

# Expositionsabschätzung gegenüber ionisierender Strahlung

## durch Wasserwerksrückstände

Rückstände, die in Wasserwerken anfallen, enthalten Radionuklide natürlicher Herkunft. Durch den Umgang mit diesen Rückständen kann es daher zu einer **Strahlenexposition der Mitarbeiter** durch natürliche radioaktive Strahlenquellen kommen. Die Ergebnisse einer Dosisabschätzung zeigen in der Einzelfallbetrachtung für Schlämme und Filtermaterialien, dass die Beschäftigten keiner unzulässigen Dosis ausgesetzt sind. Entsorgungs- oder Verwertungsbetriebe können allerdings Rückstände aus mehreren Wasserwerken beziehen, daher müssen diesen Beschäftigten längere Expositionszeiten zugewiesen werden. **Im Rahmen einer generischen Expositionsabschätzung ist diesem Umstand Rechnung zu tragen.**

von: Dr. Pia Lipp (TZW: DVGW - Technologiezentrum Wasser) & Jörg Dilling (Bundesamt für Strahlenschutz)

Am 5. Dezember 2013 hat der Rat der Europäischen Union die Richtlinie 2013/59/EURATOM zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung verabschiedet [1]. Diese Richtlinie fasst unterschiedliche europäische Regelwerke zum Strahlenschutz zusammen und bringt diese auf den aktuellen wissenschaftlichen Stand. U. a. werden Regelungen zu industriellen Rückständen mit einem erhöhten Gehalt natürlicher Radionuklide sowie zum Radongehalt in der Raumluft an Arbeitsplätzen getroffen. Diese Radionuklide entstammen der Uran- bzw. Thoriumzerfallsreihe und sind in allen Böden und Gesteinen vorhanden. Durch Lösungsprozesse gelangen sie auch in Grund- und Oberflächenwasser. Infolge industrieller Verarbeitung können sich Radionuklide verfahrensbedingt in Rückständen anreichern und somit ggf. ein Gesundheitsrisiko darstellen. In der genannten Richtlinie werden Industriezweige aufgelistet, in denen natürlich vorkommende radioaktive Materialien aus Sicht des Strahlenschutzes relevant sein könnten: So werden beispielsweise Grundwasserfilteranlagen („ground water filtration facilities“) aufgeführt. Aus diesem Grund ergibt sich für Wasserversorger das Erfordernis, sich mit dem Vorkommen und dem Gehalt an natürlichen Radionukliden in Rückständen aus Filteranlagen zu beschäftigen.

Während der Projektlaufzeit wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) ein Referentenentwurf des neuen Strahlenschutzgesetzes entwickelt, das die Richtlinie 2013/59/EURATOM in nationales Recht umsetzt. Dort werden im Anhang u. a. Rückstände aus der Grundwasseraufbereitung geregelt. In der Begründung zum Gesetz ist das BMUB den Empfehlungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) zur Einschränkung der Rückstandsarten gefolgt: „Im Bereich der Wasseraufbereitung können bei der Aufbereitung von Grundwässern Kiese, Sande, Harze sowie Kornaktivkohle anfallen, die radiologisch relevante Konzentrationen natürlicher Radionuklide enthalten. Andere Rückstände aus der Aufbereitung von Grundwässern sind nicht betroffen. Ebenso ist die Aufbereitung von Oberflächenwässern (z. B. von Uferfiltrat) generell nicht betroffen.“ Demnach fallen die Schlämme aus der Enteisung/Entmanganung und die Flockungsschlämme nicht unter diese neue Regelung.

Im Gesetzesentwurf wird des Weiteren eine generelle Unbedenklichkeitsschwelle von 0,2 Becquerel pro Gramm (Bq/g) für jedes Radionuklid der Zerfallsreihen von Uran-238 (U-238) und Thorium-232 (Th-232) genannt. Materialien, deren Gehalte unter dieser Schwelle liegen, gelten nicht als Rückstände

im Sinne dieses Gesetzes. Filtermaterialien aus Kalkstein fallen demnach auch nicht unter diese Regelung.

Im Zuge der radiologischen Bewertung ist zu unterscheiden, ob eine fallbezogene Bewertung für einen konkreten Rückstand durchgeführt werden soll oder ob über einen generischen Ansatz generelle Aussagen abgeleitet werden sollen. Ein generischer Ansatz unterscheidet sich somit fundamental von einer Einzelfallbetrachtung, bei der aufgrund von Orts- oder Sachkenntnissen weniger restriktive Parameter verwendet oder bestimmte Expositionssituationen ausgeschlossen werden können. Bei einer generischen Herangehensweise werden somit die tatsächlichen Strahlenexpositionen grundsätzlich überschätzt.

