

Grundwasserdynamik eines vom Rhein geprägten Aquifersystems und Entwicklung von Schadstofffahnen: Konsequenzen für Monitoring-Ansätze

*J. Danzer, _boden & grundwasser~, Hindelanger Str. 35,
D-87527 Sonthofen, info@boden-und-grundwasser.de*

*S. Baumeister, Ford Motor Company, EQO Europe, Henry-Ford-Strasse 1,
D-50725 Köln, sbaumeis@ford.com*

*R. Olbertz, Stadt Köln, Umwelt- u. Verbraucherschutzamt, Willy-Brandt-Platz 2,
D-50679 Köln, ralf.olbertz@stadt-koeln.de*

Einführung

Auf vielen - insbesondere industriell - genutzten Flächen erfolgte ein Eintrag von nicht mit Wasser mischbaren Flüssigkeiten wie z.B. Ölen, Lösungs- 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 sogenannter "Schadstofffahnen". Die Transportdistanz der Schadstoffe und damit die Länge und Ausdehnung der Fahnen wird im wesentlichen durch die (i) Eigenschaften des jeweiligen Schadstoffs (Wasserlöslichkeit, Hydrophobizität, biologische Abbaubarkeit etc.), den (ii) Eigenschaften des Aquifermaterials (Korngröße, organischer Kohlenstoffgehalt etc.) und der (iii) 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- bzw. 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 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 potentielle 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 ermöglicht.

Standort

Geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet (vgl. Abbildung 1) liegt in Köln-Niehl im Norden der Stadt Köln auf einer Höhe von ca. 45 müNN. 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 Leakaufaktor von ca. 10^{-5} s⁻¹.

