



Abschlussbericht zum 31. Dezember 2006

Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung, Teil I

Bayerisches Landesamt
für Umweltschutz



Abschlussbericht zum 31. Dezember 2006

Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung



**Bayerisches Landesamt
für Umwelt**

Augsburg, 2006

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Verfasser: Dr. Ronzon Mallick

Stand: Abschlussbericht zum 31. Dezember 2006

Zitervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umwelt

Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung, Augsburg, 2007

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2007

Gedruckt auf Recyclingpapier

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ziele des Untersuchungsvorhabens	5
2	Gesetzliche Grundlagen	7
2.1	Euratom-Richtlinie und Strahlenschutzverordnung	7
2.2	Trinkwasserverordnung	8
3	Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen	9
3.1	Chemisches Verhalten der Radionuklide	9
3.1.1	Uran	9
3.1.2	Thorium	9
3.1.3	Radium	10
3.1.4	Polonium und Blei	10
3.1.5	Radon	10
3.2	Radionuklidkonzentrationen im Wasser	10
3.3	Radionuklide in Rückspülschlämmen	15
3.4	Arten der Trinkwasseraufbereitung und die Entfernung von Radionukliden	17
3.4.1	Methoden und Materialien zur Trinkwasseraufbereitung	18
3.4.1.1	Ausfällen und Flockung von Eisen und Mangan	18
	Entfernung von Uran	18
	Entfernung von Radium	19
3.4.1.2	Arsenentfernung	19
3.4.1.3	Entsäuerung	19
	Entfernung von Uran	20
	Entfernung von Radium	20
3.4.1.4	Aktivkohle	20
	Entfernung von Uran	20
	Entfernung von Radon	20
3.4.1.5	Ionenaustauscher	21
	Entfernung von Uran	21
	Entfernung von Radium	21
3.4.1.6	Umkehrosmose	21
	Entfernung von Uran	22

2 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Entfernung von Radium	22
3.5 Verwertungsmöglichkeiten von Rückspülschlämmen	22
3.5.1 Abwasserentsorgung	22
3.5.2 Land- und Forstwirtschaft	22
3.5.3 Baustoffindustrie	23
4 Ergebnisse der eigenen Untersuchungen von Rückständen aus der Trinkwasseraufbereitung	25
4.1 Recherchen - Auswertung der Fragenkataloge	30
4.2 Radionuklide in Schlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung	32
4.2.1 Radionuklide in Schlämmen aus der Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung	32
4.2.1.1 Spezifische Aktivität	33
4.2.1.2 Dosisabschätzung	34
4.2.2 Radionuklide in Schlämmen aus der Entsäuerung	38
4.2.2.1 Spezifische Aktivität	38
4.2.2.2 Dosisabschätzung	40
4.2.3 Radionuklide in Schlämmen aus Kombinationen der verschiedenen Aufbereitungsarten	40
4.2.3.1 Spezifische Aktivität	41
4.2.3.2 Dosisabschätzung	42
4.2.4 Radionuklide in Schlämmen aus Anlagen mit Aktivkohle	43
4.2.4.1 Spezifische Aktivität	43
4.2.4.2 Dosisabschätzung	44
4.2.5 Radionuklide in Schlämmen aus anderen Arten der Trinkwasseraufbereitung	46
4.2.5.1 Spezifische Aktivität	46
4.2.5.2 Dosisabschätzung	47
4.3 Radionuklide in Schlämmen aus allen Trinkwasseraufbereitungen (Zusammenfassung)	48
4.3.1 Spezifische Aktivität	48
4.3.2 Dosisabschätzung	53
4.4 Radionuklide in Rückständen bei der gezielten Uranentfernung mit Hilfe von Anionenaustauschern	55
4.4.1 Spezifische Aktivität	56
4.4.2 Dosisabschätzung bei maximaler Beladung	57
4.4.3 Teilweise Beladung des Anionenaustauschers	58
4.5 Schwermetallgehalte in den untersuchten Rückspülschlämmen	59
4.6 Entsorgung der Rückspülschlämme	59

5	Radionuklid-Verteilung in Roh- und Reinwasser nach der Aufbereitung	61
5.1	Untersuchung von Radionukliden in Wasserproben	61
5.2	Dekontaminationsgrad und Dekontaminationsfaktor	63
5.3	Untersuchung des Trinkwassers und der Schlämme an einem ausgesuchten Standort	69
6	Klärschlammuntersuchungen	75
7	Wasser, Rückspülschlämme und Geologie	77
8	Zusammenfassung	79
9	Literaturverzeichnis	83
10	Anhang	89
A	Fragenkatalog an untersuchte Wasserversorgungsunternehmen	89
B	Radionukliddaten	91
B.1	Radionuklide aller Rückspülschlämme aus der Trinkwasseraufbereitung	91
B.1.1	Uran-Zerfallsreihe	91
B.1.2	Thorium-Zerfallsreihe	97
B.2	Radionuklide aller Rückspülschlämme aus der Mineralwasseraufbereitung	103
B.2.1	Uran-Zerfallsreihe	103
B.2.2	Thorium-Zerfallsreihe	103
B.3	Radionuklide der untersuchten Klärschlämme	103
B.3.1	Uran-Zerfallsreihe	103
B.3.2	Thorium-Zerfallsreihe	104
B.4	Radionuklide der untersuchten Roh- und Reinwasserproben	106
C	Ergebnisse der Dosisabschätzung	109
C.1	Dosiskoeffizienten für Inhalation und Ingestion	109
C.2	Dosisabschätzung für alle untersuchten Rückspülschlämme aus der Trinkwasseraufbereitung	109
C.2.1	Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,01 g/m ³	109
C.2.2	Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,003 g/m ³	115
C.3	Dosisabschätzung für alle untersuchten Rückspülschlämme aus der Mineralwasseraufbereitung	121
C.3.1	Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,01 g/m ³	121
C.3.2	Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,003 g/m ³	121
D	Schwermetallgehalte	123
D.1	LAGA Zuordnungswerte	123
D.2	Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung	124

4 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

D.2.1	Aluminium bis Mangan	124
D.2.2	Natrium bis TOC (Total Organic Carbon)	127
D.3	Schlämme aus der Mineralwasseraufbereitung	131
D.3.1	Arsen bis Eisen	131
D.3.2	Magnesium bis Zink	131
E	Masterarbeit – Frau Anja Landgraf	133

1 Einleitung

Seit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) im Juli 2001 [1] werden erstmals Vorschriften zum Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlenquellen bei Arbeiten in der StrlSchV aufgenommen.

In dem Untersuchungsvorhaben „Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftigen Rückständen“ [2] wurden von September 2002 bis Dezember 2004 die Expositionen bei Arbeiten nach Anlage XI, Teil A (radonbelastete Arbeitsplätze) und Teil B (Uran- und Thorium-Arbeitsplätze) in Bayern abgeschätzt. Zusätzlich haben wir überwachungsbedürftige Rückstände nach §§ 97 bis 102 StrlSchV in Bayern erfasst. Seit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung muss jeder Betrieb, bei dem überwachungsbedürftige Rückstände gemäß der Anlage XII, Teil A der Strahlenschutzverordnung bei Arbeiten anfallen, sicherstellen, dass durch die Verwertung oder Beseitigung dieser Rückstände eine effektive Dosis von 1 mSv pro Jahr für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht überschritten werden kann. Andernfalls hat der Betrieb Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung zu ergreifen [1].

Neben den in der Strahlenschutzverordnung aufgelisteten Rückständen (Positivliste der Anlage XII, Teil A [1]) existieren in Bayern aber auch Rückstände mit natürlicher Radioaktivität, die nicht in dieser Liste genannt werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens von 2002 – 2004 haben wir deshalb auch einige Rückstände, d.h. Rückspülschlämme aus Wasserwerken untersucht, die bei der Aufbereitung des Rohwassers in Wasserversorgungsunternehmen entstehen. Dabei werden zu hohe Eisen-, Mangan- und Arsengehalte aus dem Rohwasser entfernt, da sie zu Ablagerungen in den Rohrleitungen führen können, die den Durchflusswiderstand erhöhen und den Geschmack beeinträchtigen [3]. Über Anlagen zur Entsäuerung wird der pH-Wert des Wassers auf den in der Trinkwasserverordnung [4] geforderten Wert eingestellt. Durch diese Maßnahmen reichern sich in den Rückspülschlämmen neben Eisen und Mangan auch Radionuklide wie Uran und Radium an.

Erste frühere Untersuchungen des damaligen Landesamtes für Umweltschutz im Rahmen des Forschungsvorhabens „Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern“ (November 1997 bis November 2001) [5] hatten gezeigt, dass vor allem die Schlämme aus der Enteisung/Entmanganung spezifische Aktivitäten bis zu 6.300 Bq/kg TM (Trockenmasse) für Radium-226 und bis zu 8.400 Bq/kg TM für Radium-228 aufweisen. Die Schlämme aus der Entsäuerung weisen dagegen nur geringe spezifische für Radium-226 und Radium-228 (10 – 200 Bq/kg TM) auf. Die spezifischen Aktivitäten von Uran-238 wurden bei den untersuchten Schlämmen nicht ermittelt.

1.1 Ziele des Untersuchungsvorhabens

Im Rahmen dieses Projektes soll die Entfernung von Radionukliden aus dem Rohwasser und deren Anreicherung in Rückspülschlämmen aus kommerziellen Trinkwasseraufbereitungsanlagen wie Enteisung/Entmanganung, Arsenentfernung u. ä. untersucht, die bei der Entsorgung solcher Schlämme verursachte Dosis abgeschätzt und geeignete Entsorgungswege vorgeschlagen werden, die mit den Vorgaben der StrlSchV [1] übereinstimmen.

6 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Weitere Ziele dieses Forschungsvorhabens sind:

- Untersuchungen in Gebieten mit niedrigen Uranwerten im Wasser, aber mit erhöhten Nuklidgehalten aufgrund der Geologie, verstärkt durchzuführen. Möglicherweise besteht ein Zusammenhang zwischen der natürlichen Radioaktivität des Gesteinsuntergrundes, den spezifischen Aktivitäten der Radionuklide im Roh- und Reinwasser und der in den Rückspülschlämmen.
- Untersuchungen von Schlämmen aus der Entsäuerung
- Trinkwasseraufbereitungsanlagen zu ermitteln, die weitere Wasseraufbereitungstechniken verwenden, z. B. Aktivkohle, Ionenaustauscher o. ä.;
- die Bestimmung des Dekontaminationsgrades und Dekontaminationsfaktors der einzelnen Aufbereitungsarten.
- ein Forschungsprojekt des ehemaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LfW) zur gezielten Entfernung von Uran aus Trinkwasser zu begleiten. Dabei sollen Messungen von Wasserproben und Ionenaustauschermaterial durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser Daten wollen wir einen allgemein verbindlichen Entsorgungsweg für die anfallenden Rückstände gemäß Strahlenschutzverordnung und Abfallrecht ausarbeiten;
- zu klären, inwieweit eine Einleitung der Rückspülschlämme in die Kanalisation sich in den Klärschlämmen widerspiegelt. Deshalb sollen auch Klärschlämme untersucht werden.
- die jährliche effektive Dosis bei der Handhabung und der Entsorgung dieser Rückspülschlämme abzuschätzen.

2 Gesetzliche Grundlagen

2.1 Euratom-Richtlinie und Strahlenschutzverordnung

Im Jahr 1996 hat der Rat der Europäischen Union die Richtlinie 96/29/EURATOM [6], die auf der ICRP-Veröffentlichung 60 [7] beruht, zur „Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen“ verabschiedet.

Titel VII (Artikel 40 – 42) der EURATOM-Richtlinie gilt für erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche Strahlenquellen. Er behandelt Arbeiten, „bei denen das Vorhandensein natürlicher Strahlenquellen die Exposition der Arbeitnehmer oder von Einzelpersonen der Bevölkerung so erheblich erhöht ist, dass dies aus der Sicht des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden darf“ [6].

Dabei handelt es sich um Arbeiten (Artikel 40), bei denen die Arbeitnehmer oder eventuell Einzelpersonen der Bevölkerung einer Exposition durch Radonfolgeprodukten, einer Gammastrahlung oder sonstigen Expositionen an Arbeitsplätzen ausgesetzt sind. Außerdem zählen dazu Arbeiten, bei deren Ausübung Rückstände entstehen, die normalerweise nicht als radioaktiv gelten, jedoch natürliche Radionuklide enthalten, welche die Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung und von Arbeitskräften erheblich erhöhen.

Im Artikel 41 („Schutz vor Exposition durch terrestrische natürliche Strahlenquellen“) wird von den Mitgliedsstaaten für alle entsprechend eingestufteten Arbeiten die Schaffung geeigneter Vorkehrungen zur Überwachung der Expositionen, die Durchführung von Abhilfemaßnahmen zur Reduzierung der Expositionen und die Durchführung von Strahlenschutzmaßnahmen verlangt [6].

Deutschland hat mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung 2001 [1] diese o. g. Grundnormen der Richtlinie 96/29/EURATOM [6] in deutsches Recht umgesetzt.

In der StrlSchV (§§ 97 – 102) werden erstmals Regelungen zum Schutz von Mensch und Umwelt bei natürlichen Strahlungsquellen in die Verordnung aufgenommen, die bei „Arbeiten“ auftreten, ohne dass ihre radiologischen oder kernphysikalischen Eigenschaften genutzt werden. Die neuen Vorschriften gelten nur für diejenigen Arbeitsfelder und Verwendungen von Materialien, die ausdrücklich und im Einzelnen in den Vorschriften und den dazugehörenden Anlagen XI, Teil A und B und Anlage XII Teil A, genannt sind [1].

Durch Anwendung des § 102 („Öffnungsparagraph“) StrlSchV [1] können diese Regelungen auch auf Materialien mit natürlicher Radioaktivität angewandt werden, die nicht in Anlage XII, Teil A, der so genannten Positivliste aufgeführt sind. Dazu gehören z. B. Rückspülschlämme, Anionenaustauscherharze oder andere Materialien aus der Trinkwasseraufbereitung. Für sie kann die zuständige Behörde erforderliche Anordnungen treffen, wenn durch Arbeiten mit diesen Materialien oder durch die Ausübung von Arbeiten, bei denen solche Materialien anfallen, die Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung erheblich erhöht wird. Sie kann anordnen,

1. dass bestimmte Schutzmaßnahmen zu ergreifen sind,
2. dass die Materialien bei einer von ihr zu bestimmenden Stelle aufzubewahren oder zu verwahren sind, oder
3. dass und in welcher Weise die Materialien zu beseitigen sind.

Zur Verhinderung einer Dosisüberschreitung gelten folgende Überwachungsgrenzen:

- 1000 Bq/kg für die Verwertung und Beseitigung von Rückständen,
- 500 Bq/kg, wenn mehr als 5.000 Tonnen Rückstände im Jahr im Einzugsbereich eines nutzbaren Grundwasservorkommens deponiert werden,
- 200 Bq/kg, wenn bei der Deponierung im Straßen-, Wege- und Landschaftsbau im Einzugsbereich eines nutzbaren Grundwasserleiters eine Fläche von mehr als 1 Hektar mit Rückständen belegt wird.

2.2 Trinkwasserverordnung

Mit der EU-Trinkwasserrichtlinie (98/83/EG) [8] und der novellierten deutschen Trinkwasserverordnung von Mai 2001 (TrinkwV 2001 [4]) wurden neben den im Trinkwasser zu überwachenden mikrobiologischen und chemischen Parametern erstmals im § 7 in Verbindung mit der Anlage 3 zwei Parameter für die Radioaktivität eingeführt:

- Tritium (H-3) 100 Bq/l
- Gesamtrichtdosis 0,1 mSv/a.

Unter der Gesamtrichtdosis im Sinne der EU-Trinkwasserrichtlinie [8] wird die effektive Dosis eines Erwachsenen (50-Jahre-Folgedosis) infolge der Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit dem Trinkwasser mit Ausnahme von Tritium, Kalium-40, Radon und Radonzerfallsprodukten verstanden [9]. Diese beiden Parameter sind seit dem 01. Dezember 2003 auf ihre Einhaltung zu überwachen.

Die WHO (World Health Organisation) hat 1998 [10] einen lebenslang duldbaren Leitwert („guideline value“) von nur 2 µg Uran pro Liter eingeführt. Im Jahr 2003 [11] hat die WHO diesen niedrigen Wert korrigiert und auf 15 µg Uran pro Liter Wasser heraufgesetzt.

Das Umweltbundesamt [12] empfiehlt dagegen einen humantoxikologisch begründeten, lebenslang duldbaren gesundheitlichen Leitwert für Uran im Trinkwasser von 7 bis 10 µg Uran pro Liter und einen Maßnahmewert von 20 µg/l. Dieser Wert ist behördlicherseits gemäß den Vorgaben der Trinkwasserverordnung [4] zunächst für drei Jahre und gesundheitlich während einer Expositionsdauer von bis zu zehn Jahren duldbar.

Für Mineralwasser gilt die Mineral- und Tafelwasserverordnung [13]. Wenn ein Mineralwasserhersteller sein Mineralwasser mit einem Hinweis auf eine Eignung für die Säuglingsernährung in den Verkehr bringen möchte, darf die Aktivitätskonzentration von Radium-226 einen Wert von 125 mBq pro Liter und von Radium-228 einen Wert von 20 mBq pro Liter nicht überschreiten. Sind beide Radionuklide enthalten, muss folgender Sachverhalt gelten:

$$\left(\frac{C_{\text{Radium-226, tatsächlich}}}{C_{\text{Radium-226, höchst}}} + \frac{C_{\text{Radium-228, tatsächlich}}}{C_{\text{Radium-228, höchst}}} \right) \cdot 100 \leq 100\%$$

Dabei sind:

$C_{\text{Radium-226, tatsächlich}}$ bzw. $C_{\text{Radium-228, tatsächlich}}$ = die im Mineralwasser tatsächlich vorliegenden Konzentrationen von Radium-226 bzw. Radium-228,

$C_{\text{Radium-226, höchst}}$ bzw. $C_{\text{Radium-228, höchst}}$ = die zulässigen Höchstkonzentrationen von Radium-226 (125 mBq/l) bzw. Radium-228 (20 mBq/l).

Um diese zulässigen Höchstkonzentrationen nicht zu überschreiten, ist es möglich, dass die Mineralwasserhersteller Anlagen zur gezielten Radiumentfernung in Betrieb nehmen und dadurch Rückstände anfallen, die erhöhte spezifische Aktivitäten an natürlichen Radionukliden enthalten.

3 Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen

Zunächst soll kurz auf die Chemie der Radionuklide eingegangen und dann über die bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen der Radionuklidkonzentrationen in Roh- (Quellen, Brunnen), Rein- (Trinkwasser) und Mineralwasser berichtet werden. Zu diesem Sachverhalt sind nur einige wenige deutschland- und bayernweite Daten bekannt.

3.1 Chemisches Verhalten der Radionuklide

Die wichtigsten Radionuklide im Trinkwasser sind Uran-238, Uran-234, Radium 226, Radium-228, Radon-222, Blei-210 und Polonium-210.

3.1.1 Uran

Der mittlere Urangehalt der Erdkruste beträgt 2,7 g/t [14]. Es tritt in den Oxidationsstufen U^{3+} , U^{4+} , UO_2^{2+} (fünfwertiges U) und UO_2^{2+} (sechswertiges U) auf [15]. Natürliches Uran ist eine Mischung aus drei Uran-Isotopen: Uran-238 und Uran-234 aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe und Uran-235 aus der Actinium-Zerfallsreihe. Im Grundwasser kommt Uran unter oxidierenden Bedingungen als sechswertiges Uran in Form der stabilen, gut löslichen und negativ geladenen Uranylkarbonatkomplexe vor. In karbonatarmen Wässern bildet vierwertiges Uran positiv geladene Hydroxokomplexe [16].

In calciumcarbonatreichem Wasser ist sechswertiges Uran zu 99 % als Uranylcarbonatkomplex gebunden. Allgemein kann gesagt werden, dass Uranylkarbonatkomplexe die Adsorption von Uran an Kolloide verhindern [17]. Huminstoffe in Form von Torf und organischem Material absorbieren Uran aus dem Grundwasser [18].

Nuklidspezifisch findet sich in natürlichen Wässern ein Überschuss an Uran-234 gegenüber Uran-238. Dies ist auf den so genannten Rückstoß-Effekt oder Szilard-Chalmers-Effekt beim radioaktiven Zerfall zurückzuführen [18]. Dabei wird das Kristallgitter durch den radioaktiven Zerfall und den Rückstoß des Mutter-Nuklids (Uran-238) zerstört. Das Tochternuklid (Uran-234) wird im Kristallgitter verlagert und ist dadurch leichter aus dem Gestein auszulaugen und ins Wasser überzuführen. Im Grundwasser sind Uran-234/Uran-238-Verhältnisse von 0,5 bis 12 zu finden. Unter reduzierenden Bedingung liegt Uran dagegen als relativ unbewegliches vierwertiges Uran vor. Es neigt dazu, auf Mineraloberflächen adsorbiert oder durch Kolloide aus dem Wasser entfernt zu werden [16].

Im menschlichen Körper können die Radionuklide des Urans aufgrund ihrer chemischen und radiologischen Eigenschaften zu Schädigungen führen. Uran wird aufgrund der Radioaktivität in Knochen inkorporiert und kann Knochenkrebs auslösen, die Chemotoxizität führt zu Nierenschädigungen. Die Chemotoxizität steigt mit ansteigender Löslichkeit von Uran im Wasser an [16].

3.1.2 Thorium

Der mittlere Thoriumgehalt in der Erdkruste beträgt 9,6 g/t [14]. Thorium besteht aus sechs in der Natur vorkommenden Isotopen: Thorium-232 (Mutternuklid der Thorium-Zerfallsreihe), Thorium-234, Thorium-231, Thorium-230, Throium-228 und Thorium-227 [15].

Im Allgemeinen kommt in der Natur nur vierwertiges Thorium vor. Dieses neigt wie vierwertiges Uran zur Adsorption an Mineraloberflächen, Sedimenten und an Partikeln und wird dadurch aus dem Grundwasser entfernt.

Im Grundwasser ist daher die Thorium-Konzentration deutlich niedriger als die Uran-, Radium- und Radon-Konzentration [18].

3.1.3 Radium

Radium ist ein natürlich vorkommendes Element mit den drei Isotopen, Radium-224, Radium-226 und Radium-228. Radium tritt nur im Grundwasser auf. Hier liegt wegen des bereits früher beschriebenen Rückstoßeffect ein Überschuss an Radium-226 vor (bessere Löslichkeit von Radium-226 gegenüber dem Mutternuklid Thorium-230) [18]. In hoch salinen (salzhaltigen) Wässern findet sich ein hoher Radium-Gehalt. Schwach mineralisierte Wässer enthalten dagegen nur extrem niedrige Radium-Gehalte, da das Radium hier immobil ist und eine starke Neigung zur Adsorption an feste Oberflächen aufweist. Bei Reaktionen zur Ausfällung von Barium- und Strontiumsulfat wird Radium aufgrund der chemischen Ähnlichkeit (Erdalkalielelement) mit ausgefällt und somit aus dem Wasser entfernt. Auch an ausfallende Eisen- und Mangan-Oxyhydroxide wird Radium angelagert [16].

Im menschlichen Körper wird Radium im Skelett angereichert und kann Knochenkrebs auslösen [16].

3.1.4 Polonium und Blei

Blei-210 wird schnell durch Adsorption an Partikel (Tonminerale, organische Reste, Kolloide) aus dem Wasser entfernt und kann mit Eisenhydroxid und Manganoxiden ausfallen. Es weist nur eine kurze Verweilzeit im Süßwasser auf und wird nach der Bildung gleich an benachbarte feste Oberflächen adsorbiert. Deshalb ist die Blei-210-Konzentration im Grundwasser gewöhnlich sehr niedrig. Auch Polonium-210 wird an Partikel, Oberflächen und Kolloide adsorbiert und damit aus dem Grundwasser entfernt [14], [18].

3.1.5 Radon

Radon ist ein radioaktives Edelgas, das in Gesteinen, Böden, Wasser und Luft vorkommt. Die drei Isotope: Radon-222 aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe, Radon-220 (Thoron) aus der Thorium-Zerfallsreihe und Radon-219 (Actinon) aus der Uran-Actinium-Zerfallsreihe sind die einzigen gasförmigen Zerfallsprodukte dieser Reihen [19], [20].

Radon-222 entsteht aus dem radioaktiven Zerfall von Radium-226. Als Edelgas ist es sehr mobil und diffundiert aus den verschiedenen Gesteinsschichten in die umgebende Bodenluft und löst sich im Grundwasser. Hohe Radon-Gehalte treten daher in der Nähe von Gesteinen mit erhöhten Urangehalten auf [14].

In Rohwässern von Anlagen der Wassergewinnung und -aufbereitung ist Radon-222 ebenfalls in unterschiedlichen Konzentrationen gelöst. Dabei kann Radongas aus exponierten Wasseroberflächen (z. B. Trinkwasserbehälter, Filterbecken, Aufbereitungsanlagen u. ä.) in die Raumluft übertreten und sich in der Anlage verteilen.

3.2 Radionuklidkonzentrationen im Wasser

Die Radioaktivität in Grund- und Trinkwasserproben wird seit vielen Jahren im Rahmen der Überwachung der Umweltradioaktivität untersucht. Alle natürlichen Wässer und damit auch alle Trinkwässer enthalten natürliche Radionuklide. Sie können in zwei Gruppen eingeteilt werden [21]:

Kosmogene Radionuklide wie z. B. Tritium (H-3), Beryllium-7 und Kohlenstoff-14 werden durch die Einwirkung der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre ständig nachgebildet. Mit dem Niederschlag gelangen diese Radionuklide auf die Erdoberfläche und sind nur in Oberflächenwässern nachweisbar [21].

Primordiale Radionuklide sind sehr langlebig und waren schon bei der Entstehung der Erde vorhanden. Dazu zählen Radionuklide wie Kalium-40, Uran-238, Uran-235 und Thorium-232. Sie sind Bestandteil der Erdkruste und in allen Umweltmedien vertreten. Die primordialen Radionuklide und ihre Zerfallsprodukte gelangen über Lösungs- und Transportvorgänge ins Grundwasser, ins Oberflächenwasser und auf diese Weise ins Trinkwasser [21]. In Tab. 1 sind die Aktivitätskonzentrationen der beiden Radionuklidarten in verschiedenen Gewässerarten, wie Grundwasser, Oberflächenwasser und Meerwasser aufgelistet

Tab. 1: Natürliche Radionuklide in Gewässern [22]

<i>Gewässer</i>	<i>Radionuklid</i>	<i>Schwankungsbereich [mBq/l]</i>
Grundwasser	Tritium	< 40 – 400
	Kalium-40	11 – 15.000
	Uran-238	1 – 200
	Radium-226	< 4 – 400
	Radon-222 und Folgeprodukte	2.000 – 1.500.000
	Thorium-232	0,4 – 70
Oberflächenwasser	Tritium	10 - 100
	Kalium-40	40 – 2.000
	Uran-238	< 2 – 40
	Radium-226	< 2 – 30
	Radon-222 und Folgeprodukte	< 400 – 2.000
	Blei-210	2 – 70
	Thorium-232	0,04 – 0,4
	Radium-228	< 1 - 10
Meerwasser (Nord- und Ostsee)	Tritium	20 – 100
	Beryllium-7	1,1 – 3,4
	Kohlenstoff-14	5,5 – 6,7
	Kalium-40	11.800 – 12.300
	Rubidium-87	106
	Uran-238	40 – 44
	Thorium-234	0,6 – 6,8
	Uran-234	47
	Thorium-230	0,0025
	Radium-226	0,8 – 8
	Blei-210	0,4 - 2
	Polonium-210	0,6 – 1,9
	Thorium-232	0,0004 – 0,029
	Radium-228	0,8 – 8
	Thorium-228	0,004 – 0,3
	Uran-235	1,9

Mit Ausnahme von den Uranisotopen wurden natürliche Radionuklide im Trinkwasser bisher nicht routinemäßig überwacht. Über den Gehalt an natürlichen Radionukliden im Trinkwasser in Deutschland gibt es Ergebnisse aus Untersuchungen des Instituts für Wasser-, Boden- und Lufthygiene (WaBoLu) des ehemaligen Bundesgesundheitsamtes und des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS). Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen nicht im radioaktiven Gleichgewicht befinden. Die Ergebnisse einiger dieser Untersuchungen möchten wir hier kurz vorstellen. In Tab. 2 sind die Konzentrationen von natürlichen Radionukliden im Trinkwasser in Deutschland aufgeführt.

12 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 2: Konzentration natürlicher Radionuklide im Trinkwasser in Deutschland [21]; *Schätzwerte

Radionuklid	Median [mBq/l]		Schwankungsbereich [mBq/l]
	Deutschland/ Gesamtgebiet	Sachsen	
Kalium-40	70		3 - 1.200
Uran-238	5	16	< 0,1 - 500
Uran-234	5	18	< 0,8 - 500
Thorium-230	0,5	2	0,1 - 10
Radium-226	5	19	< 0,4 - 300
Radon-222	5.900	19.000	< 1.000 - 1.500.000
Blei-210	1	2	< 0,2 - 200
Polonium-210	0,5	2	< 0,1 - 100
Thorium-232	0,1*	0,5	< 0,1 - 4
Radium-228	3*	12	< 4 - 130
Thorium-228	0,2*	1	< 0,2 - 20
Uran-235	0,3	1	< 0,1 - 30

Bereits aus den 50er Jahren liegen Messwerte der Radium-226-Konzentration in Trinkwässern in Deutschland vor. Diese liegen zwischen 0,4 bis 12 mBq/l, wobei die Konzentrationen natürlicher Radionuklide in Oberflächenwässern niedriger sind als in Grundwässern [22].

1987 haben Gans et al. [23] die Radium-226-Konzentration u. a. in Trinkwasser, Mineralwasser, Brunnen und Quellen gemessen. Für Radium-226 ergaben sich bei 1.476 Trinkwasserproben (Leitungswasser) aus Deutschland ein Maximalwert von 160 mBq/l und ein Median von 4,1 mBq/l. Bei 256 Mineralwasserproben aus Deutschland lag der Maximalwert bei 1.280 mBq/l und der Median bei 25 mBq/l.

Für Rohwasserproben aus Brunnen und Quellen haben Gans et al. [23] Radium-226-Konzentrationen von < 1,5 bis 6.290 mBq/l mit einem Median von 153,1 mBq/l für ganz Deutschland erhalten. Aus Bayern wurden 53 Proben analysiert und Radium-226-Konzentrationen von 1,11 bis 239 mBq/l mit einem Median bei 24,7 mBq/l ermittelt.

Gans et al. [23] haben auch in Trinkwasserproben Uran-234- und Uran-238-Konzentrationen bestimmt. Diese Messungen ergaben Maximalwerte von 150 bzw. 99 mBq/l und Mediane von 12 bzw. 8,8 mBq/l. Umgerechnet entsprechen diese Werte einem Maximum von 8 µg/l und einem Mittel von 0,7 µg/l. Des Weiteren wurden in 27 Mineralwässern ebenfalls die Uran-234- und Uran-238-Konzentrationen bestimmt. Die Maximalwerte liegen mit 224 mBq/l und 144 mBq/l für U-234 bzw. U-238 etwas höher als im Trinkwasser, dagegen sind die Mittelwerte mit 8,7 mBq/l (Uran-234) und 4,4 mBq/l (Uran-238) etwas niedriger.

Becker et al. [24] haben für den natürlichen Urangehalt im Trinkwasser einen Maximalwert von 48,8 µg/l (entspricht 610 mBq/l) ermittelt. Der Median liegt bei 4,7 µg/l (entspricht 59 mBq/l). Die DVGW [25] gibt Urangehalte zwischen 0,01 µg/l (entspricht 0,12 mBq/l) und 5 µg/l (entspricht 62 mBq/l), geologisch bedingt bis 50 µg/l (entspricht 620 mBq/l), an.

Bünger [26] hat 1997 Trinkwasserproben verschiedener Wasserversorgungsanlagen im Süden Sachsens (im Erzgebirge, im Vorland des Erzgebirges und im Vogtland) untersucht. Der geologische Untergrund hat dort im Vergleich zum übrigen Deutschland erhöhte Gehalte natürlicher Radionuklide. Außerdem finden sich dort Hinterlassenschaften des ehemaligen Uranerzbergbaus. In den Roh- und Trinkwässern aus diesen Gebieten werden erhöhte Gehalte an Uran und teilweise an Thorium und deren Zerfallsprodukten festgestellt. Er hat für Radium-226 einen Maximalwert von 190 mBq/l und einen Median von 12 mBq/l ermittelt. Für Uran-234 und Uran-238 hat er einen Maximalwert von 390 mBq/l bzw. von 370 mBq/l und einen Median von 18 bzw. 16 mBq/l erhalten. Die Mediane der Untersuchungen von Bünger [26] sind deutlich höher als die von Gans et al. [23] (Tab. 3).

In einem zweiten Messprogramm hat Bünger [26] 52 Roh- und Trinkwasserproben aus 34 Wasserversorgungsunternehmen untersucht. Die Maximalwerte für Uran-238 und Radium-226 liegen in diesen Proben bei 480 mBq/l bzw. 260 mBq/l und die Mediane bei 19 bzw. 31 mBq/l.

Merkel [27] gibt für Uran im unbeeinflussten Grundwasser in Deutschland Konzentrationen von $< 1 \mu\text{g/l}$ bis $> 100 \mu\text{g/l}$ (entspricht 12,4 mBq/l bis 1.245 mBq/l) an. Tafel-, Mineral- und Heilwasser kann erhöhte Uran- und Radiumgehalte enthalten, da diese Wässer aus tieferen Grundwasserleitern stammen und eine größere Verweilzeit im Untergrund aufweisen. Dies könnte zu einer erhöhten Aufnahme dieser Radionuklide führen.

Gellermann & Stolz [28] haben 1997 die Ergebnisse von Messungen der Uranisotope Uran-238 und Uran-234 in Grundwässern und in Flüssen Ostdeutschlands präsentiert. Die Urankonzentrationen im Grundwasser liegen in einem Wertebereich von 0,1 mBq/l bis $> 1.000 \text{ mBq/l}$, mit einem Median von 12 mBq/l. Für Flusssysteme Ostdeutschlands geben sie Werte zwischen 5 bis 50 mBq/l an, die wesentlich niedriger als die Werte im Grundwasser sind.

In natürlichen Wässern z. B. Grundwässer beobachtet man stets eine Abweichung vom radioaktiven Gleichgewicht zwischen Uran-238 und Uran-234 aufgrund des so genannten Rückstoß-Effektes (S. 14). Bünger [26] nennt ein Aktivitätsverhältnis von Uran-234/Uran-238 in Trinkwässern von 1,1 bis 1,5. Gellermann & Stolz [28] haben für ihre untersuchten Grundwasserproben Aktivitätsverhältnisse von 0,85 bis 12,6 mit einem Median bei 1,66 berechnet.

Das Bayerische Landesamt für Umwelt [29] hat im Jahr 2002 Trinkwasserproben von einigen Wasserversorgungsunternehmen aus Nordbayern untersucht. Diese Messungen von Roh- und Trinkwasserproben lieferten für Uran-238 einen Maximalwert von 360 mBq/l im Rohwasser und von 376 mBq/l im Trinkwasser. Der Median im Rohwasser liegt bei 18,5 mBq/l und im Trinkwasser bei 16 mBq/l. Für Radium-226 hat sich ein Maximalwert im Rohwasser von 330 mBq/l und im Trinkwasser von 320 mBq/l ergeben. Bei Radium-226 liegt der Median bei 13 mBq/l im Rohwasser und bei 4,8 mBq/l im Trinkwasser. Radium-228 weist einen Maximalwert von 110 mBq/l im Rohwasser und von 57 mBq/l im Trinkwasser auf; die Mediane liegen bei 11 bzw. 7 mBq/l.

Das damalige Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft [30] hat ebenfalls Untersuchungen von Uran im Grund- und Trinkwasser durchgeführt. Diese ergaben, dass vor allem in Nordbayern (Franken), teilweise auch in Schwaben und Niederbayern, erhöhte Uranwerte von 20 bis 100 $\mu\text{g/l}$ (entspricht: 250 bis 1.245 mBq/l) im Grund- und Trinkwasser zu finden sind. Dagegen liegen in den Gebieten Ostbayerns, wie dem Fichtelgebirge, dem Oberpfälzer Wald und dem Bayerischen Wald die Uranwerte unterhalb der Nachweisgrenze bzw. zwischen $< 0,2$ bis $2 \mu\text{g/l}$ (entspricht 2,5 bis 25 mBq/l). Insgesamt liegen die Werte für Uran-238 zwischen $< 0,2$ und $65 \mu\text{g/l}$ (entspricht 2,5 bis 810 mBq/l).

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gibt auf seiner Internetseite Radium-226-Konzentrationen im Trinkwasser der Bundesrepublik Deutschland und der einzelnen Bundesländer an. Für die Bundesrepublik Deutschland liegt der Maximalwert aus 1.734 Proben bei 260 mBq/l und der Median bei 4,8 mBq/l. Für Bayern geben Sie einen Maximalwert aus 192 Proben von 159 mBq/l und einen Median von 4,07 mBq/l an [31].

Das BfS misst momentan die Aktivitätskonzentrationen verschiedener Radionuklide in Roh- und Trinkwasserproben in ganz Deutschland. Das BfS hat uns die Messwerte von bisher 58 untersuchten Wasserversorgungsanlagen in Bayern zur Verfügung gestellt [32]. Es hat sich ein Maximalwert für Uran-238 von 306 mBq/l im Rohwasser und von 296 mBq/l im Trinkwasser ergeben. Die Mediane liegen bei 9,4 mBq/l für Rohwasser und von 13 mBq/l für das Trinkwasser. Der Median des Aktivitätsverhältnisses Uran-234/Uran-238 befindet sich bei 1,4 für Rohwasser und bei 1,1 für Trinkwasser. Für Radium-226 bzw. Radium-228 ergaben sich Maximalwerte von 300 mBq/l bzw. 128 mBq/l für Rohwasser und 260 mBq/l bzw. 55 mBq/l für Trinkwasser, mit einem Median von 7 mBq/l bzw. 6 mBq/l im Rohwasser und 5 mBq/l bzw. 4 mBq/l im Trinkwasser.

Hingmann et al. [33] haben die vom BfS ermittelten Aktivitätskonzentrationen von Radionukliden in Trinkwässern in Hessen ausgewertet. Es hat sich für Uran-238 und Radium-226 Maximalwerte von 78 mBq/l bzw. 14 mBq/l und Mediane von 1,9 mBq/l bzw. 4,1 mBq/l ergeben, die niedriger sind als die Mediane für Deutschland.

14 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Michel [34] gibt für Uran-238 und Radium-226 im Trinkwasser in Deutschland spezifische Aktivitäten von 0,5 bis 300 mBq/l bzw. 0,4 bis 690 mBq/l an. Radium-228 weist spezifische Aktivitäten von 0,4 bis 300 mBq/l auf.

In Bayern kommen in etwa 35 Wasserversorgungsunternehmen Aktivitätskonzentrationen für Uran-238 von > 190 mBq/l (entspricht > 15 µg/l) vor [30]. Die übrigen Untersuchungen haben vergleichbare Ergebnisse für Bayern gezeigt. Die Uran-238- und Radium-226-Aktivitätskonzentrationen in Bayern sind höher als die für Deutschland und Hessen angegebenen Werte (Tab. 3). Sie sind aber vergleichbar mit den Werten aus Sachsen. Dieser Befund deutet auf eine ähnliche Geologie in den Untersuchungsgebieten in Sachsen (Erzgebirge, Vogtland) und einigen Teilen Bayerns (Fichtelgebirge, Oberpfälzer Wald, Bayerischer Wald) hin. Die Werte aus Gans et al. [23] haben für Bayern niedrigere Aktivitätskonzentrationen für Radium-226 ergeben als in den neueren Studien [29], [30] und [32].

Im Zeitraum September 2000 bis November 2001 hat das Bundesamt für Strahlenschutz [35] nach dem Zufallsprinzip in mehr als 150 Getränkemärkten und Filialen bekannter Einzelhandelsketten in der gesamten Bundesrepublik Deutschland insgesamt 401 Mineralwässer eingekauft und die Aktivitätskonzentrationen der oben genannten Radionuklide bestimmt. Von den untersuchten Mineralwässern wurden 366 in Deutschland produziert - die restlichen 35 Mineralwassermarken waren Importwässer aus 10 europäischen Staaten. Leider werden in [35] keine Aktivitätskonzentrationen der einzelnen Radionuklide angegeben. Rühle [36] gibt für Radium-228 in den untersuchten Mineralwässern < 5 bis 930 mBq/l für Radium-228 an. Die übrigen Radionuklide bestätigen die Ergebnisse früherer Untersuchungen, wie Gans et al. [23].

Die Aktivitätskonzentrationen der im Mineralwasser enthaltenen natürlichen Radionuklide, wie z. B. Uran-238, Uran-235, Uran-234, Radium-226, Radium-228, Blei-210, Polonium-210 und Actinium-227 variieren in Abhängigkeit von den örtlichen hydrogeologischen Gegebenheiten und unterschiedlichen Gehalten der Untergrundgesteine an Uran und Thorium in weiten Grenzen. Charakteristisch ist daher eine sehr hohe Bandbreite der Messwerte für verschiedene Mineralwässer. Höhere Radioaktivitätswerte treten oftmals in Wässern aus granitisch geprägten Gebieten auf, z. B. im Erzgebirge, Vogtland, Fichtelgebirge, Bayerischen Wald und Schwarzwald [35].

Für Mineralwasser nennt Michel [34] spezifische Aktivitäten für Uran-238 von 0,4 bis 1.200 mBq/l und für Radium-226 von 2 bis 500 mBq/l.

Die von uns in der Literatur recherchierten Radionuklidkonzentrationen im Roh- und Trinkwasser sind in der Tab. 3 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 3: Konzentration natürlicher Radionuklide im Roh- und Trinkwasser von Deutschland und einigen Bundesländern verschiedener Autoren; RoW = Rohwasser, TW = Trinkwasser

<i>Radionuklid</i>	<i>Median [mBq/l]</i>	<i>Maximalwert [mBq/l]</i>	<i>Gebiet</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Autor</i>
Uran-238	16	370	Sachsen (TW)	40	[26]
Radium-226	12	190			
Uran-238	31	480		52	[26]
Radium-226	19	260			
Uran-238	8,8	99	Deutschland (TW)	1476	[23]
Radium-226	4,1	159			
Uran-238	—	—	Bayern (TW)	241	[23]
Radium-226	8,5	137			
Radium-226	24,7	239	Bayern (RoW)	53	[23]
Uran-238	59	610	Deutschland (TW)	2751	[24]
Uran	—	> 1245	—		[27]
Uran-238	12	> 1000	Ostdeutschland (TW)	172	[28]
Uran-238	18,5	360	Bayern (RoW)	12 + 9	[29]
Radium-226	13	330			
Radium-228	11	110			
Uran-238	16	370	Bayern (TW)	12 + 9	[29]
Radium-226	4,8	320			
Radium-228	7	57			
Uran-238	—	810	Bayern (TW)		[30]
Radium-226	4,8	260	Deutschland	1734	[31]
Radium-226	4,07	159	Bayern	192	
Uran-238	9,4	306	Bayern (RoW)	58	[32]
Radium-226	7	300			
Radium-228	6	128			
Uran-238	13	296	Bayern (TW)	58	[32]
Radium-226	5	260			
Radium-228	4	55			
Uran-238	1,9	78	Hessen (TW)	43	[33]
Radium-226	4,1	14			
Radium-228	3,6	44			
Uran-238	—	300	Deutschland		[34]
Radium-226	—	690			
Radium-228	—	300			

3.3 Radionuklide in Rückspülschlämmen

(Filter-)Rückspülschlämme oder auch Wasserwerksschlämme sind Rückstände, die bei der Aufbereitung des Trinkwassers anfallen [37]. Laut einer Studie des ehemaligen ESWE-Instituts (heute: Rhine Main Water Research) [38] fielen 1991 in Deutschland etwa 125.000 t Trockenmasse (TM) dieser Rückstände an. Im Wesentlichen lassen sich folgende Arten von Rückspülschlämmen klassifizieren [39]:

16 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

1. Rückstände aus der Enthärtung und Entkarbonisierung
2. Rückstände aus der Entsäuerung
3. Rückstände aus der Flockung mit Eisen- oder Aluminiumsalzen
4. Rückstände aus der Enteisung/Entmanganung

Die verschiedenen Arten der Trinkwasseraufbereitung und deren Effizienz der Radionuklidentfernung beschreiben wir detailliert im Abschnitt 3.4..

Im Allgemeinen ist jedoch der Dekontaminierungseffekt für natürliche Radionuklide im Trinkwasser bei der Aufbereitung der Rohwässer gering. Dieser nimmt in der Reihenfolge Blei-210 > Radium-226 > Polonium-210 > Thoriumisotope > Uranisotope ab [26].

Gans et al. [23] haben in vier Wasserwerken die Radium-226-Konzentration in Roh- und Reinwasserproben ermittelt. Diese liegt zwischen 4 und 260 mBq/l im Rohwasser und zwischen 4 und 130 mBq/l im Reinwasser. Bei der Aufbereitung in diesen Wasserwerken handelt es sich um Enteisungsanlagen und die Radiumkonzentration des Rohwassers konnte bei der Aufbereitung um 50 % reduziert werden. Die Radium-226-Konzentrationen im Trockenschlamm liegen bei Werten von 200 bis 7.500 Bq/kg TM und für Radium-228 von 200 bis 5.200 Bq/kg TM.

Bünger [40] gibt für Filterkiese Radium-226-Gehalte von 49 Bq/kg bis 1.130 Bq/kg an. Dabei ist die Standzeit der Filterkiese von Bedeutung, d.h. mit der Standzeit erhöht sich die spezifische Aktivität von Radium-226 in den Filterkiesen. Barthel et al. [41] geben die anfallenden Rückspülschlammengen mit 0,1 t/a bis 100 t/a (TM) an. Als Entsorgungswege werden genannt: 20 % Ableitung in Klärwerke, Kanalisation, natürliche Vorfluter; 30 % Ablagerung auf Deponien; 10 % Zuschlagsstoff in der Baustoffindustrie und 40 % andere Entsorgungswege (z. B. Streichmasse in der Papierindustrie).

Haberer [42] hat Rückspülschlämme aus 80 verschiedenen deutschen Wasserwerken auf Radium-226 untersucht. Radium-226 tritt dabei in den Grundwässern nur in sehr kleinen Konzentrationen, dagegen in den Rückspülschlämmen stark angereichert auf. Von den 80 untersuchten Schlämmen stammen 68 Proben aus Anlagen zur Enteisung/Entmanganung, fünf Schlämme aus Flockungsanlagen und sieben Schlämme aus Anlagen zur Teilenthärtung. Für die Schlämme ergeben sich spezifische Aktivitäten zwischen 5 und 693 Bq/kg Feuchtmasse (FM). Umgerechnet ergeben sich spezifische Aktivitäten von Radium-226 von 18 bis 14.000 Bq/kg TM. Der größte Teil der Schlämme weist spezifische Aktivitäten zwischen 100 und 1.500 Bq/kg TM auf. Der Median liegt bei 500 Bq/kg TM. Haberer [42] hat über Eluiversuche festgestellt, dass Radium in den Schlämmen fest fixiert ist, so dass eine Auswaschung des Radium-226 aus deponierten Schlämmen in das Grundwasser nicht zu befürchten ist.

Wisser [43] hat erstmals durch Korrosion entstandene Ablagerungen (gelblich bis rötlich gefärbte Inkrustationen aus Eisen- und Manganverbindungen) im Thermalwassersystem eines deutschen Kurortes auf natürliche Radionuklide untersucht. Die spezifische Aktivität von Radium-226 beträgt 12.700 Bq/kg und 9.000 Bq/kg von Radium-228.

Im Rahmen einer aktuellen Studie hat Wisser [44] den Radiumgehalt im Rohwasser und in Rückständen aus der Wasseraufbereitung in einem Wasserwerk ermittelt. Bei relativ niedrigen Gehalten an Radium-228 (13 mBq/l) und Radium-226 (25 mBq/l) im Rohwasser, kam es zu teilweise hohen Radiumgehalten in den Rückständen. Filtersand aus der Enteisung wies einen Radium-228-Gehalt von 2.100 Bq/kg TM und einen Radium-226-Gehalt von 4.300 Bq/kg TM auf. Für die Rückspülschlämme hat er einen Radium-228-Gehalt von 480 Bq/kg und einen Radium-226-Gehalt von 700 Bq/kg ermittelt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern“ (November 1997 bis November 2001) [5] hat das Bayerische Landesamt für Umwelt einige Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung untersucht. Es zeigte sich, dass vor allem die Schlämme aus der Enteisung spezifische Aktivitäten zwischen 300 bis 6.300 Bq/kg TM für Radium-226 und zwischen 300 bis 8.400 Bq/kg TM für Radium-228 aufwiesen. Die Schlämme aus der Entsäuerung dagegen wiesen spezifische Aktivitäten zwischen < 10 und 200 Bq/kg TM für Radium-226 und Radium-228 auf. Die spezifischen Aktivitäten von Uran-238 wurden bei den untersuchten Schlämmen nicht explizit ermittelt. Aber aus der spezifischen Aktivität von Thorium-234 kann aufgrund des radio-

aktiven Gleichgewichtes der einzelnen Radionuklide in den Schlämmen auf die spezifische Aktivität von Uran-238 zurückgeschlossen werden. Die spezifische Aktivität von Uran-238 liegt zwischen 20 bis 120 Bq/kg TM und ist deutlich niedriger als die spezifische Aktivität von Radium-226.

In Tab. 4 sind noch einmal die uns bekannten Ergebnisse zu den Radionuklidgehalten in Rückspülschlämmen aufgeführt.

Tab. 4: Spezifische Aktivitäten in Schlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung

	<i>Spezifische Aktivität [Bq/kg]</i>				<i>Literatur</i>
	<i>Uran-238</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Radium-228</i>	
3 Wasserwerke	—	200 – 7.500	—	200 – 5.200	[23]
1 Wasserwerk	—	49 – 1.130	—	78 – 1.010	[40]
1 Wasserwerk	300	2.100	500	700	[41]
Deutschland	—	18 – 14.000	—	—	[42]
Thermalwassersystem Rohrblagerungen	—	12.700	—	9.000	[43]
1 Wasserwerk					[44]
Filtersand	—	4.300	—	2.100	
Rückspülschlamm	—	700	—	480	
1 Wasserwerke					[45]
Rückspülschlamm	5.800 – 6.100	4.500 – 5.600	—	2.500 – 2.700	
Aktivkohle	8.800	9.500	—	6.900	
19 Wasserwerke					[5]
Enteisenung	20 - 120	300 – 6.300	—	300 – 8.400	
Entsäuerung	20 - 120	< 10 – 200	—	< 10 - 200	

3.4 Arten der Trinkwasseraufbereitung und die Entfernung von Radionukliden

Als Trinkwasser soll ein natürliches Wasser verwendet werden, das keiner Aufbereitung bedarf. Etwa zwei Drittel des Trinkwassers in Bayern werden ohne, das restliche Drittel wird nach Aufbereitung abgegeben. Nach DIN 2000 [46] muss Trinkwasser folgende Grundanforderungen erfüllen. Es soll

- keine Trübstoffe enthalten und frei von Geruch und Geschmack sein,
- keine Korrosion hervorrufen,
- frei sein von Krankheitserregern und keine gesundheitsschädlichen Stoffe enthalten (z. B. Lösungsmittel),
- nicht zu viele Salze, Eisen, Mangan oder Arsen sowie organische Stoffe (Humin- und Moorstoffe)

enthalten.

Deshalb muss Rohwasser, welches die Anforderungen an Trinkwasser nicht erfüllt, so gereinigt werden, dass es beim Genuss die menschliche Gesundheit nicht beeinträchtigt.

Die Trinkwasseraufbereitung erfolgt zum einen aus gesundheitlichen, aber auch aus ästhetischen und technischen Aspekten [21]. Dies sind einmal die Entfernung von unerwünschten Stoffen oder die Änderung der Wasserzusammensetzung durch Dosierung von Zusatzstoffen. Am wichtigsten ist aber das Ziel einer nachhaltigen sicheren Wasserversorgung.

Bei den gesundheitlichen Aspekten ist zwischen Krankheitserregern und toxischen Stoffen zu unterscheiden. Dabei werden mikrobiologische Verunreinigungen des Rohwassers in erster Linie durch die Auswahl und den Schutz des Rohwassers sowie in zweiter Linie durch eine Desinfektion während der Aufbereitung vermieden.

In den nächsten Abschnitten gehen wir näher auf einige der am häufigsten verwendeten Aufbereitungsarten und deren Effizienz zur Radionuklidrückhaltung ein.

3.4.1 Methoden und Materialien zur Trinkwasseraufbereitung

3.4.1.1 Ausfällen und Flockung von Eisen und Mangan

Eisen und Mangan sind im Trinkwasser vor allem aus technischen Aspekten unerwünscht, weil sie zu Ablagerungen im Rohrnetz und beim Verbraucher zu Verwendungseinschränkungen des Wassers führen [47]. Aber auch aus ästhetischen Aspekten werden Eisen und Mangan aus dem Rohwasser entfernt. Zwar sind sie für den erwachsenen Menschen in den üblicherweise vorliegenden Konzentrationen u. U. gesundheitlich unbedenklich, doch führen sie zu einer Beeinträchtigung im Geschmack. Eisen kann man schon in geringen Mengen (ca. 1 mg/l) deutlich schmecken. Mangan wirkt für Kleinkinder toxisch [48].

Das Prinzip der physikalisch-chemischen Enteisung und Entmanganung beruht auf einer Oxidation des im Wasser gelösten zweiwertigen Eisens und Mangans durch Belüftung mit Luftsauerstoff und der Bildung von unlöslichen oxidischen Verbindungen, in Form von dreiwertigen Eisen- und vierwertigen Mangan-Verbindungen [3].

In einem anschließenden Aufbereitungsschritt werden die genannten schwerlöslichen Verbindungen mittels Sandfiltern (Schnellfilter) aus dem Wasser entfernt. Neben dem Luftsauerstoff können auch Oxidationsmittel, wie Kaliumpermanganat (KMnO_4) oder Ozon (O_3) eingesetzt werden [39].

In beiden Fällen handelt es sich um Fällungsreaktionen. Dazu werden Eisensalze als Flockungs- und Fällungsmittel eingesetzt [47].

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren bei der Entmanganung ist ein adsorptiv-autokatalytisches Filterverfahren. Als Filtermaterial wird an erster Stelle Kies (wie bei der Enteisung), bei kleineren Anlagen und gleichzeitiger Notwendigkeit der Entsäuerung auch halbgebrannter Dolomit (Calcium-Magnesium-Karbonat, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) eingesetzt [47].

Da die Körnung der Enteisungs-/Entmanganungsfilter recht grob und gleichförmig ist, kommt es schnell zu einem deutlichen Anstieg des Eisen-/Mangangehaltes im Filter. Wenn der Druckverlust in den Filtern zu groß wird, ist das Ende der Filterlaufzeit erreicht und der Filter muss rückgespült werden [47], [49]. Dabei fallen dann die so genannten Rückspülschlämme an. Die Eisenoxide fallen in Form dieser Schlämme an. Die Manganoxide dagegen bilden oft einen dichten, gut haftenden „Braunstein-Belag“ auf den Filterkörnern und verbleiben zu einem großen Teil in den Filtern.

Entfernung von Uran

Bei der Flockung mit Hilfe von Eisen und Aluminiumsalzen hat der pH-Wert einen starken Einfluss auf die Mitfällung von Uran [50]. Bei pH-Werten von 6 oder 10 werden große Mengen (> 80 %) des Urans mit den dreiwertigen und den zweiwertigen Eisen- und den dreiwertigen Aluminiumhydroxiden ausgefällt. Bei pH-Werten um 4 und 8 dagegen sind nur Wirkungsgrade unter 40 % beobachtet worden.

Bei pH-Werten über 10 ist Eisensalz dem Aluminiumsalz zur Ausflockung vorzuziehen, da die Löslichkeit von Aluminiumhydroxiden bei einem pH-Wert von 10 zunimmt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zwischen pH-Werten von 5,5 und 11 Uran mit Eisensalzen bis zu > 90 % entfernt wurde. Mit Aluminium kann Uran nur bis zu einem pH-Wert von 9 mit einem Wirkungsgrad von > 90 % entfernt werden [51]. In Wasserversorgungsunternehmen werden Ausflockungen normalerweise im pH-Bereich von 7,5 bis 8,5 betrieben. Ohne eine Änderung des pH-Wertes werden dabei aber nur Schwebstoff aus dem Wasser entfernt, nicht aber Uran [14].

Entfernung von Radium

Da es sich bei Radium um ein zweiwertiges Erdalkalimetall handelt, wird es bei allen Aufbereitungsprozessen zur Entfernung von Calcium ebenfalls mit gefällt.

Radium kann mit der konventionellen Enteisenung/Entmanganung teilweise aus dem Rohwasser entfernt werden. Untersuchungen an amerikanischen Wasserversorgungsunternehmen haben Wirkungsgrade von 11 bis 53 % ergeben [52]. Dies ist abhängig vom pH-Wert, der Eisenkonzentration und der Härte des Wassers. Innerhalb des Filtermaterials wird Radium an ausfallenden Eisen- und teilweise auch an Manganoxyhydroxide adsorbiert, die durch die Belüftung des Rohwassers ausfallen [14], [16], [53]. Dabei hat Mangandioxid (MnO_2) die höchste Sorptionsfähigkeit für Radium.

Eine Verbesserung des Filterprozesses kann durch das regelmäßige Rückspülen der Sandfilter mit verdünnter Säure (Salzsäure, HCl) erzielt werden. Damit können 80 bis 90 % des Radiums entfernt werden [54].

Bis zu 99 % Radium können über Filter, die mit Mangandioxid überzogen sind, entfernt werden [55]. Doch ist die Kapazität dieser Filter beschränkt und sie müssen deshalb häufig ausgetauscht werden. Dadurch fallen hohe Mengen an zu entsorgendem radioaktiv belastetem Material an.

3.4.1.2 Arsenentfernung

Bei der Arsenentfernung zur Trinkwasseraufbereitung werden i. d. R. Adsorptionsprozesse des Arsens an schwerlösliche Eisenoxide, aber auch an Mangan- und Aluminiumoxide, ausgenutzt [49]. Eisen, das als zweiwertiges und dreiwertiges Eisen im Rohwasser natürlich vorhanden ist, dient als Katalysator.

In der Praxis kommen verschiedene Verfahren zur Arsenentfernung in Betracht [49]:

- Enteisenung/Entmanganung: Arsen kann aus reduzierten Grundwässern durch geeignete Betriebsführung zusammen mit gelöstem Eisen und Mangan entfernt werden.
- Fällungs-/Flockungsverfahren: Durch die Zudosierung von Eisen- und Aluminiumsalzen wird Arsen mit gefällt bzw. an die entstandenen Fällprodukte adsorbiert. Dabei sind Eisensalze besser geeignet als Aluminiumsalze.
- Adsorptionsverfahren: Arsen wird dem Rohwasser durch in Festbettfilter (Kiesfilter) eingebaute Adsorbentmaterialien entzogen. Auch hier weisen Adsorber auf Eisenbasis höhere Beladungskapazitäten für Arsen auf als solche auf Aluminiumbasis.

3.4.1.3 Entsäuerung

Die Entsäuerung dient zur Einstellung des „Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts“ und damit zur Verminderung der Aggressivität des Wassers (in natürlichen Wässern hauptsächlich durch Kohlensäure), gegenüber kalkhaltigen Werkstoffen (z. B. Zementmörtel) [56] und Metallen (Eisen, Blei, Zink, Cadmium, Kupfer).

Bei der Entsäuerung kann zwischen physikalischen und chemischen Verfahren unterschieden werden [39].

Bei den physikalischen Verfahren wird durch Ausgasen oder Belüften Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus dem Wasser entfernt. Dabei fällt aber kein fester oder flüssiger Rückstand an [39].

Bei den chemischen Verfahren kann zwischen den Filterverfahren und den Dosierverfahren unterschieden werden. Bei den Filterverfahren erfolgt eine Filtration des Wassers über ein alkalisch reagierendes Filtermaterial z. B. gekörntes Calciumcarbonat ($CaCO_3$) oder Marmor. Als Rückstand fallen Filterspülwässer an, die Filtermaterial und auch Eisen- und Manganverbindungen enthalten. Bei den Dosierverfahren erfolgt eine Reaktion des CO_2 mit zudosierten alkalischen Substanzen (Laugen), wie Calciumhydroxid, Natriumhydroxid, Natriumcarbonat, Calciumcarbonat, Magnesiumcarbonat oder halbgebrannter Dolomit, wobei bei der Zubereitung der Calciumhydroxidlösung Rückstände in Form von Kalkmilch und Kalkwasser anfallen [39].

Entfernung von Uran

Eine Kalk-Soda-enthärtung kann bei einem pH-Wert über 10,6 unter Zugabe von Kalk und Magnesiumkarbonat zwischen 93 bis 99 % Uran entfernen. Bei pH-Werten unter 10,6 verringert die Zugabe von Magnesiumkarbonat die Wirksamkeit von Kalk zur Uran-Entfernung (10 bis 30 %), dagegen steigt die Uran-Entfernung bei einem pH-Wert über 10,6 mit zunehmender Magnesiumkarbonatzugabe an. Im Allgemeinen gilt, dass bei hohen pH-Werten Magnesium-Lösungen eine höhere Uran-Entfernung erzielen als Calcium-Lösungen [16].

Entfernung von Radium

Der Wirkungsgrad der Kalkenthärtung wird durch die geringe Löslichkeit von Radiumkarbonat (RaCO_3) und Radiumsulfat (RaSO_4) bestimmt und kann bis zu 95 % betragen. Der Wirkungsgrad ist außerdem von der Wasserhärte (je stärker die Wasserhärte reduziert wird, umso geringer ist die Radiumentfernung) und vom pH-Wert (je höher der pH-Wert ist, umso mehr Radium wird entfernt) abhängig [57].

3.4.1.4 Aktivkohle

Aktivkohle ist ein Sammelname für eine Gruppe von künstlich hergestellten, porösen Kohlenstoffen mit einer schwammartigen Struktur und wird aus Torf, Holz, Braunkohle, Steinkohle und Nussschalen hergestellt. Diese Materialien werden zunächst verkohlt. Da hierbei nur sehr kleine Poren entstehen, wird das aktive Porensystem anschließend durch Entfernen von flüchtigen Komponenten (Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel usw.) geschaffen [58].

Aktivkohle ist das bei der Trinkwasseraufbereitung üblicherweise zur Adsorption von Geruchs- und Geschmacksstoffen, von organischen Substanzen und zur Bindung von in Wasser gelösten Stoffen an Feststoffoberflächen eingesetzte Mittel. Sie kann als Pulverkohle (Kornanteil unter 0,18 mm größer als 90%) oder als Kornkohle (Kornanteil über 0,18 mm größer als 90%) auf oder in Filtern eingesetzt werden. Diese gebrochene, scharfkantige Aktivkohle wird bevorzugt für die Wasserreinigung eingesetzt. Kornkohle kann nach Erschöpfung (= Beladung) regeneriert und wieder verwendet werden [59].

Die Anreicherung eines Stoffes an der Oberfläche einer benachbarten, festen Phase wird allgemein als Adsorption bezeichnet. Dabei dringen Moleküle ins Innere der Nachbarphase ein, z. B. Einlagerung von Wasserstoff in Metalle [60]. Dabei lässt sich zwischen physikalischer Adsorption und Chemisorption unterscheiden. Die physikalische Adsorption ist reversibel. Die Chemisorption ist nicht reversibel. Die Abgabe von Molekülen von der Oberfläche heißt Desorption [60].

Entfernung von Uran

Die Verwendung von Aktivkohle zur Reduzierung des Uragehaltes hat sich als sehr wirkungsvoll erwiesen [16]. Dabei wandert die Zone der Uran-Adsorption langsam durch das Aktivkohlefilterbett. Die Uranentfernung durch Aktivkohle ist aber stark pH-abhängig. Bei pH-Werten unter 6,4 werden Wirkungsgrade von 95 % erzielt, bei pH-Werten über 9,1 dagegen werden weniger als 1 % Uran aus dem Wasser entfernt [16].

Entfernung von Radon

Radon wird an der Aktivkohle adsorbiert und zerfällt innerhalb weniger Tage (Gleichgewicht nach 10 bis 15 Tagen). Die Zerfallsprodukte Blei-214 und Bismut-214 werden ebenfalls zurückgehalten. Für eine effektive Nutzung dieser Methode ist eine Kontaktzeit des Wassers mit der Aktivkohle von 1 Stunde notwendig (üblicherweise ist in Wasserwerken die Kontaktzeit des Wassers mit der Aktivkohle 10 bis 20 Minuten). Deshalb ist sie nur für kleine Wasserwerke geeignet. Es kann ein Wirkungsgrad von größer 99 % erreicht werden [14], [16]. Radium wird nicht aufgenommen.

3.4.1.5 Ionenaustauscher

Ionenaustauscher sind spezielle organische oder anorganische Substanzen, die in einer Lösung eigene Ionen abspalten und dafür aus der Lösung fremde Ionen aufnehmen [61].

Als makromolekulares Grundgerüst (Matrix) wird oftmals ein Harz aus vernetztem Polystyrol verwendet, das Anker- oder funktionelle Gruppen enthält [62].

Saure Ionenaustauscher werden Kationenaustauscher genannt und tauschen positiv geladene Ionen, basische Ionenaustauscher heißen Anionenaustauscher und tauschen negativ geladene Ionen, aus.

In der Trinkwasseraufbereitung werden synthetische organische Austauscherharze für die [63]:

- Vollentsalzung (z. B. Kesselspeisewasser),
- Enthärtung (z. B. Trinkwasser, Lebensmittelindustrie),
- Entfernung von Nitrat und Sulfat,
- Entfernung oder Rückgewinnung von Metallen,
- Entfernung von organischen Substanzen durch makroporöse Adsorberharze (z. B. Huminstoffe)

eingesetzt.

Da der Austauscher ein Ion absorbiert und dafür ein anderes abgibt, ist seine Kapazität durch die Menge der vorhandenen Gegenionen begrenzt. Ist der Austauscher erschöpft, muss eine Regenerierung durchgeführt werden [64].

Entfernung von Uran

Stark basische Anionenaustauscher besitzen eine große Austauschkapazität und eine hohe Empfindlichkeit zur Uran-Entfernung (> 99 %). Die beladenen Ionenaustauscherharze lassen sich sehr leicht mit Natriumchlorid (NaCl) regenerieren [14]. In Bayern laufen unter der Beobachtung des ehemaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft mehrere Projekte, die sich mit der Uran-Entfernung aus dem Trinkwasser mittels Anionenaustauscher befassen. Es konnten hier ebenfalls Wirkungsgrade größer 99 % erzielt werden.

Entfernung von Radium

Durch synthetische oder natürliche Kationenaustauscher können zwischen 90 und 95 % Radium aus dem Wasser entfernt werden [52], [65] auch wenn das Austauschermaterial schon mit Calcium, Mangan und Barium gesättigt ist. Parallel zur Radiumentfernung wird gleichzeitig die Wasserhärte um etwa 90 % erniedrigt. Die beste Radiumentfernung zeigen stark saure Kationenaustauscher. Außerdem kann das Austauscherharz leicht mit Calciumdichlorid (CaCl₂) regeneriert werden [66]. Brink et al. [52] geben Radiumeliminierungsgrade zwischen 81 bis 97 % an.

3.4.1.6 Umkehrosmose

Das Verfahren der Umkehrosmose ist eine spezielle Form der Membranfiltration und benutzt eine einseitig durchlässige Membran, die wie ein Filter im Molekularbereich arbeitet, um Schwebstoffe, organische Verbindungen, Farbstoffe, Kolloide, Viren und Bakterien aus dem Wasser zu entfernen [67].

Der Mechanismus der Trennung des Wassers von Ionen beruht darauf, dass sich die Wassermoleküle in der Membran lösen, hindurch diffundieren und auf der anderen Seite wieder ablösen [21].

Der Prozess wird Umkehrosmose genannt, weil das Wasser unter hohem Druck (hydrostatischer Druck von 4 - 30 bar) durch eine synthetische, halbdurchlässige (semipermeable) Membran gepresst wird, um es von Verunreinigungen zu säubern [68].

Entfernung von Uran

In einer Literaturstudie im Auftrag der DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.) stellt Haberer [16] fest, dass aufgrund der Größe der komplexen Uranverbindungen im Rohwasser mit deren fast vollständigen Entfernung an den Membranen der Umkehrosmoseanlage zu rechnen ist. In einem Modellversuch mit einem Grundwasser aus Florida mit einem Urangehalt von 300 µg/l betrug der Wirkungsgrad bei vier verschiedenen Membranen 99 %.

Auch im Abschlussbericht des TENAWA-Projektes [53] konnte bei zwei Umkehrosmoseanlagen eine Rückhaltung von 98 bis 99,5 % ermittelt werden.

Entfernung von Radium

Haberer [16] berichtet von Abtrennungen zwischen 87 und 98 % für Radium in Umkehrosmoseanlagen. Daneben werden zusätzlich weitere Inhaltsstoffe, wie gelöste Feststoffe, oder Calcium- und Magnesiumverbindungen, die die Wasserhärte verursachen, entfernt [16] und der pH-Wert reduziert [53]. Die Wirksamkeit der Radiumentfernung ist dabei unabhängig von anderen Wasserinhaltsstoffen.

Im Abschlussbericht zum TENAWA-Projekt werden Entfernungswirkungsgrade für Radium-226 zwischen 95,6 und 99,8 % angegeben [53].

3.5 Verwertungsmöglichkeiten von Rückspülschlämmen

Trotz der zunehmenden alternativen Entsorgungswege wurden 1995 noch mindestens ein Viertel der Rückspülschlämme auf immer teurer werdenden Deponien entsorgt [37]. Dieser Entsorgungsweg ist aber aufgrund der bestehenden Gesetzgebung des Abfallrechtes in Zukunft nicht mehr ohne weiteres möglich [69]. Folgende Verwertungswege von Schlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung werden in der Literatur zitiert.

3.5.1 Abwasserentsorgung

Schlämme aus der Enteisung/Entmanganung (auch aus der Fällung/Flockung) werden am häufigsten in der Abwasserreinigung zur Klärschlammfäulung dazugegeben, um die Entwicklung von Schwefelwasserstoff (H₂S) zu vermindern (Schwefelwasserstoffminimierung). Die Elimination des Schwefelwasserstoffs kann bis zu 94 % betragen [70].

Der Rückspülschlamm kann ebenfalls als Fällmittlersatz zur Phosphatentfernung aus Abwasser eingesetzt werden. Auch bei der Zugabe zur Klärschlammfäulung wird mit den Schlämmen bis zu 30 % Phosphat aus dem Klärschlamm als zweiwertiges Eisenphosphat [Fe₃(PO₄)₂] ausgefällt (Phosphatelimination) [70]. Außerdem können die Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung mit Klärschlämmen kompostiert werden [49], [39].

3.5.2 Land- und Forstwirtschaft

Kalkhaltige Schlämme aus der Entsäuerung ersetzen in der Land- und Forstwirtschaft handelsübliche Kalkdünger oder werden bei ausreichend hohen Magnesium-Gehalten zur Boden- und Waldkalkung eingesetzt, um die weitere Versauerung von Böden zu stoppen bzw. zu verlangsamen. Darüber hinaus können die meisten Schlämme aus der Wasseraufbereitung zur Verbesserung des Wasserhaushaltes sandiger Böden als Bodenhilfsstoff verwendet werden [39].

3.5.3 Baustoffindustrie

Bei der Zementherstellung kann der getrocknete Schlamm aus der Enteisung als Eisenträger zur Erhöhung des Widerstandes gegen Sulfatangriff von Portlandzement zugesetzt werden [49]. Calciumcarbonathaltige Schlämme können als Sekundärrohstoff ebenfalls in der Zement- (Klinkerrohstoff) und Mörtelindustrie (Sandersatz) genutzt werden [39]. Voraussetzung für eine Verwertung der Eisenhydroxidschlämme in der Zementindustrie ist ihre Entwässerung [38].

Weitere Verwertungsmöglichkeiten sind [39]:

- die Nutzung bei der Abdeckung und Rekultivierung von Berghalden, Brachflächen und Deponien (Calcium, Stickstoff, Phosphat, Kalium, Magnesium zur Nährstoffzufuhr),
- bei der Nutzung bei metallurgischen Prozessen (Eisen als Rohstoff, Kalk als Zuschlagstoff o. ä.),
- in der Füllstoffindustrie (Calciumkarbonat),
- bei der Nutzung in Kohlekraftwerken (Kohlenstoff als Energieträger),
- als Viehfutterzusatz (Calciumkarbonat -> Calcium für den Knochenaufbau) und
- in der Rauchgasentschwefelung (Calciumcarbonat als Absorptionsmittel).