Für gesetzgeberische Zwecke ist eine generische Herangehensweise dennoch sachgerecht. Im Zuge der Expositi-

tionsabschätzung wird dabei geprüft, ob ohne weitere einschränkende Maßnahmen bei der Verwertung und Beseitigung von Rückständen mit unzulässigen Strahlenexpositionen für Beschäftigte oder sonstige Personen der Bevölkerung zu rechnen ist. Hierbei sind auch weniger wahrscheinliche Situationen, wie beispielsweise eine Konzentrierung bestimmter Rückstände innerhalb eines Verwertungszweigs, mit einzubeziehen. Gleichwohl sind bei einer generischen Herangehensweise möglichst viele Aspekte der realen Verhältnisse zu berücksichtigen. Dies gilt vor allem für die zu berücksichtigenden Expositionszeiten sowohl für Beschäftigte als auch sonstige Personen der Bevölkerung sowie für die Verzehrraten, falls der Konsum von kontaminierten Nahrungsmitteln zu berücksichtigen ist.

Zur Bewertung der radiologischen Relevanz von NORM-Stoffen (naturally

occurring radioactive material) sind zwei Teilaspekte zu berücksichtigen: Zum einen ist die Strahlenexposition von Beschäftigten zu bewerten. Dies umfasst einerseits die Personen, die im Wasserwerk dauerhaft tätig sind; andererseits werden alle weiteren Beschäftigten, die im Zuge der Verwertung oder Beseitigung mit den Rückständen Umgang haben, in die Bewertung einbezogen. Beispiele hierfür sind Mitarbeiter in Entsorgungsfirmen, die sowohl bei der Beladung im Wasserwerk, beim Transport als auch beim Abladen der Rückstände tätig sind. Zum anderen können bei bestimmten Verwertungs- oder Beseitigungsoptionen Situationen entstehen, in denen auch Personen der Bevölkerung exponiert werden. In diesen Fällen ist die Strahlenexposition gesondert neben derjenigen der Beschäftigten zu ermitteln. Diese Situation trifft z. B. bei einer Verwertung der Rückstände im Landschafts-, Straßen- oder Wegebau zu. ▶



**GIB  
DRUCK  
DRAUF!**

### Messsystem PMS3000 zur Dichtheitsprüfung nach DVGW G 469 (A) und W 400-2, Teil 16

- Prüfabläufe geführt oder frei definiert
- Touchdisplay mit Farbgrafik
- Zwei interne Druckmessbereiche
- Wasserentnahme durch Druckablasskoffer
- Pumpen und Kompressoren
- Prüfstandrohr, Prüfkörper und Adapter
- Anschlusszubehör im praktischen Koffer



UNION Instruments GmbH  
Zeppelinstraße 42, 76185 Karlsruhe  
Telefon: +49 (0) 721-68 03 81 20  
Telefax: +49 (0) 721-68 03 81 33  
E-Mail: sales@union-instruments.com



[www.union-instruments.com](http://www.union-instruments.com)



## Instandsetzung von Trinkwasserbehältern Europaweit



**Erfahrung seit 70 Jahren  
Messestand: Halle 2.2 Stand 102**

65189 Wiesbaden · Weidenbornstraße 7-9  
Telefon: 0611 7908-0

01159 Dresden · Ebertplatz 7-9  
Telefon: 0351 42441-0

Internet: [www.wiedemann-gmbh.com](http://www.wiedemann-gmbh.com)

**WIEDEMANN**

Instandsetzung und Schutz von Betonbauwerken



seit 1947

**Tabelle 1: Statistische Auswertung der Messergebnisse für die Roh- und Reinwasserproben**

Radionuklid	Min. mBq/l	Max. mBq/l	Median mBq/l	Referenz-Aktivitätskonzentrationen [6] mBq/l
Pb-210	4,2	14	5,9	200
Po-210	1,1	13	2,0	100
Ra-226	3,9	20,9	7,8	500
Ra-228	2,6	37,1	7,1	200
U-234	2,9	174	20	2.800
U-238	3,5	105	13,3	3.000

Quelle: Lipp, Dilling [2]

Ob Materialien mit einem erhöhten Gehalt an natürlichen Radionukliden aus Sicht des Strahlenschutzes relevant sind, wird grundsätzlich anhand der sogenannten effektiven Jahresdosis bewertet. Dieser Parameter ist keine Messgröße, sondern wird über Rechenverfahren ermittelt. Zur Vereinfachung wird häufig ein Bezug zwischen effektiver Jahresdosis und der einfach zu ermittelnden spezifischen Aktivität (auf ein Radionuklid bezogene Anzahl an Zerfällen pro Masseneinheit eines Feststoffs) hergestellt.

