

# Grundwasserdynamik eines vom Rhein geprägten Aquifersystems

## Entwicklung von Schadstofffahnen und Konsequenzen für Monitoring-Ansätze

Jörg Danzer, Stefan Baumeister, Ralf Olbertz

**Grundwasserschäden durch Öle und Lösemittel erfahren oft einen natürlichen Rückhalt und Abbau, der sich auf die Ausbildung von Schadstofffahnen auswirkt – sie können expandieren, schrumpfen oder stationär sein. Während die Schadstoffeigenschaften konstant sind, weisen die Eigenschaften des Aquifers eine hohe räumliche und die Grundwasserdynamik eine hohe zeitliche Variabilität auf. Für einen Standort am Rhein als Beispiel vorflutnaher Industriestandorte wurde die großräumliche Grundwasserdynamik dargestellt, um die Grundwasserdynamik auf lokaler Ebene und damit die Fahnenbildung abzuleiten<sup>1</sup>. Ein darauf aufbauendes Monitoring-Programm erlaubt eine realistische Gefährdungsabschätzung und/oder eine Quantifizierung von NA-Prozessen.**

Auf vielen – insbesondere industriell – genutzten Flächen kam es zu einem Eintrag von nicht mit Wasser mischbaren Flüssigkeiten wie z. B. Ölen, Löse- oder Kühlschmiermitteln in das Grundwasser. Aus diesen „Schadensherden“ lösen sich Schadstoffe in das Grundwasser und können so eine Gefahr z. B. für dessen Qualität als Trinkwasser darstellen. Die Schadstoffe werden mit dem Grundwasser transportiert, und es kommt zur Ausbildung so genannter „Schadstofffahnen“. Die Transportdistanz der Schadstoffe und damit die Länge und Ausdehnung der Fahnen wird im wesentlichen durch die

- Eigenschaften des jeweiligen Schadstoffs (Wasserlöslichkeit, Hydrophobizität, biologische Abbaubarkeit etc.),
- die Eigenschaften des Aquifermaterials (Korngröße, organischer Kohlenstoffgehalt etc.) und

<sup>1</sup>Nach einem Vortrag auf dem ITVA-AAV-Symposium Altlasten 2005 am 17./18. März in Köln

■ die Grundwasserdynamik (Strömungsrichtung und -geschwindigkeit) gesteuert. Während des Transportes unterliegen die Schadstoffe verschiedenen physikalisch-chemischen und (mikro-)biologischen Prozessen, die eine Verringerung der Schadstoffkonzentrationen bewirken können. Sie adsorbieren z. B. an bzw. diffundieren in das Aquifermaterial (Kies, Sand, Schluff- und Tonlinsen) und werden dadurch zurück gehalten (Retardation) oder sie werden durch chemische Reaktionen oder Mikroorganismen um- oder abgebaut. Dieser natürliche Rückhalt und Abbau von Schadstoffen kann auch als „natürliche Selbstreinigung des Grundwassers“ oder „natural attenuation“ bezeichnet werden.

Entsprechend den physiko-chemischen Eigenschaften des jeweiligen Schadstoffs sind die Rückhalte- und Abbauprozesse unterschiedlich effektiv, so dass für verschiedene Schadstoffe unterschiedliche Fahnenlängen beobachtet werden können.

Aus dem Verhältnis von Schadstoff-Nachlieferung aus dem Bereich des Schadensherdes und den Selbstreinigungsprozessen im Bereich der Fahne lässt sich abschätzen, ob eine Fahne expandiert, stationär ist oder bereits wieder kleiner wird. Möglicherweise können die Schadstoffe einer stationären oder expandierende Schadstofffahne eine

### Gefährdungen abschätzen, NA-Prozesse quantifizieren

Gefahr für einen Rezeptor, wie z. B. eine Trinkwasserfassung darstellen.

Während die Eigenschaften der Schadstoffe konstant sind und verhältnismäßig einfach der Literatur entnommen werden können, weisen die Eigenschaften des Aquifers eine hohe räumliche und die Grundwasserdynamik häufig eine hohe zeitliche Variabilität auf.

Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, die großräumliche Grundwasserdynamik eines vom Rhein geprägten Aquifersystems darzustellen, um daraus die potenzielle Ausbildung einer Schadstofffahne an einem lokalen Schadensherd abzuleiten und ein geeignetes Konzept zur Erfassung der Grundwasserdynamik auf lokaler Ebene zu entwickeln. Darauf aufbauend kann dann ein Monitoringprogramm zur Erfassung von Schadstofffahnen abgeleitet werden,

das eine realistische Gefährdungsabschätzung und/oder eine Quantifizierung von Natural-Attenuation-Prozessen erlaubt.

### Standort

Das Untersuchungsgebiet (vgl. **Bild 1**) liegt in Köln-Niehl im Norden der Stadt Köln auf einer Höhe von ca. 45 m üNN. Es wird östlich durch den Rhein auf Höhe der Flusskilometer 697 bis 700 begrenzt.

### Hydrogeologische Rahmenbedingungen

Der Grundwasserleiter wird von bis zu ca. 30 m mächtigen Kiesen und Sanden gebildet, die im Pleistozän als Mittel- und Niederterrasse vom Rhein abgelagert wurden. Das Grundwasser bewegt sich überwiegend frei im Porenraum (ungespannter Aquifer). Der Grundwasserleiter wird von Auen- und Hochflut-, z.T. Lösssedimenten überdeckt, die z.T. durch anthropogene Auffüllungen ersetzt wurden. Die Aquiferbasis bilden tonige, schluffige und feinsandige Sedimente des Tertiärs, dessen Oberfläche ein deutliches Relief besitzt.

Effektive hydraulische Aquifereigenschaften wurden basierend auf Pumpversuchsdaten durch inverse Modellierung bestimmt. Die hydraulische Leitfähigkeit ( $K_f$ ) liegt im Bereich von  $10^{-3}$  m/s bei einem Anisotropiefaktor zwischen 6 und 12, und das effektive Porenvolumen liegt um ca. 12 %.

Die hydraulische Anbindung des Aquifers an den Rhein ist sehr gut und kann durch eine Kolmationsschicht mit einer Mächtigkeit von 10 cm, die eine hydraulische Leitfähigkeit von ca.  $10^{-6}$  m/s besitzt, beschrieben werden. Dies entspricht einem Leakagefaktor von ca.  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>.

### Lokaler Schadensherd

Der hier betrachtete Schadensherd liegt zwischen den Industriebrunnen IV und V (vgl. **Bild 1**) in einer Entfernung von ca. 250 m vom Rhein. Er besteht im Wesentlichen aus Kühlschmiermitteln aus der Metallverarbeitung. Sie liegen z.T. in freier Phase, überwiegend jedoch in Residualsättigung im Porenraum des Aquifers vor und wurden durch zahlreiche Bohrungen erkundet (**Bild 2**).

Kühlschmiermittel sind nicht mit Wasser mischbar und besitzen eine geringere Dichte als dieses. Sie gehören daher zur Gruppe der sog. „light non-aqueous phase liquids“ (LNAPL). Die Kühlschmiermittel besitzen

