenziale der hydrologischen Austragspfade ist der Stoffabbau während der Passage durch das Feuchtgebiet steuerbar. Während Feuchtgebiete mit vorherrschender oberflächennaher Durchströmung und Sättigungsabfluss ein hohes Potenzial für den Rückhalt lateral (lateral) zufließender Stoffe haben, bleibt dieses Potenzial in über Fanggräben, Gräben und Drainagen entwässerten Feuchtgebieten nahezu ungenutzt. Im Stickstoffkreislauf wird vor allem lateral zufließendes Nitrat an der Grenzschicht zum anaeroben Torfkörper nahezu vollständig denitrifiziert (BLICHER-MATHIESEN et al. 1998; HAYCOCK et al. 1993; HOFFMANN et al. 2000).

Auch der direkte Wasser- und Stoffaustausch zwischen Feuchtgebiet und Fließgewässer während der Überflutungsphasen führt zu einem Stoffrückhalt durch Sedimentation und bei ausreichend langer Verweilzeit von mindestens fünf Tagen auch zu einem Stoffabbau durch Denitrifikation (MITSCH & GOSSELINK 2000).

Gegenüber anderen Ansätzen zur Feuchtgebietsklassifizierung zeichnet sich das Pfad-Transformations-Konzept dadurch aus, dass es sowohl eine differenzierte Abbildung der hydrogeologischen Anströmverhältnisse zum Feuchtgebiet wie auch der Wasserverteilung innerhalb des Feuchtgebietes erlaubt und somit den Grad der anthropogen bedingten, wasserwirtschaftlichen Überformung abbilden kann.

2.2 Bewertungsmodell WETTRANS für die Abschätzung der Stoffretention in Talniederungen

Der hier vorgestellte Ansatz kann mathematisch, wie in Abb. 3 dargestellt, in Matrizenform geschrieben werden. Um eine Anwendung als entscheidungsunterstützendes Bewertungssystem in den Umweltverwaltungen zu erreichen, wird der Grundsatz verfolgt, die für ein Stoffstrommanagement relevanten hydrologischen Strukturen nur so komplex wie nötig abzubilden. Bei der Modellierung wird dabei im Sinne eines quasistationären Ansatzes, der für Prognosen unter der Vorgabe mittlerer (effektiver) Verhältnisse durchaus gerechtfertigt ist, auf die Abbildung der kurzzeitlichen Dynamik verzichtet.

Das auf dem Pfad-Transformations-Ansatz beruhende Bewertungsmodell WETTRANS wurde bisher für die quantitative Bewertung der Stickstoffretention in Feuchtgebieten des norddeutschen Tieflands erprobt. Das Modell besteht aus zwei Eingangsvektoren, welche die Wasserzuflüsse aus dem Einzugsgebiet und deren Stoffkonzentration darstellen. Das Feuchtgebiet wird durch zwei Matrizen beschrieben, über die die zufließenden Eintragspfade auf die aus dem Feuchtgebiet abfließenden Austragspfade verteilt werden und jedem Austragspfad ein austragspfadspezifischer Transformationswert zugeordnet wird. Die Stofftransformation der einzelnen Austragspfade hängt beim Stickstoff vom vorherrschenden hydrochemischen Milieu ab und nimmt in der Reihenfolge oberflächennahe Durchströmung > Oberflächenabfluss > Grabenabfluss > Drainageabfluss > Überflutung/Gewässerdurchfluss ab. Die pfadspezifischen Transformationskoeffizienten wurden in einer ersten Annäherung aus Literaturdaten abgeleitet. Wenn die Zufluss- und Abflusskonzentrationen sowie die Wasserverteilung bekannt sind, können die entsprechenden stofflichen Transformationswerte für die Niederung nach einem besonderen Algorithmus berechnet werden.

Eine ausführliche Darstellung der mathematischen Grundlagen befindet sich in (TREPEL & KLUGE 2001). Als Ergebnis liefert das Gleichungssystem drei Vektoren für die austragspfadspezifischen Wasserflüsse, die Stoffkonzentrationen und die Stofffrachten.