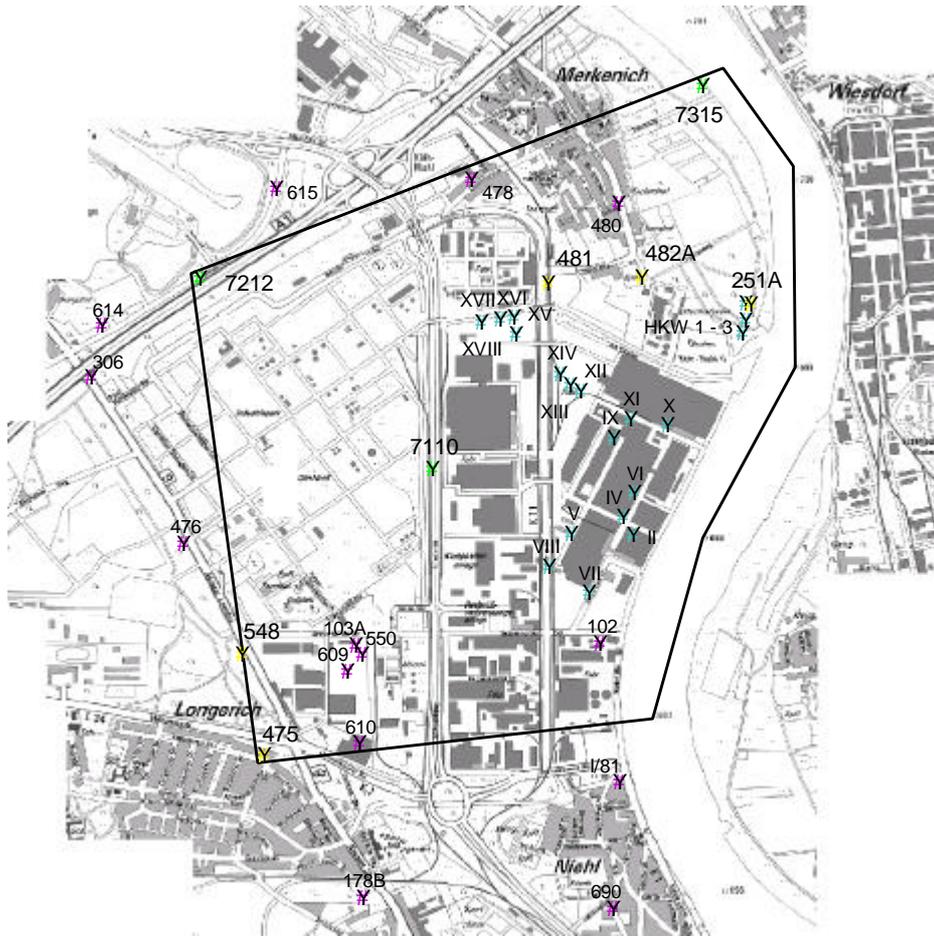


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebiets mit Grundwassermessstellen (GWM) des Staatlichen Umweltamts (vierstellige Kennziffern), der GEW-Rheinenergie (dreistellige Kennziffern) sowie der Industriebrunnen der Fordwerke (römische Kennziffern).

Lokaler Schadensherd

Der im folgenden betrachtete Schadensherd liegt zwischen den Industriebrunnen IV und V (vgl. Abbildung 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 von und wurden durch zahlreiche Bohrungen erkundet (vgl. Abbildung 2).

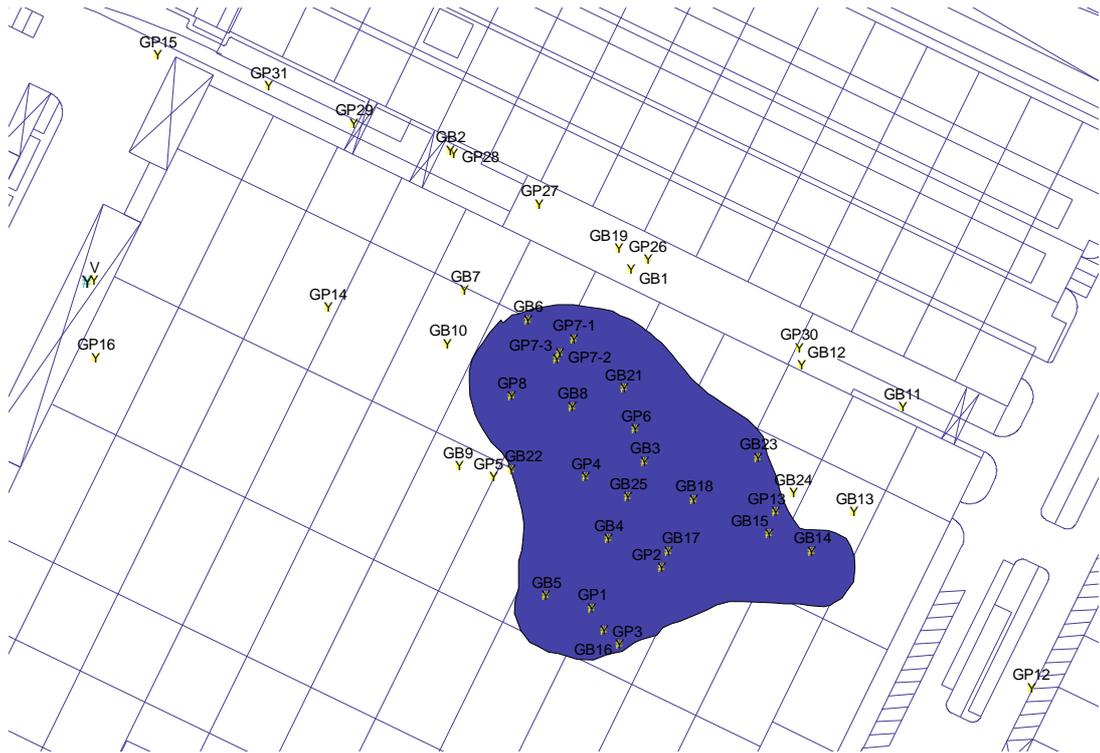


Abbildung 2: Lokaler Schadensherd (Kühlschmiermittel) mit Erkundungsbohrungen und schematischer Ausdehnung der freien bzw. residualen Phase.

