

1 ZUSAMMENFASSUNG

Die Standort- und Laboruntersuchungen konnten den Nachweis erbringen, dass im Abstrom des durch teerölbürtige Schadstoffe (AKW, PAK und heterozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) kontaminierten Standortes der ehemaligen Chemischen Fabrik „Rüsges“ natürliche Selbstreinigungsprozesse (Natural Attenuation = NA) im Untergrund wirksam sind.

Im nahen Abstrom der Schadensherde sind in den höher belasteten Kernbereichen Sulfat-reduzierende und Eisen(III)-reduzierende, außerdem auch methanogene Abbauprozesse maßgebend. Bereits im zentralen Schadensherd liegen ausgeprägte Sulfat-reduzierende Abbaubedingungen vor. Eisen(III)-reduzierende Abbauprozesse sind im gesamten kontaminierten Grundwasser-Abstrom relevant. Insgesamt sind für die am Standort zu beobachtende Schadstoffminderung maßgeblich anaerobe Abbauprozesse verantwortlich. Aerobe Prozesse sind untergeordnet und spielen an den Fahnenrändern über seitliches Einmischen von Sauerstoff-reichem Grundwasser in die Fahne eine Rolle. Die für die Abbauprozesse verantwortlichen Mikroorganismen sind autochthon vorhanden (aerobe BTEX-NAP-ACE-Verwerter, Eisen(III)- und Sulfat-reduzierende Keimzahlen).

Die natürlichen Prozesse führen bei insgesamt abnehmenden Konzentrationen zu einer vom Schadensherd in Abstromrichtung zu beobachtenden Änderung der Schadstoffprofile. Dabei werden unter den Standort-spezifischen Redoxbedingungen vergleichsweise schnell abbaubare Verbindungen (Toluol, Xylol, Benzofuran, Chinolin) bereits im Schadensherd, demgegenüber langsamer abbaubare Verbindungen (Naphthalin, Ethylbenzol, Benzol, Benzothiophen, Dibenzofuran, Fluoren, Phenanthren) im unmittelbaren Grundwasserabstrom und weiter abstromig umgesetzt. Unter den gegebenen Randbedingungen nur schwer umsetzbare Verbindungen (Acenaphthen, Dimethylnaphthalin, 2-Methylbenzofuran und 2-Methyldibenzofuran) reichern sich bei insgesamt deutlich abnehmenden Konzentrationen in den hinteren Bereichen der Fahne (Kontrollebene D und E) relativ an.

Mit Mikrokosmen wurden die Standort-relevanten Schadstoff-Abbauprozesse unter feldnahen Bedingungen mit Standort-Grundwässern identifiziert und die mikrobielle Abbaureihenfolge ermittelt. Die Versuche zeigten, dass insbesondere unter kombiniert Eisen(III)-/Sulfat-reduzierenden Abbaubedingungen die im Abstrom relevanten Substanzen Naphthalin, Ethylbenzol, Benzol, Benzothiophen, Dibenzofuran, Fluoren und Phenanthren anaerob abbaubar sind, wobei der initiale Abbau der Substanzen

sehr wahrscheinlich unter Eisen(III)-reduzierenden Bedingungen erfolgt. Unter aeroben Bedingungen wurden alle identifizierten Schadstoffe schnell und vollständig umgesetzt. Durch Abbauprobieren mit Sediment wurde belegt, dass auch vergleichsweise gut sorbierbare Schadstoffe wie Phenanthren bioverfügbar sind. Die am Standort im Vergleich zu anderen Standorten in hohen Konzentrationen nachweisbaren Huminstoffe können dabei den natürlichen Abbau durch Erleichterung des Elektronenflusses begünstigen. Auch der Abbau der im Bereich der Fahnen Spitze noch nachweisbaren Substanzen (z.B. Acenaphthen) unter anaeroben Bedingungen ist sehr wahrscheinlich, konnte in den Mikrokosmen in der zur Verfügung stehenden Inkubationszeit und aufgrund des untersuchten Schadstoff-Gemisches aber nicht nachgewiesen werden.

Das Sediment des Aquifers weist mit im Mittel 0,4 % einen vergleichsweise hohen Anteil an organischem Kohlenstoff auf. Die in Batch-Versuchen nachgewiesenen Sorptionsprozesse führen bei mittleren organischen C-Anteilen in der Modellierung zu einer zeitlich begrenzten Retardation (Fluoren: < 50 a auf 190 m Fahnenlänge). Damit zeigt auch die Modellrechnung, dass die Schadstoffminderungsprozesse am Standort im Wesentlichen auf mikrobiologische Abbauprozesse zurückzuführen sind.

Die wirksamen Abbauprozesse führen in Abstromrichtung auf einer Entfernung von etwa 190 m - quantifiziert über die Kontrollebenen B bis E – zu einer Schadstoffminderung je nach Substanzklasse zwischen 99 und 100 %. In Kontrollebene E verbleiben noch rund 10 µg/L bzw. 1,0 g/d an EPA-PAK₂₋₁₆ (Acenaphthen). Die Toxizitätsbestimmungen zeigen, dass durch die natürlichen mikrobiologischen Umsetzungen im Grundwasserabstrom keine evtl. neuen, toxikologisch kritischen Metabolite entstanden sind.