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \\ a_m \end{array} \right)
 \end{array}
 b = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ b_m \end{array} \right) \\
 \end{array}
 C = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{cccc} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ c_{31} & c_{32} & \dots & c_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{array} \right) \\
 \end{array}
 D = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{cccc} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ d_{31} & d_{32} & \dots & d_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{array} \right) \\
 \end{array}
 e = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \dots \\ e_n \end{array} \right) \\
 \end{array}
 f = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ f_n \end{array} \right) \\
 \end{array}
 g = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \dots \\ g_n \end{array} \right) \\
 \end{array}$$

Abb. 3: Elemente des Pfad-Transformations-Modelles WETTRANS zur Quantifizierung der Wasser- und Stickstoffflüsse/-transformation in Feuchtgebieten mit
a = Vektor der eintragspfadspezifischen Wassermengen,
b = eintrags-pfadspezifische Stoffkonzentration,
C = Wasserverteilungsmatrix zur Aufteilung der Eintragspfade auf die Austragspfade des Feuchtgebietes,
D = Stofftransformationmatrix mit eintrags-austragspfadspezifischen Transformationskoeffizienten,
e = Vektor der austragspfadspezifischen Wasserflüsse,
f = Vektor der austragspfadspezifischen Stoffkonzentration,
g = Vektor der austragspfadspezifischen Stofffrachten.

3. Anwendungsbeispiel Oberes Eiderdal

Zur Parametrisierung und Erprobung des Pfad-Modelles WETTRANS wurden die Wasser- und Stickstoffflüsse in dem Flusstal Niedermoor der Oberen Eider südlich Kiels quantifiziert (JENSEN et al. 2001; TREPEL & KLUGE 2002). Das Modellprojekt „Oberes Eiderdal“ dient der Vorbereitung und Umsetzung des Niedermoorprogramms des Landes Schleswig-Holstein. In diesem Flusstal Niedermoor sind Verlandungs-, Durchströmungs- und Quellmoore eng miteinander vergesellschaftet. Ziel ist es, durch Erhöhung der Stoffretention im Feuchtgebiet die Nährstoffbelastung der Eider zu reduzieren, gleichzeitig die Niedermoorbiotopstrukturen zu verbessern und das Biotopverbundsystem zu stärken.

Erreicht werden kann dies durch

- (I) ein Anheben der Grundwasserflurabstände der entwässerten Niedermoorböden,
- (II) die Änderung der landwirtschaftlichen Nutzung im Talraum durch die Schaffung großflächiger, extensiv beweideter Flächen und
- (III) eine Rücknahme der Gewässerunterhaltung (vor allem Mahd von Böschung und Gewässersohle) im ca. sieben Kilometer langen Gewässerabschnitt der Eider (Staatliches Umweltamt Kiel 2000).

Das zum Flussabschnitt gehörende etwa 300 ha große Niedermoor erhält seine Wasserzuflüsse und Stickstoffeinträge über acht Eintragspfade (vgl. Abb. 4). Die longitudinalen Zuflüsse aus dem 120 km² großen vorgelagerten Einzugsgebiet der oberen Eider sowie die lateralen Zuflüsse mit dem jungen Grundwasser gehen mit entsprechend hohem Gewicht in die Gesamtbilanzen ein. Besonders über den Eintragspfad des jungen, überwiegend oxischen Grundwassers wird im Vergleich zur Wassermenge überproportional viel Stickstoff aus dem umgebenden grundwasserfernen Einzugsgebiet in das Untersuchungsgebiet eingetragen. Die Wasser- und Stickstoffzuflüsse verteilen sich im Feuchtgebiet auf sieben Austragspfade. Das hydrologische Regime im Flusstalniedermoor wird gegenwärtig durch Entwässerungsgräben sowie durch einen in die Niederung eingetieften begradigten Flusslauf gesteuert. Im Mittel werden jährlich etwa 20,5 t N über den Austragspfad Entwässerungsgräben und 6.0 t N über Drainagen ausgebracht. Aktuell werden in dem zum Gewässerabschnitt gehörenden Feuchtgebiet ca. 40 t N a⁻¹ zurückgehalten, wovon die Retention der seitlichen (lateralen) Zuflüsse ca. 12 t N a⁻¹ und die gewässerinterne Retention einschließlich des Rückhaltes bei Überflutungen des Zustromes aus dem vorgelagerten Einzugsgebiet bei longitudinaler Durchströmung ca. 27 t N a⁻¹ betragen (vgl. Tab. 1).