- 24** Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

4 Ergebnisse der eigenen Untersuchungen von Rückständen aus der Trinkwasseraufbereitung

Bei der Beurteilung der Radionuklidgehalte der Rückstände der Trinkwasseraufbereitung ist der geologische Untergrund von großer Bedeutung, da sich innerhalb einer geologischen Formation die Gehalte an Uran oder Radium nicht sehr stark verändern und die Verteilung von Uran zwischen Bachsedimenten (stellvertretend für Gestein) und Bachwässer (stellvertretend für Wasser) sehr starken Einfluss auf die Konzentration der Radionuklide in Rohwasser und damit auch in den Rückständen hat. Die hydrogeologische Übersichtskarte (Abb. 1) zeigt 10 verschiedenen Formationen:

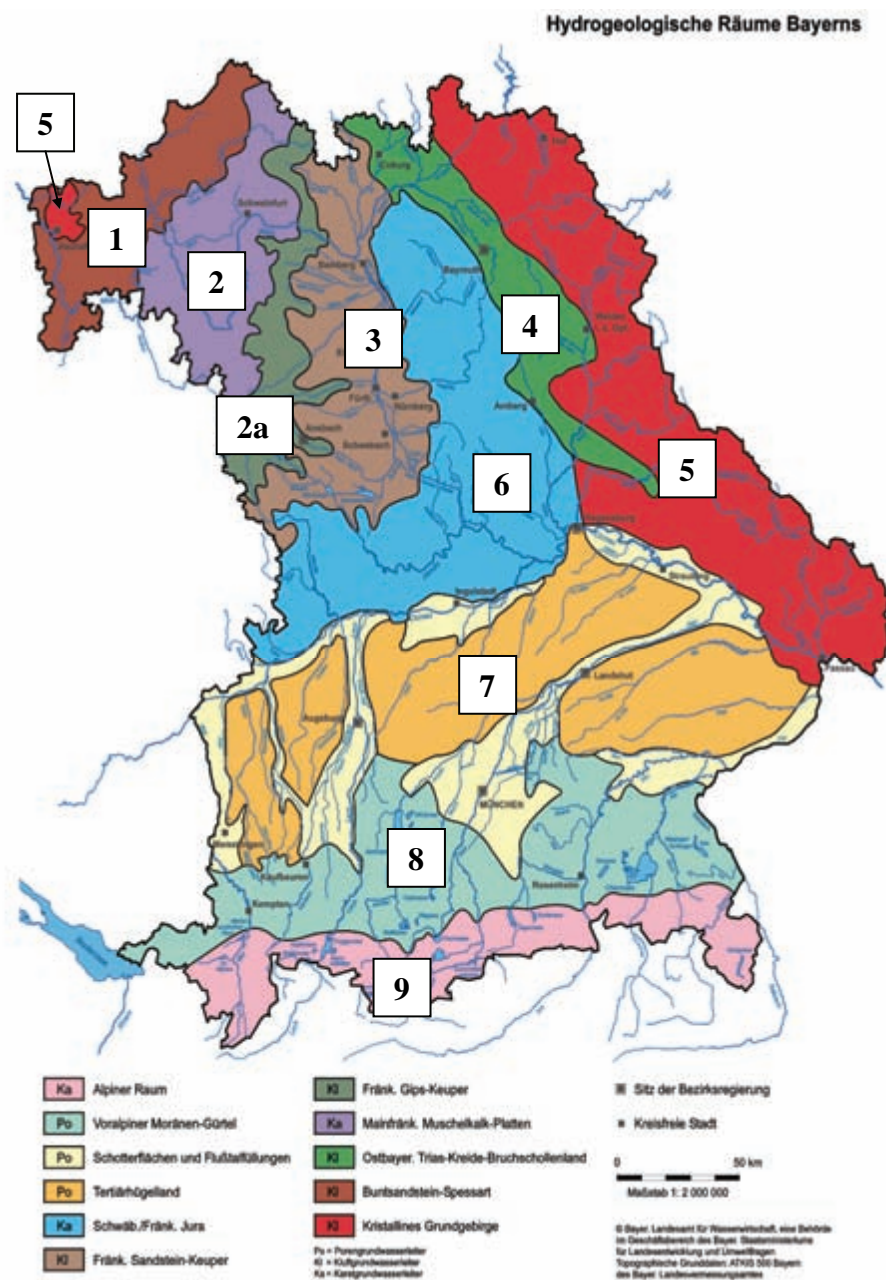


Abb. 1: Die hydrogeologischen Räume (Georegionen) Bayerns (nach [71]) siehe Text

26 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Hydrogeologisch verhalten sich die einzelnen geologischen Einheiten wie folgt [71]:

1. Buntsandstein: Grundwasser befindet sich in Klüften der bis 500 m mächtigen, roten Sandsteine aus der unteren Trias; aufgrund von Kalkarmut geringe Wasserhärte;
2. Mainfränkische Muschelkalkplatten; Grundwasser bewegt sich in Klüften und Karsthohlräumen mächtiger Kalksteine und Dolomite; aufgrund der Gipsanteile im Gestein hohe Wasserhärte;
- 2a. Fränkischer Gipskeuper: Grundwasser bewegt sich durch mächtige Sand-, Ton- und Mergelsteine mit Gipseinschlüssen; hohe Wasserhärte;
3. Fränkischer Sandsteinkeuper: Grundwasser bewegt sich in den Klüften mächtiger Sandsteine; Grundwasser mittelhart bis hart;
4. Ostbayerisches Trias-Kreide-Bruchschollenland: Grundwasser befindet sich in Klüften von Sandsteinen und Karbonatgesteinen der zerbrochenen Schichtgesteine der Trias-, Jura- und Kreidezeit auch Poren- und Grundwasserleiter vorhanden; weiches Wasser;
5. Kristallines Grundgebirge: wegen geringer Klüftigkeit kaum wasserführend; Grundwasser aus tieferreichenden Verwitterungszonen (Porengrundwasserleiter); Weiches bis sehr weiches und saures Wasser;
6. Schwäbischer und Fränkischer Jura: Grundwasser bewegt sich in Karsthohlräumen der mächtigen Kalk- und Dolomitgesteine des Malm
7. Tertiärhügelland/Schotterflächen und Flusstalfüllungen: Tertiärhügelland; Grundwasser bewegt sich in mehreren Stockwerken im Porenraum von Kiesen und Sanden; eisenhaltiges Wasser; Schotterflächen und Flusstalfüllungen – großräumige Porengrundwasserleiter in Ablagerungen von Sanden, Kiesen und Schottern aus dem Quartär; mengenmäßig bedeutendste Grundwasservorkommen Bayerns;
8. Voralpiner Moränengürtel: Grundwasser im Porenraum der sandigen Kiese und Schotter; kalkhaltiges Wasser;
9. Alpiner Raum: Grundwasser in den geklüfteten und z. T. auch verkarsteten Gesteinen, vorwiegend aber aus kiesigen Talfüllungen.

Mit Hilfe des Geochemischen Atlas der Bundesrepublik Deutschland [72] haben wir ermitteln können, in welchen Gebieten Bayerns möglicherweise eine verstärkte Löslichkeit und damit erhöhte Konzentrationen von Uran und eventuell von weiteren Radionukliden in Gesteinen und Wässern zu finden sind. Die Ergebnisse unserer Recherche sind in den Abb. 2 bis 4 graphisch dargestellt. Dabei stehen Bachsedimente stellvertretend für Gesteine und Bachwässer für Wasser allgemein.

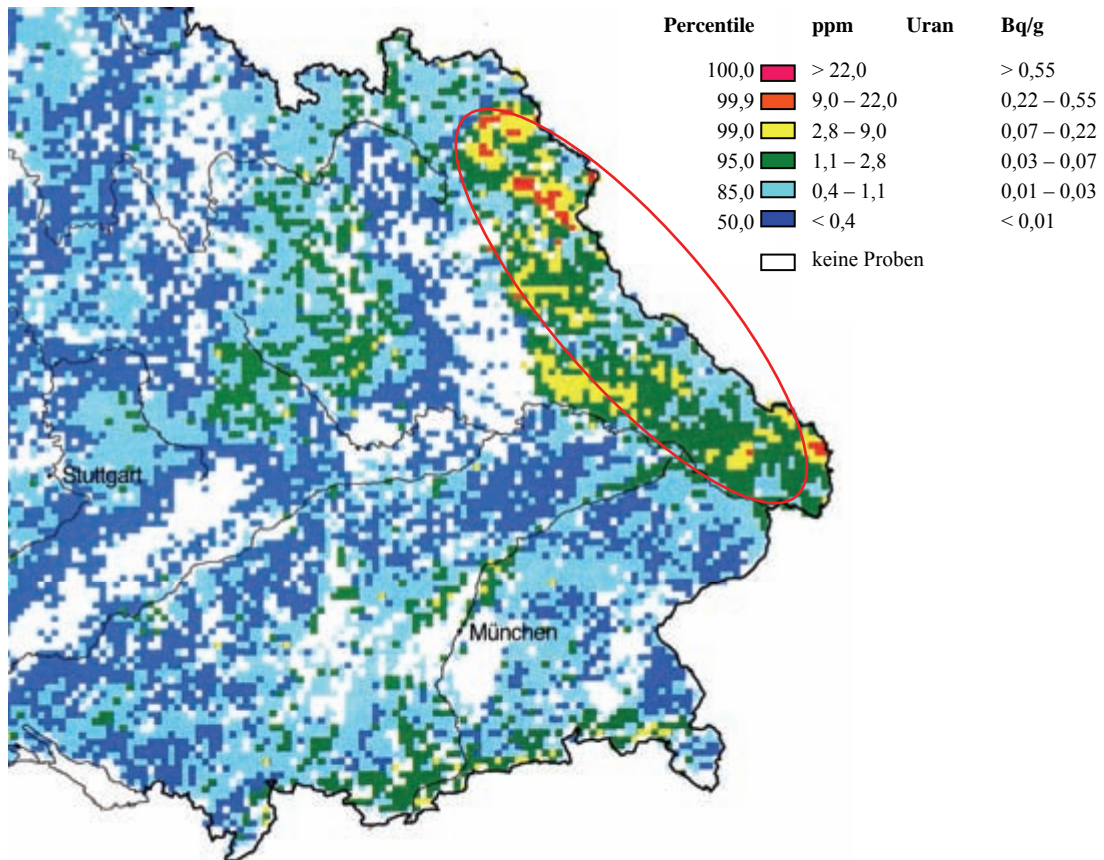


Abb. 2: Urangelhalte in Bachsedimenten (nach [72])

Wie aus Abb. 2 ersichtlich, ist Uran vor allem im ostbayerischen Raum (Georegion 5: Fichtelgebirge, Oberpfälzer Wald und Bayerischer Wald) in den Gesteinen gebunden. Da die Granite und Gneise schwerlöslich sind, sollten die Rohwässer nur niedrige Urangelhalte und die Rückspülschlämme ebenfalls nur geringe spezifische Uranaktivitäten aufweisen.

28 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

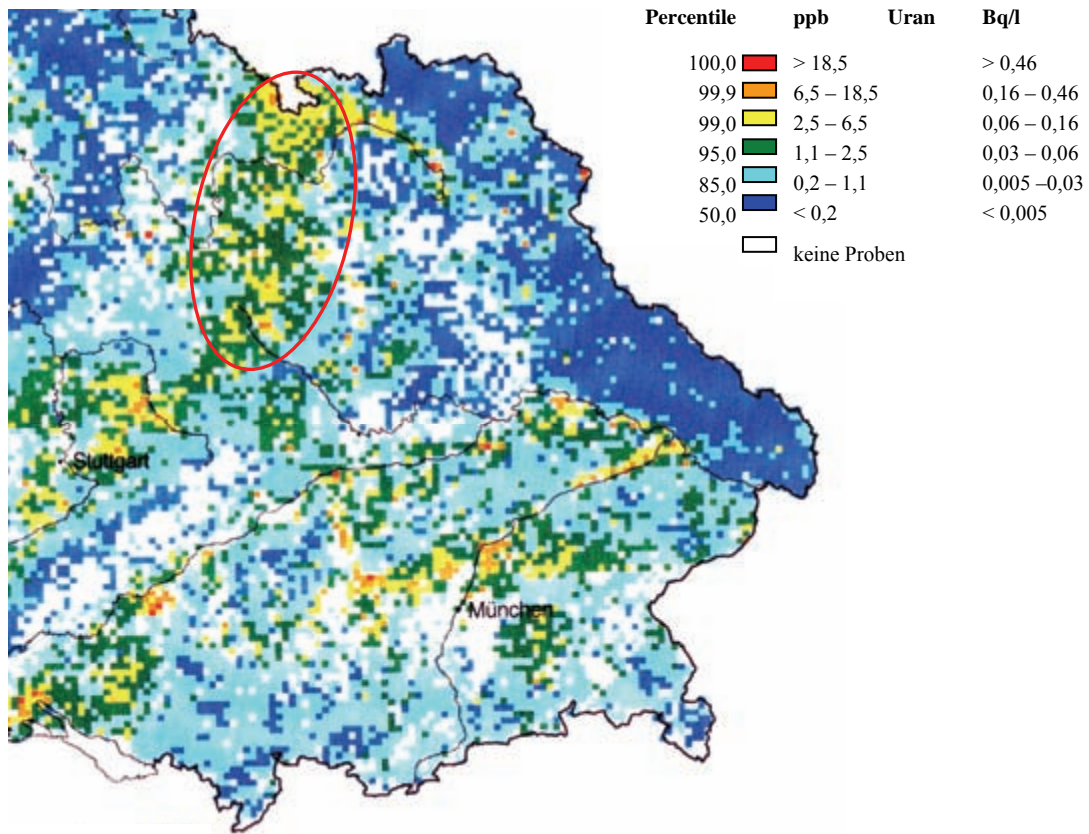


Abb. 3: Urangelhalte in Bachwässern (nach [72])

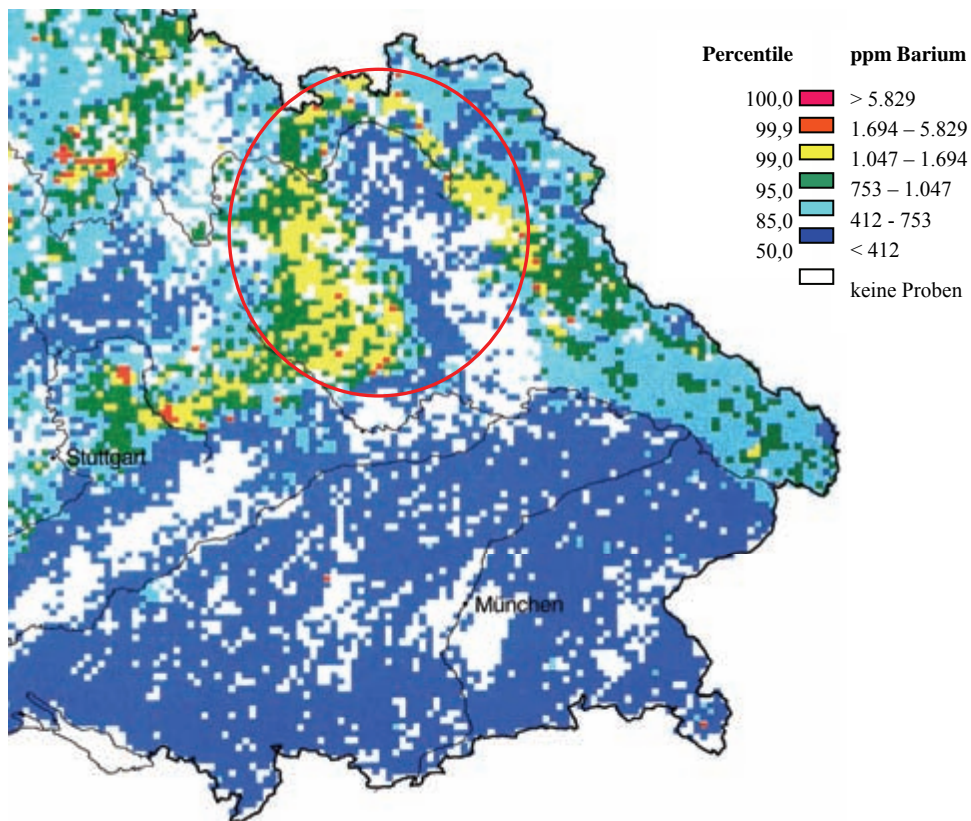


Abb. 4: Bariumgehalt in Bachsedimenten (nach [72])

Aus der Abb. 3 geht hervor, dass Uran vor allem in den Georegionen 2a, 3 und 4 (Mittel- und Oberfranken) in den Bachwässern auftritt. Es ist daher zu erwarten, dass in den Rohwässern aus diesen Gebieten erhöhte Urangelhalte und nach einer Aufbereitung erhöhte spezifische Uranaktivitäten in den Rückspülschlammern zu finden sein werden.

Anhand des Bariumgehaltes in Bachsedimenten können die Löslichkeiten von Radium, das chemisch mit Barium verwandt ist, dargestellt werden (Abb. 4)

Aus Abb. 4 ist ersichtlich, dass vor allem in den Georegionen 3 und 4, aber auch teilweise in Region 5 Radium (Barium) in erhöhten Mengen in den Gesteinen gebunden ist. Da die Gesteine der Georegion 3 und 4 aber leicht löslich sind, rechnen wir mit erhöhten spezifischen Aktivitäten für Radium in den Rohwässern. Durch die Aufbereitung der Rohwässer mit Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung wird Radium gebunden an Eisen- und Manganhydroxide aus dem Wasser entfernt und in den Rückspülschlammern angereichert [14], [16], [53].

Eine weitere Information über das Verhalten des Urans hinsichtlich seiner Löslichkeit bzw. sein Auftreten in den Rohwässern oder nach Aufbereitung in den Rückspülschlammern war eine Karte des damaligen Landesamts für Wasserwirtschaft (Abb. 5), das, wie bereits früher erwähnt, Uran im Grund- und Trinkwasser bestimmt hatte. Es zeigte sich, dass vor allem in Franken (Georegionen 3 und 4) erhöhte Uranwerte im Grund- und Trinkwasser anzutreffen sind, während in den Gebieten Ostbayerns (Georegion 5) die Uranwerte unterhalb der Nachweisgrenze bzw. zwischen $< 0,2$ und $65 \mu\text{g/l}$ liegen. Es ergibt sich damit eine gute Übereinstimmung mit den Aussagen über die Uranvorkommen in den Bachsedimenten und Bachwässern.

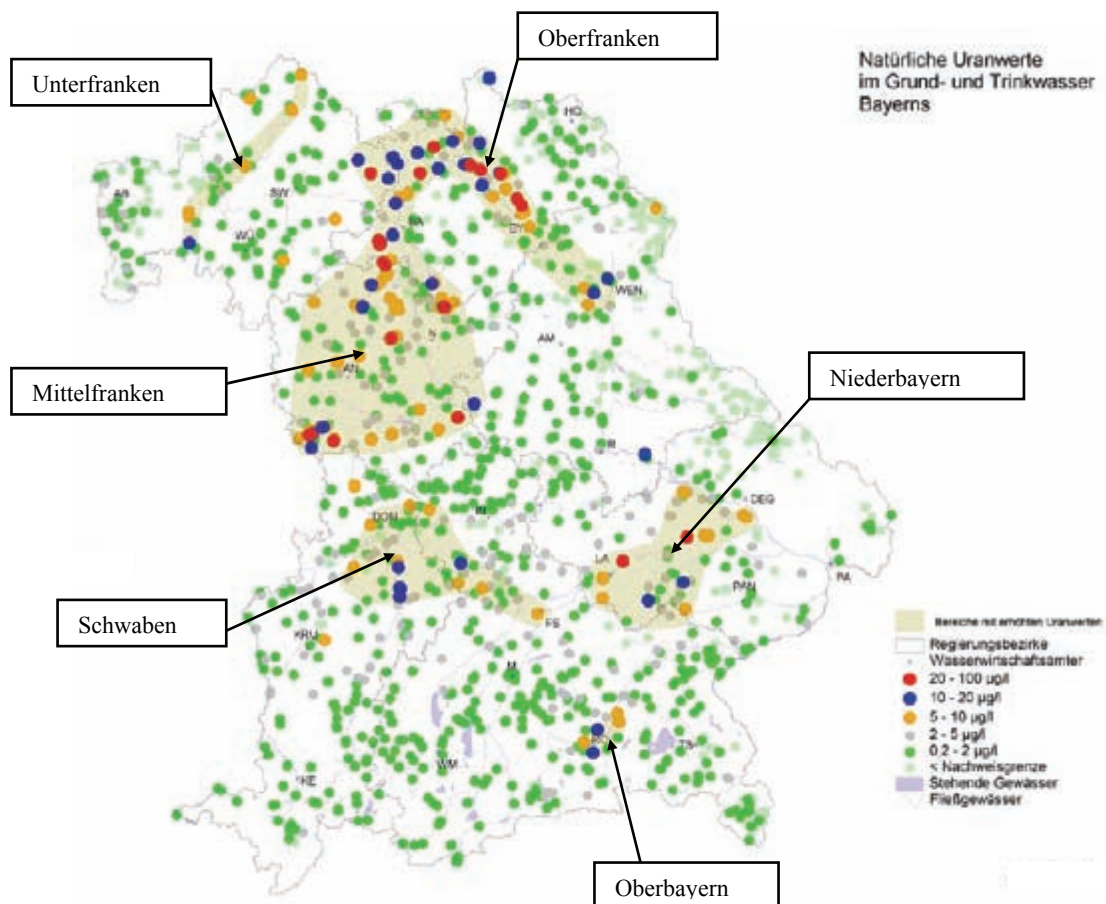


Abb. 5: Bayernkarte mit den natürlichen Uranwerten in Grund- und Trinkwasser [30]

In den nächsten Abschnitten stellen wir die Ergebnisse unserer Recherchen und unserer Untersuchungen von Rückspülschlammern vor, die bei den verschiedenen Arten der Trinkwasseraufbereitung anfallen. Wir haben von allen

Schlämmen die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallsreihe mittels Gamma-Spektrometrie bestimmt. Zum Teil haben wir auch bei einigen Schlammproben die spezifischen Aktivitäten von Uran-238, Uran-234, Uran-235, Thorium-232 und Thorium-230 mit Hilfe der Alpha-Spektrometrie ermittelt, da diese Nuklide mit der Gamma-Spektrometrie nicht nachweisbar sind.

4.1 Recherchen - Auswertung der Fragenkataloge

Im Rahmen dieses Projektes haben wir Wasserversorgungsunternehmen (WVU) aus ganz Bayern angeschrieben und um Schlammproben aus ihren Trinkwasseraufbereitungsanlagen gebeten. Die Namen und Adressen der WVU's, die Aufbereitungsanlagen zur Enteisenung, Entmanganung, Arsenentfernung oder Entsäuerung verwenden und den Schlamm in Absetzbecken sammeln wurden von den Landratsämtern zur Verfügung gestellt.

Insgesamt haben wir auf diese Weise die Adressen von 439 Wasserwerken erhalten, die Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung und zum Teil auch Absetzbecken betreiben. Zusätzlich haben wir weitere 264 Wasserwerke aus der referatsinternen Datenbank RADEX (Radon Exponierte Arbeitsplätze) erhalten, die offene oder geschlossene Filter zur Aufbereitung verwenden, deren Art der Aufbereitung diese Wasserwerke noch eruiert werden.

Bisher haben wir 375 WVU's angeschrieben und um Rückspülschlämme gebeten. Bei 145 Wasserwerken ist eine Probenahme aus technischen Gründen wegen der Direkteinleitung des Schlammes in die Kanalisation nicht möglich. 201 WVU's haben uns den Schlamm aus den Absetzbecken zugesandt. Von 19 Wasserwerken sind die zugesagten Schlammproben noch nicht eingetroffen und bei zehn WVU's ist eine Probenahme erst 2007 möglich, da sie neue Aufbereitungsanlagen oder Absetzbecken gebaut haben.

Bisher wurden in dieser Studie 263 Rückspülschlammproben aus 212 Wasserwerken untersucht. Die untersuchten Wasserwerke haben zusätzlich einen Fragenkatalog mit Fragen zu ihren Aufbereitungsanlagen, zu den dabei anfallenden Schlämmen und der Entsorgung dieser Schlämme ausgefüllt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern“ (November 1997 bis November 2001) [5] hat das Bayerische Landesamt für Umwelt 19 Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung von 18 Wasserversorgungsunternehmen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung betrachten wir zusammen mit den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens.

In Tab. 5 sind die Ergebnisse dieser Fragebogenaktion bezüglich der Aufbereitungsart und in Tab. 6 die der Entsorgung der anfallenden Rückspülschlämme aufgeführt.

Tab. 5: Ergebnisse der Fragebogenaktion: Fragen bezüglich der Art der Aufbereitung und der Anfallmenge an Rückspülschlamm; die 19 Schlammproben von 18 Wasserversorgungsunternehmen des Projektes von 1997 bis 2001 [5] werden mit betrachtet

Frage	Anzahl/Menge	
	diese Studie	Studie 1997 - 2001 [5]
Anzahl untersuchter WVU's	212	18
Anzahl untersuchter Rückspülschlammproben	263	19
Art der Aufbereitung		
reine Enteisenung	17	0
reine Entmanganung	0	1
reine Arsenentfernung	4	1
Enteisenung, Entmanganung, Arsenentfernung (Kombinationen dieser Arten)	108	7
reine Entsäuerung	40	6
mehrere der o. g. Arten zusammen 1)	40	3
Aktivkohle 2)	14	0
andere Arten der Aufbereitung 3)	4	0
Summe WVU's	227 4)	18
Anfallmenge an Rückspülschlamm pro Jahr		
134 bzw. 15 der untersuchten WVU's	5.752 m ³ 5)	750 m ³ 5)
keine Angaben	46	2
bisher noch nicht entleert	23	1
Fragebogen noch nicht zurück	9	0

- 1) Enteisenung, Entmanganung, Arsenentfernung zusammen mit Entsäuerung
- 2) keine reine Aktivkohleaufbereitung, sondern zusammen mit Enteisenung, Entmanganung, Arsenentfernung oder Entsäuerung
- 3) Aluminiumentfernung, Kerzenfilter, Oberflächenaufbereitung (3x) und Entfernung von Schwebstoffen
- 4) Die Differenz zwischen Anzahl untersuchter WVU's und Summe WVU's erhalten aus „Art der Aufbereitung“ kommt dadurch zustande, dass 15 WVU's uns mehrere Schlämme zugeschickt haben, die durch unterschiedliche Arten der Aufbereitung entstehen (z. B. 1x Schlammprobe aus reiner Entsäuerung und 1x Schlammprobe aus reiner Arsenentfernung -> WVU zweimal gezählt)
- 5) ein WVU mit 4.000 m³ an Rückspülschlamm (spezifische Aktivität < 200 Bq/kg) und ein WVU mit 525 m³ (spezifische Aktivität < 100 Bq/g)

Am häufigsten werden kombinierte Anlagen zur Enteisenung, Entmanganung und Arsenentfernung bei der Trinkwasseraufbereitung verwendet. In Gegenden mit saurem Wasser wie z. B. dem ostbayerischen Raum, werden sehr häufig reine Entsäuerungen eingesetzt. Auch Kombinationen aus Enteisenung, Entmanganung und Arsenentfernung zusammen mit einer Entsäuerung kommen vielfach vor. Reine Aktivkohlefilter werden in Bayern nur bei einem Wasserversorgungsunternehmen benutzt. Eine Probenahme ist aber erst wieder 2007 möglich, da nur in einem 2 - Jahresrhythmus ein Austausch der Aktivkohle stattfindet.

Die Aufbereitungsanlagen mit Aktivkohle stellen so genannte Mehrschichtfilter dar, bei denen mehrere Filterschichten aus verschiedenen Materialien (wie Quarzsand, Anthrazit und Aktivkohle) bei der Trinkwasseraufbereitung verwendet werden. Sobald die Filterporen verstopft sind, wird das Filter zurückgespült. Deshalb untersuchten wir nur die bei der Rückspülung entstehenden Schlämme.

32 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Die anfallenden Rückspülschlammengen beider Forschungsvorhaben bewegen sich im Bereich zwischen 0,025 m³ bis 4.000 m³. Der Median liegt bei 7 m³, was deutlich macht, dass hohe Schlammengen nur die Ausnahme sind (2 WVU mit 525 m³ und 4.000 m³).

Tab. 6: Ergebnisse der Fragebogenaktion: Fragen bezüglich der Entsorgung des Rückspülschlammes und des Rückspülwassers/Klarwassers; die 19 Schlammproben von 18 Wasserversorgungsunternehmen des Projektes von 1997 bis 2001 [5] werden mit betrachtet

Frage	Anzahl/Menge	
	diese Studie	Studie 1997 - 2001 [5]
Entsorgungswege des Rückspülschlammes 1)		
Deponie	87	7
Kläranlage	45	7
bisher noch nicht entleert	36	2
Entsorgungsfirma	33	0
Landwirtschaft	9	2
Behandlungsanlage, Müllverbrennung	4	1
Vorfluter	4	0
Restmüll	2	0
keine Angaben	34	0
Fragebogen noch nicht zurück	9	0
Entsorgung des Rückspülwassers/Klarwassers		
Vorfluter	168	0
Kanalisation	40	0
Graben, Teich, Trockenbeet, Versickerung	13	1
Wiederverwertung	2	1
Schluckbrunnen	1	0
keine Rückspülwasser	1	0
keine Angaben	29	17
Fragebogen noch nicht zurück	9	0

¹⁾ Entsorgung aller untersuchter Rückspülschlammproben

Unsere Umfrage hat gezeigt, dass die meisten Rückspülschlämme auf einer Deponie (meistens Hausmülldeponie, zum Teil aber auch Bauschuttdeponie und Sondermülldeponie) entsorgt werden. Viele Rückspülschlämme werden auch mit einem Pumpwagen aus dem Absetzbecken entnommen und zur Beseitigung zur Kläranlage gebracht. Nur sehr wenige Schlämme werden in der Landwirtschaft auf die Felder gebracht. Das anfallende Rückspülwasser bzw. Klarwasser, welches nach dem Absetzen der Schlammpartikel anfällt, wird meistens in einen Vorfluter oder in die Kanalisation eingeleitet.

4.2 Radionuklide in Schlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung

4.2.1 Radionuklide in Schlämmen aus der Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung

In diesem Abschnitt gehen wir zunächst auf die Ergebnisse der Schlämme aus den reinen Enteisungs-, Entmanganungs- und Arsenentfernungsanlagen ein, aber auch aus Anlagen, die die verschiedenen Arten kombinieren sowie aus Entsäuerungsanlagen. Dabei betrachten wir wieder die Ergebnisse dieses Untersuchungsvorhabens und der Studie von 1997 bis 2001 [5] gemeinsam.

4.2.1.1 Spezifische Aktivität

Insgesamt betreiben 17 WVU reine Enteisungsanlagen, 1 WVU eine reine Entmanganungsanlage und 5 WVU Anlagen zur reinen Arsenentfernung. 115 Wasserversorgungsunternehmen betreiben Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung, die aus einer Kombination aus diesen drei Aufbereitungsarten bestehen. Wir untersuchten insgesamt 19 Proben aus Anlagen zur Enteisung, eine Probe aus einer Anlage zur Entmanganung, fünf Proben aus Anlagen zur Arsenentfernung und 133 Proben aus Anlagen, die eine Kombination dieser drei Arten darstellen. In Abb. 6 haben wir die untersuchten WVU in die geologische Karte von Bayern eingetragen.

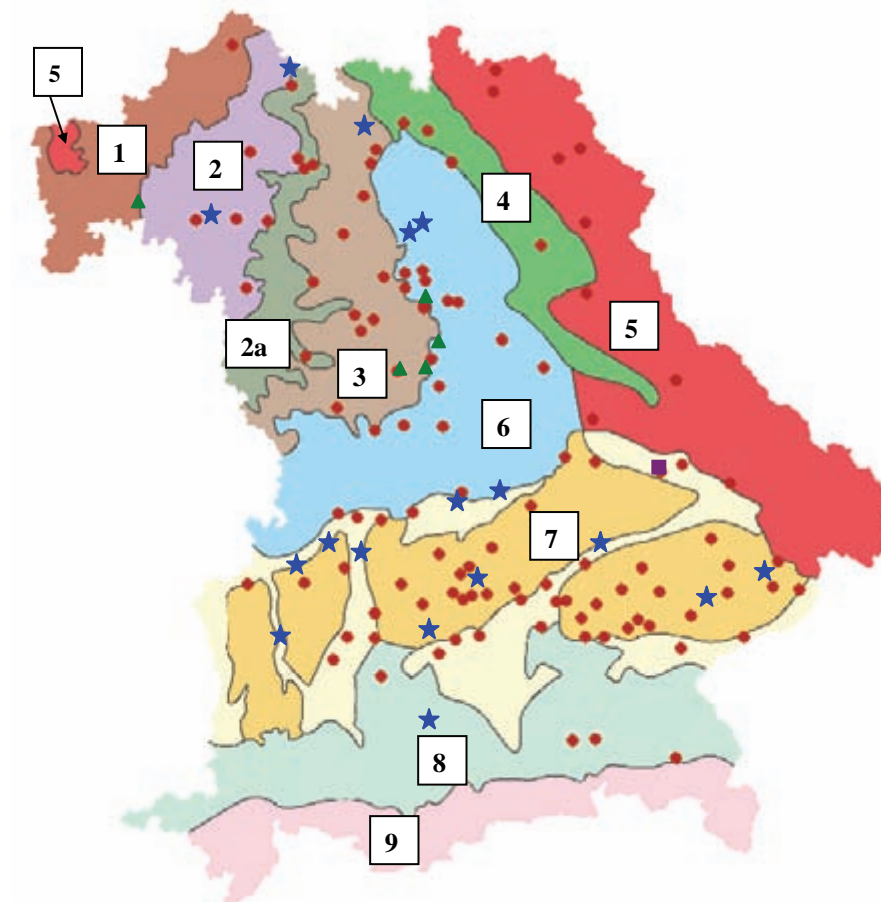


Abb. 6: Geologische Karte von Bayern [71]: Standorte der WVU mit reinen Enteisungs-, Entmanganungs-, Arsenentfernungsanlagen und Kombinationen dieser drei Aufbereitungsarten; blaue Sterne = Enteisungsanlagen, violette Viereck = Entmanganungsanlage, grüne Dreiecke = Arsenentfernungsanlagen und rote Kreise = Kombinationen

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich diese Arten der Trinkwasseraufbereitung hauptsächlich in den Georegionen 2, 2a, 3, 4, 6, 7 und 8 befinden. In der Georegion 5 finden sich nur wenige Anlagen, die eine Kombination der drei Aufbereitungsarten darstellen.

In Tab. 7 stellen wir die Ergebnisse dieser untersuchten Rückspülschlammproben vor.

34 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 7: Mittelwerte (MW), Mediane, Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Schlämme aus Anlagen zur Enteisung, Entmanganung, Arsenentfernung und einer Kombination dieser drei Aufbereitungsarten (dieses Untersuchungsvorhaben und Studie 1997 - 2001 [5]); n = Probenanzahl, TM = Trockenmasse

	<i>Uran-238</i>	<i>Uran-234</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>
Enteisung (n = 19)	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]						
MW	42	393	2.418	1.037	628	2	206
Median	9	96	1.060	469	273	0,4	142
Minimum	2	85	79	49	63	0,1	21
Maximum	303	998	11.600	6.400	2.230	15	540
Entmanganung (n = 1)							
Messwert	—	—	3.870	8.420	—	—	1.010
Arsenentfernung (n = 5)							
MW	612	3.300	1.053	1.150	332	28	224
Median	612	3.300	1.520	983	332	28	200
Minimum	226	3.300	110	61	83	10	57
Maximum	998	3.300	1.810	2.600	581	46	441
Kombination (n = 133)							
MW	67	171	2.149	1.543	466	15	313
Median	20	23	1.040	683	205	1	202
Minimum	1	8	29	12	18	0,03	23
Maximum	517	815	32.500	22.700	3.290	751	3.160

In den Schlämmen aus den o. g. Arten der Trinkwasseraufbereitung werden, wie nach der Verteilung der Bariumgehalte in Bachsedimenten (Abb. 4) zu erwarten, vor allem Radium-226 und Radium-228, z. T. aber auch Blei-210 stark angereichert. Uran-238 dagegen findet sich nur in geringen Aktivitäten in den untersuchten Rückspülschlammproben. Uran-234 ist nur in einer Schlammprobe aus der Arsenentfernung stark angereichert. Von den untersuchten 158 Proben überschreiten 83 den Überwachungsgrenzwert von 1.000 Bq/kg der StrlSchV [1] entweder mit Uran-234, Radium-226, Radium-228 oder Blei-210.

4.2.1.2 Dosisabschätzung

Viele der untersuchten Schlämme überschreiten die Überwachungsgrenzen für die Verwertung und Beseitigung nach StrlSchV [1] Bei der Verwertung und Beseitigung darf die effektive Dosis von 1 mSv pro Jahr für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht überschritten werden. Mit Hilfe der spezifischen Aktivitäten schätzen wir für die beteiligten Personen die effektive Jahresdosis für den Umgang mit den Rückspülschlämmen ab. Um die effektive Dosis auf dem gesamten Entsorgungsweg zu berücksichtigen, werden drei verschiedene Expositionspfade (im Wasserwerk, Transport und Deponierung) betrachtet:

1. Wasserwart: Handhabung des Rückspülschlammes im Wasserwerk, z. B. Beladen eines LKWs zum Abtransport, Reinigung des Absetzbeckens - Expositionszeit 20 Stunden im Jahr.
2. LKW-Fahrer: Transport des Rückspülschlammes zu einer Deponie - Expositionszeit 3 Stunden im Jahr.
3. Deponiearbeiter: Abladen des LKWs, Einbringen des Rückspülschlammes auf der Deponie; Expositionszeit - 8 Stunden im Jahr.
4. „Worst-Case“: maximale Expositionszeit - 2.000 Stunden im Jahr [73].

Die effektive Gesamtdosis E_{Eff} setzt sich aus drei Teildosen zusammen [73]:

$$E_{\text{Eff}} = E_{\text{Dir}} + E_{\text{Inh}} + E_{\text{Ing}}$$

mit

- E_{Dir} = direkte Gamma-Ortsdosisleistung,
- E_{Inh} = effektive Dosis aus der Inhalation und
- E_{Ing} = effektive Dosis aus der Ingestion.

Diese drei Teildosen werden nach folgenden Gleichungen berechnet [73]:

$$E_{\text{Dir}} = \Delta H_{\text{ex}} \cdot t_{\text{exp}}, \tag{Gl. 1}$$

$$E_{\text{Inh}} = \dot{V} \cdot t_{\text{exp}} \cdot \sum_i c_i \cdot g_{\text{Inh},i}, \text{ mit } c_i = C_{\text{Staub}} \cdot a_i / 1000 \tag{Gl. 2}$$

$$E_{\text{Ing}} = U_{\text{Bod}} \cdot t_{\text{exp}} \cdot \sum_i a_i \cdot g_{\text{Ing},i} \tag{Gl. 3}$$

Die einzelnen Parameter sind:

ΔH_{ex} : Zusätzliche Gamma-Ortsdosisleistung über Untergrund [Sv/h]

t_{exp} : Expositionszeit [h]

\dot{V} : Atmungsrate = 1,2 [m³/h]

c_i : Aktivitätskonzentration des Nuklids i im Staub [Bq/m³]

$g_{\text{Inh},i}$: Inhalationsdosiskoeffizient für Staubinhalation des Nuklids i [Sv/Bq] (siehe Anhang) [74]

C_{Staub} : Staubkonzentration = 0,01 [g/m³] (MAK-Wert einatembare Staub [75]) bzw. 0,003 [g/m³] (MAK-Wert alveolengängiger Staub [75])

a_i : spezifische Aktivität des Feststoffs i [Bq/g] (Tab. 1)

U_{Bod} : Bodenaufnahmerate = Inkorporation = 0,006 [g/h] [73]

$g_{\text{Ing},i}$: Ingestionsdosiskoeffizient des Nuklids i [Sv/Bq] (siehe Anhang) [74]

Für die vier Expositionsszenarien machten wir folgende Annahmen:

Expositionsszenario 1: *Handhabung des Rückspülschlammes durch den Wasserwart im Wasserwerk (Beladen eines LKWs zum Abtransport, Reinigung des Absetzbeckens)*

Expositionszeit: 20 Stunden pro Jahr,

Staubkonzentration: 0,01 g/m³ bzw. 0,003 g/m³ (MAK-Werte für einatembaren bzw. alveolengängigen Staub [75]),

Bodenaufnahmerate: 0,006 g/h [73],

spezifische Aktivitäten: Tabellen B1.1 und B1.2 im Anhang,

Inhalations- bzw. Ingestionsdosiskoeffizient [74]: Tabelle C1 im Anhang.

36 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Expositionsszenario 2: *LKW-Fahrer (Transport des Rückspülschlammes zu einer Deponie)*

Expositionszeit: 3 Stunden pro Jahr,
Staubkonzentration: 0,01 g/m³ bzw. 0,003 g/m³ (MAK-Werte für einatembaren bzw. alveolengängigen Staub [75]),
Bodenaufnahmerate: 0,006 g/h [73],
spezifische Aktivitäten: Tabellen B1.1 und B1.2 im Anhang,
Inhalations- bzw. Ingestionsdosiskoeffizient [74]: Tabelle C1 im Anhang.

Expositionsszenario 3: *Deponiearbeiter (Abladen des LKWs, Einbringen des Rückspülschlammes auf der Deponie)*

Expositionszeit: 8 Stunden pro Jahr,
Staubkonzentration: 0,01 g/m³ bzw. 0,003 g/m³ (MAK-Werte für einatembaren bzw. alveolengängigen Staub [75]),
Bodenaufnahmerate: 0,006 g/h [73],
spezifische Aktivitäten: Tabellen B1.1 und B1.2 im Anhang,
Inhalations- bzw. Ingestionsdosiskoeffizient [74]: Tabelle C1 im Anhang.

Expositionsszenario 4: *„Worst-Case“*

Expositionszeit: 2000 Stunden pro Jahr (jeder Beteiligte),
Staubkonzentration: 0,01 g/m³ bzw. 0,003 g/m³ (MAK-Werte für einatembaren bzw. alveolengängigen Staub [75]),
Bodenaufnahmerate: 0,006 g/h [73],
spezifische Aktivitäten: Tabellen B1.1 und B1.2 im Anhang,
Inhalations- bzw. Ingestionsdosiskoeffizient [74]: Tabelle C1 im Anhang.

Die von uns abgeschätzten jährlichen Effektivdosen sind in den Tab. 8 und 9 dargestellt.

Tab. 8: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Enteisenung (n = 19)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0035	0,0005	0,0014	0,3478
Median	0,0023	0,0004	0,0009	0,2311
Minimum	0,0011	0,0002	0,0004	0,1097
Maximum	0,0113	0,0017	0,0045	1,1261
Entmanganung (n = 1)				
MW	—	—	—	—
Median	—	—	—	—
Minimum	—	—	—	—
Maximum	0,0074	0,0011	0,0030	0,7403
Arsenentfernung (n = 5)				
MW	0,0030	0,0005	0,0012	0,3018
Median	0,0033	0,0005	0,0013	0,3259
Minimum	0,0013	0,0002	0,0005	0,1334
Maximum	0,0041	0,0006	0,0017	0,4127
Kombination (n = 133)				
MW	0,0036	0,0005	0,0015	0,3614
Median	0,0023	0,0003	0,0009	0,2272
Minimum	0,0011	0,0002	0,0004	0,1073
Maximum	0,0263	0,0039	0,0105	2,6278

Von den 18 Rückspülschlammproben, die den Richtwert von 1 mSv pro Jahr im Szenario 4 (Worst Case) überschreiten, stammen zwei Proben aus Anlagen zur reinen Enteisenung und neun Proben aus Kombinationen der genannten Aufbereitungsarten.

Für die Szenarien 1 bis 3 wird der Richtwert von 1 mSv pro Jahr [1] auf dem gesamten Entsorgungsweg nicht überschritten.

38 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 9: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,003 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Enteisung (n = 19)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0019	0,0003	0,0008	0,1877
Median	0,0014	0,0002	0,0006	0,1433
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1034
Maximum	0,0047	0,0007	0,0019	0,4670
Entmanganung (n = 1)				
MW	—	—	—	—
Median	—	—	—	—
Minimum	—	—	—	—
Maximum	0,0035	0,0005	0,0014	0,3489
Arsenentfernung (n = 5)				
MW	0,0017	0,0003	0,0007	0,1710
Median	0,0018	0,0003	0,0007	0,1812
Minimum	0,0011	0,0002	0,0005	0,1130
Maximum	0,0021	0,0003	0,0009	0,2135
Kombination (n = 133)				
MW	0,0021	0,0003	0,0008	0,1936
Median	0,0015	0,0002	0,0006	0,1458
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1026
Maximum	0,0198	0,0015	0,0039	0,9794

4.2.2 Radionuklide in Schlämmen aus der Entsäuerung

Wir betrachten hier die Ergebnisse der untersuchten Schlammproben aus Wasserwerken, die nur Entsäuerungsanlagen betreiben. Dabei betrachten wir auch in diesem Fall die Ergebnisse dieses Untersuchungsvorhabens und der Studie von 1997 bis 2001 [5] zusammen.

4.2.2.1 Spezifische Aktivität

Reine Entsäuerungsanlagen zur Trinkwasseraufbereitung werden von 42 Wasserversorgungsunternehmen betrieben. Insgesamt untersuchten wir 52 Schlammproben aus der Entsäuerung von Trinkwasser. In der Abb. 7 haben wir die untersuchten WVU in die geologische Karte Bayerns eingetragen.

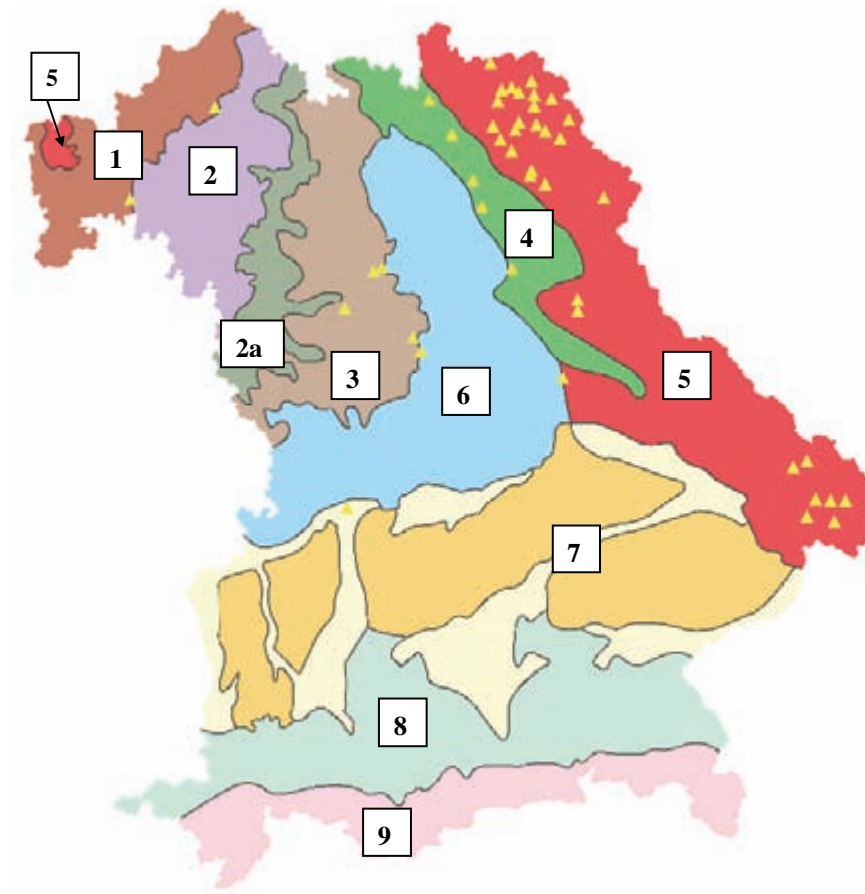


Abb. 7: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU, die nur Entsäuerungsanlagen betreiben: gelbe Dreiecke: Entsäuerungsanlagen

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die meisten WVU mit Anlagen zur Entsäuerung im ostbayerischen Raum vom Fichtelgebirge über den Oberpfälzer Wald bis zum Bayerischen Wald befinden (Georegion 5). Vereinzelt betreiben einige Wasserwerke auch in den Georegionen 1, 3 und 4 Entsäuerungsanlagen.

In Tab. 10 stellen wir die Ergebnisse dieser untersuchten Rückspülschlammproben vor.

Tab. 10: Mittelwerte (MW), Mediane, Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Schlämme aus Anlagen zur Entsäuerung (dieses Untersuchungsvorhaben und Studie 1997 - 2001 [5]); n = Probenanzahl, TM = Trockenmasse

	<i>Uran-238</i>	<i>Uran-234</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>
Entsäuerung (n = 52)	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]						
MW	74	83	136	54	544	3	34
Median	43	28	76	24	197	2	24
Minimum	4	4	6	1	14	0,2	4
Maximum	422	399	662	806	4.250	19	186

Bis auf Blei-210 unterschreiten die Rückspülschlammproben aus der Entsäuerung die Überwachungsgrenze von 1.000 Bq/kg. Insgesamt überschreiten die spezifischen Aktivitäten von Blei-210 von sechs Proben diese Überwachungsgrenze. Es zeigt sich, dass im Gegensatz zu den Schlammproben aus der Enteisenung, Entmanganung und

40 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Arsenentfernung die Proben aus der Entsäuerung kaum an Uran-238 und an Radium-226 bzw. Radium-228 angereichert sind.

Dies ist auf die Hydrogeologie zurückzuführen, da in der Georegion 5 (Gneis und Granite) Uran fest an Gesteine gebunden und daher schwerlöslich ist. Analoges gilt für Radium.

4.2.2.2 Dosisabschätzung

Auch für die Entsorgung der Schlämme aus Anlagen zur Entsäuerung haben wir die jährliche Effektivdosis für die vier Expositionsszenarien abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in den Tab. 11 und 12 für die unterschiedlichen Staubkonzentrationen 0,003 und 0,01 g/m³ dargestellt.

Tab. 11: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Entsäuerung (n = 52)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0013	0,0002	0,0005	0,1320
Median	0,0011	0,0002	0,0005	0,1145
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1007
Maximum	0,0031	0,0005	0,0012	0,3108
Ausnahmen (n = 4)				
MW	0,0080	0,0012	0,0032	0,7954
Median	0,0078	0,0012	0,0031	0,7839
Minimum	0,0053	0,0008	0,0021	0,5264
Maximum	0,0109	0,0016	0,0044	1,0877

Tab. 12: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,003 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Entsäuerung (n = 52)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0011	0,0002	0,0005	0,1124
Median	0,0011	0,0002	0,0004	0,1055
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1003
Maximum	0,0012	0,0003	0,0008	0,1883
Ausnahmen (n = 4)				
MW	0,0034	0,0005	0,0014	0,3415
Median	0,0034	0,0005	0,0014	0,3366
Minimum	0,0025	0,0004	0,0010	0,2511
Maximum	0,0044	0,0007	0,0018	0,4415

4.2.3 Radionuklide in Schlämmen aus Kombinationen der verschiedenen Aufbereitungsarten

Im Folgenden betrachten wir die Untersuchungsergebnisse von Schlämmen, die in Wasserwerken anfallen, die eine Kombination aus den verschiedenen Arten der Trinkwasseraufbereitung verwenden. Dabei handelt es sich um Kombinationen von Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung zusammen mit Anlagen zur Entsäuerung.

4.2.3.1 Spezifische Aktivität

Kombinationen von Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung zusammen mit Anlagen zur Entsäuerung werden von 42 Wasserversorgungsunternehmen betrieben. Insgesamt haben wir 45 Schlammproben von diesen 42 WVU untersucht. In Abb. 8 haben wir die Standorte dieser Wasserwerke ebenfalls in die geologische Karte von Bayern eingetragen.

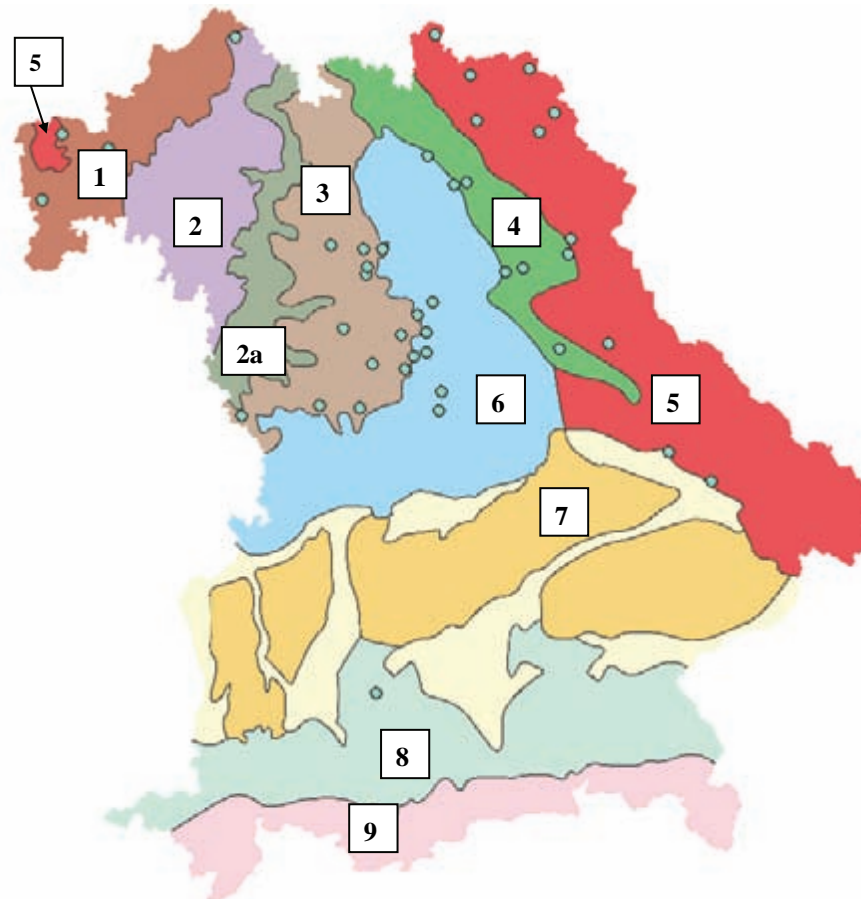


Abb. 8: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU (blaue Kreise) mit Kombinationen von Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung zusammen mit Anlagen zur Entsäuerung

Diese Art der Trinkwasseraufbereitung ist vor allem in Nordbayern in den Georegionen 1, 3, 4, 5 und 6 zu finden.

In Tab. 13 stellen wir die Ergebnisse dieser untersuchten Rückspülschlammproben vor.

42 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 13: Mittelwerte (MW), Mediane, Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Schlämme aus Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung kombiniert mit Entsäuerungsanlagen (dieses Untersuchungsvorhaben und Studie 1997 - 2001 [5]); n = Probenanzahl, Fe = Enteisung, Mn = Entmanganung, As = Arsenentfernung, ES = Entsäuerung, TM = Trockenmasse

	<i>Uran-238</i>	<i>Uran-234</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>
Kombination Fe, Mn, As mit ES (n = 45)	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]						
MW	104	180	2.257	1.400	837	5	268
Median	54	180	490	282	256	2	106
Minimum	0,8	121	10	2,5	27	0,03	7
Maximum	541	238	21.200	14.200	7.180	25	1.190

Die Ergebnisse dieser Rückspülschlämme unterscheiden sich kaum von den Ergebnissen der Schlammproben aus reinen Enteisungs-, Entmanganungs- und Arsenentfernungsanlagen bzw. deren Kombinationen (Abschnitt 4.2.1). Von den 45 Proben überschreiten 23 die Überwachungsgrenze von 1.000 Bq/kg, vor allem die Radionuklide von Radium-226, Radium-228 und Blei-210.

4.2.3.2 Dosisabschätzung

Wie in den vorherigen Abschnitten haben wir auch für diese Schlämme die jährliche Effektivdosis bei der Entsorgung für die vier Expositionsszenarien abgeschätzt und in den Tab. 14 und 15 aufgeführt.

Tab. 14: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Kombination Fe, Mn, As mit ES (n = 45)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0036	0,0005	0,0014	0,3574
Median	0,0017	0,0003	0,0007	0,1691
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1016
Maximum	0,0211	0,0031	0,0084	2,1068

Tab. 15: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,003 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Kombination Fe, Mn, As mit ES (n = 45)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0019	0,0003	0,0008	0,1928
Median	0,0013	0,0002	0,0005	0,1251
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1007
Maximum	0,0080	0,0012	0,0032	0,8044

Bis auf vier Rückspülschlammproben für das Expositionsszenario 4 unterschreiten alle Proben den Richtwert für die effektive Dosis von 1 mSv pro Jahr [1]. Für die realistischeren Expositionsszenarien 1 bis 3 wird dieser Richtwert nicht überschritten.

4.2.4 Radionuklide in Schlämmen aus Anlagen mit Aktivkohle

Reine Aktivkohlefilter werden in Bayern nur bei einem Wasserversorgungsunternehmen benutzt. Eine Probenahme ist aber nur möglich, wenn die verbrauchte Aktivkohle gegen frische ausgewechselt wird. Einige Wasserwerke betreiben Mehrschichtfilteranlagen zur Aufbereitung des Rohwassers, bei denen mehrere Filterschichten aus verschiedenen Materialien (wie Quarzsand, Anthrazit und Aktivkohle) bei der Trinkwasseraufbereitung verwendet werden. Neben Anlagen zur Enteisung, Entmanganung, Arsenentfernung und Entsäuerung werden in diesen WVU noch Filterschichten aus Aktivkohle benutzt.

Eine Probenahme der reinen Aktivkohle ist nicht möglich, da sie sehr lange Zeit ohne Erneuerung des Filtermaterials brauchbar sind. Sobald die Filterporen verstopft sind, wird das Filter zurückgespült. Deshalb haben wir nur die bei der Rückspülung entstehenden Schlämme untersuchen können. Im Folgenden präsentieren wir die Ergebnisse dieser untersuchten Rückspülschlämme.

4.2.4.1 Spezifische Aktivität

Insgesamt haben wir 17 Rückspülschlämme aus 14 WVU erhalten, die o. g. Filteranlagen mit Aktivkohle verwenden. Die Standorte dieser WVU sind in Abb. 9 eingetragen.

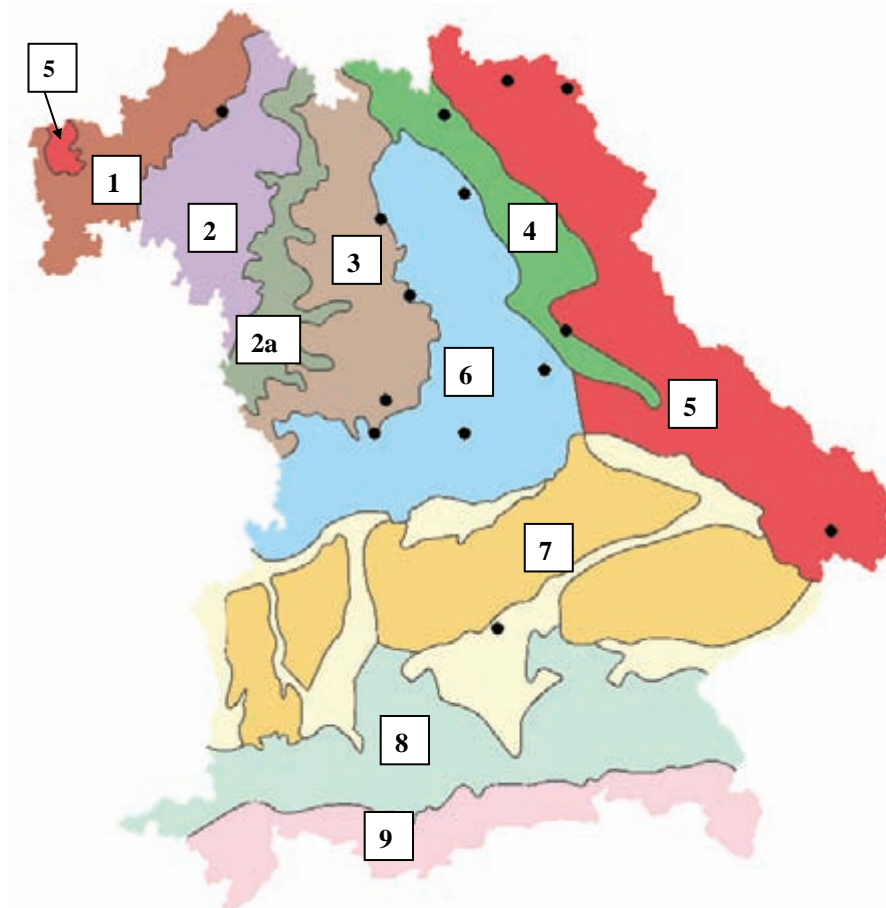


Abb. 9: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU (schwarze Kreise), die Filteranlagen mit Aktivkohle verwenden

Die WVU, die Aufbereitungsanlagen mit Aktivkohle verwenden, befinden sich in den Georegionen 1, 3, 4, 5, 6 und 7.

44 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

In Tab. 16 haben wir die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Schlammproben zusammengestellt.

Tab. 16: Mittelwerte (MW), Mediane, Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Schlämme aus Anlagen, die Aktivkohle neben Enteisenung (Fe), Entmanganung (Mn), Arsenentfernung (As) und Entsäuerung (ES) verwenden (dieses Untersuchungsvorhaben und Studie 1997 - 2001 [5]); n = Probenanzahl, TM = Trockenmasse

	<i>Uran-238</i>	<i>Uran-234</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>
Aktivkohle neben Fe, Mn, As und ES (n = 17)	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]						
MW	18	—	2.074	1.793	154	0,8	105
Median	12	—	1.060	676	107	0,6	33
Minimum	4	—	21	3	24	0,2	6
Maximum	64	—	12.400	16.300	410	3	635

Auch die Ergebnisse der Schlammproben, aus Anlagen mit Aktivkohle sind vergleichbar mit den Proben aus reinen Enteisenungs-, Entmanganungs-, Arsenentfernungsanlagen, Kombinationen von diesen drei Aufbereitungsanlagen (Abschnitt 4.2.1) und Kombinationen dieser Aufbereitungsarten mit Entsäuerungen (Abschnitt 4.2.3). Von den 17 von uns untersuchten Rückspülschlämmen überschreiten zehn die Überwachungsgrenze von 1.000 Bq/kg der StrlSchV [1].

4.2.4.2 Dosisabschätzung

Auch für die Schlämme aus Aufbereitungsanlagen mit Aktivkohle-Filterschichten haben wir für die vier Expositionsszenarien die effektive Dosis abgeschätzt. Die Ergebnisse unserer Abschätzungen haben wir in den Tab. 17 und 18 aufgeführt.

Tab. 17: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m³; MW = Mittelwert; Fe = Enteisenung, Mn = Entmanganung, As = Arsenentfernung, ES = Entsäuerung

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Aktivkohle neben Fe, Mn, As und ES (n = 17)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0038	0,0006	0,0015	0,3815
Median	0,0024	0,0004	0,0009	0,2356
Minimum	0,0011	0,0002	0,0004	0,1049
Maximum	0,0245	0,0037	0,0098	2,4533

Tab. 18: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,003 g/m³; MW = Mittelwert Fe = Enteisenung, Mn = Entmanganung, As = Arsenentfernung, ES = Entsäuerung

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Aktivkohle neben Fe, Mn, As und ES (n = 17)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0020	0,0003	0,0008	0,2007
Median	0,0015	0,0002	0,0006	0,1481
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1020
Maximum	0,0094	0,0014	0,0037	0,9353

Nur eine von den 17 Rückspülschlammproben überschreitet für das Expositionsszenario 4 den Richtwert für die Effektivdosis von 1 mSv pro Jahr für Einzelpersonen der Bevölkerung. Für die realistischeren Expositionsszenarien 1 bis 3 wird von keiner Probe dieser Richtwert überschritten.

Im Jahr 2002 hat ein Erfrischungsgetränkehersteller beim Bayerischen Landesamt für Umwelt bezüglich der Entsorgung von angefallener Aktivkohle (200 kg) aus der Rohwasseraufbereitung angefragt. Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass die spezifische Aktivität von Uran-238 der Aktivkohle 1.400 Bq/kg beträgt. Radium-226 dagegen hat sich nicht auf der Aktivkohle angereichert und die spezifische Aktivität beträgt nur 89 Bq/kg.

Die Ausgangskonzentration im Rohwasser beträgt 746 mBq Uran pro Liter Wasser, dies entspricht 60 µg Uran pro Liter. Nach Durchfluss durch die Aktivkohle ergab sich eine Restkonzentration von 124 mBq Uran pro Liter Reinwasser (entspricht 1 µg/l). Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 98 % bei der Uranentfernung. Dieses Ergebnis stimmt gut mit den Literaturangaben [16] überein.

4.2.5 Radionuklide in Schlämmen aus anderen Arten der Trinkwasseraufbereitung

Als letzte Kategorie präsentieren wir noch die Ergebnisse von einigen Rückspülschlämmen, die aus anderen Arten der Trinkwasseraufbereitung stammen. Dabei handelt es sich um einen Schlamm aus der Aufbereitung mittels Kerzenfilter, eine Probe aus der Entfernung von Schwebstoffen, drei Proben aus einer Anlage zur Oberflächenwasseraufbereitung und eine Probe aus einer Anlage zur Aluminiumentfernung.

4.2.5.1 Spezifische Aktivität

Insgesamt haben wir sechs Schlammproben aus 4 Wasserwerken untersucht. Die Standorte dieser WVU sind in Abb. 10 in die geologische Karte von Bayern eingetragen.

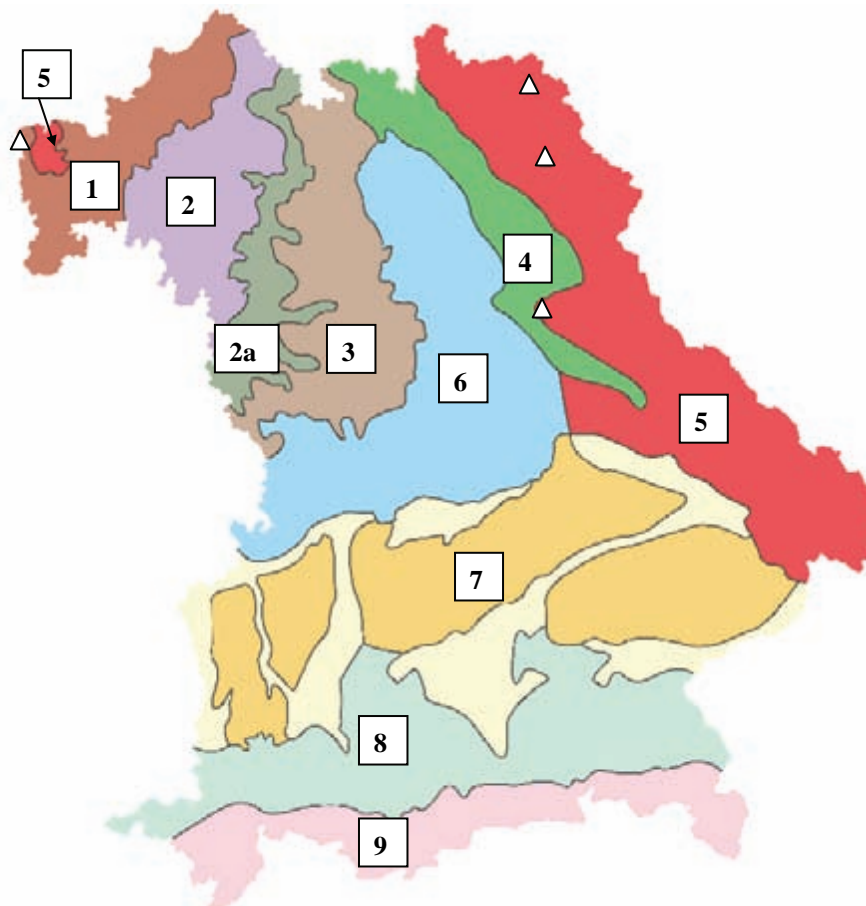


Abb. 10: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU (weiße Dreiecke), die andere Arten der Trinkwasseraufbereitung verwenden

Die Wasserwerke, welche die o. g. Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung betreiben, befinden sich in den Georegionen 1 und 5. Die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Schlammproben sind in Tab. 19 aufgeführt.

Tab. 19: Mittelwerte (MW), Mediane, Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Schlämme aus weiteren Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung; n = Probenanzahl, TM = Trockenmasse

	<i>Uran-238</i>	<i>Uran-234</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>
Weitere Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung (n = 6)	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]						
MW	637	38	612	208	2.570	30	176
Median	44	43	95	84	62	2	27
Minimum	4	25	22	12	47	0,2	9
Maximum	3.065	45	2.590	529	7.600	141	491

Von den sechs untersuchten Proben überschreitet nur die Schlammprobe aus dem Wasserwerk mit der Anlage zur Aluminiumentfernung die Überwachungsgrenze von 1.000 Bq/kg.

4.2.5.2 Dosisabschätzung

Auch für diese vier WVU haben wir für die vier Expositionsszenarien die jährliche effektive Dosis auf dem Entsorgungsweg abgeschätzt. Die Ergebnisse präsentieren wir in den Tab. 20 und 21.

Tab. 20: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Weitere Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung (n = 6)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0021	0,0003	0,0008	0,2098
Median	0,0013	0,0002	0,0005	0,1275
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1027
Maximum	0,0064	0,0010	0,0026	0,6387

Tab. 21: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,003 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
Weitere Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung (n = 6)	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0014	0,0002	0,0006	0,1423
Median	0,0011	0,0002	0,0004	0,1088
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1009
Maximum	0,0031	0,0005	0,0013	0,3129

Die sechs Rückspülschlammproben unterschreiten für alle vier Expositionsszenarien den Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr [1]. Die höchste effektive Dosis für das Expositionsszenario 4 stammt von der Schlammprobe aus der Aluminiumentfernung, für die wir auch die höchsten spezifischen Aktivitäten ermittelt haben.

4.3 Radionuklide in Schlämmen aus allen Trinkwasseraufbereitungen (Zusammenfassung)

Hier werden die Ergebnisse aller untersuchter Rückspülschlämme (dieses Untersuchungsvorhaben und Studie 1997 bis 2001 [5]) in diesem Abschnitt zusammengefasst.

4.3.1 Spezifische Aktivität

Alle untersuchten Schlammpföben sind in Abb. 11 in die vereinfachte geologische Karte von Bayern [71] eingetragen.

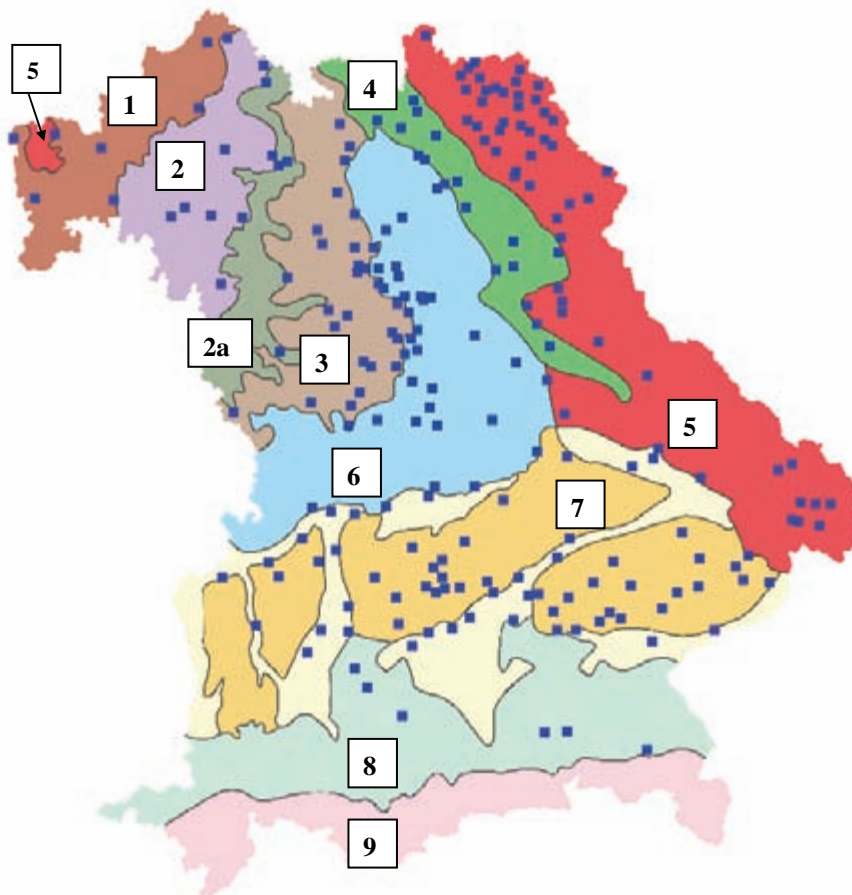


Abb. 11: Hydrogeologische Karte von Bayern [71]: Standorte aller WVU's, deren Rückspülschlammproben untersucht wurden

Die Ergebnisse unsere Untersuchungen sind in Tab. 22 aufgeführt. Dabei hat sich ein Mittelwert aller 282 untersuchter Schlammpföben von 1.822 Bq/kg TM für Radium-226 und von 1.243 Bq/kg TM für Radium-228 mit einem Median von 683 Bq/kg TM für Radium-226 und von 387 Bq/kg TM für Radium-228 ergeben. Uran-238 zeigt deutlich niedrigere Werte für den Mittelwert und den Median von 95 Bq/kg TM bzw. 21 Bq/kg TM. Die Maximalwerte liegen für Radium-226 bei 32.500 Bq/kg TM, für Radium-228 bei 22.700 Bq/kg TM und für Uran-238 bei 3.065 Bq/kg TM. Anhand des Median ist zu erkennen, dass der Großteil der Proben aber bei deutlich niedrigen spezifischen Aktivitäten für Radium-226, Radium-228 und Uran-238 liegt.

Tab. 22: Spezifische Aktivitäten aller untersuchten Rückspülschlammproben (dieses Untersuchungsvorhaben und Studie 1997 - 2001 [5]); n = Probenanzahl; TM = Trockenmasse
 oberer Teil der Tabelle: Mittelwert (MW), Median, Minimal- und Maximalwert der Radionuklide aller untersuchten Schlämme; unterer Teil der Tabelle: Mittelwert und Median der Radionuklide der untersuchten Schlämme der verschiedenen hydrogeologischen Regionen (Georegion) Bayerns

	<i>Uran-238</i>	<i>Uran-234</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>		
n = 282	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]								
Mittelwert	95	255	1.822	1.243	586	4,5	228		
Median	21	43	683	387	201	1,0	100		
Minimalwert	0,8	4,0	6,0	1,0	14	0,03	4,0		
Maximalwert	3.065	3.300	32.500	22.700	7.600	141	3.160		
	<i>Uran-238</i> <i>MW</i>	<i>Uran-238</i> <i>Median</i>	<i>Radium-226</i> <i>MW</i>	<i>Radium-226</i> <i>Median</i>	<i>Radium-228</i> <i>MW</i>	<i>Radium-228</i> <i>Median</i>	<i>Blei-210</i> <i>MW</i>	<i>Blei-210</i> <i>Median</i>	
Georegion	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]								
1 (n = 6)	11	9	217	93	148	21	179	139	
2 (n = 10)	264	10	588	300	368	216	199	76	
2a (n = 9)	14	6	1.663	1.140	1.160	1.050	685	313	
3 (n = 48)	53	26	3.494	1.900	2.262	1.155	1.041	265	
4 (n = 16)	150	85	3.448	468	966	195	839	382	
5 (n = 71)	176	45	392	101	158	37	617	170	
6 (n = 35)	89	18	3.113	1.660	3.349	1.690	522	222	
7 (n = 77)	41	8	1.449	1.025	880	591	327	206	
8 (n = 6)	31	24	970	377	474	277	18	18	

Es zeigt sich deutlich, dass die Proben aus den Georegionen 2a, 3, 4, 6 und 7 alle Überwachungsgrenzen der StrlSchV überschreiten. In diesen Regionen betreiben die Wasserwerke hauptsächlich Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung und es werden vor allem Radium-226 und Radium-228, zum Teil auch Blei-210 aus dem Wasser entfernt und in den Schlämmen angesammelt.

Die Proben der Georegion 5 reichern Uran und Radium nur in geringen Konzentrationen an und unterschreiten größtenteils die Überwachungsgrenzen der StrlSchV. In dieser Region verwenden die Wasserversorgungsunternehmen zur Trinkwasseraufbereitung nur Entsäuerungsanlagen. In den Abb. 12 und 13 stellen wir die Ergebnisse der Untersuchungen (Mittelwert, Median) aller Rückspülschlammproben noch einmal graphisch dar. Dabei werden in beiden Diagrammen die untersuchten Rückspülschlämme den verschiedenen Georegionen zugeordnet. In Abb. 12 tragen wir die spezifischen Aktivitäten der verschiedenen Radionuklide, in Abb. 13 nur die spezifischen Aktivitäten von Radium-226 und Radium-228 in Form eines Balkendiagramms gegen die Georegionen auf.

50 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

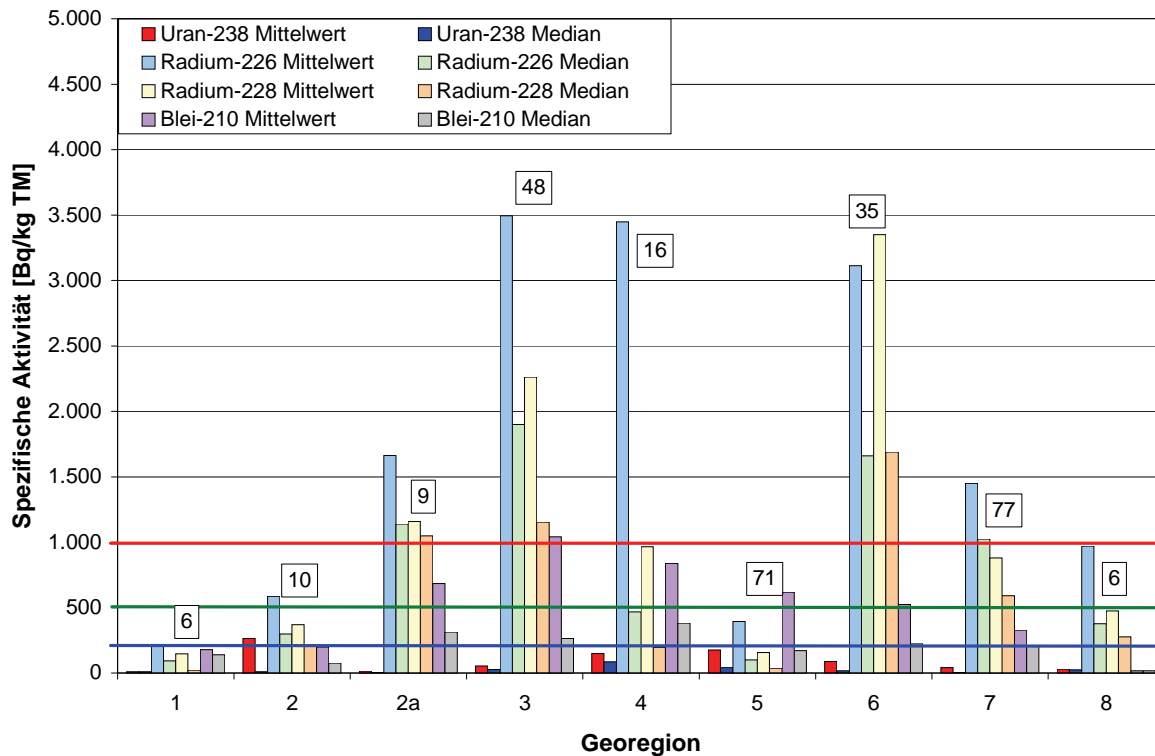


Abb. 12: Mittelwerte und Mediane der spezifischen Aktivitäten von Uran-238, Radium-226, Radium-228 und Blei-210 eingeteilt in die hydrogeologischen Gebiete (Georegionen); rote, grüne und blaue Linie = Überwachungsgrenzen nach Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; Kästchen = Probenanzahl in der entsprechenden Georegion; TM = Trockenmasse

In Abb. 12 ist noch einmal deutlich zu erkennen, dass Rückspülschlämme vor allem in den Georegionen 3, 4 und 6, in geringerem Maß auch in den Georegionen 2a und 7 deutlich erhöhte spezifische Aktivitäten der Radionuklide von Radium-226 und Radium-228 aufweisen und zum Teil alle Überwachungsgrenzen der StrlSchV überschreiten. Radium wird dabei, wie im Abschnitt 3.4.1 erläutert, an ausfallende Eisen- und Manganhydroxide adsorbiert, die durch die Belüftung des Rohwassers ausfallen. Uran-238 reichert sich dagegen kaum in diesen Rückspülschlämmen an. Die Proben der Georegionen 1, 2 und 5 überschreiten nicht alle Überwachungsgrenzen und weisen deutlich niedrigere spezifische Aktivitäten auf als die Proben der o. g. Georegionen. Dies ist auf die Verwendung von Entsäuerungsanlagen zurückzuführen. Für die vier Proben aus den Georegionen 4 und 5 zeigen sich deutlich sowohl erhöhte Aktivitäten für Uran-238, Radium-226 als auch für Blei-210, was die Sonderstellung dieser vier Proben klarmacht.

