

5 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Die vorliegende Studie beinhaltet die Untersuchungen und Ergebnisse der theoretischen und praktischen Arbeiten zum Teilprojekt „Untersuchung und Bilanzierung des Nährstofftransportes im Interstitial der Elbe“, die im Rahmen des Projektes zur „Bedeutung der Stillwasserzonen und des Interstitials für die Nährstoffelimination in der Elbe“ der Bundesanstalt für Gewässerkunde und integriert im BMBF-Förderschwerpunkt Elbe-Ökologie durchgeführt wurden.

Die Zielstellung für dieses Projekt bestand in der Analyse des Nährstoffhaushaltes des Interstitials und der damit verbundenen Kompartimente. Dabei sollten die wesentlichen Transportwege, Retentions- und Eliminationsmechanismen für Stickstoff und Phosphor erfasst werden. Mit diesem Bericht liegen jetzt sowohl theoretische als auch praktische Kenntnisse über Transportprozesse und den Nährstoffhaushalt im Interstitial eines großen Flusses vor.

Die Untersuchungsstrecke lag auf deutschem Gebiet im Bereich der Oberelbe und der Oberen Mittelelbe. Hier war aufgrund der Sedimentstruktur ein deutlicher Stofftransport durch das Interstitial als Basis für relevante Stoffumsatzprozesse in diesem Kompartiment zu erwarten. Die Vor- und die beginnenden Standarduntersuchungen beschränkten sich auf das ufernahe Interstitial, da hier die wichtigste Reaktionszone vermutet wurde. Die ersten Ergebnisse zeigten die Bedeutung der Wechselwirkung mit dem Oberflächenwasser und mit dem Grundwasser, so dass die Untersuchungen auf das ufernahe Grundwasser erweitert wurden. Damit verbunden entwickelte sich die Hypothese, dass aufgrund der unterschiedlichen Lage des ufernahen und des Interstitials der Flussmitte zum Grund- und Oberflächenwasser die Transport- und Umsatzprozesse unterschiedlich ausgeprägt sind. Für verallgemeinerungsfähige und bilanzierende Aussagen sind diese Erkenntnisse essenziell. Bisher bestand das Problem der technischen und organisatorischen Umsetzung von wissenschaftlichen Untersuchungen in der Flussmitte einer großen Schifffahrtsstraße in Tiefen bis zu 3 Metern (EIDNER UND KRANICH 2002; 2003). Deshalb wurde durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zum ersten Mal eine Messkampagne initiiert, die mit Hilfe des Taucherschachts verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen und Probenahmen einschließlich dem Einbringen von Messsonden direkt am Gewässergrund ermöglichte. In Kooperation mit der Ecosystem Saxonia GmbH und den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) Dresden und Magdeburg wurden die Einsätze koordiniert und durchgeführt.

Im Rahmen der Arbeiten wurden in folgenden Abschnitten der Elbe einzelne oder mehrere Untersuchungsstellen eingerichtet und beprobt:

km 52	Dresden-Saloppe	ufernah, (TU Dresden),
km 60-63	Dresden-Übigau	ufernah und Flussmitte,
km 80	Meißen	ufernah,
km 139	Belgern	ufernah, (zeitweise),
km 233	Coswig	Flussmitte,
km 319	Magdeburg	Flussmitte.

Mit der Auswahl der Messstellen wurden verschiedene Situationen im Längsverlauf und im Querprofil erfasst, sowohl in Hinsicht auf die Struktur des Sediments, auf die Strömungsbedingungen und auf die Belastung. Die umfangreichsten Untersuchungen erfolgten im Bereich der Flussschleife Dresden-Übigau mit der Standardmessstelle bei km 62,1, der Messstelle Altübigau, mehreren ufernahen Messstellen zu Sediment und Transport sowie im Bereich der Standardmessstelle mit zwei Taucherschachteinsätzen.

Für die Probenahme wurden verschiedene Systeme eingesetzt. Bei den ufernahen Standardmessstellen kamen im Interstitial dauerhaft installierte, horizontale Filterrohre zum Einsatz. Diese ermöglichten eine Entnahme ohne Beeinträchtigung durch vertikale Kurzschlussströmungen und die Beprobung eines vertikal integrierten Tiefenhorizontes unter Verminderung des Einflusses kleinräumiger Heterogenitäten. Vertikale Einschlagsysteme mussten beim Taucherschachteinsatz und in tieferen Sohlbereichen eingesetzt werden. Auch für die umfangreichen Untersuchungen mit Temperaturdatenloggern wurde ein vertikales Einschlagsystem entwickelt. Mit ufernahen Pegeln erfolgte die Analyse des Grundwassers.

Zu den bestimmten Parametern zählten hydraulische Gradienten, Korngrößenverteilung, Substanzen des N-, P- und O₂-Haushaltes, weitere chemisch-physikalische Parameter sowie kontinuierliche Temperaturaufzeichnungen. Messdaten zum Stoffumsatzpotenzial der Denitrifikation, Nitrifikation und Respiration der TU Dresden und des IGB Berlin wurden in die Betrachtungen integriert.

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Stoffumsatz und den Stofftransport ist die Sedimentstruktur. Einerseits wirkt sie sich als Aufwuchsträger für die Organismen und

andererseits als bestimmende Größe auf die Durchlässigkeit aus. In der Längsentwicklung der Flussmitte bestätigte sich die Abfolge von grobkörnigem Sediment mit überwiegend Kies und Steinen bei Dresden bis hin zu sandigem Bodengrund in Magdeburg. Die mittlere Körnung verringerte sich von 13,6 über 3,4 auf 1,1 mm. Ebenso nahm die Ungleichförmigkeit (D60/D10) stark von 19,4 über 7,5 auf 2,4 ab. Die Verringerung der Ungleichförmigkeit mit Erhöhung des Feinkornanteils im Längsverlauf führte zu nur gering abnehmenden Durchlässigkeitswerten (k_f) im Bereich von 10^{-3} m s^{-1} . Deutliche Unterschiede traten im ufernahen Interstitial auf. In der Flussschleife Dresden-Übigau zeigte sich eine hohe Ungleichverteilung von $80,8 \pm 19,4$ bei nur geringsten Anteilen an Grobsand und Feinkies. Damit erreichte das ufernahe Sediment trotz niedriger Feinkornanteile im Mittel geringere k_f -Werte im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-5} m s^{-1} . Die Elbe wies aber auch gleichförmigere Ufersedimente in Meißen und Belgern auf ($k_f 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$).