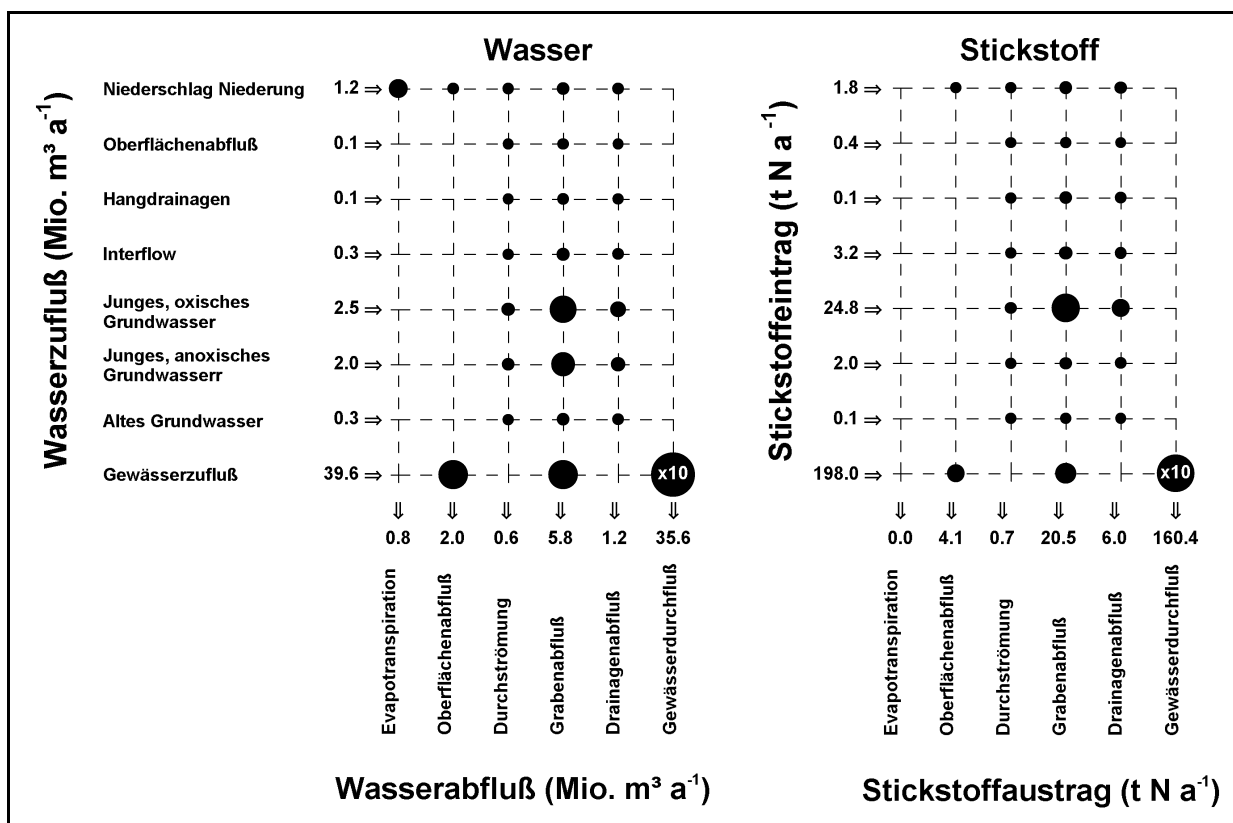


Abb. 4: Wasser- und Stickstoffflüsse im Flusstalniedermoor der oberen Eider unter aktuellen hydrologischen Verhältnissen nach Berechnungen mit dem Modellsystem WETTRANS.

Die Effizienz der Stofftransformation ST oder der Retentionskoeffizient errechnet sich aus Gleichung (1):

$$ST = 100 \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^m Q_{in_i} \cdot C_{in_i} \right) - \left(\sum_{j=1}^n Q_{out_j} \cdot C_{out_j} \right)}{\sum_{i=1}^m Q_{in_i} \cdot C_{in_i}} \quad (1)$$

mit Q_{in_i} und C_{in_i} als eintragspfadspezifische Wasserzuflüsse und Stoffkonzentrationen (Index i) und mit Q_{out_j} und C_{out_j} als austragspfadspezifische Wasserzuflüsse und Stoffkonzentrationen (Index j).

Unter aktuellen Bedingungen beträgt die Effizienz des Stickstoffrückhaltes für das Gesamtsystem (Gewässerabschnitt mit Feuchtgebiet) 17 %. Die Effizienz der lateralen Retention ist mit 37 % mehr als doppelt so hoch und verdeutlicht die große Bedeutung lateraler Fließwege und der daran gekoppelten Transformationspotenziale für ein Stoffstrommanagement zur Verminderung der diffusen Einträge.

