

ENTFERNUNG VON SULFAMETHOXAZOL IN DER BODENPASSAGE

ABSTRACT ZUR DISSERTATION VON BENNO BAUMGARTEN

Der sulfonamidische Wirkstoff Sulfamethoxazol (SMX) ist das einzige Antibiotikum, welches neben dem Auftreten in Kläranlagenablauf und Oberflächenwasser auch in Grund- und Trinkwasserproben gefunden wird. Als Vertreter der Spurenstoffe, die insbesondere dann Anlass zur Sorge geben, wenn Wasserkreisläufe teilweise geschlossen sind, ist SMX aufgrund der unbekanntenen Summen- und chronischen Wirkungen sowie dem Vermeidungsgebot anthropogener Stoffe im Wasserkreislauf unerwünscht. SMX zeichnet sich durch ein sehr komplexes Verhalten im System Wasser / Sediment aus, dessen Beschreibung und eindeutige Einordnung in der Vergangenheit Schwierigkeiten bereitete. Die redox-sensitive Entfernung von SMX in der Bodenpassage wurde in einem System von Laborsäulen über 56 Monate unter variierenden Bedingungen untersucht.

Die durchgeführte Langzeitstudie liefert neue Erkenntnisse zu Verhalten und Verbleib von SMX und das differenzierte Verhalten konnte in Laboruntersuchungen dem Einfluss einzelner Parameter unter definierten Bedingungen zugeordnet werden. Widersprüchliche Aussagen vorangegangener Feld- und Laborstudien konnten auf die im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Schlüsselparameter Startkonzentration, Redoxpotenzial und Adaptionszeit zurückgeführt und damit erklärt werden. Weiterhin wurde gezeigt, wie weitgehend SMX unter welchen Bedingungen in der Bodenpassage zur Trinkwasseraufbereitung entfernt werden kann. In diesem Zusammenhang wurden Voraussetzungen für die Simulation der Bodenpassage im Laborsystem benannt, die weitgehend übertragbare Ergebnisse ermöglichen. Zusätzlich erfolgte der Vergleich mit Batch-Abbautests, für die eine neue Vorgehensweise entwickelt wurde.

Entfernbarkeit von Sulfamethoxazol und Schlüsselparameter

Im Rahmen der Langzeitstudie konnte Sulfamethoxazol sowohl unter aeroben als auch unter anoxischen und anaeroben Bedingungen entfernt werden. Die Entfernung erfolgt unter Laborbedingungen in Säulen zur Simulation der Bodenpassage unter aeroben Bedingungen effektiver als unter anoxischen.

Damit kann eine häufig angegebene hohe Persistenz von SMX [1-4] nicht bestätigt werden. SMX ist folglich als Indikator für Abwassereinfluss aufgrund der im Rahmen dieser Dissertation sowie in anderen Untersuchungen nachgewiesenen Entfernbarkeit nicht geeignet, da es zu falsch negativen Ergebnissen kommen könnte. So sollte der Begriff Persistenz nicht für Stoffe verwendet werden, deren Abbau nur unter bestimmten Umständen nicht stattfindet oder verzögert auftritt. Zudem ist geringe Persistenz und somit Abbaubarkeit eines Stoffes auch keine Garantie für seine Abwesenheit im Trinkwasser [5].

Zur Entfernung von SMX wurde weiterhin gezeigt, dass sie unterschiedlichen Mustern folgt, wenn statt der üblicherweise im Feld auftretenden Konzentrationen (deutlich unter 1 µg/L) solche in der Höhe mehrerer µg/L eingesetzt werden. Aerob wurde bei derart erhöhter Konzentration über 2 m Fließstrecke innerhalb von 14 Tagen eine konstante Entfernung von mehr als 95 % erreicht, während anaerob 82 % und anoxisch nur maximal 54 % des Wirkstoffs entfernt werden konnten. Durch eine Verlängerung der anaeroben Passage auf 4 m bzw. 28 Tage und entsprechend weiter absinkendes Redoxpotenzial konnte ebenfalls eine Verringerung der SMX-Konzentration um maximal 95 % erreicht werden.

