

4.2.6 Untersuchungen zum Infiltrationsregime der Elbe mit dem natürlichen Isotop Radon-222

J. Dehnert (HTW), K. Freyer (UFZ), H. C. Treutler (UFZ), W. Nestler (HTW)

Einleitung

Die Kenntnis der Infiltrationsgeschwindigkeit von Oberflächenwasser ist eine notwendige Voraussetzung zur Bestimmung von Infiltrationsraten, die für verschiedene wasserwirtschaftliche Fragestellungen Bedeutung haben. Infiltrationsraten werden für die Bemessung von Versickerungsanlagen benötigt, die zur Sicherung der Trinkwassergewinnung durch künstliche Grundwasseranreicherung oder zur Stabilisierung von gefährdeten Ökosystemen am Rand von Braunkohlerevieren errichtet werden. Sie sind weiterhin für Untersuchungen zum Ökosystem Flußaue, zur Versickerung in Kanälen und zur Unterläufigkeit von Dämmen und Talsperren von Interesse.

HOEHN und VON GUNTEN (1989, 1992) unterbreiteten den Vorschlag, das Anwachsen der Radonaktivitätskonzentration in infiltriertem Flußwasser während der Uferpassage zur Bestimmung von Aufenthaltszeiten zu nutzen. Dieser Vorschlag wurde von verschiedenen Autoren aufgegriffen. So untersuchten BERTIN und BOURG (1994) Aufenthaltszeiten an einer Uferfiltrationsanlage an der Lot im Südwesten Frankreichs unter Einbeziehung der Mischung verschiedener Wässer im Grundwasserleiter. WILLME et al. (1995) bestimmten Aufenthaltszeiten an einer Wassergewinnungsanlage an der Ruhr bei Dortmund. Erste Ergebnisse bei der Bestimmung von Aufenthaltszeiten von Uferfiltrat der Elbe wurden von DEHNERT et al. (1996) und FREYER et al. (1996) vorgestellt. SNOW und SPALDING (1997) wandten das Verfahren an einer Grundwasseranreicherungsanlage am Wood River in Nebraska an.

Methode

Beim Durchströmen eines Grundwasserleiters nimmt infiltrierendes, radonarmes Flußwasser kontinuierlich Radon auf, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Aufnahme und radioaktivem Zerfall des Radons einstellt. Die Konzentration des Radons im Wasser ist der gemessenen Aktivität proportional. Die Gleichung

$$A_t = A_e (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} A_t = \text{Aktivität zum Zeitpunkt } t \\ A_e = \text{Aktivität im Gleichgewicht} \\ \lambda = \text{radioaktive Zerfallskonstante, } \lambda_{\text{Rn}} = 0,18 \text{ d}^{-1} \\ t = \text{Zeit} \end{array} \quad (1)$$

beschreibt das Anwachsen der Radonaktivität von Null bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes durch Zerfall des Mutterisotops Ra-226. Wenn man diese Gleichung nach der Zeit t auflöst, kann unter bestimmten Voraussetzungen die Aufenthaltszeit des Uferfiltrats nach:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{A_e}{A_e - A_t} \right) \quad (2)$$

berechnet werden. Benötigt wird die von Oberflächenwasser unbeeinflusste Radonaktivität A_e im Gleichgewicht, die z.B. an einer vom Oberflächengewässer ausreichend entfernten Meßstelle bestimmt werden kann. Unter Berücksichtigung der Radonaktivität A_o zum Zeitpunkt t_o des infiltrierenden Oberflächenwassers ergibt sich nach Gleichung (2) wegen $t_{auf} = t - t_o$ die Aufenthaltszeit t_{auf} (Abb. 1) des Uferfiltrats im Grundwasserleiter entsprechend der Beziehung

$$t_{auf} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{A_e - A_o}{A_e - A_t} \right). \quad (3)$$

Die Anwendung der Gleichung (3) ist sinnvoll, weil die Radonaktivitätskonzentration von Oberflächenwässern nicht immer vernachlässigbar klein ist. So wurden in der Elbe während eines Hochwassers 1992 Radonaktivitätskonzentrationen von bis zu 2,9 Bq/l gemessen, die offenbar von mitgeführten Schwebstoffen verursacht wurden.