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 eine höhere Viskosität als Wasser und beinhalten 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.

Tabelle 1: Übersicht über die Schadstoffe bzw. Inhalstoffe der Kühlschmiermittel und deren qualitativen Eigenschaften.

Stoffgruppe	Abk.	S _w	K _{ow}	Bioabbaupotential
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

Methoden

Zur Erfassung der grossräumlichen Grundwasserdynamik wurden Grundwassermessstellen und Industriebrunnen der Ford-Werke, der GEW-Rheinenergie und des staatlichen Umweltamtes herangezogen (vgl. Abbildung 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 mittels instationärer Rechenläufe eines numerischen Grundwassermodells, dessen Modellgebiet ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt ist. Die gemessenen Jahresgänge 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 Jahresganglinien von Messstellen, die - in verschiedenen Entfernungen vom Rhein - innerhalb des Modellgebiets liegen.

Die Modellergebnisse wurden mittels eines geographischen Informationssystems bearbeitet und dargestellt. Die Auswertung der Grundwasserflussrichtung und des hydraulischen Gradienten im Bereich des lokalen Schadensherdes erfolgte graphisch.

Ergebnisse

Zusammenhang Rheinpegel-Grundwasserstände

Der Einfluß des Rheinpegels auf die Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 3 zu erkennen, in welcher die Jahresganglinien des Rheinpegels und der Grundwassermessstellen mit täglichen Messungen beispielhaft für das Jahr 2000 dargestellt ist. Der Rheinpegel (oberste Linie) variiert mit der Zeit sehr stark und weist die höchste Schwankungsamplitude auf. Nahezu die gleiche Dynamik ist im Grund-

wasser 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 Grundwasserschwankung 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 ca. einen (482A) bzw. ca. zwei Tage (481) später erreicht. Die in der Messstelle 7110 (Entfernung zum Rhein ca. 1150 m) beobachteten Grundwasserschwankungen sind im Vergleich dazu wiederum gedämpfter und die Höchststände werden im Vergleich zum Rhein ca. 5 Tage später beobachtet.

In den Messstellen 475, 548 und 7212, die sich in einer Entfernung von ca. 1750 m, ca. 1850 m bzw. ca. 2400 m zum Rhein befinden, werden im Vergleich zur Messstelle 7110 wesentlich gedämpftere Grundwasserschwankungen beobachtet, wobei der Einfluß des Rheins jedoch noch deutlich zu erkennen ist. Die Änderungen der Pegelstände werden mit einer Verzögerung von ca. einem Monat in stark gedämpfter Form nachvollzogen.

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.