In der Richtlinie 2013/59/EURATOM wird angegeben, dass unterhalb einer spezifischen Aktivität von 1 Bq/g für Radionuklide der Zerfallsreihen von U-238 und Th-232 keine radiologische Relevanz gegeben ist, wenn spezifische Expositionspfade wie der Trinkwasserpfad ausgeschlossen werden können oder die Materialien nicht zu Baustoffen verwertet werden [1].

Natürliche Radionuklide werden durch das Grundwasser zu einem geringen

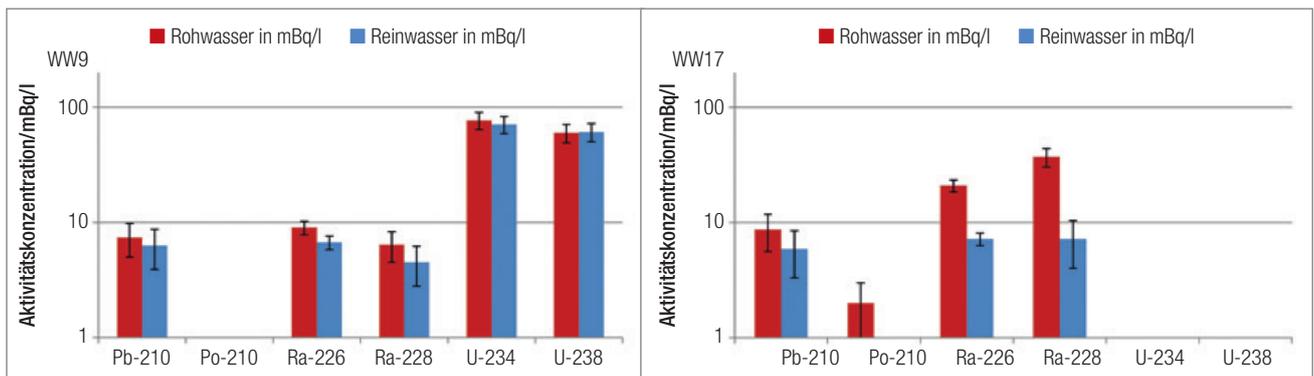
Teil aus dem Ausgangsgestein gelöst. Aufgrund der unterschiedlichen Mobilität der Elemente durch Lösungs- und Fällungsprozesse, die durch die Eigenschaften der Stoffe und die chemisch-physikalischen Verhältnisse im Untergrund gesteuert werden, ist innerhalb der natürlichen Zerfallsreihen ein radioaktives Gleichgewicht zwischen den Mutternukliden und den Tochter-nukliden im Grundwasser in der Regel nicht gegeben. Demnach muss mit sich verändernden Gehalten der verschiedenen Radionuklide in einem Grundwasser gerechnet werden. Im Wasseraufbereitungsprozess können sich die Radionuklide in den Wasserwerksrückständen anreichern. Inwieweit sich bei deren Behandlung dadurch für die Wasserversorger Folgen ergeben, muss durch weitergehende Untersuchungen bewertet werden. Vereinzelt wurden in der Vergangenheit bereits Studien zur Belastung von Schlämmen und Sedimenten aus der Wasseraufbereitung durchgeführt. Eine deutschlandweite flächendeckende Datengrundlage ist bislang jedoch nicht vorhanden.

### Vorgehensweise

Im Rahmen des vom DVGW geförderten Projektes W 2/02/14 wurden Daten zu den tatsächlich vorliegenden Aktivitäten in den anfallenden Wasserwerksrückständen ermittelt und eine Abschätzung der Exposition durch die Wasserwerksrückstände vorgenommen [2].