Die von HOEHN und VON GUNTEN (1989) für dieses Verfahren genannten Voraussetzungen lauten:

- (I) Die durchschnittliche Konzentrationsverteilung von Ra-226 im Grundwasserleiter ist makroskopisch homogen.
- (II) Die in größerer Entfernung vom Fluß gemessene vom Oberflächenwasser unbeeinflusste Radonaktivitätskonzentration ist repräsentativ für den Fließweg.
- (III) Der Radonverlust in die ungesättigte Zone und die Atmosphäre ist konstant.
- (IV) Die Länge des Fließweges zwischen den Meßstellen ändert sich auch bei unterschiedlichen Wasserständen nicht.
- (V) Es erfolgt keine Mischung von Infiltrat und altem Grundwasser.

Die in dieser Arbeit verwendete Meßmethodik zur Bestimmung der Radonaktivitätskonzentration in Grundwasserproben wird in Kapitel 5.3 weiter unten vorgestellt.

Korrelation zwischen der Radonaktivitätskonzentration des Grundwassers und dem lithologischen Aufbau des Grundwasserleiters

Am Meßprofil Torgau-Ost II betrug der Mittelwert der Aktivitätskonzentrationen aller oberen im Mittel- und Grobsand stehenden Meßstellen jeweils 8 m und 28 m unter Gelände zur Stichtagsmessung am 21.7.93 $(7,7 \pm 1,6)$ Bq/l ($n=15$)¹. An den unteren, 40 m unter Gelände in einer Wechsellagerung von Feinkies und Grobsand stehenden Meßstellen wurde eine mittlere Aktivitätskonzentration von $(41,8 \pm 11,6)$ Bq/l ($n=6$) gemessen (Abb. 4.2.6-2). Die Ergebnisse zeigen, daß am Meßprofil Torgau-Ost II das Grundwasser in der Wechsellagerung von Feinkies und Grobsand über deutlich höhere Radonaktivitätskonzentrationen verfügt als im darüberliegenden Mittel- und Grobsand. Die Radonaktivitätskonzentration im Grundwasser korreliert mit dem lithologischen Aufbau des Grundwasserleiters. Das Meßprofil Torgau-Ost I wird an anderer Stelle diskutiert.

¹ Es handelt sich bei diesen Fehlerangaben um die Standardabweichung von n Meßwerten.

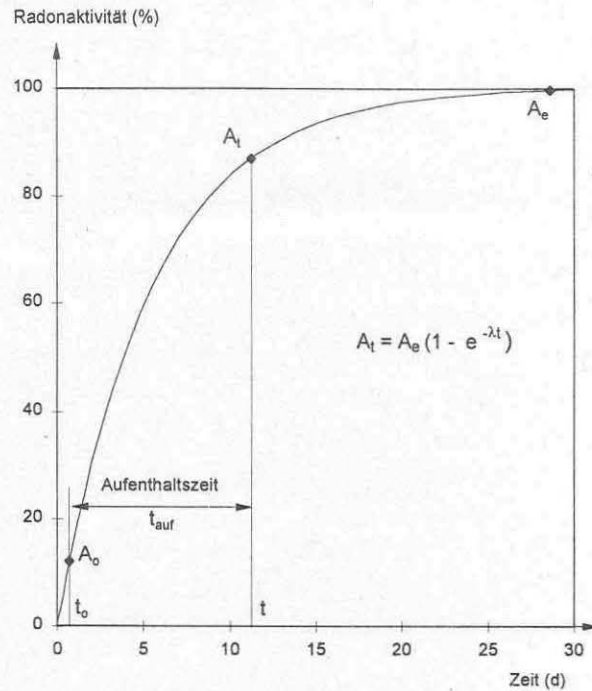


Abb. 4.2.6-1: Anwachsen der Radonaktivität von infiltriertem Flußwasser während der Uferpassage (aus DEHNERT, 1998)