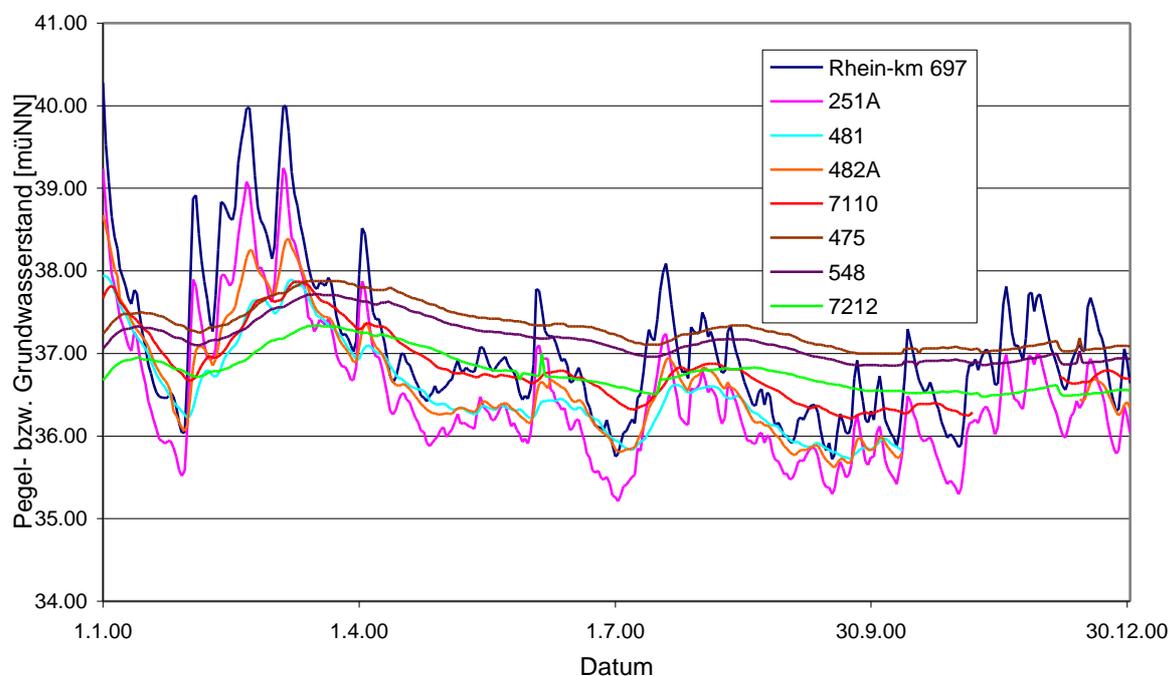


Abbildung 3: Jahresganglinien 2000 des Rheinpegels bei Fluß-km 697 und der Grundwassermessstellen 251A, 481, 482A, 7110, 475, 548 und 7212.

Grundwasserdynamik um lokalen Schadensherd

Grundwasserfliessrichtung

Die jahreszeitliche Veränderung der Grundwasserfliessrichtung ist beispielhaft für das Jahr 2001 in Abbildung 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 ca. 2 Monaten (August, September), die nach Nordwest für maximal einen Monat (März) beobachtet werden. Innerhalb dieser 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 Abbildung 5 dargestellt. An ca. 130 Tagen des Jahres ist die Grundwasserfliessrichtung bei Pegelständen des Rheins zwischen ca. 35 müNN und 37 müNN nach Ost-Nordost (> 55°) und an ca. 70 Tagen bei Pegelständen über 38 müNN nach Nordwesten (< 325°) gerichtet.

Eine direkte Korrelation zwischen dem Pegelstand des Rheins und der Grundwasserfliessrichtung lässt sich lediglich für Pegelstände über 39 müNN erkennen (vgl. Abbildung 6).