Dagegen wurde bei der charakteristischen Hintergrundkonzentration des Oberflächenwassers aus dem Tegeler See, dessen Wasser über Grundwasseranreicherung zur Trinkwasserversorgung des Ballungsraumes Berlin genutzt wird, unter aeroben Bedingungen über 2 m eine etwas geringere konstante Entfernung von 72 % erzielt, die über 4 m auf 85 % anstieg. Im Übergangsbereich anoxisch-anaerob, der sich bei anoxischer Beschickung mit der Hintergrundkonzentration von SMX über 6 m einstellte, konnte SMX mit 76 % in einem ähnlichen Maße entfernt werden. Über 2 m blieb bei anoxischer Beschickung eine Entfernung über 37 Monate vollständig aus.

Die gemessenen Entfernungsleistungen bei Hintergrundkonzentration erreichen damit vergleichbare Werte, wie sie in vorangegangenen Feldstudien für entsprechende Redoxbereiche dokumentiert wurden. Auch die davon abweichenden Entfernungsleistungen, die bei erhöhter Konzentration beobachtet wurden, entsprechen für aerobe und anoxische (denitrifizierende) Bedingungen den in der Literatur angegebenen Werten. Damit können folglich die unterschiedlichen Angaben bisheriger Studien zur Entfernbarkeit auf die Parameter Redoxpotenzial und Startkonzentration zurückgeführt werden.

Die bessere Entfernbarkeit im Anaeroben als unter anoxischen Bedingungen macht die Wichtigkeit der Unterscheidung zwischen verschiedenen reduzierten Bedingungen deutlich. Auch eine Verlängerung der Passage hat dabei durch das Sinken des Redoxpotenzials in tiefere Bereiche einen bedeutenden Einfluss auf die redox-sensitive Sulfamethoxazol-Entfernung.

Mithilfe der kinetischen Betrachtung der Zeit und Höhen aufgelösten Daten zur SMX-Entfernung in Laborsäulen konnten Verschwindenzeiten für 50 % des Analyten bestimmt werden. Diese lagen unter aeroben Bedingungen sowohl bei niedriger als auch bei hoher Startkonzentration zwischen 0,5 und 6 Tagen, anaerob bzw. anoxisch stiegen sie auf 13 bzw. bis zu 91 Tage an. Während die Entfernung von SMX in der Regel einer Kinetik erster Ordnung folgte, war eine Modellierung der Daten unter aeroben Bedingungen mit erhöhter Startkonzentration nur mit einem Ansatz zweiter Ordnung möglich, was als Hinweis auf sich unterscheidende Entfernungsmechanismen verstanden werden kann.

Zusammenfassend ist eine bevorzugte Entfernung im Aeroben festzustellen, während die Transformation von SMX im Anoxischen deutlich weniger effektiv verläuft. Weiter ins Anaerobe sinkendes Redoxpotenzial geht aber einher mit ansteigender SMX-Entfernung, die das gleiche Niveau wie unter aeroben Bedingungen erreichen kann. Eine erhöhte Konzentration von SMX führt dabei zu einer weitergehenden Entfernung.

Aufgrund der Bedeutung des Redoxpotenzials für die Spurenstoffentfernung ist die Angabe einzelner Redoxmilieus für bestimmte Brunnen oder Probenahmestellen an Feldstandorten der Bodenpassage zu überprüfen. Vor dem Hintergrund des sich entwickelnden Redoxpotenzials, unterschiedlich stark ausgeprägter Übergangsbereiche, vorhandener Mikromilieus mit unterschiedlichen Verweilzeiten, starker vertikaler Schichtungen und aufgrund mannigfaltiger Umwelteinflüsse ist sie zumindest komplexer als die Darstellung in zahlreichen Veröffentlichungen vermittelt.