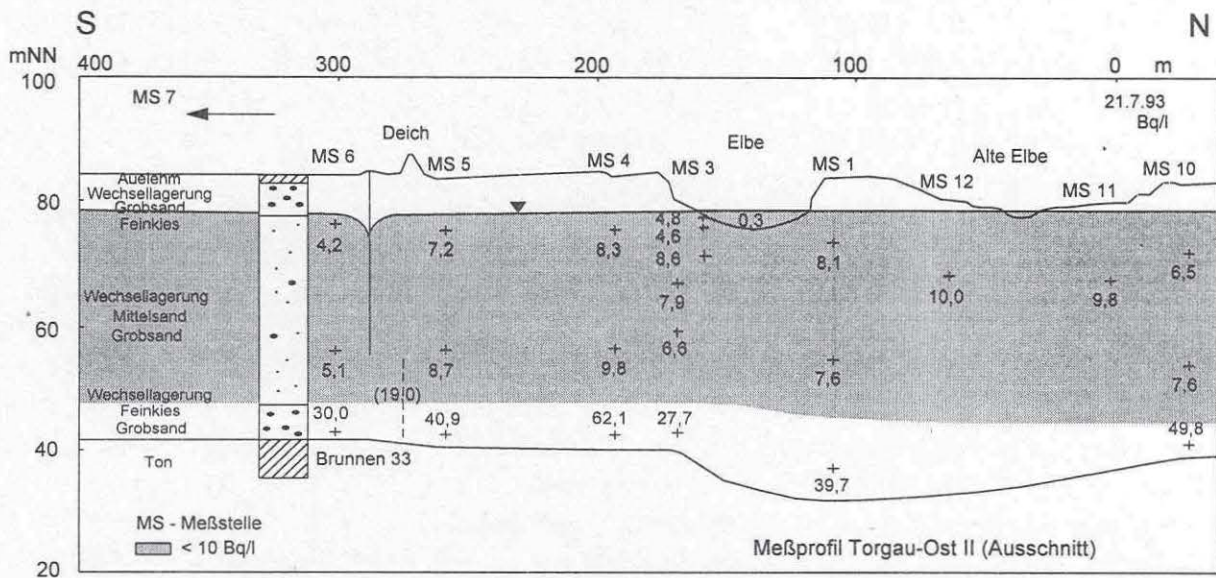


Abb. 4.2.6-2: Verteilung der Radonaktivitätskonzentration im Grundwasser am Meßprofil Torgau-Ost II (nach DEHNERT et al. 1997, geändert und ergänzt)

Lokale Inhomogenitäten

Die Standardabweichungen der obigen Ergebnisse betragen 21 % und 28 % und zeigen, daß die zur Bestimmung von Aufenthaltszeiten von Uferfiltrat notwendige makroskopisch konstante Radonemanation in den beiden Schichten entlang der 2 km

langen Meßprofile nicht vorhanden ist. Weiterführende Untersuchungen ergaben, daß eine solche Konstanz der Radonemanation auch im elbenahen Infiltrationsbereich nicht gegeben ist. Vom 18.5.96 bis zum 13.6.96 fiel die Elbe gleichmäßig um 3,41 m. Bei gleichzeitiger Förderung der 280 m vom Ufer der Elbe entfernten Brunnengalerie ergab sich eine 26 Tage andauernde Phase einer verhältnismäßig langsamen Grundwasserströmung von etwa 0,1 m/d. Bei dieser hydrologischen Situation konnten die durch die Emanation des Grundwasserleiters entstandenen und von Strömungsbewegungen weitgehend unbeeinflussten Radonaktivitätskonzentrationen des Grundwassers an allen Meßstellen bestimmt werden (wie auf Abb. 4.2.6-5 weiter unten noch gezeigt wird). Die mittlere Radonaktivitätskonzentration der 22 Meßstellen des Infiltrationsmeßprofiles betrug $(12,3 \pm 3,4)$ Bq/l ($n=22$). Wahrscheinlich führten lokale Inhomogenitäten in der Konzentrationsverteilung von Ra-226 und in der Korngrößenverteilung im Infiltrationsmeßprofil zu ständig wechselnden Radonaktivitätskonzentrationen innerhalb einer durch den lithologischen Aufbau des Grundwasserleiters vorgegebenen Größenordnung. Die für das Verfahren zur Bestimmung von Aufenthaltszeiten von Uferfiltrat notwendige makroskopische Homogenität der Radonemanation des Grundwasserleiters war nicht gegeben.

