

2 Kenntnisstand zum Stofftransport und –umsatz im hyporheischen Interstitial

2.1 Das hyporheische Interstitial

Der Lebensraum des hyporheischen Interstitials wird nach WHITE (1993) definiert als gesättigte Zone im Porenraum des Sediments unterhalb der Flusssohle und in den Sohlbänken, der sowohl durch das Flusswasser als auch das Grundwasser beeinflusst wird. Er stellt eine Übergangszone zwischen Grundwasser und Fluss dar. Der Stoffaustausch zwischen diesen beiden Systemen wird durch die hydraulische Durchlässigkeit der Sedimentschicht bestimmt (z.B. BRUNKE 1999). Das hyporheische Interstitial ist ein eigenständiger, wichtiger Teillebensraum unserer Fließgewässer und durch eine charakteristische Lebensgemeinschaft (Hyporheos) charakterisiert (BORCHARDT ET AL. 1999).

MALARD ET AL. (2000) entwickelten das Schema der Aufeinanderfolge der Zonen des hyporheischen Interstitials auf der Basis von WHITE (1993) weiter. Diese Zonierung wird wesentlich durch das Verhältnis von Flusswasser zu Grundwasser und durch die undurchlässigen Grundwasserstauer beeinflusst. Für den betrachteten Flussabschnitt der Elbe gilt die Zone E (MALARD ET AL. 2000): hyporheisches Interstitial als gesättigte Zone beeinflusst durch eine Mischung von Grundwasser und Flusswasser.

Im Unterschied zu Flüssen in gemäßigten Breiten, die natürlich aus dem Grundwasser gespeist werden, wiesen MARTIE ET AL. (2000) am Beispiel des Sycamore Creek nach, dass in ariden Zonen die Infiltration von Flusswasser bei Hochwässern einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserhaushalt hat. In diesem Gebiet überwiegen infolge der ariden Verhältnisse die oberirdischen Abflüsse nach Regenfällen, so dass dem Interstitial und der Uferregion eine erhöhte Bedeutung für den Gebietsstoffhaushalt zukommt.

Das „Telescoping Ecosystem Modell (TEM)“ von FISHER ET AL. (1998) versucht die unterschiedlichen Prozesse im Freiwasser, dem Sediment, Interstitial und der Uferzone miteinander zu verbinden. Schwerpunkt ist dabei die Nährstoffretention im Fließgewässerökosystem. Dabei wird auf die besondere Bedeutung von Hochwässern hingewiesen. Es wird die Hypothese vertreten, dass durch die Querverbindungen zwischen den einzelnen Teilsystemen die Elastizität des Ökosystems gegenüber Umwelteinflüssen verbessert wird. Damit wird die Bedeutung des Interstitials für den Stoffhaushalt und die Besiedlung des Flusses hervorgehoben.

Die Bedeutung des Interstitials für den Stoffhaushalt des Flusses wird wesentlich von den Stofftransportprozessen bestimmt, denen Stoffumsatzprozesse überlagert sind. Dabei werden sowohl gelöste Stoffe als auch Feststoffe transportiert. Weiterhin ist das Interstitial ein wichtiger Lebensraum und ein Rückzugsareal für die im Fluss vorkommenden Wasserorganismen bzw. deren Jugendformen. Gleichzeitig verändert die Lebenstätigkeit dieser Organismen die Stofftransportbedingungen z.B. durch Freihalten der Poren und Abweiden des Biofilms auf den Sedimentkörnern.

WEBSTER ET AL. (2000) zeigen am Beispiel des Murray Flusses, dass das poröse Flussbett in Zusammenhang mit dem Windeinfluss auf den Wasserstand einer Lagune einen entscheidenden Einfluss auf das hydraulische Regime haben kann. Durch den Windeinfluss wird in der Lagune ein Wasserstandsgradient erzeugt, der einen entgegengesetzten Wassertransport durch das poröse Sediment verursacht. Damit können die gemessenen, Wind beeinflussten Abflüsse besser beschrieben werden als bei Ansatz einer wasserstandsbeeinflussten Infiltration aus dem Grundwasser.

2.2 Austauschprozesse und Bedeutung der Kolmation im Interstitial

Die Austauschprozesse zwischen Interstitial und Fluss sind maßstabsabhängig. Dabei wird zwischen einer Makro-, Meso- und Mikroskala unterschieden (siehe auch LENK ET AL. 1999). Die Makroebene stellt die Vorgänge in der Flussaue dar, die z.B. durch die Grundwasserex- oder –infiltration und die Durchströmung aufgeschütteter Beckensedimente beschrieben werden (Maßstab: Meter bis Kilometer) . Die Mesoskala wird durch die morphologischen Strukturen im Fluss, wie z.B. Kiesbänke, Gleit- und Prallhang bestimmt (Maßstab: mehrere Dezimeter bis Meter), während die Mikroskala der Austauschprozesse durch die hydromechanische Dispersion und turbulente Druckschwankungen (DITTRICH 1997) charakterisiert ist. Die Mechanismen der mikroskaligen Austauschprozesse auf Korngrößenniveau des Sedimentes sind empirisch nur sehr schwer zu erfassen und bedürfen deshalb einer modeltechnischen Untersuchung.

In der Realität überlagern sich die Prozesse in den unterschiedlichen Maßstabsebenen (BRUNKE 1997), so dass es erforderlich ist, die für das jeweilige Gewässer bestimmenden Prozesse zu ermitteln und mittels modelltechnischer Hilfe deren Einfluss auf den Stofftransport- und –umsatz mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse zu ermitteln. Es ist davon

auszugehen, dass analog der Zonierung der Fließgewässer zwischen Krenal und Potamal sich auch die Bedeutung einzelner Austauschprozesse im Längsschnitt des Flusses unterscheidet. Bisher wurden bisher im wesentlichen die Prozesse in den Oberlaufregionen der Flüsse untersucht, in denen bereits auf Grund der Rauigkeit der Flusssohle die Bedeutung der meso- und mikroskaligen Stofftransportprozesse ersichtlich ist.

Untersuchungen an der Lahn (BORCHARDT UND FISCHER 2000, LENK ET AL. 1999) belegen, dass im Hyporhithral die Stofftransportprozesse im mesoskaligen Bereich durch die „riffle – pool – Sequenz“ bestimmt werden. Allerdings können diese durch klein- und großskalige Prozesse, wie der In- und Exfiltration von Grundwasser und den 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, wobei die dynamische Veränderung durch Kolmation einen wesentlichen Einfluss spielen dürfte (MONTENEGRO 2000, pers. Mitteilung).

Im Rahmen eines Verbundprojektes an der Lahn wurde ein Abschnitt der Lahn mit einer Länge von 400 m untersucht (LENK ET AL. 2000). In diesem Abschnitt, der durch eine „pool-riffle-Sequenz“ gekennzeichnet ist, wurden sowohl Tracerexperimente (SAENGER ET AL. 1997) als auch Temperaturmessungen im Flussbett bis zu einer Tiefe von 2,6 m durchgeführt, um den hydraulischen Austausch zwischen fließender Welle und Interstitial zu kennzeichnen. Zur Messung vertikaler Druckgradienten und zur Entnahme von Porenwasser aus dem Interstitial wurden Interstitialsonden eingesetzt mit Entnahmetiefen in der Regel von 5, 15, 25 und 45 cm. Die Messung erfolgte in drei hintereinander angeordneten Transekten über den Längsverlauf einer Kiesbank.

Die Temperaturmessungen im Mai 1998 zeigten bei absinkender Wasserführung der Lahn für den Einstrom- und Ausstrombereich in einer Kiesquerbank deutliche Unterschiede. Auf der Basis dieser Temperaturprofile wurden nach TANIGUCHI (1993) die vertikalen Austauschraten berechnet. Diese unterscheiden sich zwischen beiden Bereichen in der Kiesbank signifikant. Im Einstrombereich wurden vertikale hydraulische Austauschraten von 0,008 ... 0,015 m h⁻¹ kalkuliert, während diese im Ausstrombereich mit 0,002 ... 0,008 m h⁻¹ niedriger sind.

Auf der Basis von Traceruntersuchungen, in denen der Tracer in die fließende Welle injiziert wurde (SAENGER UND LENK 2000), wurde die horizontale Transportgeschwindigkeit im Interstitial verursacht durch das Einströmen von Wasser in der Kiesbank zwischen $0,05 \dots 0,2 \text{ m h}^{-1}$ kalkuliert. Wenn der Tracer direkt in das Interstitial injiziert wurde war die Abstandsgeschwindigkeit fünffach höher. Die Druckmessungen zeigen in einer Tiefe von 15 – 20 cm eine Kolmation an. Sie sind gut geeignet, um einstrom- und Ausstromsituationen zu unterscheiden. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass sowohl Traceruntersuchungen als auch vertikale Messungen der Austauschparameter erforderlich sind, um die hydraulischen Vorgänge ausreichend beschreiben zu können. Nach SAENGER (2000) dominieren unterhalb der Kolmationsschicht horizontale Transportprozesse.

Die Ergebnisse der Auswertung der Temperatursonden und der Druckmessung liegen in vergleichbarer Größenordnung (LENK ET AL. 1999). Dieser Sachverhalt weist darauf hin, dass die Messung der Vertikalverteilung der Temperatur geeignet ist, den vertikalen Austausch zu bestimmen.

An der Lahn traten im horizontalen Verteilungsmuster Bereiche auf, in denen Wasser mit hohen Sauerstoffkonzentrationen in tiefe Schichten des Interstitials (45 cm) eindringt („downwelling zone“, FISCHER ET AL. 1998). Das ist ein Hinweis auf die räumliche Heterogenität des Interstitials und der Austauschbedingungen.

Im Voralpinen Fließgewässer Töss (BRUNKE 1999) wurden in einer „pool-riffle“-Sequenz mittlere Infiltrationsraten in der Sedimentschicht 0-20 cm Tiefe von $3,3 \text{ m h}^{-1}$ Ausströmraten von $1,5 \text{ m h}^{-1}$ kalkuliert. Für diesen Flussabschnitt errechnet sich ein Zeitbedarf für einen kompletten Austausch zwischen Interstitial und fließender Welle von 1,5 h (erforderlicher Fließweg ca. 3,6 km). Im Vergleich der morphologischen Bedingungen zwischen Töss, Lahn und Elbe im Oberen Elbtal ist zu erwarten, dass die Austauschraten in der Elbe geringer sind.

Die in den Fließgewässern durchgeführten Messungen zeigen die große Bedeutung der Kolmation für das Verständnis der Austauschvorgänge zwischen Interstitial und fließender Welle.

Der Eintrag von Feinstoffen aus der fließenden Welle in das Interstitial reduziert den Porenraum und die Infiltrationsrate sowie die vertikale Austauschrate. Die

Sedimentuntersuchungen in Fließgewässern zeigen häufig eine bimodale Verteilung der Korngrößen mit den zwei Komponenten, den Flussschotter bzw. Flusskies und Fein- bzw. Feinststoffe. Die Ablagerung/Resuspension und der Transport von in der fließenden Welle enthaltenen suspendierten Stoffen < 2 mm Korngröße ist bestimmt durch die Fließbedingungen, die Eigenschaften der suspendierten Stoffe und die Flussbettstruktur (CARLING 1984).

Nach BRUNKE (1999) können verschiedene Prozesse der Wechselwirkung zwischen Flussbett und suspendierten Stoffen unterschieden werden:

- Ablagerung auf dem Sediment in Gebieten geringer Fließgeschwindigkeit in der Mikroskala in dünnen Schichten. Der Schlamm wird in die strukturelle Matrix des Periphytons auch im turbulenten Wasser eingebaut.
- Ablagerung von dicken Sedimentschichten auf dem Sediment in Zeiträumen geringen Durchflusses und der damit verringerten Fließgeschwindigkeit verbunden mit einer sekundären Kolmation. Hieran kann in eutrophen Fließgewässern auch die Bildung von Algenmatten beteiligt sein.
- Eindringen von Feinsediment in die obere Schicht des Interstitials mit dem Effekt, dass bei anhaltendem Niedrigwasserabfluss sich eine kompakte Schicht mit reduzierter Porosität und hydraulischer Durchlässigkeit aufbaut, die auch das Flussbett gegen Erosion stabilisieren kann (interne Kolmation).
- Eindringen von Feinststoffen in tiefere Sedimentschichten des Interstitials (Tiefen-Infiltration).

Der Feinststofftransport in die Tiefenschichten des Interstitials stellt eine wesentliche Lebensquelle für die Mikro- und Makroorganismen des Interstitials dar. Die Mechanismen der Filtration können in Abhängigkeit von der Partikelgröße als mechanisch, physikochemisch und kolloidal beschrieben werden (BEYER UND BANSCHER 1975). Der Partikeltransport hängt von der Partikelgröße und der Größenverteilung ab. Die Stabilität von Kolloiden wird von makromolekularen organischen Substanzen bestimmt (O'MELIA 1995).

Der Prozess der Kolmation ist in drei Phasen darstellbar (SCHÄCHLI 1993).

- Initialeinlagerung und Porenraumverringern durch Feinststoffe mit einem Korndurchmesser > 30 µm. Die hydraulische Austauschrate wird noch wenig beeinflusst. In dieser Periode reichert sich Feinsand in der oberen Sedimentschicht an, der für die bimodale Korngrößenverteilung verantwortlich ist.

- In der zweiten Phase lagern sich Partikel mit einem mittleren Korndurchmesser von 3...30 µm im Sediment ein. Die Feinststoffe mit einem Korndurchmesser < 3 µm durchdringen diese Schicht und werden in die Tiefenschichten des Interstitials transportiert.
- In der dritten Phase werden auch diese Feinststoffe mit geringer Korngröße in der Filterschicht eingelagert und reduzieren den Porenraum im Sediment endgültig. Die daraus resultierende minimale hydraulische Durchlässigkeit der Filterschicht (Kolmationsschicht) ist das Ergebnis eines Gleichgewichts von Sedimentation und Resuspendierung sowie biologischem Abbau der suspendierten Partikel.

Der vertikale hydraulische Gradient ist eine entscheidende Einflussgröße für die Kolmation, indem z.B. durch Infiltration die Menge der eingelagerten Feinststoffe im Interstitial erhöht wird, bis deren Einlagerung zu einer Sekundärfilterschichtausbildung mit Kolmation führt. Demgegenüber soll der Einfluss der Wassertemperatur durch Veränderung der Viskosität des Wassers geringer sein (SCHÄCHLI 1993).

Aus der heterogenen Verteilung der morphologischen Bedingungen des Flussbettes, der Korngrößenverteilung des Flussbettes sowie der Strömungsverteilung und der In- und Exfiltration des Grundwassers entsteht in den Flüssen ein „patch-work“ von unterschiedlich kolmierten Abschnitten der Flusssohle. Deren Verteilung ist infolge der Dynamik der Strömungsprozesse sowie des Auftretens von Abflussveränderungen zusätzlich zu beachten. Damit besteht die Möglichkeit, dass durch Messungen an ein und demselben Ort in verschiedenen Zeiträumen signifikant unterschiedliche Austauschbedingungen gemessen werden. Insbesondere für die Betrachtung größerer Flüsse ist deshalb die Verteilung dieser unterschiedlichen Kolmationsstadien zu beachten, um mit Modellvorstellungen typische mittlere Verhältnisse für einen Flussquerschnitt bzw. Flussabschnitt abzubilden.

Im Ergebnis der Untersuchungen von RÖßNER UND GUDERITZ (1993) sowie NESTLER ET AL. (1993, 1996) ist für das Flussgebiet der Oberen Elbe im Unterschied zum Rhein (GÖLZ ET AL. 1991) keine generelle Kolmation des Flussbettes (interne Kolmation) zu erwarten.

Die Kolmation ist auch eine entscheidende Einflussgröße für die Stofftransportprozesse im Interstitial. Nach SCHÄCHLI (1993) liegt die Kolmationsschicht in einer Sedimenttiefe von

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

In vergleichenden Untersuchungen der Lahn (IBISCH ET AL. 2000) wäre diese in einer Tiefe von 16 bis 20 cm zu erwarten. Die Untersuchungen in der Lahn und in einer halbtechnischen Versuchsanlage mit einem Filtersäulendurchmesser von 0,53 m zeigte ähnliche Ergebnisse. Durch den Feinststoffeintrag in das Interstitial wurde der hydraulische Widerstand in der oberen Schicht erhöht. Es wird angenommen das abgestorbene Periphyton im betrachteten Untersuchungszeitraum die Hauptquelle für diese Feinststoffe darstellte. Im Experiment folgte auf die Phase der Kolmation ein Dekolmationsprozess, in dem sich die Durchlässigkeit wieder erhöhte. Dieser Prozess war offenbar durch biologischen Abbau bedingt, da keine erhöhten Mengen an suspendierten Stoffen im Ablauf des Filters während dieser Dekolmationsphase gefunden worden sind.

Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass neben der Dekolmation durch die Einwirkung von Hochwässern auf das Flussbett auch biologische Prozesse zu beachten sind.

Im schweizerischen voralpinen Fluss Töss (BRUNKE 1999) wurde bis zu einer Sedimenttiefe von 70 cm ein Anteil der Fein- und Feinststoffe am Sediment mit 13,9 % (Standardabweichung 6 %) gemessen. Im Mittel hatten ca. 72 % dieser Feinststoffe einen Durchmesser $< 0,1$ mm ($D_m = 0,03$ mm). Der Anteil dieser Feinststoffe in den Tiefenschichten des Sediments war in den Infiltrationszonen bis auf 6 g l^{-1} (Maxima bis 15 g l^{-1}) Sediment erhöht, während in der Zone des überwiegend horizontalen Austausches die mittlere Konzentration dieser Feinststoffe 3 g l^{-1} nicht überschritt. Der Nachweis von Detrituspartikeln mit einer Korngröße $> 300 \mu\text{m}$ selbst in Sedimenttiefen von 1,5 m in diesem Fluss zeigte nach BRUNKE (1999), dass der Stofftransport in das Interstitial die Sedimentschicht und die fließende Welle verbindet sowie in größere Tiefen reichen kann. Dabei sind die Bedingungen der hohen Porosität im Sediment dieses voralpinen Flusses im Vergleich zu anderen Fließgewässern zu beachten.

Dieser Feinststoffeintrag, der auch organische Detrituspartikel, Algen und Bakterienzellen und -flocken umfasst ist eine wesentliche Grundlage für das Verständnis des Stoffumsatzes im Interstitial, der sowohl durch die gelösten organischen Verbindungen, den Sauerstoff und die Stickstoffverbindungen als auch das partikuläre C-Angebot beeinflusst wird. Es wird davon ausgegangen, dass der Eintrag von partikulärem Kohlenstoff eine wesentliche Quelle für die im Interstitial ablaufenden Respirations- und Denitrifikationsprozesse darstellt. In diesem Zusammenhang wird im Projekt „Bedeutung der Biofilme im Interstitial der Elbe für

die Stoffdynamik, die Sohlpermeabilität und die Nährstoffelimination (TU Dresden) die Bedeutung des Phytoplanktons als Kohlenstoffquelle im Interstitial untersucht.

2.3 Grundwasserverhältnisse in der Oberen Elbe

Für die Betrachtung des Interstitials in der Oberen Elbe ist die Kenntnis der Grundwasserbedingungen Voraussetzung. In WENDLAND UND KUNKEL (1999), KUNKEL ET AL. (1999) wird das betrachtete Einzugsgebiet der Elbe als nitratabbauend bzw. als Mischtyp zwischen Nitratabbauend und nicht abbauend im Bereich von Dresden eingeordnet.

Im Ballungsgebiet Dresden werden ca. 40 % der Wasserwerkskapazität durch die direkte Nutzung der Elbe nach Uferfiltration und Grundwasseranreicherung gedeckt. NESTLER ET AL. (1993) gehen von einem flächenhaft relativ einheitlichem geschichtetem Grundwasserleiter aus. Im Ergebnis der Installation eines Beschaffenheitsüberwachungssystems in Torgau zeigten sich deutlich Anomalien, die z.B. durch ein Unterströmen des Grundwassers von der anderen Elbseite hervorgerufen werden. Die Elbe kann deshalb nicht als hydraulische Grenze angesetzt werden (NESTLER ET AL. 1996). Die Unterscheidung der Wasserkörper wurde mit den Kriterien Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat (für das Grundwasser) und DOC, AOX, EDTA für das Uferfiltrat durchgeführt. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit wurde mit dem Tritium-Isotop, mit dem das Alter des Wasserkörpers gemessen werden kann, getroffen. Im Vergleich zu den einfacheren oben dargestellten Messgrößen wurden die gleichen Resultate erzielt. Ursache hierfür sind Zwischenschichten unterschiedlicher Durchlässigkeit im Grundwasserleiter.

Die Beschaffenheitsverhältnisse während der Infiltration werden von NESTLER, NITZSCHE UND KRÜGER (1996) dargestellt. Sie weisen am Beispiel Torgau darauf hin, dass

- in der Elbe ein erhöhter Anteil schwer abbaubarer huminstoffartiger Verbindungen enthalten ist,
- die „Kolmationszone“ einen wesentlichen Einfluss auf die Eliminierung von organischen Stoffen hat. In der mit wenigen Dezimetern Mächtigkeit angegebenen Schicht, die dem Interstitial entspricht, werden Eliminationsraten von 30 ... 50 % DOC und 30 ... 40 % AOX erreicht. Eine weitere Elimination findet im elbnahen Bereich des Grundwasserleiters statt.
- zwischen Flusswasser mit ca. 5 mg l⁻¹ NO₃-N und Infiltrat mit 2,5 ... 4,5 mg l⁻¹ NO₃-N eine eindeutige Denitrifikation nachweisbar ist. Eine durch die Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse in der Elbe befürchtete Verschlechterung der Denitrifikationsleistung war nicht eingetreten.

GRISCHEK ET AL. (1998) weisen darauf hin, dass der Nitratinput aus der Elbe in das Grundwasser bei Infiltrationssituationen wesentlich durch die von der Wassertemperatur abhängige Denitrifikation in der obersten Schicht – dem Interstitial mit teilweiser Ausbildung einer Kolmationsschicht beeinflusst wird.

2.4 Stoffumsatz und biologische Struktur im Interstitial

Die Stoffumsätze finden in erster Linie in Biofilmen statt. Diese bilden sich durch Adsorption von gelöstem organischen, kolloidalem und partikulärem Material an Oberflächen des Sediments im Interstitial und die Besiedelung durch Bakterien und Pilze (BOLANOS ET AL. 1998). Allgemein steht die Besiedlung in Abhängigkeit von den wechselnden Erosions- und Akkumulationsraten von Sand und organischen Partikeln, den Sedimentverlagerungen und dem Abriss von Pflanzen mit Auswirkungen auf den Stoffhaushalt (SCHÖNBORN 1992).

Aufgrund des Rückganges von leicht abbaubarem Material mit zunehmender Sedimenttiefe sinkt die Enzymaktivität von Mikroorganismen schnell mit der Tiefe ab (RÖßNER UND GUDERITZ 1993). Bereits in einer Tiefe von 40 cm im Interstitial der Elbe bei Torgau waren nur noch 50 % der Enzymaktivität nachweisbar. Bei verstärkter Kolmation der Flusssohle im Bereich von Bühnenfeldern wurden um vier Zehnerpotenzen erhöhte Gesamtzellzahlen nachgewiesen.

Die entscheidenden biochemische Stoffumwandlungsprozesse im Untergrund vollziehen sich durch Mikroorganismen in den Biofilmen an der Feststoffmatrix (RÖßNER UND GUDERITZ 1993). Die Mikroorganismendichte und deren Stoffwechselaktivität wird durch die innere Oberfläche und die stoffliche Zusammensetzung der Feststoffmatrix bestimmt. Der organische Kohlenstoffgehalt der Festphase (TOC) ermöglicht die mikrobielle Besiedelung der inneren Oberfläche. Sie sind Orte des verstärkten biologischen Metabolismus. Die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen hängt entscheidend von der Substratzufuhr ab, die von Strömungsrate der Untergrundpassage bestimmt wird. Die biologische Aktivität der Mikroorganismen im Untergrund wird vor allem durch die intensiven Milieufaktoren Temperatur, pH-Wert und Sauerstoff/Redoxpotential bestimmt (RÖßNER UND GUDERITZ 1993).

Im Vergleich zur Ammoniumaufnahme von Algen ist die Nitrifikation effizienter für die Umwandlung von Ammonium. Während stabile Nitrifikantenpopulationen auch Perioden mit geringem Substratangebot relativ lang überstehen, ist für die Entwicklung neuer Populationen eine Ammoniumkonzentration von über $0,3 \text{ mg l}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$ über mehrere Tage erforderlich. Kurzzeitige Belastungsspitzen reichen für deren Entwicklung nicht aus (JANCARKOVA UND GUJER 1999).

BUTTURINI ET AL. (2000) zeigten die Anwendbarkeit von Sediment-Biofilm-Reaktoren (SBR) für die Bestimmung der auf den Biofilm bezogenen Stoffumsatzrate im Sediment. Es besteht dabei die Möglichkeit die auf die Sedimentoberfläche bzw. das Sedimentvolumen/-gewicht bezogene Umsatzrate (Nitrifikation, Denitrifikation, C-Aufnahme) sowohl unter stationären als auch nicht-stationären Bedingungen zu beobachten. Diese Reaktoren sind besser zur Erfassung der Stoffumsatzraten geeignet als durchmischte Systeme. Die auf das Sediment (Feinsand) bezogene Nitrifikationsleistung wurde für den Fluss Solana mit $8,9 \text{ ng NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{ TM min}^{-1}$ bzw. $12,8 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1} \text{ TM d}^{-1}$ angegeben. Im Vergleich hierzu beträgt die typische Nitrifikationsleistung von Biofilmen in kommunalen Kläranlagen $36\text{...}72 \text{ mg NH}_4\text{-N kg}^{-1} \text{ TM d}^{-1}$.

Aus den verschiedensten Literaturquellen sind N-Umsatzraten bekannt, die in Abhängigkeit mehrerer abiotischer und biotischer Faktoren über eine weite Bandbreite streuen. Oft wurden die Raten in Laborversuchen unter optimalen Substrat- und Temperaturbedingungen bestimmt. Diese Raten entsprechen potenziellen Umsatzraten, die im Gewässer meist

deutlich niedriger vorliegen. SMITH UND DUFF (1988) demonstrierten, dass die Denitrifikation als Prozess der N-Eliminierung in Grundwasserleitern stattfinden kann, wobei keine Nachweise für eine Nitratammonifikation gefunden wurden.

Von Untersuchungen im Bereich der Lahn (Deutschland) sind Ungleichgewichte der Stickstoffumsätze, insbesondere von Nitritanreicherungen in der fließenden Welle und im Interstitial, bekannt (BOLANOS ET AL. 1998). Bisherige N-Bilanzierungen weisen ein Defizit von etwa 30 % auf, wobei ein molekulares Entweichen vermutet wird.

PFENNIG UND MCMAHON (1996) ermittelten durch Untersuchungen des Denitrifikationspotenzials von Flusssedimenten, dass die Denitrifikationsrate temperaturlimitiert und vom C-Angebot abhängig ist. Die Autoren gehen davon aus, dass 15 bis 30 % des Nitrates im Interstitial des Platte Rivers denitrifiziert werden. Auch mit Gesamtbilanzierungen von Frachten aus Einzugsgebieten und dem Stoffeintrag in Fließgewässer konnte die Retention im Gewässersystem gezeigt werden. Für einzelne Teileinzugsgebiete der Elbe am Beispiel der Jahna stellte LANGE (2000) eine Reduzierung des Stickstoffeintrags um 25 bis 45 % fest. Ein wesentlicher Anteil dieser Verminderung kann in Zusammenhang mit dem Stoffumsatz im Übergangsbereich zwischen Einzugsgebiet und Fließgewässer - dem Interstitial - stehen.

FISCHER ET AL. (1998) fanden im Interstitial der Lahn eine schnellere Abnahme des Sauerstoffs und des pH-Wertes in den oberen Schichten als in tieferen. Die gleichzeitige Abnahme von Ammonium und Nitrat unter aeroben Bedingungen war nur unter Annahme gleichzeitig ablaufender Nitrifikation und Denitrifikation zu erklären.

Untersuchungen haben gezeigt, dass der biologisch abbaubare Anteil des DOC (BDOC) in Grundwasser gering aber vergleichbar mit anderen Gewässern ist (MINDL ET AL. 2000). Stabile Biofilme, die nicht permanent gestört sind z.B. durch Auswaschung, zeigen eine schnellere Substratadaptation als andere, die erst längere Adaptationszeiten benötigen, um einen effektiven Abbau des BDOC zu bewirken. Der Umsatz von kurzzeitigen hohen BDOC-Konzentrationen im Grundwasser wird von der hydrologischen Dynamik bestimmt (MINDL ET AL. 2000).

Untersuchungen mit einem in situ ¹³C-Experiment von MIDDLEBURG ET AL. (2000) zeigten die wichtige Bedeutung von Mikrophytobenthos für den C-Haushalt in Küstensedimenten. Der fixierte ¹³C-Kohlenstoff wurde schnell in tiefere Sedimentschichten (unter 6 cm), schneller bei

sandigem als bei schlammigem Sediment transportiert. Ebenso wurde der schnelle Transfer des Kohlenstoffs der benthischen Algen hin zu den Bakterien anhand bakterieller Fettsäuren mit dem Maximum nach 1 d nachgewiesen.

GRISCHEK ET AL. (1998) zeigen anhand von Bilanzen des Stoffumsatzes im Grundwasserleiter bei Torgau, welcher einer Infiltration von Flusswasser auf Grund der Entnahme für das Wasserwerk ausgesetzt ist, dass für die im Interstitial und anschließendem Grundwasser stattfindende Denitrifikation mehr organischer Kohlenstoff verbraucht wird, als er durch die Reduzierung des DOC nachweisbar ist. Sie gehen deshalb davon aus, dass zusätzlich partikulärer organischer Kohlenstoff für den Stickstoffabbau benutzt wird. Die Denitrifikationsrate wurde für die Kombination von Interstitial und Grundwasserleiter mit $0,04 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ N}$ bestimmt. In einem Säulenexperiment wurden mit dem gleichen Elbwasser höhere Denitrifikationsraten ($0,1 \dots 3,2 \text{ mg l}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ N}$) bestimmt. Das Angebot an organischem Kohlenstoff limitiert in der Elbe die Denitrifikation. HENCKE ET AL. (1999) ermittelten bei der Analyse des Prozesses der Infiltration von Oberflächenwasser ins Grundwasser am Ruhrtalstausee, dass in der Stoffbilanz die organische Substanz des Seesediments den Kohlenstoffbedarf für die Aufrechterhaltung der Redoxreaktionen bei Infiltration von Oberflächenwasser decken kann.

Nach Untersuchungen von GARCIA-RUIZ ET AL. (1998) korrelierte die Denitrifikationsrate im Sediment in verschiedenen Flüssen in Nordost England positiv mit der Nitratkonzentration im Wasserkörper, dem Wassergehalt des Sediments und dem Anteil feiner Partikel ($<100 \mu\text{m}$) im Sediment. Die Denitrifikationsraten reichten von $0,005$ bis $260 \text{ nmol N g}^{-1} \text{ TM h}^{-1}$. Unter Einbeziehung des in der Studie angegebenen mittleren Wassergehalts und des beim Elbesediment ermittelten Faktors zwischen Frischgewicht und Volumen ergeben sich Denitrifikationsraten bezogen auf das Sedimentvolumen von bis zu ca. $80 \text{ g N m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

MOHAMED ET AL. (1998) zeigten die P-Limitation von Biofilmbakterien aus dem Fraser River (Canada). Die Zugabe von P erhöhte das Biofilmwachstum und gleichzeitig verringerte sich die Menge der extrazellulären Polymere, die durch die Bakterien akkumuliert wurden. Diese Bedingungen gelten jedoch nur bei geringen P-gehalten, wie sie für die Elbe nicht typisch sind.

PUSCH (1996) fand unterschiedliche hohe Respirationsraten in riffle-pool-Sequenzen im Interstitial des Mittelgebirgsfluss Steina im Schwarzwald. Im Bereich der „riffle“ lagen die mittleren Respirationsraten im Frühjahr bzw. im Sommer umgerechnet bei $11,3$ bzw.

16,1 g O₂ m⁻³ d⁻¹. In den „pools“ wurden wesentlich geringere Raten von 1,68 und 4,80 g O₂ m⁻³ d⁻¹ gemessen.

Nach Untersuchungen von Elbsedimenten gehen FISCHER UND PUSCH (1998) davon aus, dass in großen Flachlandflüssen die sedimentgebundene heterotrophe Aktivität eine größere Rolle spielt als bisher angenommen. Die in den Elbesedimenten nachgewiesenen Bakterienzahlen sind vergleichbar hoch, wie die in Bergbächen ermittelten Abundanzen (FISCHER ET AL. 1996).

Bei geeigneter Sedimentstruktur sind auch in größeren Sedimenttiefen bis zu einem Meter noch hohe Bakterienabundanzen von 1 bis $2 \cdot 10^8$ Bakterien cm⁻³ Sediment vorhanden. Diese intensive bakterielle Besiedlung der Elbesedimente im Bereich von Magdeburg sowie Daten zur Sedimentstruktur (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 1996) deuten auf eine gute Durchströmung der Sedimente mit Flusswasser und damit auf eine hohe vertikale Konnektivität der Flusssohle mit dem Pelagial der Elbe hin.

Die Analyse der Vertikalverteilung der Ammonium- und Nitritoxidierer im Interstitial der Lahn unterhalb einer Kläranlageneinleitung mittels Gensonden ergab in den oberen 5 cm des Sediments erheblich höhere Zellzahlen als in tieferen Schichten (15, 25 und 40 cm) (BOLANOS 1998).

Eine Flussbetteintiefung kann zu Schwächung der Entwicklung und der Aktivität des Biofilms im Sediment, zu Veränderungen in der Vertikalverteilung von Bakterien und der Biofilmaktivität, deutlichen temporären Variationen der Biofilmaktivität und zur Abnahme der Effizienz der Sauerstoffaufnahme, DOC-Immobilisierung und Nitrat-Bildung im Sediment führen (CLARET ET AL. 1998).

Nach BATTIN UND SENGSCHEMITT (1999) haben Algen eine wichtige Bedeutung für die Kolmation des Interstitials. So kommt es zu direktem Verstopfen durch die Algenzellen oder zur Vermehrung heterotropher Bakterien auf der Grundlage von Algenexsudaten. Weiterhin ist die Feinstoffproduktion aus Abbauprodukten des Periphytons zu beachten.

In Biofilmen von Flüssen findet man die maximale Enzymaktivität der Bakterien, wenn die Algenbiomasse zwei bis dreimal höher ist als die Bakterienbiomasse (ROMANI UND SABATER 2000).

Die Bakterienaktivität steigt in oligotrophen Mikrokosmen durch Zugabe von verschiedenen organischen Nährstoffen (qualitative Stimulation) (GAYTE ET AL. 1999). Demgegenüber erhöht sich die Bakterienaktivität bei meso- bis eutrophen Mikrokosmen durch Zugabe von größeren Mengen abbaubarer und gesamter organischer Nährstoffe (quantitative Stimulation).

Nach BORCHARDT UND FISCHER (2000) wird die Abundanz der Benthosorganismen nicht nur vom Nahrungsangebot (organischer Detritus) sondern auch von der Dynamik der Sauerstoffkonzentration bestimmt. Die jahreszeitliche Sukzession chemischer Parameter mit der Verschiebung der Isohypsen im Interstitial wirkt sich artspezifisch auf die Verteilung der Fauna aus (FRASER UND WILLIAMS 1998). Eine wesentliche Größe der Verlagerung der chemischen Isolinien steht in Zusammenhang mit der Stärke des Grundwasserzustroms bzw. mit der Infiltration von Oberflächenwasser. FRASER UND WILLIAMS (1998) vermuteten wesentliche Konsequenzen dieser Beziehung für den Nährstoffhaushalt.

Bei Grundwasser, das hauptsächlich durch Oberflächenwasser gespeist wird, wird die Zusammensetzung der Invertebratenfauna durch die Entfernung vom Fließgewässer charakterisiert (MAUCLAIRE UND GIBERT 2000). Die Artendiversität und Abundanz sind bei entfernterem, weniger verbundenem Grundwasser niedriger und spiegeln die Beschaffenheit des Grundwassers wieder.

Untersuchungen der faunistischen Besiedelung des Elbeinterstitials bei Magdeburg ergaben, dass im Hyporheal bis in 1 m Tiefe epigäische Organismen, vom Flusswasser und nicht vom Grundwasser beeinflusste Organismen, dominierten (PETERMEIER UND SCHÖLL 1998). Dies deutet auf eine gute Verbindung zwischen Interstitial und fließender Welle hin.

2.5 Schlussfolgerungen aus dem gegenwärtigen Kenntnisstand

Die Analyse des vorliegenden Wissenstandes zeigt, dass die Prozesse des Stoffaustausches zwischen Interstitial und fließender Welle sehr komplex sind. Hierbei ist der Grundwassereinfluss als makroskaliger Prozess zu beachten.

Die Betrachtung der Stofftransportprozesse erfordert eine modellunterstützte Herangehensweise, wobei in der Elbe auf Grund ihres Breiten/Tiefen-Verhältnisses eine zweidimensionale modellgestützte Betrachtung in einer ersten Stufe der Betrachtung notwendig ist.

In der Vertikalstruktur des Interstitials sind zumindest drei verschiedene Schichten zu erfassen:

- die ca. 10 ... 15 cm dicke „Rindenschicht“ zwischen Flusssohle und zu erwartender innerer Kolmationsschicht,
- die durch das Grundwasser und das Flusswasser gleichermaßen beeinflusste mittlere Tiefenschicht und
- die stärker durch das Grundwasser beeinflusste untere Tiefenschicht.

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen ist das Transportmodell zu präzisieren. Grundlage für diese erste Anpassung stellt die Messung wesentlicher physikalisch-chemischer Parameter (Wassertemperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt) dar. Mit dem präzisierten Transportmodell sind gleichzeitig durch eine Sensitivitätsanalyse die Einflussfaktoren für die notwendigen Messungen zu untersuchen und das Messkonzept zu überarbeiten. Die Literatur zeigt, dass im Gewässer durch eine Heterogenität der räumlichen Struktur des Interstitials und der Kolmationsbedingungen unterschiedliche Verhältnisse an einem Ort zu verschiedenen Zeitpunkten und an räumlich benachbarten Probenahmestellen zu erwarten sind. Aus diesem Grund besteht im Ergebnis der Messungen die Aufgabe, die typischen mittleren Bedingungen herauszuarbeiten. Dies ist nur durch eine modellgestützte Auswertung der Daten möglich.

Die Messung der vertikalen Temperaturverteilung erweist sich als gut geeignet, die vertikalen Austauschbedingungen zu beschreiben. Bezüglich der Beprobung des Interstitials ist wesentlich, möglichst repräsentative Bedingungen für die einzelnen Tiefenschichten zu erfassen. Dies erfordert in Umkehrung zu der an der Lahn angewendeten Methode eine Erfassung einer größeren horizontalen Lamelle des Interstitials. Die Tiefenauflösung wird damit begrenzt. Die Tiefenlage der Probenahmestellen ist an die oben dargestellten Schichtungsbedingungen anzupassen.

Neben der Erfassung der physikalischen Daten sind parallel chemische Daten zum Sauerstoff- und Stickstoffhaushalt zu erfassen, um durch Nutzung des physikalischen Transportmodells in Kopplung mit definierten Stoffumsatzreaktionen Bilanzen für den

Stoffumsatz zu erstellen, welche die Selbstreinigungsleistung der einzelnen Zonen des Interstitials zeigen.

Die Komplexität der Stofftransportprozesse im Interstitial erfordert, die modellmäßige Darstellung, um die z.T. gegensätzlichen bzw. voneinander abhängigen Transportprozesse nachvollziehen zu können. Hierzu wurde von BORCHARDT ET AL. (1999) auf der Basis der im Kap. 2.2. und 2.4. dargestellten Untersuchungen an der Lahn auf Grundlage des Modells AQUASIM ein erstes Modell für den Stofftransport und den Sauerstoffhaushalt im untersuchten Flussabschnitt vorgestellt.

Diesem Modell wurden zugrunde gelegt:

- ein vertikaler Transport von $0,14 \text{ m h}^{-1}$,
- eine Porosität des Sedimentes von 23%,
- eine hyporheische Benthos-Community-Respiration von $0,28 \text{ g O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ Sediment,
- Schichttiefe 40 cm.

Das Modell wurde als dynamisches Modell entwickelt. In der fließenden Welle wurden berücksichtigt:

- advektiver Transport,
- Dispersion,
- atmosphärischer Sauerstoffeintrag,
- heterotropher C-Abbau,
- Nitrifikation,
- Primärproduktion,

Die hyporheische Zone wurde durch die Prozesse des advektiven Transports und des dispersen Austauschs eingebunden.

Dieses einfache Modell zeigt bereits für einen stationären Fall eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten für Sauerstoff an der Lahn.

Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass auch im Rahmen dieses Projektes für die Elbe eine modellgestützte deterministische Beschreibung der Stofftransport- und Umsatzprozesse erfolgreich sein wird. Hierfür ist in einer ersten Phase eine Zweidimensionalität der Modellierung erforderlich.