Das Abflussgeschehen und die Wechselwirkung mit dem Grundwasser erwiesen sich als wesentliche Einflussfaktoren für die Prozesse im Interstitial. Besonders im Jahr 2001 traten immer wieder kurzfristige Wasserstandsänderungen auf, die eine Bewertung für den Stofftransport und den Stoffumsatz ermöglichten. Die Wasserstandsanstiege erfolgten schneller (bis über 1 m d^{-1}) als der Rückgang. Das infiltrierte bzw. mit dem Grundwasser vermischte Oberflächenwasser exfiltrierte demnach über eine längere Zeit, bis wieder das eigentliche Grundwasser im Interstitial nachweisbar war. Der mittlere Schwankungsbereich (1.-3. Quartil) der Wasserstandsänderungen bewegte sich im Jahr 2001 zwischen -10 und 6 cm h^{-1} . Die Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser wurde anhand der unterschiedlichen Beschaffenheit insbesondere bei Nitrat und Leitfähigkeit in Dresden-Übigau deutlich. Das Auftreten und das Verschieben der Tiefengradienten im Interstitial bis ins ufernahe Grundwasser waren Nachweise für diesen Vorgang. Der mit dem Piezomanometer bestimmte Differenzdruck erreichte bei Messungen in Dresden-Übigau zwischen Interstitial und Oberflächenwasser maximal 42 mm bei Exfiltration und -52 mm bei Infiltration. Bei mittleren Abflüssen blieb der Differenzdruck immer zwischen 20 und -20 mm. Die Abstandsgeschwindigkeiten erreichten ufernah in Phasen hoher Exfiltration bzw. Infiltration zum Teil relativ hohe Werte. Die meisten Werte bewegten sich aber im Bereich zwischen 0 und $0,5 \text{ m h}^{-1}$, wobei der typische Fall eine schwache Exfiltration des Grundwassers aus dem Einzugsgebiet darstellt.

Das komplexe System der verschiedenen Parameter und Wirkungen im Oberflächen-, Interstitial- und Grundwasser überlagert meist die Bestimmung einzelner funktionaler

Beziehungen. Die Trennung der untersuchten Proben mit allen analysierten physikalisch-chemischen Parametern ergab drei wesentliche Gruppen:

- Freiwasser und Interstitial Winter, Frühjahr,
- Interstitial Sommer, Herbst und
- Grundwassereinfluss Dresden-Übigau.

Die erste Gruppe war geprägt durch eine dem Oberflächenwasser vergleichbare Beschaffenheit, das entspricht im Interstitial Proben z.B. mit hohen Sauerstoffwerten bei niedrigem Stoffumsatz bzw. mit erheblicher Infiltration. Davon deutlich getrennt, zeigte sich der Sommer und Herbst als Zeitraum des wesentlichen Stoffumsatzes im Interstitial. Die großen Gradienten zum Grundwasser in Dresden-Übigau dominierten die Eigenschaften der dritten Gruppe.

Mit der Faktorenanalyse konnten getrennt für das Freiwasser und das Interstitial in Dresden sowie in Meißen mit zwei Hauptfaktoren jeweils etwa 50 % der Varianz der Daten erklärt werden. Die Analyse der Datenpools hinsichtlich der zwischen den Parametern dominierenden Faktoren zeigte im Interstitial, dass ca. 30 % der Varianz aller Daten durch den Stofftransport begründet sind. Die größte Beeinflussung wirkte bei den Parametern Leitfähigkeit, Nitrat, pH-Wert und oPO_4 . Als zweiter wesentlicher Faktor wurde der temperaturabhängige Stoffumsatz bestimmt. Dieser erklärte ca. 20 % der Varianz der Parameter von Dresden-Übigau. In Übereinstimmung mit den Messungen vor Ort besaß der Stoffumsatz in Meißen eine etwas größere Bedeutung, sodass der Anteil in vergleichbarer Größe zum Stofftransport lag. Der Stoffumsatz stand in hoher Beziehung zur Temperatur und entgegengesetzt zum O_2 und erklärte auch große Anteile der Parameter gebundenes P und Nitrit in Meißen.

Die Faktorendominanz im Freiwasser unterschied sich vom Interstitial. An erster Stelle standen hier mit dem Stoffumsatz verbundene Parameter wie Temperatur, Ammonium, Nitrat, Sauerstoff und gebundener P. Der Erklärungsbereich beschrieb ca. 30 % der Varianz der Proben. Der zweite Faktor mit deutlich geringerem Anteil beinhaltete Beziehungen zu Leitfähigkeit und oPO_4 und steht als Faktor, der auf die Konzentrationen gelöster Stoffe wirkt in Zusammenhang mit Niederschlag, Abfluss, punktuellen und diffusen Belastungen.

Der Einfluss der Infiltration und Exfiltration auf das Interstitial stand in Abhängigkeit von der Lage der Messstelle im Längs- und Querprofil in der Elbe. Deshalb bildeten sich

unterschiedliche Tiefengradienten der physikalisch-chemischen Parameter aus, die auf den Stofftransport verbunden mit den Stoffumsatzaktivitäten zurückzuführen waren.

Die physikalisch-chemischen Untersuchungen integrierten Parameter, die Aussagen zum Transport zulassen, und Komponenten des Sauerstoff-, Stickstoff- und Phosphor-Haushalts. Die ufernahe Messstelle Dresden-Übigau verdeutlichte den erheblichen Einfluss des Grundwassers für das Interstitial aufgrund großer Konzentrationsunterschiede zum Freiwasser (Nitrat, Leitfähigkeit). Die überwiegende Austauschzone von Grundwasser und Oberflächenwasser bei niedrigem, relativ gleichförmigen Abfluss lag in den oberen 15 cm des Interstitials. Bei steigendem Abfluss drang das Oberflächenwasser ins Interstitial und bei deutlichen Abflussanstiegen bis ins ufernahe Grundwasser vor. Mit einer Infiltration ins ufernahe Grundwasser (Parafluvial) kann bei Wasserstandsanstiegen über Mittelwasser $> 300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Pegel Dresden ca. $> 200 \text{ cm}$) gerechnet werden. Allgemein zeigte das ufernahe Grundwasser den Einfluss des Oberflächenwassers im Vergleich zum weiter entfernten Grundwasser (250 m von der Uferlinie).