Bei der Entfernung von SMX wurden Restkonzentrationen von < 50 ng/L erreicht. Dies gilt auch für Startkonzentrationen < 250 ng/L. Daher liegt eine in der Literatur vielfach diskutierte verbleibende Schwellenwertkonzentration für die Transformation von SMX in der Bodenpassage, sofern sie existiert, unterhalb von 50 ng/L. Bei Erreichen einer solchen Restkonzentration ist die Frage nach einem Schwellenwert unter Umständen nicht mehr so drängend, da es sich um einen verhältnismäßig niedrigen Wert handelt, auf den SMX sowohl unter aeroben als auch unter

anaeroben Bedingungen entfernt werden kann. Davon unbeeinflusst bleibt natürlich die Frage nach möglichen problematischen Transformationsprodukten.

Der Vergleich der Sulfamethoxazol-Entfernung mit jener des gelösten organischen Kohlenstoffs sowie die Betrachtung der festgestellten spezifischen Adaptionszeiten lieferten den Beleg für eine mikrobiologische Transformation des SMX, die mithilfe spezifischer Enzyme durch spezifisch angepasste Mikroorganismen erfolgt. Aufgrund der gezeigten Daten kann ein cometabolischer Abbau für Sulfamethoxazol ausgeschlossen werden. Dies konnte zusätzlich zu Experimenten im Langzeit-Säulensystem mit speziell entwickelten Sediment-Wasser-Tests belegt werden, in denen eine Aufdotierung mit natürlichem organischen Material nicht zu einer parallelen Steigerung der SMX-Entfernung führte.

Unter den SMX transformierenden Mikroorganismen gibt es einen verhältnismäßig hohen Anteil fakultativ anaerober Spezies, was durch ein schnelleres Ansteigen der SMX- als der DOC-Entfernung bei Umstellung der Redoxbedingungen von aerob auf anoxisch in Sediment-Wasser-Tests gezeigt wurde. Hier konnte auch nachgewiesen werden, dass eine höhere Startkonzentration des SMX das Wachstum der Spezialisten fördert und zu einer schneller ansteigenden Entfernrungsrate führt.

Bedeutung von Langzeitstudien für die Untersuchung der Spurenstoffentfernung

Auch für die mikrobielle Adaption konnte ein entscheidender Einfluss auf das schließlich zu beobachtende Verhalten von SMX in der Bodenpassage gezeigt werden. Bei SMX-Konzentrationen um 250 ng/L, wie sie in Oberflächenwasser gefunden werden, war unter aeroben Bedingungen eine Zeitspanne von 9 Monaten zur mikrobiellen Adaption erforderlich, bevor eine SMX-Entfernung einsetzte. Die Entfernrungsleistung stieg über weitere 15 Monate kontinuierlich an und führte bei einer Fließzeit von 14 Tagen schließlich zu verbleibenden Konzentrationen von ca. 60 ng/L. Bei Vorliegen anoxischer Bedingungen war über 37 Monate bei einer Verweilzeit von 14 Tagen keine SMX-Entfernung zu beobachten. Erst eine Verlängerung der Säulenpassage und damit der Verweilzeit auf 28 Tage führte zu einer über weitere 24 Monate ansteigenden Entfernung, die ebenfalls auf das Wachstum an die entstehenden Bedingungen angepasster Mikroorganismen zurückzuführen ist.

Die Adaptionszeiten bis zum Einsetzen der Entfernung verringern sich, parallel zum Ansteigen der Effektivität, mit erhöhter Konzentration. Bei einer auf 4 µg/L heraufgesetzten SMX-Konzentration erfolgte die Adaption sowohl unter aeroben als auch unter anoxischen und anaeroben Bedingungen wesentlich schneller als bei Hintergrundkonzentration. Innerhalb von 3 bis 4 Monaten war eine Entfernung von SMX zu verzeichnen, die im Aeroben bereits in diesem Zeitraum das Maximum erreichte.