Für den Abstrombereich wurde zunächst ein Grundwasserströmungsmodell erstellt. Dieses Modell wurde auf Basis der Aquiferparameter, die mit Hilfe von Stichtagsmessungen der Grundwasserstände und Pumpversuchen ermittelt wurden, kalibriert. Die Strömungsrichtung wurde außerdem in einer einjährigen Messkampagne durch Grundwasser-Ganglinien mit hoher zeitlicher Auflösung an drei repräsentativen Messstellen (hydrologisches Dreieck) verifiziert.

Aufbauend auf dem Strömungsmodell wurde dann der reaktive Transport für acht ausgewählte Standort-relevante Schadstoffe mithilfe eines Multispezies-Modells simuliert. Neben dem Stofftransport wurde der Abbau unter aeroben und Eisen(III)-/Sulfat-reduzierenden Bedingungen berücksichtigt und die Sorption der Schadstoffe

berücksichtigt. Es zeigte sich, dass die aus den Messwerten ableitbare Transportrichtung mit dem kalibrierten Strömungsmodell weitgehend nachgebildet werden konnte.

Die Transportberechnungen legen nahe, dass sich im Modellgebiet trotz der teilweise erheblichen Sorption der Schadstoffe ein quasi-stationärer Zustand eingestellt hat. Dabei werden die über die Kontrollebene B einströmenden Schadstoffe nahezu vollständig abgebaut. Der Abbau unter Eisen(III)-/Sulfat-reduzierenden Bedingungen trägt zu 80 % zum Gesamtabbau bei. Lediglich für Acenaphthen und für 2-Methylbenzofuran kommt es zu einem geringfügigen Austrag am nördlichen Rand des Modellgebiets.

Im Rahmen von Szenarienbetrachtungen wurde mit dem kalibrierten Modell die zukünftige Schadstoffentwicklung abgeschätzt. Unter Beibehaltung der aktuellen hydraulischen und hydrochemischen Randbedingungen wird sich das Abstromverhalten der Schadstoffe auch in den nächsten 20 Jahren nur unwesentlich ändern, d.h. es ist nicht mit einem Schadstoffdurchbruch in der Kontrollebene E zu rechnen. Entscheidend hierfür ist der ausreichende Vorrat an dreiwertigem Eisen im Modell. Wie die Mikrokosmen belegen, sind Eisen(III)-reduzierende Bedingungen entscheidend für den initialen anaeroben Abbau der Schadstoffe, darüber hinaus verläuft der anaerobe Abbau auch unter Sulfat-reduzierenden Bedingungen, wobei Sulfat in ausreichenden Konzentrationen über den südlichen Zustrom kontinuierlich eingetragen wird.

Insgesamt konnte anhand der Feld- und Laboruntersuchungen der Standort-spezifische Nachweis über die Wirksamkeit der NA-Prozesse erbracht werden. Die Quantifizierung der Schadstoffminderung zeigt, dass diese Prozesse im Bereich des untersuchten Grundwasserabstroms zu einem nahezu vollständigen Rückgang der Schadstoffe geführt haben. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** diskutierten Standortfaktoren, die unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Nutzung der betroffenen Flächen weiterhin wirksam bleiben, erscheint aus jetziger Sicht die dauerhafte Überwachung der NA-Prozesse (Monitored Natural Attenuation = MNA) als Option zu einer aktiven Sanierung/Sicherung am Standort geeignet.

Zunächst ist im Rahmen des MNA die Stabilität der Randbedingungen für den mikrobiologischen Abbau sowie die Stationarität / Verkürzung der Schadstofffahne über einen Zeitraum von 10 Jahren mit Hilfe eines Monitoring-Programms nachzu-

weisen. Das gewählte Messstellennetz beinhaltet auch weitere Messstellen an der Fahnen Spitze, die zur Beweissicherung empfohlen werden. Bereits nach drei Jahren erfolgt eine erste Prüfung der NA-Prozesse im Hinblick auf mögliche Anpassungen des Monitoringprogramms (Messnetz, Überwachungsparameter und Überwachungsintervalle). Sofern die Schadstoffminderungsprozesse auch nach zehn Jahren ausreichend wirksam bleiben, kann das Monitoringkonzept abschließend festgelegt werden und die dauerhafte Überwachung der NA-Prozesse erfolgen. Bestandteil des MNA ist auch die Prüfung von Maßnahmen / Eingriffen im direkten Umfeld des Standortes im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die NA-Prozesse. Hierzu zählen Maßnahmen, die zu Veränderungen der bekannten hydraulischen Randbedingungen oder der NA-Standortfaktoren führen können. Sollten sich die natürlichen Schadstoffminderungsprozesse dagegen als nicht ausreichend erweisen, kann eine Kombination aus MNA und einer Stimulierung der natürlichen Abbauprozesse (Enhanced Natural Attenuation = ENA) geprüft werden.