Abb. 13 zeigt noch einmal deutlich, dass die Georegionen 3, 4 und 6, Gebiete mit erhöhten Radium-226-Aktivitäten in den Schlämmen aus Anlagen der Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung darstellen. Die Georegionen 1, 2 und 5 dagegen sind Gebiete, in denen die Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung niedrige Radium-226-Aktivitäten aufweisen. Die Mediane machen aber deutlich, dass bei mehr als der Hälfte der Proben die spezifischen Aktivitäten unter 1.000 Bq/kg liegen (Tab. 21).

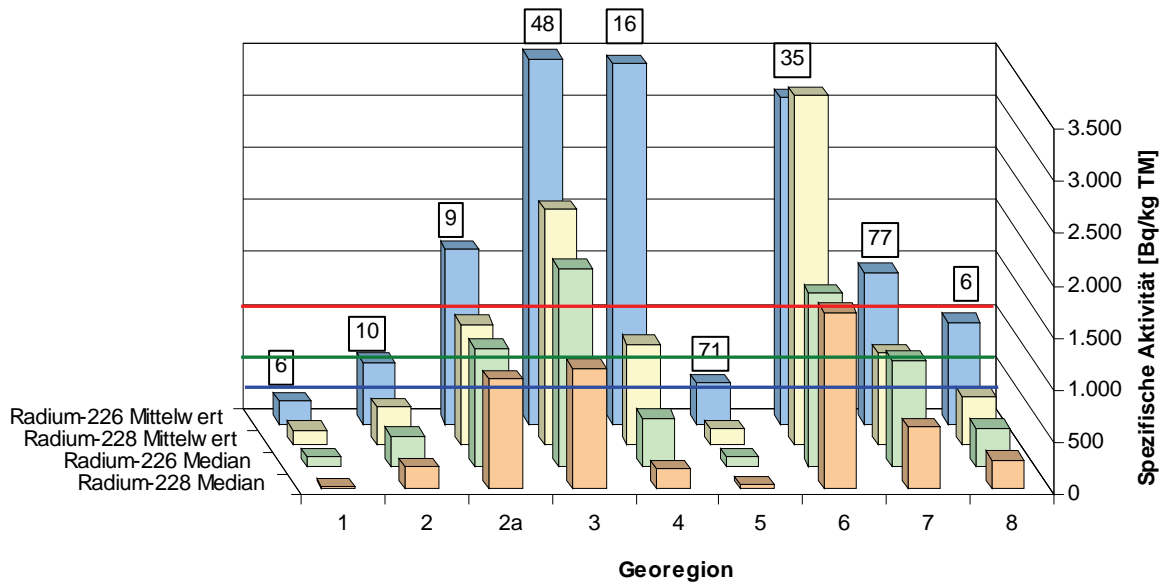


Abb. 13: Mittelwerte und Mediane der spezifischen Aktivitäten von Radium-226 und Radium-228 eingeteilt in die hydrogeologischen Gebiete (Georegionen) als Balkendiagramm; rote, grüne und blaue Linie = Überwachungsgrenzen nach Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; Kästchen = Probenanzahl in der entsprechenden Georegion; TM = Trockenmasse

In Tab. 23 sind die 282 untersuchten Schlammproben in verschiedene Wertebereiche eingeteilt, um festzustellen, wie viele Proben die Überwachungsgrenzen der Strahlenschutzverordnung (Anlage XII, Teil B [1]) überschreiten.

Tab. 23: Spezifische Aktivitäten der untersuchten Schlammproben (dieses Untersuchungsvorhaben und Studie 1997 - 2001 [5]) eingeteilt nach Wertebereichen; TM = Trockenmasse

Wertebereich [Bq/kg TM]	Uran-238	Radium-226	Radium-228	Blei-210
< 200	127	75	108	62
200 - 500	14	40	44	33
500 - 1.000	3	35	42	11
1.000 - 2.000	1	53	37	11
2.000 - 5.000	4	41	29	9
5.000 - 10.000	0	11	10	3
> 10.000	0	11	4	0
kein Messwert	133	16	8	153

Aus Tab. 23 ist ersichtlich, dass der Großteil der spezifischen Aktivitäten bei Werten unter 1.000 Bq/kg liegt und nur einige Proben spezifische Aktivitäten größer 1.000 Bq/kg aufweisen. Für Uran-238 haben wir von 133 Proben keinen Messwert, da wir nur von etwa der Hälfte der Proben Uran mittels Alpha-Spektrometrie bzw. ICP-MS gemessen haben. Blei-210 war ebenfalls nur bei etwa der Hälfte der Proben gamma-spektrometrisch messbar.

Die 282 untersuchten Rückstandsproben können wiederum in 240 reine Schlammproben und 42 kiesige Rückstände unterteilt werden. Beide Probenarten wurden aus den Absetzbecken der Wasserwerke genommen und sind bei der Rückspülung der Filter angefallen. Das kiesige Material wurde ebenfalls bei der Rückspülung aus den Filterkesseln ausgespült und in den Absetzbecken abgelagert. Die spezifischen Aktivitäten dieser beiden Probenarten haben wir in Tab. 24 aufgeführt. Daraus ist ersichtlich, dass die reinen Schlammproben, bedingt durch die Körnchengröße höhere spezifische Aktivitäten in den aufgeführten Radionukliden aufweisen als die kiesigen Rückstände.

52 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 24: Mittelwerte und Mediane der spezifischen Aktivitäten der reinen Schlammproben und der kiesigen Rückstandsproben; TM = Trockenmasse

	<i>Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]</i>			
	Uran-238	Radium-226	Radium-228	Blei-210
Schlamm				
Mittelwert	209	2.041	1.388	740
Median	26	909	483	220
Minimum	0,8	6	2	14
Maximum	4.720	32.500	22.700	7.600
Kiesiger Rückstand				
Mittelwert	42	694	371	253
Median	10	179	57	89
Minimum	2	8	1	23
Maximum	339	4.290	4.350	1.530

Wir haben von zwei Wasserwerken Ablagerungen (Inkrustierungen) aus Wasserrohren untersucht. Die Ergebnisse (Tab. 25) haben aber gezeigt, dass diese Inkrustierungen keine erhöhten spezifischen Aktivitäten von Uran-238 und Radium-226 bzw. Radium-228 enthalten..

Tab. 25: Spezifische Aktivitäten der Radionuklide in den untersuchten Inkrustierungen aus Wasserrohren; TM = Trockenmasse

<i>REx.-Nr.</i>	<i>Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]</i>		
	Uran-238	Radium-226	Radium-228
3008	180	228	69
5305	—	131	12

Zusätzlich untersuchten wir auch Rückspülschlämme aus der Wasseraufbereitung von Mineralwasserherstellern, da nach der Mineral- und Tafelwasserverordnung [13] die Mineralwässer (bei Eignung zur Säuglingsernährung) zulässige Höchstkonzentrationen für Radium-226 und Radium-228 nicht überschreiten dürfen. Es handelt sich dabei um acht Schlämme aus Anlagen zur Enteisung/Entmanganung. Die Ergebnisse sind in Tab. 26 aufgeführt.

Tab. 26: Mittelwert (MW), Median, Minimal- und Maximalwert der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide Uran-238, Radium-226, Radium-228, Uran-235 und Kalium-40 aller untersuchten Schlämme aus der Mineralwasserherstellung; n = Probenanzahl, TM = Trockenmasse

	<i>Uran-238</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>
n = 8	<i>Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]</i>				
MW	4.425	1.939	751	204	368
Median	4.425	918	511	204	249
Minimum	589	50	71	27	27
Maximum	8.261	6.190	2.300	380	947

Da wir nur bei zwei Proben Uran-238 und Uran-235 ermitteln konnten, sind deren Mittelwert und Median gleich. Drei dieser Schlämme überschreiten alle Überwachungsgrenzen der StrlSchV [1].

In der Abb. 14 sind die Standorte der acht Mineralwasserhersteller, von denen wir Schlämme untersucht haben, eingezeichnet. Die Schlämme, deren spezifische Aktivitäten alle Überwachungsgrenzen der StrlSchV überschreiten, befinden sich in den Georegionen 5 (eine Probe) und 7 (zwei Proben).

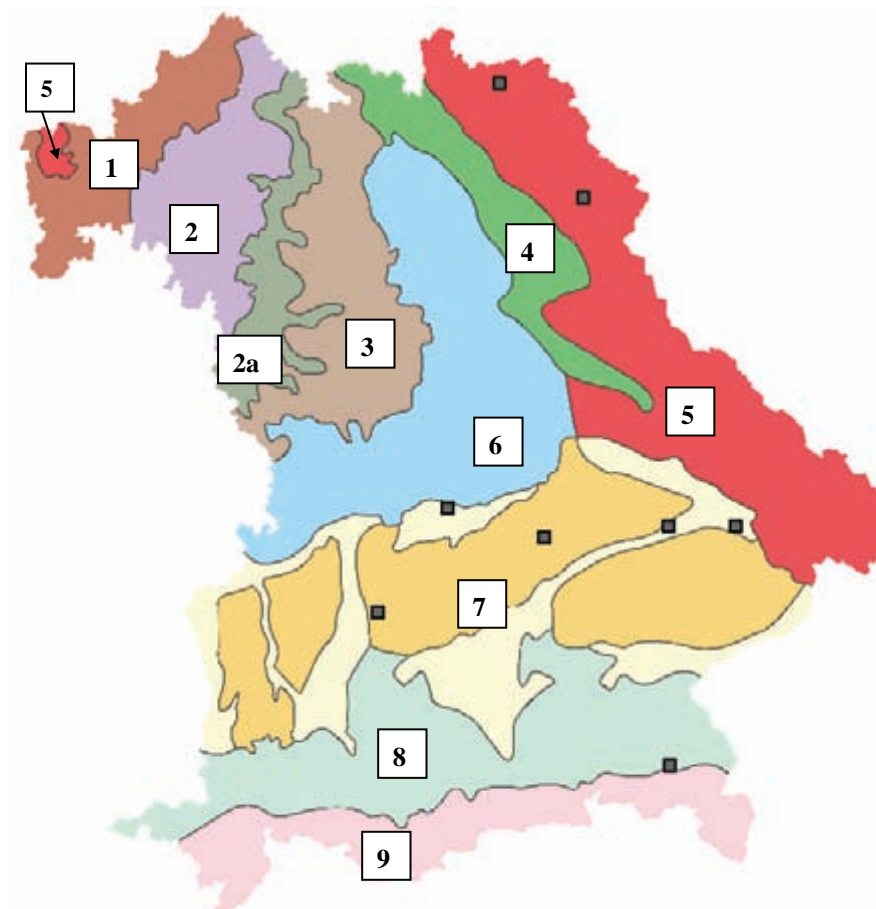


Abb. 14: Hydrogeologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der Mineralwasserhersteller (graue Vierecke)

4.3.2 Dosisabschätzung

In den Tab. 27 und 28 sind die Ergebnisse unserer Dosisabschätzung aufgeführt. Da wir diese für 282 Rückstandsproben vorgenommen haben, beschränken wir uns in diesen Tabellen auf die Mittelwerte, Mediane, Minimal- und Maximalwerte aller untersuchten Proben.

Tab. 27: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
n = 282	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0032	0,0005	0,0013	0,3214
Median	0,0019	0,0003	0,0008	0,1886
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1007
Maximum	0,0263	0,0039	0,0105	2,6278

54 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 28: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,003 g/m³; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
n = 282	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0019	0,0003	0,0007	0,1795
Median	0,0013	0,0002	0,0005	0,1323
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1003
Maximum	0,0198	0,0015	0,0039	0,9794

Die Dosisabschätzung zeigt, dass nur im Expositionsszenario 4 („Worst Case“) der Richtwert von 1 mSv pro Jahr überschritten wird [1]. Alle anderen realistischeren Szenarien unterschreiten diesen Richtwert.

Von den 282 Schlammproben wird der Richtwert nur bei der Handhabung von 18 Proben überschritten (nur Szenario 4). Dieses Szenario stellt aber den Worst Case dar und kein Beschäftigter in den Wasserversorgungsunternehmen handhabt 2000 Stunden pro Jahr diese Schlämme.

Bei realistischen Expositionszeiten (z. B. Szenario 1 bis 3) wird der Richtwert bei der Verwertung oder Beseitigung aller Rückspülschlammproben deutlich unterschritten.

Die Dosisabschätzung der acht untersuchten Schlämme aus der Mineralwasserherstellung präsentieren wir in den Tab. 29 und 30.

Tab. 29: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m³ für die Schlämme aus der Mineralwasserherstellung; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
n = 8	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0029	0,0004	0,0012	0,2870
Median	0,0018	0,0003	0,0007	0,1774
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1044
Maximum	0,0087	0,0013	0,0035	0,8707

Tab. 30: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,003 g/m³ für die Schlämme aus der Mineralwasserherstellung; MW = Mittelwert

	<i>Szenario 1</i>	<i>Szenario 2</i>	<i>Szenario 3</i>	<i>Szenario 4</i>
n = 8	Effektive Jahresdosis [mSv/a]			
MW	0,0017	0,0003	0,0007	0,1649
Median	0,0013	0,0002	0,0005	0,1278
Minimum	0,0010	0,0002	0,0004	0,1018
Maximum	0,0036	0,0005	0,0014	0,3583

Die Ergebnisse der Dosisabschätzung bei den acht Mineralwasserherstellern sind vergleichbar mit den effektiven Jahresdosen bei den untersuchten Wasserversorgungsunternehmen. Die höchsten jährlichen Effektivdosen ergeben sich für das Szenario 4 (Worst Case), sind aber unwahrscheinlich. Dagegen sind die Ergebnisse für die Szenarien 1 bis 3 am realistischsten. Alle von uns ermittelten Werte unterschreiten den Richtwert von 1 mSv pro Jahr der StrlSchV [1].

4.4 Radionuklide in Rückständen bei der gezielten Uranentfernung mit Hilfe von Anionenaustauschern

Durch die geplante Aufnahme eines Grenzwertes für Uran in die Trinkwasserverordnung stehen einige Wasserversorgungsunternehmen vor der Aufgabe, Aufbereitungsanlagen zur Entfernung von Uran zu installieren. Hierbei fallen Materialien an, die stärker an Uran und den übrigen Radionukliden angereichert sind als die Schlämme aus den bisherigen Aufbereitungsanlagen (deutliche Überschreitung der Überwachungsgrenzwerte der StrlSchV [1]), so dass Entsorgungswege für diese Schlämme ausgearbeitet werden müssen.

Im Rahmen des F+E-Vorhabens „Verfahrenstechnische Untersuchungen zur optimalen großtechnischen Nutzung des starken Anionenaustauscherharzes S 6368 zur Uranentfernung in bayerischen Wasserwerken“ hat das ehemalige Bayerische Landesamt für Umweltschutz als zuständige Behörde für die Entsorgung von überwachungsbedürftigen Rückständen gemäß StrlSchV folgende Untersuchungen nach § 1 Abs. 5d des Vertrages zwischen dem Freistaat Bayern (vertreten durch das ehemalige Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft) und des Wasserwerkes mit der REx.-Nr. 3183 durchgeführt:

1. Gammaspektroskopische Untersuchungen von Material- und Rückstandsproben
2. Radionuklidmessungen der Uran- und Thorium-Zerfallsreihe in Feststoffen, wie Ionenaustauschermaterialien und Spülschlämmen.

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen werden die effektive Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung gemäß § 98 StrlSchV [1] für die Beseitigung oder Verwertung des verwendeten Anionenaustauscherharzes abgeschätzt.

Zwei mögliche Szenarien stehen zur Diskussion:

1. Das verwendete Anionenaustauscherharz wird maximal mit Uran beladen und anschließend auf einer Deponie entsorgt. Dabei überschreiten die spezifischen Aktivitäten der einzelnen Radionuklide die in der StrlSchV [1] genannten Grenzwerte. Eine Entlassung aus der Überwachung und anschließende Deponierung ist nur möglich, wenn der Richtwert für die effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung 1 mSv/a nicht überschreitet. Dieser Entsorgungsweg wird für das Wasserwerk mit der REx.-Nr. 3183 angestrebt
2. Das Anionenaustauscherharz wird nur soweit beladen, dass die spezifischen Aktivitäten der einzelnen Radionuklide keine der in der StrlSchV [1] genannten Grenzwerte überschreiten und somit keine Probleme bei der Deponierung auftreten. Dazu muss aber vorher abgeschätzt werden, nach welcher Betriebsdauer bzw. nach wie viel Bettvolumina (BV) die einzelnen Radionuklide den Grenzwert von 10.000 Bq/kg bzw. 50.000 Bq/kg für die gemeinsame Deponierung auf Deponien für (besonders) überwachungsbedürftige Abfälle noch nicht überschreiten (Anlage XII, Teil C Nr. 1 Satz 4 [1]). Dieser Entsorgungsweg wird von einem weiteren Wasserwerk (REx.-Nr. 3240) angewendet, welches Uran mittels eines Anionenaustauschers entfernt, um den genannten Grenzwert von 10 Bq/g nicht zu überschreiten.

Nach Entlassung des Anionenaustauscherharzes aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung ist ebenfalls die abfallrechtliche Zulässigkeit des Entsorgungsweges mit der zuständigen Behörde für das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (Landesamt für Umwelt – Abteilung Abfallwirtschaft) abzuklären.

Bisher sind uns zwei Wasserwerke bekannt, die Anionenaustauscher zur gezielten Uranentfernung einsetzen bzw. einsetzen möchten.

Die beiden o. g. Szenarien möchten wir in den nächsten Abschnitten für das Wasserwerk 3183 präsentieren, da für das dort verwendete Anionenaustauscherharz die spezifischen Aktivitäten ermittelt wurden.

4.4.1 Spezifische Aktivität

Im Rahmen des o. g. Forschungsprojektes hat das damalige Landesamt für Umweltschutz die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen in mehreren Anionenaustauscherproben einer im Wasserwerk 3183 installierten Versuchsanlage zur Uranentfernung untersucht. Außerdem ermittelten wir die spezifischen Aktivitäten der einzelnen Radionuklide beider Zerfallsreihen in einer Rohwasser-, Reinwasser- und Anlagenwasserprobe (Tabelle B.4 im Anhang). Bei der Anlagenwasserprobe handelt es sich um das Rohwasser des Wasserwerkes, nachdem es über den Anionenaustauscher gelaufen ist und dabei dessen Uran entfernt wurde.

Roh- und Reinwasser des untersuchten Brunnens des Wasserwerkes 3183 weisen eine Urankonzentration von 25 µg bzw. 24 µg Uran pro Liter Wasser (310 mBq bzw. 300 mBq Uran pro Liter Wasser) auf. Die Tatsache, dass sich die Urankonzentrationen des Roh- und des Reinwassers kaum unterscheiden, bedeutet, dass kaum Uran aus dem Rohwasser durch die konventionelle Aufbereitung (Enteisenung/Entmanganung) entfernt wird. Die spezifische Aktivität von Uran-238 des Anlagenwassers beträgt nach der Passage durch das Anionenaustauscherharz nur noch weniger als 0,06 µg Uran pro Liter Wasser (entspricht weniger als 0,74 mBq/l). Uran-238 wird zu 99,8 % aus dem Rohwasser entfernt.

Für die Dosisabschätzung sind die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Anionenaustauscherproben notwendig. Diese sind in Tab. 31 aufgelistet.

Tab. 31: Spezifische Aktivitäten der untersuchten Anionenaustauscherharze aus Wasserwerk 3183; FM = Feuchtmasse

	Spezifische Aktivität [Bq/kg FM]			
	Uran-238	Thorium-234	Protactinium-234m	Uran-234
Probe 27/28.10.04	—	3.870 ± 1.330	4.610 ± 401	2.330 ± 1.480
Probe 28/28.10.04	—	6.040 ± 2.080	6.220 ± 646	2.150 ± 1.470
Probe a4/02.06.05	142.000 ± 5.690	75.200 ± 25.800	102.000 ± 8.970	132.000 ± 48.800
Probe b1/02.06.05	85.700 ± 5.230	51.100 ± 17.600	63.700 ± 5.810	86.900 ± 37.500
Probe b5/02.06.05	93.600 ± 4.960	49.500 ± 17.000	62.700 ± 5.730	112.000 ± 43.500
Probe d3/02.06.05	162.000 ± 6.800	95.800 ± 32.900	131.000 ± 14.400	190.000 ± 68.700

Die ermittelten spezifischen Aktivitäten der Radionuklide aus der Uranreihe liegen alle über den Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil B der Strahlenschutzverordnung [1].

Ebenfalls überschreiten fast alle Radionuklide der Uranreihe (Proben a4, b1, b5 und d3) die maximalen spezifischen Aktivitäten für die gemeinsame Deponierung mit anderen Rückständen und Abfällen nach § 98 und Anlage XII, Teil C, Nr. 1, Satz 4 [1], von 10.000 Bq/kg bei Deponierung auf Deponien für überwachungsbedürftige Abfälle bzw. 50.000 Bq/kg bei Deponierung auf Deponien für besonders überwachungsbedürftige Abfälle. Bei den von uns untersuchten Proben handelt es sich um nahezu maximal beladene Anionenaustauscherharze.

Eine Entlassung aus der Überwachung und eine anschließende Deponierung ist deshalb nur möglich, wenn der Richtwert für die effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung 1 mSv/a nicht überschreitet (§ 98 Abs. 1 StrlSchV [1]).

Für die Abschätzung der effektiven Dosis sollte die spezifische Aktivität von Uran-238 als Leitnuklid verwendet werden, da das Anionenaustauscherharz dieses gezielt aus dem Rohwasser entfernt und alle weiteren Radionuklide (Thorium-234, Protactinium-234m und Uran-234) aus dem Zerfall des Uran-238 entstanden und eventuell noch nicht im Gleichgewicht mit Uran-238 sind.

4.4.2 Dosisabschätzung bei maximaler Beladung

Für die Entlassung von Rückständen (Anionenaustauscherharze) aus der Überwachung nach § 98 StrlSchV [1] ist es notwendig, beim Landesamt für Umwelt (Abteilung Strahlenschutz) als zuständige Behörde einen Antrag auf Entlassung zu stellen (§ 98 Abs. 1 StrlSchV [1]). Daraufhin entlässt diese durch einen schriftlichen Bescheid den Rückstand aus der Überwachung, wenn der Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung unterschritten wird. Der Antragsteller hat durch eine Dosisabschätzung, unter Anwendung der in Anlage XII, Teil D StrlSchV [1] genannten Grundsätze, dafür den Nachweis zu erbringen (§ 98 Abs. 2 StrlSchV). Vor Erteilung des Bescheides muss der Antragssteller außerdem eine Erklärung über den Verbleib des künftigen Abfalls und eine Annahmeerklärung des Verwerters oder Beseitigers vorlegen.

Zur Abschätzung der effektiven Jahresdosis verwendeten wir im Falle des Wasserwerks mit der REx.-Nr. 3183 die spezifischen Aktivitäten der Probe d3 (spezifische Aktivität für Uran-238: 162.000 Bq/kg).

Die effektive Dosis (E_{Eff}) setzt sich, wie bereits früher erwähnt, aus den drei Teildosen der direkten Gamma-Ortsdosisleistung (E_{Dir}), der effektiven Dosis aus der Inhalation (E_{Inh}) und der effektiven Dosis aus der Ingestion (E_{Ing}) zusammen [73].

Die Gamma-Ortsdosisleistung (E_{Dir}) kann vernachlässigt werden, da wir an den Proben nur Untergrundstrahlung gemessen haben. Ebenfalls kann bei der Dosisabschätzung für die Beseitigung und Verwertung von Anionenaustauscherharzen die effektive Dosis aus der Inhalation unberücksichtigt bleiben, da das Material feucht beseitigt wird und recht grobkörnig ist. Damit ist eine Aufnahme über die Lunge unwahrscheinlich.

In Tab. 32 sind die Abschätzungen der effektiven Dosis aus der Ingestion für verschiedene Aufenthaltszeiten und Inkorporationen aufgelistet.

Tab. 32: Ergebnisse der Abschätzung der effektiven Dosis aus der Ingestion für verschiedene Aufenthaltszeiten; rot markiert = Richtwert von 1 mSv/a überschritten [1]

Aufenthaltszeit [h]	Inkorporation [g/h]	E_{ing} [mSv]
8	0,006	0,00081
2000	0,006	0,202

Da eine Entsorgung des untersuchten Anionenaustauscherharzes zweimal im Jahr stattfinden soll und auf dem gesamten Entsorgungsweg kein Beteiligter (Wasserwart, LKW-Fahrer oder Deponiearbeiter) mehr als 8 Stunden pro Entsorgung Kontakt mit dem Anionenaustauscherharz haben wird, ergibt sich bei einer Inkorporation von 6 mg/h, die in der Berechnungsgrundlage Bergbau für Personen > 7 Jahre angegeben wird, [73] eine effektive Dosis von 0,0008 mSv pro Entsorgung. Die EPA (U.S. Environmental Protection Agency [76]) geht dagegen von 50 mg/h aus, was für einen Erwachsenen im Vergleich zu Kindern einen recht willkürlichen Wert darstellt.

Unsere Dosisabschätzung für die Entsorgung des Anionenaustauscherharzes hat im Falle des Wasserwerks mit der REx.-Nr. 3183 gezeigt, dass selbst bei einer Jahresarbeitszeit von 2.000 Stunden und einer Inkorporation von 6 mg/h [73] der Richtwert der effektiven Dosis von 1 Millisievert pro Jahr nicht überschritten wird. Der kritische Faktor für eine mögliche Überschreitung des Richtwertes der effektiven Dosis stellt die Aufnahmemenge (Inkorporation) für das Anionenaustauscherharz durch den Beschäftigten dar. Es muss deshalb auch hier bei der Entsorgung durch die Beteiligten darauf geachtet werden, immer Arbeitshandschuhe zu tragen und nach beendeter Arbeit die Hände zu waschen, um die Inkorporation möglichst gering zu halten.

Im Falle des Wasserwerkes 3183 sollen pro Jahr etwa 0,42 Tonnen an Anionenaustauscherharz auf einer Deponie entsorgt werden. Die Überwachungsgrenzen C^M gemäß Anlage XII, Teil C StrlSchV [1] betragen:

C^M [Bq/kg] DEPONIEARTEN

- 50 wenn Deponiefläche > 15 ha
- 100 wenn Deponiefläche ≤ 15 ha
- 1.000 unabhängig von Deponiefläche, wenn Grundwasserbelastung ausgeschlossen
- 5.000 untertägige Beseitigung

Um die in § 98 und der Anlage XII, Teil C StrlSchV genannten Überwachungsgrenzen C^M [1] alle zu unterschreiten, müssen die 0,42 Tonnen Anionenaustauscherharz auf einer Deponie mit einer jährlichen Abfallmenge von mindestens 5.000 Tonnen deponiert werden. Bei 0,42 Tonnen Anionenaustauscherharz und einer Abfallmenge der Deponie von 5.000 Tonnen im Jahr, berechnet sich die Gesamtaktivität von Uran-238 auf der Deponie zu 13,6 Bq/kg und unterschreitet damit alle o. g. Überwachungsgrenzen C^M .

Aus Sicht des Strahlenschutzes ist gegen eine Beseitigung oder Verwertung auf einer Deponie deshalb nichts einzuwenden.

4.4.3 Teilweise Beladung des Anionenaustauschers

Soll eine Überschreitung der maximalen spezifischen Aktivitäten für jedes Radionuklid der Uranreihe von 10.000 Bq/kg bzw. von 50.000 Bq/kg für die gemeinsame Deponierung mit anderen Rückständen und Abfällen nach § 98 und Anlage XII, Teil C, Nr. 1, Satz 4 [1] verhindert werden, um eine sonst für jede Entsorgung notwendige Dosisabschätzung (§ 98 StrlSchV [1]) zu vermeiden, darf nur eine teilweise Beladung der Anionenaustauscherharze erfolgen. Nach einer definierten Betriebsdauer von x Bettvolumina wird das Anionenaustauscherharz auf seine Beladung mit radioaktiven Nukliden überprüft. Unter Bettvolumen (BV) versteht man den Quotient aus Wassermenge in Kubikmeter und Reaktorvolumen in Kubikmeter. Damit kann ermittelt werden, bei welchen Bettvolumina das Anionenaustauscherharz eine spezifische Aktivität von max. 10.000 bzw. 50.000 Bq/kg [1] nicht überschreitet.

Als Beispiel für diese Abschätzung anhand der spezifischen Aktivität und des Bettvolumens dient uns die Probe a4 (Tab. 31) aus dem Wasserwerk 3183 durch. Die spezifische Aktivität von 142.000 Bq/kg Uran-238 erreichte das Anionenaustauscherharz nach 300.000 BV. Bei 20.000 BV findet dagegen keine Überschreitung des Grenzwertes von 10.000 Bq/kg für eine Entsorgung auf Deponien für überwachungsbedürftige Abfälle und bei 100.000 BV des Grenzwertes von 50.000 Bq/kg für die Deponierung auf Deponien für besonders überwachungsbedürftige Abfälle statt. Die Betriebsdauer (Bettvolumen) in jedem Wasserwerk unterscheidet sich aber je nach Urankonzentration im Wasser und deshalb ist diese Abschätzung für jedes Wasserwerk gesondert durchzuführen.

Bei einer eingeschränkten Beladung werden neben dem Richtwert für die effektive Dosis von 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung auch die Grenzwerte für die gemeinsame Deponierung von 10.000 Bq/kg und 50.000 Bq/kg (Anlage XII, Teil C, Nr. 1, Satz 4 [1]) nicht überschritten.

Im Wasserwerk 3183 ergibt sich nach 20.000 BV eine spezifische Aktivität von Uran-238 von etwa 9.500 Bq/kg. Für die gemeinsame Deponierung von 0,42 Tonnen an Anionenaustauscherharz auf einer Deponie mit einer jährlichen Abfallmenge von mindestens 5.000 Tonnen berechnet sich die Gesamtaktivität zu 0,8 Bq/kg. Nach 100.000 BV ergibt sich eine spezifische Aktivität von etwa 47.300 Bq/kg. Daraus berechnet sich eine jährliche Gesamtaktivität von 4 Bq/kg für die ausgewählte Deponie. Beide Werte der Gesamtaktivität unterschreiten die Überwachungsgrenzen C^M für die gemeinsame Deponierung (Seite 64).

4.5 Schwermetallgehalte in den untersuchten Rückspülschlämmen

Im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens ermittelten wir von 136 Rückspülschlämmen die Schwermetallgehalte mit Hilfe der ICP-MS. Es hat sich gezeigt, dass einige der Schlämme neben hohen Eisen- und Mangan-Gehalten, auch hohe Arsen-Gehalte aufweisen. Die anfallenden Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung müssen bei der Entsorgung auf einer Deponie die Zuordnungswerte für die entsprechenden Deponien erfüllen, d. h. neben den strahlenschutzrechtlichen Anforderungen (§ 97 bis 102 und Anlage XII StrlSchV [1]) müssen die zu entsorgenden Rückstände auch die abfallrechtlichen Anforderungen (Zuordnungswerte Z 0 für die Verwendung in bodenähnlichen Anwendungen und Z 1, Z 2 für den eingeschränkten Einbau in technischen Bauwerken [77] bzw. die entsprechenden Zuordnungswerte für Deponien) erfüllen.

Die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen der Rückspülschlämme (Schwermetallgehalte) mit den Zuordnungswerten Z 0 bis Z 2 für Boden aus dem LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) Merkblatt Nr. 20 [77] sind im Anhang in den Tabellen D.1 und D.2 aufgeführt.

Außerdem wollten wir an einigen Proben die Eluierbarkeit der Radionuklide mit Wasser nach DIN 38 414 Teil 4 [78] überprüfen. In einem ersten Versuch haben wir an der Rückspülschlammprobe mit der höchsten spezifischen Aktivität für Radium-226 (32.000 Bq/kg) die Eluierbarkeit mit Wasser nach DIN 38 414 Teil 4 überprüft. Dabei ist kein Radium-226 aus der Schlammprobe in Lösung gegangen. Die einzigen gelösten Radionuklide waren Blei-214 mit 185 Bq/kg und Bismut-214 mit 163 Bq/kg. Die spezifischen Aktivitäten von Blei und Bismut stammen wahrscheinlich aus dem Zerfall von Radon, welches aus dem Schlamm entgast ist und sich im Wasser gelöst hat.

Die Ergebnisse der Schwermetalluntersuchung haben gezeigt, dass neben Eisen und Mangan auch weitere Elemente wie Arsen, Wismut, Cadmium, Kobalt, Kupfer, Nickel, Zink, Kalium, Magnesium, Natrium, Phosphor und Schwefel stark in den Schlämmen angereichert werden. Bei der Deponierung spielt dabei Arsen eine wichtige Rolle, da unter reduzierenden Bedingungen Arsenverbindungen im Sickerwasser gelöst werden und so ins Grundwasser gelangen können [49], [79].

4.6 Entsorgung der Rückspülschlämme

Wie in Abschnitt 4.1 (Tab. 6) bereits ausgeführt, werden die meisten Rückspülschlämme auf einer Deponie (meistens Hausmülldeponie, zum Teil aber auch Bauschuttdeponie und Sondermülldeponie) entsorgt. Viele Rückspülschlämme werden auch mit einem Pumpwagen aus dem Absetzbecken entnommen und zur Beseitigung zur Kläranlage gebracht.

Für die häufigsten Entsorgungswege, wie Deponierung, Kläranlage und Entsorgungsfirma (eventuell auf Deponie), aber auch die Entsorgung über eine Behandlungsanlage, Vorfluter und den Restmüll haben unsere Dosisabschätzungen gezeigt, dass auf dem gesamten Entsorgungsweg (vom Wasserwart über den Lkw-Fahrer bis zum Deponiearbeiter) der Richtwert der jährlichen Effektivdosis von 1 mSv für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht überschritten wird. Es gibt deshalb aus Sicht des Strahlenschutzes keinen Einwand gegen diese Entsorgungsarten.

Von zehn Wasserversorgungsunternehmen werden die anfallenden Schlämme (11 Schlammproben, da bei einem WVU zwei Schlämme anfallen) landwirtschaftlich genutzt. Dies kann möglicherweise zu einer Strahlenexposition (Belastungspfad: Boden – Pflanze, und Futterpflanze – Tier – Milch - Fleisch) führen. Bei sieben dieser zehn WVU fallen Schlammengen zwischen 4 und 20 m³, bei einem Wasserwerk 525 m³ und zwei haben keine Angaben dazu gemacht (Fragebogen) pro Jahr an. Die spezifischen Aktivitäten für Radium-226 und Radium-228 dieser Wasserwerke liegen zwischen 9,4 und 580 Bq/kg bzw. 2,5 und 1.990 Bq/kg. Sechs der zehn WVU betreiben Anlagen zur Entsäuerung, zwei Anlagen zur Enteisung/Entmanganung und zwei Kombinationen von Enteisungs-, Entmanganungsanlagen kombiniert mit Entsäuerungsanlagen.

Eine Dosisabschätzung nach den Berechnungsgrundlagen Bergbau [73] führt zu Werten, die weit vom Grenzwert von 1 mSv entfernt sind.

60 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

5 Radionuklid-Verteilung in Roh- und Reinwasser nach der Aufbereitung

5.1 Untersuchung von Radionukliden in Wasserproben

Wie bereits früher erwähnt, existiert wegen des sog. Rückstoßeffektes [18] in natürlichen Gewässern kein radioaktives Gleichgewicht, d.h. es sollte ein Überschuss an Uran-234 gegenüber Uran-238 vorhanden sein. Wir haben von 21 Roh- und Reinwasserproben die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide gemessen. Von diesen Wasserproben wurden zehn von uns und elf vom Bundesamt für Umweltschutz in Berlin analysiert.

Zusätzlich hat uns das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) die Daten für Bayern aus einer Messkampagne zur Radioaktivität verschiedener Roh- und Reinwässer in ganz Deutschland zur Verfügung gestellt. Die 21 Messergebnisse des BfS und die o. g. von uns gemessenen Proben stellen wir als Mittelwert, Median, Minimal- und Maximalwert sortiert nach den Georegionen in Tab. 33 dar. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang (Tabelle B.4) aufgeführt.

Tab. 33: Spezifische Aktivitäten verschiedener Radionuklide in Roh- und Reinwasserproben Bayerns für die Georegionen 2 und 3; RoW = Rohwasser, ReW = Reinwasser, MW = Mittelwert

Georegion			Spezifische Aktivität [mBq/l]						
			Uran-238	Uran-234	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Uran-235	Uran-234/ Uran-238
2	RoW	MW	16,35	29,10	6,60	8,60	4,12	< 4,3	1,78
		Median	16,35	29,10	6,60	8,60	4,12	< 4,3	1,78
		Min	16,30	27,00	6,38	8,46	1,70	< 4,3	1,65
		Max	16,40	31,20	6,82	8,74	6,53	< 4,3	1,91
	ReW	MW	17,05	31,80	4,39	6,57	1,75	< 3,95	1,86
		Median	17,05	31,80	4,39	6,57	1,75	< 3,95	1,86
		Min	17,00	30,90	3,83	4,66	1,70	< 3,6	1,82
		Max	17,10	32,70	4,95	8,47	1,80	< 4,3	1,91
3	RoW	MW	68,47	138,06	84,68	52,92	2,65	5,90	4,22
		Median	13,00	156,00	58,60	53,25	2,21	4,43	3,21
		Min	2,43	41,70	3,54	5,35	1,71	< 3,64	1,25
		Max	422,00	248,00	256,00	95,70	5,10	19,41	7,21
	ReW	MW	65,95	135,64	49,13	35,49	2,08	6,14	4,03
		Median	11,90	152,00	26,90	35,30	1,80	4,34	3,24
		Min	2,27	37,50	3,22	3,53	1,66	< 3,66	1,40
		Max	411,00	236,00	183,00	65,80	3,80	18,91	8,61

Tab. 33 (Fortsetzung): Spezifische Aktivitäten verschiedener Radionuklide in Roh- und Reinwasserproben Bayerns für die Georegion 4, 5, 6 und 7; RoW = Rohwasser, ReW = Reinwasser, MW = Mittelwert

Georegion			Spezifische Aktivität [mBq/l]						
			Uran-238	Uran-234	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Uran-235	Uran-234/ Uran-238
4	RoW	MW	137,53	199,08	97,08	34,12	9,16	7,15	1,44
		Median	79,85	134,50	39,40	30,60	10,52	4,70	1,50
		Min	38,40	39,30	9,53	9,08	4,00	4,30	1,02
		Max	352,00	488,00	300,00	66,20	11,60	14,90	1,74
	ReW	MW	147,15	220,35	81,93	24,08	2,57	9,47	1,56
		Median	100,80	183,00	29,10	14,90	2,23	6,74	1,56
		Min	45,00	56,40	12,50	11,50	1,83	5,50	1,25
		Max	342,00	459,00	257,00	55,00	4,00	18,90	1,84
5	RoW	MW	21,53	39,52	16,83	7,06	66,95	3,04	1,02
		Median	9,25	36,90	7,28	3,55	42,10	2,20	1,00
		Min	< 0,74	7,90	1,00	1,30	1,80	0,30	0,74
		Max	69,90	73,50	98,00	21,80	222,10	5,70	1,38
	ReW	MW	16,11	27,15	14,63	6,17	55,66	2,50	0,97
		Median	11,80	29,50	7,45	2,85	28,80	1,35	0,91
		Min	< 0,74	6,70	0,97	1,40	1,80	0,30	0,76
		Max	39,60	42,90	65,30	17,50	140,00	5,80	1,31
6	RoW	MW	74,15	115,80	107,09	154,53	3,21	5,27	5,12
		Median	61,55	66,20	113,93	152,55	1,92	4,59	6,25
		Min	7,49	58,20	56,50	102,00	1,66	< 3,27	1,34
		Max	166,00	223,00	144,00	211,00	7,35	8,64	7,77
	ReW	MW	73,82	106,97	55,16	63,98	5,34	4,92	5,09
		Median	68,13	58,90	46,63	65,20	5,25	4,95	5,51
		Min	7,04	51,00	44,00	47,80	1,65	< 2,91	1,39
		Max	152,00	211,00	83,40	77,70	9,20	6,86	8,37
7	RoW	MW	45,40	66,88	24,01	19,04	4,24	4,95	0,97
		Median	50,30	61,35	21,45	17,25	2,82	5,00	0,98
		Min	< 0,74	43,80	4,45	2,10	1,67	< 4,2	0,82
		Max	99,80	101,00	49,80	43,50	14,30	< 5,6	1,10
	ReW	MW	45,70	83,80	18,97	14,06	2,85	5,75	1,05
		Median	54,00	92,35	15,30	14,67	1,77	5,70	1,03
		Min	< 0,74	48,50	4,12	1,90	1,60	< 4,9	0,90
		Max	98,50	102,00	47,60	27,30	6,56	< 6,7	1,26

Auch für bayerische Wässer zeigt sich die o. g. Abweichung vom radioaktiven Gleichgewicht für Uran-234 und Uran-238. Die Aktivitätsverhältnisse der Rohwasserproben liegen im Bereich von 0,74 bis 7,8 mit einem Median bei 1,65. Diese Werte sind vergleichbar mit den Ergebnissen von Gellermann & Stolz [28]. Für die Reinwasserproben ergeben sich Aktivitätsverhältnisse zwischen 0,76 und 8,6 mit einem Median bei 1,82. Des Weiteren fällt auf, dass in den Georegionen 3 und 6 das Uran-234/Uran-238 – Verhältnis besonders hohe Werte ergibt.

In der Abb. 15 präsentieren wir noch einmal graphisch die Mittelwerte und Mediane der untersuchten Wasserproben nach Georegion.

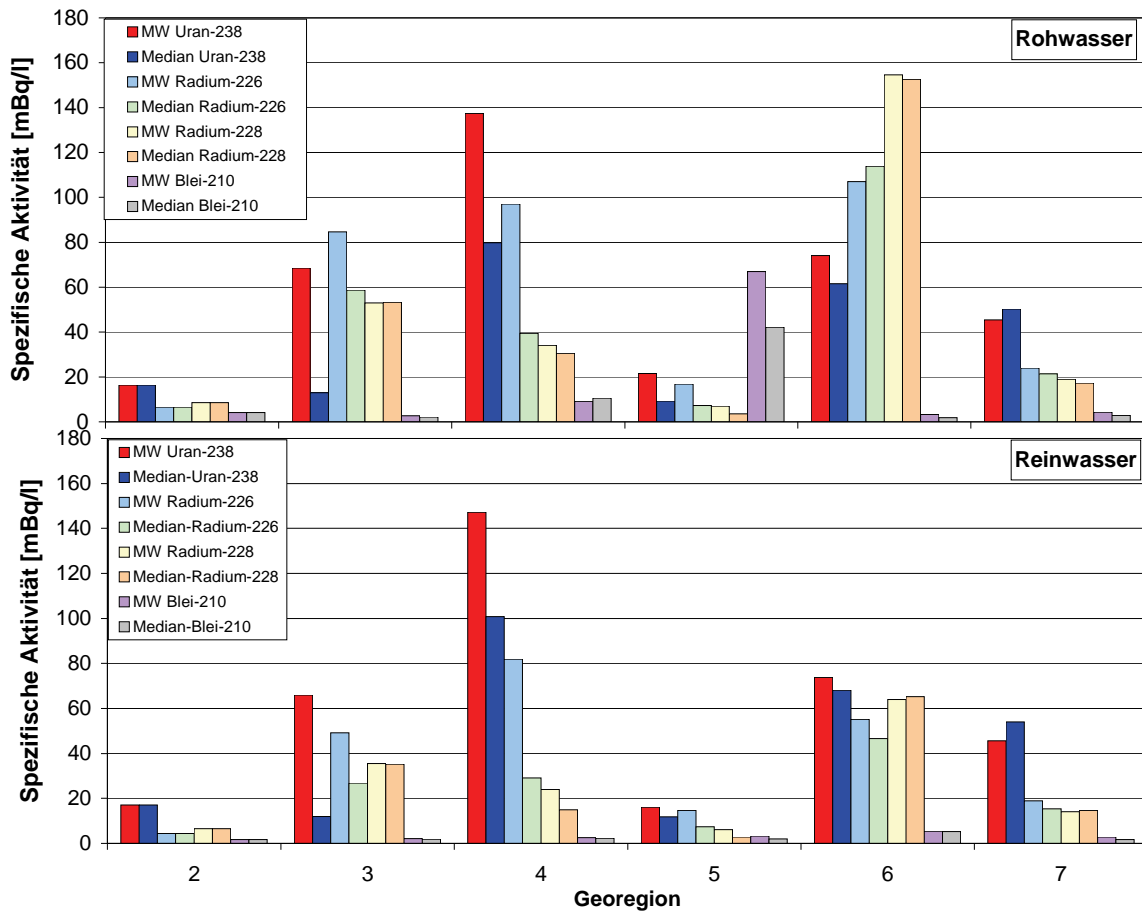


Abb. 15: Mittelwerte und Mediane der spezifischen Aktivitäten verschiedener Radionuklide der untersuchten Rohwasserproben in den unterschiedlichen Georegionen; MW = Mittelwert

Es ist deutlich zu erkennen, dass in den Georegionen 3, 4 und 6 Radium-226 und Radium-228 aus dem Rohwasser entfernt wird. Uran-238 dagegen bleibt in allen Georegionen nahezu unverändert. Blei-210 wird sehr stark in der Georegion 5 aus dem Rohwasser entfernt.

5.2 Dekontaminationsgrad und Dekontaminationsfaktor

Die Wirkung der Dekontamination eines Aufbereitungsprozesses kann durch den so genannten Grad der Dekontamination (D = die Entfernung von radioaktivem Material in Prozent (%)) beschrieben werden. D wird aus den spezifischen Aktivitäten (A) des Roh- und Reinwassers nach folgender Formel berechnet [14], [16]:

$$D = [(A_{\text{Rohwasser}} - A_{\text{Reinwasser}}) / (A_{\text{Rohwasser}})] \times 100 \%$$

Die Dekontamination lässt sich auch durch den Dekontaminationsfaktor F_D beschreiben, welcher den Quotienten aus den spezifischen Aktivitäten des Roh- und Reinwassers darstellt:

$$F_D = A_{\text{Rohwasser}} / A_{\text{Reinwasser}} > 1.$$

Mit Hilfe der obigen Formeln ist die Wirkung der Dekontamination eines Aufbereitungsprozesses darstellbar.

Mit den Ergebnissen unserer Untersuchung von Wasserproben und den Wasserdaten des Bundesamtes für Strahlenschutz (Tab. 33), konnten wir den Grad der Dekontamination für 42 Wasserproben aus 34 Wasserversorgungsun-

ternehmen ermitteln. Die Ergebnisse für Uran-238, Uran-234, Radium-226, Radium-228 und Blei-210 sind in Tab. 34a und b aufgelistet.

Von den 42 untersuchten Wasserproben stammen 26 Proben aus Anlagen zur reinen Enteisung, Entmanganung, Arsenentfernung und Kombinationen dieser drei Aufbereitungsarten. Sieben Rohwasserproben wurden mit reinen Entsäuerungsanlagen aufbereitet. Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung kombiniert mit Entsäuerungsanlagen sind bei acht Rohwasserproben und Aktivkohle bei einer Rohwasserprobe verwendet worden.

Anhand des Dekontaminationsgrades für die fünf Radionuklide zeigt sich, dass Radium-226 und Radium-228 aus Enteisungs-, Entmanganungs-, Arsenentfernungsanlagen und Kombinationen dieser drei Aufbereitungsarten (Tab. 34a) im Gegensatz zu Uran-238 und Uran-234 deutlich stärker aus dem Rohwasser entfernt werden. Der Dekontaminationsgrad für Radium-226 und Radium-228 liegt im Bereich von 0,9 und 75,5 % bzw. 3,1 und 78,6 %. Die Dekontamination für Uran-238 und Uran-234 bewegt sich zwischen 2,13 und 20,35 % bzw. 2,56 und 31,4 %. Die Probe mit der REx.-Nr. 5011 stellt eine Ausnahme dar, da hier Uran-238 zu 98,6 % aus dem Rohwasser entfernt wird. Blei-210 wird zwischen 2,2 und 84,2 % bei der Aufbereitung aus dem Rohwasser entfernt.

In der Tab. 34a sind ebenfalls die spezifischen Aktivitäten dieser fünf Radionuklide in den Rückspülschlämmen der untersuchten WVU mit aufgeführt. Auch anhand der spezifischen Aktivitäten ist die stärkere Abreicherung des Radiums im Rohwasser durch eine starke Anreicherung in den Schlammproben zu erkennen. Uran dagegen wird in den Schlämmen nur in geringen Konzentrationen angereichert. Für die Probe mit der REx.-Nr. 5011 zeigt sich die sehr hohe Entfernung des Uran-238 aus dem Rohwasser nicht im Rückspülschlamm. In der Schlammprobe konnten wir Uran-238 in nur sehr geringer Aktivität ermitteln. Auch Blei-210 wird zum Teil mit hohen Aktivitäten in den Schlämmen angereichert.

In Tab. 34b haben wir die Dekontaminationsgrade für die Wasserproben aus Wasserwerken mit Entsäuerungsanlagen, Kombinationen von Enteisungs-, Entmanganungs- und Arsenentfernungsanlagen mit Entsäuerungsanlagen und für ein WVU mit Aktivkohle aufgelistet.

Für die Wasserproben aus den Entsäuerungsanlagen ergeben sich Dekontaminationsgrade für Radium-226 und Radium-228 von 19,5 bis 33,4 bzw. 44,0 %. Für Uran-238 haben wir vergleichbare Werte zwischen 15,2 und 30,4 % ermittelt. Auch die Schlämme zeigen eine vergleichsweise niedrige Anreicherung an Uran und Radium. Für die untersuchten Wasserproben aus WVU mit Enteisungs-, Entmanganungs- und Arsenentfernungsanlagen kombiniert mit Entsäuerungsanlagen haben wir Dekontaminationsgrade für Radium-226 und Radium-228 von 2,2 bis 64,0 bzw. 0,8 bis 45,4 % berechnet. Für Uran-238 ermittelten wir dagegen Werte zwischen 4,5 und 18,3 %. Dies ist auch aus den spezifischen Aktivitäten der Rückspülschlämme sichtbar. Die spezifischen Aktivitäten für Radium-226 und Radium-228 sind deutlich höher als für Uran-238, d. h. Radium wird in diesen Schlämmen stärker angereichert als Uran.

Für die einzige Wasserprobe aus einem WVU mit einer Aufbereitung mit Aktivkohle sind die Dekontaminationsgrade sowohl für Uran als auch für Radium relativ hoch (Tab. 34b). Doch in den Schlämmen wurde nur Radium mit erhöhten spezifischen Aktivitäten angereichert. Aus der Literatur ist bekannt, dass Uran stark in der Aktivkohle selbst angereichert wird (bis zu 95 %) [16].

Tab. 34a: Grad der Dekontamination D und Dekontaminationsfaktor F_D für die Entfernung von Uran, Radium und Blei aus den 42 untersuchten Roh- und Reinwasserproben bayerischer WVU, zusammen mit den spezifischen Aktivitäten von Uran, Radium und Blei der entsprechenden Rückspülschlämme; REx.-Nr. = Bezeichnung des WVU, TM = Trockenmasse

REx.-Nr	Grad der Dekontamination D [%]						Dekontaminationsfaktor F_D						Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]						
	Uran-238		Uran-234		Blei-210		Uran-238		Uran-234		Blei-210		Uran-238		Uran-234		Blei-210		
	Radium-226	Radium-228	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Radium-226	Radium-228	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Radium-226	Radium-228	Blei-210
Aufbereitungsart: Enteisenerung, Entmanganung, Arsenentfernung und Kombination dieser drei Arten																			
2115	—	—	22,4	3,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	545	527	—
2208	—	—	43,8	44,9	72,4	1,78	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	408	291	—
3028	8,4	5,4	22,1	23,8	10,3	1,28	1,06	1,09	1,31	1,12	1,31	1,12	237	303	988	—	7.380	9.250	222
3079	—	—	9,0	34,0	2,2	1,10	—	—	1,52	1,02	1,52	1,02	9	9	—	—	602	251	—
3183	2,8	5,9	14,3	16,9	84,2	1,17	1,06	1,03	1,20	6,34	1,20	6,34	475	475	815	—	32.500	3.950	3.290
3184	6,6	—	28,5	31,2	—	1,40	—	1,07	1,45	—	1,45	—	55	55	—	—	9.450	3.340	—
3196/1	—	—	38,7	40,7	76,3	1,63	—	—	1,69	4,23	1,69	4,23	64	64	—	—	3.230	3.330	—
3196/8	—	—	64,9	71,6	62,7	2,85	—	—	3,52	2,68	3,52	2,68	46	46	—	—	2.230	722	—
3261/1	—	2,6	50,5	70,4	44,0	2,02	1,03	—	3,38	1,79	3,38	1,79	21	21	—	—	10.100	3.990	—
3267/1	—	—	—	—	19,1	—	—	—	—	1,24	—	1,24	27	27	—	—	6.020	1.660	1.500
3274/2	20,4	4,8	50,0	49,8	23,0	2,00	1,05	1,26	1,99	1,30	1,99	1,30	34	34	—	—	12.600	3.800	1.250
3282	3,2	8,1	22,4	25,7	—	1,29	1,09	1,03	1,35	—	1,35	—	—	—	—	—	243	336	83
3311	12,7	23,0	42,1	60,6	—	1,73	1,30	1,15	2,54	—	2,54	—	36	36	—	—	12.700	9.130	1.220
3340	8,5	10,1	10,7	14,6	—	1,12	1,11	1,09	1,17	—	1,17	—	25	25	—	—	18.500	7.890	—
3352/1	6,5	31,4	45,7	43,5	—	1,84	1,46	1,07	1,77	—	1,77	—	4	4	—	—	3.730	6.790	—
3352/2	2,6	—	38,0	37,1	25,5	1,61	—	1,03	1,59	1,34	1,59	1,34	51	51	—	—	2.430	2.250	62
4001/1	16,2	—	29,7	38,6	14,9	1,42	—	1,19	1,63	1,18	1,63	1,18	7	7	—	—	8.950	6.400	—
4001/2	—	—	4,4	—	—	1,05	—	—	—	—	—	—	8	8	—	—	11.100	3.200	724
4202	—	—	19,4	16,8	5,5	1,24	—	—	1,20	1,06	1,20	1,06	—	—	—	—	625	968	—
5011/1	98,6	—	73,0	47,7	—	3,70	—	73,71	1,91	—	1,91	—	8	8	8	—	98	50	—
5425/2	—	—	—	—	56,8	—	—	—	—	2,31	—	2,31	3	3	—	—	47	44	—
7014	—	—	19,5	13,0	—	1,24	—	—	1,15	—	1,15	—	30	30	25	—	1.260	354	40
7053	—	—	12,1	19,6	16,6	1,14	—	—	1,24	1,20	1,24	1,20	4	4	—	—	2.090	1.280	—
7198	—	—	75,5	78,6	54,1	4,08	—	—	4,68	2,18	4,68	2,18	22	22	23	—	831	295	—
7338	2,1	—	0,9	39,7	29,8	1,01	—	1,02	1,66	1,43	1,66	1,43	85	85	96	—	856	469	273
7373	4,1	—	7,4	—	43,3	1,08	—	1,04	—	1,76	—	1,76	15	15	—	—	179	55	—

Tab. 34b: Grad der Dekontamination D und Dekontaminationsfaktor F_D für die Entfernung von Uran, Radium und Blei aus den 42 untersuchten Roh- und Reinwasserproben bayerischer WVU, zusammen mit den spezifischen Aktivitäten von Uran, Radium und Blei der entsprechenden Rückspülschlämme; REx.-Nr. = Bezeichnung des WVU; 5410_{MW}: die spezifischen Aktivitäten dieser Schlammprobe stellen den Mittelwert aus zwei untersuchten Proben (5410/1 und 5410/2) dar; TM = Trockenmasse

REx.-Nr	Grad der Dekontamination D [%]				Dekontaminationsfaktor F_D				Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]						
	Uran-238	Uran-234	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Uran-238	Uran-234	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Uran-238	Uran-234	Radium-226	Radium-228	Blei-210
	Aufbereitungsart: Entsäuerung und Entsäuerungsanlagen, die Ausnahmen darstellen														
3081/2	15,2	—	22,5	19,5	—	1,18	—	1,29	1,24	—	20	21	100	28	120
3168	—	—	—	77,8	4,50	—	—	—	—	1,929	4,302	1,448	—	1,918	
5100	—	—	19,5	15,8	1,19	—	1,24	—	—	4	—	78	22	122	
5336	—	—	29,7	33,2	—	—	1,42	1,50	—	—	—	96	31	1,590	
5407	30,4	39,4	33,4	44,0	—	1,44	1,65	1,79	—	422	399	546	77	678	
5410 _{MW}	—	—	—	37,0	1,59	—	—	—	—	4,585	4,145	2,990	342	5,030	
5410/3	—	—	—	82,2	5,63	—	—	—	—	94	—	179	7	125	
Aufbereitungsart: Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung kombiniert mit Entsäuerung															
3005	—	—	31,2	63,5	80,1	—	—	1,45	2,74	5,02	201	238	6,660	3,060	384
3022	—	—	52,1	57,7	—	—	—	2,09	2,37	—	10	—	21,200	8,640	—
3029	6,0	—	64,0	74,0	—	1,06	—	2,77	3,85	—	18	—	10,600	5,380	—
3081/1	—	—	2,2	0,8	—	—	—	1,02	1,01	—	75	109	43	58	379
3156	4,5	—	41,8	28,3	50,6	1,05	—	1,72	1,39	2,02	68	—	6,960	14,200	—
3208	—	—	—	—	3,4	—	—	—	—	1,03	230	—	1,640	898	4,380
3267/2	18,3	—	9,7	—	27,1	1,22	—	1,11	—	1,37	19	—	14,700	6,730	—
5011/2	—	—	3,0	46,2	77,0	—	—	1,03	1,86	4,34	17	—	—	—	159
Aufbereitungsart: mit Aktivkohle															
3352/3	24,6	21,1	36,0	45,4	4,3	1,33	1,27	1,56	1,83	1,05	15	—	12,400	16,300	—

Anhand der Dekontaminationsgrade ist deutlich zu erkennen, dass bei der Enteisung/Entmanganung vor allem Radium aus dem Rohwasser abgereichert und in den Schlämmen angereichert wird. Bei der Entsäuerung wird entweder kaum Uran oder Radium, oder aber beide in gleichem Maße aus dem Rohwasser entfernt und im Schlamm angereichert.

In Tab. 35 führen wir zusätzlich die Dekontaminationsgrade der untersuchten Wasserproben und die spezifischen Aktivitäten der dazugehörenden Rückspülschlämme sortiert nach den verschiedenen geologischen Gebieten (Georegionen in Bayern) auf.

Es zeigt sich deutlich, dass vor allem in den Georegionen 2, 3, 4, 6 und 7 sowohl die höchste Abreicherung an Radium-226 und Radium-228 aus dem Rohwasser und die stärkste Anreicherung dieser beiden Radionuklide in den Rückspülschlämmen stattfindet. Dagegen wird in diesen Gebieten deutlich weniger Uran-238 aus dem Rohwasser entfernt und in den Schlämmen angereichert.

In der Georegion 5 liefern die Dekontaminationsgrade für Uran und Radium ähnliche Werte, doch es wird kaum Uran und Radium in den dazugehörenden Schlammproben gefunden.

68 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 35: Grad der Dekontamination D der 42 untersuchten Wasserproben und die spezifischen Aktivitäten der entsprechenden Rückspülschlammproben; 5410_{MW} : die Werte dieser Probe stellen den Mittelwert aus zwei untersuchten Proben (5410/1 und 5410/2) dar, REx.-Nr. = Bezeichnung des WVU; TM = Trockenmasse

REx.-Nr.	Geo-region	Grad der Dekontamination [%]					Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]				
		Uran-238	Uran-234	Radium-226	Radium-228	Blei-210	Uran-238	Uran-234	Radium-226	Radium-228	Blei-210
2115	2	—	—	22,4	3,1	—	—	—	545	527	—
2208	2	—	—	43,8	44,9	72,4	303	998	408	291	—
3079	3	—	—	9,0	34,0	2,2	9	—	602	251	—
3156	3	4,5	—	41,8	28,3	50,6	68	—	6.960	14.200	—
3184	3	6,6	—	28,5	31,2	—	55	—	9.450	3.340	—
3196/1	3	—	—	38,7	40,7	76,3	64	—	3.230	3.330	—
3196/8	3	—	—	64,9	71,6	62,7	46	—	2.230	722	—
3208	3	—	—	—	—	3,4	230	—	1.640	898	4.380
3261	3	—	2,6	50,5	70,4	44,0	21	—	10.100	3.990	—
3267/1	3	—	—	—	—	19,1	27	—	6.020	1.660	1.500
3267/2	3	18,3	—	9,7	—	27,1	19	—	14.700	6.730	—
3274/2	3	20,4	4,8	50,0	49,8	23,0	34	—	12.600	3.800	1.250
3282	3	3,2	8,1	22,4	25,7	—	—	—	243	336	83
3340	3	8,5	10,1	10,7	14,6	—	25	—	18.500	7.890	—
3352/1	3	6,5	31,4	45,7	43,5	—	4	—	3.730	6.790	—
3352/2	3	2,6	—	38,0	37,1	25,5	51	—	2.430	2.250	62
3352/3	3	24,6	21,1	36,0	45,4	4,3	15	—	12.400	16.300	—
3005	4	—	—	31,2	63,5	80,1	201	238	6.660	3.060	384
3081/1	4	—	—	2,2	—	—	75	109	43	58	379
3168	4	—	—	—	—	77,8	1.929	4.302	1.448	—	1.918
3183	4	2,8	5,9	14,3	16,9	84,2	475	815	32.500	3.950	3.290
3081/2	5	15,2	—	22,5	19,5	—	20	21	100	28	120
5011/1	5	98,6	—	73,0	47,7	—	8	8	98	50	—
5011/2	5	—	—	3,0	46,2	77,0	17	—	—	—	159
5100	5	—	—	19,5	—	15,8	4	—	78	22	122
5336	5	—	—	29,7	33,2	—	—	—	96	31	1.590
5407	5	30,4	39,4	33,4	44,0	—	422	399	546	77	678
5410 _{MW}	5	—	—	—	—	82,2	4.585	4.145	2.990	342	5.030
5410/3	5	—	—	—	—	37,0	94	—	179	7	125
5425	5	—	—	—	—	56,8	3	—	47	44	—
3022	6	—	—	52,1	57,7	—	10	—	21.200	8.640	—
3028	6	8,4	5,4	22,1	23,8	10,3	237	—	7.380	9.250	222
3029	6	6,0	—	64,0	74,0	—	18	—	10.600	5.380	—
3311	6	12,7	23,0	42,1	60,6	—	36	—	12.700	9.130	1.220
4001/1	7	16,2	—	29,7	38,6	14,9	7	—	8.950	6.400	—
4001/2	7	—	—	4,4	—	—	8	—	11.100	3.200	724
4202	7	—	—	19,4	16,8	5,5	—	—	625	968	—
7014	7	—	—	19,5	13,0	—	30	25	1.260	354	40
7053	7	—	—	12,1	19,6	16,6	4	—	2.090	1.280	—
7198	7	—	—	75,5	78,6	54,1	22	23	831	295	—
7338	7	2,1	—	0,9	39,7	29,8	85	96	856	469	273
7373	7	4,1	—	7,4	—	43,3	15	—	179	55	—

5.3 Untersuchung des Trinkwassers und der Schlämme an einem ausgesuchten Standort

Im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens wurde in einer Masterarbeit (Masterthesis siehe Anhang E) an einem Wasserversorgungsunternehmen in Nordbayern (REx.-Nr. 3168) das Trinkwasser und die bei der Aufbereitung anfallenden Rückstände (Rückspülschlamm, Klärschlämme) auf natürliche Radionuklide untersucht.

Im Untersuchungsgebiet, das sich im Bereich des Fränkischen Keupers befindet, erfolgt die Wassergewinnung hauptsächlich aus Sandsteingebieten verschiedener Formationen. Es handelt sich meist um mehr oder weniger deutlich ausgebildete Kluftgrundwasserleiter, mit relativ geringen spezifischen Ergiebigkeiten. Allein die ausgeprägten Tonhorizonte wie der Feuerletten wirken stockwerkstrennend. Dadurch gibt es im fränkischen Bruchschollenland fast nur "Tiefbrunnen" im ersten Grundwasserstockwerk, in denen sich das Trinkwasser jedoch besser schützen lässt als im Jura.

Das aus einem Quellgebiet mit 60 Quellen und acht Tiefbrunnen gewonnene Rohwasser wird durch eine Entsäuerung aufbereitet.

Mittels Alpha-Spektrometrie wurde an mehreren Rohwasser-, Reinwasser- und Mischwasserproben die spezifische Aktivität der Radionuklide Uran-234, Uran-235 und Uran-238 gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tab. 36 aufgeführt.

Tab. 36: Ergebnisse der Uranmessung mittels Alpha-Spektrometrie; n. n. = nicht nachweisbar

Nr.	Probe	1. Probenahme			2. Probenahme		
		Aktivitätskonzentration [mBq/l]					
		Uran-234	Uran-235	Uran-238	Uran-234	Uran-235	Uran-238
W 801	Brunnen 2	107	2	43	—	—	—
W 802	Brunnen 5	108	5	78	—	—	—
W 803	Brunnen 8	223	6	130	—	—	—
W 804	Brunnen 7	266	6	147	—	—	—
W 805	Rohwasser GM	2	n. n.	1	2	n. n.	1
W 806	Rohwasser MT	269	7	163	255	6	149
W 807	Reinwasser	158	4	90	119	2	72
W 808	Brunnen 3	312	9	183	—	—	—
W 810	Mischwasser	—	—	—	143	3	83
W 811	entsäuertes Wasser	—	—	—	134	3	78
W 812	Schlammwasser	—	—	—	102	2	56

Zusätzlich wurde Uran-238 im Labor in Augsburg per ICP-MS (Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) bestimmt. Das bietet die Möglichkeit, unabhängig von Tracer und Aufbereitung, die Ergebnisse der Alpha-Spektrometrie zu überprüfen.

Die Ergebnisse der Alpha-Spektrometrie zeigen eine vergleichsweise gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der ICP-MS-Messung. Die ICP-MS-Ergebnisse liegen ca. 10% niedriger als die mit der Alpha-Spektrometrie ermittelten Aktivitäten (Tab. 37 und Abb. 16).

70 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. 37: Vergleich der Uran-Aktivitätskonzentrationen (Uran-238) der Alpha-Spektrometrie und der ICP-MS

Messmethode	Uran-Aktivitätskonzentration [mBq/l]							
	W 801	W 802	W 803	W 804	W 805	W 806	W 807	W 808
ICP-MS	40	66	116	128	1	154	86	181
α-Spektrometrie	43	78	130	147	1	163	90	183

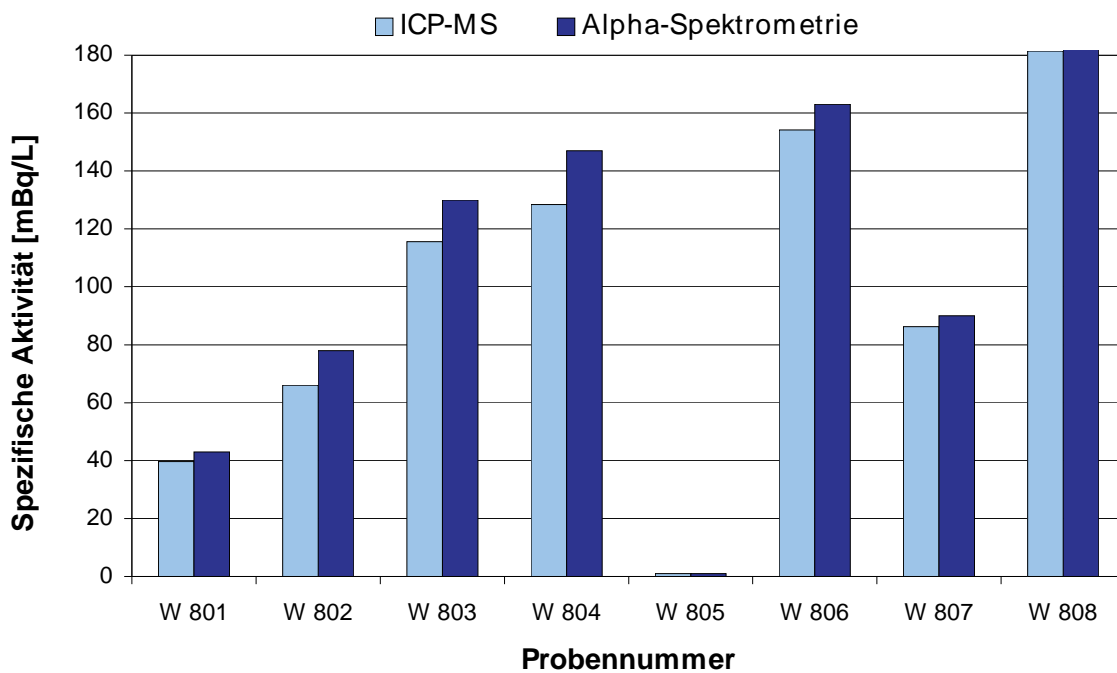


Abb. 16: Uranaktivitätskonzentrationen (Uran-238) der Alpha-Spektrometrie & ICP-MS

Radium wurde zusammen mit weiteren natürlichen Radionukliden nach dem Einengen der Wasserproben mit der Gamma-Spektrometrie gemessen. Die Messungen lieferten meist Ergebnisse unter der Nachweisgrenze. Nur wenige Radionuklide wurden identifiziert (Tab. 38).

Tab. 38: Ergebnisse der Gamma-Spektrometrie der eingengten Wasserproben; RW = Rohwasser

Nr.	Probe	Aktivitätskonzentration [mBq/l]					
		Kalium-40	Blei-210	Blei-214	Bismut-214	Radium-226	Radium-228
W 805	RW GM	<192	50	<12	<12	<100	< 0,03
W 806	RW MT	246	<1.166	28	22	292	< 0,05
W 807	Reinwasser	172	<98	<14	<16	113	< 0,03
W 808	Brunnen 3	352	<1.370	29	<24	324	< 0,04

Radium 228 wurde über das Gleichgewicht zu Actinium-228 bestimmt. Da zwischen Probenahme und Messung etwa 45 Tage lagen, kann davon ausgegangen werden, dass sich Actinium-228 und Radium-228 im Gleichgewicht befinden.

Zusätzlich wurden drei Schlämme aus der Kläranlage und eine Probe des Aufbereitungsrückstandes der Trinkwasseraufbereitungsanlage mittels Alpha-Spektrometrie auf den Urangehalt untersucht (Tab. 39).

Tab. 39: Ergebnisse der Uranbestimmung in den Schlammproben über Alpha-Spektrometrie; TM = Trockenmasse; TWA = Trinkwasseraufbereitung

Nr.	Probe	spezifische Aktivität [mBq/g TM]		
		Uran-234	Uran-235	Uran-238
S 801	Rückstand TWA	16	1	11
S 802	Rohschlamm	119	7	103
S 803	Überschussschlamm	164	4	103
S 804	Klärschlamm	210	7	135

Auffällig sind die geringen Urangelhalte der Aufbereitungsrückstände aus der TWA. Diese sind aber vergleichbar mit den Urangelhalten, der von uns untersuchten Rückspülschlämme aus Entsäuerungsanlagen.

Radium wird in Schlammproben in den Trockenrückständen stark fixiert und nicht ausgewaschen [42]. Die Aufbereitung der Proben vermag es nicht, das Radium in Lösung zu bringen. Deshalb wurde ein Teil der Probe mittels Gamma-Spektrometrie gemessen (Tab. 40).

Tab. 40: Ergebnisse der Gamma-Spektrometrie von den Schlammproben; TWA = Trinkwasseraufbereitung, TM = Trockenmasse

Nr.	Probe	Aktivitätsgehalt [Bq/kg TM]				
		Kalium-40	Blei-210	Blei-214	Bismut-214	Radium-226
S 801	TWA	1.550	1.920	760	680	1.450
S 804	Klärschlamm	n. n.	220	70	60	470

Die Gehalte der natürlichen Radionuklide im Wasser und im Klärschlamm, können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Sie bilden vielmehr ein dynamisches System aus natürlichen Gleichgewichten und verschiedenen Fraktionierungsprozessen.

Die höheren Gehalte von Uran-234 gegenüber Uran-238 sind charakteristisch für aquatische Systeme. Durch den Rückstosseffekt bei der Alpha-Emission kann durch Schäden im Kristallgitter die Löslichkeit erhöht oder Uran-234 direkt in die wässrige Phase gebracht werden [18]. Uran-235 kommt erwartungsgemäß nur in geringer Konzentration vor [36] (Abb. 17).

Besonders deutlich fallen die niedrigen Urangelhalte von Probe W 805 auf (Tab. 37 und Abb. 16). Es handelt sich dabei um das Rohwasser aus den Quellfassungen. Geologisch gesehen liegt das Quellgebiet in uranreichen Gesteinsformationen, umgeben von zahlreichen Uranerzfundgebieten. Uran wird jedoch aus granitischen Gesteinen kaum gelöst, was sich in niedrigen bzw. fehlenden Urankonzentrationen im Grundwasser granitisch geprägter Regionen zeigt.