Auf der Datengrundlage einer im DVGW-Vorhaben W 9/01/10 vorgenommenen Erhebung zum Vorkommen und zu den Mengen der in der Wasseraufbereitung anfallenden Rückstände [3, 4] wurden Wasserversorgungsunternehmen (WVU), die Aufbereitungsanlagen zur Enteisung und Entmanganung betreiben, zur Teilnahme an dem neuen Vorhaben angefragt.

Natürliche Radionuklide sind in stark variierender Konzentration und Zusammensetzung in Grundwässern enthalten: Sie sind geogen in Böden und Gesteinen enthalten (Kalium-40 und Radionuklide aus den drei natürlichen Zerfallsreihen Uran-238, Uran-235 und Thorium-232) und gelangen über Lösungs- und Transportvorgänge in das Grundwasser. Natürliche Radionuklide kommen in allen geologischen Formationen vor, jedoch mit unterschiedlichen Gehalten. Geogen bedingt können einige Gesteine höhere Gehalte an natürlichen Radionukliden aufweisen (beispielsweise Buntsandstein im Keuper, granitische und magmatische Gesteine).



Quelle: Lipp, Dilling [2]

**Abb. 1:** Aktivitätskonzentrationen in zwei Roh- und Reinwasserproben (WW9 als Beispiel für eine geringe Veränderung und WW17 als Beispiel für eine deutliche Veränderung)

Während des radioaktiven Zerfalls entsteht innerhalb der Uran-238-Zerfallsreihe das chemische Element Radon (Radon-222), das als Edelgas entweichen und in der Bodenluft nachgewiesen werden kann. In Regionen mit erhöhten Radongehalten in der Bodenluft ist das Vorkommen höherer Gehalte an natürlichen Radionukliden in Böden und Gesteinen folglich wahrscheinlicher als in anderen Regionen [5]. Im Rahmen des Projektes wurden deshalb vorzugsweise Wasserversorgungsunternehmen aus diesen Regionen ausgewählt und gebeten, Proben der anfallenden Wasserwerksrückstände (WWR) für Analysen zur Verfügung zu stellen. Obwohl das Hauptinteresse in dem Projekt auf der Untersuchung der Filterkiese lag, wurden die Roh- und Reinwässer sowie die im Prozess anfallenden Schlämme untersucht. Ziel war es u. a., Zusammenhänge zwischen den Konzentrationen in den Wässern und den Schlämmen sowie den Stoffströmen herauszufinden. Hierbei wurden vorwiegend Schlämme aus der Enteisung/Entmanganung berücksichtigt. Ferner sollten die WVU auch Proben der Filtermaterialien aus den genannten Wasseraufbereitungsprozessen für Analysen entnehmen.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts von 13 WVU 26 Wasserproben, 34 Schlammproben und 23 Filtermaterialproben aus 32 Wasserwerken zur Verfügung gestellt und vom BFS radiochemisch (Wasserproben)

und gammaspektrometrisch (Feststoffproben) auf die Radionuklide der Zerfallsreihen des Urans und Thoriums untersucht.

Für die Expositionsabschätzung wird zunächst das Radionuklid mit der höchsten spezifischen Aktivität innerhalb einer Zerfallsreihe identifiziert. Anschließend erfolgt eine Summenbildung mit den spezifischen Aktivitäten der beiden Radionuklide, die innerhalb ihrer Zerfallsreihe den jeweils höchsten Wert aufweisen. Bei Rückständen aus der Wasseraufbereitung sind die Radionuklide Ra-228 und Th-228 aus der Thorium-Zerfallsreihe und U-238, Ra-226 und Pb-210 aus der Uran-Zerfallsreihe zu betrachten. Die Summe der Maxima der spezifischen Aktivitäten errechnet sich anhand der folgenden Gleichung:

$$\text{Summe der Maxima} = \text{MAX (Ra-228; Th-228)} + \text{MAX (U-238; Ra-226; Pb-210)}$$

### Roh- und Reinwasseruntersuchungen

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse einer statistischen Auswertung aller für die 26 Roh- und Reinwasserproben erhaltenen Messdaten. Die Aktivitätskonzentrationen lagen mit Werten zwischen 1 und 174 Millibecquerel pro Liter (mBq/l) für die einzelnen Nuklide in einem weiten Messbereich. Zum Vergleich sind in der rechten Spalte die jeweiligen Referenz-Aktivitätskonzentrationen angegeben, wie sie in der Trinkwasserverordnung in Anlage 3 a, Teil II aufgeführt sind [6]. Demnach sind auch die maximalen ermittelten Aktivitätskonzentrationen deutlich geringer als die Referenz-Aktivitätskonzentrationen. Aus diesen Werten wurde geschlossen, dass Trinkwasser nur einen geringen Beitrag zur gesamten jährli-