Vortäuschung eines Fließweges

Wenn im Grundwasser in der Nähe eines Oberflächengewässers niedrige Radonaktivitätskonzentrationen auftreten, müssen diese nicht in jedem Fall durch infiltrierendes Oberflächenwasser hervorgerufen werden. Sie können auch geogene Ursachen haben. Die Abb. 4.2.6-3 zeigt ein Beispiel. Die niedrigen Radonaktivitätskonzentrationen, die am Meßprofil Torgau-Ost I von der Elbe bis auf die Sohle des Grundwasserleiters und weiter in Richtung Brunnen weisen, suggerieren einen Fließweg, der nicht existiert (Fließweg A). So konnte mit Hilfe von Tritiummessungen (TRETTIN et al. 1995) gezeigt werden, daß es sich bei dem Wasser unterhalb der beiden Schluffschichten um ein elbeunterströmendes Grundwasser mit einem Alter von mehr als 35 Jahren handelt. Die Konzentrationsverteilung der Wasserinhaltsstoffe Chlorid, Sulfat, Kalzium, Natrium und Magnesium sowie der Kennwert elektrische Leitfähigkeit wiesen darauf hin, daß es sich nicht um Uferfiltrat handelt. Der Hauptfließweg führt in den oberen Metern des Grundwasserleiters von der Elbe zum Brunnen (Fließweg B), was anhand der Summenparameter DOC und AOX sowie der Wasserinhaltsstoffe EDTA und Atrazin gezeigt werden konnte (GRISCHEK et al. 1995, NEITZEL et al. 1995, NESTLER et al. 1996).

Aus diesem Beispiel kann die Empfehlung abgeleitet werden, in der Nähe eines Oberflächengewässers auftretende niedrige Radonaktivitätskonzentrationen im Grundwasser auf ihre Ursache hin zu prüfen, bevor diese zur Bestimmung der Aufenthaltszeit von Uferfiltrat herangezogen werden. Hierzu bestehen zwei Möglichkeiten: Einmal kann die Plausibilität eines möglichen Fließweges durch hydrogeologische Untersuchungsmethoden wie z.B. Untersuchungen zur Wasserbeschaffenheit oder Altersbestimmungen mit Isotopen überprüft werden. Zum anderen kann durch eine Wiederholungsmessung der Radonaktivitätskonzentration während einer Phase verhältnismäßig langsamer Infiltrationsgeschwindigkeit bis hin zum effluenten Zustand festgestellt werden, ob sich die Radonaktivitätskonzentration erhöht.

Kommt es trotz eines Wechsels des Strömungsregimes zu keiner Erhöhung der Radonaktivitätskonzentration, dann sind solche niedrigen Aktivitätskonzentrationen geogen verursacht.

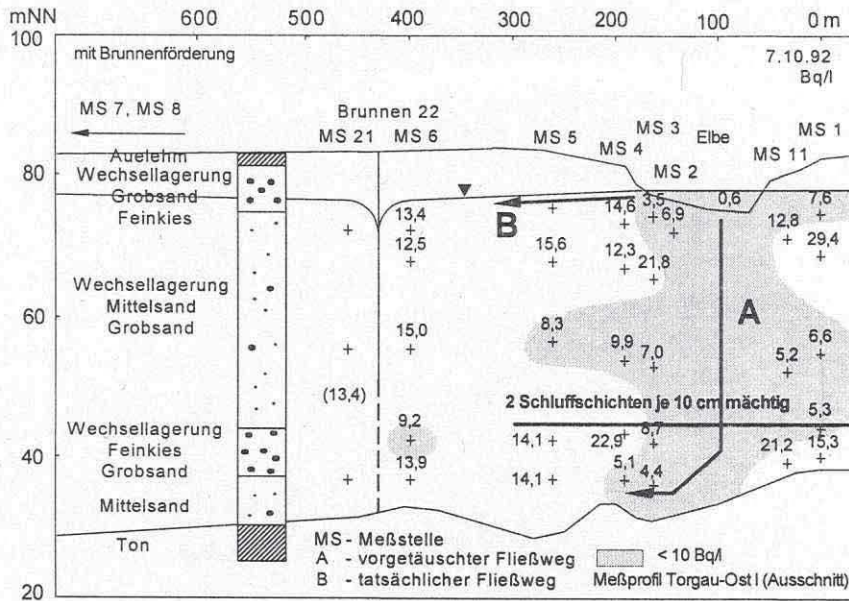


Abb. 4.2.6-3: Verteilung der Radonaktivitätskonzentration im Grundwasser am Meßprofil Torgau-Ost I (aus DEHNERT et al., 1996, geändert und ergänzt)