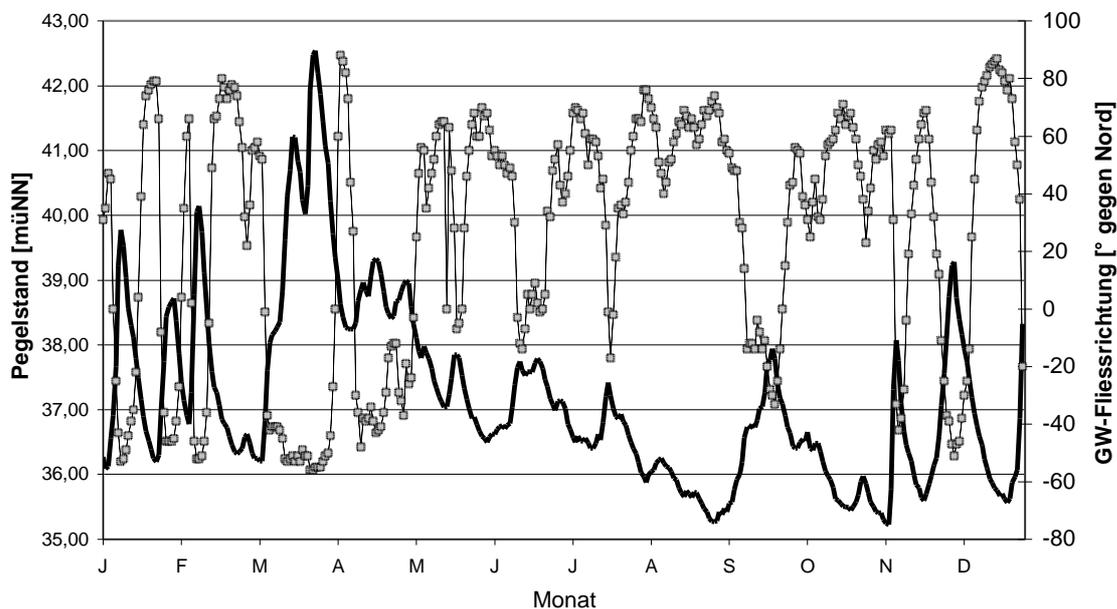


Abbildung 4: Pegelstand des Rheins am Fluss-km 698 im Jahr 2001 (durchgezogene schwarze Linie bezogen auf die linke y-Achse) und Grundwasser-Strömungsrichtung (gestrichelte Linie und Symbole bezogen auf die rechte y-Achse) im Bereich des lokalen Schadensherdes.

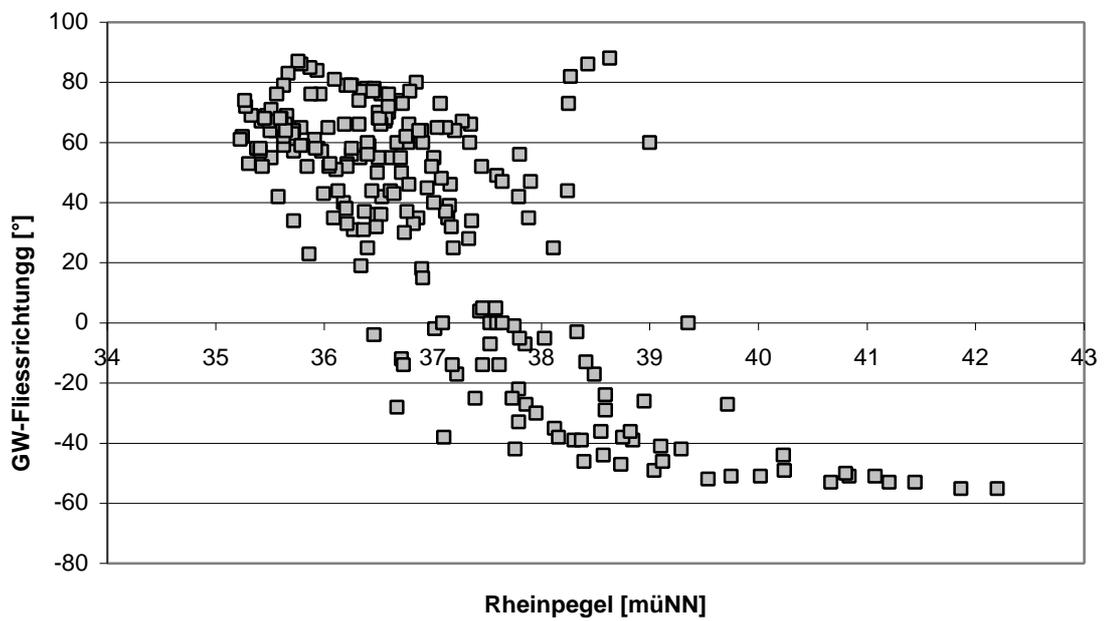


Abbildung 5: Grundwasserfließrichtung [° gegenüber Nord] in Abhängigkeit des Rheinpegels auf Höhe der Ford-Werke (Fluss-km 698).

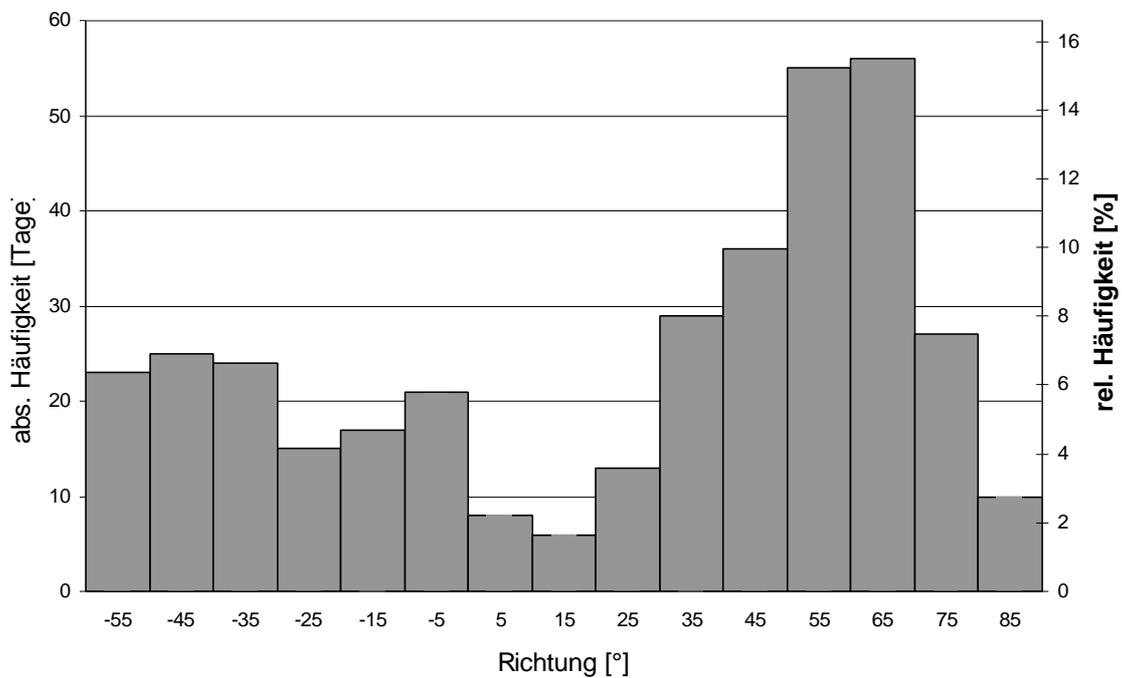


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilungen der Grundwasserströmungsrichtung im Bereich des lokalen Schadensherdes für das Jahr 2001.

Für niedrigere Pegelstände wird die Grundwasserfliessrichtung im wesentlichen von der Veränderung des Rheinpegels und deren Zeitdauer bestimmt. Bei konstant steigendem 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 bzw. fallender Pegel im Jahr 2001 sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die maximale Änderung der Grundwasserfliessrichtung liegt bei ca. 18° pro Tag.

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.

Datum	Dauer [Tage]	Pegel- änderung ges. [m]	Richtungs- änderung ges. [°]	Pegel- änderung [m/Tag]	Richtungs- änderung [°/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

Hydraulischer Gradient

Der hydraulische Gradient im Bereich des lokalen Schadensherdes ist in Abhängigkeit der Grundwasserströmungsrichtung in Abbildung 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.