Der Sauerstoffhaushalt im Interstitial war jahreszeitlich geprägt von der Temperatur und dem Abflussregime. Dabei konnten nach den ufernahen Untersuchungen drei wesentliche Perioden im Jahr unterschieden werden: (1) hohe Werte durch geringen Stoffumsatz bei geringen Temperaturen unabhängig vom Abfluss im Winter (2) hohe Werte trotz steigenden Temperaturen durch Infiltration des Frühjahrshochwassers und (3) niedrige Sauerstoffwerte durch hohen Stoffumsatz bei hohen Temperaturen im Sommer bis Spätherbst, wobei Einträge von Sauerstoff durch Hochwässer möglich sind. Im Gegensatz zu Dresden-Übigau blieb in Meißen in der Phase des Stoffumsatzes der Sauerstoffgehalt sehr gering. Unterschiede in der Sedimentstruktur und in den Eigenschaften des Oberflächen- und des Grundwassers zählen zu wichtigen Faktoren für die Prozesse im Interstitial. Als aktivster Bereich des Stoffumsatzes auch bezogen auf den N-Haushalt zeigte sich die oberste Sedimentschicht ($< 13 \text{ cm}$). Die Bedeutung der obersten Interstitialzone als biochemisch aktivster Bereich belegen auch verschiedenste Literaturquellen z.B. bezogen auf Enzymaktivitäten. Die abbaubaren organischen Stoffe waren eine wesentliche Größe im Sauerstoffhaushalt. Im ufernahen Grundwasser in Dresden-Übigau stellten diese eine limitierende Größe für heterotrophe Umsatzprozesse dar. Vom Oberflächenwasser über das Interstitial zum Grundwasser gingen die Konzentrationen zurück, wobei der relative Anteil der gelösten Stoffe zunahm. Das Interstitial besitzt demnach eine Filterwirkung mit gleichzeitigem Abbau der partikulären organischen Stoffe. Die Prozesse von Eintrag,

Austrag, Abbau und Bindung führten zu häufig wechselnden Tiefenverteilungen des organischen Materials im Interstitial. Eine erhebliche Bedeutung muss auch der Temperaturverteilung zugeordnet werden, die ufernah extreme Gradienten zwischen 0 und 40 cm von bis zu -10,0 K im Sommer und +5,6 K im Winter erreichte. Die beim Taucherschachteinsatz im Labor bestimmten maximalen Respirationsraten im Sediment (20° C; 5 cm Tiefe; IGB) lagen in Dresden ufernah im Mittel mit $169 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ höher als in der Flussmitte ($130 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$). Andererseits wurden in Coswig mit feinkörnigerem Sediment in der Flussmitte und in der Buhne nur etwa 40 % dieser Werte erreicht. Der Stoffumsatz hängt also von der Lage im Quer- und Längsprofil der Elbe mit den entsprechenden strukturellen und funktionellen Bedingungen ab.

Der Stickstoffhaushalt im Interstitial wird im wesentlichen von den Faktoren Nitrat, Nitrit, Ammonium und organischer N sowie den Stoffumsatzprozessen Nitrifikation und Denitrifikation und weniger durch Ammonifikation und Assimilation bestimmt. Temperatur, Sauerstoffgehalt, abbaubare organische Substanzen sowie Infiltration und Exfiltration beeinflussen diese Faktoren.

Der N-Haushalt an der Messstelle Dresden war ufernah durch die Exfiltration von Nitrat-reichem Grundwasser geprägt. In der Flussmitte konnte dieser Einfluss nicht mehr nachgewiesen werden. Hier wurde die Denitrifikation durch negative Gradienten mit der Tiefe deutlich, was durch die Taucherschachteinsätze nachgewiesen wurde. Dies bestätigten auch die erhöhten Nitritwerte. Im Vergleich hierzu zeigte das Verhalten des Nitrats an der ufernahen Messstelle Meißen-Siebeneichen wiederholt abnehmende Tiefengradienten im Interstitial, die neben der Wechselwirkung mit dem Grundwasser auf die Denitrifikation zurückzuführen waren. Ammonium spielt durch die Verbesserung der Abwasserreinigung und den Zusammenbruch von Industrie nach 1989 in der Elbe nur noch eine geringere Rolle. Insbesondere im Sommerzeitraum lagen die Konzentrationen im Freiwasser und im Interstitial oft nahe der Nachweisgrenze (Untersuchungszeitraum Herbst 2001-Herbst 2002). Im Interstitial zeigte der negative Gradient den Abbau durch Nitrifikation an. Lediglich im Winter traten im Pelagial zum Teil Werte bis $0,5 \text{ mg NH}_4\text{-N l}^{-1}$ auf.

Der Phosphor-Haushalt des Interstitials wird durch den Stofftransport und durch Prozesse der Festlegung (biochemische Inkorporation, Flockung und Fällung) und Remobilisierung (biochemischer Abbau, chemische Rücklösung) gesteuert. Durch die verschiedenen Einflussfaktoren überlagern sich einfache Zusammenhänge. Nach den Ergebnissen der

multivariaten Datenanalyse wird ortho-Phosphat vor allem durch den Stofftransport im Interstitial und Gesamt-Phosphor durch Festlegung und Remobilisierung beeinflusst. Analog zum N-Haushalt ist die aktivste Zone die oberste Interstitialschicht.

Neben den Auswertungen zur Sedimentstruktur bildeten umfangreiche Temperaturmessungen mittels Sensoren mit Datenloggern die Grundlage zur Bestimmung der Parameter des Stofftransportes. Die selbsttätig messenden Temperaturdatenlogger wurden in verschiedenen Tiefen an mehreren ufernahen Stellen und an mehreren Messstellen in der Flussmitte installiert. Als wesentliche Temperaturmuster konnten folgende beschrieben werden:

- a) Hohe Tagesamplituden bei hoher Freiwassertemperatur und niedriger Wasserführung,
- b) Verringerung der Gradienten mit Abflussanstieg und
- c) Umkehr des Temperaturgradienten bei Abkühlung des Freiwassers.

Die Temperaturtagesgänge im Pelagial über dem Sediment unterschieden sich ufernah und in der Flussmitte. Die Tagesdynamik folgte phasenverschoben ufernah um 1,5 bis 1,7 h früher. Durch das anliegende Grundwasser bildeten sich auch sehr große Differenzen zwischen dem Pelagial und dem ufernahen Interstitial in 40 cm Tiefe von bis zu 8 K bei Niedrigwasser im Sommer aus. In Coswig und Magdeburg zeigten sich zum Teil kleine, kurzzeitige Schwankungen innerhalb der Tagesdynamik im Freiwasser über der Flusssohle der Flussmitte. Nach unserem gegenwärtigen Kenntnisstand könnten diese in Zusammenhang mit wechselnden Strömungen und Wirbeln aus dem Bereich der Bühnen stehen. Zur Bestimmung des Dispersionskoeffizienten wurde die Amplitudendämpfung bzw. -abstand zwischen den einzelnen Tiefen (dimensionsloser Modellparameter ρ [-]) und die Phasenverschiebung (τ_w [h]) durch umfangreiche statistische Aufarbeitung ermittelt. Im Ergebnis ergaben sich eindeutige Dispersionskoeffizienten, die ufernah bei $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ und im Interstitial des Flussbetts in Dresden, Coswig und Magdeburg mit $1,2 \cdot 10^{-5}$ bis $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ um 5 - 10 mal niedriger lagen.