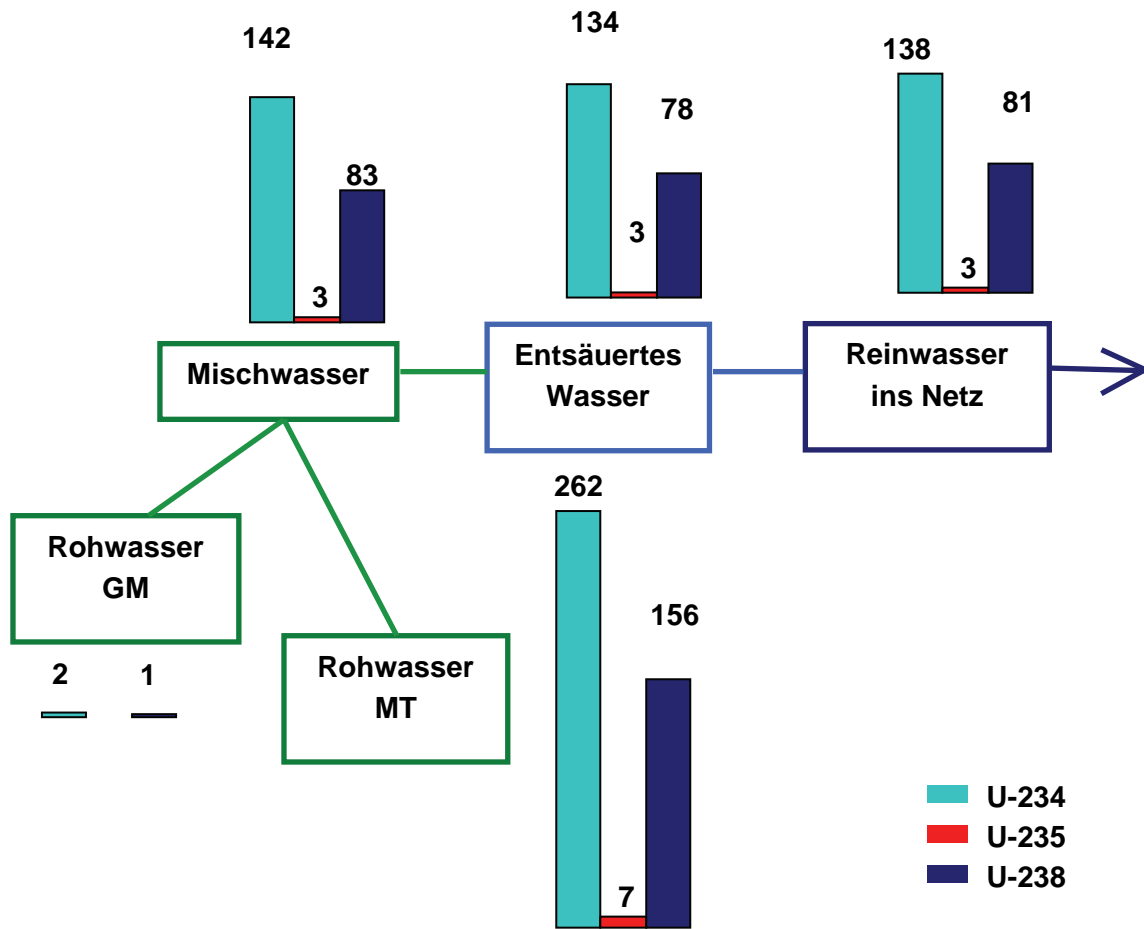


Abb. 17: Uranaktivitätskonzentrationen im Wasser [mBq/l]; Erläuterungen im Text

Die Rohwässer trugen im Untersuchungszeitraum mengenmäßig zu etwa gleichen Teilen zum Mischwasser bei, das in der Trinkwasseraufbereitung gesammelt wird. Dies bestätigt die Berechnung des Mittelwertes der Uranaktivitäten der Rohwässer, welche mit den Gehalten im Mischwasser übereinstimmen.

Welchen Einfluss hat aber die Aufbereitung des Trinkwassers auf die Aktivitätskonzentration von Uran? Dazu wurden die Aktivitätskonzentrationen im Mischwasser, entsäuerten Wasser und im reinen Wasser betrachtet (Abb. 18). Zu beachten ist dabei, dass es sich bei den Werten um die Ergebnisse der zweiten Probenahme handelt, da bei der Verwendung des Mittelwertes der Uranaktivität des reinen Wassers die Ergebnisse verfälscht würden.

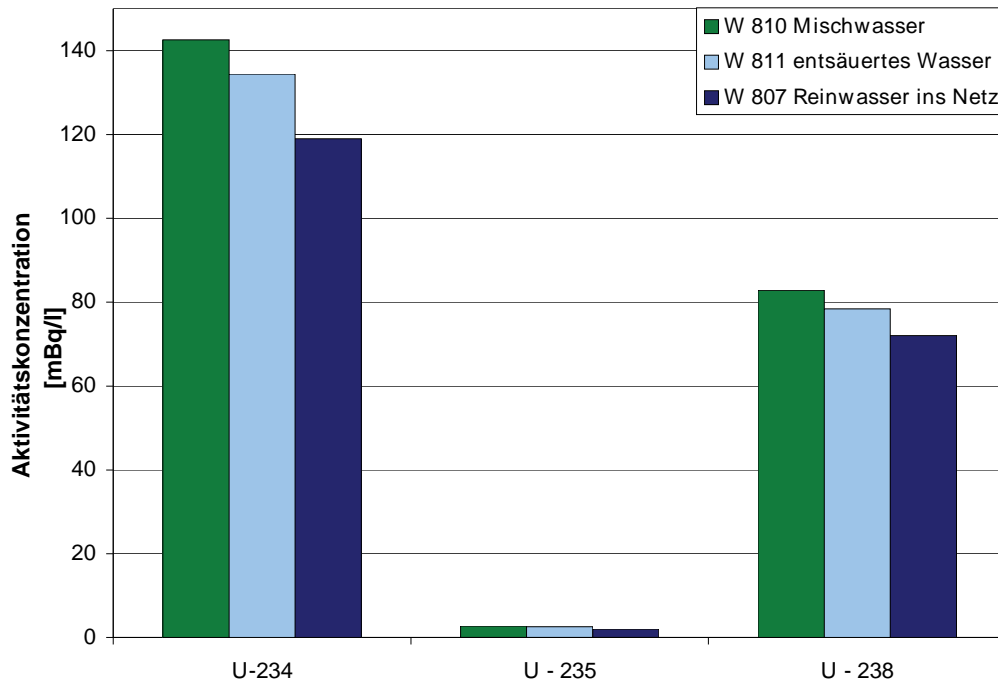


Abb. 18: Veränderung der Uranaktivitätskonzentrationen durch die Aufbereitung (TWA)

Es wird deutlich, dass sich die Aktivitätskonzentrationen vom Mischwasser über das entsäuerte Wasser zum Reinwasser sukzessive verringern, die Urankonzentration durch die Aufbereitung mit rund 15 % jedoch nur geringfügig abnimmt (Abb. 18). Daraus kann geschlossen werden, dass erhöhte Urangelhalte im Rückstand der Trinkwasseraufbereitung nicht nachweisbar sein sollten.

Die Untersuchung der Aufbereitungsrückstände hat diese Vermutung bestätigt (Abb. 19).

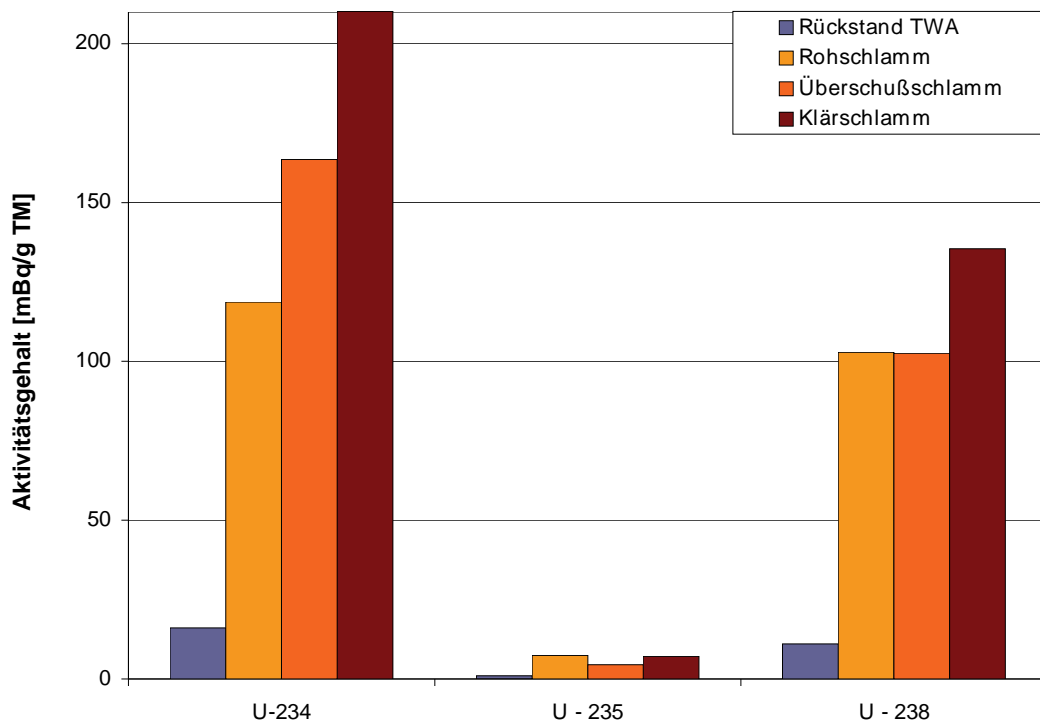


Abb. 19: Uranaktivitätsgehalte in den Schlammproben; TM = Trockenmasse

74 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Das Verhältnis der einzelnen Uranisotope zueinander zeigt sowohl bei den Wasserproben, als auch bei den Schlammproben die gleiche Verteilung. Eine Anreicherung einzelner Isotope durch Fraktionierungsprozesse kann daher ausgeschlossen werden.

In den Wasserproben konnte Radium-226 nur im Rohwasser MT und im Reinwasser sicher nachgewiesen werden. Die Aktivitätskonzentration im Reinwasser liegt mit 113 mBq/l im oberen Bereich der in Deutschland gemessenen Radium-226-Gehalte. Haberer [42] gibt als Maximalwert 160 mBq/l, bei einem Mittelwert von 4,1 mBq/l an.

In dieser Masterarbeit wird die hohe Radium-226-Aktivität mit der Adsorption von Radium an Eisen- und Manganhydroxiden in den Kiesfiltern erklärt. Da es sich aber im Wasserwerk 3168 bei der Aufbereitung um eine Entsäuerung handelt, kann die hohe Radium-226-Aktivität nicht darauf zurückgeführt werden. Dieser Umstand gilt nur für Rückstände aus Anlagen zur Enteisung und Entmanganung. Möglicherweise ist die erhöhte Radium-226-Aktivität auf einen erhöhten Radiumgehalt in den Filterkiesen zurückzuführen [80].

6 Klärschlammuntersuchungen

Wir haben im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens zusätzlich 33 Klärschlämme untersucht, da in den Roh- und Reinwässern teilweise erhöhte spezifische Aktivitäten von Uran und Radium ermittelt wurden und Uran-238 über die Aufbereitung nicht aus dem Rohwasser entfernt wird. Außerdem werden 45 Rückspülschlammproben über Kläranlagen entsorgt. Ziel war es festzustellen, ob in den Klärschlämmen erhöhte Uran-238 bzw. Radium-226 und Radium-228 Aktivitäten zu finden sind.

Unsere Ergebnisse sind in der Tab. 41 aufgeführt und in der Abb. 20 sortiert nach den verschiedenen Georegionen graphisch dargestellt.

Tab. 41: Mittelwerte (MW), Mediane, Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der untersuchten Klärschlämme; n = Probenanzahl = 33, TM = Trockenmasse

	<i>Uran-238</i>	<i>Radium-226</i>	<i>Radium-228</i>	<i>Blei-210</i>	<i>Uran-235</i>	<i>Kalium-40</i>
Klärschlämme	Spezifische Aktivität [Bq/kg TM]					
MW	130,8	126,7	53,0	205,4	9,1	276,9
Median	112,2	83,1	38,1	206,1	5,2	267,0
Minimum	66,3	37,9	22,3	100,1	3,1	94,7
Maximum	235,4	467,0	192,0	313,0	28,6	854,0

Es ist deutlich zu erkennen, dass für Uran-238 und Radium-226 der Großteil der Klärschlammproben die Überwachungsgrenze von 200 Bq/kg der StrlSchV unterschreiten (Mediane < 200 Bq/kg). Nur für Blei-210 überschreitet selbst der Median die Überwachungsgrenze von 200 Bq/kg und damit auch mehr als die Hälfte aller Proben.

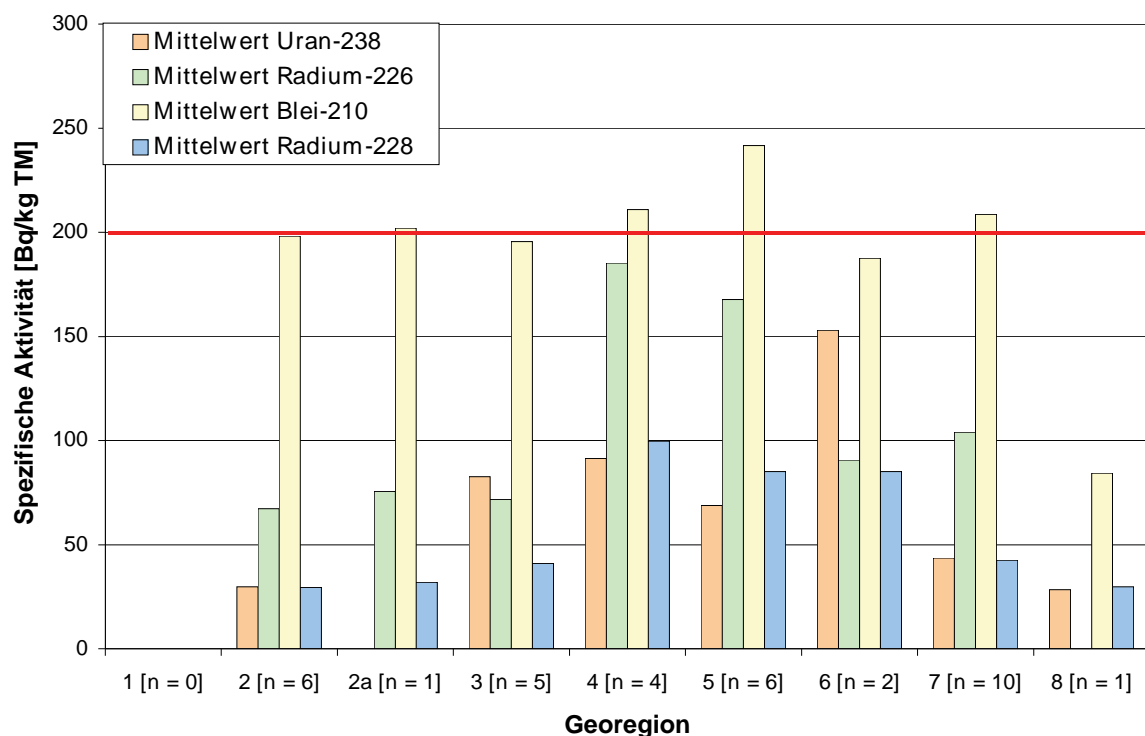


Abb. 20: Mittelwerte für verschiedene Radionuklide aus Klärschlammproben sortiert nach Georegionen; TM = Trockenmasse

76 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Auch zeigt sich in Abb. 20, dass bis auf Blei-210 die übrigen Radionuklide die Überwachungsgrenze von 200 Bq/kg nicht überschreitet.

7 Wasser, Rückspülschlämme und Geologie

Wie bereits früher erwähnt, ist Uran vor allem in den Georegionen 2, 3, 4 und 6 verstärkt im Wasser gelöst und in der Georegion 5 dagegen an Bachsedimente gebunden. Radium (Barium verhält sich chemisch ähnlich wie Radium) tritt dagegen in den Georegionen 3, 4 und 6 in hohen Konzentrationen in den Bachsedimenten auf.

In den Georegionen 2, 3, 4 und 6 liegen Gesteine wie z. B. Kalksteine, Dolomite, Sandsteine oder Karbonatgesteine vor, die viele Klüfte und Karsthohlräume aufweisen. Das Grundwasser kann diese leichter erreichen, wodurch die Löslichkeit der Elemente erhöht wird. Daher ist eine erhöhte spezifische Aktivität von Uran und Radium in den Rohwässern dieser Gebiete zu erwarten. Für Uran ist dies in den Abb. 3 und 5 deutlich zu erkennen. Die Messergebnisse des ehemaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft zeigen erhöhte Urangelhalte in den Wässern dieser Gebiete. Die Konzentration von Radium in bayerischen Grund- und Trinkwässern wurde vom ehemaligen Landesamt für Wasserwirtschaft nicht gemessen.

Unsere Messungen der natürlichen Radionuklide in Roh- und Reinwasserproben aus diesen Gebieten (Tab. 33 und Abb. 15) zeigen erhöhte spezifische Aktivitäten z. T. für Uran-238, vor allem aber für Radium-226 bzw. Radium-228. Dies ist für Uran mit den Messergebnissen des ehemaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft (Abb. 5) vergleichbar. Außerdem wird mit den Ergebnissen für Radium-226 und Radium-228 unsere Theorie der besseren Löslichkeit von Radium aus den in diesen Regionen vorkommenden Gesteinen bestätigt.

Bei der Aufbereitung des Rohwasser über Anlagen zur Enteisung und Entmanganung wird innerhalb des Filtermaterials Radium an ausfallende Eisen- und Manganoxhydroxide adsorbiert, die durch die Belüftung (Sauerstoffanreicherung im Wasser führt zur Oxidation von Eisen und Mangan) des Rohwassers ausfallen [14], [16], [53]. Dabei hat Mangandioxid (MnO_2) die höchste Sorptionsfähigkeit für Radium. Dies konnten wir anhand der Dekontaminationsgrade, die wir aus den Aktivitäten von Roh- und Reinwasser berechnet haben, bestätigen. Radium-226 und Radium-228 werden in diesen Gebieten zwischen 2,2 und 65,0 % bzw. 14,6 und 74,0 % aus dem Rohwasser entfernt. Es findet eine starke Anreicherung von Radium-226 (bis 32.500 Bq/kg) und Radium-228 (bis 16.300 Bq/kg) in den Rückspülschlämmen statt.

Die Dekontaminationsgrade für Uran-238 (zwischen 3,2 bis 30,4 %) bedeuten dagegen eine geringere Entfernung von Uran aus dem Rohwasser. Im Grundwasser kommt Uran unter oxidierenden Bedingungen als sechswertiges Uran vor. Uranyl- und -trikarbonatkomplexe ($UO_2(CO_3)_2^{2-}$ und $UO_2(CO_3)_3^{4-}$) sind in natürlichen Wässern bei pH-Werten über 7,5 zu finden [16]. Diese Komplexe steigern die Löslichkeit von Uranmineralen und die Mobilität von Uran im Grund- und Oberflächenwasser.

In den von uns untersuchten Rückspülschlämmen aus diesen Gebieten konnten wir nur niedrige spezifische Aktivitäten für Uran-238 ermitteln. Bei der Flockung mit Hilfe von Eisen und Aluminiumsalzen hat sich gezeigt, dass der pH-Wert einen starken Einfluss auf die Mitfällung von Uran hat [50]. Bei einem pH-Wert zwischen 7 bis 9 liegen die Uranylkomplexe als auch die Metallhydroxide negativ geladen vor. Deshalb ist in diesem pH-Bereich eine geringere Uran-Entfernung zu erwarten.

Uran ist in der Georegion 5 (kristallines Grundgebirge) in den Gesteinen gebunden (Abb. 2). Diese weisen eine geringe Klüftigkeit auf und sind deshalb gering wasserführend. Radium (Barium) findet sich vereinzelt in den Gesteinen im ostbayerischen Raum (Abb. 4). Da das kristalline Grundgebirge zusätzlich schwer wasserlöslich ist, erwarten wir nur geringe Konzentrationen von Uran und Radium in den Roh- und Reinwasserproben aus dieser Region. Dies wird durch die Messungen des ehemaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft (Abb. 5) und durch unsere Messungen von Roh- und Reinwasser (Tab. 33) bestätigt.

Unsere Untersuchungen von Roh- und Reinwasser haben Dekontaminationsgrade von 30 - 40% für Uran-238 und Radium-226 bzw. Radium-228 ergeben. In den Rückspülschlämmen aus Entsäuerungsanlagen sind aber kaum Uran-238 und Radium-226 bzw. Radium-228 angereichert.

78 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

8 Zusammenfassung

Im Rahmen unseres Untersuchungsvorhabens sollten möglichst viele Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung untersucht werden. Ein weiteres Ziel war zusätzlich die Geologie in den Untersuchungsgebieten und die Radionuklidgehalte im Roh- und Reinwasser zu ermitteln, um einen möglichen Zusammenhang zu den spezifischen Aktivitäten der verschiedenen Rückständen festzustellen. Bei den von uns analysierten Rückständen aus der Trinkwasseraufbereitung handelt es sich um Rückspülschlämme, die einerseits aus reinen Schlämmen und andererseits aus kie-sigem Material bestehen. Zusätzlich haben wir in Rohrablagerungen (Inkrustierungen) aus Rohrleitungen die spezi-fische Aktivität von Radionukliden gemessen.

Insgesamt haben wir in dieser Studie 263 Rückspülschlammproben aus 212 Wasserwerken untersucht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern“ (November 1997 bis No-vember 2001) [5] hat das Bayerische Landesamt für Umwelt 19 Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung von 18 Wasserversorgungsunternehmen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben wir zusammen mit den Ergebnissen unseres Forschungsvorhabens betrachtet.

Von den Wasserversorgungsunternehmen betreiben 17 WVU reine Enteisungsanlagen (19 Rückstandsproben), ein WVU eine reine Entmanganungsanlage (eine Probe), fünf WVU reine Arsenentfernungsanlagen (fünf Proben) und 115 WVU Kombinationen aus Enteisungs-, Entmanganungs- und Arsenentfernungsanlagen (133 Proben). Reine Entsäuerungsanlagen haben 46 WVU (56 Proben) und 43 WVU bereiten das Rohwasser mit Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung kombiniert mit Entsäuerungsanlagen auf (45 Proben). Aktivkohle zur Trinkwasseraufbereitung wird von 14 WVU in Form von Mehrschichtfiltern verwendet (17 Proben) und 4 WVU benutzen andere Arten der Trinkwasseraufbereitung (6 Proben), wie Kerzenfilter, Oberflächenaufbereitung, Entfernung von Schwebstoffen und Aluminiumentfernung.

Anlagen zur reinen **Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung** und Kombinationen dieser drei Aufberei-tungsarten werden hauptsächlich in den Georegionen 2, 2a, 3, 4, 6, 7 und 8 betrieben (Abb. 1). Unsere Untersu-chungen haben gezeigt, dass in den Rückspülschlämmen dieser Aufbereitungsarten vor allem Radium-226 und Radium-228 angereichert werden. Die spezifischen Aktivitäten liegen im Bereich von 29 bis 32.500 Bq/kg TM für Radium-226 und von 12 bis 22.700 Bq/kg TM für Radium-228. Dagegen wird Uran-238 nur in geringen Aktivitä-ten in den Rückständen angereichert. Die ermittelten spezifischen Aktivitäten für Uran-238 liegen zwischen 1 und 998 Bq/kg TM. Dies ist damit zu erklären, dass innerhalb des Filtermaterials Radium an ausfallende Eisen- und Manganoxhydroxide adsorbiert wird, die durch die Belüftung (Sauerstoffanreicherung im Wasser führt zur Oxida-tion von Eisen und Mangan) des Rohwassers ausfallen [14], [16], [53]. In sauerstoffhaltigem, calciumcarbonatrei-chem (CaCO_3) Wasser liegt zu 99 % Uran als Uranylkarbonatkomplex vor. Dieser Komplex ist bei pH-Werten zwischen 6,5 und 12,0 stabil [17]. Allgemein kann man sagen, dass Uran in Form von Uranylkarbonatkomplexen nicht an Kolloide adsorbiert wird. Deshalb ist Uran nur in geringen Aktivitäten in den Schlämmen zu finden [17]. Auch Blei-210 wird mit spezifischen Aktivitäten zwischen 18 bis 3.290 Bq/kg TM stark in den Rückstandsproben angereichert.

Entsäuerungsanlagen dagegen finden sich hauptsächlich im ostbayerischen Raum, vom Fichtelgebirge über den Oberpfälzer Wald bis zum Bayerischen Wald (Georegion 5). Im Gegensatz zu Schlämmen aus der Enteise-nung/Entmanganung reichern sich in Schlämmen aus der Entsäuerung die Radionuklide nur in geringen spezifi-schen Aktivitäten an. Die spezifischen Aktivitäten für Radium-226 bewegen sich im Bereich von 4 bis 662 Bq/kg TM, für Radium-228 von 1 bis 806 Bq/kg TM und für Uran- 238 von 4 bis 422 Bq/kg TM.

Blei-210 fanden wir in allen Entsäuerungsanlagen in hohen spezifischen Aktivitäten zwischen 14 bis 5.320 Bq/kg TM.

Zusätzlich sind in Nordbayern, in den Georegionen 1, 3, 4, 5 und 6 auch **Kombinationen aus Enteisungs-, Ent-manganungs- und Arsenentfernungsanlagen zusammen mit Entsäuerungsanlagen** zu finden. In den spezifi-schen Aktivitäten für Uran-238, Radium-226 und Radium-228 unterscheiden sich deren Rückspülschlämme kaum

von denjenigen aus reinen Enteisungs-, Entmanganungs-, Arsenentfernungsanlagen und Kombinationen dieser drei Aufbereitungsarten. Die spezifischen Aktivitäten betragen für Uran-238 0,8 bis 541 Bq/kg TM, für Radium-226 10 bis 21.200 Bq/kg TM und für Radium-228 zwischen 2,5 bis 14.200 Bq/kg TM. Auch in diesen Rückspülschlämmen haben wir hohe spezifische Aktivitäten für Blei-210 zwischen 27 bis 7.180 Bq/kg TM ermittelt.

Reine Aktivkohle wird nur in einem Wasserversorgungsunternehmen in Bayern zur Trinkwasseraufbereitung verwendet. Wir konnten aber Rückspülschlämme aus Wasserwerken untersuchen, die **Aktivkohle in Mehrschichtfilteranlagen** (Kombination von Enteisungs-, Entmanganungs-, Arsenentfernungs- und Entsäuerungsanlagen mit Aktivkohle) zur Aufbereitung des Rohwassers benutzen. Die spezifischen Aktivitäten dieser Schlämme unterscheiden sich kaum von den anderen Aufbereitungsanlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung. Wir ermittelten spezifische Aktivitäten für Uran-238 von 4 bis 64 Bq/kg TM, für Radium-226 von 21 bis 12.400 Bq/kg TM und für Radium-228 von 3 bis 16.300 Bq/kg TM. Blei-210 ist mit spezifischen Aktivitäten von 24 bis 410 Bq/kg TM nicht so stark in den Schlämmen angereichert.

Es existieren in Bayern außerdem noch **andere Arten zur Trinkwasseraufbereitung**. Dies sind eine Anlage zur Aluminiumentfernung, eine Aufbereitung mittels Kerzenfiltern, eine Anlage zur Aufbereitung von Oberflächenwasser (Oberflächenaufbereitung) und eine Anlage zur Entfernung von Schwebstoffen. Die spezifischen Aktivitäten für Uran-238 liegen zwischen 4 und 3.065 Bq/kg TM, für Radium-226 zwischen 22 und 2.590 Bq/kg TM für Radium-228 zwischen 12 und 529 Bq/kg TM und für Blei-210 zwischen 47 und 7.600 Bq/kg TM. Die Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten ergaben sich für die Schlammprobe aus der Aluminiumentfernung.

Ablagerungen aus Rohrleitungen in Wasserwerken haben wir bisher nur von zwei Wasserwerken untersucht. Die spezifischen Aktivitäten von Uran-238 und Radium-226 liegen bei 180 Bq/kg bzw. zwischen 130 und 230 Bq/kg.

Für alle von uns untersuchten Rückspülschlämme aus den o. g. Anlagen der Trinkwasseraufbereitung wurden die jährlichen Effektivdosen abgeschätzt. Dazu haben wir vier Expositionsszenarien (drei realistische und ein „worst case“- Szenario) entworfen, um die effektive Dosis auf dem gesamten Entsorgungsweg zu berücksichtigen.

Es hat sich gezeigt, dass für die drei realistischen Expositionsszenarien (Expositionszeiten von 3, 8 und 20 Stunden im Jahr) bei der Entsorgung aller Schlammproben der Richtwert der Effektivdosis von 1 mSv pro Jahr für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht überschritten wird. Für das vierte Expositionsszenario wird dieser Richtwert bei der Handhabung von 18 Schlammproben überschritten. Dieses Szenario stellt aber den realitätsfernen „worst case“ dar. Von den 282 Rückstandspollen bestehen 240 aus reinem Schlamm und 42 aus z. T. kiesigem Material. Die reinen Schlammproben weisen wegen der kleineren Korngrößen höhere spezifische Aktivitäten für Uran-238 (0,8 bis 4.720 Bq/kg TM), für Radium-226 (6 bis 32.500 Bq/kg TM) und Radium-228 (2 bis 22.700 Bq/kg TM) auf. Für die z. T. kiesigen Materialien haben wir spezifische Aktivitäten für Uran-238 von 2 bis 339 Bq/kg TM, für Radium-226 von 8 bis 4.290 Bq/kg TM und für Radium-228 von 1 bis 4.350 Bq/kg TM ermittelt.

Die Begleitung eines F+E-Vorhabens des damaligen Landesamtes für Wasserwirtschaft hat gezeigt, dass die Verwendung von stark basischen **Anionenaustauschern** zur Entfernung von Uran aus dem Trinkwasser zu einer Beladung des Anionenaustauscherharzes bis zu Werten über 160.000 Bq Uran-238/kg Ionenaustauscherharz führen kann. Doch ergab unsere Dosisabschätzung bei maximaler Beladung des Anionenaustauschers, dass der Richtwert der Effektivdosis von 1 mSv pro Jahr auch hier nicht überschritten wird. Eine Anlage zur Uranentfernung mittels Anionenaustauscher und maximaler Beladung des Austauschers wird in naher Zukunft in Nordbayern in Betrieb genommen. Eine weitere Anlage zur gezielten Uranentfernung in Mittelfranken ist schon in Betrieb. Im Gegensatz zur vorher genannten Anlage mit maximaler Beladung, wird diese Anlage nur soweit beladen, dass die spezifische Aktivität von Uran-238 die Grenze von 10.000 Bq/kg nicht überschreitet (Anlage XII, Teil C Nr. 1 Satz 4 [1]).

Ein an die Wasserwerke versandter Fragenkatalog zur Methode der Entsorgung hat ergeben, dass 94 Rückspülschlämme auf Deponien entsorgt werden. 52 Schlämme werden von den WVU in Kläranlagen zu den Klärschlämmen gegeben. Rückspülschlämme aus 33 Absetzbecken werden über Entsorgungsfirmen entsorgt. Weitere Schlämme werden über Behandlungsanlagen (Müllverbrennung), Vorfluter, Restmüll entsorgt.

Obwohl die spezifischen Aktivitäten der Rückspülschlämme aus Anlagen der Enteisung/Entmanganung und das Anionenaustauscherharz zur gezielten Uranentfernung die Überwachungsgrenzwerte der Strahlenschutzverordnung

(Anlage XII, Teil B [1]) überschreiten, können diese Materialien, wie andere Rückstände auch, auf Deponien der Klasse I und II oder auf Bauschuttdeponien (Deponieklasse 0) entsorgt werden. Unsere Dosisabschätzung hat ergeben, dass der Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung nach § 98 nicht erreicht wird. Aus strahlenschutzrechtlicher Sicht ist nichts gegen die o. g. Entsorgungswege einzuwenden, sofern auch die abfallrechtlichen Zuordnungswerte für eine Deponierung eingehalten werden. Dazu haben wir die Gehalte einiger Schwermetalle untersucht. Es hat sich gezeigt, dass neben Eisen und Mangan, auch weitere Schwermetalle wie Arsen, Cadmium und Kupfer stark angereichert sind und die Zuordnungskriterien nach LAGA [77] überschreiten.

Elf Schlämme werden von den WVU auf Felder in der Landwirtschaft gebracht. Eine von uns durchgeführte Dosisabschätzung hat aber auch hier ergeben, dass der Richtwert der Effektivdosis von 1 mSv pro Jahr durch den Verzehr von auf den Feldern angebauten Nutzpflanzen oder mit den Pflanzen gefüttertem Vieh nicht überschritten wird.

Aus den Aktivitäten der untersuchten Roh- und Reinwasserproben konnten wir den Grad der Dekontamination für Radium-226 und Radium-228 bestimmen. Vor allem die Wasserproben aus den Georegionen 3, 4 und 6 ergaben erhöhte spezifische Aktivitäten von Radium-226 (Rohwasser: 3,5 bis 300 mBq/l, Reinwasser: 3,2 bis 257 mBq/l) und Radium-228 (Rohwasser: 5,4 bis 211 Bq/l, Reinwasser: 3,5 bis 77,7 mBq/l). Die Wässer aus der Georegion 5 dagegen weisen niedrigere spezifische Aktivitäten dieser Radionuklide auf.

Die Dekontaminationsgrade für die Wasserproben aus den Georegionen 3, 4 und 6 bewegen sich im Bereich von 2 bis 65 % für Radium-226 und 15 bis 74 % für Radium-228. Für Uran-238 erhielten wir Dekontaminationsgrade von 3 bis 25 %. Dies bedeutet eine starke Abreicherung (Entfernung) von Radium-226 und Radium-228 aus dem Rohwasser bzw. eine starke Anreicherung in den dazugehörigen Rückspülschlämmen. Uran dagegen findet sich nur in geringen Aktivitäten.

Durch die Aufbereitung werden Radium und Uran zum Teil aus dem Rohwasser entfernt und gelangen somit über das Trink- und Brauchwasser ins Abwasser. Von den Wasserversorgungsunternehmen werden die Rückspülschlämme aber auch durch Einleitung bzw. Zugabe zu Klärschlämmen in Kläranlagen entsorgt. Aus diesem Grund haben wir Klärschlämme aus 33 Kläranlagen, die Rückspülschlämme aus WVU annehmen, auf die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihe untersucht. Dabei unterschreiten die spezifischen Aktivitäten von Uran-238 und Radium-226 bzw. Radium-228 der meisten Klärschlammproben alle Überwachungsgrenzen der Strahlenschutzverordnung. Nur Blei-210 überschreitet bei einigen Proben die Überwachungsgrenze von 200 Bq/kg.

82 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

9 Literaturverzeichnis

- [1] Veith, H.-M. (2001): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001, Textausgabe mit einer erläuternden Einführung, 6. völlig neu bearbeitete Auflage, Bundesanzeiger Verlagsges. mbH, Köln.
- [2] Mallick, R.: Abschlussbericht des Forschungsvorhabens Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftigen Rückständen vom 31. Dezember 2004, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2004.
- [3] DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (2005): Enteisung und Entmanganung – Wichtigste Regeln für Planung und Betrieb von Trinkwasseraufbereitungsanlagen in der neuen DVGW-Arbeitsblattnreihe W223 zusammengefasst, Energie / Wasser-Praxis 3/2005.
- [4] Bundesministerium für Gesundheit und Soziale Sicherung (BMGS) (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV) vom 21. Mai 2001, BGBl. 2001, Teil I, S. 959.
- [5] Trautmannsheimer, M.: Abschlussbericht des Forschungsvorhabens Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern vom 01. Mai 2002, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002.
- [6] Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Dok. XI-3539/96-DE, 1996.
- [7] ICRP, International Commission on Radiological Protection (1991): 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21, No. 1 - 3, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.
- [8] Europäische Union (EU) Richtlinie 98/83/EG über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch von 3. November 1998, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 330/32.
- [9] Bünger, Th. & Obrikat, D. (2003): Überwachung natürlicher Radionuklide in Trinkwasser, in: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 12. Fachgespräch zur Überwachung der Umwelt-radioaktivität, Bonn, 08. bis 10. April 2003.
- [10] WHO, World Health Organization (1998): Guidelines for drinking water quality, 2nd ed., Addendum to vol. 1 – recommendations-Uranium, WHO, Geneva, S. 10 - 11.
- [11] WHO, World Health Organization (2003): Guidelines for drinking water quality, 3rd ed., vol. 1 – recommendations, WHO, Geneva, S. 454 - 456.
- [12] Konietzka, R., Hermann Dieter, H. & Voss, J.-U. (2005): Vorschlag für einen gesundheitlichen Leitwert für Uran in Trinkwasser, Umweltmedizin in Forschung und Praxis 10 (2), S. 133 - 143.
- [13] Verordnung über natürliches Mineralwasser, Quellwasser und Tafelwasser (Mineral- und Tafelwasserverordnung - Min/TafelWV) vom 01 August 1984, BGBl I 1984, 1036, zuletzt geändert am 01. September 2005.
- [14] Haberer, K., Raff, O., Akkermann-Kubillus, A. & Wilken, R.-D. (1997): Natural Radionuclides in Drinking Water in Europe and Treatment Methods for Their Removal, European Commission, Contract No F14 PCT 960054, TENAWA Project, WP 1.1 final report (23.6.1997).
- [15] Staubmann, K. & Perfler, R. (2000): Entfernung von Radium aus Trinkwasser mittels Kationenaustausch – neue Erkenntnisse über den Einfluss der Wasserqualität auf die Filterstandzeit, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jahrgang 52, Heft 9/10, S. 211 - 219.
- [16] Haberer, K. (1989): Entfernung von Radionukliden bei der Trinkwasseraufbereitung, in: DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 62, Eschborn 1989.

- [17] Amayri, S., Baraniak, L. & Bernhard, G. (2001): Formation of $\text{Ca}_2[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$ in Dependence on the Concentration of UO_2^{2+} , Ca^{2+} and CO_3^{2-} , Forschungszentrum Rossendorf, Annual Report 2000, Institute of Radiochemistry, FZR-318.
- [18] Ivanovich, M., Harmon, R. S. (1992): Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine, and environmental sciences, Clarendon Press, Oxford.
- [19] Wichmann, H. E., Kreienbrock, L., Kreuzrer, M., Gerken, M., Dingerkus, G., Wellmann, J. & Keller, G. (1998): Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (West), Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1998-503.
- [20] Kemski, J., Klingel, R. & Siehl, A.: Das geogene Radon-Potential, in: Siehl A. (Hrsg.): Umweltradioaktivität, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 1996.
- [21] Höll, K. (2002): Wasser – Nutzung im Kreislauf, Hygiene, Analyse und Bewertung, Hrsg. Grohmann, A., 8., völlig neu bearbeitete Auflage, Walter de Gruyter, Berlin.
- [22] BMU-Jahresbericht 2001: Umwelt und Strahlenbelastung, http://www.bfs.de/bfs/druck/uus/jb_2001.html, Stand: Oktober 2006.
- [23] Gans, I., Fusban, H. U., Wollenhaupt, H., Kiefer, J., Glöbel, B., Berlich, J. & Porstendörfer, J. (1987): Radium 226 und andere natürliche Radionuklide im Trinkwasser und in Getränken in der Bundesrepublik Deutschland, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, Berlin, WaBoLu-Hefte 4/1987.
- [24] Becker, K., Müssig-Zufika, M., Hoffmann, K., Krause, C., Meyer, E., Nöllke, P., Schulz, C. & Seiwert, M. (1997): Umwelt-Survey 1990/92 Band V: Trinkwasser, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Umweltbundesamtes, WaBoLu-Hefte 5/1997.
- [25] DVGW (1985): Daten und Informationen zu Wasserinhaltsstoffen, DVGW Schriftenreihe Wasser Nr. 48.
- [26] Bünger, Th. (1997): Der Gehalt natürlicher Radionuklide (Uran, Radium, Thorium u.a.) im Trinkwasser, in: Aurand, K. & Rühle, H. (1997): Radon und Trinkwasser, Schriftenreihe Verein WaBoLu 101, S. 125 - 139.
- [27] Merkel, B. J. (2005): Uran in Trinkwasser (Leitungswasser, Mineralwasser, Tafelwasser, Heilwasser), http://www.geo.tu-freiberg.de/~merkel/uran_index.htm, Stand: Oktober 2006.
- [28] Gellermann, R. & Stolz, W. (1997): Uran in Wässern – Untersuchungen in ostdeutschen Flüssen und Grundwässern, UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 9 (2), S. 87 – 92.
- [29] Reifenhäuser, Chr. (2002): Untersuchung natürlicher Radionuklide im Trinkwasser, Jahresbericht 2002 des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, <http://www.bayern.de/lfu/wir/index.html>, Stand: Oktober 2006.
- [30] Ehemaliges Landesamt für Wasserwirtschaft (2004): Natürliche Uranwerte im Grund- und Trinkwasser Bayerns, Foliensammlung Wasserwirtschaft.
- [31] Bundesamt für Strahlenschutz (2006): Natürliche Radionuklide in Trinkwässern, <http://www.bfs.de/ion/nahrungsmittel/trinkwasser.html>, Stand: Oktober 2006.
- [32] persönliche Mitteilung Herr Dr. Bünger, Bundesamt für Strahlenschutz, 2006.
- [33] Hingmann, H., Ehret, V. & Allinger, Th. (2006): Natürliche Radionuklide im Trinkwasser - Untersuchungen in Hessen, 38. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. in Dresden, Tagungsband, S. 541 - 548.
- [34] Michel, R., Ritzel, S. & Vahlbruch, J.-W. (2006): Natürliche Strahlenexposition: Horrorszenario oder alles ganz normal?, 38. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. in Dresden, Tagungsband, S. 3 - 34.
- [35] Bundesamt für Strahlenschutz (2006): Natürliche Radionuklide in Mineralwässern, <http://www.bfs.de/ion/nahrungsmittel/mineralwasser.html>, Stand: Oktober 2006.
- [36] Rühle, H. (2001): Natürlich radioaktive Stoffe in Trinkwasser und Mineralwasser, Strahlenschutz Praxis 1/2001, S. 14 - 20.

- [37] Schneider, S. (1995): Derzeitiger Stand der Entsorgung von Rückständen aus der Wasseraufbereitung, DVGW-Schriftenreihe Wasser 86, S. 85 - 96.
- [38] Dallmann, W. & Scheibe, W. (1996): Verwertung von stark hydroxidhaltigen Schlämmen, gwf Wasser Special 137 Nr. 14, S. 142 - 147.
- [39] DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (2000): Rückstände und Nebenprodukte aus Wasseraufbereitungsanlagen; Teil 3: Vermeidung, Verwertung und Beseitigung, Technische Regel DVGW-Arbeitsblatt W 221-3.
- [40] Bünger, Th. (1997): Untersuchungen zum Radongehalt des Trinkwassers in Berliner Wasserwerken, in: Au-
rand, K. & Rühle, H. (1997): Radon und Trinkwasser, Schriftenreihe Verein WaBoLu 101, S. 29 - 37.
- [41] Barthel, R., Goldammer, W., Hake, W. & Kugeler, E. (2000): Eingrenzung und Bewertung der von den vorge-
sehenen NORM-Regelungen der Novelle StrlSchV betroffenen Bereiche, Brenk-Systemplanung GmbH, im
Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BS-Bearb. Nr. 9410/2.
- [42] Haberer, K. (1999): Radium 226 in Filterschlämmen der Grundwasseraufbereitung, Vom Wasser, 92, S. 335 -
345.
- [43] Wisser, S. (2002): Außergewöhnliche Anreicherung natürlicher Radionuklide in Thermalwasserleitungen,
Wasser & Boden, 54/3, S. 20 - 22.
- [44] Wisser, S. & Walsdorf, A. (2006): Vorkommen und Verhalten von Radium bei der Wasseraufbereitung, 38.
Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. in Dresden, Tagungsband, S. 223 - 228.
- [45] Wisser, S. (2003): Balancing Natural Radionuclides in Drinking Water Supply – an investigation in Germany
and Canada with respect to geology, radiometry & legislation, Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, Juni 2003.
- [46] DIN 2000 - Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau,
Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen - Technische Regel des DVGW.
- [47] <http://www.trinkwasserspezi.de/enteisk.html>, Stand: Oktober 2006.
- [48] <http://www.wasser-lexikon.de/search.php?key=Trinkwasseraufbereitung>, Stand: Oktober 2006.
- [49] Oberacker, F., Maier, D. & Maier, M. (2003): Arsen und Trinkwasser, Teil 2 – Ein Überblick über Arsenent-
fernungsverfahren zur Trinkwasseraufbereitung und umweltverträgliche Entsorgungsmöglichkeiten der entste-
henden arsenbelasteten Wasserwerksschlämme, Vom Wasser, 100, S. 9 - 48.
- [50] Lee, S. Y., Hall, S. K. & Bondietti, E. A. (1982): Methods of Removing Uranium from Drinking Water: II:
Present Municipal Water Treatment and Potential Removal Methods, EPA 570/9-82-003, Washington, D.C.
- [51] Sorg, T. J. (1988): Methods for Removing Uranium from Drinking Water, J. Amer. Water Works Assoc. 80, 7,
S. 105 - 111.
- [52] Brink W. L., Schliekelman R. J., Bennett D. L., Bell Ch. R. & Markwood I. M.: Radium-Removal Efficiencies
In Water-Treatment Processes, J. Amer. Water Works Assoc. 70, 1, S. 31 - 35, 1978.
- [53] Annanmäki, M. & Turtiainen, T. (2000): Treatment Techniques for Removing Natural Radionuclides from
Drinking Water, Final Report of the TENAWA project, STUK-A169.
- [54] Valentine, R. L., Mulholland, T. S. & Splinter, R. C. (1987): Radium Removal using sorption to filter sand, J.
Amer. Water Works Assoc. 79, 4, S. 170 - 176.
- [55] Haberer, K. & Raff, O. (1999): Removal of Naturally Occurring Radionuclides from Drinking Water – An
Overview, Vom Wasser, 93, S. 305 - 324.
- [56] Ritter, M. & Bruischütz, R. (1998): Trinkwasser, Universität Bayreuth, [http://www.uni-
bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/trinkwasser/trinkwasser.html](http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/trinkwasser/trinkwasser.html), Stand: Oktober 2006.

- [57] Sorg, T. J. & Logsdon, G. S. (1980): Treatment technology to meet the Interim Primary Drinking Regulations for inorganics: Part 5, J. Amer. Water Works Assoc. 72, 7, S. 411 - 422.
- [58] <http://gutmbh.de/aktivkohlevortrag1.htm>, Stand: Oktober 2006.
- [59] <http://wasser-lexikon.schlicht-gruppe.de/search.php?key=Aktivkohle>, Stand: Oktober 2006.
- [60] <http://web.telecom.cz/silcarbon/indexde.htm#1.%20Allgemeines>, Stand: Oktober 2006.
- [61] http://www.wasser-macht-schule.com/wiewaswo/lexikonright_i.html, Stand: Oktober 2006.
- [62] Funktionsprinzip und Anwendung der Ionenaustauschchromatographie in Industrie, Lebensmittel- und Umweltanalytik, http://www.av.fh-koeln.de/professoren/rehorek/files/PA_Ionenaustauschchromatographie_Senhold_0201.pdf, Stand: Oktober 2006.
- [63] Zweckverband Eislinger Wasserversorgungsgruppe http://wasserwerk-online.de/wasseralpha_beta.htm, Stand: Oktober 2006.
- [64] Osmosefilter und Ionenaustauscher, <http://www.ibdoerre.com/aqua/norbert/technik/filtertechnik/osmosefilter/osmose-ionenaustauscher.htm>, Stand: Oktober 2006.
- [65] Logsdon, G. S. (1977): Treatment techniques for the removal of radioactive contaminants from drinking water, in: Manual of treatment techniques for meeting the Interim Primary Drinking Water Regulations, EPA-Publication 600/8-77-005, Cincinnati/Ohio.
- [66] Myers, A. G., Snoeying, V. L. & Snyder, D. W. (1985): Removing barium and radium through calcium cation exchange, J. Amer. Water Works Assoc. 77, 5, S. 60 - 66.
- [67] http://www.lenntech.com/deutsch/Was_ist_Umkehrose.htm, Stand: Oktober 2006.
- [68] <http://de.wikipedia.org/wiki/Umkehrosiose>, Stand: Oktober 2006.
- [69] Gooßens, A. (1996): Verwertung von Wasserwerksschlamm und deren Probleme, gwf Wasser Special 137 Nr. 14, S. 17 - 20.
- [70] Dammann, E. & Benzinger, S. (1996): Verwertung von Eisenhydroxidschlämmen aus der Grundwasseraufbereitung in der kommunalen Abwasserreinigung, gwf Wasser Special 137 Nr. 14, S. 148 - 151.
- [71] Ehemaliges Landesamt für Wasserwirtschaft (2004): Grundwasserlandschaften in Bayern, ehemaliges Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Foliensammlung Wasserwirtschaft.
- [72] Fauth, H. (1985): Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland: Verteilung von Schwermetallen in Wässern u. Bachsedimenten, Herausgeber: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, ISBN 3-9801097-0-4.
- [73] Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau), Richtlinienvorschlag der Strahlenschutzkommission, verabschiedet auf der 155. Sitzung der SSK am 02./03.07.1998.
- [74] Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition, Band 1 und 2, in: Bundesanzeiger vom 23. Juli 2001, Jahrgang 53, Nr. 160a, 2001.
- [75] Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 900 - Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz „Luftgrenzwerte“, Ausgabe: Oktober 2000, zuletzt geändert am 29. April 2003, BarzBI Nr. 6/2003 S. 90, 2003.
- [76] EPA (1997): Exposure Factors Handbook, Volume 1, General Factors, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [77] LAGA (1997): Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall Nr. 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln – Stand: 06. November 1997, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1998.

- [78] DIN 38414 Teil 4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S): Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4), Deutsches Institut für Normung e.V., Stand: Oktober 1984.
- [79] Persönliche Mitteilung Herr Drexler, Referat 36, Landesamt für Umwelt, 2006.
- [80] persönliche Mitteilung Herr Dr. Wissler, Rhine-Main Water Research GmbH, 2006.

- 88** Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

10 Anhang

A Fragenkatalog an untersuchte Wasserversorgungsunternehmen

1. Name und Adresse des Wasserwerks/Wasserversorgungsunternehmens:

2. Anzahl Gewinnungsgebiete und Brunnen/Quellen:

3. Geförderte Wassermenge der einzelnen Brunnen im Jahr:

4. Anzahl der Anlagen zur Wassergewinnung und Art der Aufbereitung:

Anlage	Anzahl
Wasseraufbereitung	
Enteisung	
Entmanganung	
Entarsenung	
Entsäuerung	
Aktivkohle	
Ionenaustauscher	
Hochbehälter	
Sonstiges*	

*Bezeichnung:

5. Wasseraufbereitung

VORGEHENSWEISE		BRUNNENBEZEICHNUNG
Rohwasser aller Brunnen gemischt und aufbereitet		
Rohwasser mehrerer Brunnen gemischt und aufbereitet		
Rohwasser jedes einzelnen Brunnen aufbereitet		

Bemerkung:

90 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

6. Wasserdurchsatz durch die Aufbereitungsanlage (Enteisenung/Entmanganung):

7. Fassungsvermögen des Absetzbeckens:

8. Seit wann befindet sich der Rückspülschlamm im Absetzbecken/wann wurde das Absetzbecken zuletzt geleert?

9. Menge an Rückspülschlamm pro Absetzbecken:

10. Gesamtmenge an zu entsorgendem Rückspülschlamm:

11. Wie oft wird der Rückspülschlamm entsorgt?

12. Wie und wohin wird der Rückspülschlamm entsorgt?

13. Rückspülwasser/Klarwasser in Kanalisation oder in Vorfluter?

14. Name des Vorfluters:

15. Geologie (falls bekannt), in der sich der/die Brunnen befindet/n:

16. Versorgungsgebiet, Anzahl der Haushalte?

17. In welcher Kläranlage werden die Abwässer des Versorgungsgebietes aufbereitet?

B Radionukliddaten

B.1 Radionuklide aller Rückspülschlämme aus der Trinkwasseraufbereitung

B.1.1 Uran-Zerfallsreihe

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]								
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Uran-234	Thorium-230	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
15	0,541	0,144 ± 0,075	—	—	—	—	0,024 ± 0,007	0,009 ± 0,007	1,040 ± 0,171
1006	0,004	—	—	—	—	0,298 ± 0,046	0,046 ± 0,005	0,036 ± 0,005	—
1018/1	0,008	0,023 ± 0,011	0,014 ± 0,012	—	—	0,025 ± 0,004	0,009 ± 0,001	0,008 ± 0,001	0,028 ± 0,016
1018/2	0,018	0,025 ± 0,010	—	—	—	0,042 ± 0,008	0,010 ± 0,001	0,009 ± 0,001	0,410 ± 0,023
1040	0,010	—	—	—	—	0,781 ± 0,060	0,227 ± 0,015	0,196 ± 0,012	0,185 ± 0,018
1072	0,024	0,023 ± 0,018	—	—	—	0,143 ± 0,020	0,066 ± 0,004	0,064 ± 0,004	0,092 ± 0,052
1099	0,002	—	—	—	—	0,015 ± 0,005	0,007 ± 0,001	0,006 ± 0,001	—
1107	—	—	—	—	—	0,018 ± 0,005	0,010 ± 0,001	0,008 ± 0,001	0,089 ± 0,027
2067	—	—	—	—	—	4,130 ± 0,150	3,360 ± 0,090	3,170 ± 0,130	2,303 ± 0,025
2076/1	0,005	—	—	—	—	0,848 ± 0,074	0,130 ± 0,007	0,112 ± 0,007	0,052 ± 0,010
2076/2	0,033	0,069 ± 0,037	0,058 ± 0,025	—	—	0,279 ± 0,030	0,158 ± 0,008	0,144 ± 0,008	0,374 ± 0,060
2078	—	—	—	—	—	2,533 ± 0,011	2,112 ± 0,073	2,206 ± 0,066	—
2079	0,006 ± 0,001	—	—	0,008 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,155 ± 0,023	0,088 ± 0,005	0,078 ± 0,005	0,061 ± 0,023
2094	0,003	—	—	—	—	0,191 ± 0,036	0,011 ± 0,004	0,011 ± 0,004	0,063 ± 0,016
2096/1	0,006	0,015 ± 0,008	—	—	—	0,102 ± 0,011	0,055 ± 0,004	0,047 ± 0,003	0,251 ± 0,017
2096/2	0,005	0,011 ± 0,008	—	—	—	0,045 ± 0,009	0,023 ± 0,002	0,021 ± 0,002	0,058 ± 0,012
2115	—	—	—	—	—	0,545 ± 0,037	0,437 ± 0,016	0,449 ± 0,016	—
2119/1	0,003	—	—	—	—	3,170 ± 0,271	0,460 ± 0,027	0,413 ± 0,026	—
2119/2	0,028	—	—	—	—	1,510 ± 0,134	0,121 ± 0,009	0,104 ± 0,009	—
2127	0,016	—	—	—	—	1,140 ± 0,108	0,170 ± 0,011	0,158 ± 0,012	—
2135	0,010	—	—	—	—	1,220 ± 0,105	0,152 ± 0,010	0,135 ± 0,010	—
2159	—	—	—	—	—	0,628 ± 0,069	0,066 ± 0,005	0,057 ± 0,005	—
2172/1	—	—	—	—	—	0,072 ± 0,012	0,021 ± 0,002	0,018 ± 0,002	—
2172/2	0,998	0,743 ± 0,257	1,020 ± 0,101	3,300 ± 1,250	—	0,110 ± 0,073	0,028 ± 0,002	0,024 ± 0,002	0,581 ± 0,070
2208	0,303 ± 0,046	0,208 ± 0,079	0,386 ± 0,067	0,998 ± 0,093	0,015 ± 0,005	0,408 ± 0,091	0,309 ± 0,016	0,285 ± 0,015	—
2252/1	—	—	—	—	—	0,220 ± 0,012	0,150 ± 0,004	0,165 ± 0,005	0,207 ± 0,009
2252/2	—	—	—	—	—	0,354 ± 0,043	0,111 ± 0,007	0,095 ± 0,005	0,273 ± 0,207
3005/1	—	—	—	—	—	7,760 ± 0,260	5,930 ± 0,160	6,630 ± 0,170	0,826 ± 0,030
3005/2	0,201 ± 0,033	—	—	0,238 ± 0,028	0,084 ± 0,014	6,660 ± 0,455	4,150 ± 0,285	3,700 ± 0,251	0,384 ± 0,246
3007	—	—	—	—	—	0,191 ± 0,022	0,028 ± 0,002	0,025 ± 0,002	—
3008	—	—	—	—	—	0,022 ± 0,004	0,009 ± 0,001	0,008 ± 0,001	—
3008/1	—	0,141 ± 0,074	—	—	—	0,223 ± 0,050	0,014 ± 0,005	0,018 ± 0,005	—
3008/2	—	0,218 ± 0,094	—	—	—	0,233 ± 0,054	0,015 ± 0,005	0,026 ± 0,006	—
3016	0,011	0,092 ± 0,072	—	—	—	0,580 ± 0,088	0,068 ± 0,008	0,057 ± 0,012	—
3017	—	—	—	—	—	0,037 ± 0,008	0,027 ± 0,002	0,024 ± 0,003	—
3022	0,010	—	—	—	—	21,20 ± 1,690	12,40 ± 0,646	11,30 ± 0,601	—
3028	0,237	0,266 ± 0,081	1,270 ± 0,548	—	—	7,380 ± 0,617	6,360 ± 0,321	5,520 ± 0,383	0,222 ± 0,080
3029	0,018	—	—	—	—	10,60 ± 0,873	1,820 ± 0,088	1,560 ± 0,123	—
3032	0,142	0,094 ± 0,045	—	—	—	2,240 ± 0,211	0,238 ± 0,015	0,210 ± 0,015	0,261 ± 0,042
3033	—	—	—	—	—	1,900 ± 0,147	0,313 ± 0,019	0,282 ± 0,016	—
3034/1	0,337	0,186 ± 0,095	0,456 ± 0,141	—	—	1,340 ± 0,125	0,147 ± 0,010	0,128 ± 0,010	—
3034/2	0,263	0,245 ± 0,112	0,391 ± 0,105	—	—	0,662 ± 0,123	0,079 ± 0,005	0,073 ± 0,005	—
3040	—	—	—	—	—	1,180 ± 0,082	0,131 ± 0,007	0,115 ± 0,006	—
3066	0,046	—	—	—	—	0,942 ± 0,098	0,162 ± 0,009	0,136 ± 0,008	—
3067	—	—	—	—	—	0,468 ± 0,035	0,072 ± 0,004	0,063 ± 0,004	—

92 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]								
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Uran-234	Thorium-230	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
3079/1	0,009	—	—	—	—	0,602 ± 0,042	0,071 ± 0,004	0,063 ± 0,003	—
3079/2	0,010	—	—	—	—	0,528 ± 0,034	0,064 ± 0,003	0,058 ± 0,003	—
3081/1	0,075 ± 0,011	0,099 ± 0,036	0,109 ± 0,034	0,109 ± 0,025	0,021 ± 0,004	0,043 ± 0,030	0,032 ± 0,002	0,028 ± 0,002	0,379 ± 0,046
3081/2	0,020 ± 0,003	0,024 ± 0,012	0,046 ± 0,022	0,021 ± 0,003	0,026 ± 0,017	0,100 ± 0,006	0,038 ± 0,003	0,033 ± 0,002	0,120 ± 0,032
3089	0,008	—	—	—	—	1,900 ± 0,189	0,154 ± 0,011	0,134 ± 0,011	0,113 ± 0,038
3099	0,004	—	—	—	—	0,213 ± 0,021	0,031 ± 0,002	0,027 ± 0,002	0,065 ± 0,010
3102	0,095	0,051 ± 0,021	0,085 ± 0,031	—	—	0,006 ± 0,033	0,013 ± 0,001	0,011 ± 0,001	—
3103	0,042	0,007 ± 0,007	—	—	—	0,023 ± 0,018	0,016 ± 0,001	0,013 ± 0,001	0,072 ± 0,022
3134	0,009	0,012 ± 0,012	—	—	—	0,277 ± 0,020	0,070 ± 0,004	0,061 ± 0,003	—
3150	0,004	—	—	—	—	0,023 ± 0,009	0,010 ± 0,001	0,008 ± 0,001	—
3152	0,003	—	—	—	—	0,050 ± 0,011	0,012 ± 0,001	0,011 ± 0,001	—
3154/1	—	—	—	—	—	2,220 ± 0,201	0,330 ± 0,019	0,297 ± 0,017	—
3154/2	0,071	—	—	—	—	2,380 ± 0,245	0,360 ± 0,023	0,330 ± 0,019	—
3156	0,068	—	0,938 ± 0,399	—	—	6,960 ± 0,617	0,717 ± 0,049	0,623 ± 0,037	—
3158	—	—	—	—	—	—	0,016 ± 0,002	0,016 ± 0,002	—
3163	—	—	—	—	—	0,084 ± 0,021	0,070 ± 0,005	0,060 ± 0,004	0,095 ± 0,074
3168	1,929	—	—	4,302 ± 5,322	—	1,448 ± 0,394	0,758 ± 0,093	0,684 ± 0,098	1,918 ± 0,344
3176	—	—	—	—	—	0,481 ± 0,035	0,073 ± 0,004	0,064 ± 0,003	—
3182	0,042	—	—	—	—	0,356 ± 0,023	0,048 ± 0,003	0,043 ± 0,002	—
3183	0,475 ± 0,066	0,437 ± 0,240	—	0,815 ± 0,063	0,024 ± 0,011	32,50 ± 2,890	9,150 ± 0,490	7,820 ± 0,411	3,290 ± 0,533
3184	0,055	—	—	—	—	9,450 ± 0,944	1,050 ± 0,054	0,929 ± 0,051	—
3192	—	—	—	—	—	1,350 ± 0,222	0,341 ± 0,029	0,271 ± 0,043	0,059 ± 0,048
3195	—	—	—	—	—	3,740 ± 0,140	3,370 ± 0,090	3,760 ± 0,100	1,070 ± 0,051
3196/1	0,064	—	—	—	—	3,230 ± 0,248	0,467 ± 0,035	0,405 ± 0,031	—
3196/2	0,096	0,104 ± 0,107	—	—	—	1,450 ± 0,149	0,240 ± 0,020	0,188 ± 0,017	—
3196/3	0,048	—	—	—	—	7,410 ± 0,571	1,520 ± 0,079	1,350 ± 0,069	—
3196/4	0,023	0,026 ± 0,015	—	—	—	0,121 ± 0,020	0,027 ± 0,003	0,024 ± 0,002	0,072 ± 0,016
3196/5	0,102	0,119 ± 0,088	—	—	—	2,150 ± 0,176	0,320 ± 0,018	0,278 ± 0,016	—
3196/6	0,010	—	—	—	—	0,090 ± 0,012	0,029 ± 0,002	0,026 ± 0,002	—
3196/7	0,014	—	—	—	—	2,240 ± 0,181	0,415 ± 0,023	0,363 ± 0,021	—
3196/8	0,046	—	—	—	—	2,230 ± 0,156	0,222 ± 0,013	0,198 ± 0,015	—
3208	0,230	—	—	—	—	1,640 ± 0,132	0,257 ± 0,013	0,212 ± 0,011	4,380 ± 0,327
3238	—	0,017 ± 0,011	—	—	—	0,031 ± 0,005	0,015 ± 0,001	0,013 ± 0,001	—
3240	0,161	0,225 ± 0,037	—	—	—	0,930 ± 0,097	0,539 ± 0,029	0,475 ± 0,041	—
3243	—	—	—	—	—	1,060 ± 0,122	0,100 ± 0,010	0,094 ± 0,011	—
3246	—	—	—	—	—	—	0,150 ± 0,076	—	7,180 ± 3,820
3247	0,068	—	—	—	—	4,920 ± 0,401	2,440 ± 0,125	2,080 ± 0,161	—
3251	0,007	—	—	—	—	0,111 ± 0,012	0,034 ± 0,002	0,028 ± 0,002	0,416 ± 0,180
3253	0,063	0,043 ± 0,019	0,033 ± 0,018	—	—	—	0,016 ± 0,001	0,014 ± 0,001	—
3260	0,063	—	—	—	—	5,310 ± 0,318	0,434 ± 0,022	0,372 ± 0,019	0,468 ± 0,133
3261/1	0,021	—	—	—	—	10,10 ± 0,903	1,120 ± 0,067	0,991 ± 0,051	—
3261/2	0,101	0,057 ± 0,037	—	—	—	—	0,044 ± 0,003	0,037 ± 0,003	0,304 ± 0,130
3267/1	0,027	—	—	—	—	6,020 ± 0,530	0,816 ± 0,044	0,713 ± 0,047	1,500 ± 0,088
3267/2	0,019	—	—	—	—	14,70 ± 1,330	1,230 ± 0,063	1,050 ± 0,056	—
3274/1	0,021	—	—	—	—	4,900 ± 0,387	0,594 ± 0,033	0,519 ± 0,035	—
3274/2	0,034	—	—	—	—	12,60 ± 1,030	2,120 ± 0,116	1,890 ± 0,106	1,250 ± 0,448
3275	—	0,114 ± 0,104	—	—	—	3,020 ± 0,287	0,267 ± 0,018	0,208 ± 0,018	—
3276	—	0,162 ± 0,070	—	—	—	1,810 ± 0,204	0,474 ± 0,029	0,422 ± 0,038	—
3278	—	0,060 ± 0,010	—	—	—	0,490 ± 0,030	0,320 ± 0,010	0,340 ± 0,010	0,065 ± 0,006
3280	—	0,133 ± 0,080	—	—	—	1,480 ± 0,145	0,122 ± 0,010	0,105 ± 0,009	—

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]								
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Uran-234	Thorium-230	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
3281	0,012	—	—	—	—	2,560 ± 0,253	0,743 ± 0,041	0,675 ± 0,037	—
3282	—	0,120 ± 0,026	—	—	—	0,243 ± 0,019	0,095 ± 0,005	0,084 ± 0,006	0,083 ± 0,014
3285	—	—	—	—	—	0,129 ± 0,038	0,020 ± 0,004	0,016 ± 0,002	—
3289	—	—	1,500 ± 0,777	—	—	3,750 ± 0,405	2,090 ± 0,118	1,850 ± 0,106	—
3290	—	—	—	—	—	3,480 ± 0,453	0,376 ± 0,091	0,286 ± 0,071	0,190 ± 0,125
3291	—	—	—	—	—	0,419 ± 0,049	0,031 ± 0,004	0,025 ± 0,004	—
3293	—	0,015 ± 0,008	—	—	—	0,030 ± 0,004	0,008 ± 0,001	0,006 ± 0,001	—
3304	—	0,275 ± 0,110	0,532 ± 0,157	—	—	1,520 ± 0,143	0,138 ± 0,009	0,119 ± 0,008	—
3306	—	0,046 ± 0,027	0,069 ± 0,046	—	—	0,624 ± 0,042	0,083 ± 0,005	0,077 ± 0,004	—
3308	—	0,231 ± 0,087	0,408 ± 0,185	—	—	1,750 ± 0,218	0,286 ± 0,022	0,236 ± 0,036	0,279 ± 0,035
3309	0,127	0,044 ± 0,030	—	—	—	0,024 ± 0,042	0,035 ± 0,002	0,030 ± 0,002	0,251 ± 0,139
3311	0,036	—	—	—	—	12,70 ± 1,060	6,120 ± 0,300	5,510 ± 0,267	1,220 ± 0,402
3322	0,013	—	—	—	—	3,360 ± 0,329	0,532 ± 0,027	0,473 ± 0,024	—
3325/1	0,012	—	—	—	—	2,040 ± 0,185	0,231 ± 0,016	0,199 ± 0,012	—
3325/2	0,226	0,254 ± 0,117	0,325 ± 0,110	—	—	1,580 ± 0,211	0,159 ± 0,009	0,139 ± 0,008	—
3337	—	—	—	—	—	2,110 ± 0,212	0,390 ± 0,023	0,346 ± 0,018	—
3339	0,200 ± 0,036	0,132 ± 0,074	0,316 ± 0,071	0,304 ± 0,039	0,006 ± 0,003	1,350 ± 0,166	0,300 ± 0,015	0,271 ± 0,014	0,063 ± 0,017
3340	0,025	—	—	—	—	18,50 ± 1,790	2,940 ± 0,146	2,640 ± 0,128	—
3345	0,317	—	0,710 ± 0,393	—	—	5,710 ± 0,443	0,596 ± 0,035	0,493 ± 0,033	—
3346	—	—	—	—	—	1,130 ± 0,072	0,726 ± 0,035	0,659 ± 0,032	—
3352/1	0,004	—	—	—	—	3,730 ± 0,395	1,010 ± 0,053	0,887 ± 0,049	—
3352/2	0,051	—	—	—	—	2,430 ± 0,218	0,689 ± 0,046	0,625 ± 0,041	0,062 ± 0,037
3352/3	0,015	—	—	—	—	12,40 ± 0,846	1,040 ± 0,061	0,923 ± 0,067	—
4001/1	0,007	—	—	—	—	8,950 ± 0,672	1,080 ± 0,055	0,928 ± 0,046	—
4001/2	0,008	—	—	—	—	11,10 ± 0,816	1,650 ± 0,095	1,500 ± 0,080	0,724 ± 0,275
4001/3	0,007	—	—	—	—	2,020 ± 0,203	0,482 ± 0,028	0,424 ± 0,021	—
4004	—	—	—	—	—	0,228 ± 0,033	0,025 ± 0,004	0,022 ± 0,003	—
4019	0,009	0,028 ± 0,012	—	—	—	0,057 ± 0,010	0,021 ± 0,002	0,020 ± 0,002	0,067 ± 0,013
4023	—	—	—	—	—	1,060 ± 0,088	0,354 ± 0,021	0,314 ± 0,018	—
4030	—	—	—	—	—	0,760 ± 0,074	0,097 ± 0,007	0,087 ± 0,007	0,073 ± 0,024
4031	—	—	—	—	—	0,173 ± 0,013	0,035 ± 0,002	0,031 ± 0,002	0,187 ± 0,037
4043	—	0,024 ± 0,014	—	—	—	0,079 ± 0,009	0,026 ± 0,001	0,022 ± 0,002	0,521 ± 0,207
4054	—	0,036 ± 0,024	—	—	—	0,813 ± 0,080	0,348 ± 0,023	0,322 ± 0,021	0,177 ± 0,032
4071/1	—	—	—	—	—	0,372 ± 0,061	0,051 ± 0,006	0,042 ± 0,007	—
4071/2	—	—	—	—	—	0,489 ± 0,060	0,084 ± 0,007	0,077 ± 0,007	—
4078	—	—	—	—	—	0,176 ± 0,031	0,047 ± 0,004	0,042 ± 0,004	0,024 ± 0,015
4079	—	—	—	—	—	1,210 ± 0,123	0,096 ± 0,008	0,092 ± 0,009	—
4098	0,003	—	0,175 ± 0,106	—	—	4,290 ± 0,258	0,516 ± 0,025	0,458 ± 0,023	—
4129	0,004	—	—	—	—	2,250 ± 0,201	0,274 ± 0,016	0,242 ± 0,019	—
4157	0,003	—	—	—	—	11,60 ± 1,120	4,180 ± 0,232	3,690 ± 0,295	2,230 ± 0,114
4165	—	—	—	—	—	1,180 ± 0,720	0,352 ± 0,103	0,291 ± 0,102	—
4167	0,0008	—	—	—	—	1,660 ± 0,159	0,157 ± 0,012	0,101 ± 0,010	—
4192	0,002	—	—	—	—	1,250 ± 0,088	0,713 ± 0,042	0,648 ± 0,046	0,169 ± 0,026
4199	0,011	—	—	—	—	0,662 ± 0,041	0,074 ± 0,004	0,065 ± 0,003	—
4202	—	—	—	—	—	0,625 ± 0,071	0,047 ± 0,005	0,044 ± 0,005	—
5011/1	0,008 ± 0,001	—	—	0,008 ± 0,001	0,008 ± 0,001	0,098 ± 0,010	0,018 ± 0,001	0,016 ± 0,001	—
5011/2	0,017	0,036 ± 0,019	—	—	—	—	0,011 ± 0,007	0,007 ± 0,005	0,159 ± 0,028
5039/1	—	—	—	—	—	0,011 ± 0,003	0,006 ± 0,001	0,005 ± 0,0005	0,037 ± 0,012
5039/2	—	—	—	—	—	—	0,014 ± 0,002	0,012 ± 0,001	0,462 ± 0,070
5051	0,019 ± 0,003	0,046 ± 0,021	—	0,021 ± 0,003	0,046 ± 0,008	0,194 ± 0,015	0,043 ± 0,005	0,039 ± 0,003	4,250 ± 0,178
5059/1	0,016	0,011 ± 0,007	—	—	—	—	0,009 ± 0,001	0,007 ± 0,001	0,108 ± 0,026