Tab. 1: Stickstofftransformation ($t N a^{-1}$) und deren Effizienz (ST in %) für lateralen diffusen Eintrag, die longitudinale Durchströmung und das Gesamtsystem eines Gewässerabschnittes mit Flusstalniedermoor im oberen Eidertal unter aktuellen hydrologischen Verhältnissen im Vergleich mit drei möglichen hydrologischen Szenarien: Puffer = laterales Pufferzonenmanagement; Überflutung = longitudinales Überflutungsmanagement; P&Ü = kombiniertes lateral-longitudinales Retentionsmanagement.

	aktuell		Puffer		Überflutung		P&Ü	
	($t N a^{-1}$)	ST (%)	($t N a^{-1}$)	ST (%)	($t N a^{-1}$)	ST (%)	($t N a^{-1}$)	ST (%)
Lateral	12.9	37.5	18.0	52.4	12.9	37.5	18.0	52.4
Longitudinal	27.7	14.0	27.7	14.0	45.5	23.0	45.5	23.0
Kombination	40.6	17.5	45.7	19.7	58.4	25.1	63.5	27.3

Eine Prognose der Effizienz wasserwirtschaftlicher Maßnahmen wird mit dem Modell WETTRANS durch Veränderungen in der Wasserverteilungsmatrix realisiert, das heißt bei der Prognose werden die zufließenden Wasser- und Stoffmengen auf andere Austragspfade verteilt. Da sich diese Austragspfade in ihren Transformationskoeffizienten unterscheiden, sind damit Veränderungen in der Summe der Stoffausträge bzw. der Retentionsraten möglich.

Für das Flusstalniedermoor der oberen Eider bieten sich zwei Managementoptionen an (Abb. 5):

- Zum Einen können nach dem Rückbau der Drainagen und der Entwässerungsgräben die Transformationspotenziale durch eine intensivere Durchströmung des oberflächennahen Torfkörpers und eine oberflächenparallele Sickerbewegung aktiviert werden (*laterales Pufferzonenmanagement*),
- zum Anderen ist durch den Verzicht auf eine Gewässerunterhaltung eine längere und häufigere (longitudinale) Überflutung der ufernahen Bereiche möglich (*longitudinales Pufferzonenmanagement/Überflutungsmanagement*).