Die Messergebnisse der Radonaktivitätskonzentrationen am Infiltrationsmeßprofil wurden in Abb. 4.2.6-5 veranschaulicht und sollen im folgenden diskutiert werden:

Abb. 4.2.6-5 A beginnt mit der bereits weiter oben beschriebenen 26 Tage andauernden Phase einer verhältnismäßig langsamen Grundwasserströmung von etwa 0,1 m/d, bei der sich an jeder Meßstelle die von Strömungsbewegungen weitgehend unbeeinflussten Radonaktivitätskonzentrationen eingestellt hatten.

Die Abb. 4.2.6-5 B zeigt die Radonaktivitätskonzentrationsverteilung während der ansteigenden Hochwasserwelle kurz vor Erreichen des Scheitelpunktes. Der starke Abfall der Radonaktivitätskonzentrationen an allen Meßstellen markiert das schnell infiltrierte Elbewasser. Zur besseren Verdeutlichung wurden die Bereiche mit Radonaktivitätskonzentrationen von weniger als 8 Bq/l markiert, wobei die Markierung nicht gleichbedeutend mit dem Infiltrat der Hochwasserwelle ist.

Die Abb. 4.2.6-5 C zeigt die Radonaktivitätskonzentrationsverteilung während der zurückgehenden Hochwasserwelle. Ein Teil des jungen Infiltrats ist weiter in Richtung Brunnen (Brunnen außerhalb der Abbildung) geströmt, was zu einem Absinken der Radonaktivitätskonzentrationen in den Meßstellen 18/1, 19/1, 19/11, 4/1 und 4/11 geführt hat. In allen übrigen Meßstellen stiegen die Radonaktivitätskonzentrationen jedoch an, da sich die Grundwasserströmung aufgrund der zurückgehenden Hochwasserwelle verlangsamte, so daß sich die an den Meßstellen durch Emanation verursachten Radonaktivitätskonzentrationen wieder einzustellen begannen.

Durchgang einer Hochwasserwelle
Während des Durchgangs einer Hochwasserwelle der Elbe am Infiltrationsmeßprofil bei gleichzeitigem Betrieb der Brunnengalerie wurden durch mehrere Stichtagsmessungen die Radonaktivitätskonzentrationen im Grundwasser bestimmt und damit die Bewegung des Uferfiltrats beobachtet. Die Abb. 4.2.6-4 zeigt den zugehörigen Verlauf des Elbewasserstandes am 9 km entfernten Pegel Torgau.

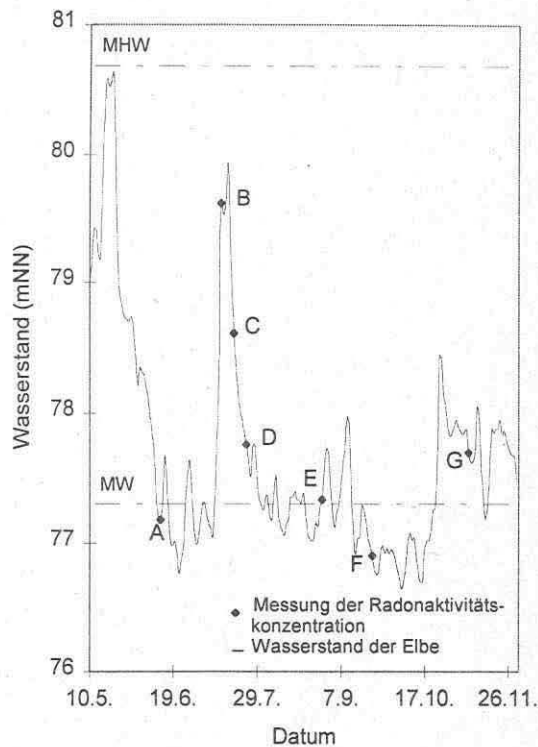


Abb. 4.2.6-4: Wasserstandsganglinie der Elbe am Pegel Torgau und Meßzeitpunkte für die Bestimmung der Radonaktivitätskonzentrationsverteilung am Infiltrationsmeßprofil (aus DEHNERT, 1998)