Die Ergebnisse aus den hydrodynamischen und physikalisch-chemischen Untersuchungen mit dem Taucherschacht und der Beprobungen des ufernahen Interstitials ermöglichten die modellhafte Gliederung des Flussquerschnittes in Zusammenhang mit der Bedeutung der Stoffumsatz- und Transportprozesse. Der Uferbereich wird von den starken Transportprozessen geprägt, wogegen in der Flussmitte der diffusive / dispersive Austausch in geringerem Ausmaß dominiert. Ein zusätzlicher Antrieb für die ufernahen Austauschprozesse sind natürliche Wind- und Wellenbewegungen sowie Sunk und Schwall

durch Schiffe. Das ufernahe Interstitial ist die Zone der größten Umsatzprozesse. Dies lässt sich auf die Vermischung von anorganischen (z.B. Nitrat aus dem Grundwasser) und organischen Nährstoffen (aus dem Oberflächenwasser) mit der Auswirkung optimaler Bedingungen für die Mikroorganismen zurückführen. Der aktivste Horizont ist das obere ufernahe Interstitial (< 15 cm). Das tiefere ufernahe Interstitial zeigt noch ein etwas höheres Stoffumsatzpotenzial als das Interstitial der Flussmitte. Für die Bewertung muss beachtet werden, dass in Abhängigkeit des Querprofils der Elbe die aktive Uferzone nur einen begrenzten Bereich einnimmt. In Dresden sind 20-30 % des Querprofils (bis etwa zur Mittelwasserlinie) dem aktiven Uferbereich zuzuordnen. Um dieses System von Grundwasser - ufernahes Interstitial - Interstitial der Flussmitte - Freiwasser (Pelagial) im Bereich von Bühnenfeldern zu verstehen, wären weitere Untersuchungen erforderlich, insbesondere da die hydrodynamischen Prozesse bereits im Pelagial der Bühnen andere Muster aufweisen.

Der advective Transport wirkt sich über die Abstandsgeschwindigkeit auf den Stoffumsatz im Interstitial aus. In Abhängigkeit der Morphologie und Sedimentstruktur im ufernahen Bereich führen Wasserstandsänderungen zu unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten im Interstitial. In Dresden-Übigau war oberhalb von Mittelwasser höchstens noch eine geringe Exfiltration zu finden.

Eine zuverlässige Bilanzierung der Umsatzraten für den Sauerstoff- und Stickstoffhaushalt auf Grund der gemessenen ist schwierig, da als Einflussgrößen nur mittelbar bestimmbar sind:

- der Dispersionskoeffizient für den Stoffaustausch,
- die Ex- bzw. Infiltrationsgeschwindigkeit und
- die Dynamik der Stoffumsatzprozesse.

Mit der von BAUMERT (2003) entwickelten Bilanzmethode (Advektions-Diffusions-Reaktionsgleichungen für Parafluvial und Interstitial) und mit Hilfe des Modells AQUASIM (mit einem Teilmodell für den Stoffaustausch zwischen Freiwasser/Interstitial und Grundwasser auf der Basis der Auswertung und vergleichenden Simulation der Wassertemperaturen in den einzelnen Schichten zur Ableitung und Verifizierung des Dispersionskoeffizienten und der advectiven Geschwindigkeit) wurden folgende Ergebnisse erzielt. Die Umsatzraten sind das Ergebnis aller Umsatzprozesse und geben dabei sowohl die Abbauprozesse (Denitrifikation, Nitrifikation) als auch die Bildungsprozesse wieder.

Als Periode wesentlicher Stoffumsatzaktivität mit auswertbaren Gradienten zeigte sich der Zeitraum zwischen Mai/Juni und November/Dezember. Bezogen auf das ufernahe Interstitialwasser ergaben sich folgende Werte:

- typische advective Geschwindigkeit: (Exfiltration) 0,1 ... 0,2 m h⁻¹
- typischer Dispersionskoeffizient: 0,4 m² h⁻¹
- mittlere Respirationsrate: 0,5 ... 1,0 g m⁻³ h⁻¹ O₂
- mittlere Denitrifikationsrate: 0,1 ... 0,2 g m⁻³ h⁻¹ NO₃-N
- mittlere Nitrifikationsrate: 0,01...0,02 g m⁻³ h⁻¹ NH₄-N

Für die Berechnung der Nährstoffbilanzen entsprechen diese Werte folgenden interstitiellen Umsatzraten bezogen auf das Sedimentvolumen:

- mittlere Respirationsrate: 0,1 ... 0,2 g m⁻³_{Sed.} h⁻¹ O₂
- mittlere Denitrifikationsrate: 0,02 ... 0,05 g m⁻³_{Sed.} h⁻¹ NO₃-N
- mittlere Nitrifikationsrate: 0,002 ... 0,004 g m⁻³_{Sed.} h⁻¹ NH₄-N

Der Vergleich mit den durch das IGB und die TUD (2002) unter optimierten Laborbedingungen gemessenen potenziellen Umsatzraten (als Obergrenzen) zeigt für die Respiration und die Denitrifikation ein Verhältnis von 1:10 bis 1:100.

Der größte Anteil des Stoffumsatzes fand in der oberen Schicht des Parafluvials statt. Erwartungsgemäß nimmt die Umsatzrate von Sauerstoff über Nitrat zu Ammonium ab. Die Nitrifikation war durch die Substratlimitierung aufgrund mittlerweile geringer Ammonium-Konzentrationen im Sommer/Herbst sehr gering. Die potenzielle O₂-Respiration erhöhte sich mit steigender Wassertemperatur. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren insbesondere durch die Transportdynamik konnten auch bei höheren Temperaturen z.T. niedrige Umsätze auftreten. Aufgrund der besseren Sedimentstruktur (Durchlässigkeit, Aufwuchsträger) waren die Stoffumsätze in Meißen höher als in Dresden.

Bei der Aufstellung der flussbezogenen Bilanzierung mussten die Anteile des Stoffumsatzes im Parafluvial und im Interstitial berücksichtigt werden. Das Parafluvial ist die interstitielle Hauptumsatzzone mit 70-80 % Anteil bezogen auf den Flussquerschnitt, obwohl z.B. in Dresden nur 20-30 % des Querprofils dem aktiven Uferbereich zuzuordnen sind. Dies lässt sich auf die Kombination der Transportprozesse durch Advektion (z.B. Nitrat aus dem

Grundwasser) und Dispersion (Eintrag von organischen Nährstoffen aus dem Oberflächenwasser) mit dem Ergebnis optimaler Bedingungen für die Mikroorganismen zurückführen.

Im Sommer/Herbst-Zeitraum (Mai/Juni bis November/Dezember) wurde die mittlere Denitrifikationsrate im Interstitial der Oberen Elbe mit 25 ... 50 kg d⁻¹ und Flusskilometer bilanziert. Demgegenüber benötigt die interstitielle Respiration zwischen 150 ... 400 kg d⁻¹ Sauerstoff pro Flusskilometer. Auf den Gesamtflusslauf der Elbe in Deutschland bezogen ist demnach in diesem Zeitraum ein Denitrifikationspotenzial von 15 ... 30 t d⁻¹ Stickstoff im Interstitial zu erwarten. Die Realisierung dieses Denitrifikationspotenzials hängt von

- den hydrodynamischen Bedingungen,
- den Sauerstoffverhältnissen und
- dem Angebot an abbaubaren Stoffen ab.