Die Verfügbarkeit einiger Milligramm BDOC je Liter unterstützt, wie entsprechende Experimente im Rahmen der Dissertation gezeigt haben, die mikrobielle Aktivität im Untergrund und fördert die SMX-Entfernung. Sie ist aber nicht erforderlich, da auch eine Adaption der Mikroorganismen an geringere BDOC-Konzentrationen erfolgt.

Alle Ergebnisse zeigen, dass im Laborsystem gerade bei realen Konzentrationen eine auffallend lange Zeit für die Ansiedlung und Adaption der Mikroorganismen an die herrschenden Bedingungen erforderlich ist. Bis ein technisches System zur Simulation der Bodenpassage im Labormaßstab ein repräsentatives konstantes Niveau hinsichtlich der Entfernung von SMX erreicht hat, können demnach Monate bis Jahre vergehen. Damit sind Kurzzeitexperimente offensichtlich ungeeignet, natürliche Systeme und Prozesse zu repräsentieren und daraus resultierende Ergebnisse nicht übertragbar. Widersprüchliche Aussagen anderer Studien können damit in einigen Fällen auf zu kurze Laufzeiten der Experimente zurückgeführt werden [6-9]. Ohne Langzeitstudien sind kaum belastbare

Ergebnisse von praktischer Relevanz zur Entfernbarkeit von Spurenstoffen in mikrobiologischen Systemen unter realen Bedingungen zu gewinnen.

Zu kurze Versuchszeiträume führen damit, wie auch Moorman [10] beschreibt, möglicherweise zu falschen oder unvollständigen Ergebnissen. Beendet man ein Experiment zu früh (z.B. nach 9 Monaten), wäre eine übliche und oft gezogene Schlussfolgerung, dass die Entfernung von SMX aerob deutlich besser als unter reduzierenden Bedingungen verläuft und erst beim Überschreiten einer gewissen Schwellenwertkonzentration von mehreren hundert Nanogramm je Liter überhaupt stattfindet.

Abbautests im Batch können geeignet sein, die Trends aus Laborsäulen-Experimenten vorherzusagen und sind unter bestimmten Bedingungen einsetzbar zur Benennung einer prinzipiellen Abbaubarkeit oder zur Identifizierung von Transformationsprodukten, deren Relevanz anschließend auch im Feld oder in der Säule überprüft werden muss. Adaptionszeiten an einen neu auftretenden Spurenstoff können jedoch nur mithilfe von Säulenexperimenten in Langzeitstudien ermittelt werden.

Auslegung von Experimenten zur Spurenstoffentfernung

Bei der Durchführung von Säulenexperimenten zur Untersuchung der Spurenstoffentfernung ist nicht nur auf eine ausreichende Gesamtlaufzeit, die eine mikrobiellen Adaption erlaubt, zu achten, sondern auch die anderen oben genannten Schlüsselparameter sind ausschlaggebend für den Erfolg der Untersuchungen und belastbare wie repräsentative Ergebnisse.

Da die Ausgangskonzentration von SMX und die Redoxbedingungen die SMX-Entfernung stark beeinflussen, ist es essentiell, diese Bedingungen angemessen, d.h. realistisch für Feldstandorte oder zumindest klar definiert, auszuwählen und reproduzierbar einzustellen. Nur so können Ergebnisse von Laborstudien auf reale Standorte übertragen werden. Beispielsweise muss auch beim Einsatz von Bodenmaterial von Feldstandorten für Laboruntersuchungen auf die Einstellung der gleichen Redoxbedingungen wie am Herkunftsort geachtet werden, da sonst ebenfalls lange mikrobielle Adaptionsphasen erforderlich werden.