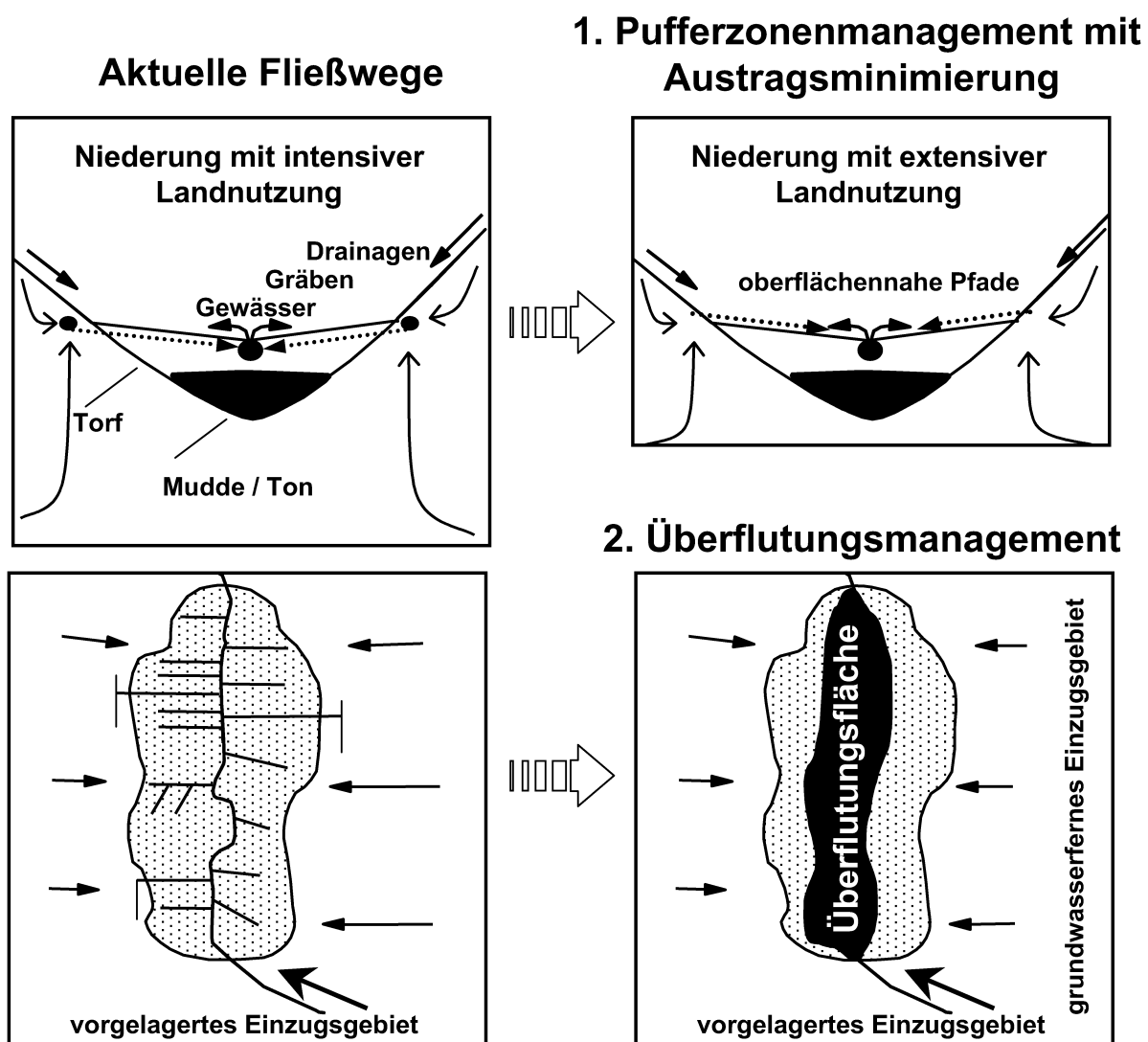


Abb. 5: Aktuelle Fließwege eines intensiv landwirtschaftlich genutzten Flusstalniedermoores und mögliche Managementoptionen zur Reduzierung der diffusen Stoffeinträge in Oberflächengewässer.

Bei einem lateralen Pufferzonenmanagement erhöht sich die Stickstofftransformation im Gesamtsystem um etwa 5 t N a^{-1} , wobei die Effizienz der lateralen Transformation ca. 50 % beträgt (vgl. Tab. 1), d.h. mehr als die Hälfte des lateral zufließenden Stickstoffs werden im Feuchtgebiet zurückgehalten. Bei einem longitudinale Überflutungsmanagement erhöht sich der Stickstoffrückhalt um 18 t N a^{-1} , die Effizienz des gesamten Systems erhöht sich lediglich um ca. 8%, weil der Zustrom aus dem vorgelagerten Einzugsgebiet den lateralen diffusen Eintrag etwa sechsfach übertrifft (vgl. Zahlen in Abb. 4). Durch eine Kombination beider Managementstrategien im Rahmen eines lateral-longitudinalen Niederungsmanagements könnten etwa 63 t N a^{-1} zurückgehalten werden.

Mit diesen quantitativen Angaben der zu erwartenden Stickstofftransformationen können die Umweltämter im Rahmen der Umsetzung von Feuchtgebietsprogrammen die Effizienz der Maßnahme im Hinblick auf den Rückhalt diffuser Stoffeinträge im Vorfeld einschätzen und gegebenenfalls detailliertere genauere Untersuchungen oder die Realisierung der Maßnahme initiieren.

4. Managementstrategien zur Erhöhung der Stoffretention in Niederungen

Mit dem pfadbasierten Ansatz können sowohl die aktuellen Stoffausträge von Feuchtgebieten bzw. Talraumsektoren als auch die Wirksamkeit möglicher Maßnahmen vereinfacht, aber noch weitgehend systemadäquat als zeitliche Mittelwerte für Stickstoff und Phosphor beschrieben werden. Da für jeden geohydrologischen Niederungstyp und dessen Entwässerungszustand die ober- und unterirdischen Wasserpfade jeweils charakteristische Muster aufweisen und diese wiederum eng mit den jeweils dominierten Stofftransformationen (z. B. Denitrifikation, Sedimentation u. a.) korreliert sind, kann der Aufwand bei der Parametrisierung durch das Zurückgreifen auf typspezifische Standarddatensätze stark reduziert werden. Das komplexe Wissen, das zu den Einzelprozessen vorliegt und von gemessenen bis zu simulierten Daten reicht, verbirgt sich dabei hinter diesen Standarddaten. Die Maßnahmen zur Verminderung der diffusen Stoffausträge aus den Feuchtgebieten in die Gewässer, die entweder über reduzierte Stoffeinträge ins Feuchtgebiet, veränderte interne Fließwege oder entsprechend erhöhte Retentionskoeffizienten in den Pfadmatrizen berücksichtigt werden, lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