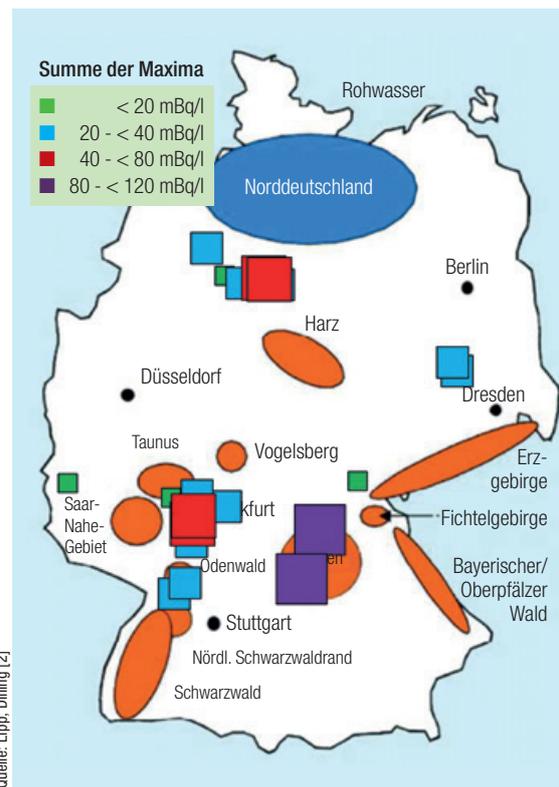


Abb. 2: Geografische Schwerpunkte der untersuchten Rohwässer [2] (orangefarbene Bereiche mit erhöhten Radon-Gehalten in der Bodenluft [9], quadratische Symbole entsprechen den Konzentrationsbereichen für die Summe der Maxima)



### BOHRSERVICE

WBW GmbH  
 Kleiner Bollen 1  
 26826 Weener  
 Telefon 04951 950 300  
 Fax 04951 950 310  
 E-Mail info@wbw-weener.de

Mehr Informationen über uns  
[www.wbw-weener.de](http://www.wbw-weener.de)



Grabenlose Rohrverlegung – Zertifiziert nach DVGW GW 302 GN2.  
 Bohrlängen bis 600 m und Ø 710 mm – Wir bohren auch Fels!

**Tabelle 2: Statistische Kenngrößen aus der Analyse der 34 Schlammproben; die Werte für Minimum, Maximum und Median beziehen sich auf die Trockenmasse**

	Ra-228	Th-228	U-238	Ra-226	Pb-210	Summe der Maxima
Minimum/Bq/g	0,01	0,003	0,03	0,01	0,01	0,04
Maximum/Bq/g	3,3	2,5	2,4	3,0	25	27
Median/Bq/g	0,31	0,10	0,11	0,26	0,05	0,63
Anzahl > BG	34	34	34	34	26	34
Anzahl ≥ 0,2 Bq/g	23	8	5	25	3	28
Anzahl ≥ 0,5 Bq/g	10	5	2	7	3	20
<b>Anzahl ≥ 1 Bq/g</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>8</b>

Quelle: Lipp, Dilling [2]

der Bodenluft (orangefarbene Bereiche) auch höhere Werte für die Konzentrationen der gemessenen Radionuklide aufweisen, wobei die Gehalte zusätzlich von der jeweiligen Fördertiefe abhängig waren. Eine direkte Abhängigkeit zwischen Fördertiefe und Radionuklidgehalten lässt sich aus der eingeschränkten Datengrundlage jedoch nicht ableiten.

### Schlammartige Wasserwerksrückstände

Aus den Daten für die untersuchten 34 Schlammproben in **Tabelle 2** ist ersichtlich, dass die spezifische Aktivität für alle Radionuklide über zwei bis drei Größenordnungen schwankt. Die insgesamt höchsten Werte für die spezifische Aktivität wurden bei zwei Proben eines Wasserwerks für das Radionuklid Pb-210 festgestellt, die Analysenwerte der anderen untersuchten Proben weisen vor allem für Ra 226 und Ra-228 höhere Werte auf. Bei den Werten für Th-228 ist aufgrund der geringen Mobilität von Thorium davon auszugehen, dass sich dieses Nuklid erst durch den radioaktiven Zerfall des Mutternuklids Ra-228 im Rückstand bildet.

Quelle: Lipp, Dilling [2]

**Tabelle 3: Statistische Kenngrößen aus der Analyse der Filtermaterialproben aus den Wasserwerken; die Werte für Minimum, Maximum und Median beziehen sich auf die Trockenmasse**

	Ra-228	Th-228	U-238	Ra-226	Pb-210	Summe der Maxima
Minimum/Bq/g	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01
Maximum/Bq/g	2,10	1,55	0,80	3,50	0,09	4,50
Median/Bq/g	0,19	0,14	0,06	0,28	0,03	0,44
Anzahl > BG	20	20	19	21	12	20
Anzahl ≥ 0,2 Bq/g	10	8	1	13	0	15
<b>Anzahl ≥ 0,5 Bq/g</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>10</b>
Anzahl ≥ 1 Bq/g	3	1	0	3	0	6

chen Strahlenexposition liefert [7, 8]. Um im Einzelfall erkennen zu können, wie sich die Konzentrationen der Radionuklide im Aufbereitungsprozess verändern, sind in **Abbildung 1** die Ergebnisse für zwei Wasserwerke (WW9 und WW17) beispielhaft dargestellt. Für WW9 (Beispiel links) ergaben sich nur geringe Veränderungen der Konzentrationen, während im WW17 (Beispiel rechts) die Konzentrationen im Reinwasser deutlich geringer waren als im Rohwasser.

Wie der Vergleich der Aktivitätskonzentrationen in allen Roh- und Reinwasserproben zeigt, war in den meisten Fällen eine deutliche Verminderung der Werte im Aufbereitungsprozess zu beobachten. Nur in einigen Wasserwerken waren für einzelne Radionuklide im Reinwasser geringfügig höhere Werte als im Rohwasser nachweisbar. Die Unterschiede sind jedoch nicht relevant, da sie im Schwankungsbereich der Messgenauigkeit lie-

gen und durch die methodenspezifisch schwankende Bestimmungsgrenze bedingt sind.

Die Ergebnisse der Rohwasseruntersuchungen wurden zur besseren grafischen Darstellung in vier Konzentrationsbereiche für die Summe der Maxima unterteilt.

- Konzentrationsbereich 1: < 20 mBq/l
- Konzentrationsbereich 2: 20 mBq/l bis < 40 mBq/l
- Konzentrationsbereich 3: 40 mBq/l bis < 80 mBq/l
- Konzentrationsbereich 4: 80 mBq/l bis 120 mBq/l

In der geografischen Deutschlandkarte in **Abbildung 2** sind diese Konzentrationsbereiche mit quadratischen Symbolen gekennzeichnet. Es bestätigt sich im Wesentlichen die Annahme, dass die Rohwässer in den Regionen mit erhöhten Radongehalten in

Für etwa 60 Prozent der Proben lag die aufsummierte spezifische Aktivität oberhalb von 0,5 Bq/g; etwa ein Viertel der Proben wies in der Summe eine Aktivität von mehr als 1 Bq/g auf. Wären Wasserwerksrückstände in Anlage XII der aktuellen Strahlenschutzverordnung als zu berücksichtigende Rückstände aufgeführt, würde demnach je nach Verwertungspfad die Überwachungsgrenze von 0,5 Bq/g bzw. 1 Bq/g für diese Proben überschritten sein [10].

Üblicherweise wird Filterspülwasser im Wasserwerk zur Sedimentation der Feststoffe zwischengelagert. Die dabei entstehenden Schlämme werden in der Regel mithilfe eines Saugwagens aus dem Wasserwerk transportiert. Diese Art des Transports ist jedoch nur bei hohen Wassergehalten von 90 bis 99 Prozent möglich. Die in **Tabelle 2** angegebenen spezifischen Aktivitäten beziehen sich auf getrockneten

Schlamm. Im transportierten Schlamm sind die Werte entsprechend dem Wassergehalt etwa um den Faktor 10 geringer und liefern somit für die Exposition nur einen geringen Beitrag.