Die Abb. 4.2.6-5 E zeigt wieder eine normale, durch die Brunnen verursachte Infiltrationssituation bei Mittelwasser, wobei noch letzte Auswirkungen des Hochwassers beobachtet werden können. Die niedrigen Radonaktivitätskonzentrationen an den in Flußnähe gelegenen und mehrheitlich oberflächennah verfilterten Meßstellen markieren den Hauptfließweg des Uferfiltrats (2/1, 12/1, 13/1, 13/2, 13/3, 14/1, 14/2, 15/B, 15/11, 16/1, 16/11 und 17/11). Die vom Fluß weiter entfernten Meßstellen und die tiefer verfilterten Meßstellen zeigen hohe Radonaktivitätskonzentrationen. Diese befinden sich in der aus Mittel- und Grobsanden bestehenden Schicht, die langsamer durchströmt wird als die darüberliegenden Grobsande und Feinkiese, so daß sich die vom Oberflächenwasser unbeeinflusste Radonaktivitätskonzentration an diesen Meßstellen schneller einstellen konnte.

Bestimmung der Infiltrationsgeschwindigkeit

Das Strömungsregime am Infiltrationsmeßprofil wird durch das Zusammenwirken von Wasserstandsänderungen der Elbe und der Förderleistung der Brunnen bestimmt. Wegen der fehlenden makroskopischen Homogenität in der Radonemanation des Grundwasserleiters konnte die Aufenthaltszeit des Uferfiltrats nur für die flußsohlennahe Kolmationsmeßstelle 2/1 bestimmt werden. Die Radonaktivitätskonzentration an dieser Meßstelle wurde von 1994 bis 1996 für verschiedene hydraulische Situationen gemessen. Sie lag in diesem Zeitraum zwischen 1,4 Bq/l und 16,8 Bq/l. Die höchste gemessene Radonaktivitätskonzentration von 16,8 Bq/l wurde am 13.10.94 ohne Brunnenförderung bei einem über 28 Tage weitgehend gleichbleibendem Elbewasserstand von $(76,18 \pm 0,09)$ mNN (Tagesmittelwerte des Pegels Torgau) bestimmt und deshalb als eine von Uferfiltrat unbeeinflusste Radonaktivitätskonzentration angesehen. Mit dieser Radonaktivitätskonzentration wurde für alle verbleibenden Meßwerte der Kolmationsmeßstelle 2/1 unter der Annahme einer homogenen Radonemanation des Grundwasserleiters auf dem kurzen Fließweg von 0,80 m zwischen der Elbesohle und der Meßstelle die Aufenthaltszeit nach Gleichung (4) berechnet. Die zugehörigen Infiltrationsgeschwindigkeiten wurden unter der Annahme einer senkrechten Strömung bestimmt (Tab. 4.2.6-1). Die Aufenthaltszeiten schwanken zwischen 0,4 d und 10,4 d. Die zugehörigen Infiltrationsgeschwindigkeiten betragen 2 m/d und 0,1 m/d. Die Ergebnisse stimmen gut mit geohydraulischen Abschätzungen überein. So stieg die Infiltrationsgeschwindigkeit während des Hochwassers von 0,1 m/d auf 1,7 m/d an, um dann kontinuierlich auf 0,6 m/d zu fallen.