- Die **Austragsminimierung (interne Retention)** zielt auf die Verringerung der feuchtgebietsinternen Stofffreisetzung/-austräge ab. Besonders entwässerte und landwirtschaftlich intensiv genutzte Niedermoorböden haben aufgrund des hohen Vorrats an organischer Substanz hohe Mineralisationsraten, besonders im Frühjahr und nach Applikation von Düngemitteln werden diese Stoffe nicht vollständig von der Vegetation aufgenommen und können über schnell entwässernde Fließwege die Oberflächengewässer belasten. Das Austragsrisiko hängt darüber hinaus vom Säure-Basen-Verhältnis und vor allem vom Profilaufbau ab: Bei flachgründigen und Sand unterlagerten

Niedermoorböden ist das Risiko für Stickstoffauswaschungen größer als in mächtigen und mude-unterlagerten Moorböden. Hier wird ein Großteil des durch Mineralisation gebildeten Nitrats bei der Tiefenverlagerung in anaeroben Schichten denitrifiziert, sofern es nicht vorher über Drainagen dem Gewässer direkt zugeführt wird (TREPPEL 2000). Eine Austragsminimierung durch Extensivierung und Anhebung der Wasserstände ist insbesondere in großflächigen Niederungsgebieten unabhängig von der dominierenden Wasserspeisung sinnvoll. In Regenwasser dominierten Niederungen ist die Austragsminimierung die einzig sinnvolle Managementstrategie, da diese Systeme für den Gewässerschutz immer eine mögliche Stoffquelle darstellen.

- Ein **Pufferzonenmanagement (laterale Retention)** zielt auf die Verringerung der diffusen Stoffeinträge über laterale Fließwege ab, dabei werden die Transformationspotenziale insbesondere die Denitrifikation an der Grenzschicht zwischen Grundwasser und anaeroben Torfkörper genutzt. Ein laterales Pufferzonenmanagement ist in allen Niederungen sinnvoll, die erhöhte Stoffeinträge über laterale Eintragspfade mit erhöhten Stoffkonzentrationen (z. B. oxisches, vorwiegend junges Grundwasser, Interflow, Oberflächenabfluss etc.) erhalten. Die Wirksamkeit der Transformationsprozesse wird wesentlich von der Verfügbarkeit von Nitrat und dem ausreichenden Vorhandensein von leicht verfügbaren Kohlenstoffverbindungen bestimmt, die Länge des Fließweges ist dabei im Vergleich zum Wechsel des hydrochemischen Milieus von untergeordneter Bedeutung. Ein laterales Pufferzonenmanagement ist daher unabhängig von der Niederungsgröße und der Niederungsbreite. Ein laterales Pufferzonenmanagement kann durch die Verlagerung von Fanggräben in die Niederung einfach realisiert werden.
- Ein **Überflutungsmanagement (longitudinale Retention)** zielt auf die Verminderung der Stoffkonzentration der bereits im Fließgewässer befindlichen Stoffe ab. Hierzu ist die Wiederherstellung des Wasser- und Stoffaustausches zwischen Niederung und Fließgewässer durch Überflutung erforderlich. Eine wirksame Verminderung der Stoffkonzentrationen ist allerdings nur bei einer ausreichend langen Verweilzeit möglich, für Denitrifikationsprozesse in überflutungsgeprägten Feuchtgebieten werden Verweilzeiten von mindestens fünf Tagen benötigt (MITSCH & GOSSELINK 2000). Die Wiederherstellung einer natürlichen Überflutungsdynamik ist aber besonders für die Förderung niederungstypischer Biozönosen von Bedeutung. Ein longitudinales Überflutungsmanagement zur Erhöhung des Stoffrückhaltes ist daher besonders in großen und breiten Niederungen zu empfehlen, die vorwiegend über Flusswasser gespeist werden.