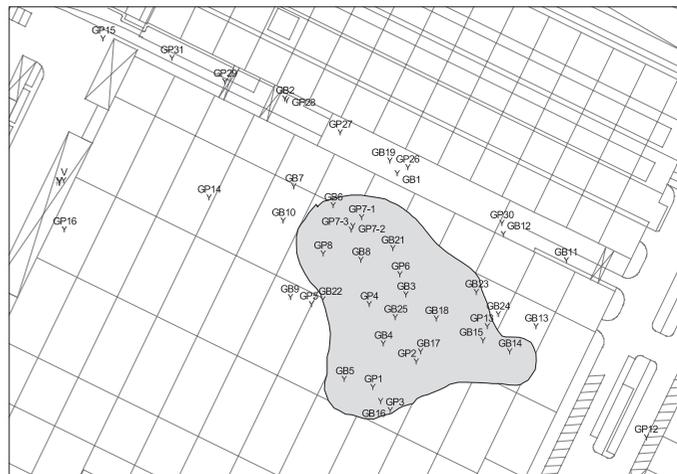
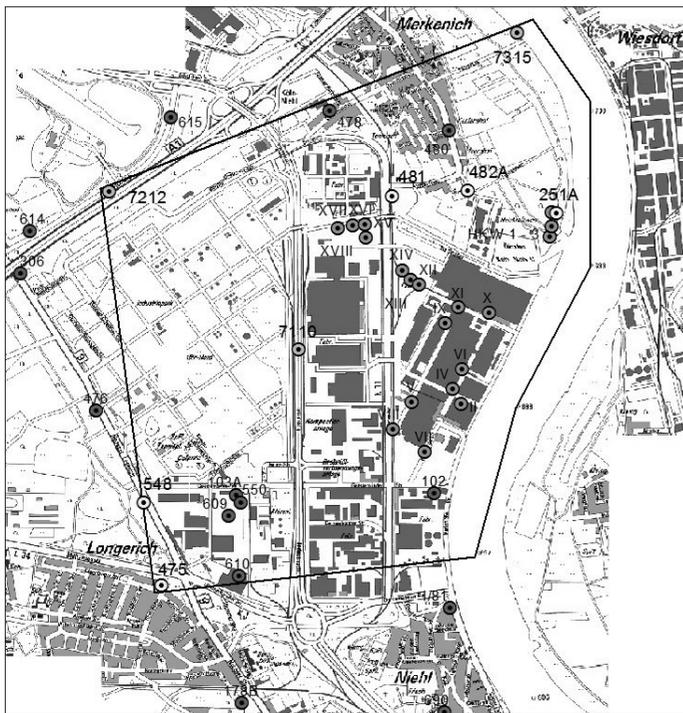


Bild 2: Lokaler Schadensherd (Kühlschmiermittel) mit Erkundungsbohrungen und schematischer Ausdehnung der freien bzw. residualen Phase.

Bild 1: Lage des Untersuchungsgebiets mit Grundwassermessstellen (GWM) des Staatlichen Umweltamtes (vierstellige Kennziffern), der GEW-Rheinenergie (dreistellige Kennziffern) sowie der Industriebrunnen der Fordwerke (römische Kennziffern).

eine höhere Viskosität als Wasser und enthalten v.a. Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Polychlorierte Alkane (PCA, Chlorparaffine), Polychlorierte Biphenyle (PCB) sowie Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Die Eigenschaften dieser Schadstoffgruppen sind qualitativ in **Tabelle 1** zusammengefasst.

### Methoden

Zur Erfassung der großräumlichen Grundwasserdynamik wurden Grundwassermessstellen und Industriebrunnen der Fordwerke, der GEW-Rheinenergie und des staatlichen Umweltamtes herangezogen (vgl. Bild 1). Alle Messstellen waren mit automatischen Messsystemen zur Erfassung des Grundwasserstandes ausgestattet und lieferten mindestens einen Messwert pro Tag. Die Zeitreihen der Pegelstände des Rheins wurden freundlicherweise vom Wasser- und Schifffahrtsamt Düsseldorf zur Verfügung gestellt.

Die Verarbeitung der Daten erfolgte mithilfe instationärer Rechenläufe eines numerischen Grundwassermodells, dessen Modellgebiet ebenfalls in Bild 1 dargestellt ist. Die gemessenen Jahressgänge des Grundwasserspiegels der einzelnen Messstellen bzw. des Rheinpegels am Modellrand dienten dabei der Quantifizierung der zeitlich variablen Festpotentialränder. Die Eichung und Validierung des Modells erfolgte anhand von Jahressganglinien von Messstellen, die - in verschiedenen Entfernungen vom Rhein - innerhalb des Modellgebiets liegen.

Die Modellergebnisse wurden mit Hilfe eines geographischen Informationssystem bearbeitet und dargestellt. Die Auswertung der Grundwasserfließrichtung und des hydraulischen Gradienten im Bereich des lokalen Schadensherdes geschah grafisch.

### Ergebnisse

#### Zusammenhang Rheinpegel-Grundwasserstände

Der Einfluß des Rheinpegels auf die Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet ist in **Bild 3** zu erkennen, in dem die Jahressganglinien des Rheinpegels und der Grundwassermessstellen mit täglichen Messungen beispielhaft für das Jahr 2000 dargestellt sind. Der Rheinpegel (oberste Linie) variiert mit der Zeit sehr stark und weist die höchste Schwingungsamplitude auf. Nahezu die gleiche Dynamik ist im Grundwasser der Messstelle 251A (zweite Linie von oben) zu beobachten, die sich in ca. 100 m Entfernung zum Rhein befindet.

Mit zunehmenden Abstand zum Rhein wird die in den Messstellen beobachtete Amplitude der Grundwasserschwingung geringer, und die Maxima oder Minima

werden im Vergleich zum Rheinpegel deutlich später erreicht.

In den Messstellen 482A und 481, die sich in einer Entfernung von ca. 650 m bzw. ca. 1000 m zum Rhein befinden, werden die Pegelschwankungen leicht gedämpft, aber dennoch deutlich nachvollzogen. Die Höchststände werden im Vergleich zum Rheinpegel etwa einen (482A) bzw. ca. zwei Tage (481) später erreicht. Die in der Messstelle 7110 (Entfernung zum Rhein ca. 1150 m) beobachteten Grundwasserschwingungen sind im Vergleich dazu wiederum gedämpfter, und die Höchststände lassen sich im Vergleich zum Rhein ungefähr fünf Tage später beobachten.

In den Messstellen 475, 548 und 7212, die sich in einer Entfernung von ca. 1750 m, 1850 m bzw. 2400 m zum Rhein befinden, werden im Vergleich zur Messstelle 7110 wesentlich gedämpftere Grundwasser-

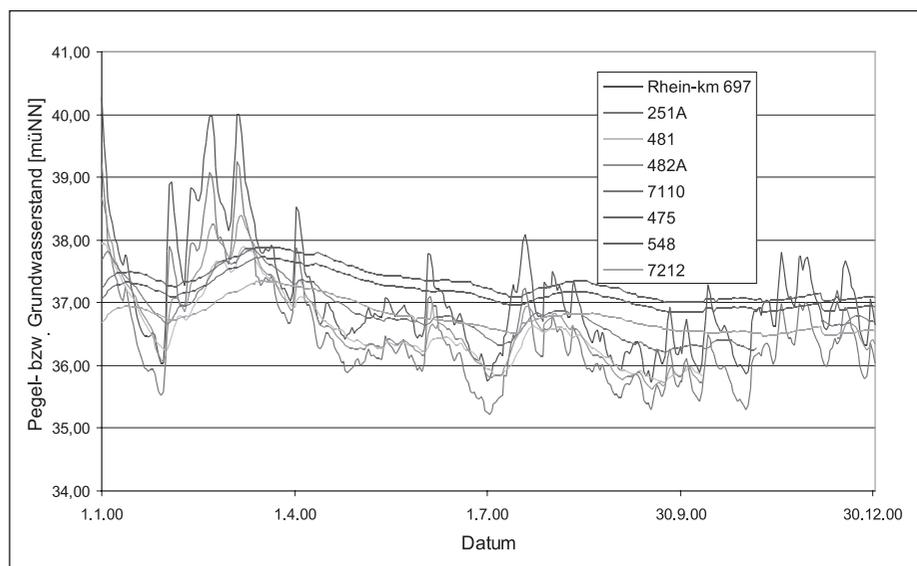
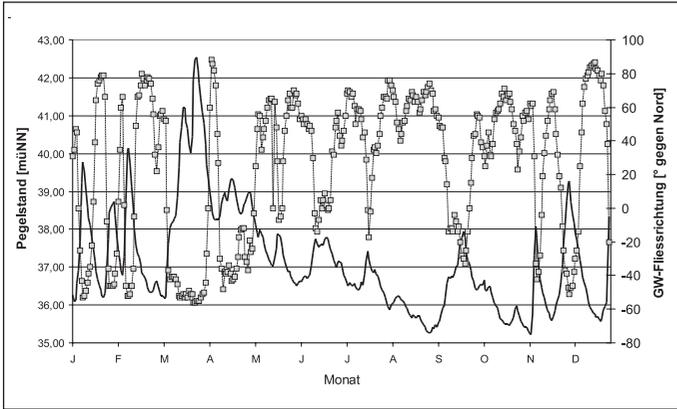
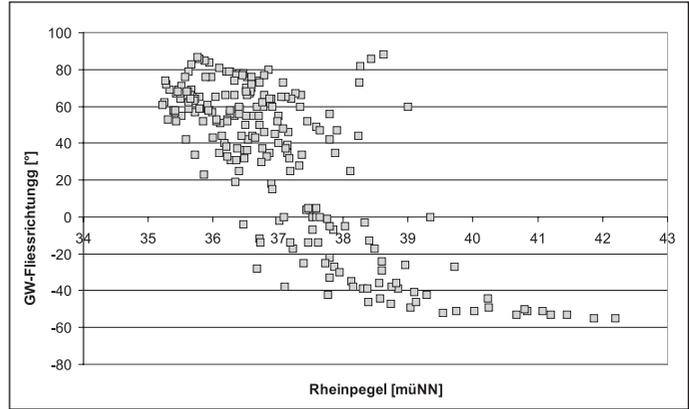