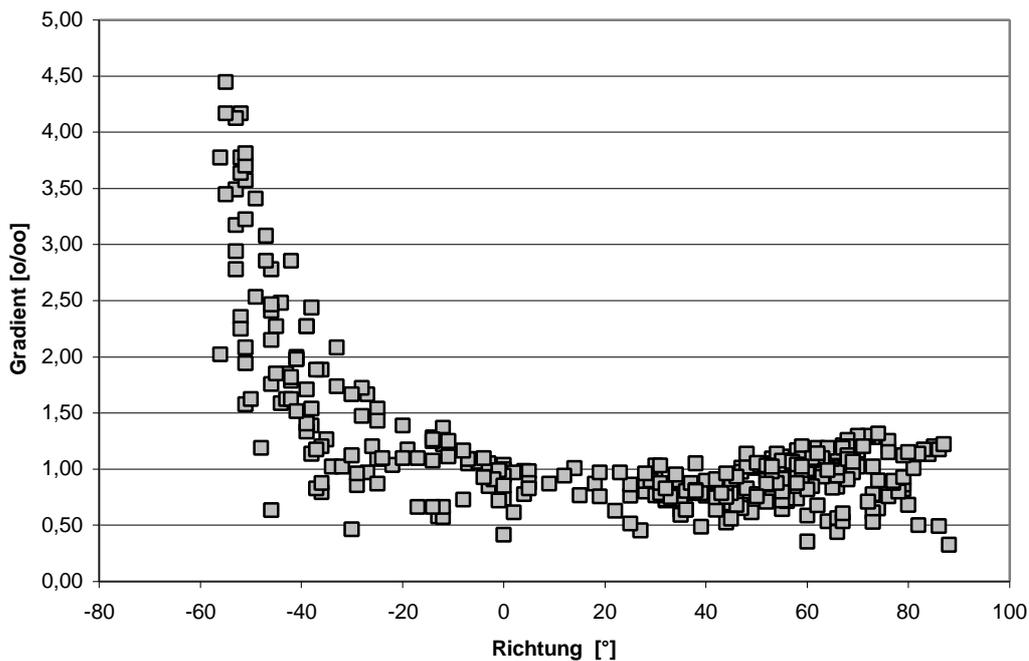


Abbildung 7: Hydraulischer Gradient im Bereich des lokalen Schadensherdes in Abhängigkeit der Grundwasserströmungsrichtung.

Entwicklung von Schadstofffahnen

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

Schadstoff-Emission

Die Lösung von Schadstoffen in das Grundwasser wird durch deren Wasserlöslichkeit, 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 Kühlschmiermitteln 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 Grundwasserflussrichtung nach Nordwesten zusammenfallen, ist die Emission grösser als bei niedrigen Grundwasserständen und einer Grundwasserflussrichtung in östliche Richtungen.

Schadstoff-Transport

Die Grundwasserflussrichtung kann sich im Bereich des lokalen Schadensherdes innerhalb kurzer Zeiträume mit Änderungsbeträgen bis zu 18° pro Tag zwischen den zwei "Hauptflussrichtungen" Nordwest und Ost-Nordost um bis zu 130° drehen, wobei der hydraulische Gradient - z.T. in Abhängigkeit der Grundwasserflussrichtung - zwischen ca. 0,5 und 4,5 Promille variieren kann. Aus den beiden "Hauptflussrichtungen" ergibt sich eine effektive Grundwasserflussrichtung, 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 Flussrichtung nach Nordwesten schneller transportiert werden als bei niedrigeren Gradienten und Flussrichtungen in östliche Richtung.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der vorgestellte Standort - als Beispiel vorflutnaher Industriestandorte - besitzt aufgrund der Nähe zum Rhein eine sehr hohe Grundwasserdynamik, d.h. Grundwasserstände, -flussrichtung und -gradienten weisen eine grosse zeitliche Variabilität auf, 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, zunächst die tatsächliche Grundwasserdynamik auf lokaler Ebene zu erfassen. Dies kann z.B. durch drei zeitlich möglichst hoch auflösenden automatischen Messsysteme erfolgen, die bereits mit passiven Probenahmesystemen 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.

Dank

Die Autoren danken Dr. Carsten Leven, dem Wasser- und Schiffsamt Düsseldorf, der GEW Rheinenergie und dem Staatlichen Umweltamt Köln.

Literatur

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. Schriftreihe 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. Schriftreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Heft 32, S. 154.