Nach Tabelle 2 ist ein laterales Pufferzonenmanagement häufig die effizienteste Maßnahme zur Erhöhung der Stoffretention in Talniederungen. Um die Wirksamkeit dieser Methode zur Reduzierung der diffusen Stoffeinträge zu überprüfen, besteht erhöhter Forschungsbedarf im Bereich des Managements der Anströmungsverhältnisse von Talniederungen unter unterschiedlichen hydrogeologischen Bedingungen.

Tab. 2: Matrix zur Ableitung effizienter Managementstrategien für Talniederungen zur Verbesserung der Wasserqualität.

A, a: Austragsminimierung;

P: laterales Pufferzonenmanagement;

Ü: longitudinales Überflutungsmanagement;

PÜ: latera-longitudinales Pufferzonen- und Überflutungsmanagement.

Flächengröße		groß		klein	
Breite		breit	schmal	breit	schmal
Wasserbilanz	Regenwasser dominiert	A	A	a	a
	Grundwasser dominiert	P & A	P & A	P, a	P, a
	Flußwasser dominiert	Ü & A	P & A	P, a	P, a
	Grund- & Flußwasser dominiert	PÜ & A	P & A	P, a	P, a

5. Fazit

Feuchtgebiete haben aufgrund ihrer besonderen hydrologisch-hydrochemischen Bedingungen ein hohes Potenzial zur Verminderung der diffusen Stoffeinträge in Fließgewässer. Die Entwicklung und Umsetzung effizienter Managementstrategien zur Erhöhung der lateralen und longitudinalen Stoffretention sowie zur Verminderung der internen Stoffausträge ist nur bei genauer Kenntnis der individuellen, räumlichen Einbindung von Feuchtgebieten in die Landschaft insbesondere deren hydrogeologische Anströmungsverhältnisse möglich. Das noch in der Erprobung befindliche Feuchtgebiets-Stoffretentions-Modell WETTRANS liefert einen Beitrag zum besseren Verständnis und zur integrativen Auswertung der hydrologischen und stofflichen Funktion von Feuchtgebieten. Es dient der objektiv nachvollziehbaren Bewertung der Effizienz von Maßnahmen zur Wiederherstellung der Retentionsfunktion von Feuchtgebieten und damit zur Verminderung der diffusen Stoffeinträge in Gewässer.

6. Zusammenfassung

Die Feuchtgebiete der Talniederungen steuern den lateralen Wasser- und Stoffaustausch zwischen dem grundwasserfernen Einzugsgebiet und den Fließgewässern. Durch eine Vielzahl wasserwirtschaftlicher Maßnahmen haben die Feuchtgebiete ihre natürliche Retentionsfunktion weitgehend verloren bzw. wirken selbst als Stoffquellen. Am Beispiel eines Flusstalniederermoors in Schleswig-Holstein wird gezeigt, dass mit einem Pfad-Transformations-Ansatz das komplexe hydrologisch-hydrochemische Wirkungsgefüge einschließlich der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse stark vereinfacht, aber annähernd systemadäquat beschrieben werden kann. Mit dem auf dem Pfad-Ansatz beruhenden

Bewertungsmodell WETTRANS werden die mittleren aktuellen Wasser- und Stickstoffflüsse in den Niederungen des Modellgebietes in Abhängigkeit von den geohydrologischen Anströmverhältnissen quantifiziert und die Stoffretention bei der Umsetzung von potenziellen Managementmaßnahmen prognostiziert. Das Bewertungssystem ist geeignet, die für den diffusen Stoffeintrag in Gewässer quantitativ bedeutsamen und für ein Management sensiblen Eintragspfade aufzufinden. Neben der Austragsminimierung aus großen Niederungen und einem Überflutungsmanagement erscheint ein laterales Pufferzonenmanagement als besonders geeignet, die diffuse Stoffbelastung der Oberflächenwässer im Rahmen der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie wirksam zu reduzieren.

Danksagung

Die Entwicklung und Erprobung des Pfad-Transformations-Konzeptes wurde vom Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Abteilung Wasserwirtschaft, im Rahmen der Begleitforschung zum Niedermoorprogramm Schleswig-Holsteins finanziell gefördert.