Bei der kinetischen Auswertung der Daten zur SMX-Entfernung stellte sich heraus, dass neben ausreichend langer Laufzeit des Experiments auch die Verweilzeit in der Säule selbst von größter Bedeutung für die erzielten Ergebnisse ist. Daher sind Fließgeschwindigkeit und Säulenlänge so auszuwählen, dass auch unter ungünstigen Bedingungen die Verweilzeit des Wassers in der Säule hinreichend lang ist, um die mikrobiologische Transformation von Spurenstoffen zu erlauben. Für SMX stellten sich anoxische Bedingungen als nachteilig für die Entfernung heraus. Durch eine Verlängerung der Passage und damit eine Erhöhung der Verweilzeit auf zunächst vier und schließlich sechs Wochen konnte jedoch auch bei anoxischer Beschickung der Säule mit der Hintergrundkonzentration von SMX eine hohe Entfernungsleistung erreicht werden, während bei einer kürzeren Verweilzeit von 14 Tagen keine Abnahme der SMX-Konzentration zu verzeichnen war. Insbesondere unter reduzierenden Bedingungen muss hier das mit Fließstrecke bzw. Verweilzeit weiter absinkende Redoxpotenzial berücksichtigt werden, das zu einer weitergehenden SMX-Entfernung führt. In Säulenexperimenten bzw. in der realen Bodenpassage ist damit eine Verweilzeit von mehreren Wochen bis zu Monaten zu ermöglichen, um die Transformation von SMX und entsprechender anderer schwer abbaubarer Stoffe zu gewährleisten. Auch dieser Gesichtspunkt ist beim kritischen Hinterfragen in der Vergangenheit durchgeführter Säulenexperimente zu berücksichtigen.

Sediment-Wasser-Tests sind prinzipiell geeignet die Entfernung von Spurenstoffen zu untersuchen, da sie ähnliche Tendenzen wie die Experimente in Laborsäulen zeigten. Nichtsdestotrotz ist eine

ausreichende Zeit für mikrobielles Wachstum und gegebenenfalls erforderliche Adaption einzuplanen. Die Verweilzeit des Wassers im Säulenexperiment kann zeitlich der Dauer eines Batch-Tests gleichgesetzt werden. Für den Vergleich mit Säulenexperimenten ist jedoch die Einbeziehung der Parameter Säulenlänge, Aufenthaltszeit und Testdauer bei der Auslegung sowie die exakte Berücksichtigung aller Randbedingungen bei der Auswertung erforderlich. Auch die korrekte Beachtung der oben benannten Schlüsselparameter ist Voraussetzung für die Aussagekraft der durchgeführten Tests. So ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Sediment-Wasser-Tests, die nach der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Vorgehensweise durchgeführt wurden, in weiteren Tests zu verifizieren. Auch andere Standardtests zur Bestimmung der Abbaubarkeit von Spurenstoffen bergen entsprechend große Fehlermöglichkeiten und sind daher, wie es auch andere Autoren schlussfolgern [11], unter umweltrelevanten Bedingungen zu überprüfen.

Schlussfolgerungen für die Trinkwasseraufbereitung

Die neuen Erkenntnisse über Verhalten und Verbleib von Sulfamethoxazol im Untergrund ist von großer Bedeutung für die Förderung von Trinkwasser nach Uferfiltration oder Grundwasseranreicherung sowie für die Auslegung von neuen Grundwasseranreicherungsstandorten.

Die Erkenntnisse können genutzt werden, um die Größe von Infiltrationseinrichtungen und / oder Brunnen auszulegen oder um die Fördermenge so festzulegen, dass ausreichende Aquifer-Verweilzeiten zur Entfernung des SMX gewährleistet und künftige Grenzwerte eingehalten werden [12]. Im Vergleich der örtlichen Gegebenheiten mit den Untersuchungsergebnissen für einzelne Parameter kann weiterhin bestimmt werden, ob weitere Vor- und/oder Nachbehandlungsschritte erforderlich sind oder ob die Nutzung der Bodenpassage anderweitig optimiert werden kann.