Die Größenordnung dieses Potenzials zeigt, dass das Interstitial nicht nur ein wichtiges und komplexes biozönotisches Kompartiment ist, sondern es auch in der Wechselwirkung mit dem Grundwasser und dem Flusswasser den Stickstoffhaushalt wesentlich mitbestimmt.

Aus der Literatur ergaben sich folgende Erkenntnisse. Untersuchungen zum Stoffumsatz im Interstitial an großen Fließgewässern wurden bisher nur zu ausgewählten Aspekten durchgeführt. Dabei überwiegen Untersuchungen zur biologischen Besiedlung dieses Lückensystems. Der Schwerpunkt der komplexeren Untersuchungen zum Stofftransport- und -umsatz wurde an Fließgewässern mit Oberlaufcharakter (Epirhithral bis Hyporhithral) durchgeführt. Die untersuchte Fließstrecke der Elbe ist dem Epipotamal zuzuordnen, wobei am Ende der Fließstrecke der Übergang zum Metapotamal erfolgt. Es ist davon auszugehen, dass die Struktur des hyporheischen Interstitials und der Stoffaustausch zwischen der fließenden Welle und dem Interstitial in den einzelnen Fließgewässerregionen unterschiedlich ist.

Aus den Untersuchungen an der Lahn (BORCHARDT ET AL. 1999, LENK et. al 1999) folgt, dass im Hyporhithral die Stofftransportprozesse im mesoskaligen Bereich durch die „riffle – pool – Sequenz“ bestimmt werden, die durch Prozesse in der Makroskala (In- und Exfiltration von Grundwasser) und der Mikroskala (Strömungsbedingungen in den einzelnen Poren des Interstitials) überlagert werden. Diese Überlagerung kann dazu führen, dass an aufeinanderfolgenden Beprobungen trotz ähnlicher hydraulischer Bedingungen gänzlich andere Strömungsverhältnisse im Interstitial vorliegen (MONTENEGRO 2000, pers. Mitteilung).

Die Untersuchungen zu den Stoffumsetzungen im Interstitial werden sich deshalb in zwei Richtungen entwickeln:

- einer Detailuntersuchung der Stofftransport- und Umsatzprozesse im Bereich der Mikroskala (< 1 mm bis Zentimeter-Maßstab)
- eine globalere Erfassung der typischen Stofftransport- und Umsatzbedingungen in einzelnen Schichten des Interstitials, die sich im Flussquerschnitt unterschiedlich ausgeprägt sein können

Die Dicke der zu betrachtenden aufeinanderfolgenden Schichten ist hierbei von der Körnung des Sedimentes abhängig. Die Messung der vertikalen Temperaturverteilung (TANIGUCHI 1993, LENK ET AL. 1998) ist gut für eine Bestimmung von Parametern des Stofftransportes geeignet. Als Randbedingung für den makroskaligen Stofftransport ist der Einfluss des Grundwassers (Potenzialgefälle) stärker zu beachten.

Für die Elbe ist zu erwarten, dass auf Grund der gleichförmigeren Sohlstruktur die für die Lahn angenommene Wirkung von „pool – riffle-Sequenzen“ für den Stoffaustausch mit dem Interstitial untergeordnet ist. Dem gegenüber sind kurzzeitige Wasserspiegelschwankungen auf Grund von meteorologischen Ereignissen, der Steuerung der Wassermengen (z.B. Schleusensysteme in Tschechien) und dem Schiffsverkehr zu beachten.

Die Kolmation erweist sich in der Literatúrauswertung als ein entscheidender Prozess, der dem Austausch zwischen dem frei fließendem Wasserkörper und dem Interstitial entgegengerichtet ist. Kolmation und Dekolmation finden ständig im Prozess der Abflussschwankungen und der Sedimentation bzw. der Sedimentresuspension statt und verändern die Austauschbedingungen. Die wahrscheinliche Lage der Kolmationsschicht wird in der Literatur (SCHÄCHLI 1993, BRUNKE 1999, IBISCH ET AL. 2000) in einer Tiefe von

$$D_{\text{Kolmation}} = 3 D_m + 0,1 \text{ [m]}$$

angegeben. Diese liegt oberhalb bzw. im Bereich der oberen Beprobungsstelle (Rohrmittelachse 13 cm unter Sedimentoberkante).

Aus den gegenwärtigen Ergebnissen der Untersuchung der einzelnen Untersuchungsstellen ergeben sich folgende weitere Schlussfolgerungen:

Die Überdeckung der Stofftransport- und -umsatzprozesse erfordert den Einsatz eines mathematischen Modells das bezüglich des Stofftransportes

- den turbulenten Stoffaustausch zwischen der fließenden Welle und dem Interstitial
- den turbulenten Austausch innerhalb des Interstitials
- den advektiven Horizontal- und Vertikaltransport
- die Wirkung einer Kolmationsschicht

simuliert. Als Eingangsgrößen hierzu sind die morphologischen und hydrologischen Grundparameter des Flusses (Wasserführung, Breite, Tiefenverteilung, benetzter Umfang, Sohl- und Energiegefälle, Sedimentkörnung) zu benutzen. Weiterhin ist der Grundwasserstand der Umgebung zu berücksichtigen (Ex- und Infiltration).

Das Modell sollte zweidimensional sein, um die unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen im Fluss zu berücksichtigen. Auf dieser Grundlage kann eine eindimensionale Vereinfachung geprüft werden. Für die Eichung dieses Modells ist die Durchführung geeigneter Messkampagnen ergänzend zu dem weiteren Einsatz von kontinuierlichen Temperaturmessungen erforderlich. Dabei erweist sich für die Darstellung der makroskaligen Transportprozesse die Erfassung der Grundwasserstände in unmittelbarer Umgebung der Beprobungsstelle als erforderlich.

