

Biochemische Stoffwandlungsprozesse in der Kolmationszone – Untersuchungen im Labormaßstab mit Hilfe eines Kolmationsgerinnes

Thomas Kumke, Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung,
Forschungsstelle Potsdam, Telegrafenberg A43, D-14473 Potsdam,
e-mail: tkumke@awi-potsdam.de

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von verschiedenen Experimenten zur biochemischen Stoffwandlung während der Uferfiltration in der Kolmationszone besprochen. Die Experimente wurden mit einem Kolmationsgerinne unter naturnahen Fließ- und Sedimentationsverhältnissen der Elbe durchgeführt. Der biochemische Abbau ist in vier Bodensäulen untersucht worden, die Elbesedimente der Standorte Torgau und Meißen enthielten. Es konnte in Langzeituntersuchungen gezeigt werden, dass gelöste organische Kohlenstoffverbindungen bei einer stabilen Kolmationsschicht bis zu 20 % reduziert werden. Die Ergebnisse der Experimente belegten wesentliche Abhängigkeiten der Abbauprozesse von Steuermechanismen, wie z.B. die Filtergeschwindigkeit in den Sedimenten und die Fließdynamik der Elbe. So reduzierte sich der biochemische Abbau bei höherer Filtergeschwindigkeit. Bei einer höheren Fließgeschwindigkeit der Elbe wurde der Abbau einiger Komponenten geringer bzw. instabil. Die hier beschriebenen Untersuchungen waren Teil einer in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Nestler angefertigten Diplomarbeit und ein Beitrag zum ehemaligen BMFT-Projekt zur Elbeuferfiltration.

Einleitung

Die Gewinnung von Uferfiltrat ist ein wichtiger Bestandteil der Trinkwasseraufbereitung. So beträgt z.B. der Anteil an Uferfiltrat von Oberflächengewässern bezogen auf die Gesamttrinkwasserversorgung im Freistaat Sachsen ca. 18 % (Worch *et al.*, 2002). Die Qualität des Uferfiltrats ist dabei maßgeblich von der Uferfiltratspassage abhängig, wobei hier die Länge der Fließstrecke sowie die Beschaffenheit des Untergrundes eine wichtige Rolle spielen. Insbesondere der erste Teil der Fließstrecke innerhalb der Gewässersohle ist durch intensive physikalische, chemische und biochemische Prozesse gekennzeichnet, die zu einer deutlichen Veränderung der Inhaltsstoffe des Oberflächenwassers führen können. In diesem Teil der Fließstrecke, der so genannten Kolmationszone, kommt es durch Absetzen von Sink- und Schwebstoffen, chemische Fällung sowie erhöhte mikrobielle Aktivität zu einer Verringerung der Infiltrationsrate und damit zu einer Verminderung der Durchlässigkeit (z.B. Grabs, 1981). Stoffwandlungsprozesse innerhalb dieser verdichteten Zone können vorwiegend auf Fällungs- und Lösungsprozesse, Adsorption/Desorption, Ionenaustausch und Redoxprozesse zurückgeführt werden, wobei auch die Kolmationsentwicklung und ihre Dynamik eine wichtige Rolle spielen. Letzteres ist dabei vor allem abhängig vom hydrologischen Regime (z.B. Wasserspiegeländerungen und Fließgeschwindigkeit) sowie von der Güte des Oberflächengewässers (z.B. Schwebstoffkonzentration).

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen waren Teil einer am Institut für Grundwasserwirtschaft der Technischen Universität Dresden durchgeführten Diplomarbeit (Kumke, 1994) und haben die Ziele, (i) diese Stoffwandlungsprozesse innerhalb der Kolmationszone von Elbesedimenten im Labormaßstab nachzuweisen, (ii) den Einfluß von Infiltrationsgeschwindigkeit sowie Fließdynamik der Elbe auf die Stoffwandlung zu bestimmen und (iii) das Transportverhalten ausgewählter Stoffe in der Kolmationszone zu charakterisieren. Die oben erwähnte Diplomarbeit war Bestandteil eines vom ehemaligen BMFT finanzierten Projektes zur Elbeuferfiltration (Nestler *et al.*, 1995).