Literatur

- BEAUCHEMIN, S., SIMARD, R.R. & CLUIS, D. (1998): Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty- seven tile-drained soils. - *Journal of Environmental Quality* **27**: 721-728.
- BLICHER-MATHIESEN G., MCCARTY G.W. & NIELSEN L.P. (1998): Denitrification and degassing in groundwater estimated from dissolved dinitrogen and argon. - *Journal of Hydrology* **208**: 16-24.
- DALL'O', M., KLUGE, W. & BARTELS, F. (2001): FEUWANet: a multi-box water level and lateral exchange model for riparian wetlands. - *Journal of Hydrology* **250**: 40-62.
- GRIMVALL, A., STÅLNACKE, P. & TONDERSKI, A. (2000): Time scales of nutrient losses from land to sea - a European perspective. - *Ecological Engineering* **14**: 363-371.
- GROOTJANS, A., VAN WIRDUM, G., KEMMERS, R.; VAN DIGGELEN, R. (1996): Ecohydrology in the Netherlands: principles of an application-driven interdisciplinary. - *Acta Botanica Neerlandica* **45**: 491-516.
- HAYCOCK, N.E.; PINAY, G.; WALKER, C. (1993): Nitrogen Retention in River Corridors: European Perspective. - *AMBIO* **22**: 340 -346.
- HOFFMANN, C.C.; RYSGAARD, S.; BERG, P. (2000): Denitrification rates predicted by nitrogen-15 labeled nitrate microcosm studies, in situ measurements and modeling. - *Journal of Environmental Quality* **29**: 2020-2028.

- JELINEK, S.; KLUGE, W.; WIDMOSER, P. (1999): Über das Abflußverhalten kleiner Einzugsgebiete in Norddeutschland am Beispiel der oberen Stör in Schleswig-Holstein. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung **43**: 3-17.
- JENSEN, K.; GRANKE, O.; HOPPE, B.; KIECKBUSCH, J.; TREPPEL, M.; LEINER, U. (?): Weidelandschaft Eidertal - Naturschutz durch extensive Beweidung und Wiedervernässung. - Petermanns Geographische Mitteilungen **144**: 38-49.
- KADLEC, R.H. (1999): The limits of phosphorus removal in wetlands. - Wetlands Ecology and Management **7**: 165-175.
- KLUGE, W.; JELINEK, S.; MARTINI, M. (2000): Einfluß von Talniederungen auf die diffusen Stoffeinträge in Kleingewässer über den Grundwasserpfad. - In FRIESE, K.; WITTER, B.; MIEHLICH, G.; RODE, M. (Hrsg.): Stoffhaushalt von Auenökosystemen – Böden und Hydrologie, Schadstoffe Bewertungen. Springer, Berlin, S. 129-138.
- MITTSCH, W. J.; GOSSELINK, J. G. (2000): Wetlands. 3. Aufl., 920 S. - Wiley, New York.
- ROULET, N.T. (2000): Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: prospects and significance for Canada. - Wetlands **20**: 605-615.
- SAND-JENSEN, K.; RIIS, T.; VESTERGAARD, O.; LARSEN, S.E. (2000): Macrophyte decline in danish lakes and streams over the past 100 years. - Journal of Ecology **88**: 1030-1040.
- SCHULZ, F. (2000): Trendauswertung der stofflichen Belastung schleswig-holsteinischer Fließgewässer. - In: Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, (Hrsg.): Jahresbericht 1999, S. 59-65.
- SIMARD, R.R.; BEAUCHEMIN, S.; HAYGARTH, P.M. (2000): Potential for preferential pathways of phosphorus transport. - Journal of Environmental Quality **29**: 97-104.
- STAATLICHES UMWELTAMT KIEL (Hrsg.) (2000): Jahresbericht 1999. 39 S. Kiel.
- TÓTH, J. (1999): Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes and manifestations. - Hydrogeology journal **7**: 1-4.
- TREPPEL, M. (2000): Quantifizierung der Stickstoffdynamik von Ökosystemen auf Niedermoorböden mit dem Modellsystem WASMOD. - EcoSys – Beiträge zur Ökosystemforschung Supplement **29**: 1-140, Kiel.
- TREPPEL, M.; KLUGE, W. (2001): Entwicklung und Erprobung eines Systems zur Bewertung des Rückhaltes von Nährstoffen in den Niedermooren Schleswig-Holsteins. Endbericht Teilprojekt 1. - Forschungsvorhaben im Auftrag des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. 90 S., Kiel.
- TREPPEL, M.; KLUGE, W. (2002): Ecohydrological characterisation of a degenerated valley peatland in Northern Germany for use in restoration. - Journal for Nature Conservation **10**: 155-169.