94 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]								
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Uran-234	Thorium-230	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
5059/2	0,057	—	—	—	—	0,172 ± 0,017	0,085 ± 0,006	0,071 ± 0,006	0,503 ± 0,196
5072	—	0,147 ± 0,067	0,165 ± 0,061	—	—	—	0,015 ± 0,005	0,017 ± 0,002	0,633 ± 0,300
5077	0,007 ± 0,001	—	—	0,007 ± 0,001	0,011 ± 0,002	0,022 ± 0,008	0,008 ± 0,001	0,007 ± 0,001	0,147 ± 0,045
5090	0,010	—	—	—	—	1,030 ± 0,091	0,076 ± 0,006	0,069 ± 0,006	0,100 ± 0,056
5098	0,004 ± 0,001	—	—	0,004 ± 0,001	0,015 ± 0,012	0,015 ± 0,005	0,008 ± 0,001	0,007 ± 0,001	0,031 ± 0,007
5100	0,004	—	—	—	—	0,078 ± 0,008	0,019 ± 0,001	0,015 ± 0,001	0,122 ± 0,095
5153/1	—	0,031 ± 0,026	—	—	—	0,250 ± 0,031	0,048 ± 0,004	0,042 ± 0,004	—
5153/2	—	—	—	—	—	0,308 ± 0,039	0,069 ± 0,006	0,063 ± 0,006	—
5156	—	—	—	—	—	0,232 ± 0,032	0,034 ± 0,003	0,030 ± 0,003	—
5191	—	0,065 ± 0,018	—	—	—	0,534 ± 0,025	0,369 ± 0,011	0,401 ± 0,012	0,095 ± 0,014
5232	—	0,058 ± 0,013	—	—	—	0,227 ± 0,040	0,223 ± 0,009	0,218 ± 0,007	0,065 ± 0,007
5243	0,013 ± 0,002	0,019 ± 0,010	—	0,014 ± 0,002	0,024 ± 0,002	0,029 ± 0,007	0,013 ± 0,001	0,011 ± 0,001	0,120 ± 0,015
5248	—	—	—	—	—	2,340 ± 0,207	1,310 ± 0,086	1,210 ± 0,077	0,878 ± 0,064
5263	—	0,019 ± 0,006	—	—	—	0,081 ± 0,007	0,080 ± 0,003	0,086 ± 0,003	0,014 ± 0,004
5264	—	—	—	—	—	0,073 ± 0,015	0,037 ± 0,003	0,032 ± 0,002	—
5266	—	—	—	—	—	0,291 ± 0,032	0,061 ± 0,004	0,055 ± 0,004	—
5270	0,517	0,222 ± 0,126	0,618 ± 0,194	—	—	1,090 ± 0,191	0,164 ± 0,011	0,142 ± 0,010	—
5278	—	0,010 ± 0,007	—	—	—	0,073 ± 0,007	0,033 ± 0,002	0,029 ± 0,002	—
5303	0,021 ± 0,003	0,020 ± 0,011	0,045 ± 0,023	0,033 ± 0,003	0,013 ± 0,002	0,009 ± 0,011	0,010 ± 0,001	0,008 ± 0,001	0,058 ± 0,044
5323	0,004	0,004 ± 0,004	—	—	—	0,012 ± 0,003	0,007 ± 0,001	0,006 ± 0,0005	0,023 ± 0,013
5328	—	—	—	—	—	0,041 ± 0,006	0,024 ± 0,001	0,026 ± 0,002	0,065
5332/1	0,148 ± 0,024	0,151 ± 0,057	0,203 ± 0,069	0,155 ± 0,017	0,032 ± 0,006	0,315 ± 0,076	0,032 ± 0,003	0,026 ± 0,003	1,920 ± 0,143
5332/2	0,106 ± 0,017	0,098 ± 0,043	0,106 ± 0,088	0,113 ± 0,012	0,030 ± 0,006	0,266 ± 0,084	0,038 ± 0,003	0,030 ± 0,003	1,740 ± 0,139
5332/3	0,152 ± 0,024	0,159 ± 0,064	0,237 ± 0,072	0,164 ± 0,018	0,043 ± 0,007	0,343 ± 0,074	0,044 ± 0,003	0,036 ± 0,003	2,240 ± 0,322
5332/4	0,028 ± 0,005	0,028 ± 0,021	—	0,025 ± 0,004	0,009 ± 0,001	—	0,004 ± 0,002	0,002 ± 0,001	—
5332/5	0,044 ± 0,008	0,051 ± 0,019	—	0,043 ± 0,006	0,013 ± 0,003	0,056 ± 0,017	0,011 ± 0,006	0,006 ± 0,004	0,062 ± 0,010
5332/6	0,046 ± 0,009	0,087 ± 0,032	—	0,045 ± 0,007	0,023 ± 0,004	0,095 ± 0,027	—	—	0,047 ± 0,019
5334	2,826	1,730 ± 0,605	1,880 ± 0,275	—	—	2,830 ± 0,493	0,321 ± 0,026	0,269 ± 0,016	3,930 ± 0,343
5336	—	—	—	—	—	0,096 ± 0,014	0,014 ± 0,003	0,013 ± 0,001	1,590 ± 0,401
5340	—	—	—	—	—	0,306 ± 0,019	0,045 ± 0,002	0,038 ± 0,002	0,069 ± 0,023
5344/1	—	0,012 ± 0,006	—	—	—	0,101 ± 0,010	0,033 ± 0,002	0,029 ± 0,002	0,064 ± 0,008
5344/2	—	—	—	—	—	0,093 ± 0,018	0,025 ± 0,003	0,022 ± 0,002	0,241 ± 0,088
5344/3	—	—	—	—	—	0,371 ± 0,027	0,107 ± 0,006	0,096 ± 0,005	—
5346	—	—	—	—	—	0,010 ± 0,003	0,004 ± 0,0003	0,003 ± 0,0004	0,027 ± 0,021
5348	—	0,007 ± 0,002	—	—	—	0,020 ± 0,004	0,006 ± 0,001	0,005 ± 0,001	0,041 ± 0,004
5351	0,055	0,049 ± 0,024	—	—	—	—	0,009 ± 0,002	0,007 ± 0,002	0,299 ± 0,050
5353	—	0,073 ± 0,036	—	—	—	0,137 ± 0,022	0,014 ± 0,002	0,011 ± 0,002	—
5354	0,084	—	—	—	—	—	0,008 ± 0,002	0,004 ± 0,001	0,389 ± 0,054
5356/1	0,005	—	—	—	—	0,021 ± 0,011	0,008 ± 0,001	0,005 ± 0,001	0,081 ± 0,060
5356/2	0,064	0,042 ± 0,030	—	—	—	4,630 ± 0,396	0,445 ± 0,030	0,410 ± 0,027	0,343 ± 0,040
5357	—	0,019 ± 0,015	—	—	—	0,031 ± 0,011	0,010 ± 0,002	0,008 ± 0,001	0,107 ± 0,051
5358	—	0,180 ± 0,088	0,304 ± 0,178	—	—	0,837 ± 0,094	0,050 ± 0,007	0,036 ± 0,005	—
5360/1	—	0,011 ± 0,010	—	—	—	0,059 ± 0,007	0,015 ± 0,001	0,012 ± 0,001	0,397 ± 0,078
5360/2	—	—	—	—	—	0,593 ± 0,062	0,092 ± 0,006	0,079 ± 0,005	—
5361	—	0,026 ± 0,014	—	—	—	0,041 ± 0,013	0,012 ± 0,002	0,010 ± 0,001	—
5363	—	—	—	—	—	0,045 ± 0,005	0,016 ± 0,001	0,013 ± 0,001	0,214 ± 0,033
5364	0,167	0,102 ± 0,044	0,169 ± 0,042	—	—	0,093 ± 0,045	0,015 ± 0,002	0,014 ± 0,002	—
5366/1	—	0,017 ± 0,010	—	—	—	0,165 ± 0,012	0,024 ± 0,002	0,021 ± 0,001	0,201 ± 0,034
5366/2	—	—	—	—	—	0,033 ± 0,010	0,008 ± 0,001	0,061 ± 0,001	0,097 ± 0,050
5368	—	0,030 ± 0,020	—	—	—	—	0,011 ± 0,002	0,007 ± 0,002	0,566 ± 0,066
5374	—	0,058 ± 0,036	—	—	—	0,393 ± 0,038	0,051 ± 0,004	0,033 ± 0,003	1,410 ± 0,435

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]								
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Uran-234	Thorium-230	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
5378	0,123	0,042 ± 0,019	—	—	—	1,050 ± 0,072	0,186 ± 0,009	0,160 ± 0,008	0,459 ± 0,058
5395	—	—	—	—	—	0,025 ± 0,010	0,008 ± 0,002	0,008 ± 0,001	0,101 ± 0,047
5405	0,015 ± 0,002	—	—	0,023 ± 0,001	—	0,089 ± 0,015	0,052 ± 0,003	0,045 ± 0,003	0,220 ± 0,037
5407	0,422 ± 0,056	0,423 ± 0,156	0,505 ± 0,069	0,399 ± 0,041	0,034 ± 0,009	0,546 ± 0,129	0,151 ± 0,011	0,125 ± 0,010	0,678 ± 0,300
5408	0,043 ± 0,006	0,025 ± 0,024	—	0,042 ± 0,003	—	0,283 ± 0,034	0,220 ± 0,013	0,184 ± 0,009	—
5408	0,339	0,244 ± 0,097	0,285 ± 0,081,	—	—	0,212 ± 0,076	0,046 ± 0,003	0,038 ± 0,003	1,530 ± 0,343
5410/1	4,450 ± 0,706	4,260 ± 1,460	5,590 ± 0,555	4,130 ± 0,463	0,233 ± 0,087	2,310 ± 0,992	0,227 ± 0,029	0,183 ± 0,016	4,740 ± 0,202
5410/2	4,720 ± 0,721	4,430 ± 1,520	5,270 ± 0,637	4,160 ± 0,427	0,202 ± 0,064	3,670 ± 0,833	0,582 ± 0,077	0,483 ± 0,043	5,320 ± 0,223
5410/3	0,094	0,088 ± 0,035	0,119 ± 0,030	—	—	0,179 ± 0,060	0,076 ± 0,004	0,065 ± 0,005	0,125 ± 0,079
5413	0,187	0,137 ± 0,074	0,193 ± 0,067	—	—	1,340 ± 0,253	0,153 ± 0,016	0,132 ± 0,007	0,472 ± 0,122
5414/1b	0,010 ± 0,001	—	—	0,014 ± 0,001	0,019 ± 0,002	0,129 ± 0,017	0,100 ± 0,006	0,091 ± 0,005	0,193 ± 0,043
5414/2b	—	—	—	—	—	0,008 ± 0,002	0,004 ± 0,0003	0,005 ± 0,0004	—
5414/1a	—	—	—	—	—	0,017 ± 0,001	0,011 ± 0,001	0,011 ± 0,001	0,170 ± 0,011
5416	—	—	—	—	—	0,974 ± 0,108	0,109 ± 0,008	0,099 ± 0,008	—
5425/1	3,065	3,330 ± 1,200	3,750 ± 1,410	—	—	2,590 ± 1,070	0,441 ± 0,047	0,333 ± 0,043	7,600 ± 0,928
5425/2	0,003	—	—	—	—	0,047 ± 0,014	0,018 ± 0,002	0,016 ± 0,001	—
6013	0,015	—	—	—	—	1,980 ± 0,196	1,730 ± 0,085	1,450 ± 0,072	—
7002	0,004	—	—	—	—	4,740 ± 0,403	1,600 ± 0,080	1,450 ± 0,071	—
7014	0,030 ± 0,005	0,026 ± 0,014	—	0,025 ± 0,003	0,004 ± 0,001	1,260 ± 0,094	0,096 ± 0,006	0,083 ± 0,005	0,040 ± 0,012
7017	—	—	—	—	—	1,540 ± 0,060	1,290 ± 0,040	1,230 ± 0,050	0,099 ± 0,020
7017	—	—	—	—	—	1,120 ± 0,060	0,870 ± 0,040	0,740 ± 0,070	0,063 ± 0,015
7024	—	—	—	—	—	0,086 ± 0,016	0,026 ± 0,002	0,023 ± 0,002	—
7027	0,019	—	—	—	—	2,420 ± 0,227	0,543 ± 0,033	0,480 ± 0,038	0,264 ± 0,042
7042	—	—	—	—	—	1,660 ± 0,170	0,206 ± 0,012	0,182 ± 0,011	0,223 ± 0,202
7043	—	—	—	—	—	1,040 ± 0,116	0,141 ± 0,009	0,120 ± 0,009	—
7048/1	—	—	—	—	—	0,909 ± 0,086	0,091 ± 0,009	0,075 ± 0,008	—
7048/2	—	—	—	—	—	0,973 ± 0,090	0,220 ± 0,013	0,181 ± 0,011	—
7053	0,004	—	—	—	—	2,090 ± 0,179	0,181 ± 0,011	0,158 ± 0,011	—
7057	—	—	—	—	—	0,666 ± 0,067	0,169 ± 0,010	0,153 ± 0,009	—
7059	—	—	—	—	—	1,150 ± 0,109	0,125 ± 0,011	0,100 ± 0,009	0,112 ± 0,025
7065	—	—	—	—	—	1,470 ± 0,131	0,143 ± 0,009	0,124 ± 0,008	0,243 ± 0,104
7067	0,285	0,067 ± 0,058	—	—	—	0,617 ± 0,133	0,150 ± 0,009	0,118 ± 0,008	—
7068	—	—	—	—	—	1,120 ± 0,121	0,252 ± 0,014	0,219 ± 0,012	—
7070/1	0,006	—	—	—	—	3,140 ± 0,291	0,696 ± 0,041	0,600 ± 0,048	0,156 ± 0,036
7070/2	0,024	0,049 ± 0,052	—	—	—	1,880 ± 0,147	0,517 ± 0,031	0,469 ± 0,026	0,141 ± 0,113
7070/3	0,008	—	—	—	—	1,270 ± 0,134	0,161 ± 0,011	0,140 ± 0,013	0,078 ± 0,022
7074	—	—	—	—	—	0,576 ± 0,064	0,065 ± 0,005	0,054 ± 0,005	0,073 ± 0,020
7081	0,354	—	—	—	—	3,360 ± 0,380	0,223 ± 0,013	0,175 ± 0,012	0,486 ± 0,289
7106	—	—	—	—	—	—	0,279 ± 0,215	0,560 ± 0,253	—
7108	—	—	—	—	—	0,446 ± 0,091	0,027 ± 0,008	0,020 ± 0,009	—
7110	—	—	—	—	—	—	—	2,030 ± 0,889	—
7111	—	—	—	—	—	0,884 ± 0,097	0,281 ± 0,017	0,254 ± 0,018	—
7136	—	—	—	—	—	0,070 ± 0,007	0,015 ± 0,001	0,013 ± 0,001	—
7142	—	—	—	—	—	1,030 ± 0,110	0,111 ± 0,009	0,087 ± 0,008	—
7149	—	—	—	—	—	1,020 ± 0,087	0,227 ± 0,013	0,200 ± 0,011	—
7150	—	—	—	—	—	0,401 ± 0,034	0,051 ± 0,004	0,043 ± 0,004	0,283 ± 0,058
7152	—	—	—	—	—	1,460 ± 0,117	0,513 ± 0,028	0,444 ± 0,024	0,671 ± 0,297
7155	—	—	—	—	—	1,100 ± 0,107	0,496 ± 0,028	0,457 ± 0,027	0,321 ± 0,138
7158	—	—	—	—	—	0,926 ± 0,089	0,220 ± 0,015	0,200 ± 0,012	—
7160	0,002	—	—	—	—	2,170 ± 0,179	0,426 ± 0,023	0,374 ± 0,020	—
7162	—	—	—	—	—	1,070 ± 0,120	0,092 ± 0,008	0,087 ± 0,009	—

96 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]								
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Uran-234	Thorium-230	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
7164	—	—	—	—	—	3,870 ± 0,180	3,320 ± 0,120	3,280 ± 0,130	—
7179	—	—	—	—	—	0,288 ± 0,032	0,037 ± 0,003	0,032 ± 0,002	—
7186	0,071 ± 0,012	0,069 ± 0,057	—	0,085 ± 0,010	0,006 ± 0,002	1,680 ± 0,151	0,137 ± 0,011	0,126 ± 0,011	—
7192/1	—	—	—	—	—	1,530 ± 0,136	0,095 ± 0,008	0,075 ± 0,007	0,220 ± 0,098
7192/2	—	—	—	—	—	0,887 ± 0,082	0,085 ± 0,005	0,072 ± 0,004	—
7198	0,022 ± 0,004	—	—	0,023 ± 0,002	0,007 ± 0,001	0,831 ± 0,057	0,081 ± 0,005	0,073 ± 0,004	—
7209/1	—	—	—	—	—	0,219 ± 0,049	0,044 ± 0,006	0,038 ± 0,007	2,480 ± 0,246
7209/2	—	—	—	—	—	—	0,038 ± 0,010	0,041 ± 0,010	0,577 ± 0,182
7211	—	—	—	—	—	0,391 ± 0,059	0,174 ± 0,012	0,164 ± 0,012	—
7217	—	—	—	—	—	0,442 ± 0,055	0,147 ± 0,011	0,138 ± 0,009	—
7224	—	—	—	—	—	5,720 ± 0,479	0,440 ± 0,027	0,380 ± 0,025	—
7230	0,003	—	—	—	—	1,520 ± 0,136	0,111 ± 0,008	0,097 ± 0,007	—
7232	—	—	—	—	—	0,079 ± 0,017	0,027 ± 0,002	0,024 ± 0,002	—
7233	—	—	—	—	—	1,070 ± 0,105	0,102 ± 0,008	0,086 ± 0,007	—
7237	—	—	—	—	—	0,390 ± 0,040	0,155 ± 0,010	0,137 ± 0,008	—
7239/1	—	—	—	—	—	0,700 ± 0,085	0,059 ± 0,007	0,057 ± 0,006	—
7239/2	—	—	—	—	—	0,300 ± 0,027	0,035 ± 0,002	0,032 ± 0,002	—
7246	—	0,085 ± 0,061	—	—	—	0,516 ± 0,055	0,144 ± 0,010	0,129 ± 0,008	—
7258	—	—	—	—	—	0,825 ± 0,087	0,486 ± 0,026	0,412 ± 0,022	—
7277	—	—	—	—	—	0,178 ± 0,042	0,049 ± 0,006	0,041 ± 0,006	—
7288/1	—	—	—	—	—	1,670 ± 0,149	0,315 ± 0,018	0,273 ± 0,016	—
7288/2	—	—	—	—	—	1,120 ± 0,127	0,211 ± 0,013	0,185 ± 0,012	—
7294	—	—	—	—	—	3,650 ± 0,404	0,389 ± 0,038	0,348 ± 0,037	—
7299	—	—	—	—	—	1,500 ± 0,155	0,664 ± 0,033	0,588 ± 0,029	—
7308	0,001	—	—	—	—	0,905 ± 0,078	0,740 ± 0,038	0,649 ± 0,032	—
7310	0,002	—	—	—	—	1,540 ± 0,162	1,300 ± 0,081	1,100 ± 0,082	0,205 ± 0,052
7311	0,008	—	—	—	—	1,070 ± 0,096	0,852 ± 0,060	0,742 ± 0,051	—
7336	0,001	—	—	—	—	2,180 ± 0,257	1,250 ± 0,064	1,040 ± 0,053	—
7338	0,085 ± 0,014	0,043 ± 0,024	—	0,096 ± 0,011	0,011 ± 0,002	0,856 ± 0,085	0,310 ± 0,017	0,279 ± 0,019	0,273 ± 0,033
7373	0,015	0,021 ± 0,012	0,029 ± 0,017	—	—	0,179 ± 0,014	0,020 ± 0,001	0,017 ± 0,001	—
8104	0,064	—	—	—	—	0,777 ± 0,070	0,130 ± 0,008	0,107 ± 0,007	—
8113	0,010	—	—	—	—	3,880 ± 0,295	0,751 ± 0,038	0,641 ± 0,032	—
8217	0,030	0,061 ± 0,016	—	—	—	0,232 ± 0,040	0,140 ± 0,009	0,120 ± 0,010	0,018 ± 0,013
8232	0,018	—	—	—	—	0,456 ± 0,045	0,124 ± 0,010	0,108 ± 0,009	—
8263	—	0,027 ± 0,014	0,029 ± 0,020	—	—	0,175 ± 0,013	0,045 ± 0,002	0,040 ± 0,002	—
9127	—	0,047 ± 0,043	—	—	—	0,298 ± 0,053	0,207 ± 0,013	0,186 ± 0,014	—

Die spezifischen Aktivitäten von Uran-238 ohne Fehlerangabe wurden aus den Konzentrationsergebnissen der ICP-MS Messung von Uran bestimmt.

B.1.2 Thorium-Zerfallsreihe

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]							
	Thorium-232	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
15	—	0,075 ± 0,014	—	0,038 ± 0,006	—	0,013 ± 0,004	0,160 ± 0,037	0,025 ± 0,013
1006	0,0013	0,529 ± 0,048	0,128 ± 0,039	0,114 ± 0,011	0,124 ± 0,031	0,035 ± 0,003	0,344 ± 0,023	0,0002
1018/1	0,0013	0,007 ± 0,001	—	0,005 ± 0,0005	0,007 ± 0,002	0,002 ± 0,0002	0,019 ± 0,002	0,0004
1018/2	0,0002	0,014 ± 0,002	0,008 ± 0,008	0,009 ± 0,001	0,009 ± 0,004	—	0,018 ± 0,004	0,0008
1040	0,009	0,301 ± 0,031	0,307 ± 0,058	0,292 ± 0,028	0,273 ± 0,010	0,090 ± 0,006	0,310 ± 0,018	0,0005
1072	0,0012	0,028 ± 0,004	0,041 ± 0,020	0,018 ± 0,002	0,021 ± 0,009	0,006 ± 0,001	0,024 ± 0,007	0,0011
1099	0,003	0,008 ± 0,001	0,010 ± 0,005	0,009 ± 0,001	0,010 ± 0,002	0,003 ± 0,0003	0,030 ± 0,003	0,0001
1107	—	0,013 ± 0,002	0,015 ± 0,005	0,013 ± 0,001	0,014 ± 0,003	0,004 ± 0,0004	0,898 ± 0,085	—
2067	—	1,810 ± 0,040	—	0,850 ± 0,030	1,010 ± 0,060	0,284 ± 0,011	0,410 ± 0,040	—
2076/1	0,0016	0,634 ± 0,071	0,328 ± 0,051	0,297 ± 0,033	0,330 ± 0,022	0,088 ± 0,006	0,100 ± 0,008	0,0002
2076/2	0,003	0,227 ± 0,015	0,099 ± 0,036	0,111 ± 0,011	0,133 ± 0,013	0,036 ± 0,002	0,333 ± 0,021	0,002
2078	—	1,518 ± 0,033	—	1,104 ± 0,045	1,243 ± 0,069	0,368 ± 0,016	0,133 ± 0,026	—
2079	0,011 ± 0,002	0,093 ± 0,008	0,095 ± 0,029	0,086 ± 0,010	0,083 ± 0,011	0,027 ± 0,002	0,270 ± 0,016	0,0003 ± 0,0001
2094	0,001	0,140 ± 0,019	0,124 ± 0,045	0,059 ± 0,011	0,039 ± 0,023	0,017 ± 0,003	0,090 ± 0,022	0,0001
2096/1	0,010	0,037 ± 0,004	0,033 ± 0,014	0,041 ± 0,004	0,040 ± 0,005	0,012 ± 0,001	0,950 ± 0,052	0,0003
2096/2	0,010	0,021 ± 0,003	0,031 ± 0,012	0,025 ± 0,002	0,028 ± 0,007	0,008 ± 0,001	0,952 ± 0,049	0,0002
2115	—	0,527 ± 0,013	—	0,161 ± 0,007	0,195 ± 0,025	0,054 ± 0,003	0,053 ± 0,017	—
2119/1	0,002	2,990 ± 0,259	2,040 ± 0,254	1,680 ± 0,155	1,630 ± 0,139	0,541 ± 0,030	—	0,0001
2119/2	0,0005	1,310 ± 0,118	0,684 ± 0,093	0,459 ± 0,042	0,424 ± 0,073	0,140 ± 0,009	—	0,0013
2127	0,0004	1,050 ± 0,079	0,462 ± 0,101	0,391 ± 0,050	0,387 ± 0,056	0,133 ± 0,008	0,060 ± 0,030	0,0007
2135	0,001	0,454 ± 0,042	0,598 ± 0,095	0,486 ± 0,045	0,487 ± 0,045	0,156 ± 0,009	0,058 ± 0,022	0,0005
2159	—	0,556 ± 0,050	0,252 ± 0,059	0,173 ± 0,028	0,170 ± 0,031	0,057 ± 0,003	0,039 ± 0,011	—
2172/1	—	0,028 ± 0,003	0,024 ± 0,013	0,024 ± 0,002	0,030 ± 0,007	0,008 ± 0,001	0,030 ± 0,007	—
2172/2	0,015	0,061 ± 0,006	0,042 ± 0,010	0,042 ± 0,003	0,050 ± 0,006	0,014 ± 0,001	0,441 ± 0,030	0,046 ± 0,003
2208	0,014 ± 0,005	0,291 ± 0,019	0,166 ± 0,065	0,159 ± 0,015	0,188 ± 0,019	0,052 ± 0,003	0,089 ± 0,013	0,015 ± 0,004
2252/1	—	0,080 ± 0,002	—	0,086 ± 0,003	0,103 ± 0,006	0,030 ± 0,001	0,328 ± 0,011	—
2252/2	—	0,133 ± 0,012	0,172 ± 0,047	0,133 ± 0,019	0,125 ± 0,013	0,038 ± 0,002	0,353 ± 0,026	—
3005/1	—	3,330 ± 0,060	—	1,820 ± 0,060	2,110 ± 0,090	0,710 ± 0,030	0,435 ± 0,040	—
3005/2	0,012 ± 0,005	3,060 ± 0,297	1,700 ± 0,685	1,420 ± 0,084	1,580 ± 0,109	0,435 ± 0,031	—	0,012 ± 0,004
3007	—	0,094 ± 0,008	0,042 ± 0,014	0,031 ± 0,004	0,032 ± 0,010	0,009 ± 0,001	0,026 ± 0,005	—
3008	—	0,012 ± 0,001	0,014 ± 0,004	0,013 ± 0,001	0,012 ± 0,002	0,004 ± 0,0004	0,027 ± 0,003	—
3008/1	—	0,069 ± 0,015	0,054 ± 0,039	0,032 ± 0,005	0,043 ± 0,015	0,006 ± 0,002	—	—
3008/2	—	0,068 ± 0,015	0,081 ± 0,035	0,039 ± 0,007	0,039 ± 0,036	0,010 ± 0,003	—	—
3016	0,001	1,990 ± 0,195	0,439 ± 0,102	0,280 ± 0,033	0,310 ± 0,080	0,086 ± 0,008	—	0,001
3017	—	0,012 ± 0,002	—	0,068 ± 0,004	0,060 ± 0,010	0,020 ± 0,002	—	—
3022	0,003	8,640 ± 0,751	6,400 ± 2,470	6,320 ± 0,583	5,880 ± 0,486	1,970 ± 0,106	—	0,0004
3028	0,001	9,250 ± 0,775	4,990 ± 1,830	4,610 ± 0,638	4,800 ± 0,334	1,380 ± 0,098	—	0,011
3029	0,012	5,380 ± 0,546	6,530 ± 0,668	5,930 ± 0,513	5,180 ± 0,361	1,740 ± 0,138	0,820 ± 0,084	0,0008
3032	0,002	0,754 ± 0,064	0,838 ± 0,158	0,632 ± 0,093	0,545 ± 0,055	0,200 ± 0,013	0,021 ± 0,018	0,007
3033	—	1,150 ± 0,096	0,230 ± 0,072	0,181 ± 0,016	0,188 ± 0,043	0,059 ± 0,004	0,117 ± 0,021	—
3034/1	0,005	1,980 ± 0,182	1,450 ± 0,144	0,963 ± 0,083	0,883 ± 0,081	0,290 ± 0,021	0,089 ± 0,017	0,016 ± 0,004
3034/2	0,006	0,806 ± 0,063	0,684 ± 0,064	0,537 ± 0,040	0,514 ± 0,042	0,172 ± 0,010	0,056 ± 0,017	0,012 ± 0,007
3040	—	0,856 ± 0,076	0,563 ± 0,052	0,467 ± 0,034	0,430 ± 0,033	0,144 ± 0,007	0,180 ± 0,020	—
3066	0,001	0,438 ± 0,040	0,162 ± 0,064	0,128 ± 0,021	0,145 ± 0,027	0,039 ± 0,003	0,028 ± 0,013	0,002
3067	—	0,454 ± 0,041	0,208 ± 0,025	0,161 ± 0,012	0,149 ± 0,017	0,050 ± 0,003	0,067 ± 0,007	—
3079/1	0,00195	0,251 ± 0,023	0,234 ± 0,026	0,182 ± 0,013	0,196 ± 0,012	0,056 ± 0,003	0,069 ± 0,006	0,0004
3079/2	0,001	0,195 ± 0,016	0,207 ± 0,019	0,167 ± 0,009	0,171 ± 0,011	0,053 ± 0,003	0,059 ± 0,005	0,0005
3081/1	0,023 ± 0,004	0,058 ± 0,005	0,060 ± 0,010	0,055 ± 0,003	0,057 ± 0,006	0,018 ± 0,001	0,345 ± 0,021	0,006 ± 0,005
3081/2	0,028 ± 0,020	0,028 ± 0,003	0,017 ± 0,006	0,006 ± 0,001	0,010 ± 0,003	0,002 ± 0,0003	0,008 ± 0,002	0,001 ± 0,001
3089	0,000256	1,890 ± 0,157	1,090 ± 0,186	0,792 ± 0,116	0,888 ± 0,077	0,247 ± 0,016	0,030 ± 0,015	0,0004

98 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]							
	Thorium-232	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
3099	0,019	0,181 ± 0,014	0,104 ± 0,019	0,090 ± 0,007	0,085 ± 0,009	0,028 ± 0,002	1,850 ± 0,091	0,0002
3102	0,009	0,013 ± 0,002	—	0,008 ± 0,001	0,010 ± 0,004	0,002 ± 0,001	0,014 ± 0,004	0,004 ± 0,002
3103	0,001	0,024 ± 0,002	0,018 ± 0,005	0,017 ± 0,001	0,016 ± 0,003	0,005 ± 0,0004	0,031 ± 0,003	0,002 ± 0,001
3134	0,00698	0,224 ± 0,019	0,088 ± 0,015	0,078 ± 0,004	0,075 ± 0,010	0,024 ± 0,001	0,067 ± 0,007	0,0004
3150	0,007	0,014 ± 0,002	0,017 ± 0,007	0,016 ± 0,001	0,016 ± 0,004	0,005 ± 0,0004	0,437 ± 0,039	0,0002
3152	0,008	0,072 ± 0,006	0,061 ± 0,012	0,054 ± 0,004	0,054 ± 0,006	0,016 ± 0,001	0,359 ± 0,032	0,0001
3154/1	—	3,000 ± 0,220	1,560 ± 0,239	1,340 ± 0,171	1,320 ± 0,121	0,444 ± 0,021	0,212 ± 0,050	—
3154/2	0,025	3,120 ± 0,268	1,790 ± 0,299	1,410 ± 0,203	1,410 ± 0,122	0,450 ± 0,021	0,230 ± 0,038	0,003
3156	0,016	14,20 ± 1,300	5,360 ± 0,551	4,960 ± 0,466	4,520 ± 0,444	1,510 ± 0,082	0,271 ± 0,009	0,003
3158	—	0,020 ± 0,002	—	0,016 ± 0,001	—	—	—	—
3163	—	0,102 ± 0,010	—	0,058 ± 0,005	0,060 ± 0,014	0,019 ± 0,002	0,635 ± 0,044	—
3168	—	—	—	0,505 ± 0,069	0,538 ± 0,305	0,150 ± 0,032	1,548 ± 0,494	0,089 ± 0,024
3176	—	0,226 ± 0,020	0,241 ± 0,026	0,180 ± 0,013	0,168 ± 0,012	0,054 ± 0,003	0,079 ± 0,005	—
3182	0,001	0,163 ± 0,014	0,179 ± 0,017	0,134 ± 0,007	0,125 ± 0,010	0,041 ± 0,002	0,431 ± 0,026	0,002
3183	0,013 ± 0,008	3,950 ± 0,425	5,120 ± 2,050	3,020 ± 0,322	2,910 ± 0,245	0,851 ± 0,047	—	0,029 ± 0,007
3184	0,014	3,340 ± 0,322	1,060 ± 0,256	0,789 ± 0,082	0,783 ± 0,125	0,243 ± 0,014	—	0,003
3192	—	1,120 ± 0,177	0,285 ± 0,178	0,299 ± 0,056	0,274 ± 0,116	0,087 ± 0,015	0,751 ± 0,094	—
3195	—	2,360 ± 0,040	—	0,940 ± 0,030	1,170 ± 0,060	0,320 ± 0,012	0,240 ± 0,030	—
3196/1	0,000787	3,330 ± 0,325	1,900 ± 0,219	1,750 ± 0,104	1,660 ± 0,117	0,538 ± 0,039	—	0,003
3196/2	0,00052	1,810 ± 0,237	1,050 ± 0,171	1,010 ± 0,116	0,898 ± 0,074	0,288 ± 0,022	0,053 ± 0,037	0,004
3196/3	0,005	4,410 ± 0,435	2,140 ± 0,327	1,970 ± 0,144	1,920 ± 0,142	0,626 ± 0,031	0,150 ± 0,085	0,002
3196/4	0,00198	0,049 ± 0,005	0,072 ± 0,025	0,051 ± 0,008	0,047 ± 0,011	0,015 ± 0,001	0,019 ± 0,007	0,001
3196/5	0,005	1,610 ± 0,159	1,270 ± 0,133	1,170 ± 0,085	1,100 ± 0,057	0,354 ± 0,017	—	0,005
3196/6	0,001	0,023 ± 0,003	0,012 ± 0,010	0,016 ± 0,001	0,019 ± 0,005	0,006 ± 0,001	0,017 ± 0,004	0,0004
3196/7	0,002	0,825 ± 0,072	0,706 ± 0,119	0,578 ± 0,054	0,541 ± 0,038	0,178 ± 0,010	0,104 ± 0,017	0,0007
3196/8	0,001	0,722 ± 0,067	0,344 ± 0,062	0,239 ± 0,021	0,220 ± 0,023	0,074 ± 0,006	0,112 ± 0,015	0,002
3208	—	0,898 ± 0,074	0,695 ± 0,060	0,833 ± 0,044	0,859 ± 0,047	0,260 ± 0,012	1,190 ± 0,073	0,011 ± 0,005
3238	—	0,026 ± 0,003	0,033 ± 0,008	0,024 ± 0,001	0,023 ± 0,004	0,008 ± 0,0005	1,090 ± 0,065	—
3240	0,0002	0,801 ± 0,082	0,308 ± 0,148	0,303 ± 0,037	0,386 ± 0,060	0,093 ± 0,009	—	0,007
3243	—	2,670 ± 0,285	0,525 ± 0,103	0,450 ± 0,049	0,417 ± 0,103	0,142 ± 0,009	—	—
3246	—	0,540 ± 0,133	—	0,224 ± 0,047	—	—	1,180 ± 0,435	—
3247	0,001	3,790 ± 0,458	1,330 ± 0,570	1,080 ± 0,120	0,898 ± 0,141	0,301 ± 0,026	—	0,003
3251	0,006	0,070 ± 0,007	0,062 ± 0,011	0,062 ± 0,005	0,061 ± 0,006	0,018 ± 0,002	0,151 ± 0,015	0,0003
3253	—	0,026 ± 0,003	0,023 ± 0,006	0,022 ± 0,003	0,020 ± 0,003	0,007 ± 0,0004	0,153 ± 0,011	0,003 ± 0,001
3260	0,002	1,590 ± 0,130	0,969 ± 0,091	1,100 ± 0,059	1,130 ± 0,072	0,332 ± 0,016	0,048 ± 0,014	0,003
3261/1	0,00597	3,990 ± 0,318	3,080 ± 0,452	2,530 ± 0,294	2,780 ± 0,141	0,785 ± 0,040	0,558 ± 0,044	0,0009
3261/2	0,002	0,025 ± 0,004	0,024 ± 0,019	0,032 ± 0,005	0,035 ± 0,008	0,010 ± 0,001	0,026 ± 0,007	0,005 ± 0,003
3267/1	0,017	1,660 ± 0,137	1,310 ± 0,251	1,210 ± 0,139	1,110 ± 0,093	0,385 ± 0,023	0,472 ± 0,027	0,001
3267/2	0,002	6,730 ± 0,629	4,370 ± 0,643	3,030 ± 0,372	2,600 ± 0,242	0,879 ± 0,045	—	0,0009
3274/1	0,002	2,530 ± 0,236	0,601 ± 0,173	0,551 ± 0,057	0,519 ± 0,087	0,172 ± 0,013	—	0,001
3274/2	0,007	3,800 ± 0,345	4,660 ± 0,552	3,720 ± 0,283	3,530 ± 0,127	1,170 ± 0,067	0,537 ± 0,083	0,002
3275	—	1,450 ± 0,179	1,430 ± 0,233	1,020 ± 0,130	0,884 ± 0,095	0,298 ± 0,022	0,330 ± 0,047	—
3276	—	2,600 ± 0,285	1,400 ± 0,259	1,220 ± 0,168	1,080 ± 0,125	0,379 ± 0,034	0,287 ± 0,038	—
3278	—	0,313 ± 0,008	—	0,205 ± 0,008	0,220 ± 0,020	0,067 ± 0,003	0,080 ± 0,010	—
3280	—	2,650 ± 0,208	2,850 ± 0,335	2,180 ± 0,242	1,950 ± 0,128	0,660 ± 0,031	0,136 ± 0,030	—
3281	0,004	13,30 ± 0,969	9,260 ± 1,240	8,360 ± 1,060	7,870 ± 0,522	2,700 ± 0,123	—	0,001
3282	—	0,336 ± 0,009	—	0,205 ± 0,013	0,197 ± 0,016	0,063 ± 0,004	0,057 ± 0,009	—
3285	—	0,250 ± 0,035	0,169 ± 0,050	0,124 ± 0,019	0,099 ± 0,033	0,035 ± 0,005	0,034 ± 0,016	—
3289	—	22,70 ± 2,410	15,50 ± 1,800	14,20 ± 1,510	12,60 ± 0,908	4,320 ± 0,226	—	—
3290	—	2,710 ± 0,511	1,330 ± 0,526	1,240 ± 0,118	0,938 ± 0,341	0,401 ± 0,058	—	—
3291	—	0,992 ± 0,107	0,276 ± 0,042	0,220 ± 0,016	0,204 ± 0,040	0,064 ± 0,004	0,027 ± 0,013	—

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]							
	Thorium-232	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
3293	—	0,006 ± 0,001	—	0,003 ± 0,0004	0,004 ± 0,002	0,001 ± 0,0002	0,011 ± 0,002	—
3304	—	1,770 ± 0,141	0,904 ± 0,122	0,666 ± 0,077	0,612 ± 0,066	0,206 ± 0,011	—	—
3306	—	0,462 ± 0,038	0,191 ± 0,025	0,138 ± 0,008	0,135 ± 0,020	0,043 ± 0,002	0,013 ± 0,005	—
3308	—	0,342 ± 0,051	0,428 ± 0,136	0,424 ± 0,069	0,377 ± 0,056	0,122 ± 0,021	0,260 ± 0,027	—
3309	—	0,020 ± 0,003	0,022 ± 0,011	0,024 ± 0,002	0,026 ± 0,008	0,007 ± 0,001	0,136 ± 0,011	0,006 ± 0,002
3311	0,004	9,130 ± 0,716	9,030 ± 1,680	7,880 ± 0,873	7,180 ± 0,436	2,490 ± 0,116	—	0,002
3322	0,0006	1,430 ± 0,127	1,260 ± 0,271	1,250 ± 0,203	1,170 ± 0,079	0,400 ± 0,019	—	0,0006
3325/1	0,006	1,230 ± 0,113	1,320 ± 0,151	1,120 ± 0,106	1,010 ± 0,072	0,341 ± 0,019	0,171 ± 0,021	0,0006
3325/2	—	0,983 ± 0,087	0,657 ± 0,131	0,530 ± 0,086	0,494 ± 0,045	0,163 ± 0,008	0,112 ± 0,015	0,010 ± 0,008
3337	—	1,080 ± 0,094	0,536 ± 0,143	0,350 ± 0,050	0,345 ± 0,048	0,109 ± 0,006	0,071 ± 0,022	—
3339	0,016 ± 0,006	1,930 ± 0,178	1,280 ± 0,170	1,270 ± 0,145	1,380 ± 0,071	0,405 ± 0,019	—	0,011 ± 0,005
3340	0,005	7,890 ± 0,696	4,290 ± 1,130	4,180 ± 0,676	4,060 ± 0,303	1,360 ± 0,062	0,080 ± 0,062	0,001
3345	0,005	9,040 ± 1,060	5,480 ± 0,573	4,510 ± 0,428	4,890 ± 0,290	1,350 ± 0,067	0,155 ± 0,012	0,015
3346	—	0,658 ± 0,054	0,545 ± 0,103	0,476 ± 0,025	0,460 ± 0,033	0,153 ± 0,007	0,110 ± 0,008	—
3352/1	0,002	6,790 ± 0,651	3,370 ± 0,438	3,480 ± 0,361	4,000 ± 0,246	1,110 ± 0,055	0,072 ± 0,008	0,0002
3352/2	0,0005	2,250 ± 0,191	0,738 ± 0,183	0,583 ± 0,063	0,588 ± 0,062	0,194 ± 0,013	—	0,002
3352/3	0,005	16,30 ± 1,490	14,30 ± 1,290	11,70 ± 1,010	12,10 ± 0,710	3,570 ± 0,253	—	0,0007
4001/1	0,002	6,400 ± 0,626	3,490 ± 0,341	2,780 ± 0,203	2,520 ± 0,229	0,861 ± 0,039	—	0,0003
4001/2	0,004	3,210 ± 0,265	3,410 ± 0,439	2,570 ± 0,219	2,450 ± 0,157	0,821 ± 0,044	0,089 ± 0,040	0,0004
4001/3	0,009	0,855 ± 0,074	1,000 ± 0,210	0,827 ± 0,119	0,710 ± 0,052	0,242 ± 0,012	0,214 ± 0,020	0,0003
4004	—	0,203 ± 0,019	0,110 ± 0,036	0,100 ± 0,015	0,110 ± 0,021	0,032 ± 0,003	0,033 ± 0,017	—
4019	0,015	0,028 ± 0,003	0,030 ± 0,010	0,030 ± 0,002	0,027 ± 0,005	0,010 ± 0,001	0,155 ± 0,010	0,0004
4023	—	0,506 ± 0,042	0,627 ± 0,101	0,562 ± 0,048	0,509 ± 0,036	0,174 ± 0,010	0,508 ± 0,038	—
4030	—	0,412 ± 0,036	0,220 ± 0,049	0,201 ± 0,022	0,190 ± 0,025	0,064 ± 0,004	0,193 ± 0,015	—
4031	—	0,025 ± 0,002	0,015 ± 0,007	0,020 ± 0,002	0,019 ± 0,003	0,006 ± 0,0004	0,170 ± 0,012	—
4043	—	0,031 ± 0,004	0,034 ± 0,009	0,029 ± 0,003	0,026 ± 0,004	0,009 ± 0,001	1,030 ± 0,098	—
4054	—	0,287 ± 0,026	0,291 ± 0,091	0,219 ± 0,024	0,221 ± 0,027	0,068 ± 0,005	0,119 ± 0,015	—
4071/1	—	1,440 ± 0,139	0,696 ± 0,114	0,530 ± 0,073	0,512 ± 0,071	0,164 ± 0,014	—	—
4071/2	—	1,310 ± 0,132	0,746 ± 0,091	0,659 ± 0,050	0,613 ± 0,063	0,205 ± 0,010	—	—
4078	—	0,294 ± 0,025	0,050 ± 0,027	0,040 ± 0,006	0,038 ± 0,021	—	0,032 ± 0,009	—
4079	—	1,690 ± 0,134	1,820 ± 0,223	1,270 ± 0,141	1,180 ± 0,091	0,386 ± 0,019	0,075 ± 0,029	—
4098	0,003003389	4,350 ± 0,354	3,460 ± 0,214	2,730 ± 0,144	2,530 ± 0,168	0,866 ± 0,040	—	0,0002
4129	0,000892899	2,450 ± 0,238	0,644 ± 0,119	0,453 ± 0,052	0,435 ± 0,093	0,139 ± 0,011	0,030 ± 0,022	0,0002
4157	0,003	0,437 ± 0,045	—	0,664 ± 0,091	0,586 ± 0,078	0,204 ± 0,017	—	0,0001
4165	—	2,730 ± 0,332	2,070 ± 1,270	1,920 ± 0,132	2,190 ± 0,749	0,561 ± 0,073	—	—
4167	0,000929	2,540 ± 0,228	0,428 ± 0,098	0,425 ± 0,060	0,617 ± 0,069	0,137 ± 0,011	—	0,00003
4192	0,005	0,691 ± 0,060	0,480 ± 0,135	0,438 ± 0,033	0,494 ± 0,047	0,142 ± 0,010	0,021 ± 0,015	0,0001
4199	0,005	0,198 ± 0,016	0,216 ± 0,020	0,160 ± 0,009	0,166 ± 0,011	0,050 ± 0,002	0,376 ± 0,023	0,0005
4202	—	0,968 ± 0,087	0,178 ± 0,050	0,145 ± 0,024	0,197 ± 0,040	0,048 ± 0,003	0,042 ± 0,024	—
5011/1	0,013 ± 0,002	0,050 ± 0,005	0,061 ± 0,012	0,046 ± 0,005	0,049 ± 0,005	0,014 ± 0,001	0,646 ± 0,042	0,0004 ± 0,0002
5011/2	0,007	—	—	0,023 ± 0,005	—	0,008 ± 0,006	0,050 ± 0,039	0,0008
5039/1	—	0,003 ± 0,001	—	0,003 ± 0,0003	0,003 ± 0,001	0,001 ± 0,0001	0,019 ± 0,002	—
5039/2	—	0,011 ± 0,002	—	0,008 ± 0,001	0,009 ± 0,004	0,003 ± 0,0004	0,035 ± 0,004	—
5051	0,023 ± 0,003	0,035 ± 0,004	0,046 ± 0,017	0,036 ± 0,003	0,038 ± 0,007	0,011 ± 0,001	0,186 ± 0,015	0,001 ± 0,001
5059/1	—	0,009 ± 0,001	0,009 ± 0,004	0,009 ± 0,001	0,009 ± 0,002	0,003 ± 0,0002	0,073 ± 0,005	0,001 ± 0,001
5059/2	—	0,046 ± 0,005	0,047 ± 0,019	0,039 ± 0,003	0,036 ± 0,005	0,011 ± 0,001	0,038 ± 0,005	0,003 ± 0,002
5072	—	0,005 ± 0,002	—	—	—	0,001 ± 0,001	0,024 ± 0,007	—
5077	0,002 ± 0,001	0,005 ± 0,001	—	0,003 ± 0,0005	0,003 ± 0,002	0,001 ± 0,0001	0,021 ± 0,002	0,0003 ± 0,0001
5090	0,0003	0,336 ± 0,026	0,070 ± 0,033	0,051 ± 0,007	0,052 ± 0,022	0,017 ± 0,002	0,015 ± 0,011	0,0005
5098	0,011	0,002 ± 0,001	—	0,002 ± 0,0003	—	0,001 ± 0,0002	0,019 ± 0,002	0,0002
5100	0,001	0,022 ± 0,002	—	0,005 ± 0,001	0,007 ± 0,003	0,002 ± 0,0003	0,012 ± 0,003	0,0002

100 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]							
	Thorium-232	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
5153/1	—	0,146 ± 0,014	0,025 ± 0,021	0,022 ± 0,003	0,018 ± 0,014	0,006 ± 0,001	0,031 ± 0,012	—
5153/2	—	0,174 ± 0,018	—	0,025 ± 0,003	0,021 ± 0,009	0,009 ± 0,002	0,032 ± 0,014	—
5156	—	0,065 ± 0,006	0,066 ± 0,015	0,051 ± 0,007	0,056 ± 0,012	0,017 ± 0,001	0,025 ± 0,008	—
5191	—	0,354 ± 0,009	—	0,062 ± 0,002	0,080 ± 0,013	0,021 ± 0,001	0,058 ± 0,011	—
5232	—	0,162 ± 0,003	—	0,107 ± 0,005	0,120 ± 0,008	0,036 ± 0,001	0,438 ± 0,016	—
5243	0,013 ± 0,002	0,012 ± 0,002	0,011 ± 0,007	0,012 ± 0,001	0,012 ± 0,004	0,004 ± 0,0004	0,203 ± 0,012	0,001 ± 0,0003
5248	—	0,533 ± 0,047	0,367 ± 0,298	0,485 ± 0,053	0,471 ± 0,048	0,157 ± 0,010	0,293 ± 0,031	—
5263	—	0,038 ± 0,001	—	0,033 ± 0,001	0,033 ± 0,004	0,011 ± 0,001	0,019 ± 0,004	—
5264	—	0,024 ± 0,003	0,013 ± 0,016	0,009 ± 0,002	0,010 ± 0,003	0,003 ± 0,001	0,021 ± 0,005	—
5266	—	0,153 ± 0,014	0,169 ± 0,030	0,112 ± 0,010	0,105 ± 0,015	0,035 ± 0,002	0,280 ± 0,022	—
5270	—	3,330 ± 0,345	2,430 ± 0,324	2,110 ± 0,265	1,850 ± 0,140	0,624 ± 0,028	—	0,024 ± 0,007
5278	—	0,020 ± 0,002	—	0,010 ± 0,001	0,010 ± 0,003	0,003 ± 0,0003	0,010 ± 0,003	—
5303	0,002 ± 0,001	0,009 ± 0,001	0,007 ± 0,005	0,007 ± 0,001	0,009 ± 0,003	0,002 ± 0,0003	0,008 ± 0,003	0,001 ± 0,0004
5323	0,008	0,001 ± 0,001	—	0,001 ± 0,0002	—	0,0003 ± 0,0001	0,004 ± 0,001	0,0002
5328	—	0,018 ± 0,001	—	—	—	—	0,045 ± 0,006	—
5332/1	0,015 ± 0,004	0,221 ± 0,018	0,060 ± 0,027	0,060 ± 0,007	0,086 ± 0,015	0,020 ± 0,002	0,008 ± 0,003	0,008 ± 0,003
5332/2	0,009 ± 0,003	0,156 ± 0,016	0,096 ± 0,028	0,091 ± 0,011	0,095 ± 0,017	0,029 ± 0,002	0,046 ± 0,010	0,006 ± 0,002
5332/3	0,014 ± 0,004	0,225 ± 0,024	0,053 ± 0,025	0,064 ± 0,008	0,084 ± 0,015	0,020 ± 0,001	0,025 ± 0,005	0,008 ± 0,003
5332/4	0,003 ± 0,001	—	—	0,004 ± 0,001	—	0,002 ± 0,001	0,010 ± 0,006	0,002 ± 0,001
5332/5	0,006 ± 0,002	—	—	0,008 ± 0,002	—	0,006 ± 0,002	0,009 ± 0,011	0,003 ± 0,001
5332/6	0,008 ± 0,003	—	—	0,013 ± 0,004	—	0,004 ± 0,002	—	0,002 ± 0,002
5334	0,009	0,079 ± 0,010	0,087 ± 0,058	0,098 ± 0,010	0,103 ± 0,022	0,029 ± 0,003	0,083 ± 0,016	0,130 ± 0,027
5336	—	0,031 ± 0,004	0,028 ± 0,019	0,020 ± 0,003	0,020 ± 0,007	0,006 ± 0,001	0,041 ± 0,006	—
5340	—	0,024 ± 0,002	0,021 ± 0,008	0,024 ± 0,001	0,020 ± 0,003	0,007 ± 0,0004	0,033 ± 0,003	—
5344/1	—	0,024 ± 0,003	0,027 ± 0,009	0,023 ± 0,002	0,020 ± 0,003	0,007 ± 0,001	0,657 ± 0,036	—
5344/2	—	0,113 ± 0,010	0,080 ± 0,027	0,091 ± 0,012	0,085 ± 0,018	0,030 ± 0,002	0,044 ± 0,011	—
5344/3	—	0,134 ± 0,012	0,141 ± 0,023	0,125 ± 0,009	0,122 ± 0,009	0,038 ± 0,002	0,101 ± 0,005	—
5346	—	0,003 ± 0,0005	—	0,002 ± 0,0003	0,002 ± 0,001	0,001 ± 0,0001	0,007 ± 0,001	—
5348	—	—	—	—	—	—	—	—
5351	—	—	—	0,003 ± 0,001	—	0,001 ± 0,001	0,010 ± 0,007	0,003 ± 0,002
5353	—	0,052 ± 0,008	0,027 ± 0,015	0,016 ± 0,002	0,013 ± 0,006	0,004 ± 0,001	0,052 ± 0,009	—
5354	—	—	—	0,007 ± 0,001	—	0,002 ± 0,001	—	0,004 ± 0,003
5356/1	0,0007	0,003 ± 0,002	—	0,002 ± 0,001	—	0,001 ± 0,0004	0,006 ± 0,004	0,0002
5356/2	0,002	0,885 ± 0,076	0,821 ± 0,147	0,662 ± 0,072	0,623 ± 0,059	0,218 ± 0,014	0,089 ± 0,021	0,003
5357	—	0,004 ± 0,002	—	0,004 ± 0,001	—	0,002 ± 0,001	0,004 ± 0,005	—
5358	—	0,498 ± 0,076	0,079 ± 0,040	0,063 ± 0,006	0,063 ± 0,038	0,019 ± 0,003	0,144 ± 0,030	—
5360/1	—	0,035 ± 0,003	0,015 ± 0,006	0,014 ± 0,002	0,014 ± 0,003	0,005 ± 0,0003	0,059 ± 0,005	—
5360/2	—	0,105 ± 0,011	0,048 ± 0,033	0,039 ± 0,006	0,043 ± 0,012	0,012 ± 0,001	0,029 ± 0,007	—
5361	—	0,006 ± 0,002	—	0,002 ± 0,001	—	0,001 ± 0,001	0,037 ± 0,008	—
5363	—	0,018 ± 0,002	0,010 ± 0,005	0,010 ± 0,001	0,008 ± 0,003	0,003 ± 0,0003	0,028 ± 0,003	—
5364	—	0,041 ± 0,006	0,042 ± 0,018	0,024 ± 0,003	0,024 ± 0,009	0,008 ± 0,001	0,134 ± 0,015	0,008 ± 0,002
5366/1	—	0,053 ± 0,005	0,023 ± 0,009	0,019 ± 0,001	0,019 ± 0,004	0,006 ± 0,0004	0,043 ± 0,004	—
5366/2	—	0,003 ± 0,001	—	0,002 ± 0,001	—	0,001 ± 0,0005	—	—
5368	—	—	—	0,006 ± 0,001	—	0,002 ± 0,001	0,010 ± 0,008	—
5374	—	0,029 ± 0,004	—	0,020 ± 0,002	0,022 ± 0,008	0,006 ± 0,001	0,070 ± 0,009	—
5378	—	0,032 ± 0,003	0,042 ± 0,026	0,029 ± 0,002	0,027 ± 0,007	0,008 ± 0,001	0,014 ± 0,005	0,006 ± 0,002
5395	—	0,003 ± 0,002	0,010 ± 0,008	0,004 ± 0,001	—	0,001 ± 0,001	0,058 ± 0,008	—
5405	—	0,026 ± 0,003	—	0,003 ± 0,001	—	0,002 ± 0,001	—	0,001 ± 0,0002
5407	0,038 ± 0,011	0,077 ± 0,008	0,016 ± 0,010	0,019 ± 0,002	0,021 ± 0,005	0,005 ± 0,001	0,024 ± 0,005	0,019 ± 0,008
5408	—	0,047 ± 0,005	—	0,028 ± 0,004	0,034 ± 0,008	0,007 ± 0,001	0,064 ± 0,009	0,002 ± 0,001
5408	—	0,059 ± 0,007	0,101 ± 0,021	0,074 ± 0,006	0,068 ± 0,011	0,023 ± 0,002	0,025 ± 0,008	0,016 ± 0,004

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]							
	Thorium-232	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
5410/1	0,084 ± 0,071	0,316 ± 0,033	—	0,058 ± 0,009	0,100 ± 0,035	0,017 ± 0,003	0,053 ± 0,021	0,249 ± 0,083
5410/2	0,053 ± 0,391	0,368 ± 0,043	—	0,092 ± 0,014	0,132 ± 0,041	0,029 ± 0,005	0,051 ± 0,031	0,219 ± 0,068
5410/3	—	0,007 ± 0,001	0,017 ± 0,015	0,006 ± 0,001	0,004 ± 0,002	0,001 ± 0,0002	0,061 ± 0,007	0,004 ± 0,003
5413	0,003	0,189 ± 0,015	—	0,058 ± 0,008	0,044 ± 0,016	0,017 ± 0,002	0,021 ± 0,012	0,009
5414/1b	0,004 ± 0,001	0,058 ± 0,006	—	0,009 ± 0,001	0,021 ± 0,007	0,004 ± 0,001	0,021 ± 0,006	0,001 ± 0,0001
5414/2b	—	0,002 ± 0,001	0,003 ± 0,002	0,001 ± 0,0002	—	0,0003 ± 0,0001	0,004 ± 0,001	—
5414/1a	—	0,010 ± 0,001	—	0,004 ± 0,0002	—	—	0,013 ± 0,002	—
5416	—	0,881 ± 0,084	0,511 ± 0,089	0,479 ± 0,059	0,465 ± 0,056	0,141 ± 0,008	—	—
5425/1	—	0,084 ± 0,033	—	0,141 ± 0,025	—	0,044 ± 0,014	0,491 ± 0,151	0,141 ± 0,047
5425/2	0,0003	0,044 ± 0,004	0,052 ± 0,014	0,038 ± 0,004	0,040 ± 0,007	0,012 ± 0,001	0,452 ± 0,029	0,0001
6013	0,0001	2,770 ± 0,295	1,020 ± 0,340	0,869 ± 0,074	1,180 ± 0,138	0,252 ± 0,014	0,290 ± 0,072	0,0007
7002	0,004	2,690 ± 0,212	2,050 ± 0,435	1,790 ± 0,198	1,650 ± 0,131	0,552 ± 0,026	0,174 ± 0,034	0,0002
7014	0,057 ± 0,001	0,354 ± 0,037	0,258 ± 0,037	0,209 ± 0,020	0,221 ± 0,016	0,064 ± 0,004	0,822 ± 0,047	0,002 ± 0,001
7017	—	0,680 ± 0,020	—	0,440 ± 0,010	0,480 ± 0,030	0,160 ± 0,006	0,440 ± 0,020	—
7017	—	0,313 ± 0,009	—	0,360 ± 0,020	0,330 ± 0,040	0,106 ± 0,007	0,460 ± 0,025	—
7024	—	0,036 ± 0,004	0,034 ± 0,016	0,036 ± 0,005	0,029 ± 0,008	0,011 ± 0,001	0,202 ± 0,016	—
7027	0,008	1,060 ± 0,102	0,801 ± 0,205	0,798 ± 0,110	0,710 ± 0,072	0,245 ± 0,020	0,198 ± 0,032	0,001
7042	—	0,802 ± 0,073	0,605 ± 0,126	0,516 ± 0,084	0,510 ± 0,051	0,165 ± 0,008	—	—
7043	—	0,685 ± 0,070	0,101 ± 0,051	0,080 ± 0,010	0,081 ± 0,035	0,024 ± 0,003	—	—
7048/1	—	0,855 ± 0,081	0,234 ± 0,066	0,203 ± 0,021	0,210 ± 0,060	0,067 ± 0,006	—	—
7048/2	—	0,720 ± 0,073	0,175 ± 0,060	0,172 ± 0,014	0,166 ± 0,036	0,052 ± 0,004	0,117 ± 0,024	—
7053	0,003	1,280 ± 0,096	0,538 ± 0,078	0,544 ± 0,053	0,634 ± 0,055	0,168 ± 0,009	0,051 ± 0,016	0,0002
7057	—	0,358 ± 0,028	0,257 ± 0,065	0,223 ± 0,029	0,231 ± 0,031	0,073 ± 0,004	0,023 ± 0,016	—
7059	—	0,639 ± 0,056	0,543 ± 0,090	0,431 ± 0,047	0,435 ± 0,053	0,140 ± 0,010	0,045 ± 0,015	—
7065	—	0,433 ± 0,036	0,565 ± 0,092	0,375 ± 0,042	0,333 ± 0,043	0,114 ± 0,006	0,297 ± 0,033	—
7067	—	0,372 ± 0,037	0,294 ± 0,067	0,244 ± 0,030	0,222 ± 0,035	0,074 ± 0,005	0,550 ± 0,053	0,013 ± 0,005
7068	—	1,040 ± 0,109	0,371 ± 0,092	0,394 ± 0,050	0,385 ± 0,050	0,121 ± 0,006	0,049 ± 0,014	—
7070/1	0,004	1,240 ± 0,118	0,844 ± 0,239	0,805 ± 0,111	0,733 ± 0,078	0,248 ± 0,020	0,082 ± 0,038	0,0003
7070/2	0,008	1,060 ± 0,088	0,198 ± 0,103	0,369 ± 0,032	0,363 ± 0,048	0,122 ± 0,007	0,197 ± 0,031	0,001
7070/3	0,009	0,676 ± 0,066	0,360 ± 0,078	0,267 ± 0,037	0,233 ± 0,050	0,079 ± 0,007	0,126 ± 0,026	0,0004
7074	—	0,166 ± 0,015	0,206 ± 0,050	0,176 ± 0,026	0,164 ± 0,019	0,054 ± 0,004	0,893 ± 0,048	—
7081	—	1,270 ± 0,146	0,428 ± 0,088	0,324 ± 0,029	0,332 ± 0,069	0,092 ± 0,006	0,096 ± 0,022	0,016 ± 0,011
7106	—	1,020 ± 0,421	—	0,764 ± 0,162	—	0,158 ± 0,091	3,160 ± 1,200	—
7108	—	0,554 ± 0,067	0,324 ± 0,092	0,132 ± 0,017	0,192 ± 0,061	0,042 ± 0,006	—	—
7110	—	2,630 ± 1,850	—	—	—	—	—	—
7111	—	0,595 ± 0,050	0,441 ± 0,117	0,462 ± 0,068	0,436 ± 0,044	0,150 ± 0,010	0,206 ± 0,021	—
7136	—	0,034 ± 0,003	0,029 ± 0,007	0,023 ± 0,003	0,022 ± 0,003	0,007 ± 0,0004	0,433 ± 0,029	—
7142	—	0,881 ± 0,114	0,713 ± 0,105	0,454 ± 0,049	0,394 ± 0,051	0,125 ± 0,009	—	—
7149	—	0,516 ± 0,053	0,438 ± 0,074	0,402 ± 0,030	0,392 ± 0,036	0,126 ± 0,007	0,209 ± 0,027	—
7150	—	0,192 ± 0,018	0,175 ± 0,031	0,149 ± 0,013	0,139 ± 0,015	0,047 ± 0,004	0,120 ± 0,016	—
7152	—	0,289 ± 0,036	0,328 ± 0,115	0,347 ± 0,033	0,298 ± 0,032	0,101 ± 0,006	0,540 ± 0,046	—
7155	—	0,428 ± 0,041	0,433 ± 0,118	0,411 ± 0,038	0,418 ± 0,064	0,133 ± 0,009	0,140 ± 0,033	—
7158	—	0,387 ± 0,037	0,455 ± 0,078	0,370 ± 0,035	0,361 ± 0,035	0,117 ± 0,007	0,231 ± 0,022	—
7160	0,001	1,390 ± 0,140	0,524 ± 0,111	0,443 ± 0,034	0,430 ± 0,067	0,136 ± 0,008	0,031 ± 0,021	0,0001
7162	—	1,870 ± 0,156	0,597 ± 0,116	0,479 ± 0,071	0,495 ± 0,076	0,156 ± 0,011	—	—
7164	—	8,420 ± 0,180	—	5,270 ± 0,230	5,440 ± 0,270	1,610 ± 0,070	1,010 ± 0,060	—
7179	—	0,211 ± 0,018	0,176 ± 0,032	0,102 ± 0,012	0,095 ± 0,013	0,030 ± 0,002	0,277 ± 0,019	—
7186	0,005 ± 0,002	1,180 ± 0,095	0,615 ± 0,074	0,463 ± 0,039	0,551 ± 0,046	0,141 ± 0,011	0,099 ± 0,016	0,002 ± 0,001
7192/1	—	0,524 ± 0,044	0,617 ± 0,094	0,431 ± 0,048	0,437 ± 0,046	0,132 ± 0,007	—	—
7192/2	—	0,133 ± 0,011	0,154 ± 0,033	0,113 ± 0,013	0,105 ± 0,010	0,034 ± 0,002	0,216 ± 0,015	—
7198	0,009 ± 0,002	0,295 ± 0,021	0,247 ± 0,034	0,247 ± 0,022	0,260 ± 0,016	0,079 ± 0,004	0,299 ± 0,021	0,001 ± 0,0004

102 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]							
	Thorium-232	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
7209/1	—	0,113 ± 0,018	0,080 ± 0,047	0,100 ± 0,013	0,097 ± 0,038	0,030 ± 0,004	0,335 ± 0,042	—
7209/2	—	0,065 ± 0,018	0,087 ± 0,057	0,049 ± 0,007	0,062 ± 0,050	0,015 ± 0,004	0,074 ± 0,047	—
7211	—	0,859 ± 0,078	0,278 ± 0,066	0,262 ± 0,024	0,284 ± 0,052	0,082 ± 0,006	0,090 ± 0,020	—
7217	—	0,607 ± 0,057	0,636 ± 0,092	0,612 ± 0,058	0,605 ± 0,049	0,198 ± 0,011	0,345 ± 0,027	—
7224	—	2,650 ± 0,237	1,810 ± 0,217	1,270 ± 0,115	1,240 ± 0,116	0,399 ± 0,024	—	—
7230	0,002	0,784 ± 0,059	0,689 ± 0,109	0,443 ± 0,057	0,509 ± 0,046	0,141 ± 0,007	0,119 ± 0,013	0,0002
7232	—	0,049 ± 0,006	0,048 ± 0,017	0,042 ± 0,005	0,042 ± 0,008	0,013 ± 0,001	0,447 ± 0,036	—
7233	—	1,340 ± 0,099	1,220 ± 0,175	0,918 ± 0,117	0,901 ± 0,074	0,297 ± 0,014	0,315 ± 0,033	—
7237	—	0,163 ± 0,015	0,114 ± 0,040	0,129 ± 0,011	0,116 ± 0,016	0,039 ± 0,003	0,594 ± 0,041	—
7239/1	—	1,260 ± 0,109	0,713 ± 0,119	0,558 ± 0,080	0,562 ± 0,060	0,175 ± 0,009	0,177 ± 0,023	—
7239/2	—	0,496 ± 0,044	0,336 ± 0,031	0,263 ± 0,019	0,240 ± 0,021	0,081 ± 0,004	0,432 ± 0,030	—
7246	—	0,371 ± 0,035	0,346 ± 0,059	0,268 ± 0,025	0,258 ± 0,030	0,082 ± 0,005	1,110 ± 0,080	—
7258	—	1,050 ± 0,107	0,858 ± 0,132	0,792 ± 0,060	0,776 ± 0,069	0,243 ± 0,012	0,544 ± 0,056	—
7277	—	0,098 ± 0,016	0,117 ± 0,045	0,086 ± 0,011	0,097 ± 0,025	0,025 ± 0,003	0,269 ± 0,037	—
7288/1	—	0,823 ± 0,090	0,647 ± 0,105	0,565 ± 0,042	0,565 ± 0,059	0,173 ± 0,009	—	—
7288/2	—	0,552 ± 0,060	0,433 ± 0,100	0,450 ± 0,045	0,423 ± 0,051	0,134 ± 0,008	—	—
7294	—	1,170 ± 0,181	0,676 ± 0,243	0,515 ± 0,078	0,535 ± 0,161	0,143 ± 0,019	0,190 ± 0,130	—
7299	—	0,723 ± 0,076	0,273 ± 0,169	0,332 ± 0,042	0,282 ± 0,040	0,097 ± 0,006	0,295 ± 0,043	—
7308	0,001	0,357 ± 0,037	0,179 ± 0,126	0,186 ± 0,014	0,198 ± 0,031	0,016 ± 0,019	0,061 ± 0,022	0,00004
7310	0,0002	0,430 ± 0,051	0,465 ± 0,258	0,556 ± 0,040	0,499 ± 0,083	0,164 ± 0,013	—	0,00009
7311	0,001	0,591 ± 0,060	0,271 ± 0,154	0,199 ± 0,013	0,214 ± 0,042	0,055 ± 0,005	—	0,0003
7336	0,0001	0,833 ± 0,092	0,326 ± 0,032	0,425 ± 0,054	0,479 ± 0,070	0,121 ± 0,009	—	0,00003
7338	0,010 ± 0,003	0,469 ± 0,040	0,319 ± 0,093	0,314 ± 0,036	0,355 ± 0,034	0,102 ± 0,066	0,185 ± 0,020	0,006 ± 0,002
7373	0,005	0,055 ± 0,005	0,059 ± 0,009	0,0481 ± 0,004	0,052 ± 0,004	0,015 ± 0,001	0,082 ± 0,006	0,0007
8104	0,069	0,497 ± 0,051	0,131 ± 0,042	0,214 ± 0,016	0,200 ± 0,031	0,063 ± 0,004	0,622 ± 0,052	0,003
8113	0,013	1,610 ± 0,158	1,730 ± 0,199	1,240 ± 0,090	1,080 ± 0,082	0,365 ± 0,017	0,632 ± 0,032	0,0005
8217	0,008	0,241 ± 0,022	0,164 ± 0,061	0,156 ± 0,022	0,161 ± 0,024	0,049 ± 0,004	0,562 ± 0,034	0,001
8232	0,000487036	0,313 ± 0,032	0,218 ± 0,044	0,186 ± 0,012	0,186 ± 0,026	0,059 ± 0,005	—	0,0008
8263	—	0,066 ± 0,006	0,044 ± 0,009	0,040 ± 0,002	0,037 ± 0,005	0,013 ± 0,001	0,197 ± 0,013	—
9127	—	0,118 ± 0,016	0,139 ± 0,068	0,129 ± 0,015	0,144 ± 0,032	0,041 ± 0,004	0,027 ± 0,022	—

Die spezifischen Aktivitäten von Thorium-232 ohne Fehlerangabe wurden aus den Konzentrationsergebnissen der ICP-MS Messung von Thorium bestimmt.