Aufgrund des gezeigten redox-sensitiven Verhaltens ist zu beachten, dass eine Bodenpassage, die bei anoxischer Infiltration über lange Zeiten im denitrifizierenden Bereich verbleibt und daher weder lange aerobe noch tief anaerobe Zonen bietet, besonders unvorteilhaft für die Entfernung von SMX ist. Unter aeroben und unter anaeroben Bedingungen hingegen ist die Bodenpassage geeignet, um eine Entfernung von SMX auf unter 60 ng/L zu erzielen. Dabei ist es essentiell, eine ausreichende Aufenthaltszeit von mehreren Wochen bis zu Monaten – in Abhängigkeit des vorherrschenden Redoxpotenzials – zu ermöglichen, damit die Transformation von SMX und wahrscheinlich anderer Spurenstoffe im angestrebten Maße erfolgen kann. So zeugt das Auftreten von SMX im Grundwasser nicht notwendigerweise von genereller Persistenz des Wirkstoffs, sondern spiegelt unzureichende Verweilzeiten oder unvorteilhafte Redoxbedingungen wider. Entsprechend sind Angaben von erforderlichen Verweilzeiten mit Blick auf die Spurenstoffentfernung zu überprüfen.

Weiterhin kann es beispielsweise sinnvoll sein, vor einer Bodenpassage, die ein schnell absinkendes Redoxpotenzial aufweist, das Wasser zu belüften, um aerob zu infiltrieren. So kann im Anschluss ein Wechsel der Redoxmilieus erreicht werden, der sich als vorteilhaft für die SMX-Entfernung herausstellte.

Für neue Uferfiltrations- bzw. Grundwasseranreicherungsstandorte muss, um das Potenzial zur Entfernung von SMX oder anderer schwer abbaubarer Spurenstoffe vollständig zu entwickeln, eine möglicherweise erforderliche Adaptionszeit in der Größenordnung von Jahren in Betracht gezogen werden. Dies geht aus der beobachteten Dauer von zwei Jahren hervor, die im Laborexperiment unter aeroben Bedingungen bei Hintergrundkonzentration und damit der im infiltrierenden Wasser vorliegenden Konzentration von SMX benötigt wurde, bis sich eine konstante und weitgehende Entfernung für SMX einstellte. Die erforderliche Zeit für die Adaption der Mikroorganismen muss

auch dann beachtet werden, wenn bei einer künstlichen Grundwasseranreicherung die oberste und damit mikrobiologisch aktivste Sandschicht abgetragen wird.

Auch die möglicherweise variierende Qualität des versickernden Oberflächenwassers kann eine erneute Adaption der Mikroorganismen an veränderte Bedingungen erforderlich machen und die Entfernung von Spurenstoffen wie SMX beeinflussen. Daher ist sie beim praktischen Betrieb zu berücksichtigen.

Ausblick

Die dargestellten Erkenntnisse sind nutzbar, um die Spurenstoffentfernung in Uferfiltration und Grundwasseranreicherung zu optimieren und um beispielsweise eine gesteuerte Bodenpassage (mit kontrollierten Redoxbedingungen und Fließzeiten) als Teil eines Multi-Barrieren-System zur Entfernung von Spurenstoffen auszulegen. Dies wird im Zuge neuer zu erwartender Trinkwasser-Grenzwerte [13] sowie ansteigender Konzentrationen im Wasserkreislauf [14-16], mit denen in den kommenden Jahrzehnten für zahlreiche Spurenstoffe zu rechnen ist, noch an Bedeutung gewinnen. Aufgrund des gezeigten bestimmenden Einflusses des Redoxmilieus für die Spurenstoffentfernung und der aufgezeigten problematischen Zuordnung definierter Redoxpotenziale an realen Standorten wird eine Überprüfung entsprechender Einstufungen in der bisherigen Literatur angeraten.

Für technischen Sand hat sich eine erhebliche mikrobiologische Adaptionszeit als erforderlich herausgestellt. Diese ist sowohl bei der Bestückung von Infiltrationsbecken im praktischen Betrieb der Wasseraufbereitung als auch bei künftigen Laboruntersuchungen zu berücksichtigen. Sie muss in Zukunft bei der Bewertung der Vergleichbarkeit mit Feldstandorten sowie bei der Einordnung in der Vergangenheit durchgeführter Kurzzeittests mit häufig weniger als drei Monaten Laufzeit berücksichtigt werden. Auch die anderen Schlüsselparameter Startkonzentration und Redoxpotenzial müssen entsprechend realer Standorte ausgewählt werden. Beim Vergleich realer Standorte mit Experimenten, in denen technischer Sand eingesetzt wurde, müssen die dort fehlenden festen Eisen- und Manganoxid bzw. -hydroxid-Phasen beachtet werden, die zu einer abweichenden Kinetik bei der Ausbildung anaerober Redoxbereiche führen können.

Um festzustellen, ob das verwendete Laborsäulensystem auch hinsichtlich mikrobiologischer Parameter vergleichbar mit Feldstandorten ist, wären weiterführende Experimente wünschenswert. So wäre die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft vergleichend zu untersuchen, wie dies Li et al. [17, 18] für reale Bodenmatrices durchgeführt haben. Dabei sollte der Fokus darauf liegen, ob sich unter definierten Laborbedingungen die gleiche mikrobielle Gemeinschaft ausbildet wie einerseits in Experimenten mit realen Bodenproben und andererseits an Feldstandorten.

Sind die Bedingungen, die zur Transformation von SMX erfüllt sein müssen, weitestgehend klar, stellt sich die Frage nach den entstehenden Transformationsprodukten. Hier ist die Relevanz im Labor gefundener Transformationsprodukte an realen Standorten sowie deren Toxizität zu untersuchen und zu überprüfen, inwieweit die Rücktransformierbarkeit einzelner Produkte zur Ausgangssubstanz von Bedeutung ist. Unter diesem Aspekt sind auch angegebene Entfernungsraten für Sulfamethoxazol zu überprüfen und die Bedeutung bestimmter Transformationsprodukte ist systematisch zu untersuchen. So finden beispielsweise Joss et al. [19] und Göbel et al. [20] mehr SMX im Ablauf als im Zulauf von Kläranlagen, was auf in die Kläranlage gelangendes Acetyl-Sulfamethoxazol zurückzuführen sein kann [21], welches leicht wieder zum Wirkstoff zurückgespalten wird [22]. Im verwendeten Laborsäulensystem konnte die Relevanz eines solchen Prozesses zwar über die Messung von Acetyl-Sulfamethoxazol in Zu- und Ablauf für diesen Stoff

ausgeschlossen werden, doch ist die Entstehung anderer unbekannter Transformationsprodukte, die ähnlichen Effekten unterliegen, nicht auszuschließen.