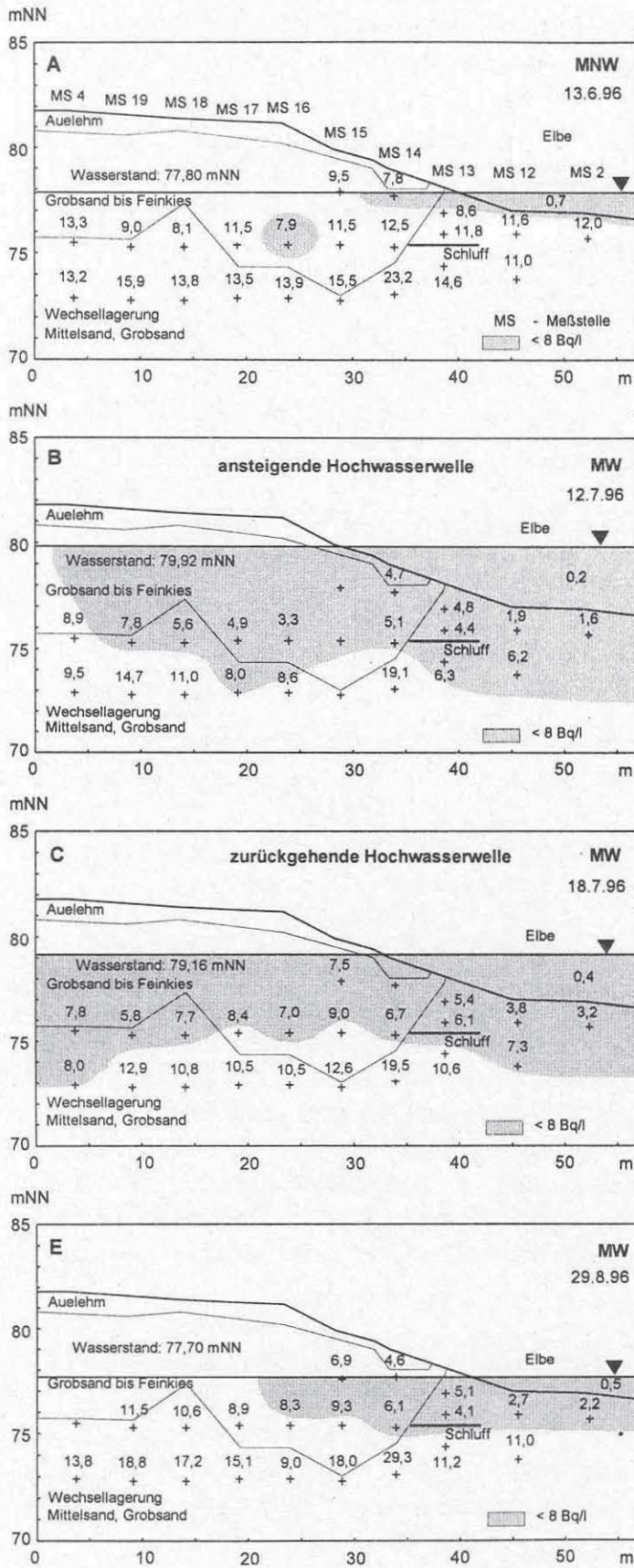


Abb. 4.2.6-5: Verteilung der Radonaktivitätskonzentration im Grundwasser am Infiltrationsmeßprofil Torgau zu verschiedenen Stichtagsmessungen (aus DEHNERT et al., 1996, geändert und ergänzt)

Tab. 4.2.6-1: Bestimmung von Aufenthaltszeiten des Uferfiltrats und Infiltrationsgeschwindigkeiten von Elbewasser an der Kolmationsmeßstelle 2/1, Meßprofil Torgau-Ost I (aus DEHNERT, 1998, geändert)

Datum	Abb. 4.2.6-5	Brunnen- förderung	Wasserstand der Elbe	Aktivitätskonz. [Bq/l]		t_a nach (3) [d]	$V_{\text{infiltration}}$ [m/d]
				MS 2/1	Elbe		
09.08.94		(Ruhe)	NW	7,8	0,3	3,4	0,24
08.09.94		Ruhe	MNW	11,4	0,4	6,2	0,13
13.10.94		Ruhe	MNW	16,8	0,7	-	-
30.03.95		Ruhe	MW	11,0	-	5,9 ¹⁾	0,14
20.09.95		Betrieb	MW	1,4	0,2	0,4	1,97
13.06.96	A	Betrieb	MNW	12,0	0,7	6,8	0,12
12.07.96	B	Betrieb	MW ²⁾	1,6	0,2	0,5	1,72
18.07.96	C	Betrieb	MW ³⁾	3,2	0,4	1,0	0,79
24.07.96	D ⁴⁾	Betrieb	MW	3,8	0,5	1,3	0,63
29.08.96	E	Betrieb	MW	2,2	0,5	0,6	1,27
22.09.96	F ⁴⁾	Ruhe	MNW	14,3	0,7	10,4	0,08
07.11.96	G ⁴⁾	Ruhe	MW	10,0	0,6	4,9	0,16