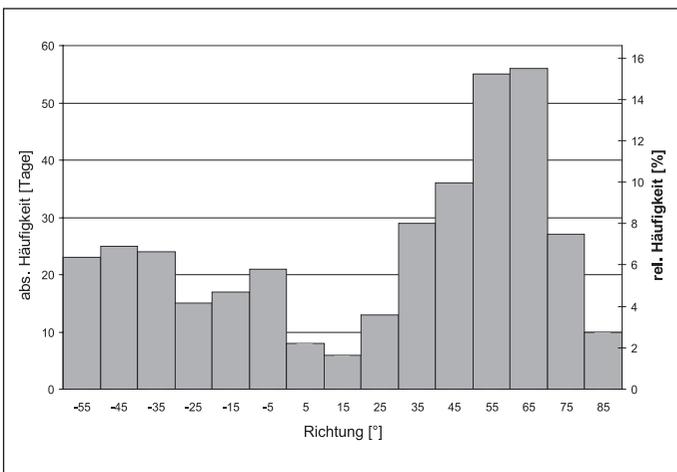
Bild 3: Jahressganglinien 2000 des Rheinpegels bei Fluss-km 697 und der Grundwassermessstellen 251A, 481, 482A, 7110, 475, 548 und 7212.



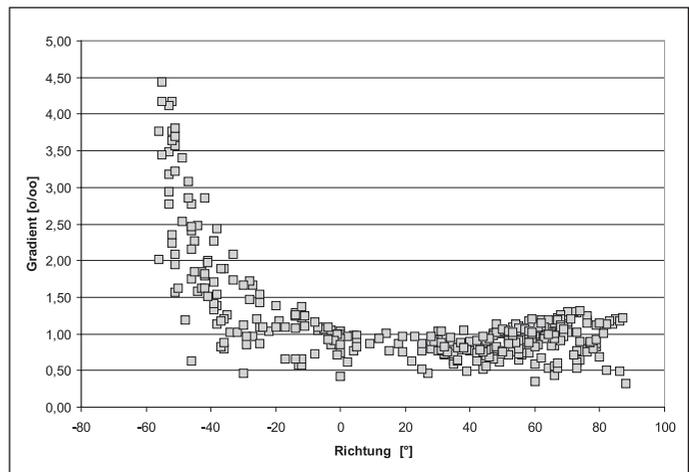
**Bild 4:** Pegelstand des Rheins am Fluss-km 698 im Jahr 2001 (durchgezogene schwarze Linie bezogen auf die linke y-Achse) und Grundwasser-Strömungsrichtung (gestrichelte Linie und Symbole bezogen auf die rechte y-Achse) im Bereich des lokalen Schadensherdes.



**Bild 5:** Grundwasserfließrichtung [° gegenüber Nord] in Abhängigkeit des Rheinpegels auf Höhe der Ford-Werke (Fluss-km 698).



**Bild 6:** Häufigkeitsverteilungen der Grundwasserströmungsrichtung im Bereich des lokalen Schadensherdes für das Jahr 2001.



**Bild 7:** Hydraulischer Gradient im Bereich des lokalen Schadensherdes in Abhängigkeit der Grundwasserströmungsrichtung.

schwankungen beobachtet, wobei der Einfluß des Rheins jedoch noch deutlich zu erkennen ist. Die Änderungen der Pegelstände werden mit einer Verzögerung von rund einem Monat in stark gedämpfter Form nachvollzogen.

Während zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Stand des Rheinpegels (Fluss-km 697) 7,26 m lagen, wurde im Grundwasser in der am weitesten vom Rhein entfernten Messstelle 7212 eine Amplitude zwischen Minimal- und Maximalwerten von ca. 1,57 m beobachtet.

### Grundwasserdynamik um lokalen Schadensherd

Die jahreszeitliche Veränderung der Grundwasserfließrichtung ist beispielhaft für das Jahr 2001 in **Bild 4** dargestellt. Sie wird stark durch die Dynamik des Rheinpegels beeinflusst und schwankt zwischen zwei „Hauptströmungsrichtungen“. Diese sind nach Ost-Nordost (ca. 60° bis 80°) bzw. nach Nordwesten (-40° bis -60° bezogen auf Nord) gerichtet. Die Strömungsrichtung nach Ost-Nordost kann für eine zusammenhängende Zeitdauer von maximal etwa zwei Monaten (August, September), die nach Nordwest für maximal einen Monat (März) beobachtet werden. Innerhalb die-

ser Zeiträume variiert die Fließrichtung um kleinere Beträge bis zu 10°. Die Änderung der Fließrichtung zwischen den genannten „Hauptströmungsrichtungen“ erfolgt beim An- bzw. Abflauen von Hochwasserwellen sehr schnell, d.h. innerhalb weniger Tage.

Die Häufigkeit der Grundwasserfließrichtung in Abhängigkeit des jeweiligen Pegelstandes ist in **Bild 5** dargestellt. An ca. 130 Tagen des Jahres ist die Grundwasserfließrichtung bei Pegelständen des Rheins zwischen ca. 35 m üNN und 37 m üNN nach Ost-Nordost (> 55°) und an ca. 70 Tagen bei Pegelständen über 38 m üNN nach Nordwesten (< 325°) gerichtet.

Eine direkte Korrelation zwischen dem Pegelstand des Rheins und der Grundwasserfließrichtung lässt sich lediglich für Pegelstände über 39 m üNN erkennen (vgl. **Bild 6**).

Für niedrigere Pegelstände wird die Grundwasserfließrichtung im Wesentlichen von der Veränderung des Rheinpegels und dessen Zeitdauer bestimmt. Bei konstant steigenden Pegelständen dreht die Fließrichtung nach Nordwesten, d.h. vom Rhein weg, bei konstant fallenden Pegelständen nach Ost-Nordost, d.h. zum Rhein hin. Ob eine der o.g. Hauptströmungsrichtungen erreicht wird, scheint v.a. von der Dauer des

Steigens bzw. Fallens und dem Betrag der Pegeländerung abzuhängen.

Die Pegel- und Richtungsänderungsdaten für ausgewählte, längere, zusammenhängende Phasen steigender oder fallender Pegel im Jahr 2001 sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Die maximale Änderung der Grundwasserfließrichtung liegt bei ca. 18° pro Tag.

Der hydraulische Gradient im Bereich des lokalen Schadensherdes ist in Abhängigkeit der Grundwasserströmungsrichtung in **Bild 7** dargestellt. Für Strömungsrichtungen zwischen -30° und 85° schwankt er um Werte zwischen 0,3 Promille und 1,3 Promille. Beim Anlaufen bzw. Durchgang von Hochwasserwellen, die mit einer Drehung der Grundwasserfließrichtung auf Werte zwischen -30° und -55° verbunden sind, steigt der hydraulische Gradient auf Werte bis zu 4,5 Promille an.

### Entwicklung von Schadstofffahnen

Aus den großräumlichen Daten zur Grundwasserdynamik, lassen sich folgende Überlegungen zur Entwicklung der Schadstofffahne im Bereich des lokalen Schadensherdes ableiten:

Die Lösung von Schadstoffen in das Grundwasser wird durch deren Wasserlös-

lichkeit, der Zusammensetzung der Kühlschmiermittel sowie der Kontaktzeit und der Kontaktfläche zwischen Kühlschmiermitteln und Grundwasser bestimmt. Beim Vorliegen von Kühlschmiermitteln in residualer Phase, werden die Schadstoffe entsprechend dem Raoult'schen Gesetz mit ihrer jeweiligen Sättigungskonzentration emittiert. Die Schadstoffmasse, die pro Zeiteinheit den Schadensherd verlässt (Emission) ist damit v.a. vom durchströmten Aquifervolumen, in welchem Kühlschmiermittel in Residualsättigung vorliegen, abhängig. Bei einer Amplitude der Grundwasserschwankung von ca. 3 m bis 4 m ist die Schadstoffemission entsprechend eine Funktion des Grundwasserstandes. Bei hohen Grundwasserständen, die häufig mit einer Grundwasserfließrichtung nach Nordwesten zusammenfallen, ist eine höhere Emission zu erwarten als bei niedrigen Grundwasserständen und einer Grundwasserfließrichtung in östliche Richtungen.

Die Grundwasserfließrichtung kann sich im Bereich des lokalen Schadensherdes innerhalb kurzer Zeiträume mit Änderungsbeiträgen bis zu 18° pro Tag zwischen den zwei „Hauptfließrichtungen“ Nordwest und Ost-Nordost um bis zu 130° drehen, wobei der hydraulische Gradient - z.T. in Abhängigkeit der Grundwasserfließrichtung - zwischen ca. 0,5 und 4,5 Promille variieren kann. Aus den beiden „Hauptfließrichtungen“ ergibt sich eine effektive Grundwasserfließrichtung, die in etwa nach Nord-Nordosten gerichtet ist.

Der Transport bzw. die Retardation (Rückhalt) der organischen Schadstoffe ist neben dem organischen Kohlenstoffgehalt des Aquifermaterials von der Kontaktzeit zum Aquifermaterial und damit von der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers abhängig. Dementsprechend ist zu erwarten, dass die Schadstoffe bei den hohen Gradienten verbunden mit einer Fließrichtung nach Nordwesten schneller transportiert werden als bei niedrigeren Gradienten und Fließrichtungen in östliche Richtung.

### Schlussfolgerungen

Der vorgestellte Standort – als Beispiel vorflutnaher Industriestandorte – besitzt aufgrund der Nähe zum Rhein eine sehr hohe Grundwasserdynamik. Das bedeutet, dass Grundwasserstände, -fließrichtung und -gradienten eine große zeitliche Variabilität aufweisen, die nicht periodisch ist, jedoch ein gewisses jahreszeitlich bedingtes Muster zeigt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die großräumlich abgeleitete Grundwasserdynamik sowohl die Schadstoffemission als auch den Transport der Schadstoffe und damit die Ausbildung von Schadstofffahnen steuert. Für eine Gefährdungsabschätzung und/oder die Quantifizierung natürlicher Rückhalt- und Abbauprozesse erscheint es daher sinnvoll,

Stoffgruppe	Abk.	Wasserlöslichkeit (S <sub>w</sub> )	Oktanol/Wasser-Verteilungskoeffizient (K <sub>ow</sub> )	Bioabbaupotenzial
Mineralölkohlenwasserstoffe	MKW	mittel bis sehr gering	mittel bis sehr hoch	mittel bis sehr gut
Polychlorierte Alkane Chlorparaffine	PCA	mittel bis sehr gering	mittel bis sehr hoch	gering bis sehr gering
Polychlorierte Biphenyle	PCB	gering bis sehr gering	hoch bis sehr hoch	gering bis sehr gering
Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe	PAK	„hoch“ bis sehr gering	„gering“ bis sehr hoch	„hoch“ bis sehr gering

Tabelle 1: Übersicht über die Schadstoffe und Inhaltsstoffe der Kühlschmiermittel und deren qualitative Eigenschaften.

Datum	Dauer [Tage]	Pegeländerung ges. [m]	Richtungsänderung ges. [°]	Pegeländerung [m/Tag]	Richtungsänderung [°/Tag]	Endrichtung [°]	Pegeländerung [qualitativ]
02.01.01	7	3.69	-88	0.53	-13	-53	steigend
09.01.01	14	-3.34	131	-0.24	9	79	fallend
23.01.01	7	2.42	-111	0.35	-16	-45	steigend
30.01.01	6	-1.59	105	-0.26	18	66	fallend
05.02.01	4	2.87	-54	0.72	-14	-52	steigend
09.02.01	15	-3.43	125	-0.23	8	74	fallend
27.03.01	14	-3.96	99	-0.28	7	44	fallend
10.04.01	5	0.72	-65	0.14	-13	-38	steigend
20.04.01	6	-0.88	29	-0.15	5	-13	fallend
02.05.01	6	-1.05	82	-0.18	14	56	fallend
21.05.01	7	-0.98	71	-0.14	10	64	fallend
10.06.01	6	0.99	-59	0.17	-10	-12	steigend
23.06.01	7	-0.76	53	-0.11	8	52	fallend
02.07.01	6	-0.62	33	-0.10	6	70	fallend
21.07.01	4	-0.36	52	-0.09	13	35	fallend
06.09.01	8	1.19	-68	0.15	-9	-14	steigend
24.09.01	9	-1.39	89	-0.15	10	56	fallend
12.11.01	11	-2.17	110	-0.20	10	68	fallend
23.11.01	12	3.58	-120	0.30	-10	-51	steigend
05.12.01	18	-3.06	130	-0.17	7	83	fallend
26.12.01	6	2.69	-100	0.45	-17	-20	steigend

Tabelle 2: Richtungsänderung und Endrichtung der Grundwasserströmung in Abhängigkeit der Pegeländerung des Rheins für längere, zusammenhängende Phasen ausgewählter steigender bzw. fallender Rheinpegel im Jahr 2001.

zunächst die tatsächliche Grundwasserdynamik auf lokaler Ebene zu erfassen. Dies kann z.B. durch drei zeitlich möglichst hoch auflösende, automatische Messsysteme erfolgen, die bereits mit passiven Probennahmesystemen ausgestattet sind. Basierend auf der lokalen Grundwasserdynamik können dann z.B. geeignete Kontrollebenen gewählt werden, an welchen Schadstoffkonzentrationen bestimmt werden, um natürliche Abbauraten quantifizieren zu können. ■

#### Literaturhinweise:

Bopp, S., Weiß H.-J., Schirmer, M., Grathwohl, P., Schirmer K. (2004): Passive Probenahme in Grund-

und Oberflächenwasser - Ein Überblick. Grundwasser 9 (2), 109-118.

Danzer, J., Baumeister, S., Olbertz, R. (2004): Grundwasserdynamik eines vom Rhein geprägten Aquifersystems und Entwicklung von Schadstofffahnen: Konsequenzen für Monitoring-Ansätze. In: Schiedeck, T. et al., Hydrogeologie regionaler Aquifersysteme. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Heft 32, S. 24.

Danzer, J., Schad, H. (2004), Erprobung von in-situ Mikroemulsionen zur Sanierung von Mineralölschäden in Boden und Grundwasser, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Zwischenbericht, unveröffentlicht.

Grathwohl, P. (1998): Diffusion in Natural Porous Media: Contaminant Transport, Sorption/Desorption and Dissolution Kinetics. - Kluwer Academic Publishers, Boston, 224 p.

Leven, C. und Dietrich, P. (2004): Untersuchung der zeitlichen Variabilität von Grundwasserfließbedingungen. In: Schiedeck, T. et al., Hydrogeologie regionaler Aquifersysteme. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Heft 32, S. 154.

Ingenieurbetrieb Dr. Pütz, W. (1998): Statusbericht zur Grundwasseranierung, Ford-Werke AG, Köln-Niehl, Halle G, unveröffentlicht.

Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (1986): Ingenieurgeologische Karte 1:25 000, Blatt 5007 Köln

### Danksagung

Die Autoren danken Dr. Carsten Leven, I.M.E.S. GmbH, dem Ingenieurbetrieb Dr. Pütz, dem Wasser- und Schifffahrtsamt Düsseldorf, der GEW Rheinenergie und dem Staatlichen Umweltamt Köln.