B.2 Radionuklide aller Rückspülschlämme aus der Mineralwasseraufbereitung

B.2.1 Uran-Zerfallsreihe

Rex.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]				
	Uran-238	Thorium-234	Radium-226	Blei-214	Bismut-214
40002	—	—	0,918 ± 0,093	0,144 ± 0,013	0,118 ± 0,012
50002	8,261	—	6,190 ± 0,643	5,410 ± 0,235	4,520 ± 0,192
50003	—	—	—	0,048 ± 0,013	—
70001	—	—	4,280 ± 0,358	3,940 ± 0,171	3,260 ± 0,142
70005	0,589	—	0,384 ± 0,242	0,172 ± 0,015	0,129 ± 0,014
70007	—	—	1,450 ± 0,217	0,219 ± 0,030	0,192 ± 0,031
70011	—	—	0,050 ± 0,014	0,034 ± 0,003	0,030 ± 0,003
80002	—	0,047 ± 0,043	0,298 ± 0,053	0,207 ± 0,013	0,186 ± 0,014

B.2.2 Thorium-Zerfallsreihe

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]						
	Ac-228	Ra-224	Pb-212	Bi-212	Tl-208	K-40	U-235
40002	0,684 ± 0,091	0,121 ± 0,060	0,133 ± 0,016	0,206 ± 0,024	0,040 ± 0,005	—	—
50002	1,660 ± 0,170	—	0,357 ± 0,045	0,568 ± 0,078	0,105 ± 0,008	—	0,380 ± 0,040
50003	0,090 ± 0,037	—	0,032 ± 0,015	—	—	—	—
70001	2,300 ± 0,238	0,872 ± 0,672	0,645 ± 0,056	0,661 ± 0,164	—	0,947 ± 0,147	—
70005	0,338 ± 0,056	—	0,059 ± 0,007	0,088 ± 0,042	0,016 ± 0,005	0,129 ± 0,038	0,027 ± 0,014
70007	0,753 ± 0,130	—	0,034 ± 0,017	—	—	—	—
70011	0,071 ± 0,008	0,064 ± 0,018	0,062 ± 0,007	0,067 ± 0,012	0,020 ± 0,002	0,369 ± 0,023	—
80002	0,118 ± 0,016	0,139 ± 0,068	0,129 ± 0,015	0,144 ± 0,032	0,041 ± 0,004	0,027 ± 0,022	—

B.3 Radionuklide der untersuchten Klärschlämme

B.3.1 Uran-Zerfallsreihe

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]						
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
2076	—	—	—	0,062 ± 0,022	0,018 ± 0,003	0,014 ± 0,002	0,223 ± 0,066
2078	—	0,025 ± 0,004	—	—	0,020 ± 0,002	0,014 ± 0,001	0,184 ± 0,006
2079	—	0,022 ± 0,004	—	—	0,016 ± 0,002	0,015 ± 0,001	0,126 ± 0,007
2113	—	—	—	0,076 ± 0,023	0,012 ± 0,003	0,010 ± 0,002	0,202 ± 0,130
2115	—	—	—	0,066 ± 0,022	0,009 ± 0,003	—	0,225 ± 0,115
2123	—	0,028 ± 0,023	—	0,073 ± 0,017	0,012 ± 0,002	0,012 ± 0,002	0,138 ± 0,093
2124	0,139	0,114 ± 0,045	0,197 ± 0,085	0,038 ± 0,058	0,020 ± 0,003	0,017 ± 0,002	0,284 ± 0,061
2135	—	0,044 ± 0,025	—	0,069 ± 0,017	0,019 ± 0,003	0,018 ± 0,002	0,292 ± 0,067
3005	0,235	0,170 ± 0,021	—	0,139 ± 0,029	0,127 ± 0,011	0,127 ± 0,004	0,233 ± 0,006
3066	—	0,055 ± 0,032	—	0,165 ± 0,025	0,055 ± 0,004	0,049 ± 0,004	0,288 ± 0,055
3067	—	0,050 ± 0,007	—	—	0,051 ± 0,004	0,049 ± 0,002	0,152 ± 0,005
3081	0,112	0,085 ± 0,011	—	0,074 ± 0,021	0,067 ± 0,006	0,060 ± 0,003	0,210 ± 0,007
3089	0,104	0,083 ± 0,039	—	0,066 ± 0,041	0,016 ± 0,002	0,012 ± 0,002	0,254 ± 0,121
3150	—	—	—	0,042 ± 0,027	0,008 ± 0,003	0,008 ± 0,002	0,199 ± 0,118

104 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]						
	Uran-238	Thorium-234	Protaktinium-234m	Radium-226	Blei-214	Bismut-214	Blei-210
3183	—	0,061 ± 0,023	—	0,342 ± 0,065	0,066 ± 0,008	0,053 ± 0,006	0,248 ± 0,033
3201	—	0,072 ± 0,009	—	—	0,027 ± 0,002	0,027 ± 0,002	0,100 ± 0,005
4001	—	—	—	—	0,023 ± 0,002	0,022 ± 0,001	0,165 ± 0,005
4055	—	0,024 ± 0,003	—	—	0,021 ± 0,001	0,018 ± 0,001	0,187 ± 0,005
4121	—	0,062 ± 0,024	—	0,141 ± 0,025	0,023 ± 0,003	0,019 ± 0,002	0,141 ± 0,015
4142	—	—	—	0,091 ± 0,019	0,011 ± 0,002	0,012 ± 0,022	0,158 ± 0,080
4167	0,153 ± 0,210	—	—	0,467 ± 0,373	0,071 ± 0,047	0,062 ± 0,058	0,217 ± 0,246
5001	—	0,045 ± 0,006	—	—	0,020 ± 0,001	0,017 ± 0,001	0,275 ± 0,007
5263	—	0,062 ± 0,032	—	0,194 ± 0,028	0,048 ± 0,004	0,046 ± 0,004	0,216 ± 0,072
5378	0,106	0,103 ± 0,038	0,150 ± 0,057	0,147 ± 0,052	0,031 ± 0,003	0,028 ± 0,003	0,105 ± 0,012
7001	0,066	0,056 ± 0,007	—	0,044 ± 0,010	0,033 ± 0,003	0,030 ± 0,001	0,306 ± 0,006
7014	—	0,050 ± 0,027	—	0,104 ± 0,018	0,032 ± 0,003	0,027 ± 0,002	0,176 ± 0,050
7017	—	0,083 ± 0,040	0,121 ± 0,063	0,239 ± 0,033	0,046 ± 0,004	0,041 ± 0,003	—
7063	—	0,039 ± 0,005	—	—	0,052 ± 0,005	0,049 ± 0,002	—
7285	—	0,035 ± 0,005	—	—	0,033 ± 0,003	0,031 ± 0,002	0,106 ± 0,004
7311	—	—	—	0,141 ± 0,034	0,088 ± 0,007	0,075 ± 0,007	0,313 ± 0,106
8007	—	0,028 ± 0,004	—	—	0,016 ± 0,002	0,016 ± 0,001	0,084 ± 0,003
9908	—	0,090 ± 0,012	—	—	0,083 ± 0,002	0,079 ± 0,002	0,217 ± 0,006
50002	—	0,059 ± 0,031	—	0,165 ± 0,064	0,031 ± 0,008	0,026 ± 0,007	0,349 ± 0,035
70001	—	0,037 ± 0,009	—	0,057 ± 0,035	0,010 ± 0,005	0,009 ± 0,005	0,202 ± 0,030
70007	—	0,025 ± 0,018	—	0,039 ± 0,030	0,009 ± 0,006	0,006 ± 0,004	0,215 ± 0,028

B.3.2 Thorium-Zerfallsreihe

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]						
	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
2076	0,034 ± 0,005	0,026 ± 0,018	0,020 ± 0,003	0,020 ± 0,007	0,006 ± 0,001	0,272 ± 0,025	—
2078	0,023 ± 0,001	—	0,023 ± 0,003	—	0,008 ± 0,001	0,506 ± 0,015	—
2079	0,023 ± 0,001	—	0,021 ± 0,003	0,017 ± 0,004	0,006 ± 0,0005	0,254 ± 0,009	—
2113	0,032 ± 0,006	0,035 ± 0,022	0,017 ± 0,003	—	0,005 ± 0,001	0,232 ± 0,027	—
2115	0,035 ± 0,006	0,044 ± 0,022	0,016 ± 0,003	0,021 ± 0,015	0,005 ± 0,001	0,368 ± 0,033	—
2123	0,034 ± 0,004	0,035 ± 0,019	0,024 ± 0,004	0,028 ± 0,008	0,007 ± 0,0009	0,303 ± 0,025	—
2124	0,030 ± 0,005	0,033 ± 0,016	0,025 ± 0,004	0,022 ± 0,012	0,008 ± 0,001	0,336 ± 0,028	0,006 ± 0,003
2135	0,027 ± 0,004	—	0,019 ± 0,003	0,024 ± 0,010	0,006 ± 0,0006	0,385 ± 0,029	—
3005	0,119 ± 0,003	—	0,085 ± 0,011	0,088 ± 0,010	0,027 ± 0,001	0,207 ± 0,007	0,011 ± 0,001
3066	0,090 ± 0,009	0,041 ± 0,023	0,044 ± 0,005	0,043 ± 0,019	0,015 ± 0,002	0,529 ± 0,038	—
3067	0,096 ± 0,003	—	0,067 ± 0,008	0,074 ± 0,008	0,021 ± 0,001	0,325 ± 0,010	—
3081	0,074 ± 0,002	—	0,046 ± 0,006	0,040 ± 0,006	0,014 ± 0,0008	0,304 ± 0,010	0,005 ± 0,001
3089	0,048 ± 0,006	0,018 ± 0,013	0,023 ± 0,003	0,021 ± 0,011	0,007 ± 0,001	0,177 ± 0,019	0,005 ± 0,002
3150	0,042 ± 0,006	—	0,018 ± 0,003	0,022 ± 0,008	0,006 ± 0,001	0,236 ± 0,025	—
3183	0,110 ± 0,013	0,066 ± 0,050	0,027 ± 0,005	0,030 ± 0,017	0,010 ± 0,002	0,434 ± 0,035	—
3201	0,034 ± 0,001	—	0,020 ± 0,003	—	0,006 ± 0,0004	0,421 ± 0,013	—
4001	0,065 ± 0,002	—	0,035 ± 0,004	0,041 ± 0,005	0,011 ± 0,0006	0,152 ± 0,005	—
4055	0,031 ± 0,001	—	0,022 ± 0,002	0,021 ± 0,004	0,007 ± 0,0009	0,170 ± 0,005	—
4121	0,051 ± 0,006	0,030 ± 0,020	0,019 ± 0,003	0,015 ± 0,010	0,007 ± 0,0009	0,223 ± 0,016	—
4142	0,085 ± 0,009	0,032 ± 0,020	0,033 ± 0,006	0,032 ± 0,012	0,011 ± 0,002	0,347 ± 0,028	—
4167	—	—	—	—	—	—	0,029 ± 0,023
5001	0,039 ± 0,002	—	0,045 ± 0,003	0,043 ± 0,006	0,013 ± 0,002	0,261 ± 0,007	—
5263	0,192 ± 0,018	0,067 ± 0,029	0,057 ± 0,005	0,056 ± 0,019	0,018 ± 0,002	0,434 ± 0,033	—
5378	0,023 ± 0,003	0,018 ± 0,013	0,011 ± 0,002	0,010 ± 0,007	0,004 ± 0,0007	0,215 ± 0,015	0,005 ± 0,003
7001	0,027 ± 0,001	—	0,034 ± 0,004	0,035 ± 0,004	0,010 ± 0,0005	0,095 ± 0,003	0,003 ± 0,0005

REx.-Nr.	Spezifische Aktivität [Bq/g]						
	Aktinium-228	Radium-224	Blei-212	Bismut-212	Thallium-208	Kalium-40	Uran-235
7014	0,038 ± 0,005	0,027 ± 0,020	0,033 ± 0,003	0,036 ± 0,011	0,011 ± 0,001	0,323 ± 0,026	—
7017	0,081 ± 0,008	0,029 ± 0,024	0,045 ± 0,007	0,042 ± 0,001	0,015 ± 0,001	0,119 ± 0,013	—
7063	0,043 ± 0,001	—	0,044 ± 0,006	0,050 ± 0,006	0,014 ± 0,0007	0,121 ± 0,005	—
7285	0,024 ± 0,001	—	0,026 ± 0,003	0,028 ± 0,004	0,007 ± 0,0005	0,184 ± 0,007	—
7311	0,077 ± 0,010	0,059 ± 0,040	0,029 ± 0,004	0,041 ± 0,022	0,008 ± 0,002	0,120 ± 0,026	—
8007	0,030 ± 0,001	—	0,035 ± 0,004	0,036 ± 0,004	0,010 ± 0,0005	0,198 ± 0,006	—
9908	0,114 ± 0,003	—	0,101 ± 0,003	0,116 ± 0,006	0,033 ± 0,0009	0,854 ± 0,018	—
50002	0,052 ± 0,012	—	0,042 ± 0,009	—	—	0,267 ± 0,042	—
70001	0,018 ± 0,004	—	0,012 ± 0,004	—	0,004 ± 0,001	0,332 ± 0,038	—
70007	0,022 ± 0,009	—	0,019 ± 0,005	—	0,005 ± 0,002	0,287 ± 0,037	—

B.4 Radionuklide der untersuchten Roh- und Reinwasserproben

Es werden die Ergebnisse der zehn von uns und elf vom Bundesamt für Strahlenschutz in Berlin analysierten Wasserproben präsentiert; RoW = Rohwasser, ReW = Reinwasser; Ω_{ges} = Gesamtfehler in %; 5410_{MW} : die spezifischen Aktivitäten dieser Schlammprobe stellen den Mittelwert aus zwei untersuchten Proben dar

REx.- Nr.	Geo- region	Art	Radium-226		Radium-228		Uran-238		Uran-235		Uran-234		Blei-210		²³⁴ Uran/ ²³⁸ Uran
			Aktivität mBq/l	Ω_{ges} %	Aktivität mBq/l	Ω_{ges} %	Aktivität mBq/l	Ω_{ges} %	Aktivität mBq/l	Ω_{ges} %	Aktivität mBq/l	Ω_{ges} %	Aktivität mBq/l	Ω_{ges} %	
2115	2	RoW	6,38	14	8,74	26	16,3	24	< 4,3	—	31,2	20	< 1,7	—	1,9
		ReW	4,95	16	8,47	22	17,1	23	< 3,6	—	32,7	19	< 1,7	—	1,9
2208	2	RoW	6,82	14	8,46	18	16,4	24	< 4,3	—	27	21	6,53	19	1,6
		ReW	3,83	18	4,66	21	17	24	< 4,3	—	30,9	20	< 1,8	—	1,8
3079	3	RoW	3,54	18	5,35	20	9,63	18	—	—	—	—	1,84	46	—
		ReW	3,22	19	3,53	24	9,63	18	—	—	—	—	< 1,8	—	—
3352/1	3	RoW	33,3	12	82,8	15	< 2,91	—	< 3,89	—	17,5	23	< 1,73	—	6,0
		ReW	18,1	12	46,8	15	< 2,72	—	< 3,69	—	12	26	< 1,73	—	4,4
3352/2	3	RoW	64,5	28,9	48,3	4,6	422	16,4	19,41	17,4	—	—	5,1	19,6	—
		ReW	40,0	34,8	30,4	4,9	411	16,5	18,91	14,3	—	—	< 3,8	—	—
3352/2	3	RoW	35,8	12	72	15	18,3	23	< 3,92	—	58,2	18	2,08	43	3,2
		ReW	22,9	12	39,3	15	13,8	25	< 4,14	—	45,9	19	1,99	40	3,3
3340	3	RoW	21,6	12	11,0	16	13,0	25	< 3,71	—	41,7	19	< 1,71	—	3,2
		ReW	19,3	12	9,39	17	11,9	26	< 4,01	—	37,5	19	< 1,72	—	3,2
3267/2	3	RoW	114	11	58,2	15	10,1	27	< 3,64	—	65,6	17	2,58	34	6,5
		ReW	103	11	59,8	15	8,25	29	< 3,66	—	69,7	17	1,88	44	8,4
3274/2	3	RoW	98,2	11	80,1	15	34,4	20	< 4,69	—	248	16	3,05	30	7,2
		ReW	49,1	11	40,2	15	27,4	21	< 4,21	—	236	16	2,35	38	8,6
3261/1	3	RoW	52,7	11	34,8	15	25,3	21	< 4,33	—	156	16	3,57	27	6,2
		ReW	26,1	12	10,3	17	28,2	21	< 4,7	—	152	16	2,0	43	5,4
3184	3	RoW	256	11	95,7	15	2,43	11	—	—	—	—	< 1,71	—	—
		ReW	183	11	65,8	15	2,27	11	—	—	—	—	2,52	36	—
3156	3	RoW	47,6	11	89,9	15	96,5	18	< 7,49	—	179	17	3,4	28	1,9
		ReW	27,7	12	64,5	15	92,2	19	< 8,8	—	183	17	< 1,68	—	2,0
3267/1	3	RoW	167	11	79,7	15	35,5	20	< 4,61	—	206	16	3,98	50	5,8
		ReW	167	11	85,4	15	41,6	19	< 4,34	—	207	16	3,22	31	5,0
3208	3	RoW	13,1	12	17,9	16	64	18	< 4,53	—	80,3	17	< 1,79	—	1,3
		ReW	17	12	18,2	16	82,8	17	< 4,89	—	116	17	< 1,73	—	1,4
3196/8	3	RoW	21,7	12	11,9	16	—	—	—	—	—	—	4,45	24	—
		ReW	7,61	14	3,38	21	25,5	21	< 3,87	—	46,1	18	< 1,66	—	1,8
3196/1	3	RoW	22,2	12	33,4	15	63,6	18	< 4,13	—	165	16	8,58	17	2,6
		ReW	13,6	12	19,8	16	77,7	18	< 4,85	—	181	16	2,03	43	2,3
3282	3	RoW	8,48	13	22,2	16	40,8	21	< 6,48	—	107	18	1,7	48	2,6
		ReW	6,58	14	16,5	16	39,5	24	< 9,7	—	98,3	19	2,16	38	2,5
3005	4	RoW	65	11	49,3	17	38,4	20	< 4,4	—	39,3	20	9,44	16	1,0
		ReW	44,7	11	18	19	45	20	< 6,2	—	56,4	19	1,88	45	1,3
3183	4	RoW	300	11	66,2	15	352	16	14,9	31	488	16	11,6	15	1,4
		ReW	257	11	55	15	342	16	18,9	28	459	16	1,83	46	1,3
3168	4	RoW	9,53	13	9,08	18	67,6	18	< 5	—	109	17	11,6	15	1,6
		ReW	12,5	12	11,5	17	109	17	7,28	42	201	16	2,58	35	1,8
3081/1	4	RoW	13,8	49	11,9	2,5	92,1	2,6	4,3	0,4	160	4,2	< 4	—	1,7
		ReW	13,5	50,4	11,8	2,5	92,6	2,5	5,5	0,5	165	4,1	< 4	—	1,8

REx.-Nr.	Geo-region	Art	Radium-226		Radium-228		Uran-238		Uran-235		Uran-234		Blei-210		²³⁴ Uran/ ²³⁸ Uran
			Aktivität mBq/l	Ωges %	Aktivität mBq/l	Ωges %	Aktivität mBq/l	Ωges %	Aktivität mBq/l	Ωges %	Aktivität mBq/l	Ωges %	Aktivität mBq/l	Ωges %	
5100	5	RoW	6,58	14	< 2	—	3,09	17	—	—	—	—	19,6	13	—
	5	ReW	5,3	15	< 2,4	—	3,09	17	—	—	—	—	16,5	14	—
5011/1	5	RoW	4,51	15	4,21	31	69,9	18	< 5,7	—	73,5	18	< 1,8	—	1,1
	5	ReW	1,22	34	< 2,2	—	—	—	—	—	—	—	< 1,8	—	—
5011/2	5	RoW	< 1	—	< 2,6	—	< 0,74	—	—	—	—	—	7,81	18	—
	5	ReW	< 0,97	—	< 1,4	—	< 0,74	—	—	—	—	—	< 1,8	—	—
5336	5	RoW	6,27	14	2,89	28	< 0,74	—	—	—	—	—	42,1	15	—
	5	ReW	4,41	16	1,93	40	< 0,74	—	—	—	—	—	97	12	—
5407	5	RoW	98	11	21,8	16	56,9	19	< 5,6	—	53,3	19	63,1	13	0,9
	5	ReW	65,3	11	12,2	17	39,6	20	< 5,3	—	32,3	21	94,3	12	0,8
5410 _{MW}	5	RoW	7,98	13	13,7	17	26,7	22	< 5	—	36,9	20	162	11	1,4
	5	ReW	9,6	13	17,5	17	32,7	22	< 5,8	—	42,9	20	28,8	13	1,3
5410/3	5	RoW	10,1	39,6	< 1,3	—	3,5	12,5	1,6	12,5	—	—	222,1	1,6	—
	5	ReW	10,9	4,6	< 2,8	—	14,4	20,8	< 0,9	—	—	—	140	1,7	—
5425/2	5	RoW	2,2	13,6	< 2,6	—	< 10,6	—	< 0,9	—	—	—	31,7	9,1	—
	5	ReW	2,2	18,2	< 2,9	—	< 11,8	—	< 1	—	—	—	< 13,7	—	—
5334	5	RoW	13,0	4,2	10,8	4,6	35,2	1,0	2,2	0,2	26	0,8	52,3	6,5	0,74
	5	ReW	31,9	3,3	11,4	4,4	35,2	1,0	1,7	0,2	26,7	0,8	107	4,5	0,76
3081/2	5	RoW	18,7	—	8,7	—	7,9	—	0,3	—	7,9	—	—	—	1
	5	ReW	14,5	—	7,0	—	6,7	—	0,3	—	6,7	—	—	—	1
3022	6	RoW	93,85	—	113,1	—	112,5	—	5,2	—	—	—	< 7,35	—	—
	6	ReW	44,95	—	47,8	—	127	—	5,8	—	—	—	9,2	17,4	—
3311	6	RoW	144	11	192	15	10,6	27	< 3,98	—	66,2	18	2,0	43	6,2
	6	ReW	83,4	11	75,6	15	9,25	29	< 4,1	—	51	18	4,9	22	5,5
3029	6	RoW	134	11	211	15	7,49	28	< 3,27	—	58,2	17	< 1,66	—	7,8
	6	ReW	48,3	11	54,8	15	7,04	28	< 2,91	—	58,9	17	5,6	20	8,4
3028	6	RoW	56,5	11	102	15	166	16	8,64	35	223	16	1,84	45	1,3
	6	ReW	44,0	11	77,7	15	152	16	6,86	40	211	16	< 1,65	—	1,4
7014	7	RoW	7,24	14	2,53	47	53,4	19	< 5,6	—	43,8	20	3,59	28	0,8
	7	ReW	5,83	15	< 2,2	—	54	19	< 4,9	—	48,5	19	5,27	21	0,9
7338	7	RoW	11,6	13	14,0	19	70,5	18	< 5,5	—	77,9	18	2,58	35	1,1
	7	ReW	11,5	13	8,44	22	69	19	< 6,7	—	87,1	18	1,81	48	1,3
7373	7	RoW	4,45	16	< 2,1	—	99,8	17	< 4,2	—	101	17	2,82	32	1,0
	7	ReW	4,12	16	2,51	49	95,7	18	< 6	—	102	17	< 1,6	—	1,1
7053	7	RoW	30,7	12	28	16	< 0,74	—	—	—	—	—	2,89	33	—
	7	ReW	27	12	22,5	17	< 0,74	—	—	—	—	—	2,41	37	—
7198	7	RoW	19,2	12	8,89	20	47,2	19	< 4,5	—	44,8	19	14,3	14	0,9
	7	ReW	4,71	15	< 1,9	—	98,5	17	5,4	45	97,6	17	6,56	19	1,0
4001/1	7	RoW	45,4	11	43,5	15	5,45	11	—	—	—	—	2,01	43	—
	7	ReW	31,9	12	26,7	16	4,57	11	—	—	—	—	< 1,71	—	—
4001/2	7	RoW	49,8	11	20,5	16	< 0,74	—	—	—	—	—	< 1,67	—	—
	7	ReW	47,6	11	20,9	16	< 0,74	—	—	—	—	—	< 1,68	—	—
4202	7	RoW	23,7	12	32,8	15	—	—	—	—	—	—	< 1,83	—	—
	7	ReW	19,1	12	27,3	16	1,24	11	—	—	—	—	< 1,73	—	—

108 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

C Ergebnisse der Dosisabschätzung

C.1 Dosiskoeffizienten für Inhalation und Ingestion

NUKLID	DOSISKOEFFIZIENTEN	
	INGESTION BERUFLICH [Sv/Bq] [74]	INHALATION BERUFLICH [Sv/Bq] [74]
Uran-238	4,40E-08	1,60E-06
Thorium-234	3,40E-09	5,30E-09
Protaktinium-234m	5,10E-10	5,50E-10
Uran-234	4,90E-08	2,10E-06
Thorium-230	2,10E-07	2,80E-05
Radium-226	2,80E-07	2,20E-06
Blei-214	1,40E-10	4,80E-09
Bismut-214	1,10E-10	2,10E-08
Blei-210	6,80E-07	1,10E-06
Thorium-232	2,20E-07	2,90E-05
Aktinium-228	4,30E-10	1,20E-08
Thorium-228	7,20E-08	2,20E-05
Radium-224	6,50E-08	2,40E-06
Blei-212	5,90E-09	3,30E-08
Bismut-212	2,60E-10	3,90E-08
Thallium-208	1,00E-10	1,00E-10
Uran-235	4,60E-08	1,80E-06

C.2 Dosisabschätzung für alle untersuchten Rückspülschlämme aus der Trinkwasseraufbereitung

C.2.1 Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,01 g/m³

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1	Expositionsszenario 2	Expositionsszenario 3	Expositionsszenario 4
	t = 20 h	t = 3 h	t = 8 h	t = 2000 h
1006	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
1018/1	0,0010	0,00016	0,00042	0,10
1018/2	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
1040	0,0019	0,00029	0,00076	0,19
1072	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
1099	0,0010	0,00016	0,00042	0,10
1107	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
2078	0,0032	0,00048	0,0013	0,32
2079	0,0013	0,00019	0,00052	0,13
2094	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
2135	0,0023	0,00034	0,00091	0,23
2159	0,0018	0,00027	0,00071	0,18
2172/1	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
2172/2	0,0035	0,00053	0,0014	0,35
2208	0,0023	0,00035	0,00092	0,23
2115	0,0016	0,00024	0,00063	0,16
2067	0,0050	0,00076	0,0020	0,50
2076/1	0,0020	0,00030	0,00081	0,20

110 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	<i>Effektive Gesamtdosis [mSv]</i>			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
2076/2	0,0015	0,00022	0,00060	0,15
2096/1	0,0013	0,00019	0,00050	0,13
2096/2	0,0012	0,00017	0,00046	0,11
2119/1	0,0055	0,00082	0,0022	0,55
2119/2	0,0029	0,00044	0,0012	0,29
2127	0,0024	0,00037	0,00098	0,24
3195	0,0047	0,00070	0,0019	0,47
3079/1	0,0016	0,00024	0,00065	0,16
3079/2	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
3089	0,0037	0,00055	0,0015	0,37
3099	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
3134	0,0014	0,00021	0,00055	0,14
3150	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3156	0,0152	0,0023	0,0061	1,52
3184	0,0087	0,0013	0,0035	0,87
3196/1	0,0056	0,00084	0,0023	0,56
3196/2	0,0034	0,00051	0,0014	0,34
3196/3	0,0087	0,0013	0,0035	0,87
3196/4	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
3196/5	0,0038	0,00057	0,0015	0,38
3196/6	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3196/7	0,0031	0,00047	0,0012	0,31
3196/8	0,0028	0,00043	0,0011	0,28
3208	0,0044	0,00066	0,0018	0,44
3238	0,0011	0,00016	0,00042	0,10
3243	0,0032	0,00048	0,0013	0,32
3246	0,0038	0,00056	0,0015	0,37
3247	0,0065	0,00097	0,0026	0,65
3251	0,0013	0,00020	0,00053	0,13
3253	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
3260	0,0056	0,00083	0,0022	0,55
3261/1	0,0105	0,0016	0,0042	1,05
3261/2	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
3267/1	0,0066	0,00099	0,0027	0,66
3267/2	0,0152	0,0023	0,0061	1,52
3278	0,0015	0,00022	0,00058	0,15
3274/1	0,0054	0,00081	0,0022	0,54
3274/2	0,0132	0,0020	0,0053	1,32
3290	0,0051	0,00077	0,0021	0,51
3291	0,0019	0,00028	0,00075	0,19
3293	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
3304	0,0033	0,00049	0,0013	0,33
3306	0,0017	0,00025	0,00068	0,17
3308	0,0025	0,00038	0,0010	0,25
3309	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
3322	0,0044	0,00065	0,0017	0,44
3325/1	0,0036	0,00054	0,0014	0,36
3325/2	0,0029	0,00043	0,0011	0,29

REx.-Nr.	<i>Effektive Gesamtdosis [mSv]</i>			
	Expositionsszenario 1	Expositionsszenario 2	Expositionsszenario 3	Expositionsszenario 4
	t = 20 h	t = 3 h	t = 8 h	t = 2000 h
3346	0,0023	0,00034	0,00091	0,23
3352/1	0,0085	0,0013	0,0034	0,85
3352/2	0,0040	0,00059	0,0016	0,40
3352/3	0,0245	0,0037	0,0098	2,45
3337	0,0030	0,00046	0,0012	0,30
3339	0,0039	0,00058	0,0016	0,39
3340	0,0179	0,0027	0,0072	1,79
3005/a	0,0074	0,0011	0,0029	0,73
3005/b	0,0083	0,0012	0,0033	0,83
3007	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
3008	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
3008/1	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
3008/2	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
3016	0,0026	0,00039	0,0010	0,26
3017	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
3040	0,0024	0,00036	0,00097	0,24
3067	0,0016	0,00024	0,00064	0,16
3081/1	0,0016	0,00024	0,00064	0,16
3102	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
3158	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
3163	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
3168	0,0055	0,00082	0,0022	0,55
3176	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
3182	0,0014	0,00021	0,00056	0,14
3183	0,026	0,0039	0,011	2,63
3192	0,0025	0,00037	0,0010	0,25
15	0,0016	0,00024	0,00065	0,16
3066	0,0019	0,00028	0,00075	0,19
3081/2	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
5011/1	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
5011/2	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
5039/1	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5039/2	0,0012	0,00017	0,00047	0,12
5051	0,0031	0,00047	0,0012	0,31
5059/1	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5059/2	0,0013	0,00020	0,00054	0,13
5072	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
5077	0,0012	0,00017	0,00046	0,12
5090	0,0018	0,00027	0,00073	0,18
5098	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
5100	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
5156	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
5191	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
5232	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
5243	0,0013	0,00020	0,00053	0,13
5248	0,0031	0,00047	0,0012	0,31
5263	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5264	0,0011	0,00016	0,00042	0,11

112 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	<i>Effektive Gesamtdosis [mSv]</i>			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
5266	0,0013	0,00020	0,00054	0,13
5270	0,0049	0,00074	0,0020	0,49
5278	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5303	0,0012	0,00017	0,00047	0,12
5323	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5328	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5332/1	0,0025	0,00037	0,00098	0,24
5332/2	0,0023	0,00034	0,00090	0,23
5332/3	0,0027	0,00040	0,0011	0,26
5332/4	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
5332/5	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
5332/6	0,0013	0,00020	0,00053	0,13
5334	0,0053	0,00079	0,0021	0,53
5336	0,0016	0,00025	0,00065	0,16
5340	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
5344/1	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
5344/2	0,0012	0,00019	0,00050	0,12
5344/3	0,0014	0,00020	0,00054	0,14
5348	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5346	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5351	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
5353	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
5354	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
5356/1	0,0011	0,00016	0,00042	0,10
5356/2	0,0047	0,00070	0,0019	0,47
5357	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5358	0,0018	0,00026	0,00070	0,18
5360/1	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
5360/2	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
5361	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5363	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
5364	0,0012	0,00017	0,00047	0,12
5366/1	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
5366/2	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5368	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
5378	0,0018	0,00028	0,00074	0,18
5374	0,0017	0,00026	0,00069	0,17
5395	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5405	0,0012	0,00017	0,00046	0,11
5407	0,0025	0,00037	0,00098	0,25
5408	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
5408	0,0019	0,00028	0,00075	0,19
5410/1	0,010	0,0015	0,0041	1,02
5410/2	0,011	0,0016	0,0044	1,09
5410/3	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
5413	0,0021	0,00032	0,00084	0,21
5414/a	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5414/1b	0,0013	0,00020	0,00053	0,13

REx.-Nr.	<i>Effektive Gesamtdosis [mSv]</i>			
	Expositionsszenario 1	Expositionsszenario 2	Expositionsszenario 3	Expositionsszenario 4
	t = 20 h	t = 3 h	t = 8 h	t = 2000 h
5414/2b	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
5416	0,0023	0,00034	0,00091	0,23
5425/1	0,0064	0,00096	0,0026	0,64
5425/2	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
6013	0,0041	0,00061	0,0016	0,41
3022	0,021	0,0032	0,0084	2,11
3028	0,013	0,0019	0,0052	1,29
3029	0,014	0,0020	0,0054	1,36
3032	0,0033	0,00049	0,0013	0,33
3033	0,0028	0,00042	0,0011	0,28
3034/1	0,0038	0,00056	0,0015	0,38
3034/2	0,0023	0,00035	0,00093	0,23
3103	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
3152	0,0012	0,00017	0,00046	0,12
3154/1	0,0047	0,00070	0,0019	0,46
3154/2	0,0051	0,00077	0,0021	0,51
3240	0,0022	0,00033	0,00087	0,22
3275	0,0043	0,00064	0,0017	0,43
3276	0,0041	0,00062	0,0017	0,41
3280	0,0048	0,00072	0,0019	0,48
3281	0,015	0,0022	0,0058	1,45
3282	0,0013	0,00020	0,00053	0,13
3285	0,0013	0,00019	0,00052	0,13
3289	0,024	0,0035	0,0094	2,35
3311	0,019	0,0028	0,0074	1,85
3345	0,012	0,0018	0,0048	1,21
4004	0,0013	0,00019	0,00052	0,13
4019	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
4023	0,0022	0,00033	0,00089	0,22
4043	0,0013	0,00019	0,00050	0,13
4071/1	0,0023	0,00035	0,00093	0,23
4071/2	0,0024	0,00035	0,00094	0,24
4078	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
4079	0,0036	0,00054	0,0014	0,36
4098	0,0076	0,0011	0,0031	0,76
4129	0,0039	0,00058	0,0015	0,39
4157	0,0086	0,0013	0,0034	0,86
4165	0,0042	0,00064	0,0017	0,42
4167	0,0034	0,00052	0,0014	0,34
4001/1	0,011	0,0017	0,0045	1,13
4001/2	0,011	0,0017	0,0045	1,11
4001/3	0,0032	0,00048	0,0013	0,32
4030	0,0018	0,00027	0,0007	0,18
4031	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
4054	0,0018	0,00028	0,00073	0,18
4192	0,0024	0,00036	0,00097	0,24
4199	0,0016	0,00025	0,00066	0,16
4202	0,0019	0,00029	0,00077	0,19

114 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	<i>Effektive Gesamtdosis [mSv]</i>			
	Expositionsszenario 1	Expositionsszenario 2	Expositionsszenario 3	Expositionsszenario 4
	t = 20 h	t = 3 h	t = 8 h	t = 2000 h
5153/1	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
5153/2	0,0013	0,00019	0,00050	0,13
7002	0,0063	0,00094	0,0025	0,62
7014	0,0025	0,00038	0,0010	0,25
7017	0,0023	0,00034	0,00090	0,22
7017	0,0018	0,00027	0,00073	0,18
7024	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
7027	0,0035	0,00053	0,0014	0,35
7042	0,0028	0,00041	0,0011	0,28
7043	0,0020	0,00030	0,00079	0,20
7048/1	0,0021	0,00031	0,00083	0,21
7048/2	0,0020	0,00030	0,00080	0,20
7053	0,0032	0,00047	0,0013	0,32
7057	0,0017	0,00026	0,00068	0,17
7059	0,0023	0,00035	0,00093	0,23
7065	0,0025	0,00037	0,00098	0,25
7067	0,0018	0,00027	0,00073	0,18
7068	0,0024	0,00035	0,00094	0,24
7070/1	0,0040	0,00059	0,0016	0,40
7070/2	0,0028	0,00042	0,0011	0,28
7070/3	0,0024	0,00035	0,00094	0,24
7074	0,0016	0,00023	0,00062	0,16
7081	0,0041	0,00061	0,0016	0,41
7106	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
7108	0,0017	0,00026	0,00069	0,17
7110	0,0023	0,00034	0,00092	0,23
7111	0,0021	0,00031	0,00082	0,21
7136	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
7142	0,0024	0,00036	0,00097	0,24
7149	0,0021	0,00031	0,00084	0,21
7150	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
7152	0,0024	0,00036	0,00096	0,24
7155	0,0022	0,00033	0,00088	0,22
7158	0,0020	0,00030	0,00079	0,20
7160	0,0032	0,00048	0,0013	0,32
7162	0,0029	0,00043	0,0012	0,29
7164	0,0074	0,0011	0,0030	0,74
7179	0,0014	0,00021	0,00055	0,14
7186	0,0030	0,00046	0,0012	0,30
7192/1	0,0026	0,00038	0,0010	0,26
7192/2	0,0017	0,00025	0,00066	0,17
7198	0,0019	0,00028	0,00076	0,19
7209/1	0,0021	0,00031	0,00083	0,21
7209/2	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
7211	0,0018	0,00027	0,00072	0,18
7217	0,0019	0,00029	0,00077	0,19
7224	0,0066	0,00099	0,0026	0,66
7230	0,0027	0,00040	0,0011	0,27

REx.-Nr.	<i>Effektive Gesamtdosis [mSv]</i>			
	Expositionsszenario 1	Expositionsszenario 2	Expositionsszenario 3	Expositionsszenario 4
	t = 20 h	t = 3 h	t = 8 h	t = 2000 h
7232	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
7233	0,0030	0,00045	0,0012	0,30
7237	0,0014	0,00021	0,00055	0,14
7239/1	0,0024	0,00037	0,00097	0,24
7239/2	0,0016	0,00024	0,00064	0,16
7246	0,0017	0,00025	0,00067	0,17
7258	0,0025	0,00037	0,0010	0,25
7277	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
7288/1	0,0027	0,00041	0,0011	0,27
7288/2	0,0022	0,00032	0,00086	0,22
7294	0,0040	0,00060	0,0016	0,40
7299	0,0024	0,00035	0,00095	0,24
7308	0,0018	0,00027	0,00072	0,18
7310	0,0024	0,00037	0,00097	0,24
7311	0,0021	0,00031	0,00083	0,21
7336	0,0028	0,00043	0,0011	0,28
7373	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
2252/a	0,0012	0,00019	0,00049	0,12
2252/b	0,0015	0,00022	0,00058	0,15
7338	0,0022	0,00033	0,00089	0,22
8104	0,0023	0,00034	0,00091	0,23
8113	0,0051	0,00076	0,0020	0,51
8217	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
8232	0,0016	0,00023	0,00062	0,16
8263	0,0012	0,00017	0,00046	0,12
9127	0,0013	0,00020	0,00052	0,13

C.2.2 Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,003 g/m³

REx.-Nr.	<i>Effektive Gesamtdosis [mSv]</i>			
	Expositionsszenario 1	Expositionsszenario 2	Expositionsszenario 3	Expositionsszenario 4
	t = 20 h	t = 3 h	t = 8 h	t = 2000 h
1006	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
1018/1	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
1018/2	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
1040	0,0013	0,00020	0,00053	0,13
1072	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
1099	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
1107	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
2078	0,0018	0,00027	0,00072	0,18
2079	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
2094	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
2135	0,0014	0,00022	0,00058	0,14
2159	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
2172/1	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
2172/2	0,0018	0,00027	0,00072	0,18
2208	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
2115	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
2067	0,0025	0,00038	0,0010	0,25
2076/1	0,0014	0,00020	0,00055	0,14

116 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
2076/2	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
2096/1	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
2096/2	0,0011	0,00016	0,00042	0,10
2119/1	0,0026	0,00039	0,0010	0,26
2119/2	0,0017	0,00025	0,00067	0,17
2127	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
3195	0,0024	0,00036	0,00095	0,24
3079/1	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
3079/2	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
3089	0,0020	0,00030	0,00079	0,20
3099	0,0012	0,00017	0,00046	0,11
3134	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
3150	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
3156	0,0063	0,00094	0,0025	0,63
3184	0,0037	0,00056	0,0015	0,37
3196/1	0,0027	0,00040	0,0011	0,27
3196/2	0,0019	0,00028	0,00074	0,19
3196/3	0,0037	0,00056	0,0015	0,37
3196/4	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3196/5	0,0020	0,00030	0,00080	0,20
3196/6	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
3196/7	0,0017	0,00026	0,00069	0,17
3196/8	0,0017	0,00025	0,00066	0,16
3208	0,0024	0,00035	0,00094	0,24
3238	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
3243	0,0018	0,00028	0,00074	0,18
3246	0,0023	0,00034	0,00091	0,23
3247	0,0030	0,00045	0,0012	0,30
3251	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
3253	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
3260	0,0026	0,00039	0,0010	0,26
3261/1	0,0043	0,00065	0,0017	0,43
3261/2	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3267/1	0,0030	0,00045	0,0012	0,30
3267/2	0,0060	0,00090	0,0024	0,60
3278	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
3274/1	0,0026	0,00039	0,0010	0,26
3274/2	0,0053	0,00079	0,0021	0,53
3290	0,0025	0,00037	0,0010	0,25
3291	0,0013	0,00020	0,00053	0,13
3293	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
3304	0,0018	0,00027	0,00073	0,18
3306	0,0013	0,00019	0,00050	0,12
3308	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
3309	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3322	0,0022	0,00033	0,00087	0,22
3325/1	0,0019	0,00029	0,00076	0,19
3325/2	0,0017	0,00025	0,00066	0,17
3346	0,0015	0,00022	0,00058	0,15
3352/1	0,0037	0,00056	0,0015	0,37
3352/2	0,0021	0,00031	0,00083	0,21
3352/3	0,0094	0,0014	0,0037	0,94

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
3337	0,0017	0,00026	0,00069	0,17
3339	0,0020	0,00030	0,00081	0,20
3340	0,0070	0,0011	0,0028	0,70
3005/a	0,0033	0,00050	0,0013	0,33
3005/b	0,0035	0,00053	0,0014	0,35
3007	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3008	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
3008/1	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3008/2	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
3016	0,0016	0,00024	0,00064	0,16
3017	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
3040	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
3067	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
3081/1	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
3102	0,0010	0,00016	0,00041	0,10
3158	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
3163	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
3168	0,0025	0,00038	0,0010	0,25
3176	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
3182	0,0011	0,00017	0,00046	0,11
3183	0,0098	0,0015	0,0039	0,98
3192	0,0016	0,00023	0,00062	0,15
15	0,0013	0,00019	0,00050	0,13
3066	0,0013	0,00020	0,00052	0,13
3081/2	0,0012	0,00017	0,00047	0,12
5011/1	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5011/2	0,0010	0,00016	0,00042	0,10
5039/1	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
5039/2	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5051	0,0019	0,00028	0,00075	0,19
5059/1	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5059/2	0,0011	0,00017	0,00046	0,11
5072	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
5077	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5090	0,0013	0,00019	0,00052	0,13
5098	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5100	0,0010	0,00016	0,00042	0,10
5156	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5191	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
5232	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
5243	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
5248	0,0018	0,00027	0,00071	0,18
5263	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5264	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5266	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
5270	0,0024	0,00036	0,00096	0,24
5278	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5303	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5323	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5328	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5332/1	0,0016	0,00023	0,00063	0,16
5332/2	0,0015	0,00022	0,00060	0,15
5332/3	0,0017	0,00025	0,00066	0,16

118 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
5332/4	0,0010	0,00016	0,00041	0,10
5332/5	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5332/6	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
5334	0,0026	0,00039	0,0010	0,26
5336	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
5340	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5344/1	0,0010	0,00016	0,00042	0,10
5344/2	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
5344/3	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
5348	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
5346	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
5351	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5353	0,0010	0,00016	0,00042	0,10
5354	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5356/1	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5356/2	0,0023	0,00034	0,00092	0,23
5357	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5358	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
5360/1	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5360/2	0,0011	0,00017	0,00046	0,11
5361	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
5363	0,0011	0,00016	0,00042	0,10
5364	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5366/1	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5366/2	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5368	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
5378	0,0013	0,00020	0,00052	0,13
5374	0,0013	0,00020	0,00052	0,13
5395	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5405	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
5407	0,0015	0,00022	0,00060	0,15
5408	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5408	0,0014	0,00020	0,00054	0,14
5410/1	0,0042	0,00062	0,0017	0,41
5410/2	0,0044	0,00066	0,0018	0,44
5410/3	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5413	0,0014	0,00021	0,00056	0,14
5414/a	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
5414/1b	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
5414/2b	0,0010	0,00015	0,00040	0,10
5416	0,0015	0,00022	0,00058	0,15
5425/1	0,0031	0,00047	0,0013	0,31
5425/2	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
6013	0,0021	0,00032	0,00085	0,21
3022	0,0080	0,0012	0,0032	0,80
3028	0,0053	0,00080	0,0021	0,53
3029	0,0054	0,00081	0,0022	0,54
3032	0,0018	0,00027	0,00072	0,18
3033	0,0016	0,00025	0,00066	0,16
3034/1	0,0020	0,00030	0,00079	0,20
3034/2	0,0015	0,00022	0,00059	0,15
3103	0,0010	0,00015	0,00041	0,10

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
3152	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
3154/1	0,0023	0,00035	0,00093	0,23
3154/2	0,0025	0,00037	0,00099	0,25
3240	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
3275	0,0021	0,00032	0,00086	0,21
3276	0,0021	0,00032	0,00085	0,21
3280	0,0024	0,00035	0,00094	0,23
3281	0,0059	0,00089	0,0024	0,60
3282	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
3285	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
3289	0,0092	0,0014	0,0037	0,92
3311	0,0072	0,0011	0,0029	0,72
3345	0,0050	0,00075	0,0020	0,50
4004	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
4019	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
4023	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
4043	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
4071/1	0,0015	0,00022	0,00060	0,15
4071/2	0,0015	0,00022	0,00060	0,15
4078	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
4079	0,0019	0,00029	0,00076	0,19
4098	0,0198	0,00050	0,0013	0,34
4129	0,0021	0,00031	0,00082	0,21
4157	0,0037	0,00055	0,0015	0,37
4165	0,0022	0,00033	0,00087	0,22
4167	0,0019	0,00029	0,00077	0,19
4001/1	0,0047	0,00070	0,0019	0,47
4001/2	0,0045	0,00068	0,0018	0,45
4001/3	0,0018	0,00026	0,00071	0,18
4030	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
4031	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
4054	0,0013	0,00019	0,00052	0,13
4192	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
4199	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
4202	0,0014	0,00020	0,00054	0,14
5153/1	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
5153/2	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
7002	0,0029	0,00043	0,0011	0,29
7014	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
7017	0,0015	0,00022	0,00058	0,15
7017	0,0013	0,00019	0,00052	0,13
7024	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
7027	0,0019	0,00028	0,00076	0,19
7042	0,0016	0,00024	0,00065	0,16
7043	0,0014	0,00020	0,00054	0,14
7048/1	0,0014	0,00021	0,00056	0,14
7048/2	0,0014	0,00020	0,00055	0,14
7053	0,0018	0,00027	0,00071	0,18
7057	0,0013	0,00019	0,00050	0,13
7059	0,0015	0,00022	0,00059	0,15
7065	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
7067	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
7068	0,0015	0,00022	0,00060	0,15

120 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
7070/1	0,0021	0,00031	0,00082	0,20
7070/2	0,0017	0,00025	0,00066	0,17
7070/3	0,0015	0,00022	0,00059	0,15
7074	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
7081	0,0021	0,00032	0,00084	0,21
7106	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
7108	0,0013	0,00019	0,00050	0,13
7110	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
7111	0,0014	0,00021	0,00055	0,14
7136	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
7142	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
7149	0,0014	0,00021	0,00055	0,14
7150	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
7152	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
7155	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
7158	0,0013	0,00020	0,00054	0,13
7160	0,0018	0,00027	0,00072	0,18
7162	0,0017	0,00025	0,00068	0,17
7164	0,0035	0,00052	0,0014	0,35
7179	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
7186	0,0017	0,00026	0,00069	0,17
7192/1	0,0016	0,00023	0,00062	0,16
7192/2	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
7198	0,0013	0,00020	0,00052	0,13
7209/1	0,0015	0,00022	0,00059	0,15
7209/2	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
7211	0,0013	0,00020	0,00052	0,13
7217	0,0013	0,00020	0,00053	0,13
7224	0,0030	0,00045	0,0012	0,30
7230	0,0016	0,00024	0,00063	0,16
7232	0,0010	0,00016	0,00041	0,10
7233	0,0017	0,00026	0,00068	0,17
7237	0,0011	0,00017	0,00045	0,11
7239/1	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
7239/2	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
7246	0,0012	0,00019	0,00050	0,12
7258	0,0015	0,00023	0,00061	0,15
7277	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
7288/1	0,0016	0,00024	0,00064	0,16
7288/2	0,0014	0,00021	0,00056	0,14
7294	0,0021	0,00031	0,00083	0,21
7299	0,0015	0,00022	0,00059	0,15
7308	0,0013	0,00019	0,00051	0,13
7310	0,0015	0,00023	0,00060	0,15
7311	0,0014	0,00021	0,00055	0,14
7336	0,0017	0,00025	0,00066	0,17
7373	0,0011	0,00016	0,00043	0,11
2252/a	0,0011	0,00016	0,00044	0,11
2252/b	0,0012	0,00018	0,00047	0,12
7338	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
8104	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
8113	0,0024	0,00036	0,00097	0,24
8217	0,0012	0,00017	0,00046	0,12

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
8232	0,0012	0,00018	0,00048	0,12
8263	0,0011	0,00016	0,00042	0,11
9127	0,0011	0,00017	0,00044	0,11

C.3 Dosisabschätzung für alle untersuchten Rückspülschlämme aus der Mineralwasseraufbereitung

C.3.1 Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,01 g/m³

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
40002	0,0019	0,00029	0,00077	0,19
50002	0,0087	0,0013	0,0035	0,87
50003	0,0010	0,00016	0,00042	0,10
70001	0,0051	0,00076	0,0020	0,51
70005	0,0016	0,00024	0,00065	0,16
70007	0,0022	0,00033	0,00087	0,22
70011	0,0011	0,00017	0,00044	0,11
80002	0,0013	0,00020	0,00052	0,13

C.3.2 Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,003 g/m³

REx.-Nr.	Effektive Gesamtdosis [mSv]			
	Expositionsszenario 1 t = 20 h	Expositionsszenario 2 t = 3 h	Expositionsszenario 3 t = 8 h	Expositionsszenario 4 t = 2000 h
40002	0,0013	0,00020	0,00054	0,13
50002	0,0036	0,00054	0,0014	0,36
50003	0,0010	0,00015	0,00041	0,10
70001	0,0025	0,00037	0,00098	0,25
70005	0,0012	0,00018	0,00049	0,12
70007	0,0014	0,00021	0,00057	0,14
70011	0,0010	0,00016	0,00041	0,10
80002	0,0011	0,00017	0,00044	0,11

122 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

D Schwermetallgehalte

D.1 LAGA Zuordnungswerte

Element	LAGA [mg/kg]			
	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Aluminium	—	—	—	—
Arsen	20	30	50	150
Blei	100	200	300	1.000
Bismut	—	—	—	—
Calcium	—	—	—	—
Cadmium	0,6	1	3	10
Chrom _{ges}	50	100	200	600
Kobalt	—	—	—	—
Kupfer	40	100	200	600
Eisen	—	—	—	—
Kalium	—	—	—	—
Magnesium	—	—	—	—
Mangan	—	—	—	—
Natrium	—	—	—	—
Nickel	40	100	200	600
Antimon	—	—	—	—
Thorium	—	—	—	—
Thallium	0,5	1	3	10
Uran	—	—	—	—
Zink	120	300	500	1.500
Phosphor	—	—	—	—
Schwefel	—	—	—	—
TOC	—	—	—	—
Glühverlust [%]	—	—	—	—

124 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

D.2 Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung

D.2.1 Aluminium bis Mangan

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											
	Aluminium	Arsen	Bismut	Calcium	Cadmium	Kobalt	Chrom	Kupfer	Eisen	Kalium	Magnesium	Mangan
1006	2.824	10,9	< 0,05	25.382	6,78	65,4	24,7	80,1	5.733	628	1.958	184.653
1018/1	1.170	1,65	0,02	361.834	0,71	0,74	4,00	7,24	1.839	592	4.931	883
1018/2	1.101	0,40	0,02	21.591	0,04	0,26	4,00	66,2	3.916	225	650	58,9
1040	4.194	9,82	0,04	91.048	4,89	52,4	12,3	246	3.136	1.623	1.721	54.690
1072	1.255	79,0	0,02	187.684	0,15	13,0	8,44	88,7	187.490	774	28.506	8.892
1099	193	0,40	0,02	124.099	0,05	0,11	4,00	1,40	100	254	546	32,8
2076/1	1.154	36,2	0,02	35.429	7,52	34,6	14,8	95,3	8.790	1.832	6.850	255.426
2076/2	2.262	70,4	0,05	23.361	1,25	21,3	19,1	91,2	18.701	872	2.473	13.678
2079	761	2,50	0,03	11.957	0,51	130	5,97	21,5	3.612	580	962	33.757
2094	505	30,9	0,06	59.083	0,50	17,9	5,52	119	356.532	97,5	3.239	1.211
2096/1	4.216	3,39	0,07	24.281	0,18	139	11,2	36,6	11.371	1.453	1.660	3.121
2096/2	3.548	11,7	0,07	66.928	0,28	17,5	18,9	64,7	26.410	1.170	5.363	1.676
2119/1	1.299	33,6	< 0,05	64.308	30,1	213	< 10	2.272	11.707	1.815	9.458	523.283
2119/2	1.235	214	0,10	56.860	11,8	192	< 10	157	367.534	234	2.251	80.035
2127	240	169	< 0,05	56.561	5,90	69,6	< 10	35,9	155.348	908	5.997	360.979
2135	210	21,4	< 0,05	66.837	15,5	37,9	< 10	300	22.955	1.239	9.138	514.748
2172/1	9.248	1.572	0,12	11.265	0,31	32,1	20,5	409	311.012	6.160	3.058	428
2172/2	5.875	4,21	0,02	253.876	7,74	3,59	6,92	112	13.853	1.348	70.113	5.769
2208	29.158	7.254	0,03	36.926	4,78	35,8	43,9	160	372.975	1.941	2.501	6.423
3005	2.533	16,0	0,05	220.332	124	133	16,7	2.679	94.760	1.517	29.152	52.152
3016	832	52,5	< 0,02	105.892	0,47	186	10,7	28,9	350.039	73,8	9.543	8.448
3022	89,3	6.448	0,02	10.967	0,04	10,9	4,04	10,4	108.411	730	998	52.976
3028	—	12.246	0,04	12.873	3,13	33,3	14,3	224	219.241	—	582	11.620
3029	4.285	6.790	0,07	26.355	0,20	11,6	258	38,3	176.878	2.725	1.573	63.399
3032	3.168	5.108	0,04	152.055	6,90	25,9	34,9	643	152.023	378	85.158	2.509
3034/1	5.302	24.122	0,03	91.502	1,26	40,0	37,8	878	330.575	1.445	23.825	1.974
3034/2	28.655	9.399	< 0,02	201.220	1,47	28,5	24,8	444	131.305	1.175	49.083	1.026
3040	146	5,77	< 0,05	1.711	< 0,1	0,12	< 10	2,70	18.020	323	217	9.031
3066	1.914	20,0	< 0,05	243.788	2,79	47,4	< 10	42,3	174.540	315	64.601	3.918
3079/1	99,2	204	0,02	15.487	1,36	33,2	4,00	22,4	106.097	472	1.131	66.744
3079/2	137	191	0,02	15.983	1,66	33,9	4,00	27,6	111.934	487	1.117	71.549
3081/1	18.508	23,6	0,18	251.301	0,96	13,9	42,9	118	40.756	8.503	6.877	703
3081/2	3.819	2,63	0,02	287.082	3,11	4,30	2,92	4,23	4.270	509	81.901	1.651
3089	467	34,4	0,02	46.236	0,04	9,26	4,00	1,50	383.682	959	2.534	10.582
3099	1.219	3,49	0,03	1.127	0,04	6,13	16,3	29,6	7.903	868	429	1.783
3099	1.909	5,86	0,03	2.267	< .04	5,76	13,7	33,5	7.957	1.247	346	1.639
3102	634	3,09	0,03	834	< .04	0,64	< 4	12,0	3.787	169	114	1.698
3103	1.551	4,53	< 0,02	461.686	0,20	8,73	4,81	113	1.530	253	2.272	677
3134	2.706	4,73	0,02	448.820	0,27	0,65	< 4	5,97	8.803	128	3.968	727
3150	817	1,99	< 0,02	392	< .04	0,62	< 4	8,15	389	331	81,0	57,5
3152	255	11,3	0,02	200	0,04	2,20	4,00	9,6	1.238	287	36,5	366

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											
	Aluminium	Arsen	Bismut	Calcium	Cadmium	Kobalt	Chrom	Kupfer	Eisen	Kalium	Magnesium	Mangan
3154/1	3.492	4.408	0,30	29.479	1,19	226	93,6	316	311.802	2.078	2.632	36.036
3156	3.383	4.467	0,10	83.841	1,54	261	132	430	138.013	2.342	5.893	262.893
3182	983	3,35	< 0,02	461.712	3,00	2,36	< 4	69,3	1.286	93,3	4.444	490
3183	—	477	0,02	16.934	0,44	123	7,82	589	231.403	—	1.809	10.210
3184	2.835	3.616	0,08	65.585	1,25	218	104	354	116.094	1.895	4.811	217.659
3196/1	1.595	30,5	0,02	212.292	34,7	211	9,23	223	14.400	486	30.910	84.457
3196/2	654	3,75	< 0,02	361.097	0,78	3,72	4,01	10,6	2.651	< 40	50.615	2.355
3196/3	333	1.094	< 0,02	28.160	5,28	94,5	13,0	46,2	278.078	94,9	2.389	30.572
3196/4	888	6.911	0,06	41.105	2,03	145	55,2	166	258.580	209	7.606	57.958
3196/5	2.829	153	< 0,02	319.294	0,55	3,69	11,1	8,29	16.485	142	62.543	3.342
3196/6	5.307	620	0,05	35.363	14,9	191	16,1	332	197.770	2.045	4.491	169.201
3196/7	962	11.247	< 0,02	129.508	33,7	148	54,8	740	233.683	296	8.528	65.914
3196/8	720	3.115	< 0,02	35.181	0,38	48,3	9,95	2.732	355.832	364	2.877	57.270
3208	7.092	51,9	0,52	17.928	45,9	287	22,8	13.083	8.759	3.793	5.600	143.960
3240	—	9.677	0,02	14.610	2,54	12,1	51,5	751	233.148	—	740	2.103
3247	575	11.192	< 0,05	32.167	8,91	110	39,0	822	464.859	527	2.531	38.527
3251	1.266	8,38	0,23	4.568	0,04	6,87	8,38	14,3	3.720	715	741	2.243
3260	1.174	1.001	0,02	27.425	7,78	160	4,17	2.740	241.948	1.473	4.657	122.395
3261/1	1.786	411	0,03	18.176	36,2	281	4,00	103	55.709	2.261	3.873	133.589
3261/2	1.451	14,3	0,02	252.246	0,62	8,06	4,00	425	8.651	796	81.813	3.048
3267/1	16.761	2.736	0,18	41.145	4,46	8.924	45,0	425	201.668	4.115	4.455	55.549
3267/2	866	5.365	< 0,05	32.094	0,76	45,7	< 10	210	454.216	502	3.373	65.759
3274/1	3.767	2.453	0,05	42.737	4,58	1.058	9,58	221	161.974	1.415	3.404	56.397
3274/2	1.942	4.356	0,05	29.284	0,05	1,30	< 4	270	369.098	812	2.392	16.095
3281	545	387	< 0,05	31.910	203	386	< 10	4.524	4.827	3.245	3.467	272.863
3311	2.249	10.357	< 0,05	17.270	< 0,1	3,86	406	57,2	405.973	2.012	797	69.083
3322	858	3.174	< 0,05	342.314	0,24	34,3	< 10	6,92	36.297	560	46.821	78.772
3325/1	715	180	< 0,05	7.013	19,8	118	< 10	1.777	14.258	422	907	60.849
3337	1.066	3.416	0,09	23.797	0,69	29,0	84,7	114	463.436	699	1.653	14.048
3339	6.902	41.771	0,02	27.531	0,19	139	73,9	258	471.532	764	675	3.341
3340	6.391	3.044	0,10	62.235	77,8	475	50,9	385	132.704	4.047	11.558	358.760
3345	3.769	6.987	0,05	15.656	0,15	96,5	11,8	407	323.363	4.023	1.635	42.275
3352/1	1.310	4.326	0,02	24.468	0,04	18,5	51,3	148	361.075	1.604	962	16.614
3352/2	398	20.750	0,02	30.860	0,48	405	4,00	10,2	369.629	724	629	24.782
3352/3	1.035	1.925	0,04	20.073	0,10	1,91	4,23	39,3	95.536	1.420	1.894	141.764
4001/1	2.293	256	< 0,05	70.714	0,52	665	< 10	89,5	248.020	859	4.981	60.595
4001/2	4.031	5,40	0,06	151.887	0,10	3,78	10,6	147	98.782	1.674	22.063	42.471
4001/3	7.883	15,2	0,12	13.121	0,10	6,61	11,9	14,6	28.485	2.093	3.019	3.845
4019	8.691	29,0	0,09	67.033	0,12	18,9	25,6	31,3	19.035	446	13.895	157
4098	159	30,0	< 0,05	12.356	< 0,1	8,06	< 10	25,7	43.703	553	1.623	100.682
4129	227	15,1	< 0,05	6.156	< 0,1	4,95	< 10	9,94	588.380	327	419	965
4157	2.623	119	< 0,05	21.361	2,04	18,8	< 10	36,2	416.379	1.179	1.056	28.438
4167	369	22,7	< 0,02	18.442	0,14	42,7	< 4	8,34	412.822	< 40	1.055	1.877
4192	2.161	27,5	0,04	25.577	0,09	3,17	12,8	107	423.162	361	1.099	7.825

126 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											
	Aluminium	Arsen	Bismut	Calcium	Cadmium	Kobalt	Chrom	Kupfer	Eisen	Kalium	Magnesium	Mangan
4199	1.204	45,8	0,02	23.633	0,55	3,68	7,71	42,5	113.158	541	2.106	3.756
5011/1	1.219	5,30	0,02	16.967	0,24	3,00	4,03	47,4	4.392	651	3.449	5.302
5011/2	160.252	14,1	0,15	115.650	3,84	5,95	22,4	39,6	24.823	929	3.716	2.911
5051	14.697	3,48	0,11	308.246	3,11	14,3	23,1	17,0	10.437	3.594	3.366	1.731
5077	1.761	2,25	0,02	421.482	1,88	2,06	4,16	6,44	3.476	946	1.976	365
5090	451	55,3	< 0,05	55.105	0,36	32,3	< 10	18,3	500.754	381	967	8.959
5098	592	0,77	0,02	255.721	0,28	1,41	3,23	5,85	2.006	744	1.009	86
5100	1.304	1,78	0,02	369.643	3,29	5,28	4,00	9,33	1.615	726	2.062	1.069
5243	11.465	3,88	0,73	152.937	0,42	6,10	23,1	135	10.022	1.572	82.541	934
5303	1.299	10,1	0,02	334.787	1,71	1,23	3,30	47,6	5.975	555	51.460	1.700
5323	576	4,42	0,02	1.341	0,39	34,3	< 4	22,3	1.777	191	144	5.434
5332/1	10.245	3,07	0,09	180.328	1,39	11,9	16,8	387	22.635	1.056	99.116	8.960
5332/2	10.131	2,73	0,08	207.147	2,12	8,86	17,6	429	19.158	1.265	105.090	6.162
5332/3	10.622	3,02	0,10	186.809	1,43	12,1	17,8	394	22.964	1.150	103.090	9.140
5332/4	196.589	5,08	0,10	1.199	0,51	4,23	5,70	4,75	4.537	514	424	232
5332/5	263.655	6,94	0,11	2.899	0,40	1,95	6,80	7,14	4.675	537	347	62,4
5332/6	242.794	6,79	0,12	3.627	0,49	2,59	7,29	8,66	4.603	871	537	83,7
5334	59.119	33,2	0,11	260.645	29,0	32,7	10,4	33,0	6.629	620	2.110	10.519
5356/1	1.161	2,07	< 0,05	387.298	0,48	1,30	< 10	83,9	2.558	372	65.070	1.580
5356/2	4.163	67,5	< 0,05	119.186	67,7	1.388	< 10	138	9.438	721	21.626	377.373
5378	633	24,7	0,02	239.041	100	67,7	4,52	178	14.745	272	96.023	2.356
5405	—	0,48	0,02	176.844	0,42	0,67	1,70	8,40	1.303	—	1.275	331
5407	24.265	11,2	0,02	386.422	7,29	15,1	3,51	15,6	3.425	779	2.137	3.432
5408	—	0,86	0,02	167.214	2,53	2,22	3,09	2,18	1.446	—	3.680	623
5410/1	222.316	91,3	0,13	20.853	46,5	93,1	13,4	38,1	12.253	2.192	1.497	28.872
5410/2	215.378	90,6	0,13	24.480	51,8	101	13,5	43,0	13.927	2.780	1.678	31.289
5413	24.928	10,9	< 0,05	412.032	22,7	27,6	< 10	108	2.103	1.198	2.975	12.010
5414	—	2,75	0,02	201.251	1,20	9,66	2,48	95,8	3.732	—	1.466	3.236
5425	351	2,55	< 0,02	477.763	0,52	0,81	< 4	2,06	379	< 40	2.601	141
6013	—	42,0	0,02	15.459	0,07	81,8	1,70	8,30	270.039	—	500	6.142
7002	743	300	< 0,05	15.107	< 0,1	0,48	< 10	54,4	166.106	429	2.306	30.788
7014	379	408	0,04	11.594	0,11	6,47	1,72	17,0	140.213	382	1.120	43.891
7027	5.932	762	0,08	33.392	0,23	14,5	37,5	118	284.411	1.357	9.528	41.231
7053	2.385	1.654	0,03	26.693	0,04	1,54	7,37	139	279.806	721	5.349	17.985
7070/1	1.802	4.068	< 0,05	26.087	< 0,1	1,25	< 10	44,3	347.930	643	2.744	48.364
7070/2	4.677	1.262	0,05	34.111	0,17	4,00	< 10	27,9	288.351	1.197	8.469	34.927
7070/3	2.544	2.209	0,05	31.082	< 0,1	13,5	27,3	8,57	368.929	865	5.096	7.254
7160	1.072	85,9	< 0,05	53.392	< 0,1	1,35	< 10	143	439.948	445	3.874	52.506
7186	912	334	0,03	35.157	0,53	52,1	2,79	42,1	445.794	720	1.785	42.243
7198	234	278	0,02	6.659	0,13	6,96	1,70	7,90	86.012	364	607	22.361
7230	785	1.445	0,04	42.061	0,98	18,3	4,00	23,4	274.924	347	2.437	33.415
7308	—	84,3	0,02	8.874	0,07	1,47	1,70	10,0	146.850	—	437	3.233
7310	—	151	0,02	17.294	0,78	5,66	4,01	17,4	194.974	—	790	10.620
7311	—	430	0,03	12.390	0,16	5,88	17,4	9,5	129.598	—	1.338	26.758

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											
	Aluminium	Arsen	Bismut	Calcium	Cadmium	Kobalt	Chrom	Kupfer	Eisen	Kalium	Magnesium	Mangan
7336	—	390	0,02	16.274	0,07	0,76	1,70	1,33	227.744	—	765	9.182
7338	3.981	1.471	0,14	37.964	1,28	8,18	17,6	217	288.061	962	9.195	32.447
7373	1.122	34,1	0,02	11.294	0,40	6,75	4,00	32,1	23.217	244	2.308	21.538
8104	25.105	1.145	0,26	54.668	0,33	6,84	12,5	30,5	252.649	4.880	8.977	8.130
8113	1.819	232	0,15	10.581	0,16	1,61	< 10	97,9	71.229	709	2.114	42.566
8217	—	553	0,09	27.645	0,16	19,2	11,1	11,7	72.023	—	9.490	10.808
8232	360	2.190	< 0,05	23.009	0,66	21,3	161	19,1	331.305	206	1.061	19.737
9908	35.033	1.206	0,63	25.420	9,26	322	40,1	699	204.392	503	3.075	29.690

D.2.2 Natrium bis TOC (Total Organic Carbon)

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											
	Natrium	Nickel	Blei	Antimon	Thorium	Thallium	Uran	Zink	Phosphor	Schwefel	Glühverlust [%]	TOC
1006	163	67,9	15,9	1,53	0,32	3,54	0,33	386	615	697	—	—
1018/1	64,8	0,70	45,2	0,20	0,32	0,05	0,66	54,4	300	500	—	—
1018/2	155	1,02	2,13	0,20	0,06	0,02	1,44	18,6	300	1.709	—	—
1040	54,3	127	17,2	0,27	2,25	0,71	0,80	227	<300	< 500	2,4	<920
1072	107	10,1	13,6	0,25	0,29	0,22	1,90	132	7.510	500	—	—
1099	27,6	0,70	5,11	0,20	0,66	0,02	0,16	3,35	300	500	—	—
2076/1	318	87,7	8,15	2,15	0,38	5,87	0,43	106	1.843	500	—	—
2076/2	231	22,4	41,8	0,20	0,81	0,04	2,64	90,7	3.250	3.038	—	—
2079	63,0	84,0	11,8	11,8	2,02	0,06	0,25	429	—	—	—	—
2094	417	6,66	9,28	0,78	0,17	0,07	0,25	343	927	514	16	8.600
2096/1	105	251	18,6	0,49	2,45	0,11	0,40	253	792	< 500	1,5	2.500
2096/2	101	33,1	53,9	1,32	2,48	0,22	0,51	359	919	< 500	1,6	1.900
2119/1	462	329	47,5	5,77	0,43	4,17	0,26	707	466	< 500	—	—
2119/2	298	295	8,17	2,82	0,12	1,96	2,24	265	34.600	4.720	—	—
2127	407	95,5	3,06	4,01	0,10	1,86	1,29	102	20.600	< 500	—	—
2135	375	57,6	18,4	2,53	0,33	8,34	0,81	10.570	< 300	< 500	—	—
2172/1	126	56,5	100	0,39	3,57	0,14	71,3	80,2	2.128	500	—	—
2172/2	189	211	14,2	0,20	0,69	0,36	1,27	233	300	500	—	—
2208	163	31,7	9,69	0,25	0,69	0,08	26,1	160	—	—	—	—
3005	85,6	279	12.517	0,14	1,00	2,48	17,2	6.880	—	—	—	—
3016	56,0	210	1,69	< 0,2	0,23	0,25	0,92	754	2.918	< 500	10	1.500
3022	39,5	16,7	10,0	0,21	0,73	2,90	0,78	139	300	500	—	—
3028	—	128	21,0	0,72	0,34	1,02	19,2	167	—	—	—	—
3029	145	151	23,2	0,63	2,88	1,54	1,42	4.720	449	< 500	—	—
3032	119	251	28,9	0,69	0,50	1,39	11,4	718	7.277	< 500	8,6	13.000
3034/1	1.549	85,0	9,24	0,21	1,34	0,24	22,3	216	11.720	< 500	11	7.600
3034/2	2.042	97,0	6,83	< 0,2	1,36	0,12	20,5	513	4.697	< 500	10	11.000
3040	< 25	2,78	10,3	< 0,5	1,26	0,30	0,17	21,3	1.590	< 500	—	—

128 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											
	Natrium	Nickel	Blei	Antimon	Thorium	Thallium	Uran	Zink	Phosphor	Schwefel	Glühverlust [%]	TOC
3066	161	250	28,7	< 0,5	0,31	0,58	3,73	1.214	5.890	< 500	—	—
3079/1	88,3	43,2	4,98	0,82	0,48	3,86	0,71	48,4	20.920	500	—	—
3079/2	82,6	45,6	8,19	0,91	0,35	3,58	0,82	55,8	6.780	500	—	—
3081/1	109	19,7	149	0,58	4,49	0,31	7,07	1.146	—	—	—	—
3081/2	84,7	9,32	4,44	0,09	0,22	0,10	1,68	107	—	—	—	—
3089	461	5,17	1,38	0,48	0,06	0,13	0,62	49,4	994	500	—	—
3099	140	11,7	7,97	0,20	4,66	0,08	0,36	11,1	955	500	—	—
3099	161	10,0	8,20	< 0,2	3,59	0,09	0,33	13,5	346	< 500	0,9	< 1100
3102	34,7	1,56	14,4	< 0,2	2,16	0,22	0,52	9,78	< 300	< 500	0,3	< 770
3103	65,0	24,5	4,70	< 0,2	0,36	0,10	0,44	22,9	< 300	< 500	0,5	< 900
3134	1.197	< 0,7	12,5	< 0,2	1,72	0,07	0,71	38,1	1.540	< 500	1,4	< 880
3150	50,7	0,75	44,8	< 0,2	1,82	0,03	0,35	7,64	< 300	< 500	0,3	< 670
3152	47,7	16,0	25,5	0,20	1,93	0,08	0,20	3,46	300	500	—	—
3154/1	288	249	39,0	1,56	6,11	3,04	5,67	868	1.080	1.850	—	—
3156	522	128	85,0	0,89	4,06	23,2	5,49	494	574	< 500	—	—
3182	41,9	2,69	15,1	< 0,2	0,21	0,08	3,38	511	< 300	< 500	0,9	< 930
3183	—	49,1	21,3	0,15	0,43	1,70	19,6	92,8	—	—	—	—
3184	454	105	68,8	0,73	3,36	18,7	4,39	394	638	< 500	—	—
3196/1	162	479	20,9	0,90	0,56	20,7	1,15	854	1.974	< 500	6,3	3.200
3196/2	104	10,5	5,92	< 0,2	0,16	0,75	0,79	49,5	< 300	< 500	2,6	1.200
3196/3	152	56,1	7,63	0,25	0,36	2,92	3,67	247	35.790	< 500	16	17.000
3196/4	134	195	14,6	0,26	1,13	10,1	8,23	229	13.690	< 500	16	13.000
3196/5	167	21,4	13,6	< 0,2	0,49	0,40	1,86	172	< 300	< 500	4,0	1.900
3196/6	732	558	30,7	1,88	1,15	5,37	3,82	713	13.290	< 500	17	10.000
3196/7	914	175	6,86	0,41	0,13	5,64	7,72	397	2.695	< 500	16	3.600
3196/8	372	89,9	11,1	0,75	0,19	1,24	5,18	463	3.749	< 500	16	4.500
3208	94,7	76,2	9.052	0,73	6,72	4,49	2,66	2.677	829	500	—	—
3240	—	8,27	2,48	0,14	0,05	0,25	13,0	242	—	—	—	—
3247	135	171	8,38	< 0,5	0,27	5,43	5,50	415	2.510	< 500	—	—
3251	68,0	5,15	23,3	0,20	1,45	0,03	0,60	40,5	300	500	—	—
3260	87,0	446	15,0	0,32	0,51	27,1	5,02	937	32.830	500	—	—
3261/1	117	761	278	1,06	1,47	15,7	1,65	985	1.295	500	—	—
3261/2	141	25,7	20,2	0,25	0,41	0,30	2,91	160	533	500	—	—
3267/1	253	924	18.213	0,53	4,25	11,5	2,18	1.063	3.290	< 500	—	—
3267/2	277	39,4	37,4	1,08	0,40	2,85	1,56	834	5.430	< 500	—	—
3274/1	317	1.061	34,4	1,18	1,72	10,9	2,71	605	1.132	< 500	8,7	5.000
3274/2	158	3,37	39,4	0,80	0,50	1,05	1,66	111	2.640	< 500	18	5.900
3281	596	312	8,74	< 0,5	1,09	59,5	0,97	9.747	< 300	< 500	—	—
3311	46,1	50,3	15,6	2,54	1,05	0,96	2,93	77,7	517	507	—	—
3322	119	36,2	3,82	< 0,5	0,15	0,67	1,01	150	801	< 500	—	—

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											TOC
	Natrium	Nickel	Blei	Antimon	Thorium	Thallium	Uran	Zink	Phosphor	Schwefel	Glühverlust [%]	
3325/1	55,4	667	8,40	0,71	1,57	7,75	0,97	1.654	1.950	< 500	—	—
3337	75,5	52,3	33,6	1,04	1,09	0,81	4,22	287	5.120	< 500	—	—
3339	41,0	116	4,81	0,08	0,19	0,34	16,8	537	—	—	—	—
3340	333	845	2.582	2,29	1,25	30,0	2,03	2.866	4.860	< 500	—	—
3345	114	136	25,0	0,22	1,16	0,59	25,5	182	4.281	500	—	—
3352/1	972	27,6	37,4	0,20	0,57	0,18	0,28	229	4.093	500	—	—
3352/2	122	522	2,99	0,20	0,13	0,81	4,11	288	9.061	500	—	—
3352/3	484	5,01	19,7	0,35	1,16	5,91	1,23	798	1.410	500	—	—
4001/1	68,2	937	12,6	3,84	0,52	0,16	0,60	574	11.500	< 500	—	—
4001/2	105	11,5	6,98	< 0,5	1,00	0,05	0,63	144	4.950	1.190	—	—
4001/3	58,5	20,5	9,9	0,52	2,13	0,09	0,56	40,3	1.190	5.340	—	—
4019	68,0	43,4	64,6	0,73	3,65	0,18	0,71	220	< 300	< 500	2,3	< 1200
4098	< 25	9,38	14,9	< 0,5	0,74	5,29	0,27	18,7	< 300	< 500	—	—
4129	47,0	5,56	2,98	< 0,5	0,22	0,21	0,35	17,7	5.270	< 500	—	—
4157	493	41,6	11,0	0,88	0,64	4,39	0,24	245	2.240	< 500	—	—
4167	61,2	14,9	3,65	0,72	0,23	0,04	0,06	96,3	876	< 500	15	3.600
4192	62,6	8,66	13,7	0,20	1,20	0,02	0,18	181	2.550	500	—	—
4199	40,2	13,9	11,1	0,38	1,28	0,07	0,90	112	3.718	500	—	—
5011/1	50,7	17,6	8,74	0,20	2,22	0,15	0,46	19,7	—	—	—	—
5011/2	155	15,9	14,7	0,93	1,82	0,12	1,36	222	359	780	—	—
5051	133	45,8	29,0	0,24	5,65	0,17	1,45	112	—	—	—	—
5077	55,7	0,70	2,91	0,07	0,48	0,03	0,53	22,0	—	—	—	—
5090	111	43,6	1,17	< 0,5	0,08	0,04	0,82	35,4	25.700	< 500	—	—
5098	29,4	3,89	2,69	0,04	0,18	0,02	0,27	10,3	—	—	—	—
5100	65,3	1,51	3,72	0,20	0,36	0,06	0,32	44,3	300	500	—	—
5243	289	13,2	10,3	0,21	2,02	0,07	1,02	126	—	—	—	—
5303	104	8,62	15,2	0,10	0,31	0,05	1,81	188	—	—	—	—
5323	43,3	23,1	13,2	< 0,2	1,95	1,22	0,34	29,0	< 300	< 500	0,7	< 800
5332/1	239	47,7	24,1	0,18	2,12	0,16	12,6	285	—	—	—	—
5332/2	296	39,4	30,1	0,18	2,26	0,13	10,1	418	—	—	—	—
5332/3	235	48,7	24,5	0,15	2,23	0,16	13,0	298	—	—	—	—
5332/4	153	10,5	6,23	0,20	0,73	0,04	2,86	114	—	—	—	—
5332/5	439	11,4	5,72	0,23	0,77	0,08	4,02	55,5	—	—	—	—
5332/6	1.817	11,9	6,40	0,40	0,89	0,10	4,49	77,4	—	—	—	—
5334	120	44,3	18,1	0,62	2,23	0,30	87,7	1.419	3.143	< 500	16	31.000
5356/1	113	7,34	3,54	< 0,5	0,18	0,05	0,42	178	< 300	< 500	—	—
5356/2	268	2.612	21,9	239	0,59	2,06	5,16	12.913	< 300	< 500	—	—
5378	76,7	181	5,93	38,3	0,21	0,10	3,19	1.153	490	500	—	—
5405	—	0,70	6,79	0,05	0,09	0,03	0,56	21,3	—	—	—	—
5407	73,2	16,7	3,34	0,13	0,38	0,07	35,6	177	—	—	—	—

130 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]											
	Natrium	Nickel	Blei	Antimon	Thorium	Thallium	Uran	Zink	Phosphor	Schwefel	Glühverlust [%]	TOC
5408	—	2,23	2,16	0,03	0,15	0,05	1,87	46,9	—	—	—	—
5410/1	94,2	97,9	25,2	0,39	2,73	0,33	446	1.022	—	—	—	—
5410/2	104	110	26,6	0,45	2,78	0,36	427	1.097	—	—	—	—
5413	108	74,2	5,49	< 0,5	0,63	0,07	15,0	567	2.080	< 500	—	—
5414	—	44,5	9,35	0,07	0,12	0,03	0,44	43,0	—	—	—	—
5425	39,7	2,83	0,74	< 0,2	0,08	0,02	0,22	16,0	< 300	< 500	0,3	< 1800
6013	—	64,2	1,73	1,17	0,04	0,12	1,18	50,4	—	—	—	—
7002	353	5,88	8,41	< 0,5	1,09	0,03	0,35	23,9	7.940	< 500	—	—
7014	33,8	9,7	10,2	0,23	1,80	0,03	2,18	72,1	—	—	—	—
7027	317	23,8	15,5	1,18	2,01	0,11	1,51	89,2	7.050	< 500	—	—
7053	229	4,84	5,04	0,31	0,78	0,04	0,30	14,9	12.690	500	—	—
7070/1	99,2	6,59	33,0	< 0,5	0,96	0,03	0,49	45,2	5.690	< 500	—	—
7070/2	243	11,6	5,07	< 0,5	2,05	0,05	1,89	37,4	9.240	< 500	—	—
7070/3	349	16,7	7,36	0,62	2,34	0,12	0,63	52,1	8.060	1.320	—	—
7160	73,3	4,20	9,12	< 0,5	0,30	< 0,03	0,19	141	6.950	< 500	—	—
7186	89,7	31,5	21,0	0,58	1,16	0,05	5,92	171	—	—	—	—
7198	40,1	10,8	10,8	0,49	1,46	0,02	1,47	24,3	—	—	—	—
7230	88,1	35,9	6,28	0,50	0,47	0,11	0,27	170	6.716	500	—	—
7308	—	< 0,7	7,93	0,10	0,17	0,02	0,07	32,9	—	—	—	—
7310	—	11,3	5,80	0,11	0,06	0,03	0,17	303	—	—	—	—
7311	—	3,74	7,53	1,39	0,33	0,08	0,61	32,2	—	—	—	—
7336	—	0,70	0,28	0,20	0,02	0,02	0,06	4,59	—	—	—	—
7338	93,7	34,5	29,8	1,99	0,93	0,21	7,41	687	—	—	—	—
7373	24,7	35,6	12,5	0,81	1,25	0,30	1,20	133	300	500	—	—
8104	7.859	17,1	23,6	1,27	16,9	0,28	5,13	178	2.950	< 500	—	—
8113	571	9,24	22,5	4,08	3,08	0,04	0,79	133	1.710	1.100	—	—
8217		32,0	4,92	1,29	2,04	0,11	2,40	65,0	—	—	—	—
8232	35,7	28,2	4,74	1,40	0,12	0,24	1,48	430	864	< 500	—	—
9908	5.590	434	56,6	0,54	10,5	0,86	40,6	4.318	15.290	884	19	38.000

D.3 Schlämme aus der Mineralwasseraufbereitung

D.3.1 Arsen bis Eisen

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]							
	Arsen	Bismut	Calcium	Cadmium	Kobalt	Chrom	Kupfer	Eisen
70011	< 0,7	< 0,017	1.043	< 0,07	0,43	< 1,7	1,84	816
50002	33,6	< 0,017	1.457	< 0,07	< 0,04	1,78	7,91	276.751
70005	331	< 0,017	13.606	< 0,07	< 0,04	< 1,7	12,9	207.183
80002	1.323	< 0,017	14.435	< 0,07	24,4	2,57	11,0	218.244
70007	37,7	< 0,017	20.901	< 0,07	< 0,04	2,38	28,4	197.158
70001	225	0,02	10.017	< 0,07	4,95	20,6	11,0	176.357
40002	0,74	< 0,017	20.733	< 0,07	0,96	4,06	101	220.337

D.3.2 Magnesium bis Zink

REx.-Nr.	Schwermetalle [mg/kg]								
	Magnesium	Mangan	Nickel	Blei	Antimon	Thorium	Thallium	Uran	Zink
70.011	55,5	146	< 0,7	11,5	0,03	0,69	0,02	0,22	5,55
50.002	455	43,7	< 0,7	0,66	< 0,017	0,00	0,01	0,01	2,71
70.005	1.138	664	< 0,7	2,79	3,03	0,15	0,01	1,77	7,74
80.002	1.481	6.798	3,93	2,63	2,06	0,14	0,15	0,86	31,9
70.007	2.333	101	1,02	1,58	0,03	0,01	0,01	0,18	81,5
70.001	5.131	415	11,1	3,33	0,33	2,10	0,04	1,43	35,0
40.002	1.966	4.758	1,13	6,16	0,07	0,47	0,03	0,17	8,95

132 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

E Masterarbeit – Frau Anja Landgraf

134 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Masterstudiengang Umweltschutz

Ein Modell der Fachhochschulen

Esslingen, Nürtingen, Reutlingen, Stuttgart

Vorkommen und Verhalten
natürlicher Radionuklide
bei Gewinnung, Aufbereitung
und Verbrauch von Trinkwasser
an einem ausgesuchten Standort

Anja Landgraf

Master Thesis

Sommersemester 2005

Nürtingen, Juli 2005

Vorkommen und Verhalten
natürlicher Radionuklide
bei Gewinnung, Aufbereitung
und Verbrauch von Trinkwasser
an einem ausgesuchten Standort

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz

Master Thesis im Sommersemester 2005 von

Anja Landgraf

vorgelegt bei

**Prof. Hohnecker (FH Stuttgart) &
K. Coy (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz)**

Verzeichnisse

1	Einleitung	139
2	Voraussetzungen für die Untersuchung	140
2.1	Rechtliche Grundlagen	140
2.2	Natürliche Radioaktivität	140
2.3	Geochemie der Radionuklide	142
2.3.1	Uran	142
2.3.2	Thorium	144
2.3.3	Radium	144
2.3.4	Radon	145
3	Methoden zur Ermittlung der Aktivität natürlicher Radionuklide	147
3.1	Alpha-Spektrometrie	147
3.1.1	Grundlagen	147
3.1.2	Probenaufbereitung	147
3.1.3	Messung	150
3.2	Gamma-Spektrometrie	151
3.2.1	Grundlagen	151
3.2.2	Probenvorbereitung	151
3.2.3	Messung	152
3.3	ICP-MS	152
4	Untersuchungsgebiet im Freistaat Bayern	155
4.1	Hydrogeologische Verhältnisse	155
4.2	Trinkwasser	156
4.2.1	Wasserwerk 3168	156
4.2.2	Probenahme	157
4.3	Abwasser und Klärschlamm	158
4.3.1	Kläranlage	158
4.3.2	Probenahme	159
5	Vorkommen und Verhalten natürlicher Radionuklide im Untersuchungsgebiet	161
5.1	Radonbestimmung mit der Gamma-Spektrometrie	161
5.2	Uranbestimmung mit Alpha-Spektrometrie & ICP-MS	165
5.2.1	Wasserproben	165
5.2.2	Schlammproben	168
5.3	Thoriumbestimmung mit Alpha-Spektrometrie	170
5.4	Radium und weitere Radionuklide	170
5.5	Auswertung	172
5.5.1	Diskussion der Ergebnisse	172
5.6	Dosisleistung	176
6	Zusammenfassung	178
7	Literatur	180

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
a_{KT}	Aktivitätskonzentration in der Kautex-Flasche
aq	aquaeous - flüssig
a_{RF}	Aktivitätskonzentration in der radondichten Flasche
C_r	Konzentration des Radionuklids im Wasser
EU	Europäische Union
EW	Einwohnergleichwerte
Gew. %	Gewichtsprozente
g_i	Dosiskoeffizient
h	Häufigkeit (h_i Impuls, h_{ch} chemische Häufigkeit, h_m Gewichtsverteilung)
H_e	effektive Körperdosis
I	Impulszahl
ICP-MS	induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie
k	Korrekturfaktor für die Radonbestimmung
L	Avogadro-Konstante
LfU	Landesamt für Umweltschutz
M	Molare Masse
n.b.	nicht bestimmt
n.n.	nicht nachweisbar
NWG	Nachweisgrenze
PE	Polyethylen
PN	Probenahme
RW	Rohwasser
s	solid – fest
$T_{1/2}$	Halbwertszeit
Tab.	Tabelle
TG	Trockengewicht
TWA	Trinkwasseraufbereitungsanlage
U_w	Wasserkonsum
GM	
MSG	
MT	Bezeichnung für die Orte im Untersuchungsgebiet (verschlüsselt)
WM	
WMT	

1 Einleitung

Eines der höchsten und schützenswertesten Güter unserer Zeit ist das Trinkwasser. Jeder benötigt Wasser in vielfältigster Weise – ein Leben ohne Wasser ist nicht möglich.

Es wird durch Quellen und Brunnen zutage gefördert, in großen Talsperren gesammelt oder an Flüssen durch Uferfiltration gewonnen. Seine Inhaltsstoffe unterscheiden sich je nach Herkunft des Wassers und sind auf der einen Seite essentiell für uns Menschen, können aber auch Gesundheitsschäden hervorrufen. Der Gesetzgeber regelt in der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch und legt Grenzwerte für bestimmte Parameter fest. Nach der Einspeisung ins Netz steht es dem Verbraucher zur Verfügung, der es nach dem Gebrauch zum großen Teil als Abwasser wieder abgibt. Auf die Art und Weise der Verwendung durch den Verbraucher hat der Gesetzgeber keinen Einfluss, bei der Einleitung in die Kanalisation müssen allerdings die Vorgaben der Abwasserverordnung (AbwV 2002) eingehalten werden. Durch Kläranlagen wird das Wasser gereinigt und kann, in den Vorfluter eingeleitet, wieder am Wasserkreislauf teilnehmen.

Ebenso natürlich wie das Wasser ist die terrestrische natürliche Radioaktivität, die durch die primordialen Radionuklide in der Erdkruste hervorgerufen wird. Sie ist allgegenwärtig und existiert seit der Entstehung der Erde. Radioaktive Elemente wie Uran, Thorium und Radium sind in Spuren in fast allen Gesteinen enthalten, sie bilden eigene Minerale oder werden in Mischkristalle eingebaut. Verwitterungsprozesse bewirken eine Verteilung im Boden und über die Pflanzen bis zum Menschen hin. Radionuklide liegen im Boden frei oder in Verbindungen vor. Im Wasser sind sie gelöst oder partikulär und in der Luft gasförmig und an Aerosole gebunden. Ihre Gehalte unterscheiden sich in Abhängigkeit von den geogenen Untergrundverhältnissen. Die Bevölkerung erfährt durch natürliche Radionuklide und die kosmische Strahlung eine äußere und eine innere Strahlenexposition. Als innere Exposition seien die Inhalation von Radon und die Ingestion von Radionukliden durch Nahrung und Trinkwasser genannt.

Natürliche radioaktive Stoffe im Trinkwasser tragen in der Regel nur geringfügig zur Strahlenexposition der Bevölkerung bei. In Gebieten mit hohen Gehalten an natürlichen Radionukliden im Untergrund kann es jedoch zu einer erhöhten Dosisbelastung kommen. Von Interesse sind auch die Rückstände und Schlämme, die bei der Trinkwasseraufbereitung und in den Kläranlagen anfallen. Sie müssen bei erhöhten Radionuklidgehalten überwacht und entsprechend entsorgt werden.

Diese Arbeit widmet sich dem Thema der natürlichen Radioaktivität in der Trinkwasseraufbereitung. An einem Wasserversorgungsunternehmen in Nordbayern soll das Trinkwasser und die bei der Aufbereitung anfallenden Rückstände auf natürliche Radionuklide hin untersucht und damit eine Abschätzung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch die Aufnahme von Trinkwasser getroffen werden. Ferner soll überprüft werden, ob die bei der Trinkwasserbehandlung anfallenden Schlämme Gehalte an radioaktiven Stoffen aufweisen.

2 Grundlagen für die Untersuchungen

2.1 Rechtliche Grundlagen

Die Grundlage für den Vollzug der Strahlenschutzverordnung bilden die EURATOM – Grundnormen (96/29/EURATOM). Darin wurde erstmals die Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide, die nicht auf Grund ihrer Radioaktivität verarbeitet werden, in den Geltungsbereich aufgenommen.

Mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung im Jahr 2001 (StrlSchV 2001) wurden diese Richtlinien in Bundesdeutsches Recht übernommen. Kapitel 3 widmet sich dem „Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen“. Als Richtwert der effektiven Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung wurde 1 mSv pro Kalenderjahr festgelegt.

Die ebenfalls 2001 novellierte Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) legt Überwachungswerte für den Parameter Radioaktivität wie folgt fest:

Tritium	100 Bq/L
Gesamtrichtdosis	0.1 mSv/a

Dabei gehen Tritium, Kalium-40, Radon und Radonfolgeprodukte nicht in die Betrachtung der Gesamtrichtdosis ein.

2.2 Natürliche Radioaktivität

Die Erscheinung der Radioaktivität ist durch die spontane Umwandlung instabiler Atomkerne unter Energieabgabe gekennzeichnet. Die Abgabe der Energie erfolgt dabei in Form ionisierender Strahlung, die entweder direkt vom Atomkern ausgeht oder indirekt durch die Kernumwandlung in der Atomhülle erzeugt wird (STOLZ 1990).

In vielen Fällen sind die durch radioaktive Umwandlung erzeugten Atomkerne selbst wieder radioaktiv. Einige Radionuklide zerfallen nicht unmittelbar zu einem stabilen, nicht-radioaktiven Atom, sondern durchlaufen Umwandlungsprozesse natürlicher Zerfallsreihen. Insgesamt 46 natürlich radioaktive Nuklide gehören drei genetisch zusammenhängenden Umwandlungsreihen an. Am Anfang dieser Reihen stehen die außerordentlich langlebigen Mutternuklide U-238, U-235 und Th-232. In den natürlichen Umwandlungsreihen gehen die einzelnen Glieder durch aufeinander folgende α - und β -Prozesse ineinander über. Wenn sich ein gebildeter Folgekern nicht im Grundzustand befindet, tritt auch γ -Strahlung auf. Die Kerne einiger Nuklide können sich entweder durch Emission von α - oder β -Teilchen um-

wandeln. Infolge solcher dualer Umwandlungen treten in den Reihen mehrmals Verzweigungen auf (STOLZ 1990).

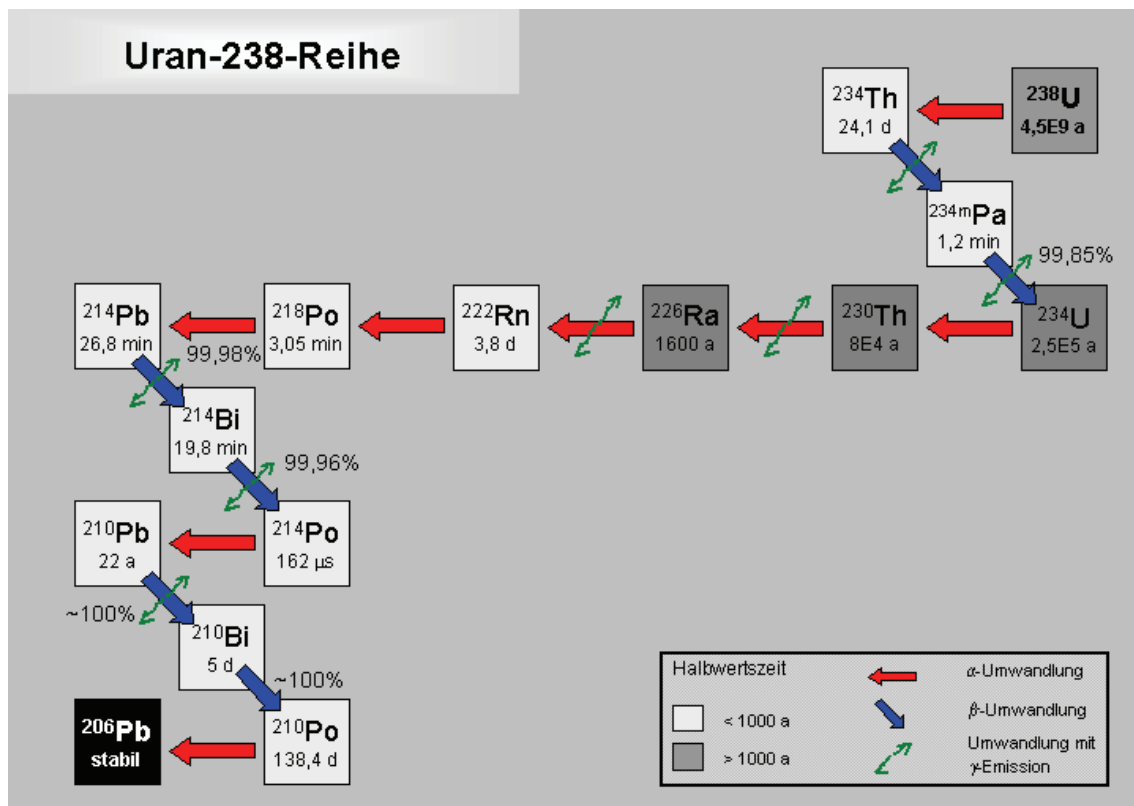


Abb. 2.1: Uran-Radium-Zerfallsreihe (DEGERING 2001)

Überall auf der Erde kommen natürliche Radionuklide in unterschiedlichen Konzentrationen vor. Bei der Überwachung der Umweltradioaktivität interessieren auch die natürlichen Nuklide der radioaktiven Zerfallsreihen von U-238 (siehe Abb.2.1), Th-232 (siehe Abb.2.2) und in geringerem Maße auch die von U-235 (Actinium-Reihe).

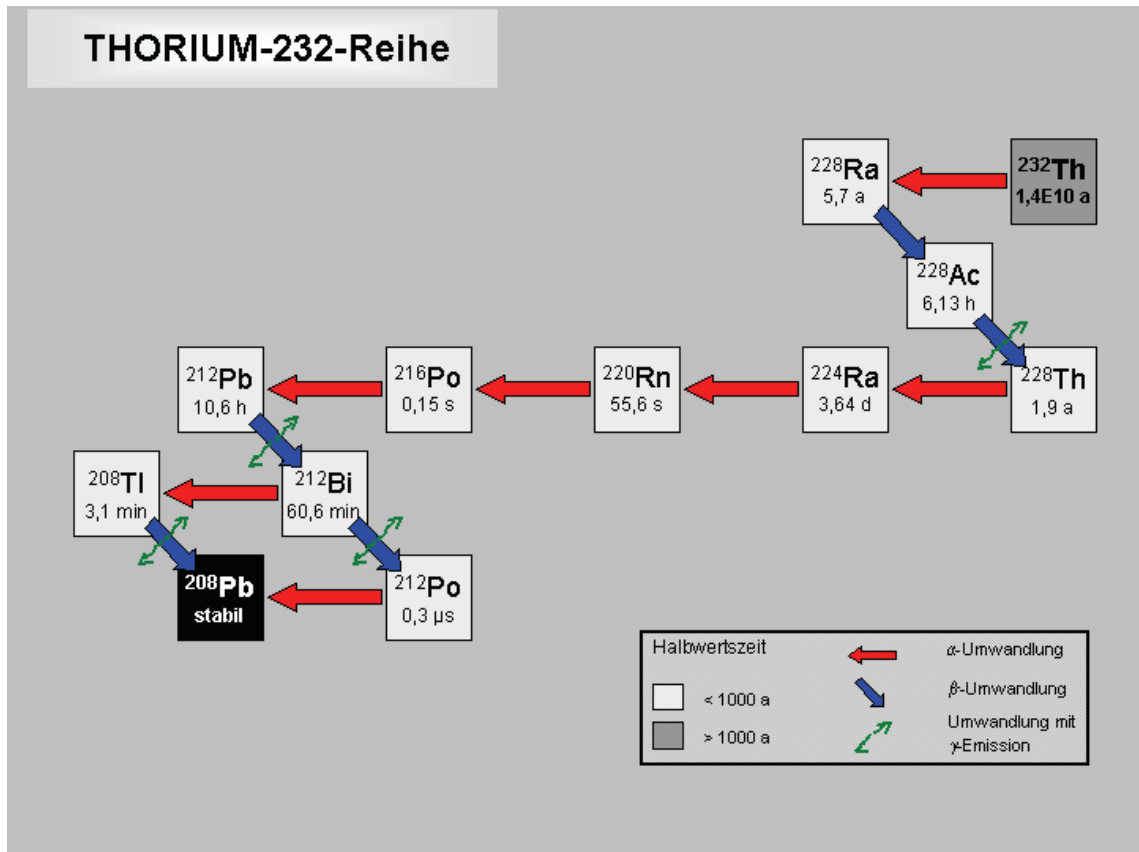


Abb. 2.2: Thorium-Zerfallsreihe (DEGERING 2001)

Die Schwankungen der Gehalte an natürlichen Radionukliden in einer Gesteinsart können auf Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zurückgeführt werden. Schwankungen der Konzentration von Radonisotopen in den oberen Bodenschichten werden durch geologische Faktoren sowie meteorologische Faktoren beeinflusst.

Seit Wasser auf der Erde existiert, sind in ihm natürliche Radionuklide vorhanden. Diese werden ständig durch Grund- und Oberflächenwasser aus dem Boden gelöst und durch Flüsse in Seen und Meere transportiert. Radionuklide, die von der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre erzeugt werden, gelangen ebenfalls durch Niederschläge zur Erdoberfläche und damit in die Gewässer.

2.3 Geochemie der Radionuklide

2.3.1 Uran

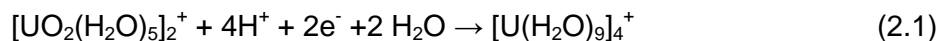
Uran wurde von KLAPROTH 1789 entdeckt und 1841 erstmals von PÉLIGOT hergestellt. Es kommt oft zusammen mit Seltenerdmetallen und in den Mineralen Uraninit (UO_2) und Carnotit ($\text{K}_2[\text{UO}_2]_2[\text{VO}_4]_2 \cdot 1-3\text{H}_2\text{O}$) vor. In der wässrigen Phase tritt Uran hauptsächlich in den Oxidationsstufen +IV und +VI auf. Im vierwertigen Zustand zeichnet es sich durch eine ge-

ringe Löslichkeit aus, sechswertig ist es wesentlich besser löslich und geochemisch sehr mobil.

Durch die Anwesenheit von gelöstem Carbonat, sowie hohen Kohlenstoffgehalten, zum Beispiel in Sedimenten, erhöht sich die Löslichkeit von Uran in Grundwasser. Es kommt dann zur Bildung von Carbonatkomplexen wie $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ und $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$. Unter einem für Grundwasser typischen CO_2 -Druck von 10^{-2} bar dominieren diese stabilen Komplexe ab einem pH-Wert von etwa 5. Im Gegensatz zu $\text{U}(\text{OH})_4^0$ sind die Carbonatkomplexe unter stark reduzierenden Bedingungen relativ stabil. Wenn hohe Carbonatkonzentrationen im Wasser vorliegen, können bei pH-Werten über 5 die Oxidation von $\text{U}^{4+}(\text{aq})$ und die Lösung von $\text{UO}_2(\text{s})$ bei niedrigen Redoxspannungen auftreten (LANGMUIR 1997).

Uran tritt in der Natur in Form von drei radioaktiven Isotopen auf, die ausnahmslos α -Strahler sind. Den größten Anteil mit 99,3 Gew. % hat dabei U-238 mit einer Halbwertszeit von $4,5 \cdot 10^9$ Jahren. Die geringste Halbwertszeit hat das Tochterprodukt U-234 mit 246.000 Jahren. U-235 hat einen Anteil von 0,7 Gew. % und eine Halbwertszeit von $0,9 \cdot 10^9$ Jahren. Die Ausgangsnuklide für die zwei Zerfallsreihen sind U-238 (siehe Abb.2.1) und U-235.

Für die Chemie des Urans in Wasser ist die Hydratisierung von elementarer Bedeutung:



Uranyl-Kationen neigen dazu insbesondere mit Sulfat-, Carbonat- und Chloridionen Komplexe in wässriger Lösung zu bilden. Freie Uranyl-Kationen dominieren nur bei pH-Werten unter 3.

Die Hintergrundwerte für Uran in Böden liegen bei etwa 2,7 g/t, können jedoch um einiges höher sein, wenn Huminstoffe in Sedimenten und Böden enthalten sind. In diesem Falle wird Uran deutlich angereichert, so dass beispielsweise Torf, Braunkohle und Steinkohle höhere Urangehalte aufweisen. Das Uran wird in Form von Uranyl-Humaten oder Uranyl-Fulvaten durch Kationenaustausch oder Sorption fixiert (ZIELINSKY et al. 1987).

Die Urangehalte im Grundwasser können nur zusammen mit den Konzentrationen der anderen Radionuklide betrachtet werden. Durch Auswertung der Ungleichgewichte der einzelnen Nuklide zueinander, können Rückschlüsse auf dynamische und hydrogeochemische Prozesse gezogen werden. Das hängt mit den unterschiedlichen Löslichkeiten der Radionuklide zusammen (MERKEL & SPERLING 1998).

Zur toxischen Wirkung des Urans, die Leber- und Nierenschäden hervorrufen kann, kommt die radioaktive Wirkung hinzu. Als α -Strahler hat Uran nur eine geringe Reichweite und ruft daher Schäden hervor, wenn es vom Körper aufgenommen wird. Die Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) enthält keinen festgelegten Grenzwert für Uran. Die Weltgesundheitsorganisation WHO legte 1998 einen lebenslang duldbaren Richtwert in der Höhe von nur $2 \mu\text{g U/L}$ fest, berichtigte diesen aber 2003 auf $15 \mu\text{g U/L}$ (WHO 1998, 2003). In einem Vorschlag des Umweltbundesamtes von 2005 hält dieses für Uran im Trinkwasser einen Richtwert von $10 \mu\text{g/L}$ Uran als gesundheitlich lebenslang duldbar. Daraus ergibt sich ein Maß-

nahmewert von 20 µg/L, der gesundheitliche Sicherheit während einer Expositionsdauer von bis zu 10 Jahren böte (KONIETZKA 2005).

2.3.2 Thorium

Im Jahre 1829 entdeckte BERZELIUS ein Element, das er nach dem germanischen Donnergott Thor als Thorium benannte.

Thorium kommt in der Natur hauptsächlich vierwertig vor und bildet schwerlösliche Oxidhydrate und Carbonate. Die Oxidationsstufen +III und +II sind sehr selten. Es bildet mit Th-232 eine eigene Zerfallsreihe, tritt aber auch als Tochternuklid Th-234 und Th-230 in den Uran-Zerfallsreihen auf (siehe Abb. 2.1).

In der Kruste liegt Thorium überwiegend als Th-232 mit Gehalten von 8,5 g/t vor. Es ist eher selten in Lagerstätten angereichert, sondern verteilt sich gleichmäßig in der Lithosphäre. Thorium ist als Spurenelement in allen magmatischen, metamorphen und sedimentären Gesteinen enthalten, aufgrund seines ausgeprägten lithophilen Charakters aber überwiegend Bestandteil silikatischer Gesteine. In der Erdkruste ist das Verhältnis von Thorium zu Uran in etwa 3.5 zu 1 (WEDEPOHL 1978).

Die akute Toxizität von Thorium ist gering, sie ist im Wesentlichen auf die Radiotoxikologie zurückzuführen. Im menschlichen Knochen sind 0.002 bis 0.012 mg/kg Thorium enthalten. Die tägliche Aufnahme wird mit 0.05 bis 3 µg angenommen (EMSLEY 1992).

Über Thorium in aquatischen Systemen liegen nur sehr wenige Informationen vor. Das kann an der geringen Löslichkeit des Thoriums und den dadurch verhältnismäßig kleinen Konzentrationen liegen (MERKEL & SPERLING 1998).

Thoriumisotope sind überwiegend α -Strahler und gefährden Organismen vor allem, wenn sie inkorporiert werden. Aufgrund der geringen Löslichkeit in Wasser ist die Strahlenexposition, die von Thorium durch Aufnahme über das Medium Wasser ausgeht, relativ gering.

2.3.3 Radium

Radium wurde nach dem lateinischen Wort *radius* für „das Strahlende“ benannt. Marie und Pierre Curie wiesen es 1898 erstmals in Pechblende nach. Es gibt 25 bekannte radioaktive Isotope des Radiums im Bereich von Ra-206 bis Ra-230, die bis auf Ra-228 alle durch α -Zerfall in andere Nuklide umgewandelt werden.

Der Gehalt von Ra-228 im Grundwasser ist aufgrund der meist höheren Konzentration des Thoriums im Gestein größer, als der des U-238 Tochternuklids Ra-226. Ra-228 zerfällt jedoch mit 5.7 Jahren wesentlich schneller als Ra-226 ($T_{1/2} = 1.600$ a), so daß Ra-228 im Grundwasser in der Regel in geringeren Konzentrationen als Ra-226 vorkommt. (MERKEL & SPERLING 1998).

Aufgrund von Sorption hat Radium eine sehr begrenzte Mobilität und liegt nur in der Oxidationsstufe + II vor. Wegen der sehr geringen Radiumgehalte von Gesteinen wird das Löslichkeitsprodukt von Radiumverbindungen nur selten überschritten (KEMPSKI et al. 1996). Radium wird von organischen Komplexbildnern kaum gebunden und liegt bei pH-Werten zwischen 4 und 8 hauptsächlich in Form von Ra^{2+} vor.

In aquatischen Systemen ist Radium aufgrund seines geringen Vorkommens in der Erdkruste nur in kleinen Mengen vorhanden. Durch Sorption von $RaSO_4^0$ an den Wandungen von Probenahmeflaschen und Filtern, können zudem beträchtliche Verluste und Analysefehler auftreten.

Im Boden wird Radium aufgrund guter Sorptionseigenschaften vermehrt zurückgehalten. Dabei richtet sich die Konzentration des Radiums im Wasser vor allem nach den Gehalten in den anstehenden Gesteinen.

2.3.4 Radon

Radon ist ein natürlich vorkommendes, radioaktives Edelgas, das in allen Böden und Gesteinen, in Wässern und in der Luft vorhanden ist. Es wird in den Zerfallsreihen von Uran und Thorium aus seinem Mutternuklid Radium ständig neu gebildet. Der deutsche Physiker Ernst DORN entdeckte 1900 ein radioaktives Gas, welches er Radium-Emanation nannte. Zwischen 1908 und 1910 isolierten RAMSEY und GRAY das Gas, analysierten sein Spektrum und bestimmten die Dichte. Im Jahre 1931 legte schließlich die „Internationale Kommission für Radioaktivität“ Radon als den endgültigen Namen für das Element fest.

Von Radon sind 28 verschiedene Isotope bekannt, die alle radioaktiv sind und Halbwertszeiten zwischen einigen Stunden und wenigen Nanosekunden haben. Rn-222 hat mit 3.8 Tagen die größte Halbwertszeit.

Fast alle Gesteine und Böden weisen in unterschiedlichen Konzentrationen Uran und Radium auf und sind demzufolge Radon-Quellen. Saure Magmatite haben aufgrund des verstärkten Einbaus von Uran in ihre Minerale sehr hohe Radongehalte. In Sedimentgesteinen und Metamorphiten sind nur geringe Radionuklidaktivitäten messbar, die zudem kein einheitliches Muster erkennen lassen. Carbonate haben unterdurchschnittliche Radionuklidgehalte (KEMPSKI et al. 1996).

Die Radon-Freisetzung aus der festen Phase wird als Emanation bezeichnet. Einen großen Einfluß auf die Emanation hat die Korngrößenverteilung. Durch die Verwitterung der Gesteine vergrößert sich die innere Oberfläche, welche für Diffusions- und Rückstoßprozesse bei der Radon-Freisetzung zur Verfügung steht. Während der Verwitterungsprozesse kommt es zudem zur Anreicherung von Zirkon ($Zr[SiO_4]$), Apatit ($Ca_5[(F,Cl,OH)I(PO_4)_3]$) und Monazit ($Ce[PO_4]$), jenen Mineralen in denen der isomorphe Einbau radioaktiver Elemente besonders hoch ist. Ein hoher Wasseranteil in Böden und Gesteinen unterstützt zusätzlich die Radonfreisetzung, wobei die Differenz zwischen trockenem und feuchtem Zustand bis um

den Faktor 5 differieren kann. Gesteine sind, im Gegensatz zu Böden mit einer größeren inneren Oberfläche, schlechte Emanatoren (KEMPSKI et al. 1996).

Wenn sich Radon durch Gesteine und Böden bewegt wird dies als Migration bezeichnet, welche durch die geomechanischen sowie die hydrologischen Verhältnisse im Untergrund beeinflusst wird. Der Transport kann zum einen durch Diffusion durch Kapillaren oder Feinporen erfolgen, aber auch passiv mit Trägermedien wie Grundwasser oder Bodengasen. Dies wird dann als Advektion bezeichnet. Bei der Diffusion ist ein Dichte- oder Konzentrationsunterschied maßgebend, die Reichweite hängt hauptsächlich von der Konnektivität des Porenverbandes ab.

Für das Auftreten geochemischer Radon-Anomalien sind erhöhte Radium-Werte die Ursache. Die Entstehung struktureller Radon-Anomalien ist hingegen im advektiven Radonanteil begründet, was zu einer sehr inhomogenen Radon-Verteilung mit Verschleppung von der Quelle führen kann (KEMPSKI et al. 1996).

Die Radongehalte in oberirdischen Gewässern sind in der Regel sehr gering, da ein Austausch mit der Atmosphäre stattfindet. Das Radon im Grundwasser kann zum einen aus dem im Wasser gelösten Radium, aus dem Radium in der Gesteinsmatrix oder mit dem Grundwasserstrom aus entfernteren Gebieten stammen. Aus diesem Grund wird es nicht zu einem Konzentrationsgleichgewicht zwischen Radium und Radon im Grundwasser kommen. Die Radon-Aktivitätskonzentration im Grundwasser liegt im Bereich von 4 bis 400 Bq/L (MERKEL & SPERLING 1998).

3 Methoden zur Ermittlung der Aktivität natürlicher Radionuklide

3.1 Alpha-Spektrometrie

3.1.1 Grundlagen

Die Alpha-Spektrometrie ist eine energieselektive Messung der von der Probe emittierten Alpha-Teilchen. Sie bietet die Vorteile einer hochauflösenden Messung, so daß die nuklid-spezifische Energie der Alpha-Teilchen erfasst und alle alpha-strahlenden Isotope eines Elementes gemeinsam gemessen werden können. Durch die niedrige Untergrundzählrate und hohe Zählzählrohr sind sehr niedrige Nachweisgrenzen, im Bereich kleiner 1 mBq/Probe, erzielbar. Mit langen Messzeiten kann der zählstatistische Fehler minimiert und die Nachweisgrenze reduziert werden, so daß auch „low-level“ Messungen möglich sind.

Ein Problem der Alpha-Spektrometrie liegt in der geringen Reichweite der Alpha-Strahlen. Es gibt nur wenige Proben, beispielsweise Filter, die direkt gemessen werden können. Bei Boden- oder Wasserproben wird praktisch die gesamte Strahlung in der Matrix absorbiert und kann nicht vom Detektor erfasst werden. Daher wird die Probe aufbereitet und die alpha-strahlenden Nuklide auf radiochemischen Wege von der Matrix abgetrennt und angereichert. Auf dem „masselosen“ Messpräparat sind die Radionuklide wenige μm dick konzentriert (VOGL 1992).

3.1.2 Probenaufbereitung

Die Aufbereitung der Wasser- und Schlammproben für die Messungen von Uran und Thorium richtete sich nach den Arbeitsanweisungen (siehe Anhang A1 und A2) des LfU in Kulmbach. Um die chemische Ausbeute der Probe bestimmen zu können, wird vor der Behandlung ein Tracernuklid zugegeben. Diese Nuklide müssen sich bei der Aufbereitung chemisch gleich verhalten, dürfen in der Probe aber nicht vorhanden sein. Zudem dürfen sich die Energielinien der Alpha-Teilchen des Tracernuklids nicht mit den Linien der zu bestimmenden Nuklide überlagern. Als Tracer für die Uran- bzw. Thoriumbestimmung werden die künstlichen Radionuklide U-232 und Th-229 eingesetzt. Im ersten Arbeitsschritt werden die Radionuklide vom Großteil der Probenmatrix separiert:

Aus den Wasserproben lassen sich die alpha-strahlenden Nuklide durch Mitfällung mit Ca^{2+} -Trägerlösung (50 mg Ca^{2+}/ml , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) und Phosphat-Lösung (300 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{ml}$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ in H_2O) abtrennen und aufkonzentrieren. Hexavalente Uranylkomplexe lagern sich dabei adsorptiv am Calciumphosphat an.

Im folgenden Arbeitsschritt werden die Schlammproben bei 500 °C zur Zerstörung der organischen Matrix verascht und anschließend mit Fluss- und Salpetersäure (0.9M HF/ 8M HNO₃) ausgelaugt und aufgeschlossen. Beide Rückstände sollten danach mit Salpetersäure und Wasserstoffperoxid abgeraucht werden, um verbliebene organische Restbestandteile vor der Extraktionschromatographie zu eliminieren.

Die Extraktionschromatographie (dritter Arbeitsschritt) dient der Abtrennung der Uran- und Thoriumisotope und der Reinigung des Probenmaterials von Fremdionen. Diese Methode verbindet die Selektivität der Flüssig-Flüssig-Extraktion mit der einfachen Handhabung der Säulenchromatographie. Bei der Extraktionschromatographie gibt es drei Hauptkomponenten: einen inaktiven Hilfsstoff, die stationäre und die mobile Phase (siehe Abb.3.1).

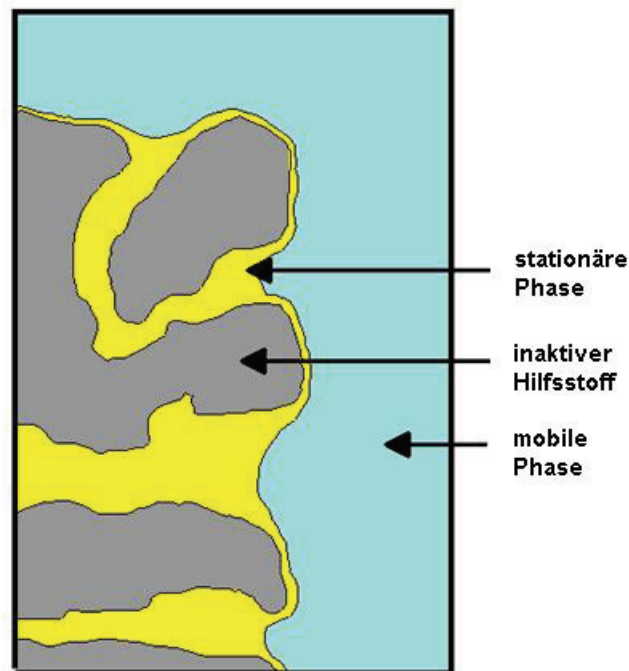


Abb. 3.1: Aufbau der Extraktionschromatographie (HORWITZ et al.1992)

Der inaktive Hilfsstoff besteht üblicherweise aus porösen Silikaten oder einem organischen Polymer in der Partikelgröße von 50 – 150 µm Durchmesser. Als stationäre Phase dienen flüssige Extraktionsmittel, die an Harze gebunden sind (siehe Abb.3.2). Die mobile Phase ist meist eine saure Lösung (HNO₃ oder HCl), aber auch Komplexe und Bioxalat werden teilweise genutzt um die Selektivität zu erhöhen oder stark gebundene Ionen von den Säulen zu waschen (HORWITZ et al. 1992).

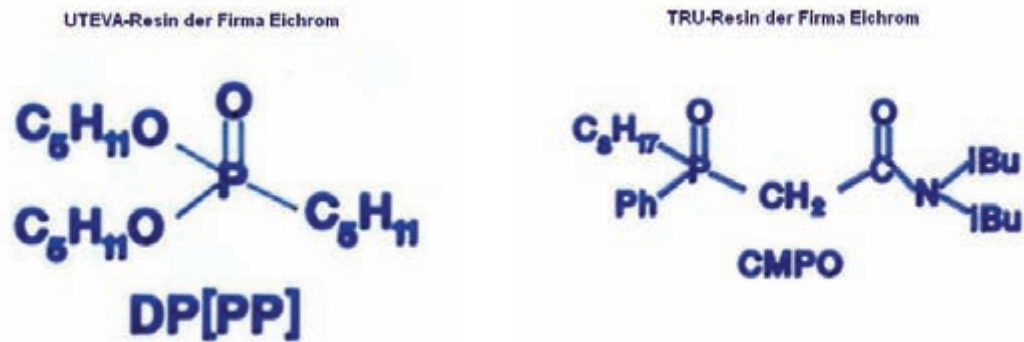


Abb. 3.2: Extraktionsharze mit flüssiger stationärer Phase (EICHROM 2005)

Zunächst wird die Probenlösung in 3M HNO₃/0.5M Al(NO₃)₃ aufgenommen und auf die Säule gegeben. Für die Bestimmung von Uran wird als Extraktionsharz UTEVA-Resin der Firma Eichrom, bei der Thoriumuntersuchung eine Doppelsäule aus TRU- und UTEVA-Resin von Eichrom verwendet. Die in der Lösung befindlichen Ionen werden von den Liganden der stationären Phase komplexiert. Daher müssen die Liganden eine hohe Selektivität in Bezug auf die ausgewählten Radionuklide zeigen, andernfalls würden sie die Säule ungehindert passieren. Im gleichen Maße sollen aber jene Verbindungen eine geringe Affinität bezüglich störender Fremdionen besitzen, damit diese nicht in die stationäre Phase extrahiert werden, sondern aus der Säule ausgewaschen werden können (NOPPER 2003).

Nach der Extraktion werden noch vorhandene Matrixreste mit dem Lösungsmittel der Probe von der Säule gewaschen und anschließend die extrahierten Komponenten eluiert. Als Elutionsmittel wird bei Uran verdünnte Salzsäure und für die Thoriumfraktion Salzsäure oder Bioxalat eingesetzt.

Vor dem letzten Arbeitsschritt - der Elektrodeposition - muss die Lösung mit der Radionuklidfraktion nochmals unter Zugabe von Wasserstoffperoxid und Schwefelsäure abgeraucht werden. Anschliessend wird die Probe auf einen pH-Wert von 2-3 eingestellt und mit Reinstwasser in die Elektrolysezelle überführt. Die elektrochemische Abscheidung beruht auf der Bildung einer dünnen stark alkalischen Schicht auf der Kathode, die durch Entladung von H⁺-Ionen bei hohen Stromdichten (>0.3 A/cm²) hervorgerufen wird. In diese Schicht diffundieren die Ionen, im Idealfall nur Uranyl-Ionen, aus der Lösung hinein. Um eine möglichst vollständige Abscheidung zu erreichen, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein:

- die Anodenfläche soll mindestens doppelt so groß sein wie die Kathodenoberfläche,
- das Elektrolytvolumen ist gering zu halten,
- für eine Wärmeabfuhr an der Kathode ist zu sorgen.

Uran und Thorium werden aus verdünnter Ammoniumsulfatlösung elektrochemisch abgeschieden. Als Kathode dienen Metallplättchen von etwa 2 cm Durchmesser; gewickelte Platindrähte werden als Anoden verwendet. Die Elektrolyse dauert 3 Stunden bei 0.8 – 1 Ampere.

3.1.3 Messung

Die Alpha-Spektrometrie bietet die Möglichkeit verschiedene Isotope eines Elements gleichzeitig qualitativ und quantitativ zu bestimmen. Zur Messung der Alpha-Strahlen genügt eine dünne, strahlenempfindliche Schicht aus Silizium. Die eindringenden Alpha-Teilchen erzeugen Elektronen-Ionen-Paare, deren Anzahl proportional der Energie des Alpha-Teilchens ist.

Zur Messung wurden ionenimplantierte Halbleiterdetektoren mit einer aktiven Fläche von 600 und 900 mm² und einer Auflösung von ca. 30 keV (Halbwertsbreite) verwendet. Der Abstand zwischen Detektor und Präparat lag im mm-Bereich. Zur Übertragung des Messsignals wurde ein Vielkanalanalysator verwendet. Es standen insgesamt 20 Alpha-Kammern von zwei verschiedenen Herstellern zur Verfügung.

Bei den Messpräparaten kommt es zur teilweisen Absorption in den Proben und die Linien einzelner Nuklide können sich verbreitern und überlappen. Wenn zudem die Linien sehr eng beieinander liegen ist eine spektrometrische Trennung oft nicht möglich (VOGL 1992).

Nachfolgend ist ein Alpha-Spektrum der Uranbestimmung von Probe W 806 abgebildet (Abb.3.3). Bei U-232 und U-234 sind deutlich Sättel in den Peaks zu erkennen, die von nahe beieinanderliegenden Hauptlinien kommen.

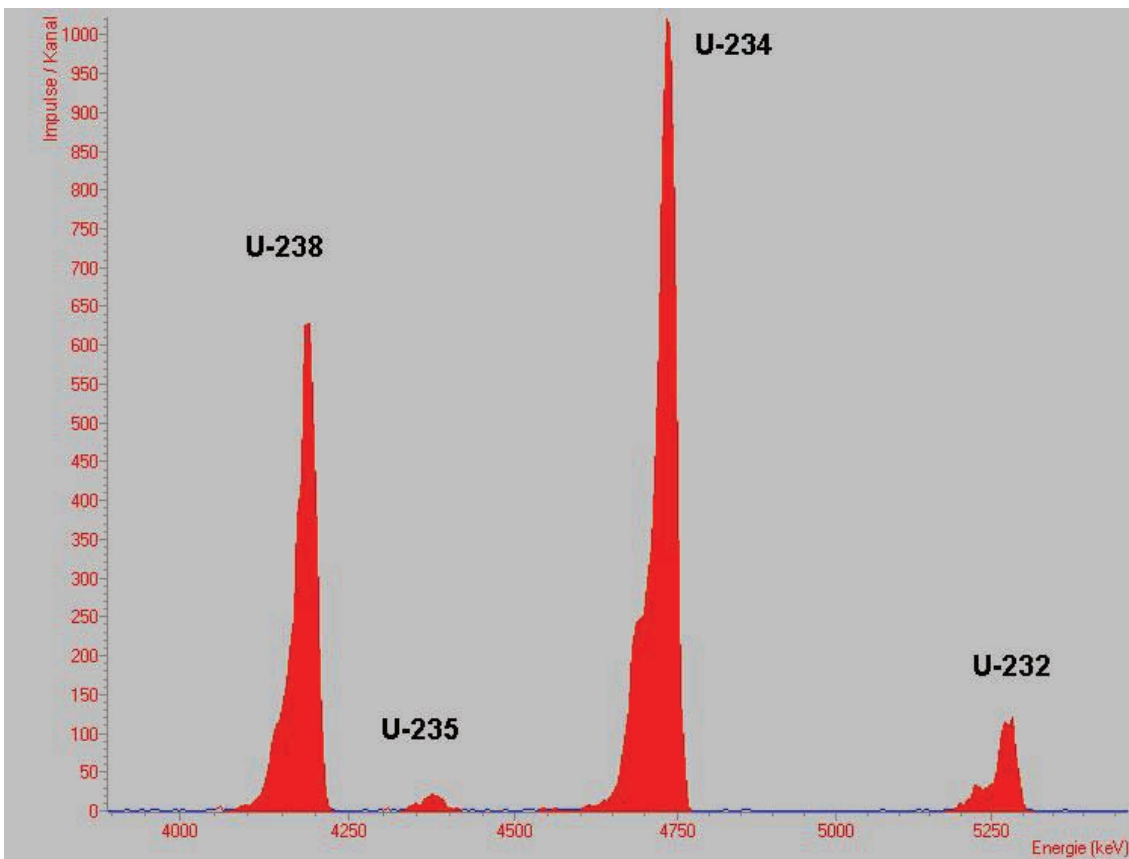


Abb. 3.3: Alpha-Spektrum der Uranmessung von Probe W 806

3.2 Gamma-Spektrometrie

3.2.1 Grundlagen

Ein Großteil der für die Überwachung relevanten natürlichen Radionuklide emittiert Gammastrahlung. Die Bestimmung der Aktivität mittels Gamma-Spektrometrie bietet den Vorteil, daß die Proben direkt messbar sind und eine Aufbereitung der Proben nicht durchgeführt werden muss. Bei geringen Probenmengen sollte also die Gamma-Spektrometrie stets vor der Alpha-Spektrometrie durchgeführt werden.

Die Detektoren haben zudem eine hohe Energieauflösung (ca. 2-3 keV), so daß eine eindeutige Zuordnung der gemessenen Energienlinien zu bestimmten Radionukliden und damit die Analyse von Radionuklidgemischen ohne aufwendige Trennungs- und Extraktionsschritte möglich sind. Die praktische Nachweisempfindlichkeit der Gamma-Spektrometrie liegt bei der Direktmessung im Bereich von 0,1 bis 5 Bq/Messprobe. Sie ist abhängig von der Probenmenge, der Messgeometrie, der nuklidspezifischen Emissionswahrscheinlichkeit der Gammastrahlung und auch von der Qualität des eingesetzten Detektors.

Eine Erhöhung der Nachweisempfindlichkeit wird in der Regel durch Verlängerung der Messzeit oder bei Wasserproben durch Aufbereitung (Eindampfen) großer Probenmengen (bis zu 100 Liter) erreicht. Wie aus den Abbildungen 2.1 und 2.2 ersichtlich ist, emittieren jedoch nicht alle Radionuklide Gamma-Quanten oder die Emissionswahrscheinlichkeit ist sehr gering, so dass in diesem Fall eine Messung mittels Alpha-Spektrometrie durchzuführen ist.

3.2.2 Probenvorbereitung

Für die Radonbestimmung konnten die Proben direkt auf dem Detektor platziert werden, eine Aufbereitung ist nicht notwendig. Um die Messung auswerten zu können, musste ein Zeitprotokoll mit genauem Probenahmezeitpunkt und dem Zeitpunkt der Messung geführt werden (siehe Anhang C1). Zur Bestimmung weiterer Radionuklide wurden die Wasserproben (je 5 L) schrittweise mit dem Rotationsverdampfer eingeengt, um sie anschliessend mit der Gamma-Spektrometrie auf weitere Radionuklide hin untersuchen zu können. Da sich die Aufkonzentration schwierig gestaltete und bei jeder Probe die vorhandenen Salze durch die erhöhte Konzentration ausfielen, wurden sie zunächst mit Salzsäure rückgelöst, später jedoch völlig eingedampft um eine homogene Verteilung gewährleisten zu können.

Für die quantitative Auswertung der aufgenommenen Spektren war es notwendig, eine kalibrierte Messgeometrie zu verwenden. Am geeignetesten erschien hier die Filtergeometrie in einer PE-Dose. Die teilweise flüssigen Proben wurden in die Dosen umgefüllt und unter dem Säureabzug belassen, bis sie völlig auskristallisiert waren. Danach wurden die Proben per γ -Spektrometrie gemessen.

3.2.3 Messung

Der Messplatz für die Gamma-Spektrometrie setzt sich aus einem Germaniumdetektor, einer Bleikammer zur Abschirmung der Untergrundstrahlung, der Elektronik und einem Rechner zur Auswertung zusammen.

Ein Germaniumdetektor besteht aus einem meist zylinderförmigen Kristall aus Reinstgermanium, der vor dem Anlegen der Hochspannung durch Einsetzen des Kryostaten in ein Dewar-Gefäß auf die Temperatur des flüssigen Stickstoffs gekühlt wird. Die wichtigsten Größen zur Charakterisierung eines Detektors sind sein Ansprechvermögen und sein Energieauflösungsvermögen. Letzteres wird durch die Halbwertsbreite einer Linie, die durch 1,33 MeV-Gammastrahlung im Impulshöhenspektrum erzeugt wird, charakterisiert. Die Halbwertsbreite nimmt mit der Energie ab und liegt bei 100 keV beispielsweise bei ca. 1,0 keV. Je nach der Menge und der Aktivitätskonzentration des Messguts wird dieses in Röhrchen, Dosen, Flaschen oder Marinelli-Becher bis zu 1 L Inhalt abgefüllt. Die Behältnisse können direkt auf die Detektorendkappe gestellt werden. Auf Reproduzierbarkeit bei der Probenpositionierung ist zu achten, insbesondere muss geprüft werden, ob die bei Kalibrierung und Messung verwendeten Behältnisse die gleichen Abmessungen haben und bis zur gleichen Höhe gefüllt sind.

3.3 ICP-MS

Die Vorteile der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) liegen in der enormen Nachweisempfindlichkeit, der hohen Analysengeschwindigkeit und dem sehr großen dynamischen Arbeitsbereich. Damit eignet sie sich hervorragend für umfassende Übersichtsanalysen.

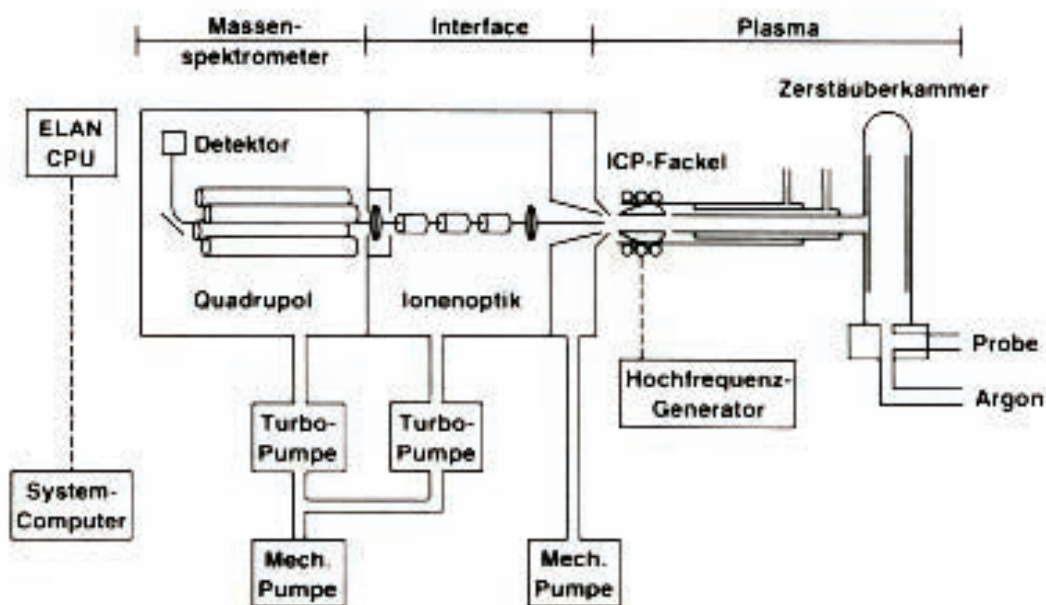


Abb. 3.4: Blockdiagramm ICP-MS (aus HEIN & KUNZE 1994).

Das ICP-MS System gliedert sich in die drei Bereiche: Plasma, Interface und Quadrupol-Massenspektrometer (siehe Abb.3.4). Die in einem Argon-Plasma erzeugten Ionen der Analysenprobe werden über das Interface dem Quadrupol-Massenspektrometer zugeführt. Somit findet im Interface die Kopplung zwischen dem induktiv gekoppelten Plasma und dem Massenspektrometer statt. Aus dem bei Normaldruck betriebenen Plasma gelangen die Ionen über eine bei geringem Druck betriebene Zwischenstufe in die Ionenoptik des Interfaces. Dort werden die Lichtquanten aus dem Plasmbrenner abgeblockt, während die Ionen zu einem dünnen Strahl gebündelt in das Quadrupol-Massenspektrometer gelangen, wo sie nach ihrem Masse-Ladungsverhältnis aufgetrennt werden.

Ein Quadrupol-Massenspektrometer ist aus vier parallelen und kreisförmig angeordneten, runden, etwa 20 cm langen Stabelektroden aufgebaut. An die gegenüberliegenden Stäbe wird eine Spannung angelegt, die sich aus Gleichspannung und einer hochfrequenten Wechselfspannung zusammensetzt. Nach dem Passieren des Interface-Systems fliegen die Ionen in einer Spiralbahn durch das Stabsystem. Dabei erreichen nur Ionen mit begrenzter Schwingungsamplitude den Detektor am Ausgang des Massenfilters, da die Ionen mit instabiler Bahn an den Stabelektroden oder dem Gehäuse abprallen und somit für die Messung verloren gehen. Jedes am Detektor auftreffende Ion erzeugt einen elektrischen Impuls, welcher dem Vielkanalpufferspeicher verstärkt zugeführt und anschließend am Steuerrechner ausgewertet wird. Neben der schnellen Multielementbestimmung erlaubt die ICP-MS außerdem die Bestimmung der Isotopenverhältnisse eines Elements (HEIN & KUNZE 1994).

Die ICP-MS liefert aber nicht die Aktivität des Uranisotops, sondern seine Konzentration in µg/L. Um beide Analyseergebnisse vergleichen zu können, müssen sie in eine einheitliche Form umgerechnet werden.

Die Aktivität A eines Radionuklids berechnet sich wie folgt:

$$A = \lambda \cdot N = 0,69 \cdot T^{-1} \cdot (L \cdot M^{-1}) \cdot h \quad h = h_l \cdot h_{ch} \cdot h_m \quad (3.1)$$

$$L = \text{Avogadro-Konstante} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen/mol}$$

154 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

4 Untersuchungsgebiet im Freistaat Bayern

4.1 Hydrogeologische Verhältnisse

Im Untersuchungsgebiet, das sich im Bereich des Fränkischen Keupers (Abb.4.1) befindet, erfolgt die Wassergewinnung hauptsächlich aus Sandsteingebieten verschiedener Formationen. Es handelt sich meist um mehr oder weniger deutlich ausgebildete Kluffundwasserleiter, mit relativ geringen spezifischen Ergiebigkeiten. Allein die ausgeprägten Tonhorizonte wie der Feuerletten wirken stockwerkstrennend. Dadurch gibt es im fränkischen Bruchschollenland fast nur "Tiefbrunnen" im ersten Grundwasserstockwerk, in denen sich das Trinkwasser jedoch besser schützen lässt als im Jura. Als Nachteile seien die geringere Ergiebigkeit und ein verminderter Grundwasserumsatz zu nennen.

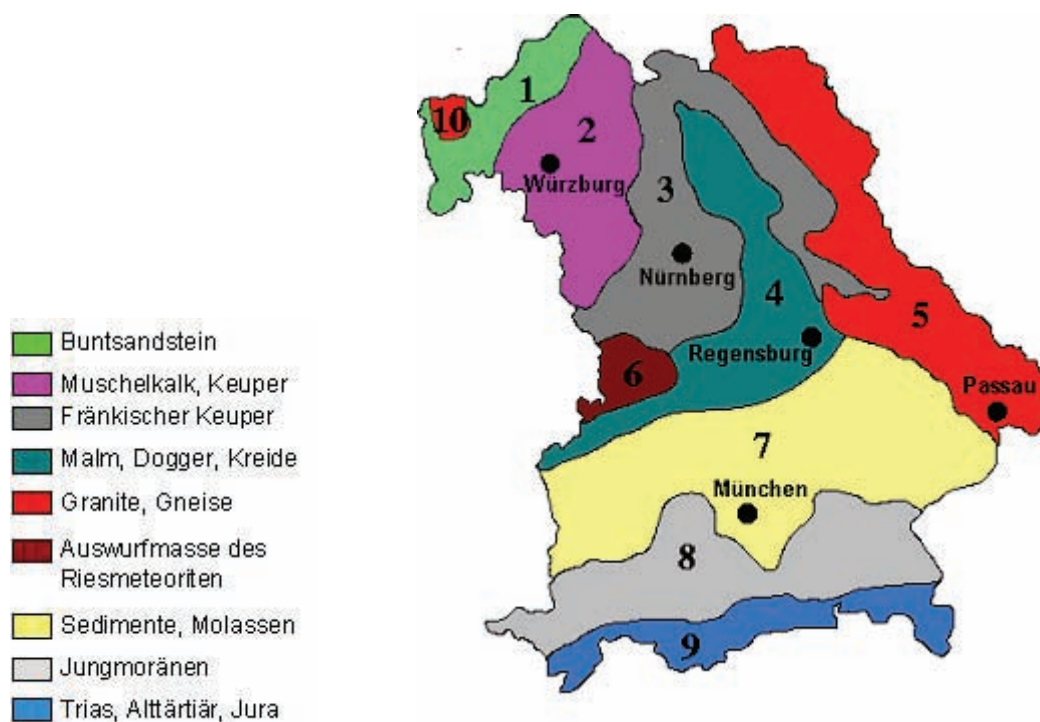


Abb. 4.1: Geologische Gliederung des Freistaat Bayern (BAYERISCHES LFU)

Die oberste Schicht des fränkischen Keupers (Nummer 3, Abb.4.1) bilden die Rhätsandsteine, die gute Grundwasserleiter darstellen und oft artesisch gespanntes, sehr altes Grundwasser liefern. Darunter folgt eine etwa 60 m mächtige Tonabfolge – die Feuerletten – die kaum Wasser führen. Außer einem zunehmenden Anteil von meistens weißen Sandsteinen, ändert sich im "Burgsandstein", gegenüber dem Feuerletten nicht viel. Im Untersuchungsgebiet stehen zahlreiche Brunnen im Burgsandstein, dessen grau- bis grünlichweißen Arkose-Sandsteine sich durch eine gut erschließbare Wasserführung auszeichnen. Der

Gipskeuper ist in der Gegend 70-80 m mächtig und überwiegend tonig ausgebildet. Beinahe nahtlos schliessen sich an die gipsführenden Tonschichten die überwiegend tonigen "Esterienschichten" an. Darunter allerdings birgt der Gipskeuper noch einmal einen sehr guten Grundwasserleiter, den sogenannten "Benker Sandstein". Allein der Muschelkalk unterbricht den Wechsel der Sandsteine und Tone. In karbonatischer Fazies ausgebildet, fällt er durch fehlende Oberflächengewässer und Verkarstungserscheinungen auf. Als Wasserspeicher kann der Muschelkalk, trotz des hohen Grundwasserangebotes nicht genutzt werden. Die Sandsteine des Buntsandsteins gelten als wichtigste Trinkwasserlieferanten. Dies liegt am Vorkommen nahe des Untersuchungsortes, der ein Teil seines Wassers aus Tiefbrunnen im Tal des WM gewinnt (HÄUSSINGER 1998).

4.2 Trinkwasser

4.2.1 Wasserwerk 3168

Die Wasserversorgung der Stadt wird durch ein nahegelegenes Quellgebiet und zahlreiche Tiefbrunnen im Gebiet MT sichergestellt.

Im Quellgebiet MSG wird das Wasser aus über 60 Quellen und 11 Hebebrunnen gewonnen und im Hauptsammler zusammengeführt. Das Gebiet ist 12,7 km² gross und liefert bei einer Wasserschüttung von 45-80 L/s jährlich etwa 2.200.000 m³ Trinkwasser. Bevor das Wasser weiter transportiert wird, muss es noch durch die Filteranlagen in der Entsäuerung laufen. Die Entsäuerungsanlage stammt aus dem Jahr 1958, die beiden Zubringerleitungen von 1900 und 1928. Im Gebiet MT wird das Grundwasser von 8 Tiefbrunnen aus bis zu 180 m Tiefe gefördert und in die Trinkwasseraufbereitungsanlage geleitet. Die Stadtwerke sind berechtigt bis zum Jahre 2019 jährlich 3,5 Millionen m³ Grundwasser aus den Tiefbrunnen im WMT entnehmen zu dürfen.

Über zwei Einlaufleitungen wird das Rohwasser vom Quellgebiet MSG und von den MT- Brunnen in die Trinkwasseraufbereitungsanlage (TWA) eingeleitet.

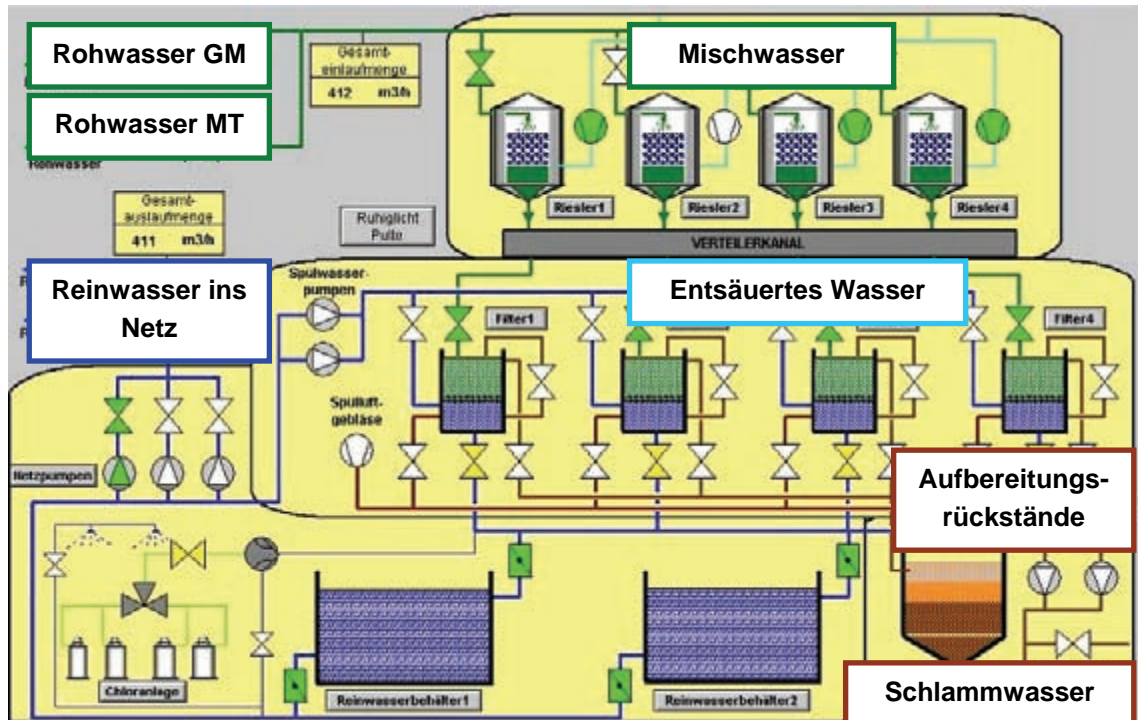


Abb. 4.2: Verfahrensschema der Trinkwasseraufbereitungsanlage mit den Probenahme-punkten

Als erstes wird das Rohwasser zu den Füllkörperrieslern geleitet, durch eine Eingangsdüse zerstäubt und fließt über die Füllkörper nach unten ab (siehe Abb.4.2). Dabei entweicht überschüssige Kohlensäure. Um die Oxidation von zweiwertigem Eisen zu dreiwertigem Eisen zu erreichen wird das Wasser mittels Ventilatoren mit Sauerstoff angereichert. Anschliessend wird es zu den Kiesfiltern weitergeleitet und läuft durch eine zwei Meter dicke Kiesfilterschicht, wo Eisen und Mangan, sowie eventuell vorhandene Schwebstoffe zurückgehalten werden.

Nachdem das Wasser die Filterschicht durchlaufen hat, gelangt es über den Rohgang in die Reinwasserkammern. Das Trinkwasser, welches die Netzpumpen aus der TWA herausfördern, wird mit Zwischenpumpwerken in über 14 Hochbehälter, die sich auf den Anhöhen rings um die Stadt befinden, gepumpt. Von hier aus läuft das Trinkwasser im natürlichen Gefälle durch das Rohrnetz bis zu den Verbrauchern.

4.2.2 Probenahme

Für die Probenahme wurden pro 10 L Kanister 10 ml HNO₃ (konz.) vorbereitet und vor Ort zur Stabilisierung der Wasserprobe zugegeben. Bei den 100 ml PE-Flaschen für die ICP-MS wurden je 1 ml HNO₃ (konz. Suprapur) vorgelegt. Die radondichten PET-Flaschen wurden nach Vorgabe befüllt und Begleitprotokolle ausgestellt.

Tab. 4.1: Probenahmepunkte im Bereich des Wasserwerkes

Nr.	Probe	Bemerkung
W 801	Brunnen 2	Tiefbrunnen MT
W 802	Brunnen 5	Tiefbrunnen MT
W 803	Brunnen 8	Tiefbrunnen MT
W 804	Brunnen 7	Tiefbrunnen MT
W 805	Rohwasser GM	Quellfassungen MSG
W 806	Rohwasser MT	Brunnen 2, 3, 4 & 6 (ohne Behandlung)
W 807	Reinwasser ins Netz	Rohwasser MT & GM – nach den Kiesfiltern
W 808	Brunnen 3	Tiefbrunnen MT
W 809	Brunnen 4	Tiefbrunnen MT
W 810	Mischwasser	Rohwasser MT & GM – vor den Kiesfiltern
W 811	Entsäueretes Wasser	Reinwasser nach den Kiesfiltern
W 812	Schlammwasser	Rückspülwasser Filter 3
S 801	Aufbereitungsrückstand	Rückstand Filter 3

Die Brunnen werden vom Wassermeister ständig gewechselt, so dass auch die Zusammensetzung des Wassers geringfügig schwankt. Je nach Bedarf und bewilligter Förderleistung werden die einzelnen Brunnen über Pumpen zugeschaltet. Zum Zeitpunkt der Probenahme lag das Verhältnis der beiden Rohwässer bei etwa 1:1.

4.3 Abwasser und Klärschlamm

4.3.1 Kläranlage

Die Kläranlage des Untersuchungsortes ist für 300.000 EW ausgelegt und derzeit mit etwa 250.000 EW ausgelastet. Davon stammen 80 % aus der Industrie und nur 20 % aus den privaten Haushalten. Das industrielle Abwasser stammt zu einem großen Teil aus den zahlreichen Brauereien in der Umgebung. Jede Brauerei entspricht ungefähr 40000 EW. Weiterhin kommen noch eine Spinnerei und Färberei hinzu.

Mit 17 Pumpwerken wird das Wasser gesammelt und durch 2 Schneckenhebwerke auf das Niveau der Kläranlage gebracht. Diese Hebwerke fassen maximal 1350 L/s, bei einem größeren Zulauf steht ein vorgeschaltetes Regenüberlaufbecken als Auffangmöglichkeit zur Verfügung. Die sich anschließenden HUBER Filterstufenrechen vom Typ SSV bilden die erste Stufe der mechanischen Reinigung. Anschliessend wird das Rechengut gewaschen und kompostiert.

Der Sandfang ist mit einem Druckluftsandheber ausgestattet. Ein Problem bei dieser Stufe bilden die vielen Gerstenkörner, die sich aufgrund der zahlreichen Brauereien im Abwasser befinden. Nach der Vorklärung gelangt das Abwasser in die biologische Reinigung. Hier kann durch die vorgeschaltete Denitrifikation der in dieser Stufe umgesetzte Nitrat-Sauerstoff schon zum biologischen Abbau der organischen Inhaltsstoffe des Abwassers

(BSB₅-Wert) genutzt werden, das heißt es ist keine externe Zugabe von Kohlenstoffquellen zum Nitratabbau notwendig. Die Ammonium-verbindungen gelangen vom Zulauf unverändert durch die Denitrifikationsstufe in die nachfolgende Nitrifikation. Erst dort werden diese Verbindungen unter aeroben Bedingungen in Nitrat umgewandelt und wieder in den Zulauf der Denitrifikation zurückgeführt. Dies geschieht mittels des Überlaufschlammes, in dem der grösste Teil der Nitratverbindungen enthalten ist. Durch die Nachrüstung der Kläranlage mit einer dritten Reinigungsstufe wurde eine Verbesserung der Reinigungsleistung erzielt.

Der Klärschlamm wird in Faultürmen gesammelt und die entstehenden Faulgase (rund 138 m³/h) zur Energieerzeugung im Blockheizkraftwerk genutzt. Die Kläranlage kann damit den Eigenbedarf decken.

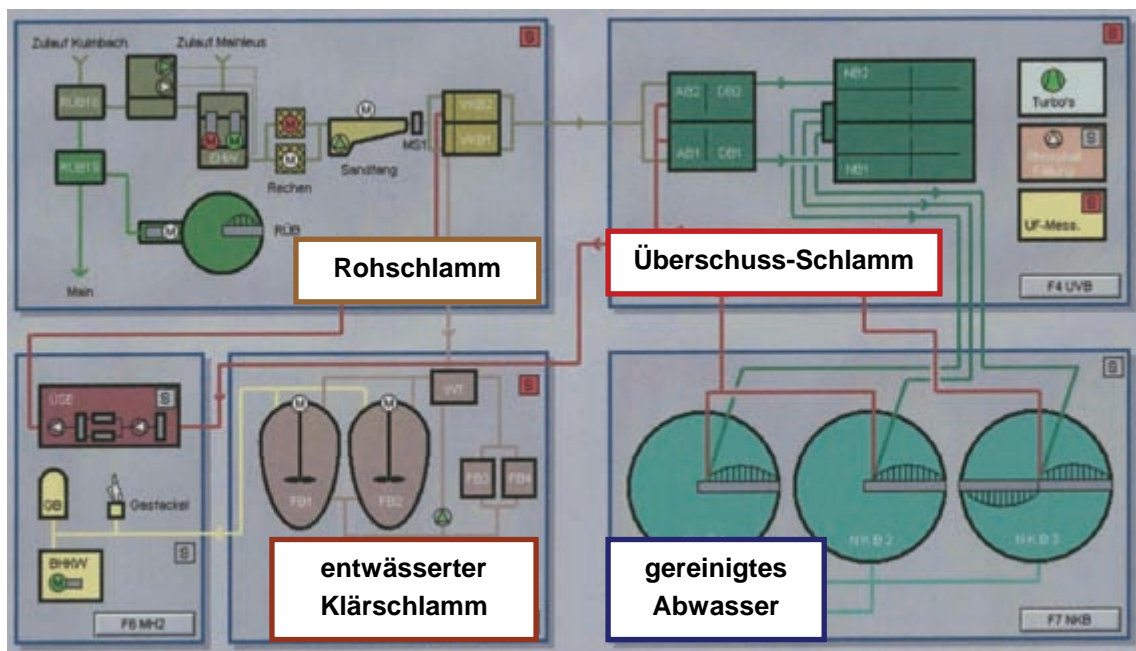


Abb. 4.3: Betriebsschema der Kläranlage mit Probenahmepunkten

4.3.2 Probenahme

Beprobt wurde der Rohschlamm, der sich aus dem Primärschlamm der Vorklärung und dem Überschussschlamm zusammensetzt, ferner separat der Überschussschlamm und der entwässerte Klärschlamm (siehe Abb.4.3). Außerdem wurde eine Probe des gereinigten Abwassers genommen, welches in den Vorfluter eingeleitet wird.

Tab. 4.2: Probenahmepunkte in der Kläranlage

Nr.	Probe	Bemerkung
W 813	gereinigtes Abwasser	Ablauf Klärwerk in den Vorfluter
S 802	Rohschlamm	Primär- und Überschussschlamm
S 803	Überschussschlamm	sog. Rücklaufschlamm
S 804	Klärschlamm	stabilisiert und getrocknet

160 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

5 Vorkommen und Verhalten natürlicher Radionuklide im Untersuchungsgebiet

5.1 Radonbestimmung mit der Gamma-Spektrometrie

Aufgrund der geringen Halbwertszeit ($T_{1/2} = 3,824 \text{ d}$) müssen die Proben möglichst schnell nach der Probenahme auf Radon hin untersucht werden.

Die Bestimmung des Rn-222 erfolgte mittels Gamma-Spektrometrie über die Zerfallsprodukte Pb-214 und Bi-214. Energielinien, die dem Radon zugeordnet werden, sind in untenstehender Nuklidtabelle zusammengefasst:

Tab. 5.1: Nuklidtabelle zur Radonbestimmung

Nr.	Energie [keV]	Isotop	Gamma [%]	Fehler [%]	Bemerkungen
1	295,220	Pb-214	18,15	1,21	Nebenlinie zur Identifizierung
2	351,930	Pb-214	35,10	1,14	Hauptlinie, Bestimmung der NWG
3	609,310	Bi-214	44,60	1,12	Hauptlinie, Bestimmung der NWG
4	1120,290	Bi-214	14,70	1,36	Nebenlinie zur Identifizierung
5	1764,490	Bi-214	15,10	1,99	Nebenlinie zur Identifizierung

Als Messzeit wurden $t = 86\,400 \text{ s}$ (entspricht einem Tag) je Probe angesetzt. Es zeigte sich aber bei der ersten Messung, dass der Fehler schon nach kürzerer Messzeit unterhalb von 10 % lag und die Messung vorzeitig beenden werden konnte. Es gilt:

$$\Delta I / I = 1 / \sqrt{I} \quad I = \text{Impulszahl} \quad (5.1)$$

Mit Hilfe von Testmessungen mit einer Messzeit $t = 3600 \text{ s}$ konnte ein grober Überblick über die Radongehalte erhalten und dann die anstehenden Messungen optimiert durchgeführt werden. Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich jedoch bei der Qualität der gewonnenen Messdaten. Durch längere Messzeiten konnte der Fehler – damit auch die Nachweisgrenze – reduziert werden. Diese Abhängigkeit verläuft jedoch nicht zeitlich linear, sondern asymptotisch.

Der mittlere Fehler betrug bei den Tests etwa 24 %, bei den ausführlichen Messungen (durchschnittliche Messzeit $t = 52\,000 \text{ s}$) nur 15 %.

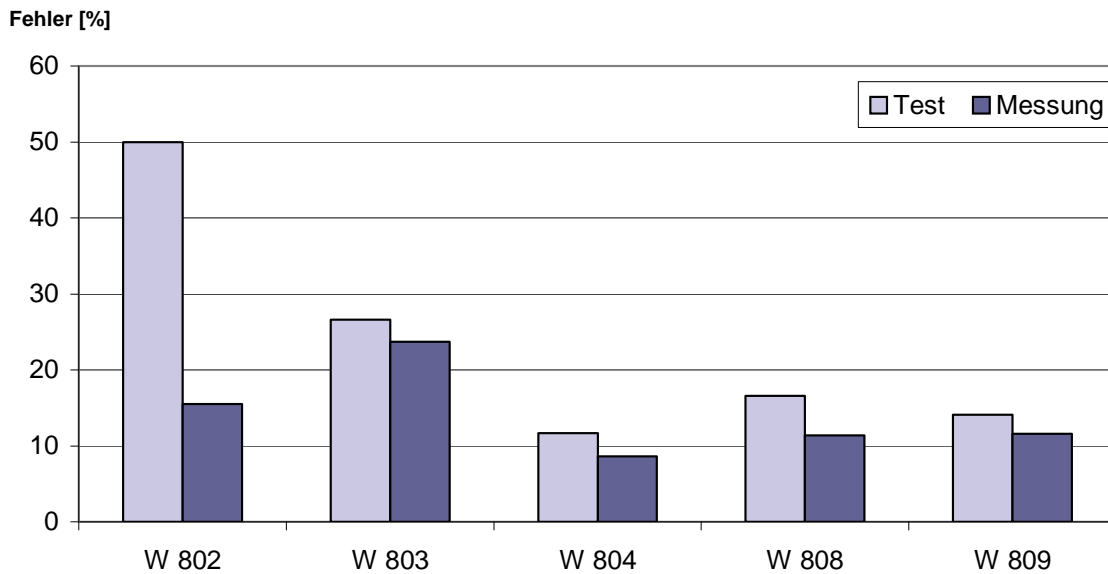


Abb. 5.1: Vergleich des Fehlers bei verschiedenen Messzeiten

Insgesamt kann eine Testmessung in kurzer Zeit gute Ergebnisse liefern. Sie ist vor allem dann sinnvoll, wenn eine große Probenanzahl bearbeitet werden muss und um einen Überblick über die Proben zu erhalten. Wenn die Ergebnisse interpretiert und zu Vergleichsmessungen herangezogen werden sollen, ist eine längere Messzeit unabdingbar, um ein sicheres Ergebnis zu erhalten.

Eine Korrektur der Ergebnisse aufgrund der Befüllung der radondichten Flaschen ist nicht notwendig, da sie einen Inhalt von $1,0 \pm 0,012$ L aufweisen. Diese Schwankungen liegen innerhalb der Unsicherheiten des Messergebnisses und bedürfen daher keiner zusätzlichen Berichtigung.