Als biologische Komponenten sollte dieses Modell in einer ersten Stufe folgende physikalische, chemische und biologische Zustandsgrößen umfassen:

- Sauerstoff
- Ammonium
- Nitrat
- Nitrit
- Organischer Stickstoff
- abbaubare organische Substanz (analog BSB5)
- Summe organische Substanz (analog CSB)
- ortho-Phosphat-Phosphor
- Gesamtphosphor (TP)
- suspendierte Stoffe (partikuläre organische Substanz)
- Biofilm heterotroph
- Biofilm Nitrifikanten
- Hydrogenkarbonat
- pH-Wert

Wesentliche Umsatzraten sind dabei

- die Nitrifikationsrate
- die Denitrifikationsrate
- die Abbaurrate (leicht abbaubare Stoffe)
- die Abbaurrate (schwer abbaubare Stoffe)
- endogene Atmungsrate
- die P-Freisetzungsrare beim aeroben Abbau

- Weiterführende Untersuchungen

Entsprechend der durch die Untersuchungen im Oberen Elbtal nachgewiesenen Bedeutung des Interstitials für den Stickstoffhaushalt der Elbe ist es erforderlich, durch zeitlich hochauflösende und komplexe In-situ-Untersuchungen der Stofftransport- und Umsatzvorgänge die kinetischen Parameter detailliert zu erfassen. Dabei besteht eine besondere Aufgabe in der detaillierten Bewertung der Stofftransport- und Umsatzprozesse bei Ex- und Infiltration sowie im Übergangsstadium unter besonderer Berücksichtigung der partikulären und gelösten organischen Stoffe, die als Denitrifikationsquelle und Grundlage für die Respiration im Interstitial dienen. Auf Grund des hohen Anteiles des Stoffumsatzes des Parafluvials am Gesamtumsatz des Interstitials ist es notwendig, durch weiterführende Untersuchungen den Einfluss der morphologischen Struktur des Parafluvials auf die Stoffumsatzleistung durch vergleichende In-situ-Analyse und Modellbetrachtung zu erforschen. Die wasserbauliche Gestaltung im ufernahen Bereich (Querprofil, Uferverbau, Steinschüttungen, Buhnen) stellt dabei einen wesentlichen Einflussfaktor für die Selbstreinigung in den Fließgewässern dar.

Literatur

- BATTIN, T. J. and SENGSCHMITT, D. (1999): Linking Sediment Biofilms, hydrodynamics, and River Bed Clogging: Evidence from a Large River. *Microb. Ecol.* **37**: 185-196
- BAUMERT, H. und LEVIKOV, F. (2001): Erarbeitung von numerisch-modelltechnischen Hilfsmitteln zur Interpretation von experimentellen Untersuchungen im Interstitial und Parafluvial der oberen Elbe. BMBF-Projekt: Bedeutung der Stillwasserzonen und des Interstitials für die Nährstoffeliminierung in der Elbe (0339603), Zuarbeit für ECOSYSTEM SAXONIA, Dresden, unveröffentl. Bericht, HYDROMOD, Wedel/Hostein, 94 Seiten
- BAUMERT, H.; DUWE, K.; LEVIKOV, F., PIERI, C. und GOLDMANN, D. (2003): Hyporheisches Interstitial, Parafluvial und Zusammenfassung der Ergebnisse. BMBF-Projekt: Bedeutung der Stillwasserzonen und des Interstitials für die Nährstoffeliminierung in der Elbe (0339603), Zuarbeit für ECOSYSTEM SAXONIA, Dresden, unveröffentl. Bericht, HYDROMOD, Wedel/Hostein
- BEHRENDT, H. (1998): Die Nährstoffbelastung der Flusssysteme in Deutschland – Ursachen und Veränderungen. Jahresbericht IGB, S.153-162
- BEYER, W. (1963): Beitrag zur Ermittlung maßgebender Fließgeschwindigkeiten. Dissertation, TU Dresden
- BEYER, W. und BANSCHER, E. (1975): Zur Kolmation der Gewässerbetten bei der Uferfiltratgewinnung. *Z. Angewandte Geologie* **12**: 565 – 570.
- BFG (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE) (1994): Historische Entwicklung der aquatischen Lebensgemeinschaft (Zoobenthos und Fischfauna) im deutschen Abschnitt der Elbe. BfG-0802, Koblenz
- BOLANOS, M. C.; BRANDT, S.; ROSENKRANZ, V.; WERNER, D. (1998): Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse im hyporheischen Interstitial eines Fließgewässers am Beispiel der Lahn. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Tagungsbericht 1997, (Frankfurt/M): 610-614
- BORCHARDT, D and FISCHER, J. (2000): Three-dimensional patterns and processes in the River Lahn (Germany): variability of abiotic and biotic conditions. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**: 393-397
- BOULTON, J.A., FINDLAY, S., MARMONIER, P., STANLEY, E. H., VALETT, H. M. (1998): The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **29**: 59-81.
- BRUNKE, M. (1998): The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* **37**: 1-33.
- BRUNKE, M. (1999): Colmation and Depth Filtration within Streambeds: Retention of Particles in Hyporheic Interstices. *Internat. Rev. Hydrobiol.* **84** (2): 99-117.
- BRUNKE, M., FISCHER, H., WILCEK, S., PUSCH, M. (2002): Ökologische Bewertung der aquatischen Lebensräume wirbelloser Tiere in der Elbe: Natürliche und anthropogene Faktoren. In: Geller, W., Puncocar, P., Guhr, H., von Tümpling, W., Medek, J., Smrt'ak, J, Feldmann, H., Uhlmann, O. (2002): Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner-Verlag: 259-262

- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (1996): Geologisch-Morphologische Untersuchungen im Magdeburger Elbabschnitt (Elbe- 300-350). BfG-Bericht Nr. 0979, bearbeitet von A. HAUSCHILD, K. RIEHL und A. SCHMIDT
- BUSCH, K.-F., LUCKNER, L. (1974): Geohydraulik. 2.Aufl., Stuttgart: Enke
- BUTTURINI, A., BATTIN, T.J. und SABATER, F. (2000): Nitrification in stream sediment biofilms: the role of Ammonium concentration and DOC quality. *Wat. Res.* **34** (2): 629-639.
- CARLING, P.A. (1984): Deposition of fine and coarse sand in an open-workes gravel bed. *Can. J. Fish. Aquatic. Sci.* **41**: 263-270.
- CLARET, C.; MARMONIER, P.; BRAVARD, J.-P. (1998): Seasonal dynamics of nutrient and biofilm in interstitial habitats of two contrasting riffles in a large river. *Aquatic Sciences* **60** (1): 33-55
- DITTRICH, A. (1998): Wechselwirkung Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer. Habilitationsschrift des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe.
- EIDNER, R., KRANICH, J. (2002): Einsatz des Taucherschachtes zur Untersuchung des Interstitials der Elbe. In: GELLER, W., PUNCOCHAR, P., GUHR, H., VON TÜMLING, W., MEDEK, J., SMRT'AK, J, FELDMANN, H., UHLMANN, O. (2002): Die Elbe – neue Horizonte des Flussgebietsmanagements. 10. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner-Verlag: 220-222
- EIDNER, R., KRANICH, J. (2003): Taucherschachteinsatz am Elbegrund zur Aufklärung ökologischer Wirkungszusammenhänge im Interstitial. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* **47**: 21-26
- FISCHER, H. und PUSCH, M. (1998): Organisches Material und Bakterien im hyporheischen Interstitial der Elbe bei Magdeburg. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Tagungsbericht 1997, (Frankfurt/M): 615-618
- FISCHER, H.; PUSCH, M. and SCHWOERBEL, J. (1996): Spatial distribution and respiration of bacteria in stream-bed sediments. *Arch. Hydrobiol.* **137**: 281-300
- FISCHER, J., HELLWIG, C. und BORCHARDT, D. (1998): Räumliche und zeitliche Variabilität im Stoffhaushalt des Interstitials der Lahn. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Tagungsbericht 1997, (Frankfurt/M): 619- 623
- FISHER, St. G., GRIMM, N.B., HOLMES, R.M. und JONES, J.B.Jr (1998): Material Spiraling in Stream Corridors: A Telescoping Ecosystem Model. *Ecosystems* **1**: 19-34
- FRASER, B.G., WILLIAMS, D.D. (1998): Seasonal boundary dynamics of a groundwater / surface-water ecotone. *Ecology* **76** (6): 2019-2031
- GARCIA-RUIZ, R., PATTINSON, S.N. and WHITTON, B.A. (1998): Denitrification in river sediments: relationship between process rate and properties of water and sediment. *Freshwater Biology* **39**: 467-476
- GAYTE, X.; Fontvieille, D. and WILKINSON, K. J. (1999): Bacterial Stimulation in Mixed Cultures of Bacteria and Organic Carbon from River and Lake Waters. *Microb. Ecol.* **38**: 285-295
- GÖLZ, E., SCHUBERT, J. und LIEBLICH, D. (1991): Sohlenkolmation und Uferfiltration im Bereich des Wasserwerks Flehe (Düsseldorf). *Gas- und Wasserfach* **132**: 69 – 72.
- GRISCHEK, T., ET AL. (1998): Factors affecting denitrification during infiltration of river water into sand an gravel aquifer in Saxony, Germany. *Wat.Res.* **32** (2): 450-460.