¹⁾ nach Gleichung (2)

²⁾ ansteigende Hochwasserwelle

³⁾ zurückgehende Hochwasserwelle

⁴⁾ Abb. enthalten im Teilbericht

Die berechnete Aufenthaltszeit des Uferfiltrats ist unabhängig von der Länge des tatsächlichen Fließweges und kann deshalb bei einer homogenen Radonemanation des Grundwasserleiters als verlässliches Ergebnis betrachtet werden. Die Berechnung von Fließgeschwindigkeiten setzt als zusätzliche Annahme die Kenntnis der genauen Länge des zurückgelegten Fließweges voraus. Für gewässersohlennahe Meßstellen kann eine senkrechte Strömung des Uferfiltrats angenommen werden, für tieferliegende Meßstellen wäre eine solche Annahme wegen der zunehmenden Horizontalkomponente der Strömung spekulativ. Die Bestimmung von Geschwindigkeiten sollte auch aus diesem Grund auf gewässersohlennahe Meßstellen beschränkt bleiben.

Schlußfolgerungen

- (1) Bei der Berechnung von Aufenthaltszeiten von Uferfiltrat ist die Einbeziehung der Aktivitätskonzentration des Oberflächenwassers erforderlich.
- (2) In Talgrundwasserleitern kann mit der Existenz einer entlang des Fließweges makroskopisch homogenen Radonemanation nicht gerechnet werden.
- (3) Niedrige Radonaktivitätskonzentrationen in der Nähe eines Flusses können gegen bedingt sein und nichtexistierende Fließwege vortäuschen.

-
- (4) Die vom Oberflächenwasser unbeeinflusste Radonaktivitätskonzentration kann während der Phase einer verhältnismäßig langsamen Grundwasserströmung an jeder Meßstelle gesondert bestimmt werden.
 - (5) Zur Vermeidung von Fehlern durch Verletzung der Randbedingungen sollte die Anwendung des Verfahrens auf den unmittelbaren Infiltrationsbereich des Oberflächengewässers beschränkt bleiben.

Wassergewinnung in Talgrundwasserleitern im Einzugsgebiet der Elbe

Gemeinsamer Abschlußbericht
zum Verbundforschungsvorhaben des Bundesministeriums
für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
(02 WT 9454)

Leitung des Verbundvorhabens
W. Nestler

Teilprojekt 1:

Charakterisierung der Mischungsverhältnisse im Grundwasserleiter/Verhalten der Summenparameter AOS und DOC bei der Uferfiltration

W. Nestler (Projektleiter), J. Dehnert, T. Grischek
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, LB Geotechnik & Wasserwesen
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden

Teilprojekt 2:

Verhalten von Einzelstoffen (Sulfonsäuren und halogenierten Carbonsäuren) bei der Uferfiltration

W. Walter (Projektleiter), P. Neitzel
Technische Universität Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft
Mommsenstraße 13, 01062 Dresden

Teilprojekt 3:

Dreidimensionale Beobachtung von Strömungsprozessen im Grundwasserleiter mittels geoelektrischer Computertomographie

F. Jacobs (Projektleiter), C. Reißmann
Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie
Augustusplatz 10 - 11, 04109 Leipzig

Teilprojekt 4:

Entwicklung und Anwendung isopenanalytischer Methoden zur Beurteilung von Herkunft und Bewegung von Grundwasser und Inhaltsstoffen

R. Trettin, K. Freyer (Projektleiter)
H.C. Treutler, G. Mallén, G. Strauch
UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Sektion Hydrogeologie, Hallesche Straße 44, 06246 Bad Lauchstädt
Sektion Analytik, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig