



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](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Verfasser: Dr. Ronzon Mallick

Stand: Abschlussbericht zum 31. Dezember 2006

### Zitiervorschlag:

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

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>5</b> |
| 1.1      | Ziele des Untersuchungsvorhabens                                       | 5        |
| <b>2</b> | <b>Gesetzliche Grundlagen</b>  | <b>7</b> |
| 2.1      | Euratom-Richtlinie und Strahlenschutzverordnung                        | 7        |
| 2.2      | Trinkwasserverordnung  | 8        |
| <b>3</b> | <b>Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen</b>                        | <b>9</b> |
| 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        |
| <b>4 Ergebnisse der eigenen Untersuchungen von Rückständen aus der Trinkwasseraufbereitung</b>     | <b>25</b> |
| 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        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>5</b>  | <b>Radionuklid-Verteilung in Roh- und Reinwasser nach der Aufbereitung</b>                | <b>61</b> |
| 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        |
| <b>6</b>  | <b>Klärschlammuntersuchungen</b>  | <b>75</b> |
| <b>7</b>  | <b>Wasser, Rückspülschlämme und Geologie</b>  | <b>77</b> |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>79</b> |
| <b>9</b>  | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>83</b> |
| <b>10</b> | <b>Anhang</b>   | <b>89</b> |
| 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 <sup>3</sup>                         | 109       |
| C.2.2     | Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,003 g/m <sup>3</sup>                        | 115       |
| C.3       | Dosisabschätzung für alle untersuchten Rückspülschlämme aus der Mineralwasseraufbereitung | 121       |
| C.3.1     | Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,01 g/m <sup>3</sup>                         | 121       |
| C.3.2     | Dosisabschätzung mit Staubkonzentration von 0,003 g/m <sup>3</sup>                        | 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  $U^{3+}$ ,  $U^{4+}$ ,  $UO^{2+}$  (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, Thorium-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/<br>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 angegebene 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]             |
| <b>Thermalwassersystem</b><br>Rohrablagerungen        | —                                    | 12.700                    | —               | 9.000                     | [43]             |
| <b>1 Wasserwerk</b><br>Filtersand<br>Rückspülschlamm  | —<br>—                               | 4.300<br>700              | —<br>—          | 2.100<br>480              | [44]             |
| <b>1 Wasserwerke</b><br>Rückspülschlamm<br>Aktivkohle | 5.800 – 6.100<br>8.800               | 4.500 – 5.600<br>9.500    | —<br>—          | 2.500 – 2.700<br>6.900    | [45]             |
| <b>19 Wasserwerke</b><br>Enteisenung<br>Entsäuerung   | 20 - 120<br>20 - 120                 | 300 – 6.300<br>< 10 – 200 | —<br>—          | 300 – 8.400<br>< 10 - 200 | [5]              |

### 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 ( $\text{KMnO}_4$ ) oder Ozon ( $\text{O}_3$ ) 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 ( $\text{MnO}_2$ ) die höchste Sorptionsfähigkeit für Radium.

Eine Verbesserung des Filterprozesses kann durch das regelmäßige Rückspülen der Sandfilter mit verdünnter Säure (Salzsäure,  $\text{HCl}$ ) 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 ( $\text{CO}_2$ ) 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) oder Marmor. Als Rückstand fallen Filterspülwässer an, die Filtermaterial und auch Eisen- und Manganverbindungen enthalten. Bei den Dosierverfahren erfolgt eine Reaktion des  $\text{CO}_2$  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 ( $\text{RaCO}_3$ ) und Radiumsulfat ( $\text{RaSO}_4$ ) 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 (CaCl<sub>2</sub>) 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 (H<sub>2</sub>S) 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 [Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>] 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:

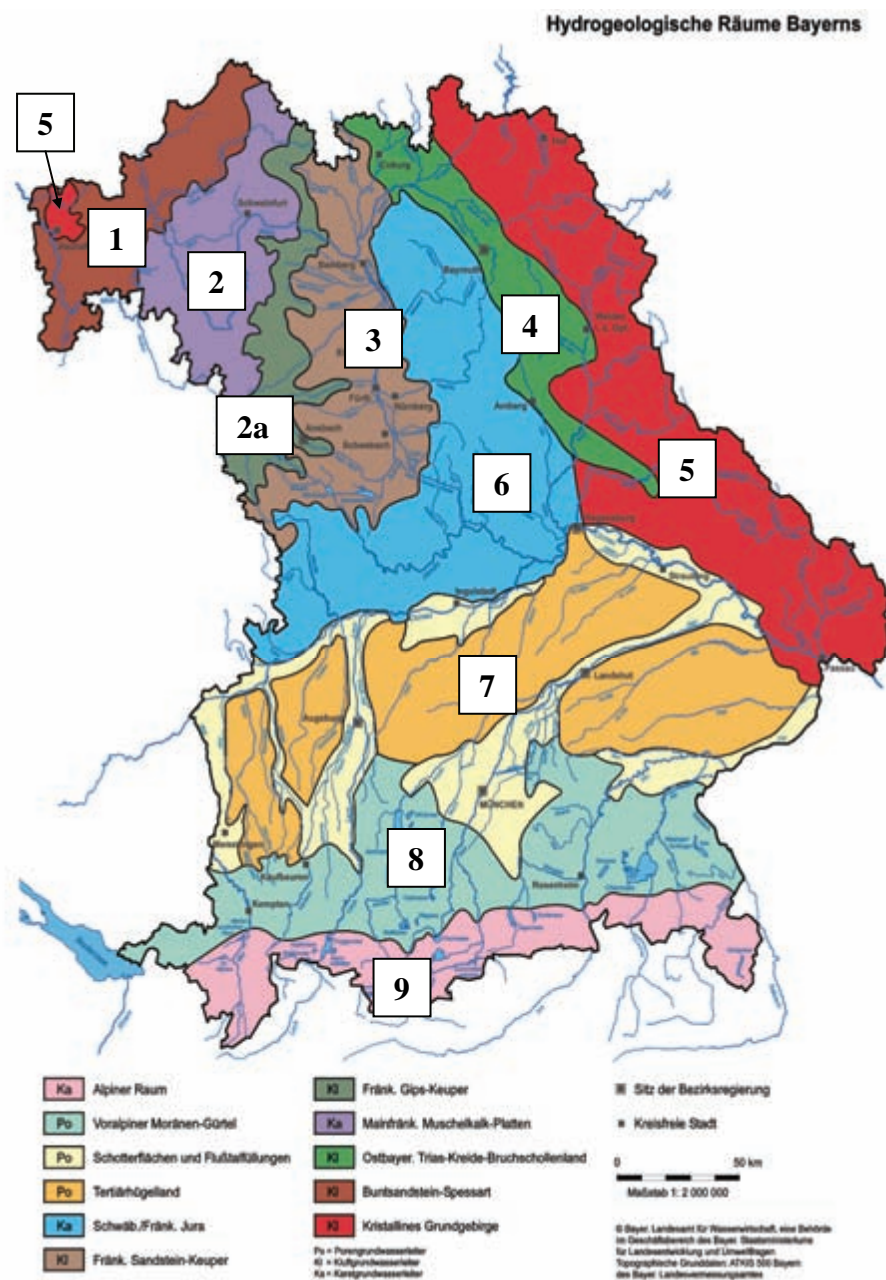


Abb. 1: Die hydrogeologischen Räume (Georegionen) Bayerns (nach [71]) siehe Text

**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.

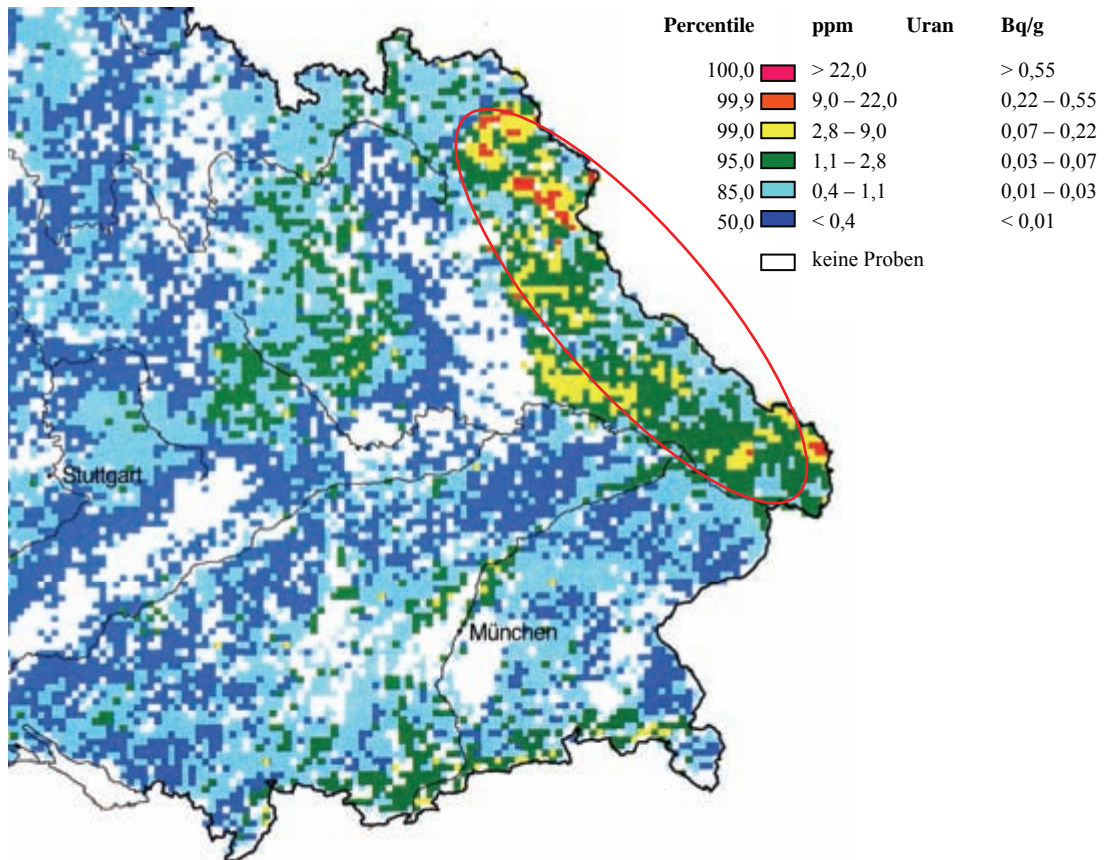


Abb. 2: Urangelhalte in Bachsedimenten (nach [72])

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

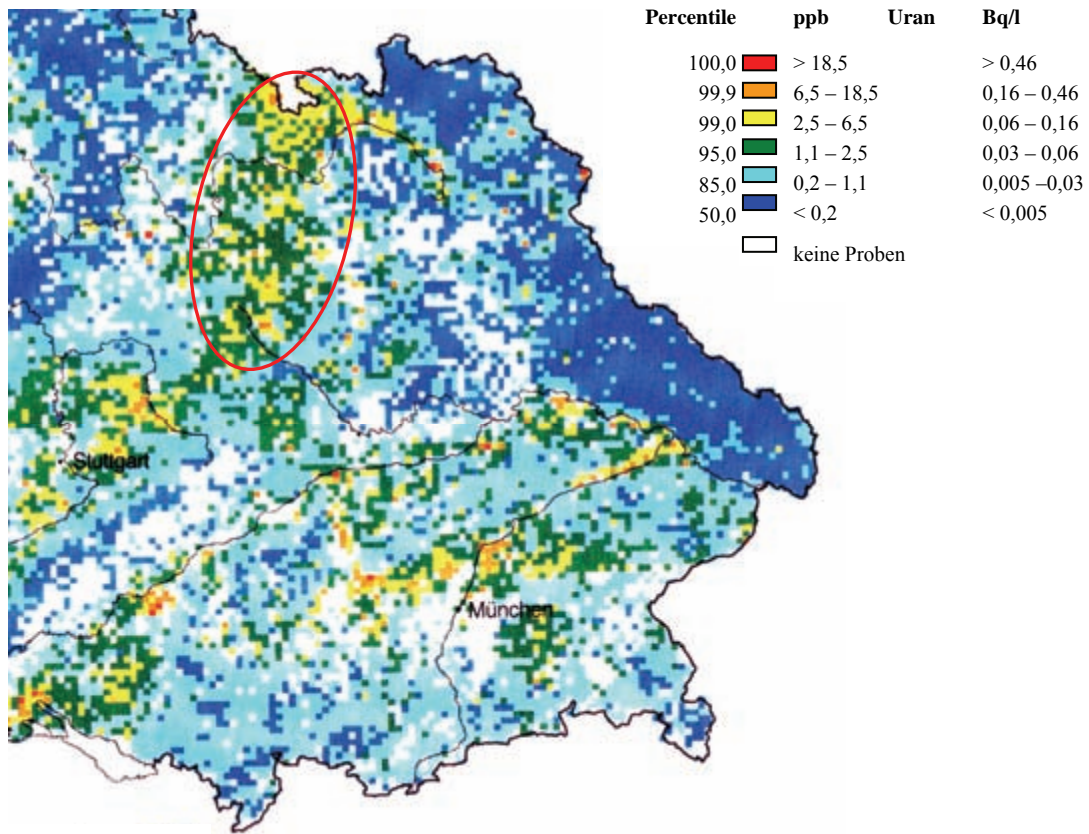


Abb. 3: Urangelhalte in Bachwässern (nach [72])

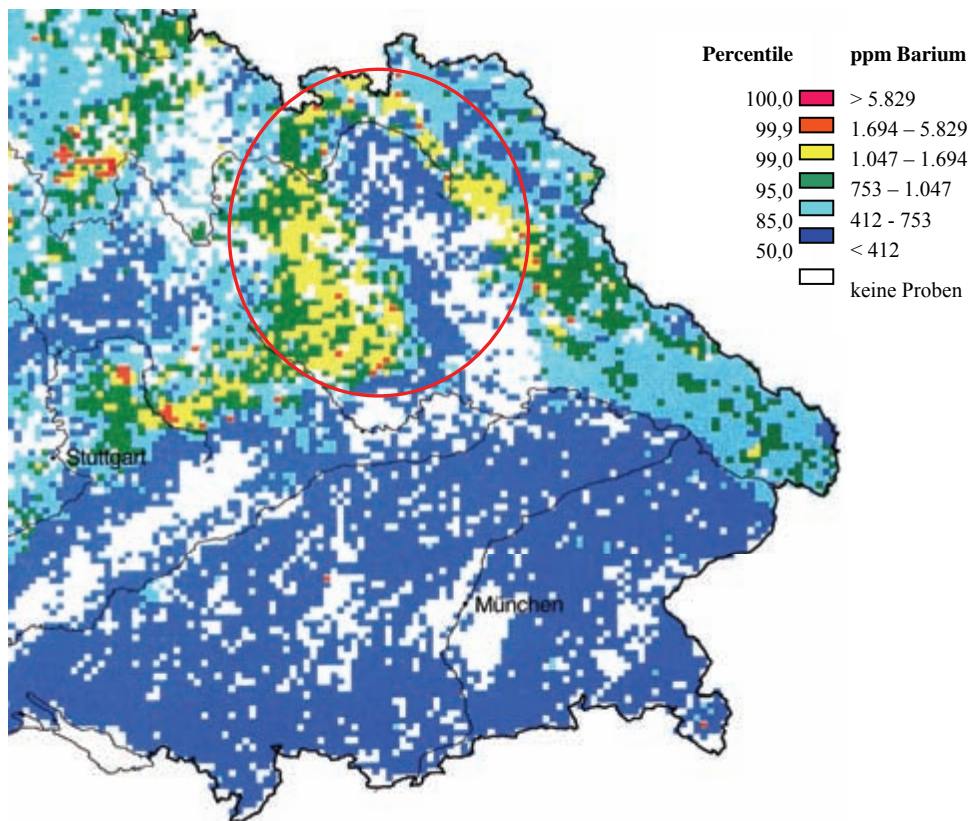


Abb. 4: Bariumgehalt in Bachsedimenten (nach [72])



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 Rückspülschlammungen 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 Rückspülschlammungen 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 Rückspülschlammungen 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.

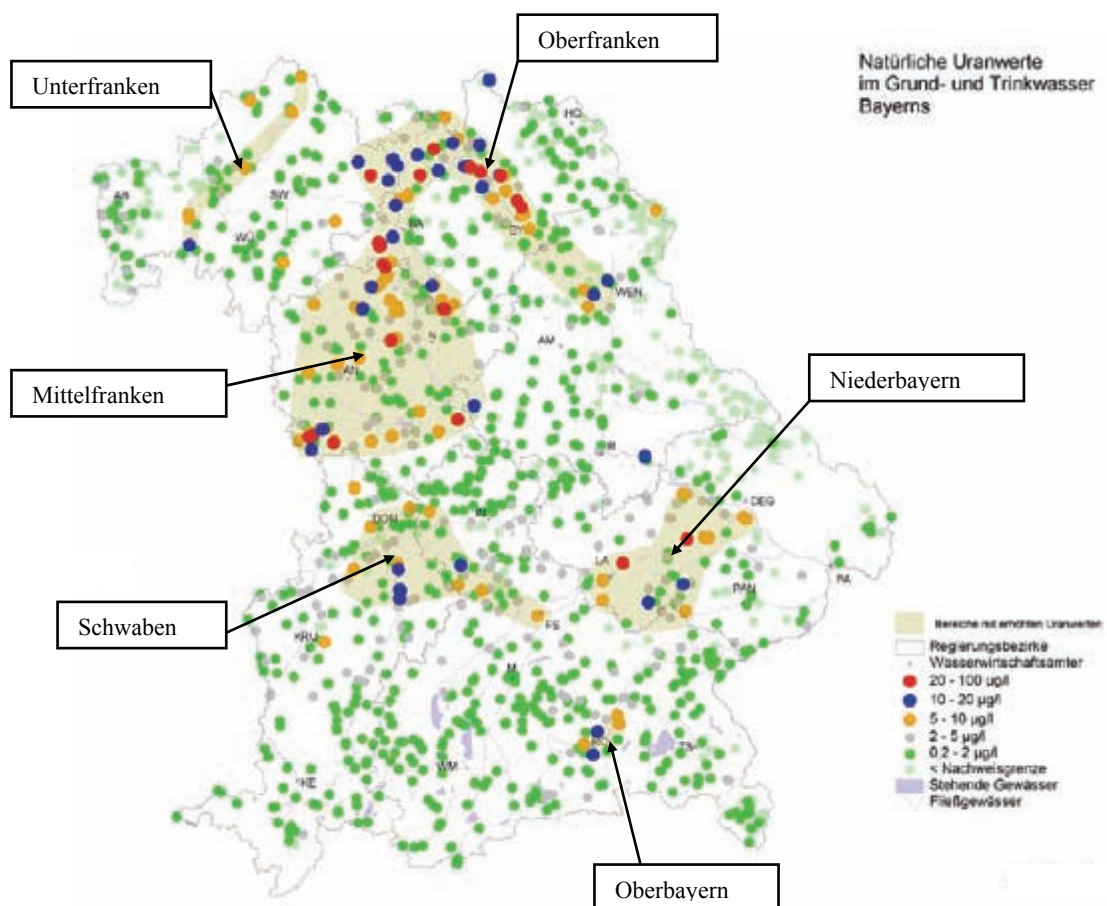


Abb. 5: Bayernkarte mit den natürlichen Uranwerten in Grund- und Trinkwasser [30]

In den nächsten Abschnitten stellen wir die Ergebnisse unserer Recherchen und unserer Untersuchungen von Rückspülschlammungen 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<br>[5] |
| Anzahl untersuchter WVU's  | 212                     | 18                        |
| Anzahl untersuchter Rückspülschlammproben                                  | 263                     | 19                        |
| <b>Art der Aufbereitung</b>  |                         |                           |
| reine Enteisenung  | 17                      | 0                         |
| reine Entmanganung   | 0                       | 1                         |
| reine Arsenentfernung  | 4                       | 1                         |
| Enteisenung, Entmanganung, Arsenentfernung<br>(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                        |
| <b>Anfallmenge an Rückspülschlamm pro Jahr</b>                             |                         |                           |
| 134 bzw. 15 der untersuchten WVU's   | 5.752 m <sup>3</sup> 5) | 750 m <sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> an Rückspülschlamm (spezifische Aktivität < 200 Bq/kg) und ein WVU mit 525 m<sup>3</sup> (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 m<sup>3</sup> bis 4.000 m<sup>3</sup>. Der Median liegt bei 7 m<sup>3</sup>, was deutlich macht, dass hohe Schlammengen nur die Ausnahme sind (2 WVU mit 525 m<sup>3</sup> und 4.000 m<sup>3</sup>).

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<br>[5] |
| <b>Entsorgungswege des Rückspülschlammes 1)</b>   |              |                           |
| 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                         |
| <b>Entsorgung des Rückspülwassers/Klarwassers</b> |              |                           |
| 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                         |

<sup>1)</sup> 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.

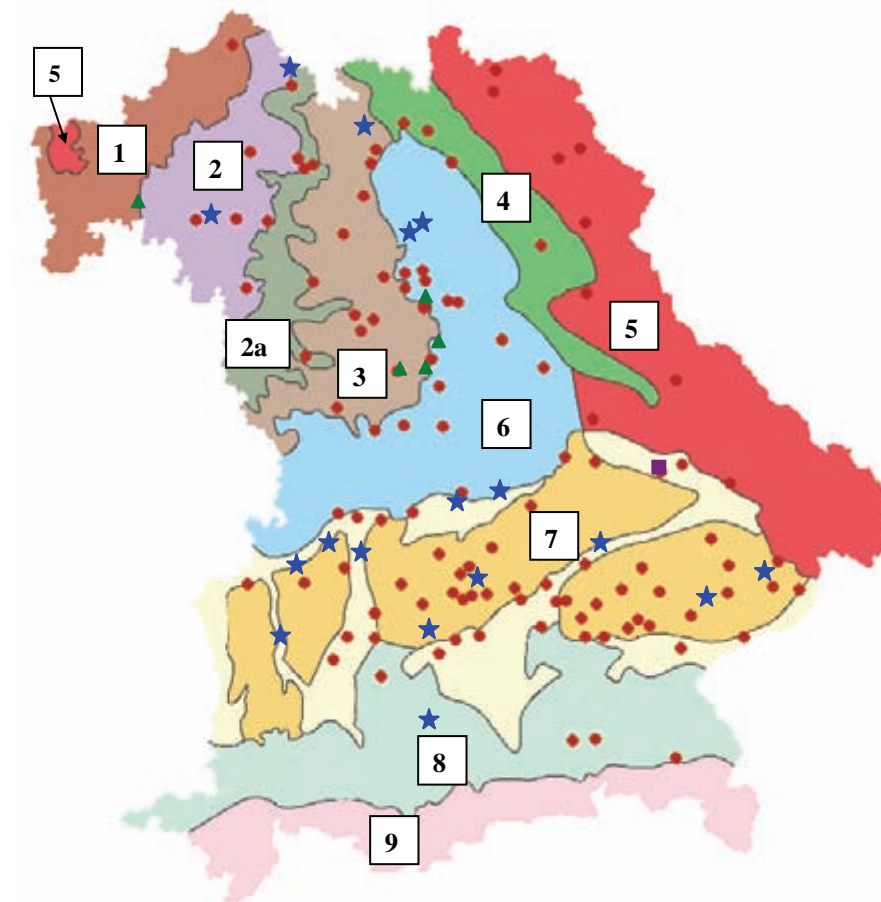


Abb. 6: Geologische Karte von Bayern [71]: Standorte der WVU mit reinen Enteisungs-, Entmanganungs-, Arsenentfernungsanlagen und Kombinationen dieser drei Aufbereitungsarten; blaue Sterne = Enteisungsanlagen, violette Viereck = Entmanganungsanlage, grüne Dreiecke = Arsenentfernungsanlagen und rote Kreise = 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  $E_{\text{Eff}}$  setzt sich aus drei Teildosen zusammen [73]:

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

mit

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

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

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

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

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

Die einzelnen Parameter sind:

$\Delta H_{\text{ex}}$  : Zusätzliche Gamma-Ortsdosisleistung über Untergrund [Sv/h]

$t_{\text{exp}}$  : Expositionszeit [h]

$\dot{V}$  : Atmungsrate = 1,2 [m<sup>3</sup>/h]

$c_i$  : Aktivitätskonzentration des Nuklids i im Staub [Bq/m<sup>3</sup>]

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

$C_{\text{Staub}}$  : Staubkonzentration = 0,01 [g/m<sup>3</sup>] (MAK-Wert einatembarer Staub [75]) bzw. 0,003 [g/m<sup>3</sup>] (MAK-Wert alveolengängiger Staub [75])

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

$U_{\text{Bod}}$  : 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/m<sup>3</sup> bzw. 0,003 g/m<sup>3</sup> (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/m<sup>3</sup> bzw. 0,003 g/m<sup>3</sup> (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/m<sup>3</sup> bzw. 0,003 g/m<sup>3</sup> (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/m<sup>3</sup> bzw. 0,003 g/m<sup>3</sup> (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/m<sup>3</sup>; 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/m<sup>3</sup>; 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.

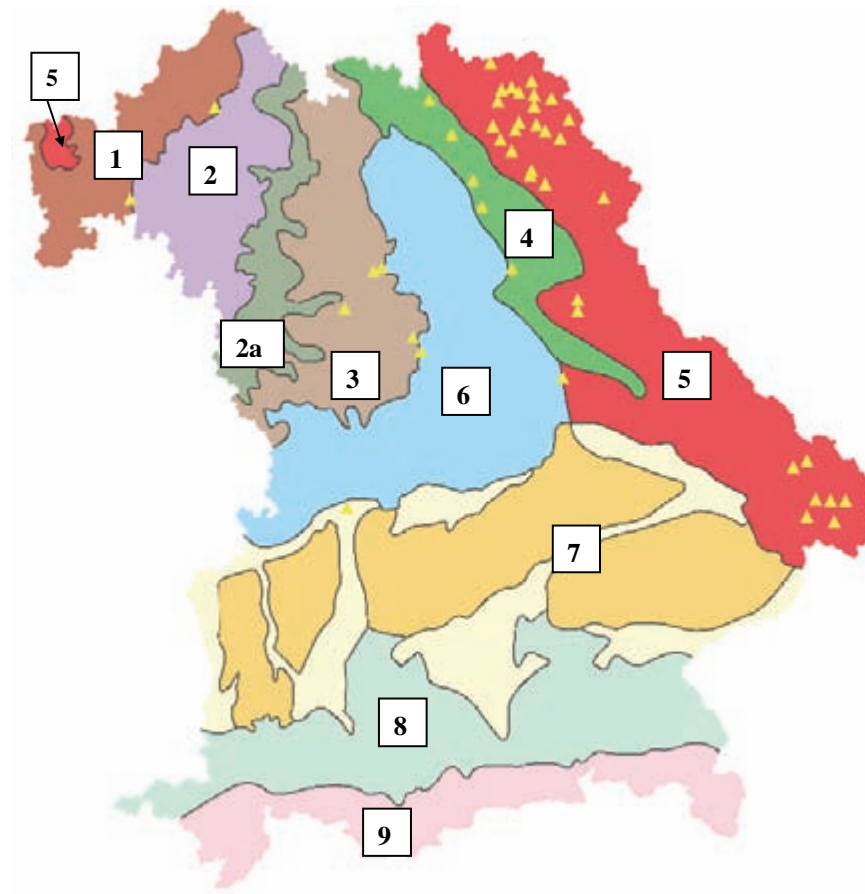


Abb. 7: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU, die nur Entsäuerungsanlagen betreiben: gelbe Dreiecke: Entsäuerungsanlagen

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/m<sup>3</sup> dargestellt.

Tab. 11: Ergebnisse der Dosisabschätzung für die vier Expositionsszenarien bei einer Staubkonzentration von 0,01 g/m<sup>3</sup>; 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/m<sup>3</sup>; 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.

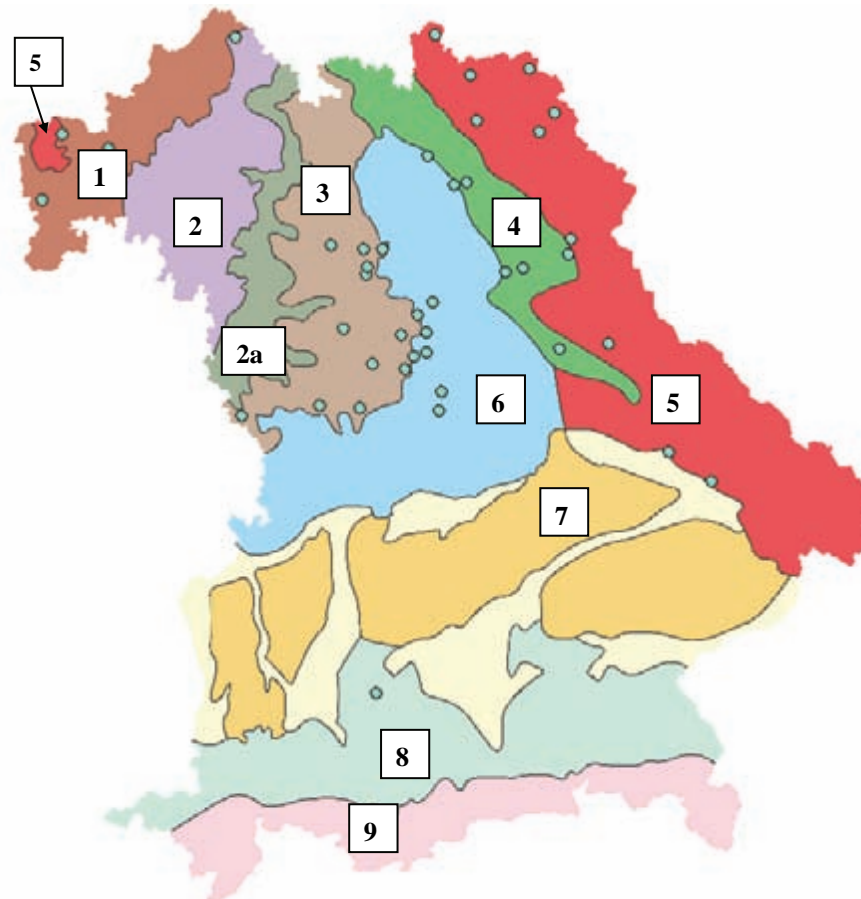


Abb. 8: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU (blaue Kreise) mit Kombinationen von Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Arsenentfernung zusammen mit Anlagen zur Entsäuerung

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/m<sup>3</sup>; 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/m<sup>3</sup>; 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.

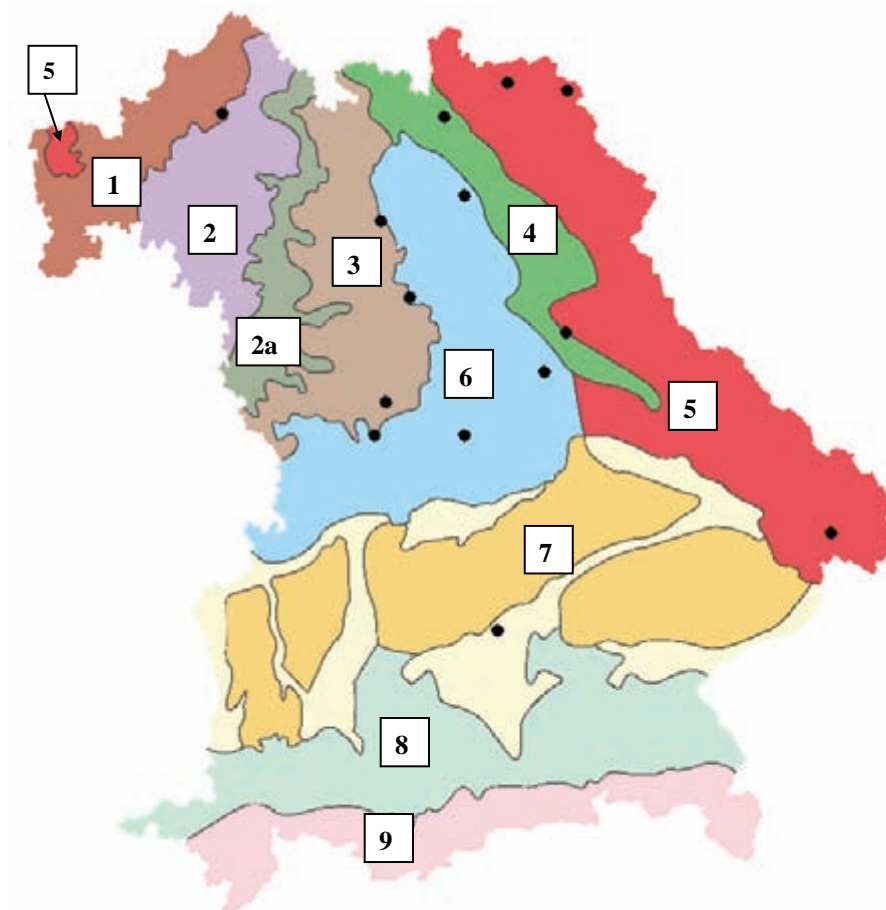


Abb. 9: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU (schwarze Kreise), die Filteranlagen mit Aktivkohle verwenden

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/m<sup>3</sup>; 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/m<sup>3</sup>; 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.

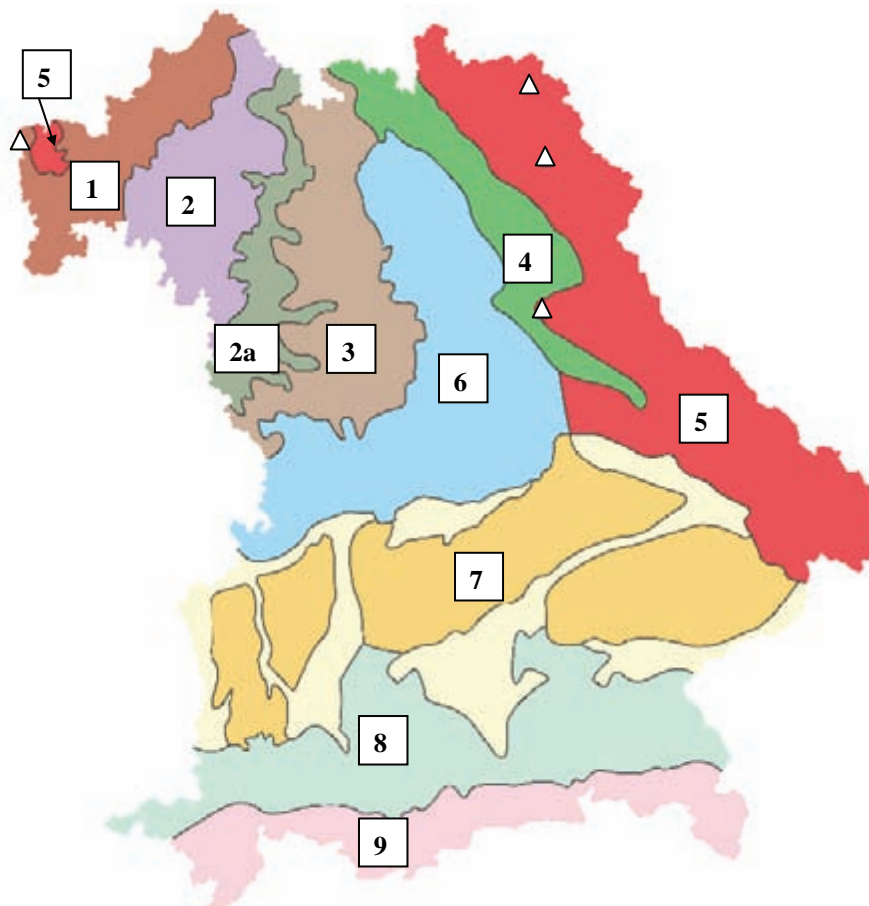


Abb. 10: Geologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der WVU (weiße Dreiecke), die andere Arten der Trinkwasseraufbereitung verwenden

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/m<sup>3</sup>; 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/m<sup>3</sup>; 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.

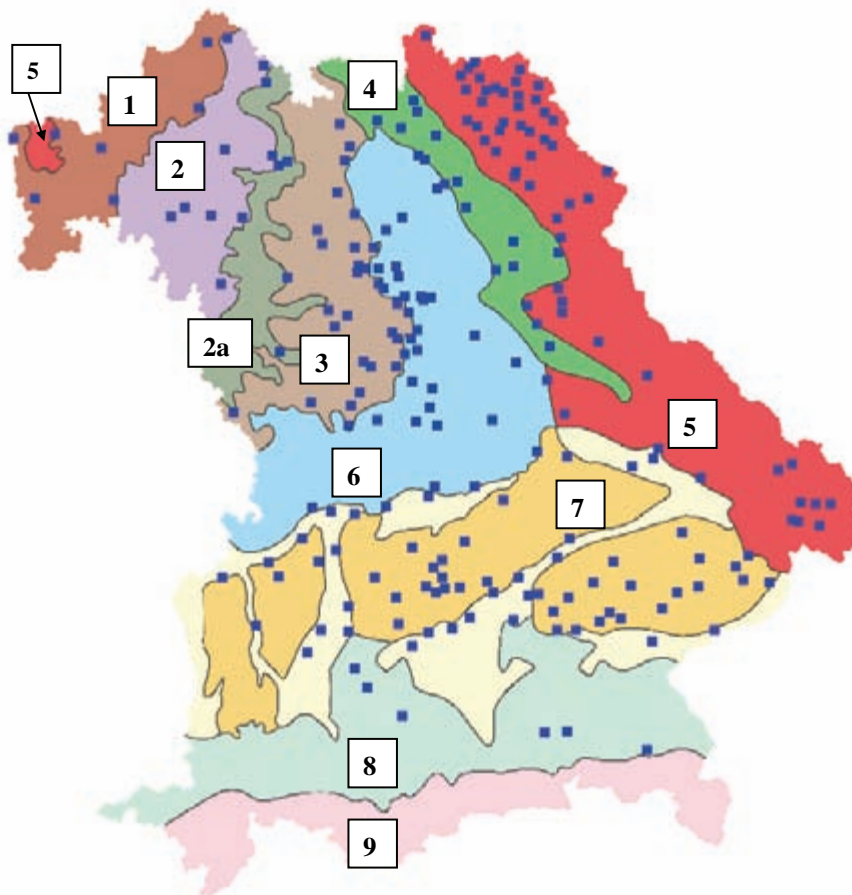


Abb. 11: Hydrogeologische Karte von Bayern [71]: Standorte aller WVU's, deren Rückspülschlammproben untersucht wurden

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><br><i>MW</i>     | <i>Uran-238</i><br><i>Median</i> | <i>Radium-226</i><br><i>MW</i> | <i>Radium-226</i><br><i>Median</i> | <i>Radium-228</i><br><i>MW</i> | <i>Radium-228</i><br><i>Median</i> | <i>Blei-210</i><br><i>MW</i> | <i>Blei-210</i><br><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**

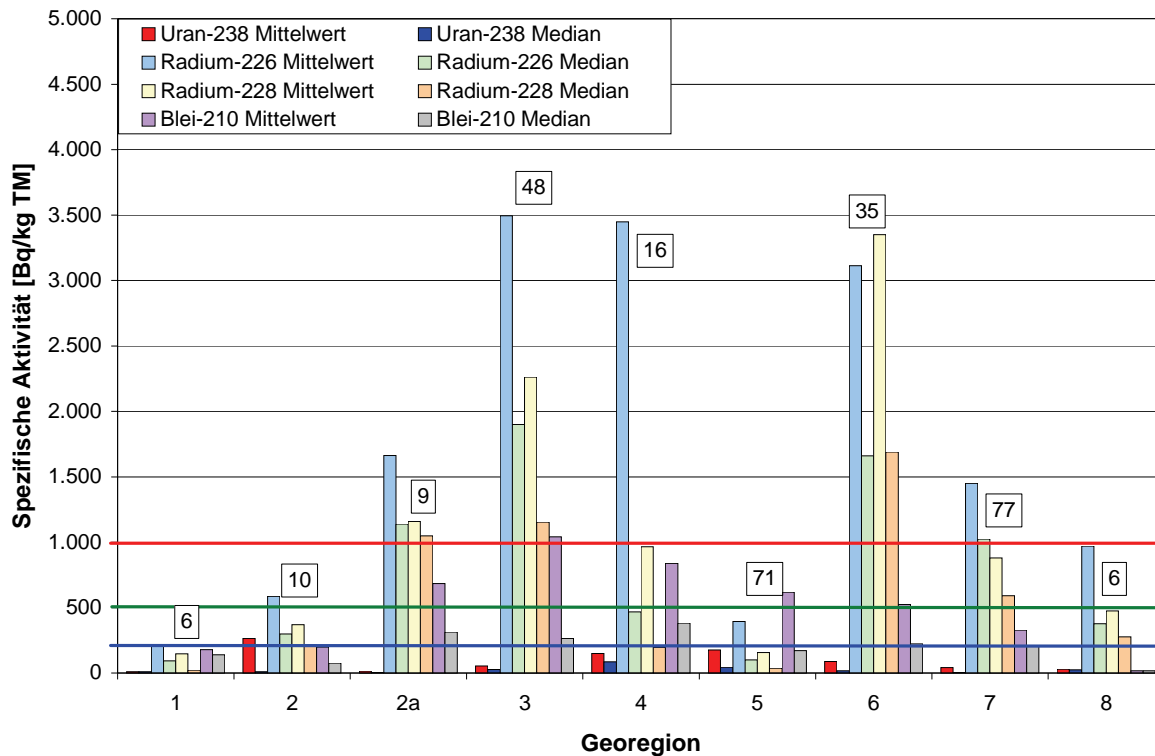


Abb. 12: Mittelwerte und Mediane der spezifischen Aktivitäten von Uran-238, Radium-226, Radium-228 und Blei-210 eingeteilt in die hydrogeologischen Gebiete (Georegionen); rote, grüne und blaue Linie = Überwachungsgrenzen nach Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; Kästchen = Probenanzahl in der entsprechenden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

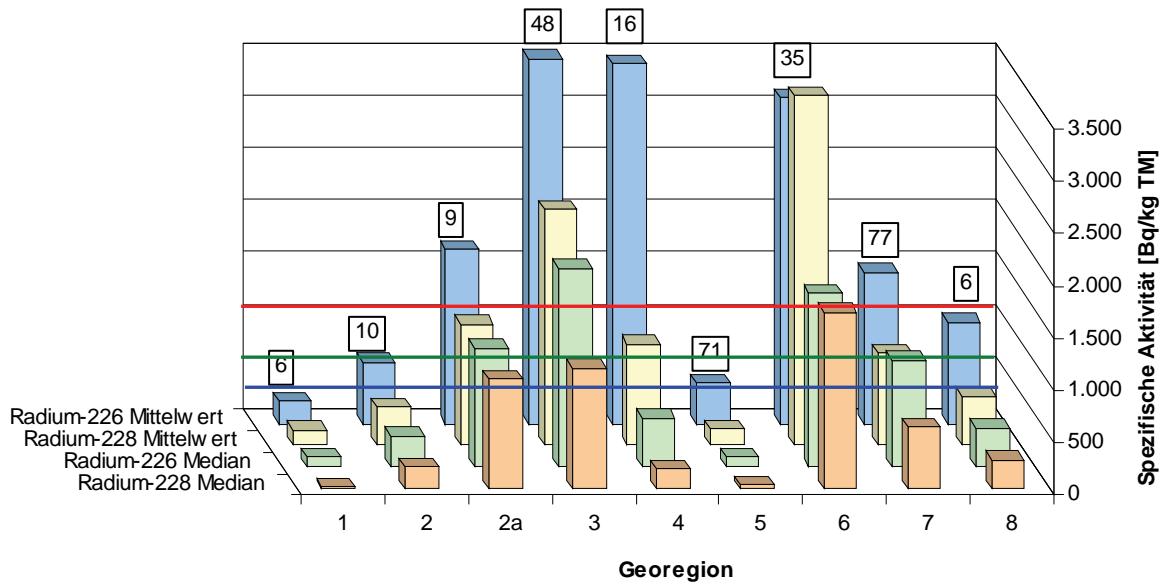


Abb. 13: Mittelwerte und Mediane der spezifischen Aktivitäten von Radium-226 und Radium-228 eingeteilt in die hydrogeologischen Gebiete (Georegionen) als Balkendiagramm; rote, grüne und blaue Linie = Überwachungsgrenzen nach Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; Kästchen = Probenanzahl in der entsprechenden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

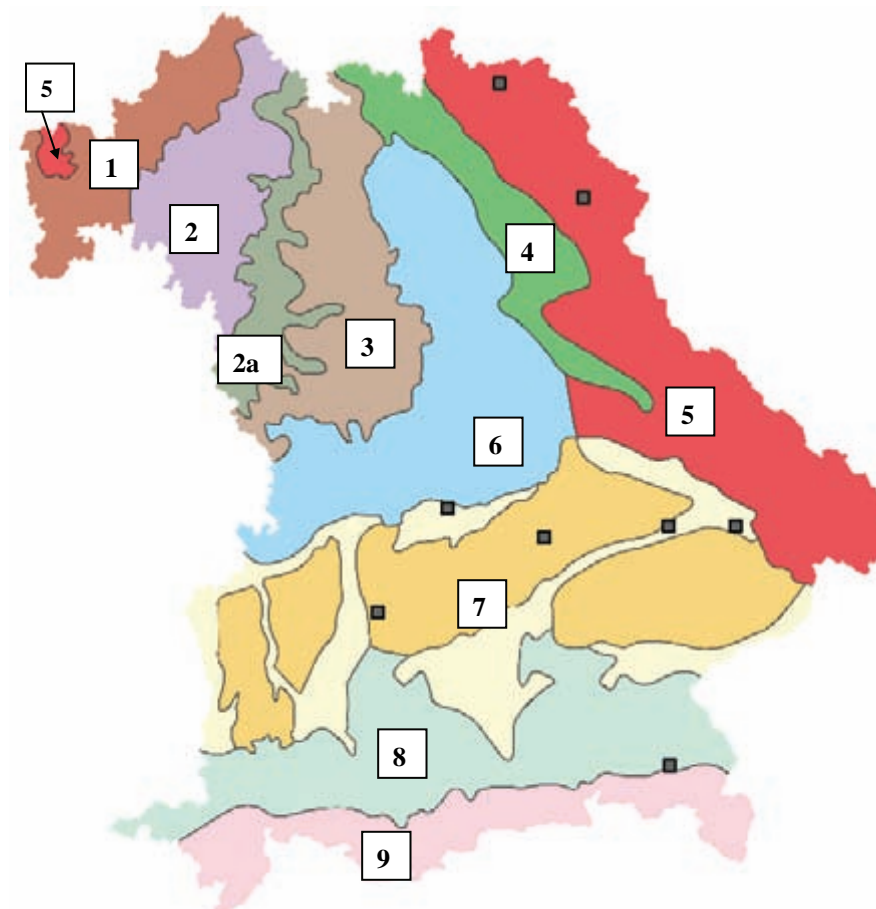


Abb. 14: Hydrogeologische Karte von Bayern [71] mit den Standorten der Mineralwasserhersteller (graue Vierecke)

### 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/m<sup>3</sup>; 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/m<sup>3</sup>; 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/m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup> 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 ( $E_{\text{Eff}}$ ) setzt sich, wie bereits früher erwähnt, aus den drei Teildosen der direkten Gamma-Ortsdosisleistung ( $E_{\text{Dir}}$ ), der effektiven Dosis aus der Inhalation ( $E_{\text{Inh}}$ ) und der effektiven Dosis aus der Ingestion ( $E_{\text{Ing}}$ ) zusammen [73].

Die Gamma-Ortsdosisleistung ( $E_{\text{Dir}}$ ) 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] | $E_{\text{ing}}$ [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 m<sup>3</sup>, bei einem Wasserwerk 525 m<sup>3</sup> 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/<br>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/<br>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.

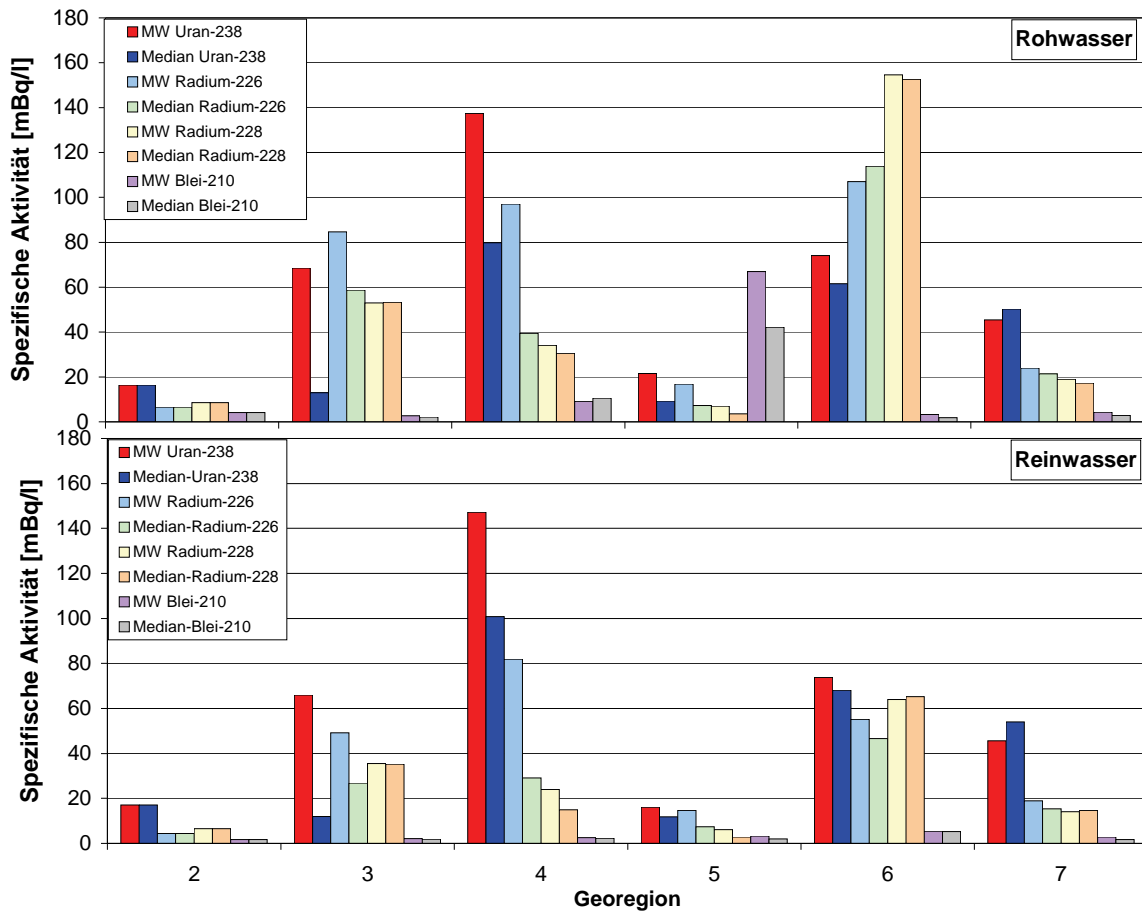


Abb. 15: Mittelwerte und Mediane der spezifischen Aktivitäten verschiedener Radionuklide der untersuchten Rohwasserproben in den unterschiedlichen Georegionen; MW = Mittelwert

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 dazugehörigen 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 dazugehörigen 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 <sub>MW</sub> | 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   |

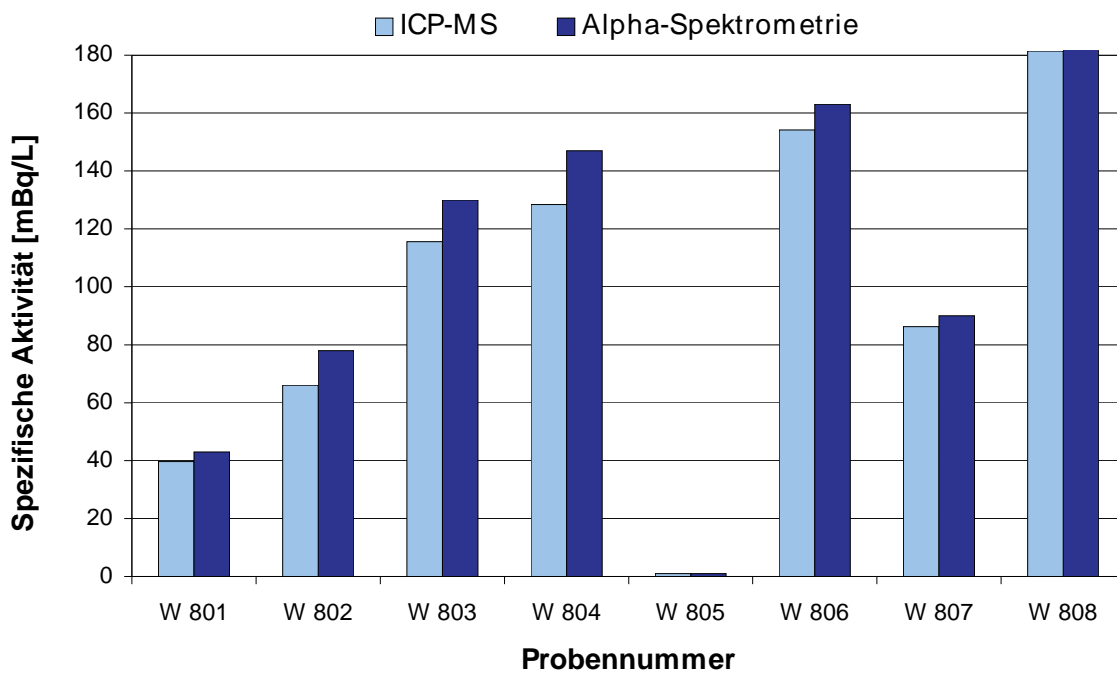


Abb. 16: Uranaktivitätskonzentrationen (Uran-238) der Alpha-Spektrometrie & ICP-MS

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 Rückpülschlämme 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 Quelfassungen. 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.

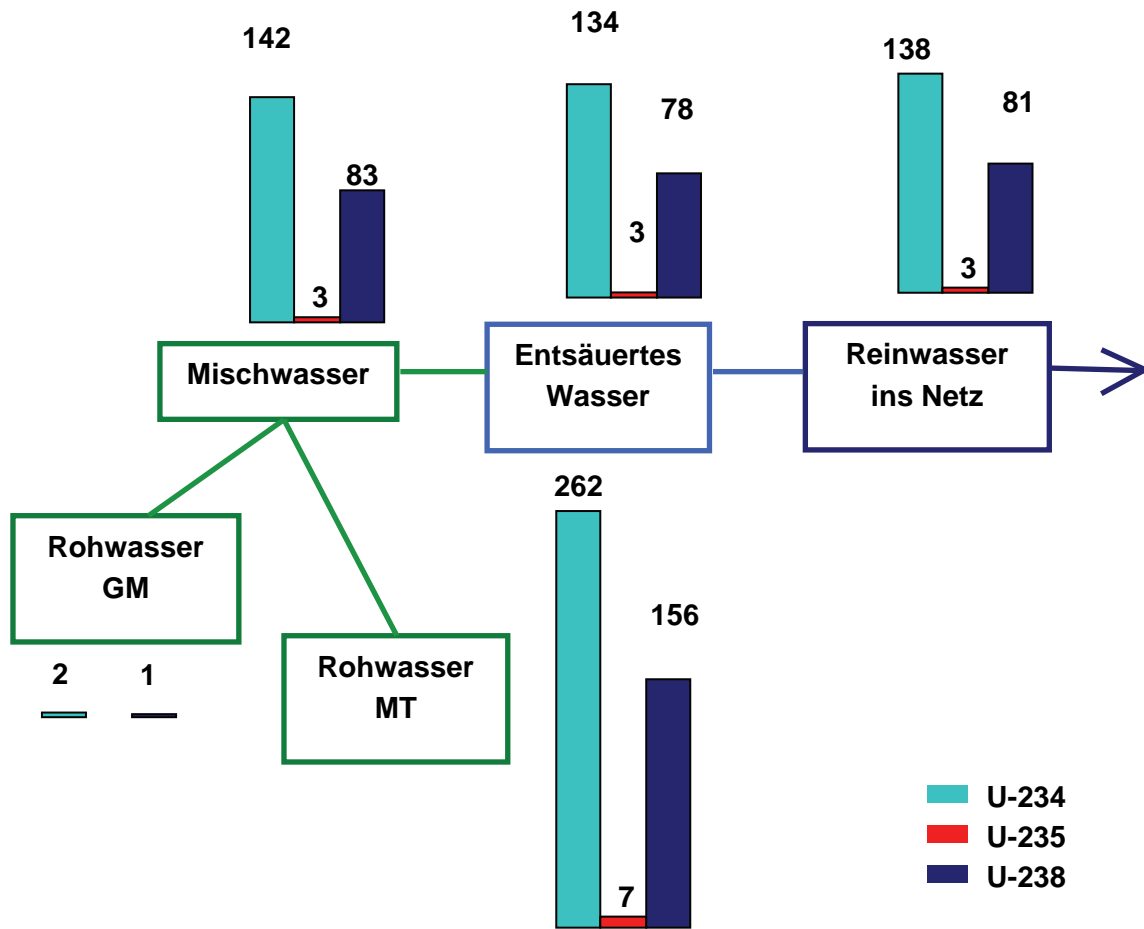


Abb. 17: Uranaktivitätskonzentrationen im Wasser [mBq/l]; Erläuterungen im Text

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.

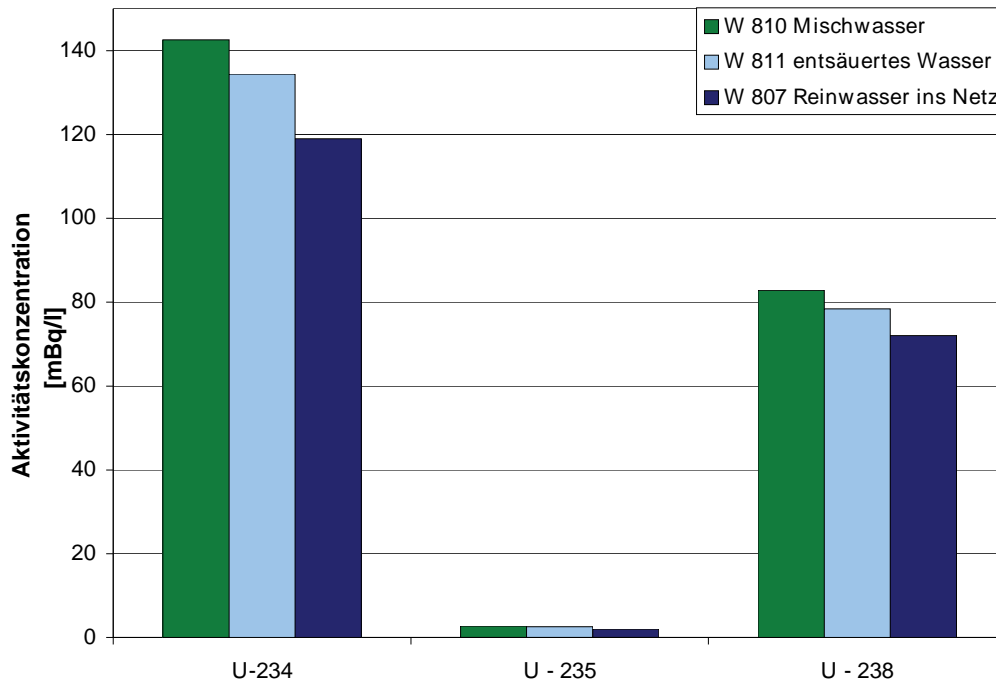


Abb. 18: Veränderung der Uranaktivitätskonzentrationen durch die Aufbereitung (TWA)

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).

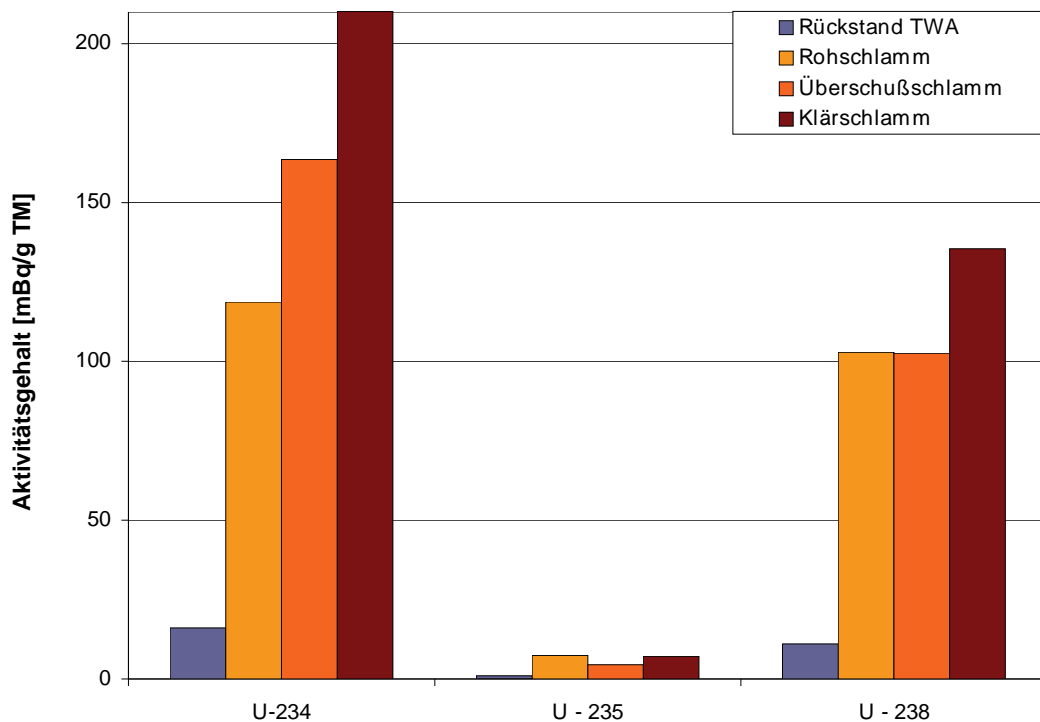


Abb. 19: Uranaktivitätsgehalte in den Schlammproben; TM = Trockenmasse

**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.

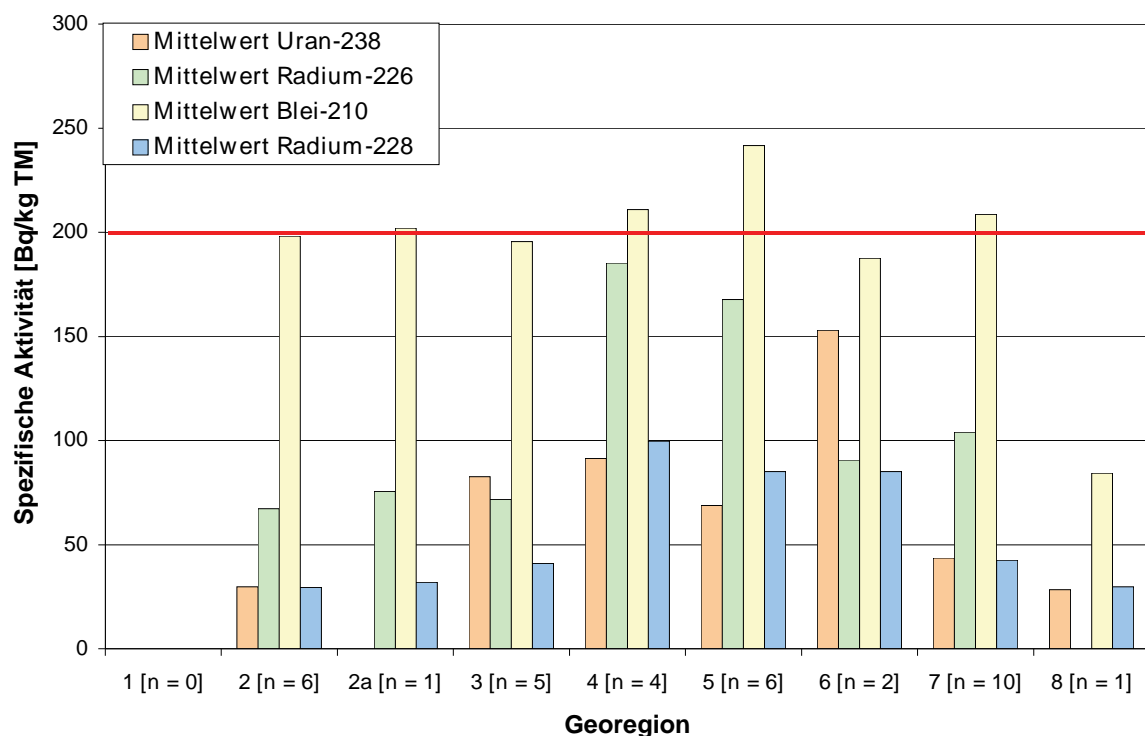


Abb. 20: Mittelwerte für verschiedene Radionuklide aus Klärschlammproben sortiert nach Georegionen; TM = Trockenmasse

**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 Enteisenungsanlagen (19 Rückstandsproben), ein WVU eine reine Entmanganungsanlage (eine Probe), fünf WVU reine Arsenentfernungsanlagen (fünf Proben) und 115 WVU Kombinationen aus Enteisenungs-, Entmanganungs- und Arsenentfernungsanlagen (133 Proben). Reine Entsäuerungsanlagen haben 46 WVU (56 Proben) und 43 WVU bereiten das Rohwasser mit Anlagen zur Enteisenung, 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 **Enteisenung, 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 Enteisenungs-, 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, 2<sup>nd</sup> ed., Addendum to vol. 1 – recommendations-Uranium, WHO, Geneva, S. 10 - 11.
- [11] WHO, World Health Organization (2003): Guidelines for drinking water quality, 3<sup>rd</sup> 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  $\text{UO}_2^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{CO}_3^{2-}$ , 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](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](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](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](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](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](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;  $\Omega_{ges}$  = 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           |                     | <sup>234</sup> Uran/<br><sup>238</sup> Uran |
|----------|------------|-----|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---|
|          |            |     | Aktivität<br>mBq/l | $\Omega_{ges}$<br>% | Aktivität<br>mBq/l | $\Omega_{ges}$<br>% | Aktivität<br>mBq/l | $\Omega_{ges}$<br>% | Aktivität<br>mBq/l | $\Omega_{ges}$<br>% | Aktivität<br>mBq/l | $\Omega_{ges}$<br>% | Aktivität<br>mBq/l | $\Omega_{ges}$<br>% |   |
| 2115     | 2          | RoW | 6,38               | 14                  | 8,74               | 26                  | 16,3               | 24                  | < 4,3              | —                   | 31,2               | 20                  | < 1,7              | —                   | 1,9   |
|          | 2          | 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   |
|          | 2          | 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                  | —   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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                | —   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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             | —                   | —   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 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                  | —   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 3          | 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   |
|          | 4          | 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   |
|          | 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   |
|          | 4          | 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   |
|          | 4          | 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           |           | <sup>234</sup> Uran/<br><sup>238</sup> Uran |
|--------------------|------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|---|
|                    |            |     | Aktivität<br>mBq/l | Ωges<br>% | Aktivität<br>mBq/l | Ωges<br>% | Aktivität<br>mBq/l | Ωges<br>% | Aktivität<br>mBq/l | Ωges<br>% | Aktivität<br>mBq/l | Ωges<br>% | Aktivität<br>mBq/l | Ωges<br>% |   |
| 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 <sub>MW</sub> | 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/m<sup>3</sup>

| 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<br>t = 20 h  | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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<br>t = 20 h  | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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/m<sup>3</sup>

| 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<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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/m<sup>3</sup>

| REx.-Nr. | Effektive Gesamtdosis [mSv]       |                                  |                                  |                                     |
|----------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
|          | Expositionsszenario 1<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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/m<sup>3</sup>

| REx.-Nr. | Effektive Gesamtdosis [mSv]       |                                  |                                  |                                     |
|----------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
|          | Expositionsszenario 1<br>t = 20 h | Expositionsszenario 2<br>t = 3 h | Expositionsszenario 3<br>t = 8 h | Expositionsszenario 4<br>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 <sub>ges</sub> | 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  $\alpha$ - und  $\beta$ -Prozesse ineinander über. Wenn sich ein gebildeter Folgekern nicht im Grundzustand befindet, tritt auch  $\gamma$ -Strahlung auf. Die Kerne einiger Nuklide können sich entweder durch Emission von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen um-



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

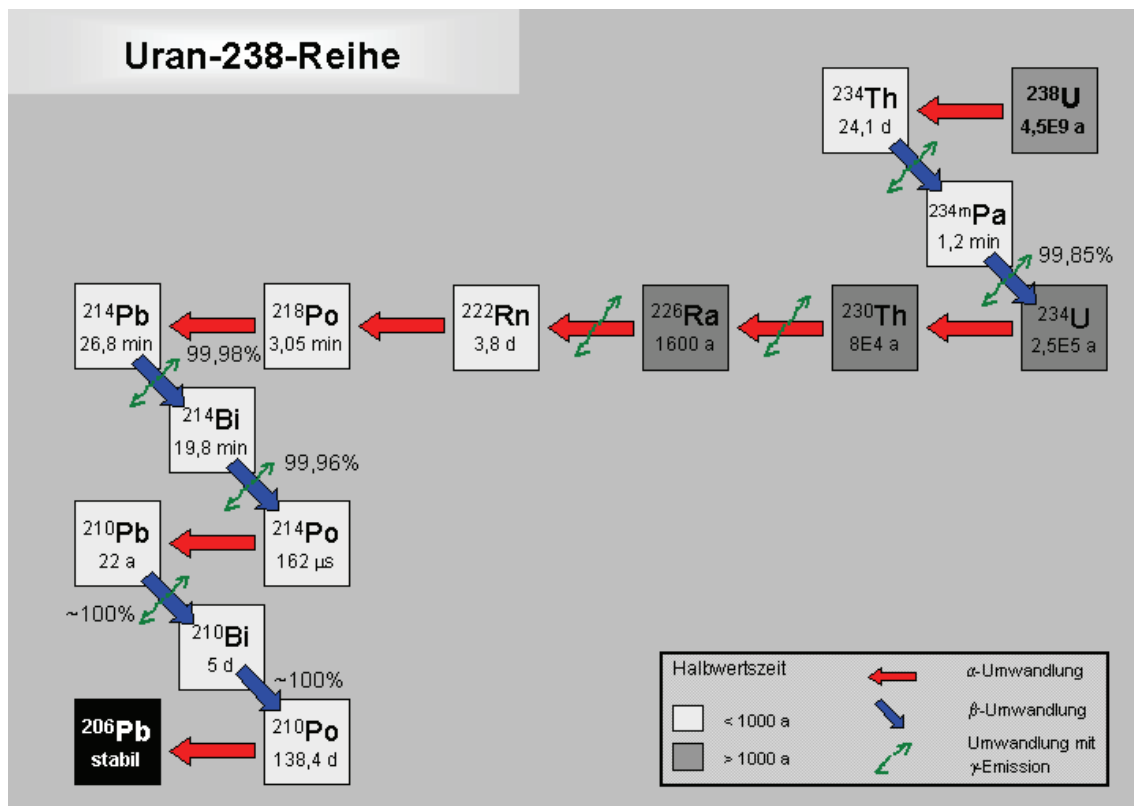


Abb. 2.1: Uran-Radium-Zerfallsreihe (DEGERING 2001)

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).

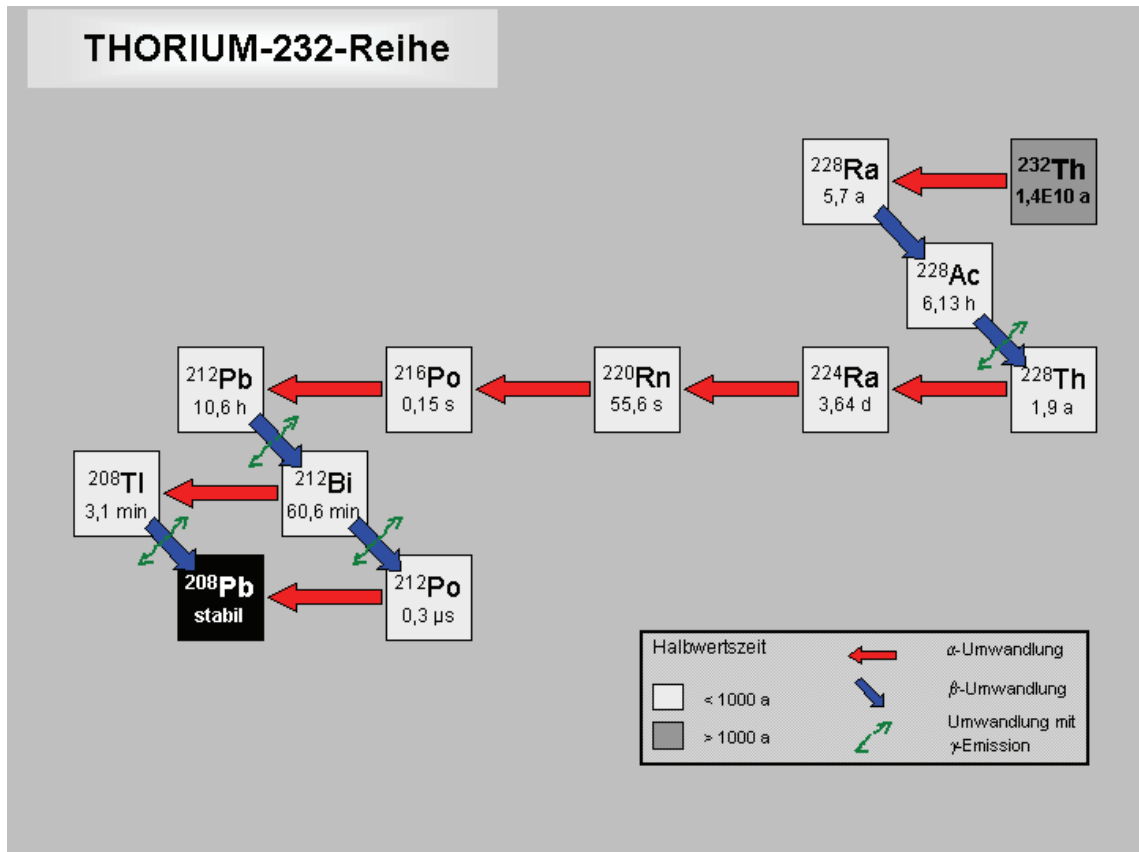


Abb. 2.2: Thorium-Zerfallsreihe (DEGERING 2001)

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

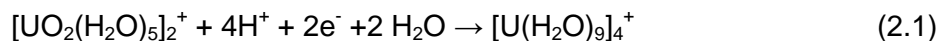
Uran wurde von KLAPROTH 1789 entdeckt und 1841 erstmals von PÉLIGOT hergestellt. Es kommt oft zusammen mit Seltenerdmetallen und in den Mineralen Uraninit ( $\text{UO}_2$ ) und Carnotit ( $\text{K}_2[\text{UO}_2]_2[\text{VO}_4]_2 \cdot 1-3\text{H}_2\text{O}$ ) vor. In der wässrigen Phase tritt Uran hauptsächlich 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  $\text{CO}_2$ -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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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 Zählzählbeute 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  $\mu\text{m}$  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  $\text{Ca}^{2+}$ -Trägerlösung (50 mg  $\text{Ca}^{2+}/\text{ml}$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) und Phosphat-Lösung (300 mg  $\text{PO}_4^{3-}/\text{ml}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  in  $\text{H}_2\text{O}$ ) 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 HNO<sub>3</sub>) 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).

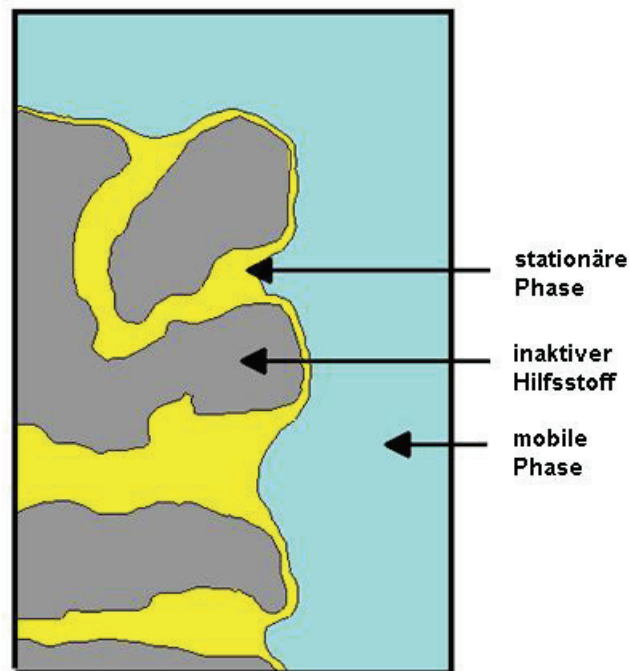


Abb. 3.1: Aufbau der Extraktionschromatographie (HORWITZ et al.1992)

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 (HNO<sub>3</sub> 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).



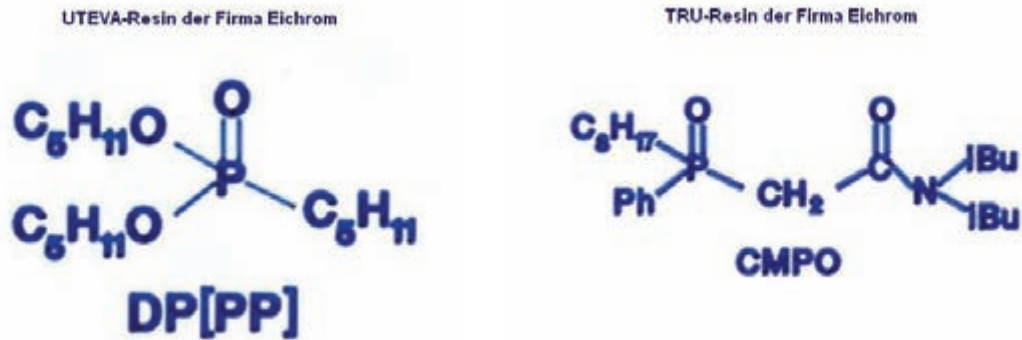


Abb. 3.2: Extraktionsharze mit flüssiger stationärer Phase (EICHROM 2005)

Zunächst wird die Probenlösung in 3M HNO<sub>3</sub>/0.5M Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 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<sup>+</sup>-Ionen bei hohen Stromdichten (>0.3 A/cm<sup>2</sup>) 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 mm<sup>2</sup> 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.

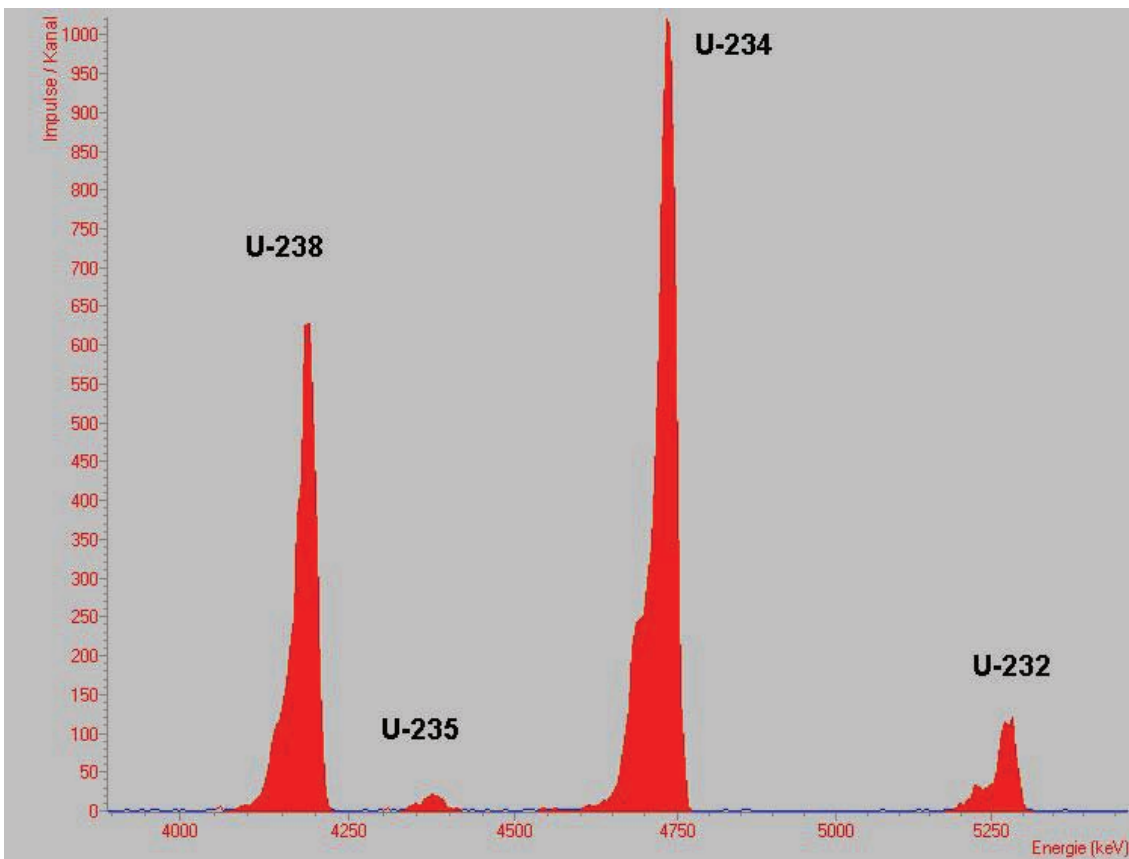


Abb. 3.3: Alpha-Spektrum der Uranmessung von Probe W 806

## 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  $\gamma$ -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.

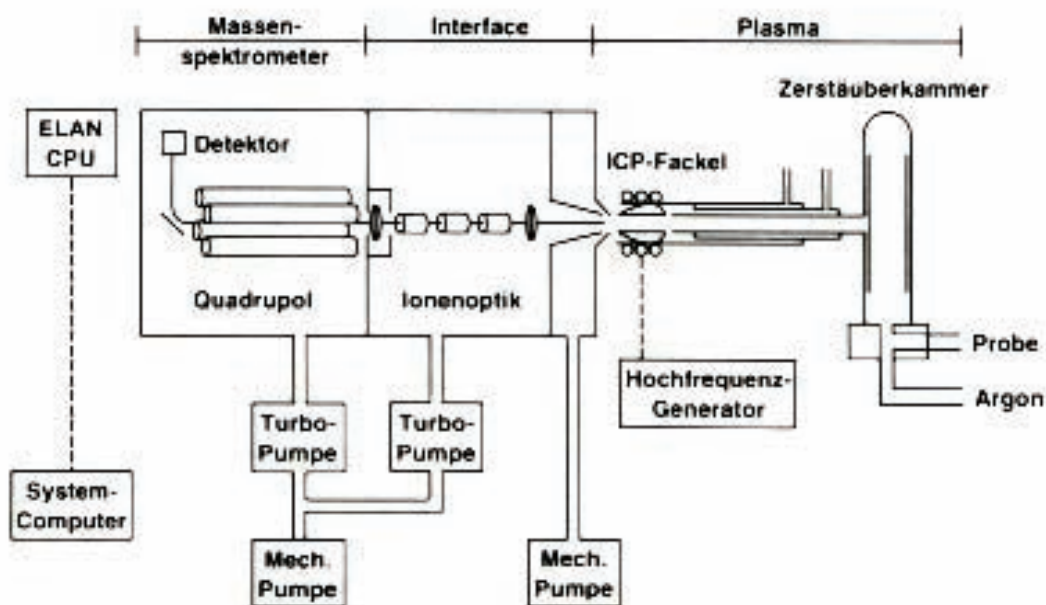


Abb. 3.4: Blockdiagramm ICP-MS (aus HEIN & KUNZE 1994).

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 Wechselfrequenz 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 Kluffgrundwasserleiter, 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.

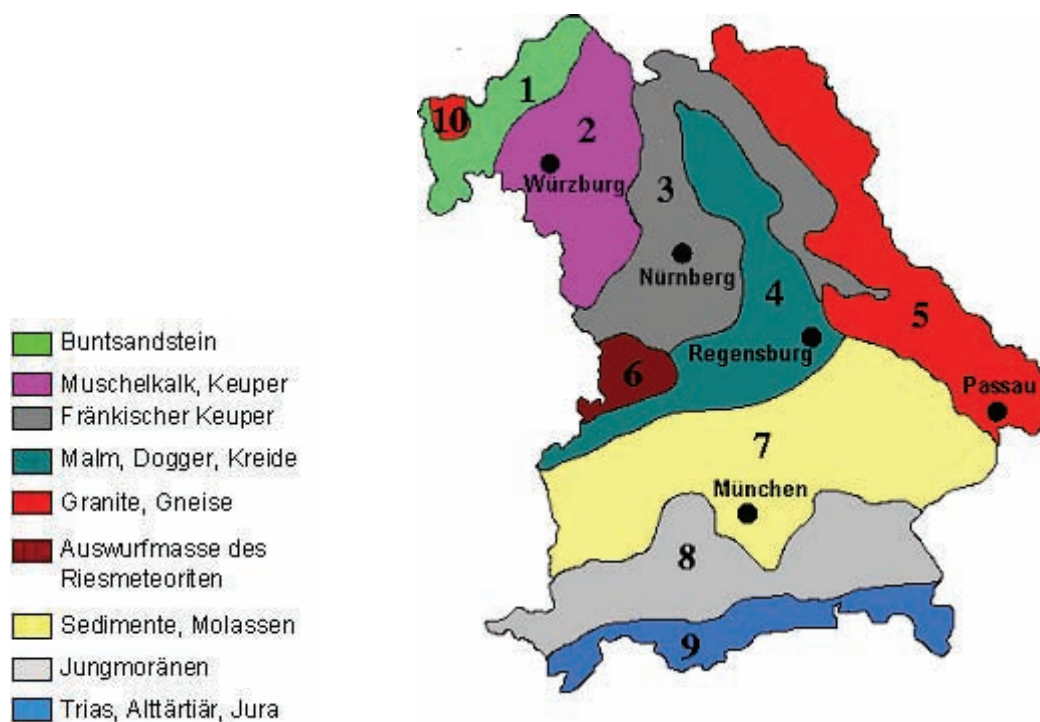


Abb. 4.1: Geologische Gliederung des Freistaat Bayern (BAYERISCHES LFU)

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 "Estereichichten" 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 km<sup>2</sup> gross und liefert bei einer Wasserschüttung von 45-80 L/s jährlich etwa 2.200.000 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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.



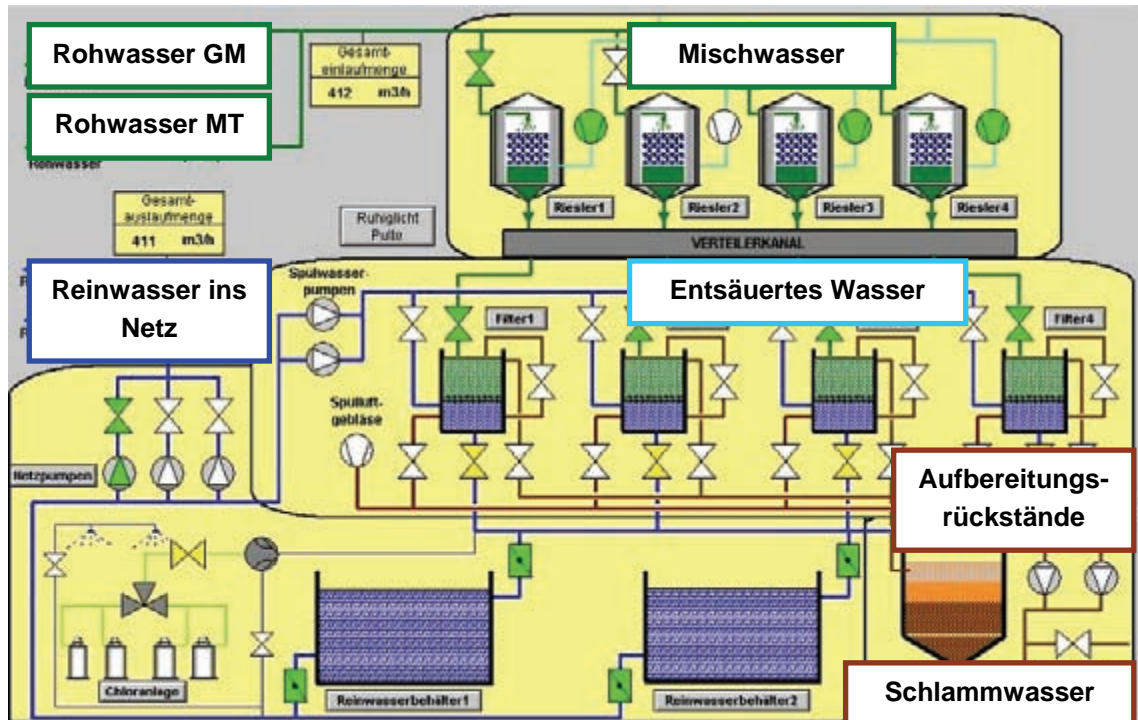


Abb. 4.2: Verfahrensschema der Trinkwasseraufbereitungsanlage mit den Probenahme-punkten

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 HNO<sub>3</sub> (konz.) vorbereitet und vor Ort zur Stabilisierung der Wasserprobe zugegeben. Bei den 100 ml PE-Flaschen für die ICP-MS wurden je 1 ml HNO<sub>3</sub> (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

(BSB<sub>5</sub>-Wert) genutzt werden, das heißt es ist keine externe Zugabe von Kohlenstoffquellen zum Nitrat Abbau 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 m<sup>3</sup>/h) zur Energieerzeugung im Blockheizkraftwerk genutzt. Die Kläranlage kann damit den Eigenbedarf decken.

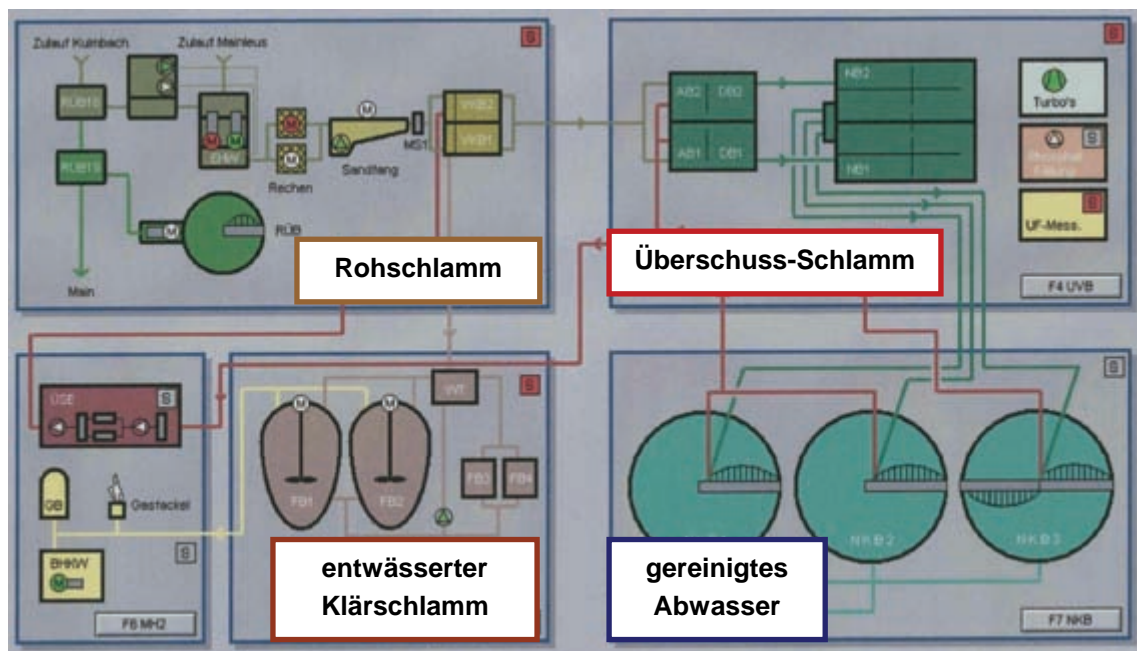


Abb. 4.3: Betriebsschema der Kläranlage mit Probenahmepunkten

#### 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 %.

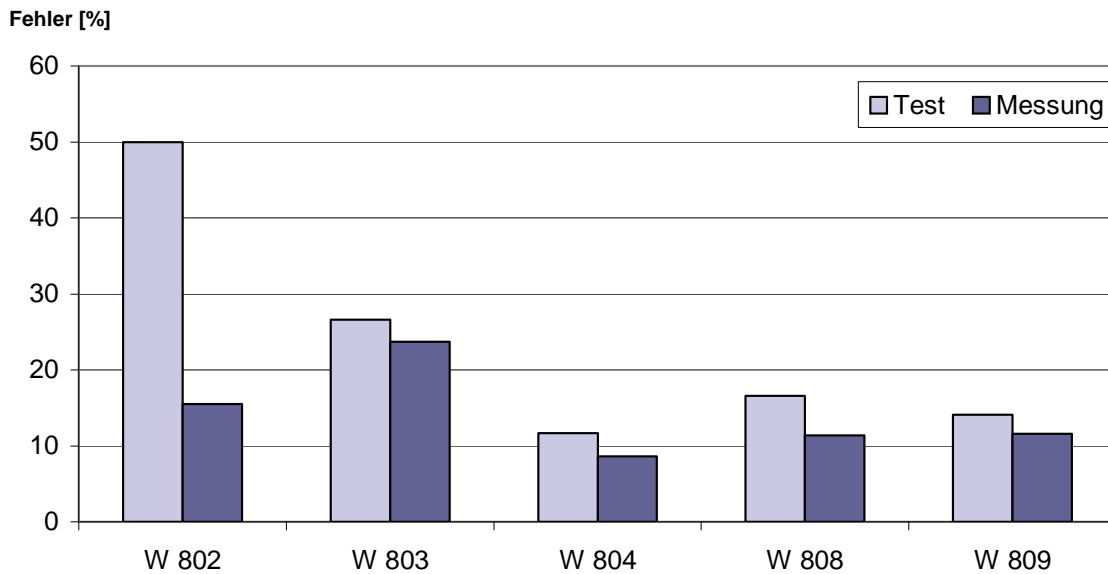


Abb. 5.1: Vergleich des Fehlers bei verschiedenen Messzeiten

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-   |        | NWG    | Isotop                          | Aktivitäts-   |        | NWG    |
|                                 | Konzentration | Fehler |        |                                 | Konzentration | Fehler |        |
|                                 | [Bq/L]        | [%]    | [Bq/L] |                                 | [Bq/L]        | [%]    | [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<br>Aktivitäts-<br>Konzentration [Bq/L] | 2.Probenahme<br>Aktivitäts-<br>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.

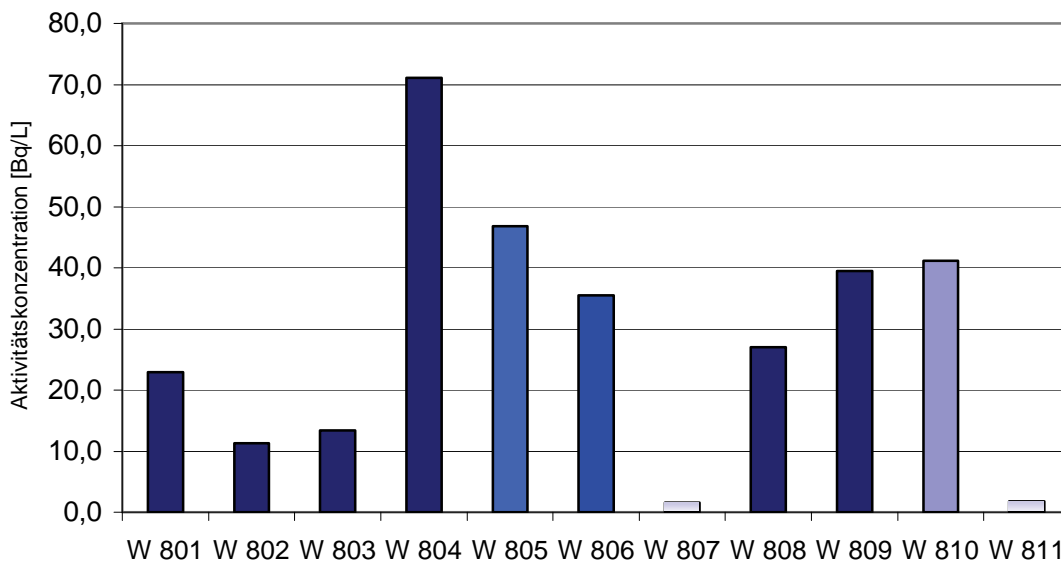


Abb. 5.2: Ergebnisse der Radonmessung durch die Gamma-Spektrometrie



## 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 HNO<sub>3</sub> 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-<br>vermögen [%] | Ausbeute<br>interner Standard | Wiederfindungsrate<br>[%] |      |
|-------|----------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|------|
| 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<br>in mBq/L |       |       | Aktivitätskonzentration<br>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<br>in mBq/L<br>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]<br>ICP-MS          | 40    | 66    | 116   | 128   | 1     | 154   | 86    | 181   |
| Aktivitätskonzentration [mBq/L]<br>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.

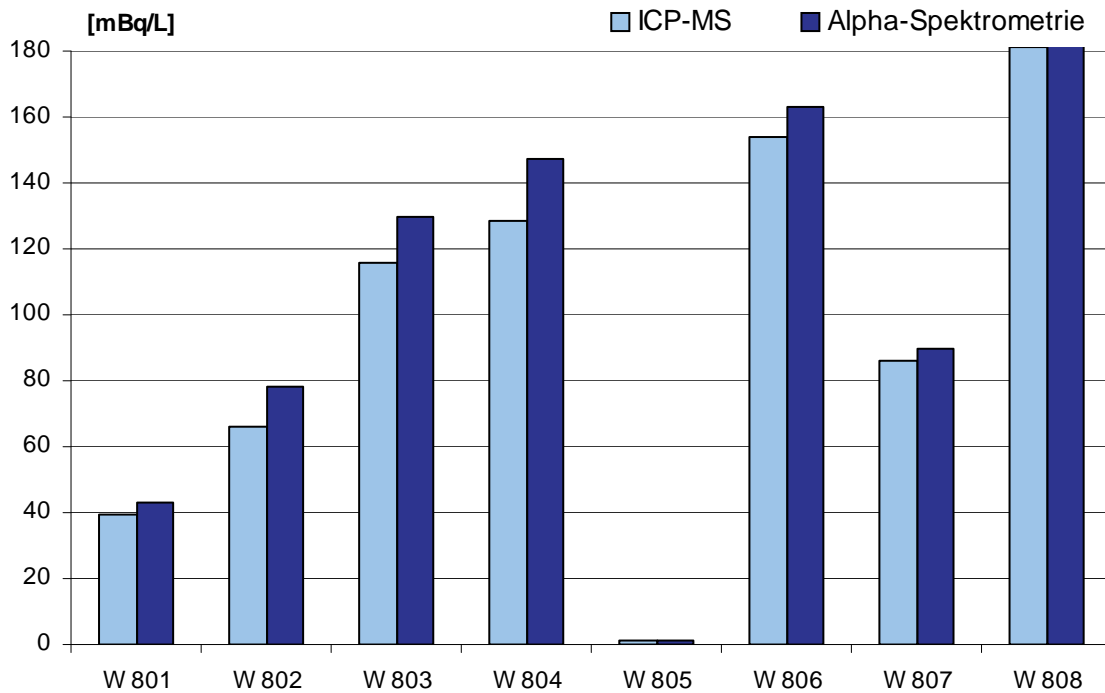


Abb. 5.3: Uranaktivitätskonzentrationen (U-238) der Alpha-Spektrometrie & ICP-MS

### 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.

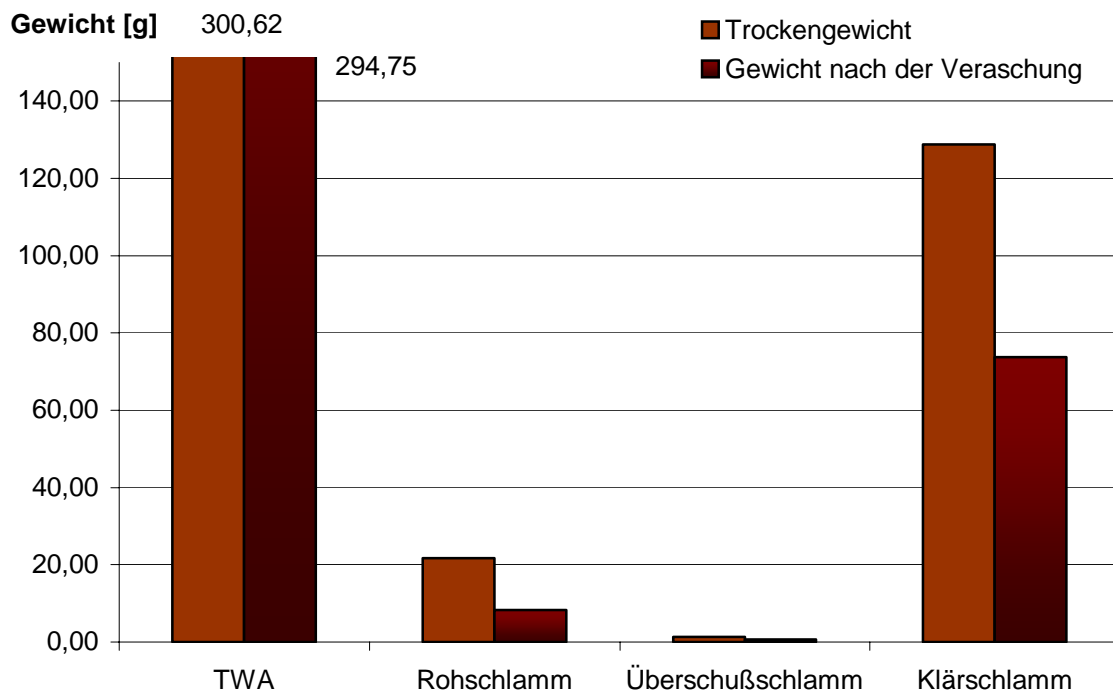


Abb. 5.4: Vergleich der Trockengewichte mit den Gewichten nach der Veraschung

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 CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> 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 eingegangenen 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                             | <b>50</b> | <12       | <12       | <4524  | <100       | < 0,03 |
| W 806 | RW MT      | <b>246</b>                       | <1166     | <b>28</b> | <b>22</b> | <5026  | <b>292</b> | < 0,05 |
| W 807 | Reinwasser | <b>172</b>                       | <98       | <14       | <16       | <5588  | <b>113</b> | < 0,03 |
| W 808 | Brunnen 3  | <b>352</b>                       | <1370     | <b>29</b> | <24       | <<6758 | <b>324</b> | < 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.

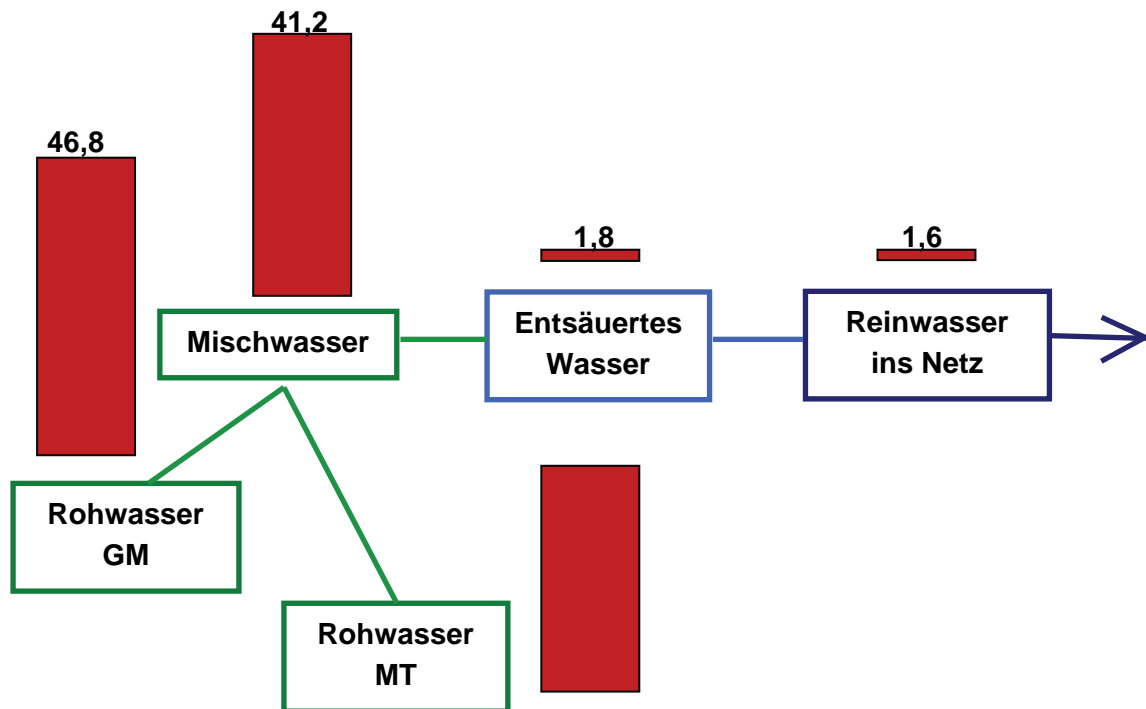


Abb. 5.5: Radonaktivitätskonzentrationen im Wasser [Bq/L]

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).

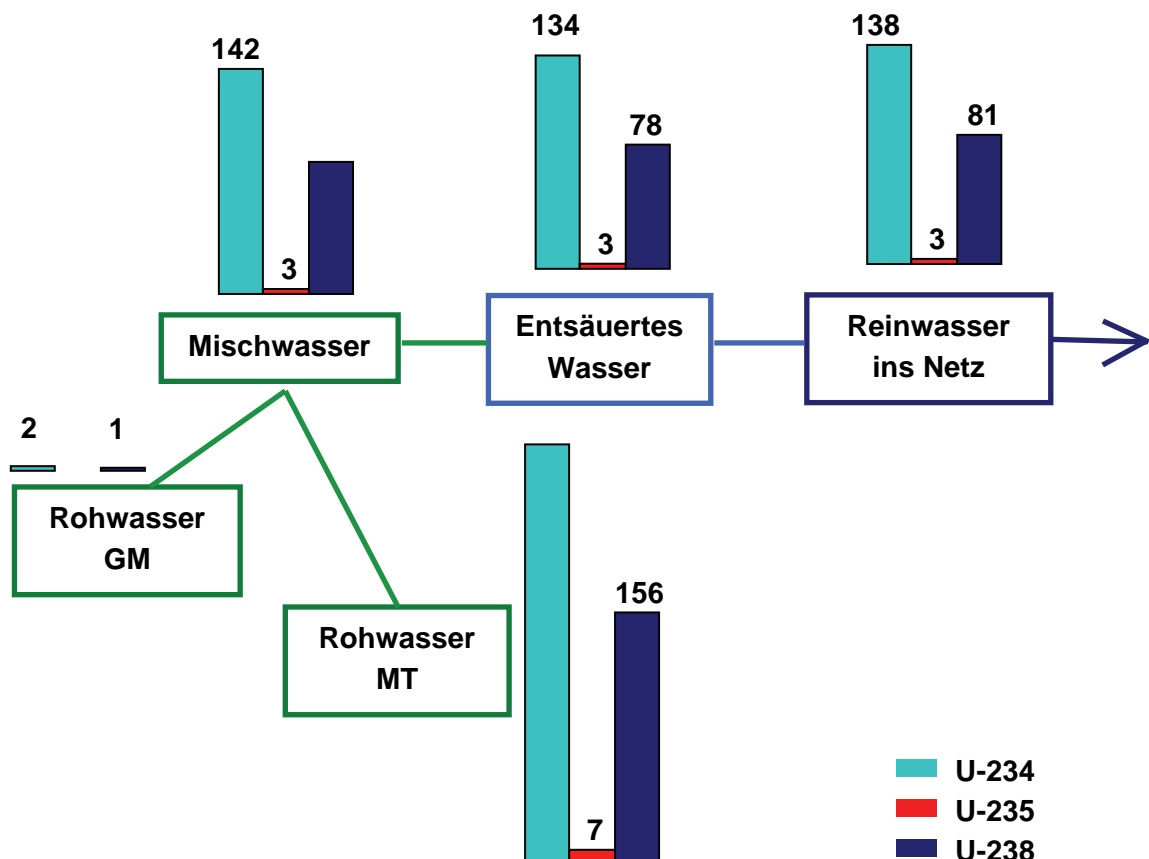


Abb. 5.6: Uranaktivitätskonzentrationen im Wasser [mBq/L]

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.

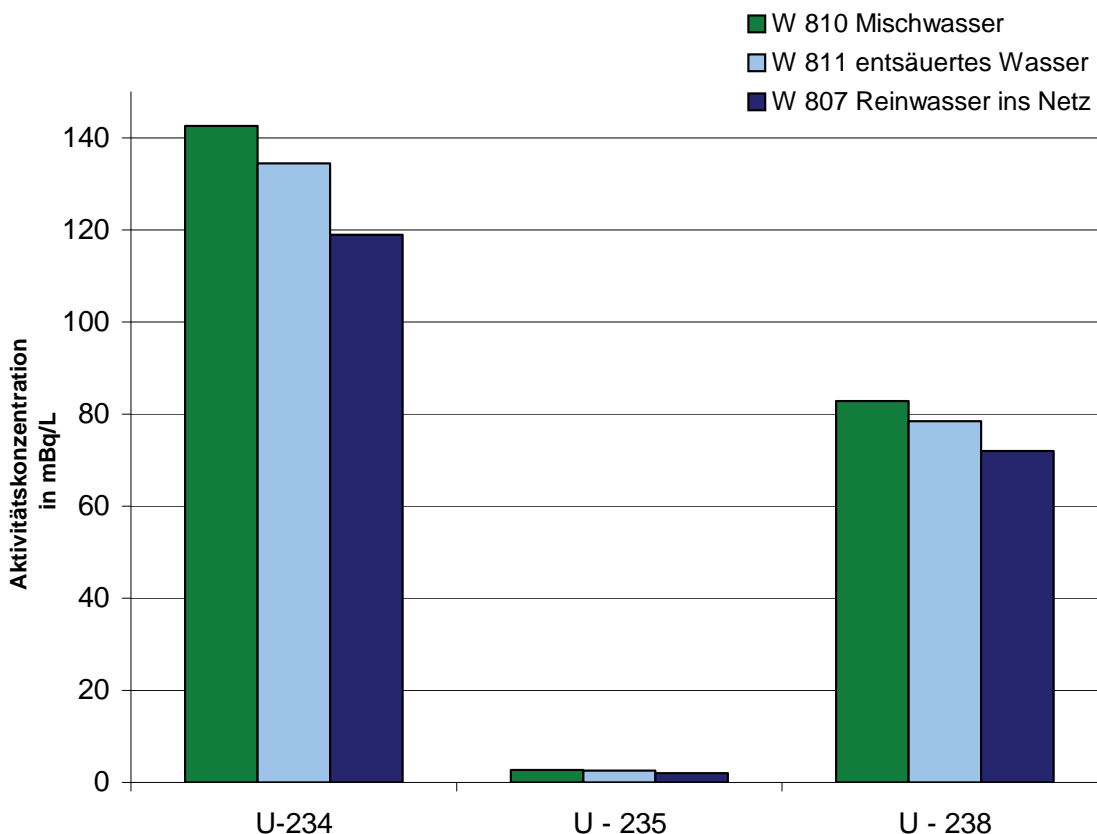


Abb. 5.7: Veränderung der Uranaktivitätskonzentrationen durch die Aufbereitung (TWA)

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.

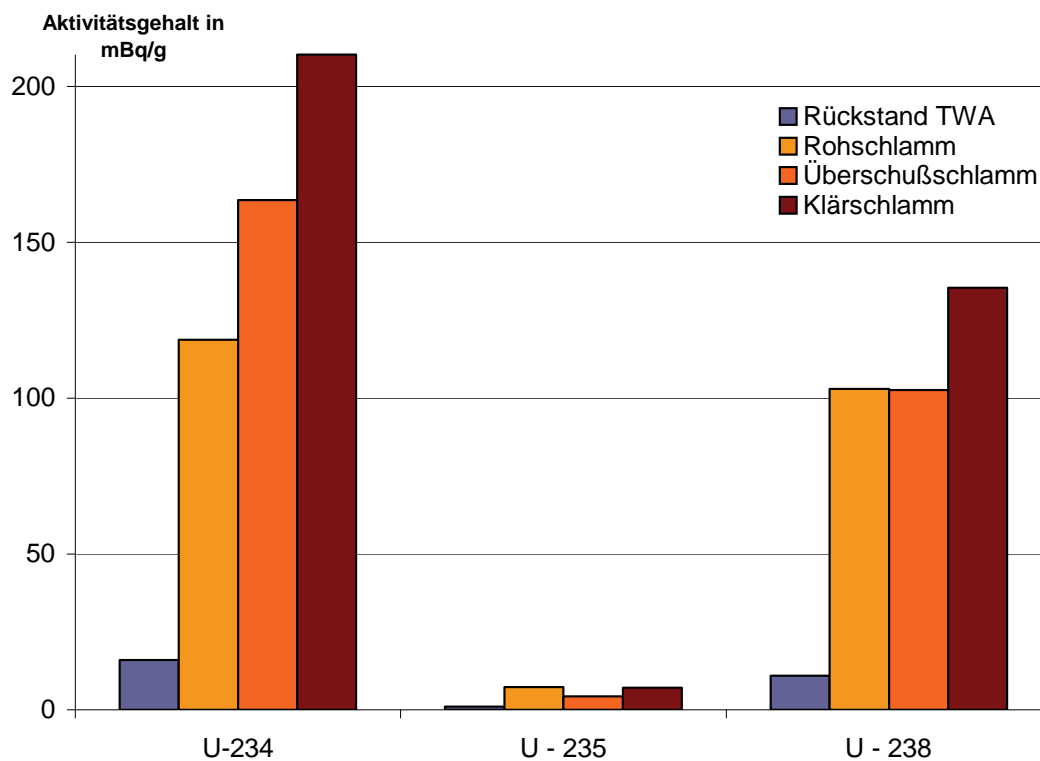


Abb. 5.8: Uranaktivitätsgehalte in den Schlammproben

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      |
| <b>Summe</b> | <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](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<sub>3</sub> (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<sup>2+</sup>-Trägerlösung (50 mg Ca<sup>2+</sup>/ml, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O) 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<sub>4</sub><sup>3+</sup>/ml, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> in H<sub>2</sub>O) zusetzen
8. etwa 5 Minuten rühren
9. Zugabe von mindestens 100 ml konz. NH<sub>4</sub>OH, 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<sub>3</sub> und einem Tropfen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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<sub>3</sub>
20. Aufgabefraktion besteht aus der Probe in 10 ml 3M HNO<sub>3</sub>/0.5M Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>
21. Säule mit 5x5 ml 3M HNO<sub>3</sub> 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 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<sub>3</sub>
29. TRU-Säule wird mit 20 ml 2M HNO<sub>3</sub> konditioniert
30. Probe in 10 ml 3M HNO<sub>3</sub>/1M Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 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 HNO<sub>3</sub>, 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 HNO<sub>3</sub> 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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> vorgelegt wurden, aufgefangen
36. vor der Elektrodeposition die Lösungen nochmals unter Zugabe von einem Tropfen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> abrauchen bis SO<sub>3</sub>-Dämpfe entweichen
37. 15 ml Reinstwasser, 3 Tropfen Methylrot als Indikator und konzentrierte NH<sub>3</sub>-Lösung zugeben, bis ein Farbumschlag nach gelb erfolgt
38. um den pH-Wert von 2-3 zu gewährleisten, 5%ige H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 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. NH<sub>3</sub>-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. HNO<sub>3</sub> 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 HNO<sub>3</sub> 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 NaNO<sub>2</sub> zugegeben (NO<sub>3</sub> 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 HNO<sub>3</sub> zurück in den Erlenmeyerkolben spülen und nochmals 30 min. unter dem Säureabzug kochen
12. zur heißen Lösung vorsichtig wiederum 0,25 g NaNO<sub>2</sub> zugeben
13. abkühlen, zentrifugieren und 2. Überstand zum 1. Überstand geben
14. einengen mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bis fast zur Trockene
15. aufnehmen in 30 ml 2 M HNO<sub>3</sub>/0,05 M Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (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 (NH<sub>4</sub>)HC<sub>2</sub>O<sub>4</sub> und 20 ml 2 M HNO<sub>3</sub>
18. Aufgabefraktion auf die Säule geben
19. Säule spülen mit 1x5 ml 2 M HNO<sub>3</sub>/0,5 M Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> und 2x5 ml 2 M HNO<sub>3</sub>/0,05 M (NH<sub>4</sub>)HC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/0,02 M HF
20. Elution der Uranfraktion mit 10 ml 0,025 M HNO<sub>3</sub> und 20 ml 0,1 M (NH<sub>4</sub>)HC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>
21. Elutionsfraktion wird mit 10 ml 0,5 M Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O versetzt und mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bis fast zur Trockene eingengt
22. aufnehmen der Probe in 20 ml 4 M HNO<sub>3</sub>
23. UTEVA-Säule mit 0,7 g UTEVA-Resin der Firma Eichrom, vorgequollen, vorbereiten
24. Säule mit 20 ml 4 M HNO<sub>3</sub> konditionieren
25. Aufgabe der Probefraktion und Nachspülen des Bechers mit 5 ml 4 M HNO<sub>3</sub>
26. Spülen der Säule mit 5x5 ml 4 M HNO<sub>3</sub>
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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> vorgelegt wurden, aufgefangen
29. vor der Elektrodeposition die Lösungen nochmals unter Zugabe von einem Tropfen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> abrauchen bis SO<sub>3</sub>-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 mm<sup>2</sup>), 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 mm<sup>2</sup>), 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 <sub>1</sub> [Bq/L] | Aktivität A <sub>2</sub> [Bq/L] | Anteil in % | k = A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub> |
| 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<br>Aktivitäts-<br>Konzentration [Bq/L] | 2.Probenahme<br>Aktivitäts-<br>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 [ $\mu\text{L}$ ]

| 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 | $m_t$<br>Gewicht<br>[g] | $A_1$                   |                         |                         | $A_2 = A_1 / m_t$       |                         |                         |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|       |                         | <b>U-234</b><br>[mBq/P] | <b>U-235</b><br>[mBq/P] | <b>U-238</b><br>[mBq/P] | <b>U-234</b><br>[mBq/L] | <b>U-235</b><br>[mBq/L] | <b>U-238</b><br>[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<br>[s] | Th-228               |               |                | Th-232               |               |                |
|-------|-----------------|----------------------|---------------|----------------|----------------------|---------------|----------------|
|       |                 | Aktivität<br>[mBq/L] | Fehler<br>[%] | NWG<br>[mBq/L] | Aktivität<br>[mBq/L] | Fehler<br>[%] | NWG<br>[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<br>[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<br>[s] | <b>K-40</b><br>Aktivität<br>[Bq/P] | <b>Pb-210</b><br>Aktivität<br>[Bq/P] | <b>Pb-214</b><br>Aktivität<br>[Bq/P] | <b>Bi-214</b><br>Aktivität<br>[Bq/P] | <b>Ra-226</b><br>Aktivität<br>[Bq/P] | <b>U-234</b><br>Aktivität<br>[Bq/P] | <b>U-238</b><br>Aktivität<br>[Bq/P] |
|-------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| W 805 | 85.950          | 0,96                               | <b>0,25</b>                          | 0,06                                 | 0,06                                 | 0,50                                 | 7,95                                | 0,22                                |
| W 806 | 86.400          | <b>1,23</b>                        | 5,83                                 | <b>0,14</b>                          | <b>0,11</b>                          | <b>1,46</b>                          | 88,32                               | -                                   |
| W 807 | 86.400          | <b>0,86</b>                        | 0,49                                 | 0,07                                 | 0,08                                 | <b>0,56</b>                          | 10,59                               | 0,33                                |
| W 808 | 86.400          | <b>1,76</b>                        | 6,85                                 | <b>0,15</b>                          | 0,12                                 | <b>1,62</b>                          | 107,50                              | -                                   |

Tab. C4-2: Ergebnisse der Untersuchung der eingeeengten Wasserproben mit der Gamma-Spektrometrie in mBq/L

| Probe | Messzeit<br>[s] | <b>K-40</b><br>Aktivität<br>[mBq/L] | <b>Pb-210</b><br>Aktivität<br>[mBq/L] | <b>Pb-214</b><br>Aktivität<br>[mBq/L] | <b>Bi-214</b><br>Aktivität<br>[mBq/L] | <b>Ra-226</b><br>Aktivität<br>[mBq/L] | <b>U-234</b><br>Aktivität<br>[mBq/L] | <b>U-238</b><br>Aktivität<br>[mBq/L] |
|-------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| W 805 | 85.950          | 192                                 | <b>50</b>                             | 12                                    | 12                                    | 100                                   | 1590                                 | 44                                   |
| W 806 | 86.400          | <b>246</b>                          | 1166                                  | <b>28</b>                             | <b>22</b>                             | <b>292</b>                            | 17664                                | -                                    |
| W 807 | 86.400          | <b>172</b>                          | 98                                    | 14                                    | 16                                    | <b>113</b>                            | 2118                                 | 66                                   |
| W 808 | 86.400          | <b>352</b>                          | 1370                                  | <b>29</b>                             | 24                                    | <b>324</b>                            | 21500                                | -                                    |

Tab. C4-3: Ergebnisse der Untersuchung der Schlammproben mit der Gamma-Spektrometrie

| Probe | Messzeit<br>[s] | <b>K-40</b><br>Aktivität<br>[Bq/g] | <b>Pb-210</b><br>Aktivität<br>[Bq/g] | <b>Pb-214</b><br>Aktivität<br>[Bq/g] | <b>Bi-214</b><br>Aktivität<br>[Bq/g] | <b>Ra-226</b><br>Aktivität<br>[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         | $c_r$<br>[mBq/L] | $g_i$<br>[mSv/mBq] | $H_e = g_i \cdot U_w \cdot c_r$ |                  | $U_w$<br>[L/a] | $H_e$<br>[mSv/a] |
|---------------|------------------|--------------------|---------------------------------|------------------|----------------|------------------|
|               |                  |                    | $U_w$<br>[L/a]                  | $H_e$<br>[mSv/a] |                |                  |
| <b>U-238</b>  | 81               | 4,50E-08           | 350                             | 1,28E-03         | 750            | 2,73E-03         |
| <b>U-235</b>  | 3                | 4,70E-08           | 350                             | 4,94E-05         | 750            | 1,06E-04         |
| <b>U-234</b>  | 139              | 4,90E-08           | 350                             | 2,38E-03         | 750            | 5,11E-03         |
| <b>Ra-226</b> | 113              | 2,80E-07           | 350                             | 1,11E-02         | 750            | 2,37E-02         |
| <b>Th-228</b> | 0,11             | 7,20E-08           | 350                             | 2,77E-06         | 750            | 5,94E-06         |
| <b>Summe</b>  |                  |                    |                                 | <u>1,48E-02</u>  |                | <u>3,17E-02</u>  |