Material und Methoden

Aufbau des Kolmationsgerinnes

Für die Untersuchungen zur Stoffwandlung in der Kolmationszone wurde ein Kolmationsgerinne benutzt (Abb. 1), das von Grischek (unveröffentlicht) entwickelt wurde. Während des Versuchszeitraumes wurde es am Rohwasserzulauf des Wasserwerkes Dresden-Hosterwitz aufgebaut. Die Unterwassermotorpumpe (6) förderte Elbwasser aus dem Rohwassereinlauf zum Vorratsbehälter (1), in dem bis zu 100 l Wasser gespeichert werden konnte. Er diente vorwiegend der Druckregelung sowie der Regelung der Fließgeschwindigkeit im Gerinne. Das Gerinne (3) hatte eine Länge von 1.82 m, eine Breite von 14.5 cm und eine Höhe von 15 cm. Es konnte im Gerinne ein Druck bis zu 15 kPa und eine maximale Fließgeschwindigkeit von 0.6 ms^{-1} erzeugt werden. Ein Entlüftungsschlauch verhinderte eine Luftblasenbildung im Gerinne. Nach Austritt des Elbewassers aus dem Gerinne (5) wurde es wieder dem Rohwasserbehälter des Wasserwerkes zugeführt. Die Messung der Fließgeschwindigkeit erfolgte am Auslauf über eine Volumenmessung. Am Gerinneboden befanden sich sechs Anschlüsse für Säulen, von denen vier für die Versuche genutzt wurden. Die Säulen (S1 bis S4) bestanden aus Keramik und hatten eine Länge von 0.42 m sowie einen Innendurchmesser von 0.09 m. Eine Druckmessung war in vier verschiedenen Säulentiefen über Piezometer (2) möglich. Die gleichmäßige Verteilung des Elbewassers auf die Säulen wurde durch eine direkte Verbindung der Säulen mit dem Gerinne gewährleistet. Vor Versuchsbeginn wurden die Säulen von unten nach oben wassergesättigt. Die Probenahme fand am Säulenablauf (4) statt. Der Säulenboden war mit Sieben ausgestattet, um einen Austrag von Säulenmaterial zu verhindern. Die Filtergeschwindigkeit der Säulen wurde über Schlauchklemmen am Ablauf der Säulen geregelt.

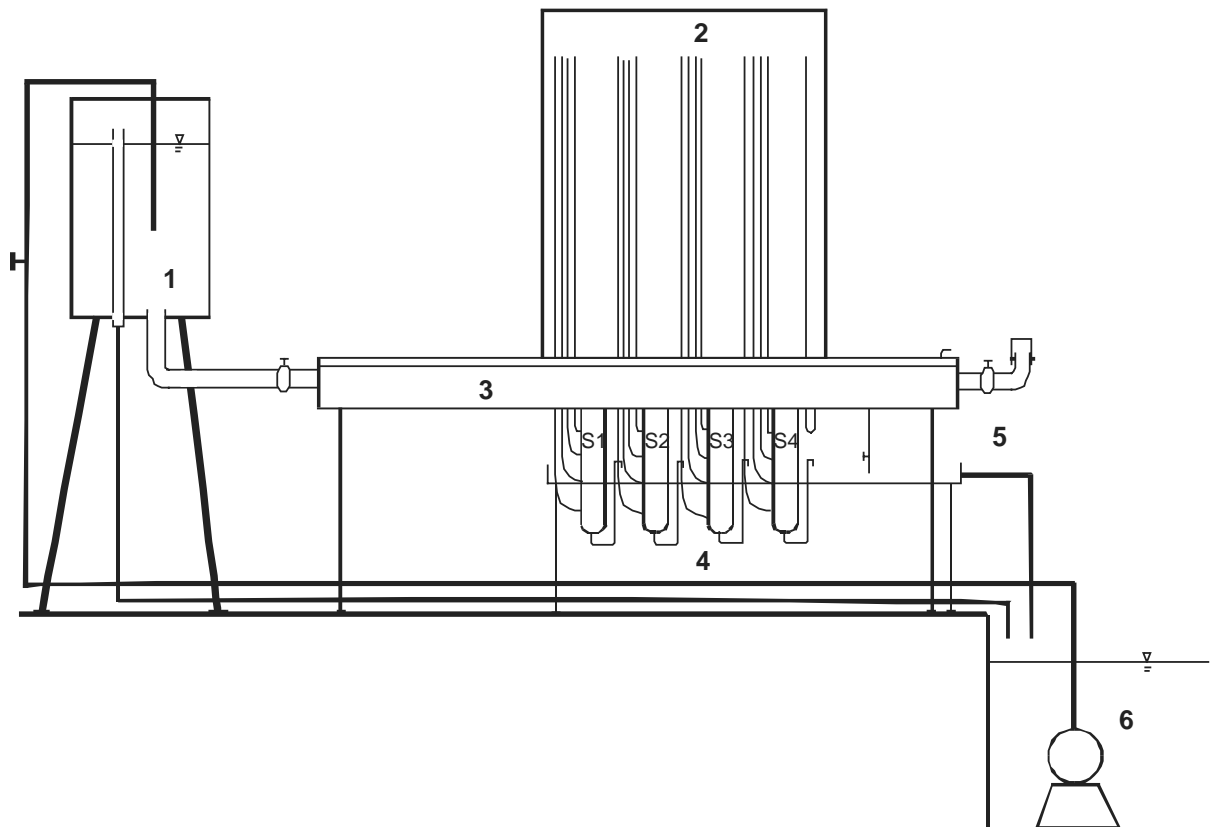


Abb. 1. Schematischer Aufbau des Kolmationsgerinnes einschließlich der Sedimentsäulen (S1 bis S4). Legende: 1 – Vorratsbehälter, 2 – Piezometerwand, 3 – Gerinne, 4 – Auffangrinne für Säulenablauf, 5 – Gerinneauslauf, 6 – Unterwassermotorpumpe