Aufgrund der leicht veränderten Geometrie der radondichten Flaschen gegenüber den sonst verwendeten Kautex-Flaschen wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Dazu wurde sich einer Kalibrierlösung bedient, die zunächst wie üblich gemessen und anschliessend in eine radondichte Flasche umgefüllt wurde. Die Ergebnisse der Messung in der radondichten Flasche liegen erwartungsgemäss unter denen der Messung der Kautex-Flaschen.

Tab. 5.2: Vergleich verschiedener Messgeometrien der Gamma-Spektrometrie

Messung in einer Kautex-Flasche				Messung in radondichter Flasche			
Isotop	Aktivitäts-			Isotop	Aktivitäts-		
	Konzentration [Bq/L]	Fehler [%]	NWG [Bq/L]		Konzentration [Bq/L]	Fehler [%]	NWG [Bq/L]
Co-60	10,12	6,9	0,254	Co-60	8,85	7,1	0,238
Y-88	5,25	13,4	0,796	Y-88	4,15	16,8	0,922
Cs-137	7,24	8,9	0,248	Cs-137	6,13	9,7	0,263
Ba-133	6,76	8,9	0,311	Ba-133	5,68	9,3	0,321
Ir-192	3,92	23,8	1,220	Ir-192	-	-	-
Am-241	2,48	59,3	1,710	Am-241	1,93	75,2	1,730

Die radondichten Flaschen werden nicht standardmäßig für die Messung verwendet, weshalb eine Geometriekorrektur durchgeführt werden muss. Da diese Flaschen einen geringeren Durchmesser haben und höher als die Kautex-Flaschen sind, ist die Ausbeute aufgrund der ungünstigeren Messgeometrie geringer. Anhand der Aktivität der Isotope, deren Energielinien denen der Radonmessung am ehesten entsprechen, kann ein Korrekturfaktor ermittelt werden. Dazu wurden Co-60, Ba-133 und Cs-137 ausgewählt und die beiden Messungen miteinander verglichen.

Tab. 5.3: Ermittlung eines Korrekturfaktors für die Verwendung von radondichten Flaschen

Isotop	Kautex-Flasche	Radondichte Flasche		Korrektur
	Aktivitäts-Konzentration [Bq/L]	Aktivitäts-Konzentration [Bq/L]	Anteil [%]	
Co-60	10,12	8,85	87,45	1,144
Cs-137	7,24	6,13	84,67	1,181
Ba-133	6,76	5,68	84,02	1,190

Mit dem gemittelten Korrekturfaktor $k = 1.17$ können die in den radondichten Flaschen gemessenen Gehalte berichtigt werden.

$$a_{RF} = k \cdot a_{KT} \quad (5.2)$$

a_{RF} : Aktivitätskonzentration in der radondichten Flasche

a_{KT} : Aktivitätskonzentration in der Kautex-Flasche

k : Korrekturfaktor

Die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Ergebnisse können somit als Endergebnisse angesehen werden. Die genauen Daten und Werte der Messungen können Anhang B 1 entnommen werden.

Tab. 5.4: Ergebnisse der Radonmessung mit der Gamma-Spektrometrie

Nr.	Probe	1.Probenahme Aktivitäts- Konzentration [Bq/L]	2.Probenahme Aktivitäts- Konzentration [Bq/L]
W 801	Brunnen 2	22,9	-
W 802	Brunnen 5	11,3	-
W 803	Brunnen 8	13,5	-
W 804	Brunnen 7	71,1	-
W 805	Rohwasser GM	50,4	43,2
W 806	Rohwasser MT	32,4	38,5
W 807	Reinwasser	1,4	1,8
W 808	Brunnen 3	27,0	-
W 809	Brunnen 4	39,4	-
W 810	Mischwasser	-	41,2
W 811	entsäuertes Wasser	-	1,8

Die Proben W 801 bis 804, sowie 808 und 809 sind Brunnenwässer, die sich in Probe W 806 – dem Rohwasser MT – zusammenfassen lassen. Das Mischwasser der Quellen (Rohwasser GM) weist mittlere Radongehalte auf. Die geringste Aktivitätskonzentration hat erwartungsgemäß das Reinwasser welches ins Netz geht.

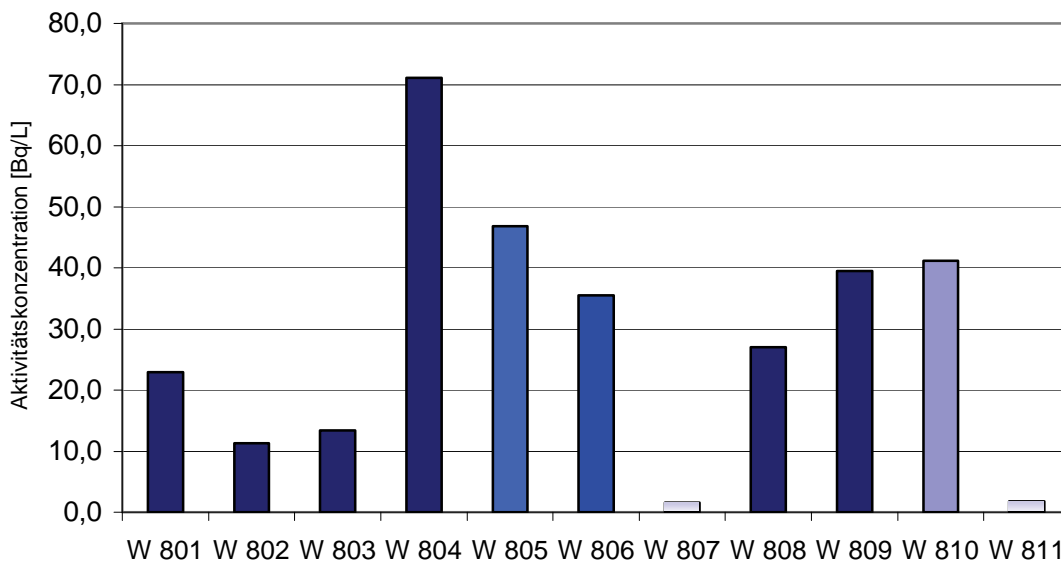


Abb. 5.2: Ergebnisse der Radonmessung durch die Gamma-Spektrometrie

5.2 Uranbestimmung mit Alpha-Spektrometrie & ICP-MS

5.2.1 Wasserproben

Die Messungen erfolgten mit der Alpha-Spektrometrie, als Messzeit wurden 260.000 s (drei Tage) gewählt. Bestimmt wurden die drei Uranisotope U-234, U-235 und U-238.

Als Tracer wurden 60 µL U-232 gelöst in 2M HNO₃ eingesetzt, was einer Aktivitätskonzentration von 32,4 mBq/L entspricht. Damit kann auch die Ausbeute nach der Aufbereitung und die Wiederfindungsrate bei der Messung ermittelt werden. Die interne Ausbeute wird mit der Auswertung der Messung ausgegeben.

Tab. 5.5: Ausbeute & Wiederfindungsrate der ersten Messungen

Probe	Detektor	Ansprech- vermögen [%]	Ausbeute interner Standard	Wiederfindungsrate [%]	
W 801	det 4	36,22	0,275	0,759	75,9
W 802	det 5	36,22	0,304	0,839	83,9
W 803	det 6	36,58	0,289	0,790	79,0
W 804	det 7	35,71	0,269	0,753	75,3
W 805	det 8	35,55	0,289	0,813	81,3
W 806	det 1	36,06	0,103	0,286	28,6
W 807	det 2	36,40	0,101	0,277	27,7
W 808	det 3	36,20	0,208	0,575	57,5

Die Wiederfindungsraten zeigen einen deutlichen Anstieg von der ersten Probenaufbereitung (W 806 bis 808) zum zweiten Durchgang (W 801 bis 805). Dieser Fehler wird mit zunehmender Praxis bei der Durchführung herabgesetzt. Sieht man von den ersten Proben ab, konnte eine mittlere Wiederfindungsrate von etwa 79 % erreicht werden. Bei der zweiten Probenahme lagen die Wiederfindungsraten mit durchschnittlichen 55 % unter denen der ersten Probenahme. Das kann an den verwendeten Alpha-Kammern liegen, die von unterschiedlichen Herstellern stammen.

Die Messung von Probe W 809 war nicht auswertbar, da der Tracer nicht nachgewiesen werden konnte. Das deutet auf eine fehlerhafte Aufbereitung hin, am wahrscheinlichsten ist ein Fehler bei der Extraktionschromatographie. Da bei der zweiten Probenahme das Interesse auf die Mischwässer gelegt wurde, fand eine erneute Bestimmung dieser Einzelprobe nicht statt.

Tab. 5.6: Ergebnisse der Uranmessung mittels Alpha-Spektrometrie

Nr.	Probe	1. Probenahme			2. Probenahme		
		Aktivitätskonzentration in mBq/L			Aktivitätskonzentration in mBq/L		
		U-234	U-235	U-238	U-234	U-235	U-238
W 801	Brunnen 2	107	2	43			
W 802	Brunnen 5	108	5	78			
W 803	Brunnen 8	223	6	130			
W 804	Brunnen 7	266	6	147			
W 805	Rohwasser GM	2	n.n.	1	2	n.n.	1
W 806	Rohwasser MT	269	7	163	255	6	149
W 807	Reinwasser	158	4	90	119	2	72
W 808	Brunnen 3	312	9	183			
W 809	Brunnen 4	n.b.	n.b.	n.b.			
W 810	Mischwasser				143	3	83
W 811	entsäuertes Wasser				134	3	78
W 812	Schlammwasser				102	2	56
W 813	gereinigtes Abwasser						

Die Rohwässer GM, MT und das Reinwasser ins Netz wurde bei beiden Probenahmen beprobt. Anhand ihrer Werte können die Ergebnisse verglichen werden.

Tab. 5.7: Vergleich der Uranmessung der 1. und 2. Probenahme (1.PN & 2.PN)

Aktivitätskonzentration in mBq/L Probe	U-234		U-235		U-238	
	1. PN	2. PN	1. PN	2. PN	1. PN	2. PN
	W 805 - Rohwasser GM	2	2	n.n.	n.n.	1
W 806 - Rohwasser MT	269	255	7	6	163	149
W 807 - Reinwasser	158	119	4	2	90	72

Die Uranaktivitätskonzentrationen beider Messungen liegen innerhalb eines geringen Schwankungsbereiches. Besonders bei Probe W 805 bestätigen sich die bei der 1. Probenahme gemessenen Werte erneut. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Radionuklidgehalte im Wasser innerhalb des Probenahmezeitraumes nahezu konstant gewesen sind. Für die Auswertung wird somit angenommen, dass auch die einmal beprobten Wässer repräsentative Ergebnisse liefern. Bei doppelt bestimmten Proben wird der Mittelwert berechnet.

Zusätzlich wurde U-238 im Labor in Augsburg per ICP-MS bestimmt. Das bietet die Möglichkeit, unabhängig von Tracer und Aufbereitung, die Ergebnisse der Alpha-Spektrometrie zu überprüfen.

Tab. 5.8: Ergebnisse der Uranbestimmung mit der ICP-MS

U-238	W 801	W 802	W 803	W 804	W 805	W 806	W 807	W 808	W 809
[µg/L]	3,23	5,37	9,40	10,4	0,047	12,5	7,01	14,8	13,2

Die ICP-MS liefert aber nicht die Aktivität des Uranisotops, sondern seine Konzentration in µg/L. Um beide Analyseergebnisse vergleichen zu können, müssen sie in eine einheitliche Form umgerechnet werden.

Die Aktivität A eines Radionuklids berechnet sich wie folgt:

$$A = \lambda \cdot N = 0,69 \cdot T^{-1} \cdot (L \cdot M^{-1}) \cdot h \quad h = h_l \cdot h_{ch} \cdot h_m \quad (5.3)$$

$$L = \text{Avogadro-Konstante} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen/mol}$$

Für U-238 mit einer Molmasse $M = 238,03 \text{ g/mol}$ und der Halbwertszeit $T = 4,5 \text{ Ga} = 1,42 \cdot 10^{17} \text{ s}$ beträgt die maximale spezifische Aktivität $a_s = 12,3 \text{ kBq/g} = 12,3 \text{ mBq/}\mu\text{g}$.

Tab. 5.9: Vergleich der Uranaktivitätskonzentrationen (U-238) der Alpha-Spektrometrie und der ICP-MS

	W 801	W 802	W 803	W 804	W 805	W 806	W 807	W 808
Aktivitätskonzentration [mBq/L] ICP-MS	40	66	116	128	1	154	86	181
Aktivitätskonzentration [mBq/L] α-Spektrometrie	43	78	130	147	1	163	90	183

Die Ergebnisse der Alpha-Spektrometrie zeigen eine vergleichsweise gute Übereinstimmung. Die ICP-MS-Ergebnisse liegen ca. 10% niedriger als die mit der Alpha-Spektrometrie ermittelten Aktivitäten.

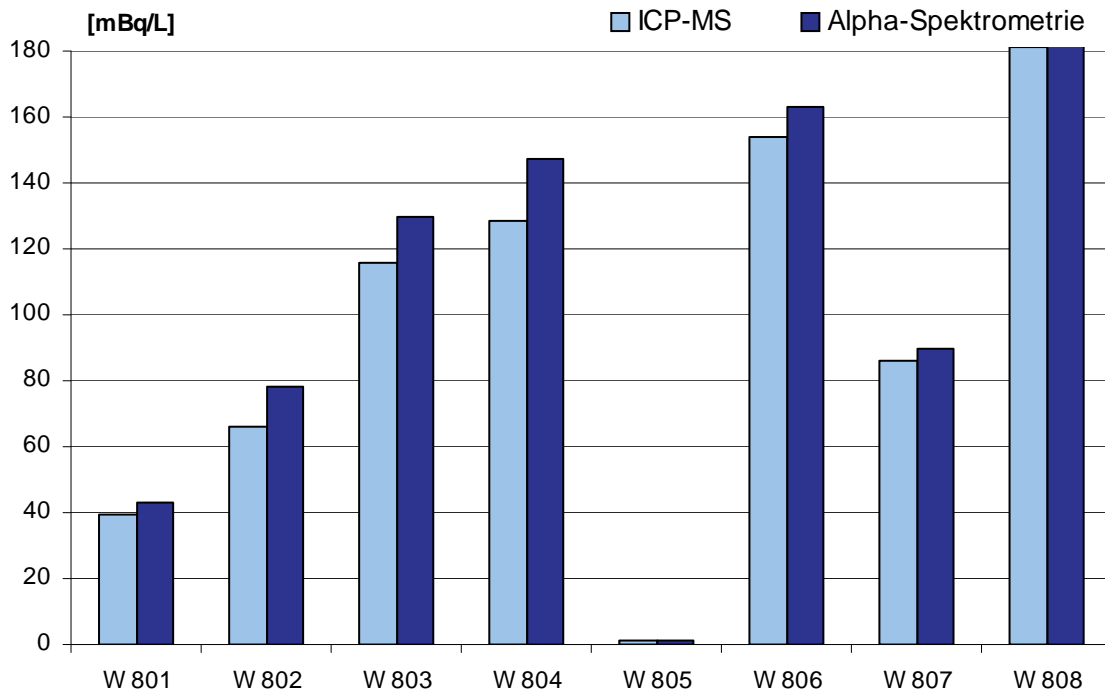


Abb. 5.3: Uranaktivitätskonzentrationen (U-238) der Alpha-Spektrometrie & ICP-MS

5.2.2 Schlammproben

Untersucht wurden 3 Schlämme aus der Kläranlage und eine Probe des Aufbereitungsrückstandes der Trinkwasseraufbereitungsanlage.

Tab. 5.10: Gewichtsverluste der Schlammproben

Nr.	Probe	Gewicht in [g]		
		Trockengewicht	nach der Veraschung	zur Analyse verwendet
S 801	Rückstand TWA	300,62	294,75	4,97
S 802	Rohschlamm	21,66	8,30	8,00
S 803	Überschussschlamm	1,38	0,61	0,50
S 804	Klärschlamm	128,83	73,74	5,01

Da die Schlämme unterschiedliche Wassergehalte aufwiesen, wurden sie vorgetrocknet, um ein vergleichbares Trockengewicht als Basis für nachfolgende Berechnungen zu erhalten. Die höchsten Wassergehalte wiesen die Proben S 802 und 803 auf, der Klärschlamm (S 804) war bereits stabilisiert und getrocknet, die Aufbereitungsrückstände aus der TWA im Imhoff-Trichter von der wässrigen Phase weitestgehend getrennt.

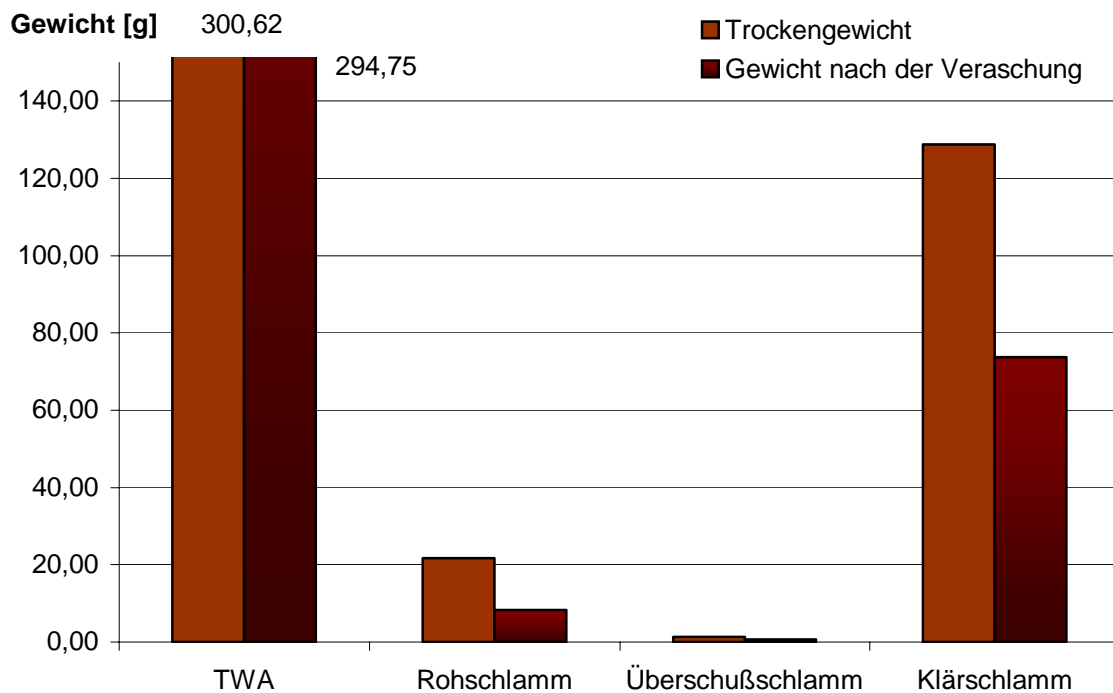


Abb. 5.4: Vergleich der Trockengewichte mit den Gewichten nach der Veraschung

Am geringsten war die Differenz zwischen Trockengewicht und Gewicht nach der Veraschung bei den Aufbereitungsrückständen der TWA. Bei dieser Probe handelt es sich um die in den Kiesfiltern zurückgehaltenen Schwebstoffe, sowie hydratisierte Eisenoxidverbindungen und zum Teil Manganoxide. Der Anteil an organischen Bestandteilen ist sehr gering, was auch die niedrige Gewichts-differenz erklärt. Es muss aber beachtet werden, dass bei Temperaturen von 500°C die Eisenverbindungen aufoxidiert werden, wodurch eine geringfügige Gewichtszunahme erfolgen kann.

Die übrigen Proben weisen Gewichtsverminderungen bis zu 62 % auf, sie bestanden somit zu etwa 50 Gew.% aus organischem Material, das bei der Veraschung oxidiert und in CO₂, CO, NO_x und andere flüchtige Gase umgewandelt wurde.

Diese Werte müssen nun für jede Probe in Abhängigkeit von den verwendeten Probenmengen umgerechnet werden. Dazu wurde die verwendete Analysenmenge, die nach der Veraschung bestimmt wurde, auf das Trockengewicht hochgerechnet und mit der Aktivität ins Verhältnis gesetzt.

Tab. 5.11: Ergebnisse der Uranbestimmung in den Schlammproben über Alpha-Spektrometrie

Nr.	Probe	spezifische Aktivität in mBq/g Trockenmasse		
		U-234	U-235	U-238
S 801	Rückstand TWA	16	1	11
S 802	Rohschlamm	119	7	103
S 803	Überschussschlamm	164	4	103
S 804	Klärschlamm	210	7	135

Die Ausbeute der Bestimmung liegt zwischen rund 75 % bei den Aufbereitungsrückständen der TWA und rund 50 % bei den anderen Proben. Auffällig sind die geringen Urangelhalte der Aufbereitungsrückstände aus der TWA.

5.3 Thoriumbestimmung mit Alpha-Spektrometrie

Auf Thorium wurden nur drei Proben hin untersucht. Die Messung erfolgte mit der Alpha-Spektrometrie, als Tracer wurden 64,4 mBq/L Th-229 zugegeben. Die Wiederfindungsrate lag zwischen 58 und 97 %.

Tab. 5.12: Ergebnisse der Thoriumbestimmung durch Alpha-Spektrometrie

Nr.	Probe	Aktivitätskonzentration in mBq/L	
		Th-228	Th-232
W 805	Rohwasser GM	0,20	0,17
W 806	Rohwasser MT	0,46	0,11
W 807	Reinwasser ins Netz	0,11	n.n.

Die gemessenen Werte liegen meist nur knapp oberhalb der Nachweisgrenze und die Fehler der Messungen sind mit durchschnittlich 35 % höher als beispielsweise bei der Uranbestimmung. Thorium ist schwerlöslich und daher in Grundwässern in der Regel sehr gering bis nicht nachweisbar.

5.4 Radium und weitere Radionuklide

Radium wurde zusammen mit weiteren natürlichen Radionukliden nach dem Einengen der Wasserproben mit der Gamma-Spektrometrie gemessen. Die Messungen lieferten meist Ergebnisse unter der Nachweisgrenze. Nur wenige Radionuklide wurden identifiziert. Verglichen mit der Alpha-Spektrometrie kann das zum einen an den höheren Nachweisgrenzen oder an der Aufbereitung der Proben liegen.

Tab. 5.13: Ergebnisse der Gamma-Spektrometrie der eingeeigneten Wasserproben (RW = Rohwasser)

Nr.	Probe	Aktivitätskonzentration in mBq/L						
		K-40	Pb-210	Pb-214	Bi-214	Rn-220	Ra-226	Ra-228
W 805	RW GM	<192	50	<12	<12	<4524	<100	< 0,03
W 806	RW MT	246	<1166	28	22	<5026	292	< 0,05
W 807	Reinwasser	172	<98	<14	<16	<5588	113	< 0,03
W 808	Brunnen 3	352	<1370	29	<24	<<6758	324	< 0,04

Die fett markierten Zahlen geben die nachgewiesenen Nuklide an, die auch zur Berechnung der Gesamtaktivität herangezogen wurden, die anderen Werte stellen die Nachweisgrenze dar. Radium 228 wurde über das Gleichgewicht zu Ac-228 bestimmt. Da zwischen Probenahme und Messung etwa 45 Tage lagen, kann davon ausgegangen werden, dass das Ac-228 aus dem Zerfall von Ra-228 stammt. Die niedrigste Gesamtaktivität weist erwartungsgemäss die Probe W 807 (Reinwasser ins Netz) mit 0,3 Bq/L auf. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Uranbestimmung per Alpha-Spektrometrie zeigt, dass die gemessenen Werte meist deutlich unter der Nachweisgrenze der Gamma-Spektrometrie liegen.

Radium wird in Schlammproben in den Trockenrückständen stark fixiert und nicht ausgewaschen (HABERER 1999). Die Aufbereitung der Proben vermag es nicht, das Radium in Lösung zu bringen. Deshalb wurde ein Teil der Probe in einem Filterbecher mittels Gamma-Spektrometrie gemessen (siehe Tab.5.14).

Tab. 5.14: Ergebnisse der Gamma-Spektrometrie von den Schlammproben

Nr.	Probe	Aktivitätsgehalt in Bq/g Trockenmasse				
		K-40	Pb-210	Pb-214	Bi-214	Ra-226
S 801	TWA	1,55	1,92	0,76	0,68	1,45
S 804	Klärschlamm	n.n.	0,22	0,07	0,06	0,47

5.5 Auswertung

5.5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Gehalte der natürlichen Radionuklide im Wasser und im Klärschlamm, können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Sie bilden vielmehr ein dynamisches System aus natürlichen Gleichgewichten und verschiedenen Fraktionierungsprozessen.

Radon hat eine hohe Henry-Konstante und lässt sich somit sehr gut durch Belüftung aus dem Wasser entfernen. Untersuchungen zeigen, dass die Belüftung durch eine Füllkörperkolonne zu einer Dekontamination des Wassers von bis zu 99 % führen kann. Durch Versprühen des Wassers können Werte von 70 bis 95 % erreicht werden (RAFF et al. 1999). Demzufolge muss das entsäuerte Wasser nach den Rieslern eine wesentlich geringere Radonkonzentration aufweisen, als die Rohwässer.

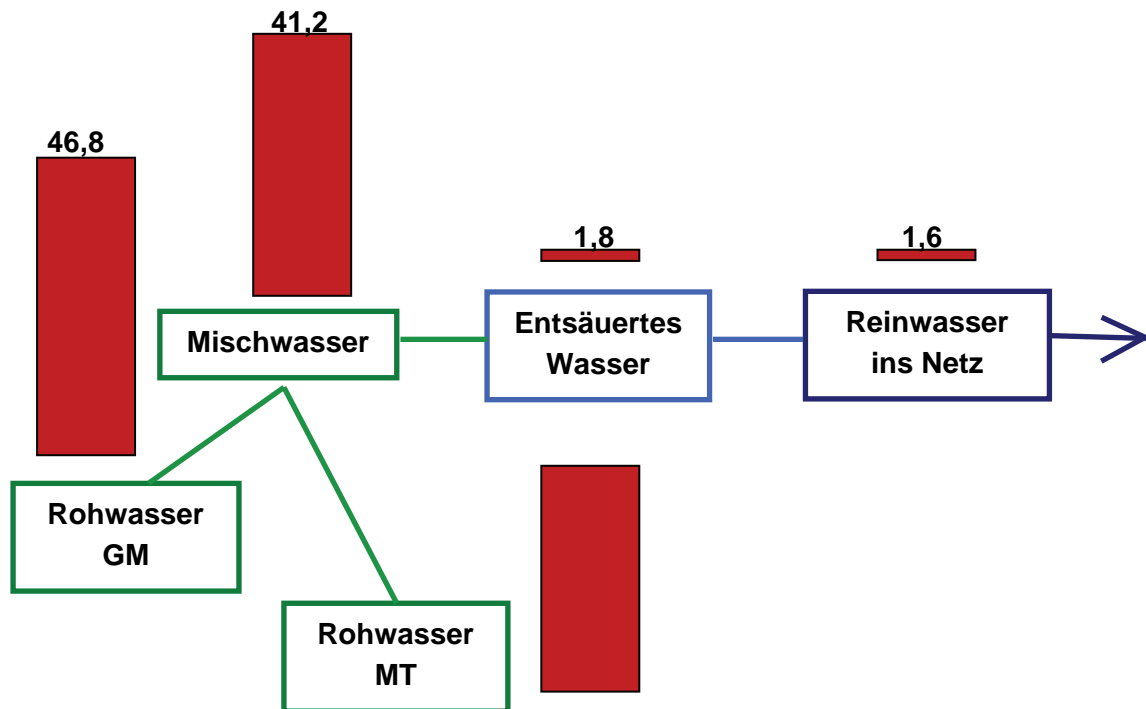


Abb. 5.5: Radonaktivitätskonzentrationen im Wasser [Bq/L]

Insgesamt liegen die Aktivitätskonzentrationen unterhalb dem von der EU vorgegebenen Referenzwert von 100 Bq/L, so dass keine zusätzlichen Massnahmen zur Entfernung des Radons ergriffen werden müssen. Im Reinwasser, welches ins Netz eingeleitet wird, ist Radon nur nahe der Nachweisgrenze auffindbar. Es kann somit bestätigt werden, dass durch die Belüftung und Reinigung mittels Kiesfilter das Radon fast vollständig aus dem Wasser entfernt wird. Die Gehalte im Rohwasser GM, welches aus den Quelfassungen in MSG gespeist wird, liegen oberhalb von denen der Tiefbrunnen im MT. Das kann an einen höheren Wasseranteil in den oberflächennahen Schichten der Quelfassungen im Vergleich zu den Tiefbrunnen liegen, was eine Radonfreisetzung begünstigt.

Die Rohwässer trugen im Untersuchungszeitraum mengenmäßig zu etwa gleichen Teilen zum Mischwasser, das in der TWA gesammelt wird, bei. Dies bestätigt die Berechnung des Mittelwertes der Radonaktivitäten der Rohwässer, welcher mit den Gehalten im Mischwasser übereinstimmt.

Die grösste Differenz zwischen den Aktivitätskonzentrationen besteht zwischen dem Mischwasser und dem entsäuerten Wasser nach den Riesler- und Filteranlagen. Fast 96 % des Radons, das entspricht 39,4 Bq/L, werden aus dem Wasser entfernt. Es ist anzunehmen, dass das Radon in die Luft entweicht und damit eine Gefährdung für die Mitarbeiter in der TWA darstellen kann. In der novellierten Strahlenschutzverordnung von 2001 (StrlSchV 2001) sind daher Regelungen für den Strahlenschutz der Beschäftigten in Wasserversorgungsanlagen festgelegt.

Die Aktivitätskonzentration des Trinkwassers an Radon dürfte, wenn es den Verbraucher erreicht, daher deutlich unterhalb von einem Bq/L liegen. Die Strahlenexposition durch die Aufnahme von Radon mit dem Trinkwasser kann als vernachlässigbar klein gegenüber den Werten der natürlichen Strahlenexposition aus anderen Quellen und der Atemluft angesehen werden.

Die höheren Gehalte von U-234 gegenüber U-238 sind charakteristisch für aquatische Systeme. Durch den Rückstosseffekt bei der Alpha-Emission kann durch Schäden im Kristallgitter die Löslichkeit erhöht oder U-234 direkt in die wässrige Phase gebracht werden (OSMOND 1992). U-235 kommt erwartungsgemäß nur in geringer Konzentration vor (RÜHLE 2001).

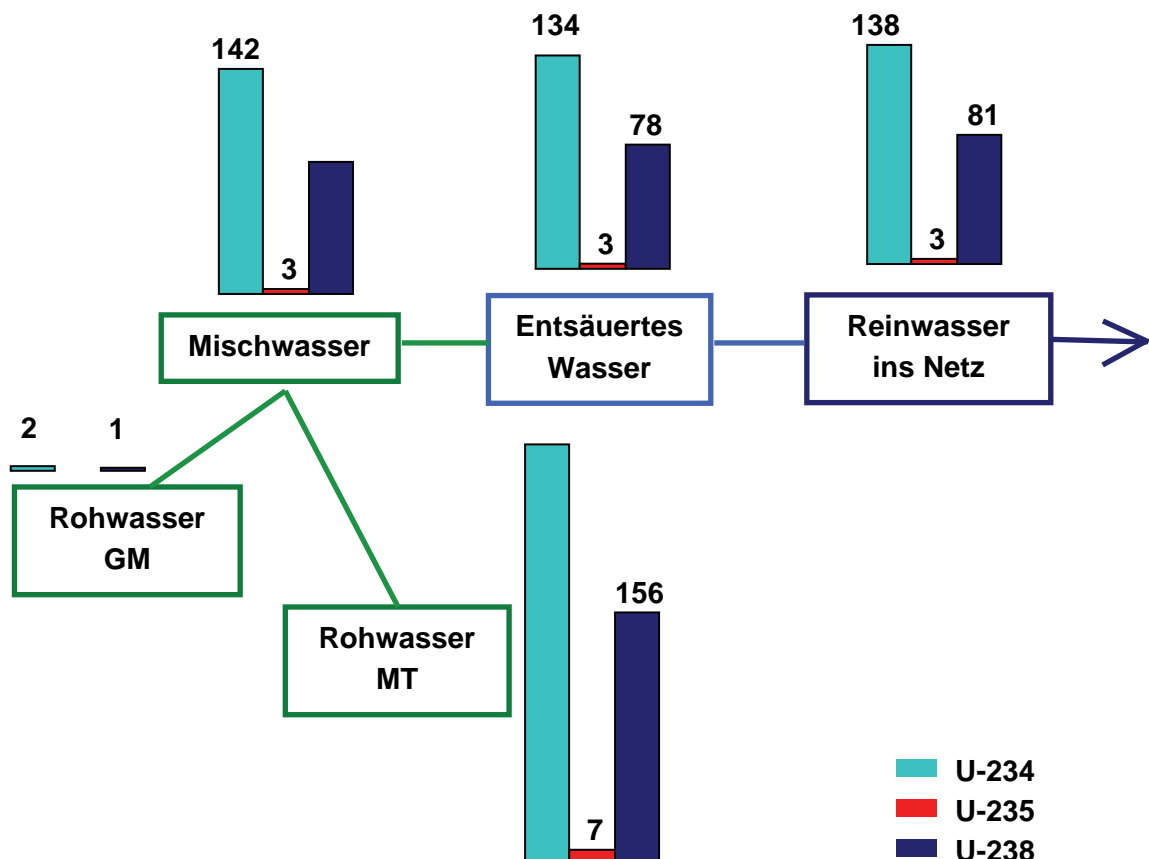


Abb. 5.6: Uranaktivitätskonzentrationen im Wasser [mBq/L]

Besonders deutlich fallen die niedrigen Urangelhalte von Probe W 805 auf. Es handelt sich dabei um das Rohwasser GM also um die Quelfassungen aus MSG. Geologisch gesehen liegt das Quellgebiet aber in uranreichen Gesteinsformationen, umgeben von zahlreichen Uranerz-Fundgebieten. Uran wird jedoch aus granitischen Gesteinen kaum gelöst, was sich in niedrigen bzw. fehlenden Urankonzentrationen im Grundwasser granitisch geprägter Regionen zeigt.

Die Probe mit den höchsten Aktivitätskonzentrationen an Radon weist gleichzeitig die geringsten Urankonzentrationen auf. Die Migration von Rn-222 führt zu einem radioaktiven Ungleichgewicht, in dessen Fortsetzung Radon-Folgeprodukte angereichert werden. Da sich Radon durch Diffusion aus dem Gestein im Grundwasser anreichern kann, ist es möglich, dass ein Grundwasser auch bei geringen Urangelhalten hohe Radonkonzentrationen aufweist (MERKEL & SPERLING 1998).

Welchen Einfluss hat aber die Aufbereitung des Trinkwassers auf die Aktivitätskonzentration von Uran? Dazu wurden die Aktivitätskonzentrationen im Mischwasser, entsäuerten Wasser und im Reinwasser betrachtet. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei den Werten um die Ergebnisse der zweiten Probenahme handelt, da bei der Verwendung des Mittelwertes der Uranaktivität des Reinwassers die Ergebnisse verfälscht würden.

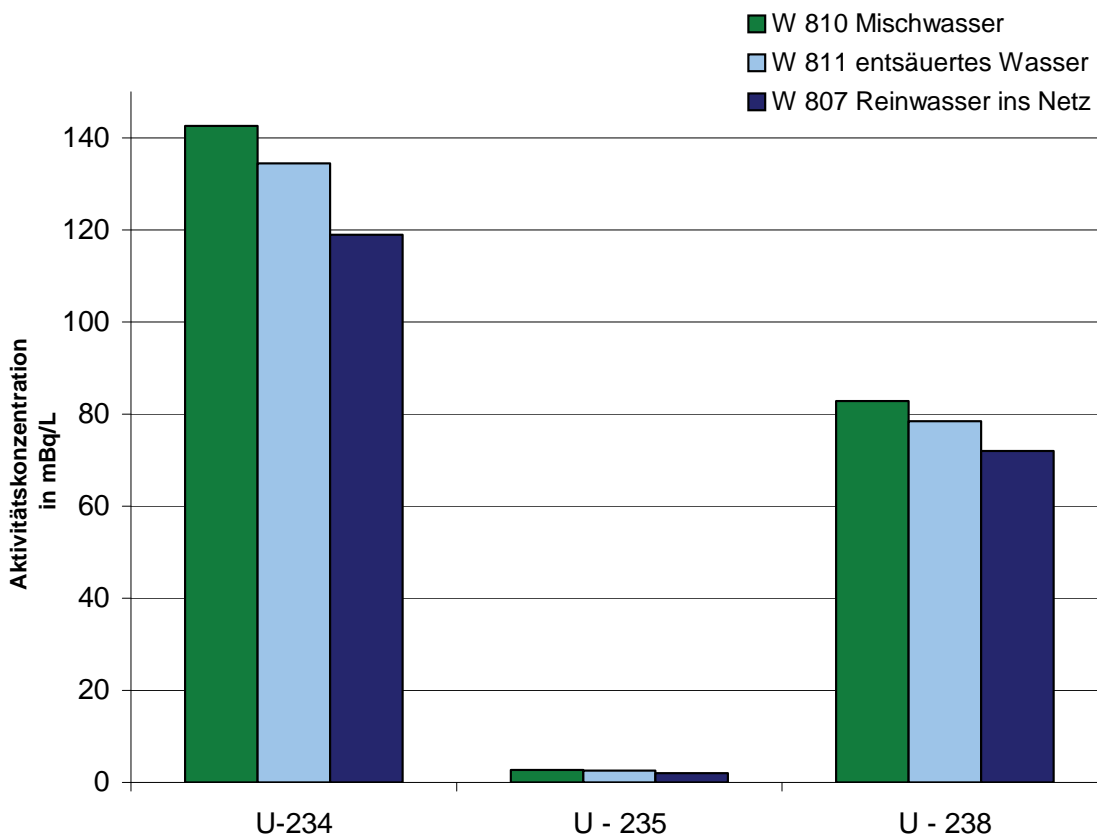


Abb. 5.7: Veränderung der Uranaktivitätskonzentrationen durch die Aufbereitung (TWA)

Es wird deutlich, dass sich die Aktivitätskonzentrationen vom Mischwasser über das entsäuerte Wasser zum Reinwasser sukzessive verringern, die Urankonzentration durch die

Aufbereitung mit rund 15 % jedoch nur geringfügig abnimmt. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass erhöhte Urangehalte im Rückstand der TWA nicht nachweisbar sein sollten.

Die Untersuchung der Aufbereitungsrückstände hat diese Vermutung bestätigt.

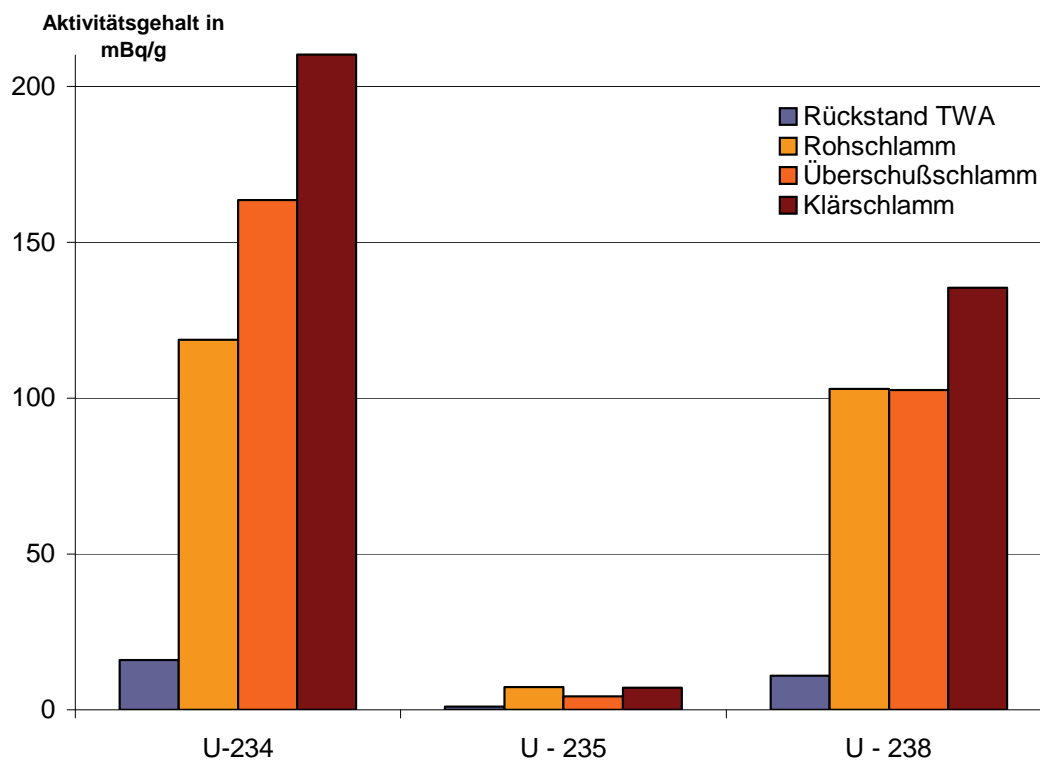


Abb. 5.8: Uranaktivitätsgehalte in den Schlammproben

Das Verhältnis der einzelnen Uranisotope zueinander zeigt sowohl bei den Wasserproben, als auch bei den Schlammproben die gleiche Verteilung. Eine Anreicherung einzelner Isotope durch Fraktionierungsprozesse kann daher ausgeschlossen werden.

Thorium kommt in der Natur mit Gehalten von 8.5 g/t Gestein häufiger als Uran (2.7 g/t Gestein) vor (MERKEL & SPERLING 1998). Es bildet aber im Gegensatz zu Uran nur wenige eigene Minerale und ist in Wasser nur sehr schwer löslich. Daher gelangt es kaum über die Verwitterung in den Wasserkreislauf. Die niedrigen gemessenen Thoriumaktivitäten sind darauf zurück zu führen.

In den Wasserproben konnte Ra-226 nur im Rohwasser MT und im Reinwasser sicher nachgewiesen werden. Die Aktivitätskonzentration im Reinwasser liegt mit 113 mBq/L im oberen Bereich der in Deutschland gemessenen Ra-226-Gehalte. HABERER (1999) gibt als Maximalwert 160 mBq/L, bei einem Mittelwert von 4,1 mBq/L an.

Da Radium an den Eisen- und Manganhydroxiden in den Kiesfiltern adsorptiv gebunden und zu etwa 80 % aus dem Wasser entfernt wird (HABERER 1999), ist mit erhöhten Radiumgehalten in den Aufbereitungsrückständen zu rechnen. Eine Messung der Rückstände der

TWA in einer Filterdose mit der Gamma-Spektrometrie lieferte eine Ra-226-Aktivität von 1,45 Bq/g (siehe Tab.5.14). Verglichen mit den geringen Konzentrationen in den Wasserproben kann für Radium eine Anreicherung im Aufbereitungsrückstand der TWA bestätigt werden.

5.6 Effektive Körperdosis durch Inkorporation

Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch die Aufnahme natürlicher Radionuklide mit dem Trinkwasser ergibt sich aus der Konzentration im Wasser c_r , dem Wasserkonsum U_w und dem Dosiskoeffizienten g_i nach folgender Gleichung:

$$H_e = g_i \cdot U_w \cdot c_r \quad (5.4)$$

Die Dosiskoeffizienten unterscheiden sich je nach Radionuklid und für unterschiedliche Altersgruppen. Berechnet wird eine effektive Folgedosis für Einzelpersonen, die sich für Erwachsene über einen Zeitraum von 50 Jahren erstreckt. In Tabelle 5.15 sind die Dosiskoeffizienten aufgeführt. Eine genaue Berechnung findet sich im Anhang D1.

Tab. 5.15: Dosiskoeffizienten [Sv/Bq] (Bundesanzeiger Nr. 160 a und b vom 28.08.2001)

Radionuklid	Erwachsener (> 17 a)
U-238	4,5 E-08
U-235	4,7 E-08
U-234	4,9 E-08
Ra-226	2,8 E-07
Th-228	7,2 E-08

Es gibt unterschiedliche Angaben für die Menge der täglichen Trinkwasseraufnahme: die SSK geht von 2 Liter täglich (730 Liter pro Jahr), die Strahlenschutzverordnung für Erwachsene von einem mittleren Verzehr von Trinkwasser von 350 Liter pro Jahr aus.

Tab. 5.16: Berechnete effektive Körperdosis [mSv]

Wasserkonsum	350 L	750 L
Radionuklid	Effektive Körperdosis [mSv]	
U-238	0,002189	0,00469
U-235	0,000049	0,00011
U-234	0,001389	0,00298
Ra-226	0,011074	0,02373
Th-228	0,000003	0,00001
Summe	<u>0,015</u>	<u>0,032</u>

Bei den Dosiskoeffizienten handelt es sich um Werte, die anhand von biokinetischen Modellen berechnet wurden. Bei Erwachsenen geben sie die 50-Jahre-Folgedosis, also die Dosis, die nach erfolgter Inkorporation innerhalb eines Zeitraums von 50 Jahren anfällt. Diese Dosiskoeffizienten sind somit nicht geeignet, um aus der ermittelten Aktivitätszufuhr eine Jahresdosis zu berechnen. Die in Tab.5.16 aufgeführten Dosiswerte können deshalb nur bedingt mit dem Dosisrichtwert der Trinkwasserverordnung verglichen werden.

Insgesamt liegen die berechneten Werte unter der empfohlenen Richtdosis von 0,1 mSv/a. Verglichen mit der jährliche Strahlenbelastung in Deutschland aufgrund terrestrischer und kosmischer, externer und interner Strahlenquellen von 2.4 mSv ist die Belastung durch die Aufnahme natürlicher Radionuklide mit dem Trinkwasser als vernachlässigbar gering einzuschätzen.

6 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Vorkommen und Verhalten natürlicher Radionuklide in der Trinkwasseraufbereitung. Bei einem Wasserversorgungsunternehmen in Nordbayern wurde das Trinkwasser und die bei der Aufbereitung anfallenden Rückstände, sowie die Schlämme in der Kläranlage beprobt.

Die Überwachung der Radioaktivität der Umwelt erfolgt zum Schutz der Bevölkerung und soll eine Beurteilung ermöglichen, in welchem Maße der Mensch ionisierender Strahlung aus der natürlichen Umwelt ausgesetzt ist. Von Interesse waren hauptsächlich die Aktivitätskonzentrationen der Uran-, Radon- und Thoriumisotope, ferner wurden weitere natürliche Radionuklide bestimmt.

Zur Untersuchung wurden alpha- und gamma-spektrometrische Messungen und eine Vergleichsmessung mit der ICP-MS durchgeführt. Vor der Alpha-Spektrometrie mussten die Proben radiochemisch aufbereitet werden, um eine Absorption der zu messenden Strahlung im Probenmaterial zu verhindern. Mit den so erhaltenen Messpräparaten konnten die Uran- und Thorium-Messungen durchgeführt werden. Für die Messung der Radonaktivitätskonzentrationen der Wasserproben war keine Aufbereitung notwendig, die speziellen radondichten Flaschen konnten ohne Vorbereitung auf den Detektor gestellt werden. Um weitere Radionuklide mittels Gamma-Spektrometrie messen zu können, mussten die Proben mit einem Rotationsverdampfer eingeeengt werden. Auf diese Weise konnte die Nachweisempfindlichkeit erhöht werden.

In den Wasserproben liegen die Aktivitätskonzentrationen unterhalb des Referenzwertes von 100 Bq/L für Radon. Durch die Aufbereitung des Wassers in der TWA wird das Radon jedoch fast vollständig aus dem Wasser entfernt und stellt somit keine Gefahr für die Bevölkerung dar. Lediglich die Mitarbeiter in den Wasserwerken könnten bei unzureichender Belüftung einer Strahlenexposition durch Radon in der Atemluft ausgesetzt werden.

Die Urankonzentrationen sind mit 0,05 bis 15 µg U-238/L innerhalb des Maßnahmewertes von 20 µg/L. Im Gegensatz zu Radon werden die Uranaktivitätskonzentrationen durch die Aufbereitung aber nicht beeinflusst und können sich demzufolge nicht in den Schlämmen anreichern.

Eine Anreicherung in den Schlämmen der Aufbereitungsrückstände der TWA konnte nur für Radium (Ra-226) nachgewiesen werden. Ein Zusammenhang zwischen dem Gehalt der Schlämme an organischem Material und den gemessenen Uranaktivitäten besteht nicht.

Auf Thorium wurden nur drei Proben untersucht. Die geringen gemessenen Thoriumaktivitäten lassen sich auf seine geringe Löslichkeit im Wasser zurückführen. Weitere natürliche Radionuklide, beispielsweise K-40 und Pb-210 konnten nur nahe der Nachweisgrenze mit einem vergleichsweise hohen Fehler nachgewiesen werden.

Die berechnete effektive Körperdosis liegt mit 0,015 mSv deutlich unter der empfohlenen Richtdosis von 0,1 mSv. Die Strahlenexposition aufgrund terrestrischer und kosmischer, externer und interner Strahlenquellen liegt in Deutschland bei 2.4 mSv, wobei allein die Umgebungsstrahlung zu etwa 0.4 mSv/a führt. Eine zusätzliche Strahlenbelastung der Bevölkerung durch die Ingestion natürlicher Radionuklide mit dem Trinkwasser ist nicht zu erwarten.

7 Literatur

AbwV (2004): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer, vom 17. Juni 2004, BGBl. I Nr. 28 vom 22.6.2004 S. 1108.

DEBERTIN K. (1992): Gamma-Spektrometrie In: Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1992-2000): Messanleitungen Umwelt-radioaktivität, Loseblattsammlung, Urban & Fischer, München.

DEGERING A. (2001): Bestimmung der Dosisleistung, Sächsische Akademie der Wissenschaften, Forschungsstelle Geochronologie Quartär auf: http://www.physik.tu-freiberg.de/wwwan/q_bddl.html#1 (Stand 17.10.2001).

EICHROM (2005): <http://www.eichrom.com/products/tech/truresin.cfm> und <http://www.eichrom.com/products/tech/utevaresin.cfm> mit Stand vom Juli 2005.

EMSLEY J. (1992): The Elements. Clarendon Press, Oxford.

EURATOM (1996): Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen (ABl. Nr. L 159 vom 29.6. 1996 S. 1).

HABERER K. (1999): Radium 226 in Filterschlämmen der Grundwasseraufbereitung. Vom Wasser, 92, 335-245.

HÄUSSINGER, H. (1998): Der Amtsbezirk des Wasserwirtschaftsamtes Bayreuth geologisch gesehen In: Festzeitschrift zu den Winterspielen der Bayerischen Wasserwirtschaft, Bayreuth.

HORWITZ E.P. et al. (1992): Separation and preconcentration of uranium from acidic media by extraction chromatography, Analytica Chimica Acta, Vol.266, pp. 25-37.

KEMPSKI J., KLINGEL R., SIEHL A. (1996): Das geogene Radon-Potential. In: Siehl A. (Hrsg.): Umweltradioaktivität, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.

KONIETZKA R., DIETER H. H. & VOSS J.-U. (2005): Vorschlag für einen gesundheitlichen Leitwert für Uran in Trinkwasser, Umweltmed Forsch Prax 10 (2), S. 133 –143.

LANGMUIR D. (1997): Aqueous environmental geochemistry, Prentice Hall, 200 S.

MERKEL B. & SPERLING B. (1998): Hydrogeochemische Stoffsysteme II, DVWK –Schriften H. 117.

NOPPER R. (2003): Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung von Spurengehalten Selte-
ner Erden in verschiedenen Matrices mit ICP-AES nach Anreicherung und Abtrennung mit-
tels Extraktionschromatographie, Dissertation der Universität Duisburg-Essen.

OSMOND (1992): In: Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and
Environmental Sciences; M. Ivanovich and R.S. Harmon; Clarendon Press, Oxford, 1992.

RAFF et al. (1999) : Radonreduzierung in Wasserwerken. Schriftenreihe BMU 1999-554.

RÜHLE H. (2001): Natürliche radioaktive Stoffe in Trinkwasser und Mineralwasser. Strahlen-
schutzpraxis 01/2001.

STOLZ W. (1990): Radioaktivität. Carl Hanser Verlag München Wien, 216 S.

StrlSchV (2001): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen,
Vom 20. Juli 2001, BGBl. I Nr. 38 vom 26.07.2001, S. 1714.

TrinkwV (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch,
vom 21. Mai 2001, BGBl. I Nr. 24 vom 28.5. 2001 S. 959.

VOGL K. (1992): Alpha-Spektrometrie. In: Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit (1992-2000): Messanleitungen Umweltradioaktivität, Loseblattsammlung,
Urban & Fischer, München.

WEDEPOHL K.H. (1978): Handbook of Geochemistry. Springer Verlag Berlin Heidelberg New
York.

WHO, World Health Organization (1998): Guidelines for drinking water quality, 2nd ed., Ad-
dendum to vol. 1 – recommendations- Uranium. WHO, Geneva, S. 10-11.

WHO, World Health Organization (1998): Guidelines for drinking water quality, 3rd ed., vol. 1
– recommendations, WHO, Geneva, S. 454-456.

ZIELINSKY R.A., OTTON J.K., WANTY R.B. & PIERSON C.T. (1987): The geochemistry of water
near a surficial organic-rich uranium deposit, northeast Washington State, USA. Chem.
Geol., 62, 263-289.

Anhang

Anhang A 1

Aufbereitung der Wasserproben vor der Messung mittels Alpha-Spektrometrie

1. Gesamtvolumen je Probe 1 L
2. zunächst jede Probe mit 100 ml HNO_3 (konz.) ansäuern
3. für die Uranmessung 0,06 ml des U-232-Standards vom 11.06.1990 zugeben, etwa 32.41 mBq/L, für die Thoriumbestimmung 0,05 ml des Th-229-Standards vom 21.03.1990 mit einer Aktivitätskonzentration von 64,46 mBq/L zugeben
4. Probe mit je 2 ml Ca^{2+} -Trägerlösung (50 mg Ca^{2+} /ml, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ in H_2O) versetzen
5. die Probelösung mit dem Uhrglas abgedeckt etwa 3 Stunden lang bei mehr als 80 °C im Wasserbad erhitzen und dabei ständig rühren
6. anschließend die Probe vom Wasserbad nehmen
7. für die Mitfällung zunächst 10 ml Phosphat-Lösung (300 mg PO_4^{3-} /ml, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ in H_2O) zusetzen
8. etwa 5 Minuten rühren
9. Zugabe von mindestens 100 ml konz. NH_4OH , Niederschlag musste dabei gut sichtbar werden
10. Entfernen des Rührstäbchens
11. Niederschlag über Nacht absetzen lassen
12. Überstand vorsichtig dekantieren und aufbewahren
13. Niederschlag mit Reinstwasser in Zentrifugenröhrchen überführen
14. bei 2500 U/min eine Viertel Stunde lang zentrifugieren
15. Probe mit destilliertem Wasser in ein Becherglas überführen
16. auf dem Sandbad dreimal mit 10 ml HNO_3 und einem Tropfen H_2O_2 abrauchen
17. vom Extraktionsharz UTEVA-Resin der Firma Eichrom 0.7 g abwiegen und über Nacht in destilliertem Wasser vorquellen
18. Säule befüllen
19. Konditionierung mit 20 ml 3M HNO_3
20. Aufgabefraktion besteht aus der Probe in 10 ml 3M HNO_3 /0.5M $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$
21. Säule mit 5x5 ml 3M HNO_3 spülen
22. Elution der Thoriumfraktion mit 4 ml 9M HCl und 10 ml 5M HCl
23. Elution der Uranfraktion mit 20 ml 0.01M HCl
24. Uranfraktion in einem extra Becherglas auffangen, in dem bereits 0.4 ml H_2SO_4 vorgelegt sind
25. Thoriumbestimmung mit einer Doppelsäule
26. erst U/TEVA-Resin der Firma Eichrom mit der Korngröße 100 – 150 μm und anschließend TRU-Resin derselben Firma
27. je 0.7 g abwiegen und über Nacht in destilliertem Wasser vorquellen
28. Konditionierung der U/TEVA-Säule mit 20 ml 3M HNO_3
29. TRU-Säule wird mit 20 ml 2M HNO_3 konditioniert
30. Probe in 10 ml 3M HNO_3 /1M $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ aufgeben

184 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

31. Säulen wird 3x5 ml 3M HNO₃, 5 ml 9M HCl und 3x5 ml 5M HCl/0,05M Oxalsäure gespült
32. anschließend die Säulen trennen und einzeln eluieren
33. Uranfraktion (U/TEVA-Säule) mit 20 ml 0,01M HCl eluieren
34. Thoriumfraktion (TRU-Säule) mit 7x5 ml 1M HNO₃ spülen und mit 20 ml Bioxalat von der Säule waschen.
35. für die nachfolgende Thoriumbestimmung wird diese letzte Fraktion in einem extra Becherglas, in dem bereits 0.4 ml H₂SO₄ vorgelegt wurden, aufgefangen
36. vor der Elektrodeposition die Lösungen nochmals unter Zugabe von einem Tropfen H₂O₂ abrauchen bis SO₃-Dämpfe entweichen
37. 15 ml Reinstwasser, 3 Tropfen Methylrot als Indikator und konzentrierte NH₃-Lösung zugeben, bis ein Farbumschlag nach gelb erfolgt
38. um den pH-Wert von 2-3 zu gewährleisten, 5%ige H₂SO₄ bis zum Farbumschlag nach rot zugeben
39. Lösung mit 15 ml Reinstwasser in die Elektrolysezelle überführen
40. Elektrolyse bei einer Stromstärke von 0.8 Ampere für Uran und 1.0 Ampere bei Thorium
41. Elektrolyse 3 Stunden durchführen
42. kurz vor Beendigung mit Methylrot und konz. NH₃-Lösung bis zum Farbumschlag nach gelb den pH-Wert wieder einstellen
43. Elektrolyseplättchen entnehmen
44. mit Reinstwasser und Ethanol spülen
45. bis zur Messung in ein PE-Döschen legen

Anhang A 2

Aufbereitung der Schlammproben vor der Messung mittels Alpha-Spektrometrie

1. Probe bis zur Gewichtskonstanz bei 80°C im Trockenschrank getrocknet
2. Veraschung im Veraschungsofen bei 500 °C
3. die veraschte Probe mit konz. HNO₃ versetzen bis alles benetzt ist und eine Stunde im Veraschungsofen bei 500 °C nachveraschen
4. ca. 5 g Probe in 250 ml Erlenmeyerkolben einwiegen
5. mit 120 µl U-232 tracern (75,12 mBq)
6. 30 ml 0,9M HF/ 8 M HNO₃ zugeben (unter Säureabzug)
7. auf dem Sandbad unter dem Säureabzug 30 min. kochen lassen, dabei mit Uhrglas abdecken
8. zur heißen Lösung werden vorsichtig 0,25 g NaNO₂ zugegeben (NO₃ entweicht)
9. abkühlen lassen und in Zentrifugenbehälter füllen und zentrifugieren (2300U/min, 15 min.)
10. Überstand in 250 ml Becherglas füllen
11. Rückstand mit 25 ml 8 M HNO₃ zurück in den Erlenmeyerkolben spülen und nochmals 30 min. unter dem Säureabzug kochen
12. zur heißen Lösung vorsichtig wiederum 0,25 g NaNO₂ zugeben
13. abkühlen, zentrifugieren und 2. Überstand zum 1. Überstand geben
14. einengen mit H₂O₂ bis fast zur Trockene
15. aufnehmen in 30 ml 2 M HNO₃/0,05 M Al(NO₃)₃ (Aufgabefraktion)
16. TRU-Säule mit 0,7 g TRU-Resin der Firma Eichrom, vorgequollen, vorbereiten
17. Konditionieren der Säule mit 10 ml 0,1 M (NH₄)HC₂O₄ und 20 ml 2 M HNO₃
18. Aufgabefraktion auf die Säule geben
19. Säule spülen mit 1x5 ml 2 M HNO₃/0,5 M Al(NO₃)₃ und 2x5 ml 2 M HNO₃/0,05 M (NH₄)HC₂O₄/0,02 M HF
20. Elution der Uranfraktion mit 10 ml 0,025 M HNO₃ und 20 ml 0,1 M (NH₄)HC₂O₄
21. Elutionsfraktion wird mit 10 ml 0,5 M Al(NO₃)₃/H₂O versetzt und mit H₂O₂ bis fast zur Trockene eingengt
22. aufnehmen der Probe in 20 ml 4 M HNO₃
23. UTEVA-Säule mit 0,7 g UTEVA-Resin der Firma Eichrom, vorgequollen, vorbereiten
24. Säule mit 20 ml 4 M HNO₃ konditionieren
25. Aufgabe der Probefraktion und Nachspülen des Bechers mit 5 ml 4 M HNO₃
26. Spülen der Säule mit 5x5 ml 4 M HNO₃
27. Elution der Uranfraktion mit 25 ml 0,025 M HCl
28. für die nachfolgende Bestimmung wird diese letzte Fraktion in einem extra Becherglas, in dem bereits 0.4 ml H₂SO₄ vorgelegt wurden, aufgefangen
29. vor der Elektrodeposition die Lösungen nochmals unter Zugabe von einem Tropfen H₂O₂ abrauchen bis SO₃-Dämpfe entweichen
30. weiter wie unter A1 Nr. 37 bis 45

Anhang B 1

Messtechnik der Alpha-Spektrometrie

Es standen zur Verfügung:

- 8 Messkammern der Fa. EG&G ORTEC:
Alpha-King™ Spectrometer Typ 676 A mit ionenimplantierten Teilchendetektoren (Detektorfläche 900 mm²), Abstand zwischen Messpräparat und Detektor ca. 5 mm
Elektronische Komponenten: Stromversorgung (NIM-Überrahmen), Vielkanalanalysator mit Analog-Digital-Wandler
Software: InterWinner/InterAlpha der Fa. Eurisys GmbH
Zubehör: Vakuumverteilung mit Druckanzeige, Drehschiebervakuumpumpe
- Alpha-Analyst Komplettsystem der Fa. Canberra mit integrierter Messelektronik, bestückt mit 12 Messkammern mit ionenimplantierten Teilchendetektoren (Detektorfläche 600 mm²), Abstand zwischen Messpräparat und Detektor ca. 3 mm
Software: Genie 2000 Basissoftware/Alpha-Analyst V2.0B der Fa. Canberra GmbH

Anhang B 2

Messtechnik der Gamma-Spektrometrie

Detektor 1:

Reinstgermaniumdetektor der Firma EG&G ORTEC:

Messbereich: 60-2000 keV

Relative Ausbeute: ca. 40%

Detektor 2:

Reinstgermaniumdetektor der Firma Eurisys GmbH:

Messbereich: 30-2000 keV

Relative Ausbeute: ca. 60%

Elektronische Komponenten:

Stromversorgung, Hochspannungsversorgung, Hauptverstärker, Analog-Digital-Wandler, Vielkanalanalysator

Software:

InterWinner/InterGamma der Fa. Eurisys GmbH

Zubehör:

Bleiburg in Low-Level-Ausführung (jeder Detektor), Probenwechsler (nur Detektor 1), unterbrechungsfreie Stromversorgung

Anhang C 1

Radonmessungen

Tab. C1-1: Radonmessungen nach der ersten Probenahme

Probenahme			Messung					
Probe	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Messzeit [s]	Aktivitätskonz. [Bq/L]	Fehler [%]	NWG [Bq/L]
W 801	12.04.05	8:08	13.04.05	6:27	33655	19,6	8,7	1,1
W 802	12.04.05	8:32	17.04.05	11:08	74923	9,7	15,5	1,6
W 803	12.04.05	9:05	19.04.05	8:27	28442	11,5	23,7	3,4
W 804	12.04.05	9:31	19.04.05	16:23	58654	60,8	8,6	2,8
W 805	12.04.05	11:18	12.04.05	16:21	50524	43,1	6,9	0,9
W 806	12.04.05	11:21	13.04.05	15:54	59148	27,7	7,4	0,9
W 807	12.04.05	11:26	14.04.05	16:28	72320	1,2	55,4	0,9
W 808	12.04.05	12:52	18.04.05	16:30	57254	23,1	11,4	2,2
W 809	12.04.05	13:08	18.04.05	8:01	25846	33,7	11,6	3,0

Tab. C1-2: Radontestmessungen nach der ersten Probenahme

Probenahme			Messung					
Probe	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Messzeit [s]	Aktivitätskonz. [Bq/L]	Fehler [%]	NWG [Bq/L]
W 802	12.04.05	8:32	14.4.05	15:05	3600	9	50	4,3
W 803	12.04.05	9:05	14.4.05	13:55	3600	11	26,6	3,4
W 804	12.04.05	9:31	14.4.05	12:38	3600	60	11,7	4,2
W 808	12.04.05	12:52	14.4.05	11:34	3600	26	16,6	3,8
W 809	12.04.05	13:08	14.4.05	10:28	3600	36	14,1	4,2

Tab. C1-3: Radonmessungen nach der zweiten Probenahme

Probenahme			Messung					
Probe	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Messzeit [s]	Aktivitätskonz. [Bq/L]	Fehler [%]	NWG [Bq/L]
W 805	25.05.05	8:38	31.05.05	16:32	50487	36,9	9,9	-
W 806	25.05.05	8:36	31.05.05	8:36	28379	32,9	12,2	-
W 807	25.05.05	8:31	27.05.05	11:05	19053	1,5	74,8	1,7
W 810	25.05.05	8:19	27.05.05	6:40	15684	35,2	10,4	2,3
W 811	25.05.05	8:25	27.05.05	16:25	86408	1,5	48,6	-
W 812	25.05.05	8:29	01.06.05	6:37	86408	0	-	2,3

Tab. C1-4: Vergleich der Messergebnisse in unterschiedlichen Probehältnissen

Messung in einer Kautex-Flasche				Messung in einer radondichten Flasche			
Isotop	Aktivität [Bq/L]	Fehler [%]	NWG [Bq/L]	Isotop	Aktivität [Bq/L]	Fehler [%]	NWG [Bq/L]
W 805	25.05.05	8:38	31.05.05	16:32	50487	36,9	9,9
W 806	25.05.05	8:36	31.05.05	8:36	28379	32,9	12,2
W 807	25.05.05	8:31	27.05.05	11:05	19053	1,5	74,8
W 810	25.05.05	8:19	27.05.05	6:40	15684	35,2	10,4
W 811	25.05.05	8:25	27.05.05	16:25	86408	1,5	48,6
W 812	25.05.05	8:29	01.06.05	6:37	86408	0	-

Tab. C1-5: Berechnung des Korrekturfaktors

Kautex-Flasche		radondichte Flasche		Korrekturfaktor
Isotop	Aktivität A ₁ [Bq/L]	Aktivität A ₂ [Bq/L]	Anteil in %	$k = A_1/A_2$
Co-60	10,12	8,85	87,45	1,144
Cs-137	7,24	6,13	84,67	1,181
Ba-133	6,76	5,68	84,02	1,190

Tab. C1-6: Ergebnisse der Radonmessung mit der Gamma-Spektrometrie

Nr.	Probe	1.Probenahme Aktivitäts- Konzentration [Bq/L]	2.Probenahme Aktivitäts- Konzentration [Bq/L]
W 801	Brunnen 2	22,9	-
W 802	Brunnen 5	11,3	-
W 803	Brunnen 8	13,5	-
W 804	Brunnen 7	71,1	-
W 805	Rohwasser GM	50,4	43,2
W 806	Rohwasser MT	32,4	38,5
W 807	Reinwasser	1,4	1,8
W 808	Brunnen 3	27,0	-
W 809	Brunnen 4	39,4	-
W 810	Mischwasser	-	41,2
W 811	entsäuertes Wasser	-	1,8

Anhang C 2

Uranmessungen

Tab. C2-1: Ergebnisse der Uranmessung in Wasserproben der ersten Probenahme

Probe	Messzeit [s]	U-234			U-235			U-238		
		Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]
W 801	238.068	107	7,6	0,2	1,7	36,2	0,2	43	17,9	0,2
W 802	237.910	108	8,0	0,1	5,0	25,1	0,4	78	17,3	0,1
W 803	237.987	223	7,0	0,2	5,8	24,4	0,2	130	17,2	0,2
W 804	238.025	266	7,2	0,2	5,8	24,9	0,2	147	17,3	0,2
W 805	238.160	2	23,9	0,2	nn	nn	nn	1	35,4	0,2
W 806	260.000	269	10,9	0,4	7,0	30,7	0,5	163	19,2	0,4
W 807	260.000	158	11,4	0,4	4,0	38,2	0,5	90	19,8	0,4
W 808	260.000	312	7,8	0,2	8,6	23,8	0,3	183	17,5	0,2

Tab. C2-2: Ausbeute und Wiederfindungsraten der ersten Probenahme (ORTEC)

Probe	Detektor	Ansprechvermögen[%]	Ausbeute interner Standard	Wiederfindungsraten [%]	
W 801	det 4	36.22	0.275	0.759	75.9
W 802	det 5	36.22	0.304	0.839	83.9
W 803	det 6	36.58	0.289	0.790	79.0
W 804	det 7	35.71	0.269	0.753	75.3
W 805	det 8	35.55	0.289	0.813	81.3
W 806	det 1	36.06	0.103	0.286	28,6
W 807	det 2	36.40	0.101	0.277	27,7
W 808	det 3	36.20	0.208	0.575	57.5

Tab. C2-3: Ergebnisse der Uranbestimmung mit der ICP-MS [μ /L]

Probe	W 801	W 802	W 803	W 804	W 805	W 806	W 807	W 808	W 809	Referenz
U-238	3,23	5,37	9,40	10,4	0,047	12,5	7,01	14,8	13,2	<0.002

Tab. C2-4: Ergebnisse der Uranmessung in Wasserproben der zweiten Probenahme

Probe	Messzeit [s]	U-234			U-235			U-238		
		Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]
W 805	259200	2	14,2	0,1	n.n.	-	-	1	15,9	0,1
W 806	259200	255	11,3	0,2	6	12,66	0,2	149	11,3	0,1
W 807	259200	119	11,5	0,1	2	17,21	0,3	72	11,6	0,1
W 810	259200	143	11,5	0,1	3	15,35	0,1	83	11,5	0,2
W 811	259200	134	11,2	0,0	3	13,39	0,0	78	11,3	0,0
W 812	259200	102	11,4	0,1	2	16,01	0,2	56	11,5	0,1

Tab. C2-5: Wiederfindungsraten der zweiten Probenahme (Canberra)

Probe	W 805	W 806	W 807	W 810	W 811	W 812
Wiederfindungsraten [%]	77,8	55,3	34,6	39,3	77,7	44,8

Tab. C2-6: Gewichtsverluste bei den Schlammproben TG = Trockengewicht

Nr.	Probe	Datum	Gewicht in [g]			
			Trocken (TG)	verascht	zur Analyse	entspricht TG
S 801	TWA	25.5.05	300,62	294,75	4,97	5,07
S 802	Rohschlamm	03.6.05	21,66	8,30	8,00	20,88
S 803	Überschußschl.	03.6.05	1,38	0,61	0,50	1,13
S 804	Klärschlamm	03.6.05	128,83	73,74	5,01	8,75

Tab. C2-7: Urangelhalte in den Schlammproben [mBq/Probe] P = Probe

Probe	Messzeit [s]	U-234			U-235			U-238		
		Aktivität [mBq/P]	Fehler [%]	NWG [mBq/P]	Aktivität [mBq/P]	Fehler [%]	NWG [mBq/P]	Aktivität [mBq/P]	Fehler [%]	NWG [mBq/P]
S 801	81.000	78,9	10,8	0,31	3,45	42,5	0,4	54,9	19,5	0,3
S 802	260.000	2477	5,5	136	153,3	17,6	27,0	2147	16,5	355
S 803	260.000	184,7	7	12,9	5,3	28,9	1,5	116,2	17,3	20,1
S 804	260.000	1840	6,3	116,2	61,9	18,8	11,6	1185	16,8	199,6

Tab. C2-8: Ausbeute und Wiederfindungsraten der ersten Schlammproben (ORTEC)

Probe	Detektor	Ansprechvermögen[%]	Ausbeute interner Standard	Wiederfindungsraten [%]
S 801	det 1	36,06	0,27	0,75
S 802	det 1	36,06	0,21	0,58
S 803	det 7	35,71	0,15	0,42
S 804	det 8	35,55	0,15	0,42

192 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung

Tab. C2-9: Umrechnung von [mBq/Probe] in [mBq/g]

Probe	m_t Gewicht [g]	A_1			$A_2 = A_1 / m_t$		
		U-234 [mBq/P]	U-235 [mBq/P]	U-238 [mBq/P]	U-234 [mBq/L]	U-235 [mBq/L]	U-238 [mBq/L]
S 801	5,07	79	3	55	16	1	11
S 802	20,88	2477	153	2147	119	7	103
S 803	1,13	185	5	116	164	4	103
S 804	8,75	1840	62	1185	210	7	135

Anhang C 3

Thoriummessungen

Tab. C3-1: Ergebnisse der Thoriumbestimmung der ersten Probenahme mit Alpha-Spektrometrie

Probe	Messzeit [s]	Th-228			Th-232		
		Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Fehler [%]	NWG [mBq/L]
W 805	259.200	0,20	30,60	0,15	0,17	27,69	0,08
W 806	259.200	0,46	25,05	0,27	0,11	40,98	0,05
W 807	259.200	0,11	55,58	0,19	n.n.	-	-

Tab. C3-2: Ergebnisse der Thoriumbestimmung der ersten Probenahme mit ICP-MS

Probe	W 801	W 802	W 803	W 804	W 805	W 806	W 807	W 808	W 809	Referenz
Th [µg/L]	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

Anhang C 4

Radiummessungen und weitere Radionuklide

Tab. C4-1: Ergebnisse der Untersuchung der eingeeengten Wasserproben mit der Gamma-Spektrometrie bezogen auf 5 L Probevolumen

Probe	Messzeit [s]	K-40	Pb-210	Pb-214	Bi-214	Ra-226	U-234	U-238
		Aktivität [Bq/P]	Aktivität [Bq/P]	Aktivität [Bq/P]	Aktivität [Bq/P]	Aktivität [Bq/P]	Aktivität [Bq/P]	Aktivität [Bq/P]
W 805	85.950	0,96	0,25	0,06	0,06	0,50	7,95	0,22
W 806	86.400	1,23	5,83	0,14	0,11	1,46	88,32	-
W 807	86.400	0,86	0,49	0,07	0,08	0,56	10,59	0,33
W 808	86.400	1,76	6,85	0,15	0,12	1,62	107,50	-

Tab. C4-2: Ergebnisse der Untersuchung der eingeeengten Wasserproben mit der Gamma-Spektrometrie in mBq/L

Probe	Messzeit [s]	K-40	Pb-210	Pb-214	Bi-214	Ra-226	U-234	U-238
		Aktivität [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]	Aktivität [mBq/L]
W 805	85.950	192	50	12	12	100	1590	44
W 806	86.400	246	1166	28	22	292	17664	-
W 807	86.400	172	98	14	16	113	2118	66
W 808	86.400	352	1370	29	24	324	21500	-

Tab. C4-3: Ergebnisse der Untersuchung der Schlammproben mit der Gamma-Spektrometrie

Probe	Messzeit [s]	K-40	Pb-210	Pb-214	Bi-214	Ra-226
		Aktivität [Bq/g]	Aktivität [Bq/g]	Aktivität [Bq/g]	Aktivität [Bq/g]	Aktivität [Bq/g]
S 801	85.950	21.600	1,55	1,92	0,76	1,45
S 804	86.400	21.600	n.n.	0,22	0,07	0,47

Anhang D 1

Berechnung der effektiven Körperdosis

Tab. D1-1: Berechnung der effektiven Körperdosis

Probe	c_r [mBq/L]	g_i [mSv/mBq]	$H_e = g_i \cdot U_w \cdot c_r$		U_w [L/a]	H_e [mSv/a]
			U_w [L/a]	H_e [mSv/a]		
U-238	81	4,50E-08	350	1,28E-03	750	2,73E-03
U-235	3	4,70E-08	350	4,94E-05	750	1,06E-04
U-234	139	4,90E-08	350	2,38E-03	750	5,11E-03
Ra-226	113	2,80E-07	350	1,11E-02	750	2,37E-02
Th-228	0,11	7,20E-08	350	2,77E-06	750	5,94E-06
Summe				<u>1,48E-02</u>		<u>3,17E-02</u>