Literatur

- [1] Al-Ahmad, A., F.D. Daschner, and K. Kümmerer. (1999) Biodegradability of Cefotiam, Ciprofloxacin, Meropenem, Penicillin G, and Sulfamethoxazole and Inhibition of Waste Water Bacteria. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 37(2), 158-163.
- [2] Lindberg, R.H., et al. (2005) Screening of human antibiotic substances and determination of weekly mass flows in five sewage treatment plants in Sweden. *Environmental Science & Technology* 39(10), 3421-3429.
- [3] Barber, L.B., et al. (2009) Fate of Sulfamethoxazole, 4-Nonylphenol, and 17 beta-Estradiol in Groundwater Contaminated by Wastewater Treatment Plant Effluent. *Environmental Science & Technology* 43(13), 4843-4850.
- [4] Dickenson, E.R.V., et al. (2011) Indicator compounds for assessment of wastewater effluent contributions to flow and water quality. *Water Research* 45(3), 1199-1212.
- [5] Mompelat, S., B. LeBot, and O. Thomas. (2009) Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water. *Environment International* 35(5), 803-814.
- [6] Schmidt, C.K., F.T. Lange, and H.J. Brauch. (2004) Verhalten von organischen Spurenstoffen bei der Uferfiltration unter standortspezifischen Bedingungen. 35. *AWBR-Jahresbericht 2003*, 207-227.
- [7] Hartig, C., *Analytik, Vorkommen und Verhalten aromatischer Sulfonamide in der aquatischen Umwelt*, in *Institut für Technischen Umweltschutz, Fakultät III: Prozesswissenschaften*. 2000, TU Berlin: Berlin.
- [8] Kuhlmann, B., et al. (2006) Behavior of selected drugs during slow sand filtration. In: R. Gimbel, N.J.D. Graham, and M.R. Collins (Eds.): *Recent Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes*. IWA Publishing: London, UK, 188-193.
- [9] Teerlink, J., et al. (2012) Removal of trace organic chemicals in onsite wastewater soil treatment units: A laboratory experiment. *Water Research* 46(16), 5174-5184.
- [10] Moorman, T.B. (1990) Adaptation of Microorganisms in Subsurface Environments. In: K.D. Racke and J.R. Coats (Eds.): *Enhanced Biodegradation of Pesticides in the Environment*. American Chemical Society: Washington D. C.
- [11] LfU, *Projekt "Arzneimittelwirkstoffe und deren Metaboliten: Belastungen des Wasserkreislaufs und Möglichkeiten der Verminderung"*. *Schlussbericht Januar 2010*. 2010, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU): Augsburg.
- [12] Patterson, B.M., et al. (2011) Behaviour and fate of nine recycled water trace organics during managed aquifer recharge in an aerobic aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology* 122(1-4), 53-62.
- [13] Lapworth, D.J., et al. (2012) Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution* 163, 287-303.
- [14] Gunkel, G. (2009) Vulnerability of aquatic systems to climate change - findings from European waters. In: L. Duarte and P. Pinto (Eds.): *Sustainable Development: Energy, Environment and Natural Disasters*. Fundação Luís de Molina: Évora, 9-23.
- [15] IKS, *Bericht Nr. 182. Auswertungsbericht Humanarzneimittel*, IKS, Editor. 2010, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR): Koblenz.
- [16] Dieter, H.H., K. Götz, and K. Kümmerer, *Handlungsmöglichkeiten zur Minderung des Eintrags von Humanarzneimitteln und ihren Rückständen in das Roh- und Trinkwasser. Statusbeschreibung und Empfehlungen aus einem Fachgespräch, das Umweltbundesamt (UBA) und Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) am 21./22. Januar 2012 in Berlin auf Anregung des Bundesministeriums für Gesundheit (Ref 324) durchführten*. 2010, Umweltbundesamt: Berlin/Frankfurt am Main.

- [17] Li, D., et al. (2012a) Dissolved organic carbon influences microbial community composition and diversity in managed aquifer recharge systems. *Applied and Environmental Microbiology* 78(19), 6819-28.
- [18] Li, D., et al. (2012b) Microbial community evolution during simulated managed aquifer recharge in response to different biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) concentrations. *Water Research* submitted.
- [19] Joss, A., et al. (2005) Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. *Water Research* 39(14), 3139-3152.
- [20] Göbel, A., et al. (2007) Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies. *Science of the Total Environment* 372(2-3), 361-371.
- [21] Reynolds, J.E.F., ed. *Martindale. The Extra Pharmacopoeia*. 31. Ausgabe ed. 1996, Royal Pharmaceutical Society: London.
- [22] Göbel, A., et al. (2005) Occurrence and sorption behavior of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in activated sludge treatment. *Environmental Science & Technology* 39(11), 3981-3989.

Entfernung von Sulfamethoxazol in der Bodenpassage. Dissertation von Benno Baumgarten. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Martin Jekel (TU Berlin). Die Disseration ist im Frühjahr 2013 in der Schriftenreihe des Instituts für Technischen Umweltschutz der TU Berlin erschienen (Band 20) und kann unter der ISBN 978-3-86948-409-9 beim Papierflieger Verlag bezogen werden.