Als Säulenmaterial wurden Elbsedimente verwendet, deren Entnahme und Einbau in die Säulen von Hensel (1993) beschrieben ist. In der Säule S1 befand sich Material, das von einem Bühnenfeld in Torgau entnommen wurde, die Sedimente in S2 und S3 entstammten den Meßprofilen Torgau bzw. Meißen, während das Material in S4 am Stromkilometer 150 der Elbe in Torgau entnommen wurde. Die Sedimente hatten einen relativ hohen Kiesanteil, mit Ausnahme von S1, deren Sediment eine feinere Körnung aufwies. Dementsprechend waren die spezifischen Oberflächen der Sedimente gering, mit Ausnahme der jeweils obersten Schichten, da dort auch der Anteil an Feinkorn höher war. Weitere Ergebnisse von bodenspezifischen Analysen des Säulenmaterials vor Versuchsbeginn und nach Versuchsende, wie z.B. die Kationenaustauschkapazität sowie die Kohlenstoff- und Stickstoffbilanz, finden sich in Kumke (1994).

Versuchsdurchführung und Auswertung

Es wurden Säulenversuche unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Nach Inbetriebnahme des Gerinnes erfolgte eine regelmäßige Beprobung über einen Zeitraum von ca. 3000 h. Für alle Versuche wurden Wasserproben der vier Säulen sowie der Elbe mit einem Volumen von 300 ml entnommen. Um die Abhängigkeit des biochemischen Abbaus von der Filtergeschwindigkeit v_f zu untersuchen, wurden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten durchgeführt. Eine Variabilität in v_f konnte durch eine Druckerhöhung im Gerinne bei konstantem Durchfluß erreicht werden. Um den Einfluß der Dynamik der Kolmationsentwicklung auf den Abbau zu untersuchen, wurde die Fließgeschwindigkeit v_w im Gerinne variiert. Dazu wurde der Gerinnewasserdurchfluß Q entweder erhöht oder verringert, je nach gewünschter Fließsituation. Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen für einen Mittelwasserfall bei $v_w=0.22 \text{ ms}^{-1}$ über 1464 h Dauer, eine Versuchsreihe für einen Niedrigwasserfall bei $v_w=0.06 \text{ ms}^{-1}$ über 432 h Dauer und eine Versuchsreihe für einen Hochwasserfall bei $v_w=0.43 \text{ ms}^{-1}$ über 312 h Dauer durchgeführt. Von allen Wasserproben wurden die Temperatur, die elektrische Leitfähigkeit, der gelöste Sauerstoff, der pH-Wert, der gelöste organische Kohlenstoff (DOC), der spektrale Absorptionskoeffizient (SAK) als Summenparameter für aromatische Verbindungen, die Konzentrationen an Fe und Mn sowie die Anionen NO_3 , Cl, SO_4 und die Kationen Na, K, Ca, Mg und NH_4 bestimmt. Kumke (1994) gibt eine ausführliche Dokumentation der verwendeten Analysemethoden.

Um das Transportverhalten von Herbiziden zu charakterisieren, wurde ein Verlagerungsversuch mit den Triazinen Atrazin und Desethylatrazin sowie mit den Harnstoffen Fenuron und Isoproturon durchgeführt. Alle genannten Stoffe wurden in der Vergangenheit als Herbizide eingesetzt, so dass erhöhte Konzentrationen in der Elbe nach entsprechender Behandlung der Ackerflächen im Einzugsgebiet als denkbar angesehen werden konnten. Für den Versuch wurden die Schieber am Gerinneinlauf und -auslauf geschlossen und eine Lösung mit den Substanzen dem Gerinne über eine Boyle-Mariottesche Flasche in einer Konzentration von jeweils $33 \mu\text{g l}^{-1}$ zugeführt. Die Flasche diente gleichzeitig zur Sicherung eines konstanten Druckes im Gerinne. Als konservativer, idealer Tracer (d.h. der Tracer wird nicht zurückgehalten) wurde NaCl in einer Konzentration von 1 g l^{-1} benutzt. Nach Durchströmen von etwa dem Anderthalbfachen des Porenvolumens ist das Gerinne geleert und in Normalbetrieb genommen worden. Der Versuch wurde bei einer Temperatur von $5 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Analyse der Proben erfolgte mittels Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC).

Zur Ermittlung der Transportcharakteristika wurde die Konvektions-Dispersions-Gleichung (KDG) für den eindimensionalen Strömungsfall benutzt und analytisch gelöst (z.B. van Genuchten, 1981, Kumke, 1999). Die daraus abgeleiteten Transportparameter sind die Porenwassergeschwindigkeit v_a und der Dispersionskoeffizient D bzw. die Dispersivität λ (siehe Kumke, 1999). Mit Hilfe der Filtergeschwindigkeit v_f , der Fläche der Säule A_s und der Zeit bei einem Tracerdurchgang von 50 % t_{50} wurde aus dem Verlagerungsversuch auch das durchströmte Porenvolumen V_p und damit die effektive Porosität n_e geschätzt. Weiterhin

wurde aus der Länge der Säule, v_a und D die Pecletzahl Pe nach Gupta & Greenkorn (1974) ermittelt, die der Einschätzung der maßgeblichen Dispersionsprozesse dient.

Versuchsergebnisse und Diskussion

Die Porenvolumina der vier Säulen wurden während des gesamten Versuchszeitraumes zwischen 530 und 800 mal durchströmt. In Abb. 2 ist, stellvertretend für alle untersuchten Größen, die Ganglinie des DOC für alle Säulen und im Gerinne dargestellt. Die vergleichsweise hohen DOC-Konzentrationen in den Säulen zu Versuchsbeginn sind auf den Einfluß von stagnierendem Porenwasser zurückzuführen, da das Gerinne über einen längeren Zeitraum außer Betrieb war. Eine Konzentrationsabnahme des DOC stellt sich nach etwa 48 h ein, wobei relativ konstante Konzentrationen unterhalb des Niveaus der DOC-Konzentrationen des Gerinnes nach etwa 350 h Betrieb erreicht wurden. Die erhöhte Variabilität und Konzentrationsanstiege zwischen 1000 h und 1500 h Versuchsdauer ergaben sich aus den zu dieser Zeit veränderten Versuchsbedingungen. Die mittlere Konzentrationsabnahme des DOC lag in den Säulen zwischen 12.2 % (S4) und 17.0 % (S1), bezogen auf die Gerinnekonzentration. Die Variabilität der DOC-Konzentrationen aller vier Säulen im Laufe der Zeit kovariert dabei mit den Schwankungen des DOC im Gerinne. Eine zeitliche Verzögerung des biochemischen Abbaus in Abhängigkeit der DOC-Variabilität im Gerinne ist aus der Ganglinie nicht ableitbar. Aus der Ganglinie für NH_4 (siehe Kumke, 1994) ist ebenfalls eine Kovarianz zwischen Säulen- und Gerinnekonzentration abzuleiten, wobei hier allerdings eine Erhöhung von NH_4 im Gerinne sich zeitlich verzögert in den Säulen reflektierte. Die Ganglinien für den SAK und die NO_3 -Konzentrationen (hier nicht dargestellt) verhalten sich unabhängig von der Variabilität der jeweiligen Gerinnekonzentration.

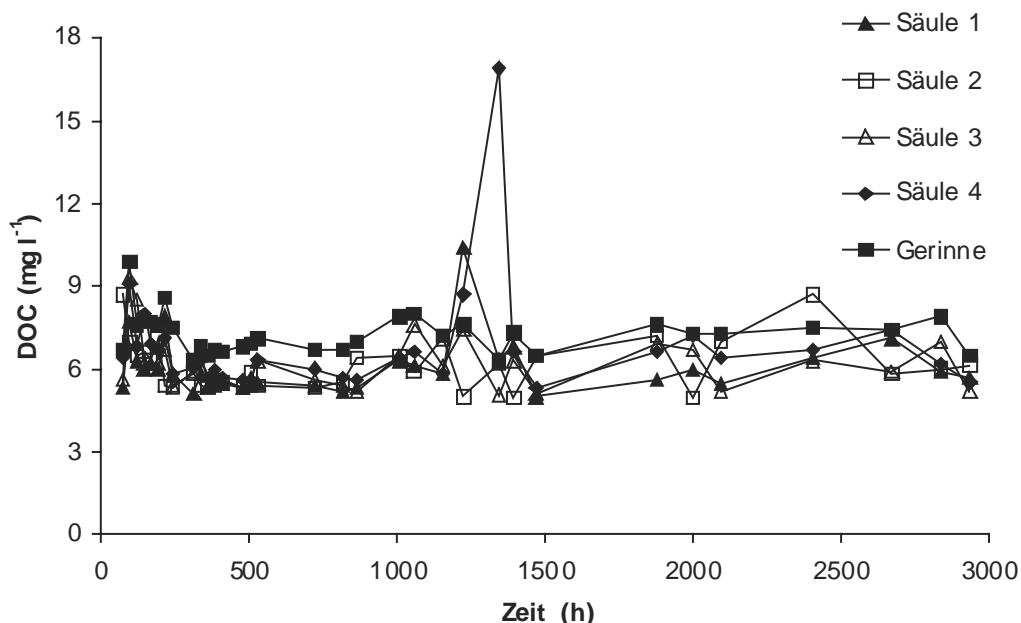


Abb. 2. DOC-Konzentrationen an den Säulenabläufen und am Gerinneablauf während des Versuchszeitraumes

Abhängigkeit der Stoffwandlung von der Versickerungs- und Fließgeschwindigkeit

Im Gerinneversuch zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der Veränderung der Stoffkonzentrationen C in den Säulen, bezogen auf die Gerinnekonzentrationen C_0 , und der Filtergeschwindigkeit v_f zeigte sich ein signifikanter linearer Zusammenhang zwischen DOC-Reduzierung (d.h. C/C_0) und v_f bzw. SAK-Reduzierung und v_f für alle vier Säulen. Repräsentativ ist dieser Zusammenhang für S2 dargestellt (Abb. 3). Die linearen Korrelationskoeffizienten betragen für den Zusammenhang zwischen DOC und v_f $r=-0.71$ (bei $P \leq 0.05$) und $r=-0.51$ (bei $P \leq 0.05$) zwischen SAK und v_f . Die Freiheitsgrade wurden

jeweils um zeitliche Autokorrelation korrigiert (Legendre & Legendre, 1998). Die Korrelationen lassen den Schluß zu, dass die Aufenthaltszeit in den Säulen ein Faktor für den biochemischen Abbau sowohl der gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen als auch für die aromatischen Verbindungen (d.h. SAK) ist. Eine erhöhte Kontaktzeit des Uferfiltrats mit dem porösem Medium trägt offensichtlich zur Erhöhung des mikrobiellen Abbaus bei. Für alle anderen untersuchten Meßgrößen wurden hingegen keine signifikanten Zusammenhänge gefunden.

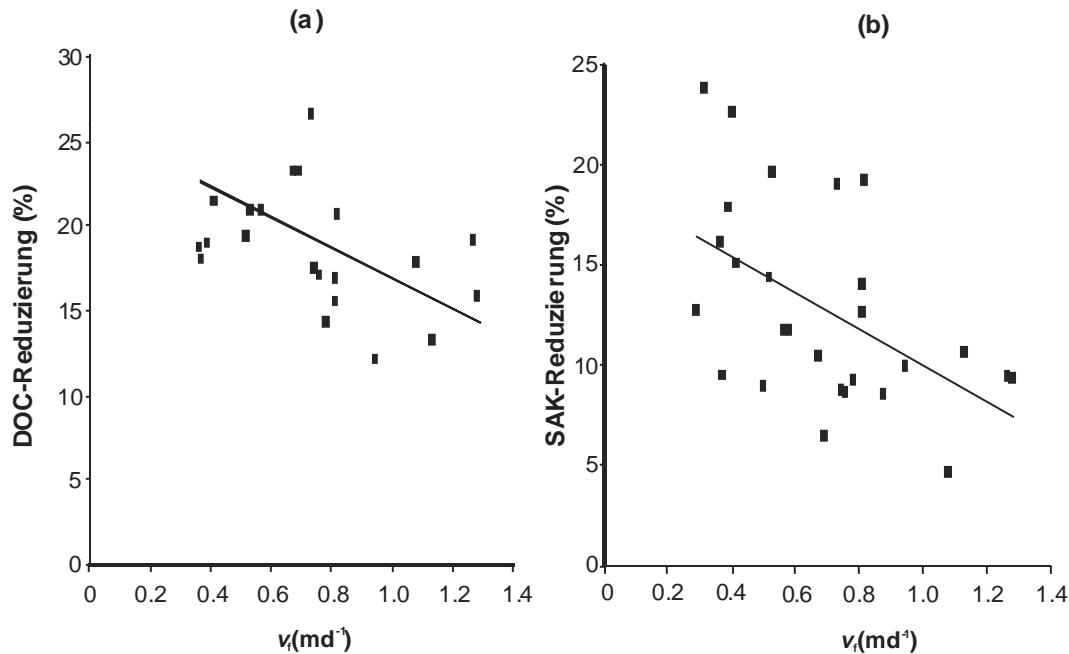


Abb. 3. Abhängigkeit des Abbaus von DOC (a) und SAK (b) von der Filtergeschwindigkeit v_f am Beispiel der Säule 2

Die Dynamik der Kolmationsentwicklung und deren Einfluß auf die biochemische Stoffwandlung ist am Beispiel des DOC-Abbaus in S2 dargestellt (Abb. 4). Hier zeigt die Ganglinie der DOC-Reduzierung am Säulenablauf für die Fließfälle Niedrigwasser und Hochwasser deutliche Unterschiede bezüglich der Variabilität des Abbaus. Während die DOC-Reduzierung während der gesamten Niedrigwasserperiode relativ konstant zwischen 19 % und 22 % blieb, hatte die Erhöhung des Durchflusses nach ca. 1200 h eine Erhöhung der Variabilität der DOC-Reduzierung sowie eine Verringerung des Abbaus zur Folge. Dieselben Phänomene wurden auch in allen anderen Säulen beobachtet. Im Vergleich zu den Fließsituationen Mittel- und Niedrigwasser führte die Erhöhung des Gerinnetdurchflusses auf ca. 0.45 ms⁻¹ zur Geschiebebewegung von Partikeln <0.4 mm (Endepols, 1992) und damit zum teilweisen Ausspülen der Kolmationsschicht. Damit ist auch ein Verlust an Biomasse in den obersten Schichten der Sedimente verbunden. Dieser Abtrag der Kolmationsschicht führte im Experiment auch zur Erhöhung der NH₄-Konzentration sowie zur Verringerung der NO₃-Konzentration an den Säulenabläufen. Das könnte auf einen Verlust an Nitrifikanten hinweisen, die sich vor allem in der obersten Sedimentschicht befanden und aus der Kolmationszone herausgespült wurden. Nach Beendigung des Fließfalls Hochwasser stellte sich ein Gleichgewicht der betroffenen Meßgrößen allmählich wieder ein.

Beim Vergleich der Fließfälle Mittelwasser und Niedrigwasser wurde für den DOC und den SAK eine Erhöhung des Abbaus bei Niedrigwasser festgestellt. Diese war in S4 jeweils am stärksten ausgeprägt. Eine signifikante Erhöhung des DOC- oder SAK-Abbaus bei Niedrigwasser konnte jedoch aus dem Experiment mit Hilfe des U-Testes nach Wilcoxon, Mann und Whitney (z.B. Sokal & Rohlf, 1995) nicht abgeleitet werden.

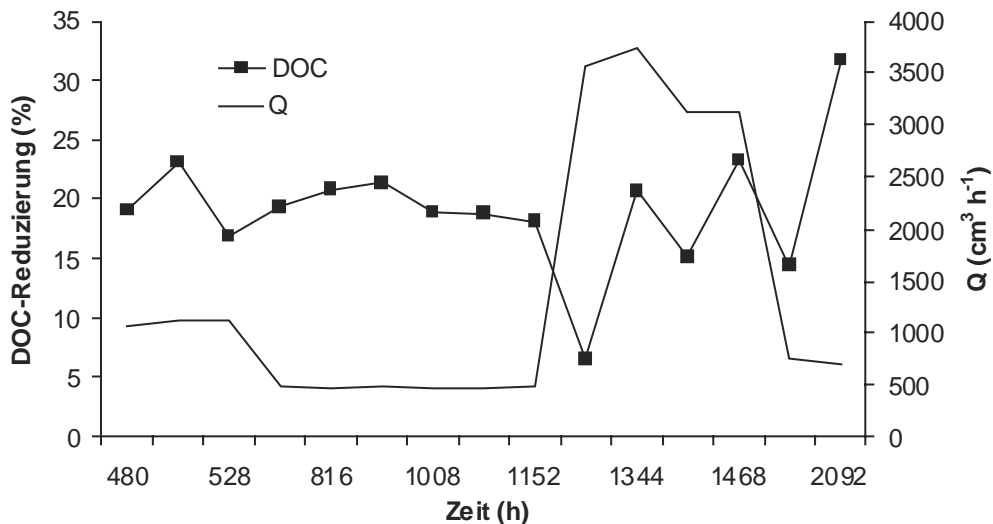


Abb. 4. Abbau des DOC in der Säule 2 bezogen auf die Gerinnkonzentration und dem Gerinnekonzentrationsfluss (Q) während des Versuchszeitraumes

Charakterisierung des Abbaus ausgewählter Schadstoffe in der Kolmationszone

In Abb. 5 sind die normierten Konzentrationsverläufe C/C_0 der vier für den Verlagerungsversuch verwendeten Herbizide zusammen mit dem konservativem Tracer NaCl als Funktion der durchströmten Porenvolumina dargestellt. Der Konzentrationsanstieg von Fenuron und Desethylatrazin beginnt etwa zeitgleich mit dem konservativen Tracer in S4 (Abb. 5b) und vollzieht sich über die Dauer von etwa $1.5 V/V_p$ (d.h. das Anderthalbfache des durchströmten Porenvolumens) bis zum Maximum. Die Konzentrationsmaxima erstrecken sich über eine nur kurze Periode. Die Konzentrationen von Atrazin und Isoproturon steigen erst nach ca. $0.7 V/V_p$. Beide erreichen ihr Maximum etwa zur selben Zeit wie Fenuron und Desethylatrazin, es liegt bei nur etwa 50 % der Ausgangskonzentration. Die Verlagerungsspeaks aller vier Herbizide sind verzögert relativ zu dem des Tracers NaCl. In S3 treten die Verlagerungsspeaks von Fenuron und Desethylatrazin zeitgleich mit dem von NaCl auf, jedoch bei weniger als 60 % ihrer Ausgangskonzentration (Abb. 5a).

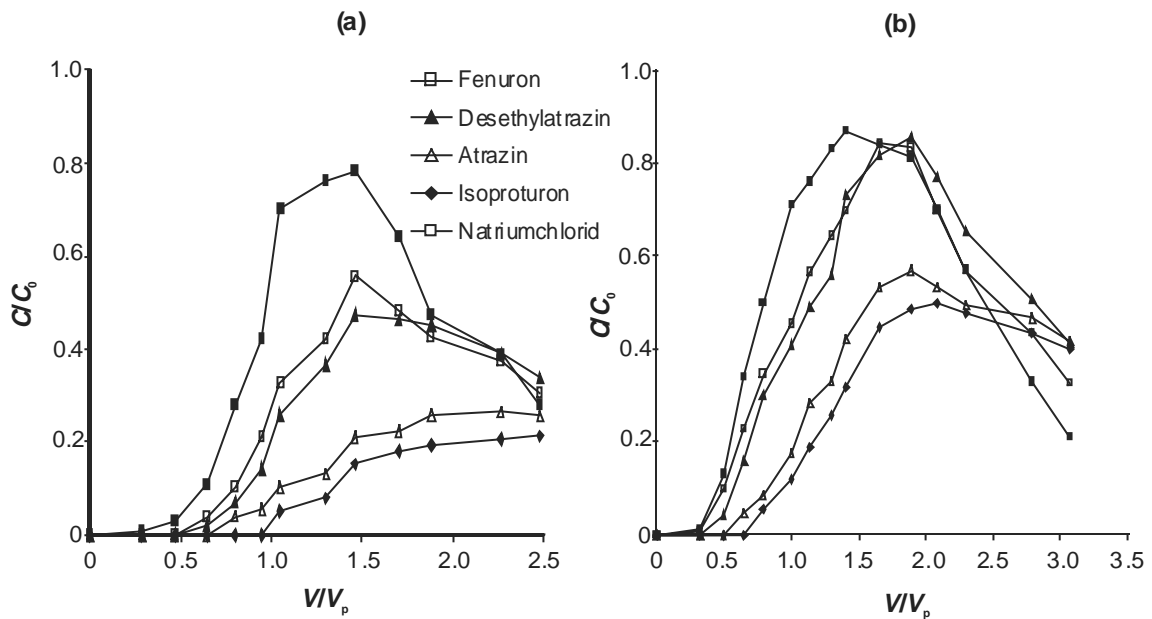


Abb. 5. Normierte Konzentrationen von Fenuron, Atrazin, Desethylatrazin, Isoproturon und Natriumchlorid in Abhängigkeit vom durchströmten Porenvolumen in Säule 3 (a) und Säule 4 (b)

Atrazin und Isoproturon erreichten während des gesamten Versuchszeitraumes kein Konzentrationsmaximum, wahrscheinlich aufgrund der relativ kurzen Verweilzeiten der Versuchslösungen im Gerinne. Diese betragen bei S4 ca. $1.5V/V_p$ und bei S3 nur $1.0V/V_p$ und führten, eine Retardation der Stoffe vorausgesetzt, zu Verdünnungseffekten. Eine Charakterisierung der Retardation der Herbizide läßt sich aus dem Säulenversuch deshalb kaum vornehmen. Weitergehende Untersuchungen, wie z.B. die Bestimmung der jeweiligen Adsorption/Desorptionsisotherme, waren im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Tab. 1. Experimentell bestimmte Transport- und Säulenparameter für S3 und S4.

Säule	n_e	v_a (md ⁻¹)	D (m ² d ⁻¹)	Pe
S3	0.28	3.60	0.22	6.8
S4	0.25	3.60	0.09	16.7

Aus der Verlagerungskurve des NaCl wurden die in Tab. 1 aufgeführten Transport- und Säulenparameter abgeleitet. Die mit der KDG geschätzten Porenwassergeschwindigkeiten v_a waren in beiden Säulen gleich. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Säulen ergab sich im Dispersionskoeffizienten D , der in S3 zweieinhalbmal so groß war wie in S4. Die ermittelten Unterschiede in der Peclet-Zahl Pe sind hingegen von nur untergeordneter Bedeutung, da beide in einem Wertebereich liegen, in denen die hydrodynamische Dispersion gegenüber der molekularen Diffusion überwiegt (z.B. Rinnert, 1983), d.h. eine Vermischung durch molekulare Diffusion während des Verlagerungsversuches kann man ausschließen.

Schlußfolgerungen

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zur Untersuchung des biochemischen Abbaus in der Kolmationszone der Elbe konnten belegen, dass man mit dem verwendeten Kolmationsgerinne Steuerprozesse des Abbaus relativ naturnah zu simulieren kann. Die Langzeituntersuchungen mit dem Gerinne zeigten, dass nach einer Inbetriebnahme des Gerinnes sich eine Kolmationszone in den Säulen entwickelt und u.a. gelöste organische Kohlenstoffverbindungen und aromatische Verbindungen bis zu 20 % abgebaut werden. Mit gestalteten Experimenten zur Untersuchung der Filtergeschwindigkeit der Säulen sowie der Fließgeschwindigkeit im Gerinne wurde nachgewiesen, dass der Abbau bei kleinerer Filtergeschwindigkeit höher ist und sehr sensitiv auf die Fließdynamik im Gerinne reagiert. Bei relativ hohen Fließgeschwindigkeiten im Gerinne wurde der Abbau des DOC geringer. Gleichzeitig kam es zu einem Wiederanstieg von NH_4 , was auf ein Ausspülen der obersten Kolmationsschicht hinweist. Die durchgeführten Verlagerungsversuche mit Herbizide zeigten einen verzögerten Transport der Verbindungen in zumindest einer der untersuchten Säulen, die Ergebnisse des Versuches waren jedoch sehr stark von der Aufenthaltszeit der Versuchslösung im Gerinne geprägt.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die Versuchsanlage gut geeignet ist, um Prozessabläufe während der Uferfiltration im Labormaßstab nachzustellen, d.h. es ist auch möglich, Prozessszenarien zu simulieren und Einschätzungen zum biochemischen Abbau während der Uferfiltration zu liefern.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Wolfgang Nestler als betreuenden Hochschullehrer der damaligen Diplomarbeit für die Überlassung des Themas, Thomas Grischek für die tägliche Betreuung und hilfreichen Diskussionen sowie Dr. Peter Neitzel für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Verlagerungsversuche. Weiterhin danke ich Dr. Lutz Schirrmeister sowie Dr. Wolf-Dieter Hermichen für die kritische Begutachtung des Manuskriptes.

Literatur

- Endepols, T. (1992) Untersuchungen zur Kolmationszone der Elbe im Bereich von Uferfiltratswerken. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden.
- Grabs, W. (1981) Beitrag zur Beschreibung von Kolmationserscheinungen in einem organisch belasteten Kleingewässer. Beiträge zur Hydrologie 2, 293-311.
- Gupta, S., Greenkorn, R. (1974) Determination of dispersion and nonlinear adsorption parameters for flow in porous media. Water Resources Research 10 (4), 839 – 846.
- Hensel, M. (1993) Untersuchungen zur Kolmationszone der Elbe im Bereich von Uferfiltratswerken. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden.
- Kumke, T. (1994) Säulenversuche zur Simulation der Uferfiltratspassage. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden.
- Kumke, T. (1999) Ionenverlagerung in landwirtschaftlich genutzten Böden eines Wassereinzugsgebietes im Uelzener Becken – Räumliche Variabilität der Transport- und Austauschparameter. Wissenschaft & Technik Verlag, Berlin.
- Legendre, P., Legendre, L. (1998) Numerical Ecology, 2nd edition. Elsevier, Amsterdam.
- Nestler, W., Neitzel, P., Grischek, T., Dehnert, J. (1995) Untersuchung der Beschaffenheitsdynamik bei der Uferfiltration der Elbe. Unveröffentlichter BMFT-Abschlußbericht zum Forschungsprojekt 02WT 9162/0.
- Rinnert, B. (1983) Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung. Dissertation an der Universität Karlsruhe.
- Sokal, R., Rohlf, F. (1995) Biometry, 3rd edition. Freeman & Company, New York.
- van Genuchten, M.T. (1981) Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero-order production and first-order decay. Journal of Hydrology 49, 213-233.
- Worch, E., Grischek, T., Börnick, H., Eppinger, P. (2002) Laboratory tests for simulating attenuation processes of aromatic amines in riverbank filtration. Journal of Hydrology 266, 259-268.