- HAUNSCHILD, A. (1996): Zur Sohlstruktur des Elbestromes. In: PRANGE, A.; WILKEN, R.-D.; VON TÜMPLING, U.; SPOUSTOVÁ, J.; PUNČOCHÁŘ, P. und LENCOVÁ, E. (Hrsg.) (1996): Ökosystem Elbe - Zustand, Entwicklung und Nutzung. 7. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Budweis, Tschechische Republik, 22.-25.10.1996, S.65-70
- HENCKE, J., SCHÜRING, J., CHRISTENSEN, B. und SCHULZ H.D. (1999): Reaktionsfronten bei der Infiltration von Oberflächenwasser ins Grundwasser. Grundwasser- Zeitschrift der Fachsektion Grundwasser **4** / 99: 177 – 128.
- IBISCH, R.B., SAENGER, N, FISCHER J. und BORCHARDT, D. (2000): Colmation dynamics in the hyporheic zone: implications for transport processes. Poster veröffentlicht in: Lenk, M. ET AL: Hydraulische Austauschvorgänge zwischen fließender Welle und Interstitial. <http://wabau.kww.bauing.tu-darmstadt.de/~saenger/intersti/intersti.html>.
- JANCARKOVA, I. und GUJER, W. (1999): Dynamik der Stickstoffumwandlung in flachen Fließgewässern. EAWAG, http://www.eawag.ch/research/ing/projekte/proj_ij_d.html
- KITTNER, H., STARKE, W., WISSEL, D. (1979): Wasserversorgung. 4. durchgesehene Aufl., Berlin: Verlag für Bauwesen
- KLOEP, F. (2002): Processes and community structure in microbial biofilms of the River Elbe: relation to nutrient dynamics and particulate organic matter. Dissertation, TU Dresden
- KLOEP, F., RÖSKE, I. (2002): Transport von Algen im hyporheischen Interstitial der Elbe. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Tagungsbericht 2001, (Kiel): 503-507
- KLOTZ, D. (1975): Hydraulische Eigenschaften handelsüblicher Filterrohre. Z. deutsch. Geol. Ges. **124**: 523 – 533
- KNEIS, F. (2000): Abschätzung der Grundwasserverhältnisse für die Probenahmestellen Dresden und Meißen zur Interstitialuntersuchung. Praktikumsarbeit, unveröffentl.
- KRANICH, J., LANGE, K.-P. (2002): Das Interstitial der Elbe – Verbindung zwischen Grund- und Oberflächenwasser. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Tagungsbericht 2001, (Kiel): 498-502
- KUNKEL, R., WENDLAND, F und ALBERT, H. (1999): Zum Nitratabbau in den grundwasserführenden Gesteinsschichten des Elbeinzugsgebietes. Wasser und Boden **51** (9): 16-19
- LANGE, K.-P. (1986): Beitrag zur Analyse, Bewertung, Prognose und Modellierung des Stoffhaushaltes der Elbe in der Fließstrecke von Pirna bis Strehla. Dissertation, TU Dresden
- LANGE, K.-P. (2000): Ergebnisse der Untersuchung zur Wasserbeschaffenheit und zur Gewässergütemodellierung der Jahna als Grundlage für einen Bewirtschaftungsplan. In: SMUL (2000): Beiträge zur Entwicklung eines ökologischen Leitbildes für Flusslandschaften am Beispiel der Jahna, einem Nebenfluss der Elbe in Sachsen. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 131-154
- LANGE, K.-P. und KRANICH, J. (2000): Untersuchung und Bilanzierung des Nährstofftransportes und –umsatzes im Interstitial der Elbe. BfG-Projekt: Bedeutung der Stillwasserzonen und des Interstitials für die Nährstoffeliminierung in der Elbe, BMBF-Förderschwerpunkt Elbe-Ökologie, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, unveröffentl. Arbeitsbericht I (2000), 80 Seiten
- LENK, M. und SAENGER, N. (2000): Exchange processes in the river bed and their influence on temperature variations. Verh. Internat. Verein. Limnol. **27**: 427-430.

- LENK, M., SAENGER, N., SEYDELL, I., WAWRA, B., MONTENEGRO, H. und SCHRÖDER, W. (2000): Hydraulische Austauschvorgänge zwischen fließender Welle und Interstitial. <http://wabau.kww.bauing.tu-darmstadt.de/~saenger/intersti/intersti.html>.
- LENK, M., SAENGER, N. und TRÄBING (1999): Hydraulische Austauschvorgänge im Interstitial. Schriftl. Fassung der Präsentation vom Darmstädter Wasserbaulichen Kolloquium, 15. Oktober 1999. <http://wabau.kww.bauing.tu-darmstadt.de/~lenk/dawako99.htm>
- LENK, M., SAENGER, K., TRÄBING, K., und SCHRÖDER, W. (1998): Temperaturmessung als Methode zur Bestimmung des hydraulischen Austausches zwischen Interstitial und fließender Welle - Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) – Tagungsbericht 1997, (Frankfurt/M)
- MALARD, F., WARD, J.V. und ROBINSON, C.T.: An expanded perspective of the hyporheic zone. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**: 431 - 437
- MATTHESS, G., UBELL, K. (1983): Lehrbuch der Hydrogeologie. Band 1, Allgemeine Hydrogeologie-Grundwasserhaushalt, Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger
- MAUCLAIRE, L. and GIBERT, J. (2000): Spatial heterogeneity of bacterial abundance and activity and fauna composition in alluvial aquifers. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**: 448-452
- MIDDLEBURG, J. J.; BARRANGUET, C.; BOSCHKER, H. T. S.; HERMAN, P. M. J.; MOENS, T. HEIP, C. H. R. (2000): The fate of intertidal microphytobenthos carbon: An in situ ¹³C-labeling study. *Limnol. Oceanogr.* **45**: 1224-1234
- MINDL, B.; GRIEBLER, N.; WIRTH, N. and STARRY, O. (2000): Biodegradability of DOC and metabolic response of heterotrophic bacteria in groundwater. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**: 453-459
- MONTENEGRO, H. (2000, pers. Mitteilung): Numerical inspection of hydraulic exchange patterns within river sediments. Vortrag am Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei in Berlin (IGB), 09.11.2000
- NESTLER, W., DEHNERT, J., NEITZEL, P., GRISCHEK, T. und NITZSCHE, I. (1996): Untersuchungen zur Unterströmung der Elbe. *Wasser und Boden* **48** (5): 53 - 58
- NESTLER, W., KRITZNER, W., GRISCHEK, T. und DEHNERT, J. (1993): Das Beschaffenheitsüberwachungssystem für das Uferfiltrat der sächsischen Elbe, Konzeption und Erfahrungen bei Entwurf, Bau und Betrieb. *Wasser und Boden* **45** (9): 707-728
- NESTLER, W., NITZSCHE, I. und KRÜGER, M. (1996): Untersuchungen zur Beschaffenheit des Uferfiltrats in den Torgauer Talgrundwasserleitern. *Gas- und Wasserfach* **137** (9): 480 – 486
- NESTLER, W., WALTHER, W., JACOBS, F., TRETTIN, R. und FREYER, K. (1998): Wassergewinnung in Talgrundwasserleitern im Einzugsgebiet der Elbe. *UfZ-Bericht* **7/1998**
- O'MELIA, C. (1995): From Algae to Aquifers, Solid-Liquid Separation in Aquatic Systems. *American Chemical Society.* **16**: 315-337.
- PETERMEIER, A. und SCHÖLL, F. (1996): Das hyporheische Interstitial der Elbe. Methoden-recherche. Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-1038, 72 S.
- PETERMEIER, A. und SCHÖLL, F. (1998): Das hyporheische Interstitial der Elbe bei Magdeburg. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Tagungsbericht 1997, (Frankfurt/M): 633-637

-
- PFENNING, K.S. and MCMAHON, P.B. (1996): Effect of nitrate, organic carbon and temperature on potential denitrification rates in nitrate-rich riverbed sediments. *Journal of Hydrology* **187**: 283-295
- PUSCH, M. (1996): The metabolism of organic matter in the hyporheic zone of a mountain stream, and its spatial distribution. *Hydrobiologica* **323**: 107-118
- REICHERT, P., D. BORCHARDT, M. HENZE, W. RAUCH, P. SHANAHAN, L. SOMLYODY & P. VANROLLEGHEM (2001): River Water Quality Model no. 1(RWQM1): II. Biochemical process equations. *Water Science and Technology*, **43**(5): 11-30.
- ROMANI, A. M. and SABATER, S. (2000): Influence of Algal Biomass on Extracellular Enzyme Activity in River Biofilms. *Microb. Ecol.* Vol. unknown
- RÖßNER, U. und GUDERITZ, I. (1993): Biogeochemische Untersuchungen zur Uferfiltration der oberen Elbe. *Die Geowissenschaften*, **3**: 79- 85
- SAENGER, N. (2000): Identifikation von Austauschprozessen zwischen Fließgewässer und hyporheischer Zone. Dissertation, TU Darmstadt
- SAENGER, N. und LENK, M. (2000): Hydraulic head and tracer experiments – two techniques to examine the hydraulic exchange through a riffle. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**: 460-462.
- SAENGER, N., LENK, M., TRÄBING, K., und SCHRÖDER, W. (1998): Hydraulische Austauschvorgänge zwischen fließender Welle und Interstitial. *Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL) – Tagungsbericht 1997, (Frankfurt/M)*, S. 638- 641
- SAGEMANN, J.; SKOWRONEK, F.; DAHMKE, A.; SCHULZ, H.D. (1996): Pore-water response on seasonal environmental changes in intertidal sediments of the Weser Estuary, Germany. *Environmental Geology*, **27** (4): 362-369
- SCHÄCHLI, U. (1993): Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen. *Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazialogie (VAW), ETH Zürich*, **124**: 1 –273.
- SCHÖNBORN, W. (1992): *Fließgewässerbiologie*. Jena, Leipzig: Gustav Fischer Verlag
- SCHWARTZ, R., KOZERSKI, H.-P. (2002): Die Bühnenfelder der unteren Mittel-Elbe – Geschichte, Bedeutung, Zukunft. *Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Tagungsbericht 2001, (Kiel)*: 417-422
- SIMON, N. S. (1988): Nitrogen cycling between Sediment and the Shallow-Water Column in the Transition Zone of the Potomac River and Estuary: I. Nitrate and Ammonium Fluxes. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **26** (5): 483-497
- SMITH, R. L.; DUFF, J.H. (1988): Denitrification in a Sand and Gravel Aquifer. *Applied and Environmental Microbiology*, **54** (5): 1071-1078
- SMUL (SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG) (1998): *Umweltbericht 1998*. Freistaat Sachsen
- STEPANAUSKAS, R.; EDLING, H.; TRANVIK, L.J. (1999): Differential Dissolved Organic Nitrogen Availability and bacterial Aminopeptidase Activity in Limnic and Marine Waters. *Microb. Ecol.* **38**: 264-272
- TANIGUCHI, M. (1993): Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifers based on transient-depth-profiles. *Water Resour. Res.* **29** (7): 2021-2026
- UHLMANN, D. (1988): *Hydrobiologie – Ein Grundriss für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 3. überarb. Aufl., Jena: Gustav Fischer Verlag

- UHLMANN, D. (2001): Hydrobiologie der Binnengewässer. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer
- WEBSTER, I.T., MAIER, H., BAKER, P. und BURCH, M. (2000): The influence of wind on lagoon-river exchange in the River Murray, Australia. *Verh.Internat.Verein.Limnol.* **27**: 468-471.
- WENDLAND, F. und KUNKEL, R. (1999): Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbeeinzugsgebietes: Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flusseinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil); Abschlussbericht. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Band **13**: 1-166
- WHITE, D.S. (1993): Perspectives on defining an delineating hyporheic zones. *J. N. Am. Benthol. Soc.* **12**: 61-69.
- ZUNKER, F. (1930): Das Verhalten des Bodens zum Wasser. In: BLANCK, E.: Handbuch der Bodenlehre, Berlin: Springer **6**: 33-220