## Filtermaterialien

Insgesamt wurden aus den am Projekt beteiligten Wasserwerken 20 Filtermaterialien auf Radionuklide analysiert. Eine aus der Entsäuerung stammende Probe wies geringe Radionuklidgehalte ( $< 0,2 \text{ Bq/g}$ ) bezogen auf die Trockenmasse auf. Ein Viertel der Filtermaterialproben aus der Enteisung oder Entmanganung wiesen für die dominierenden Radiumisotope Ra-226 und Ra-228 spezifische Aktivitäten unterhalb von  $0,2 \text{ Bq/g}$  auf. Drei Viertel der Werte überschritten jedoch diese Unbedenklichkeitsschwelle.

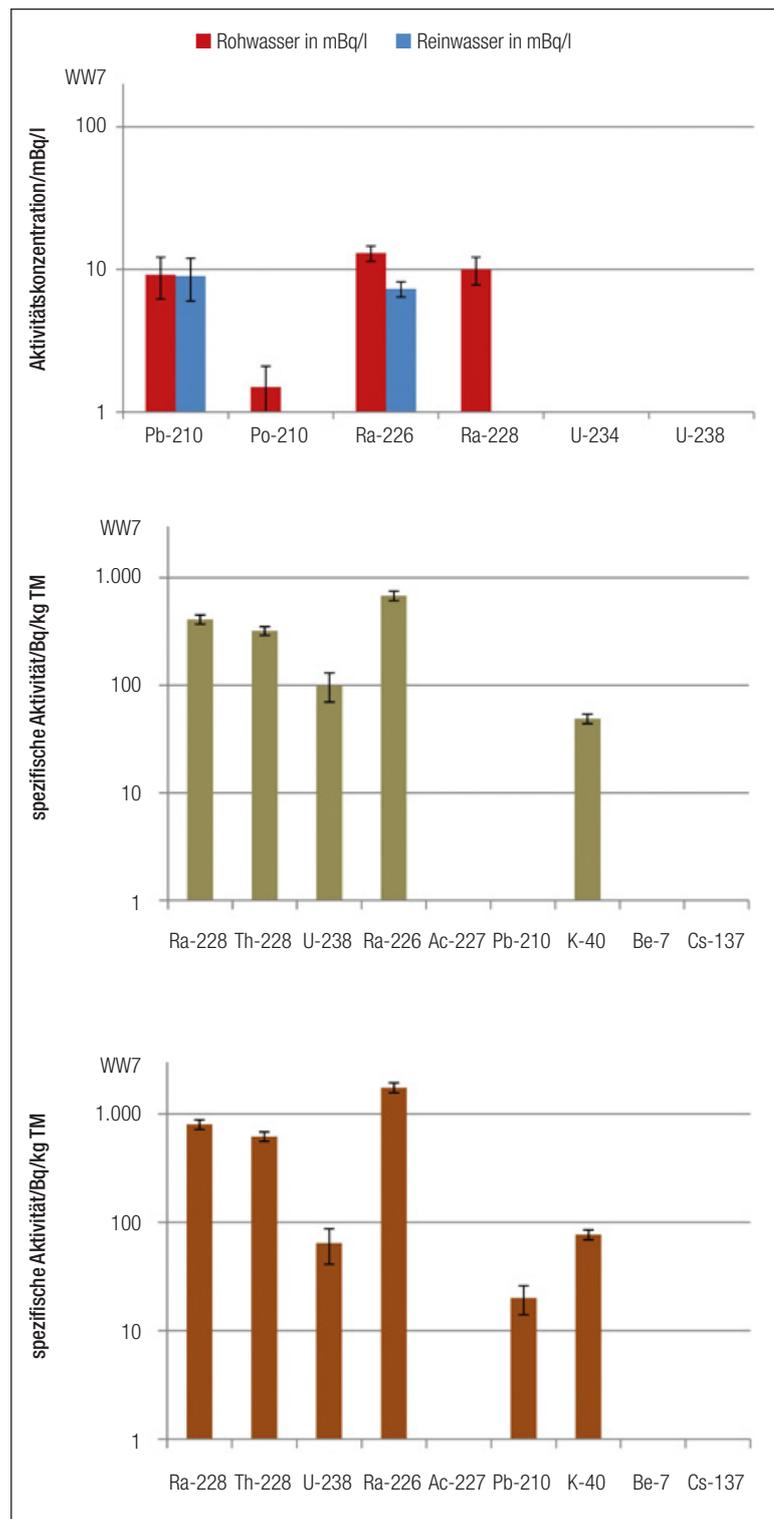
Wie aus den Angaben in **Tabelle 3** hervorgeht, schwankt die Spannweite der spezifischen Aktivität für die Radionuklide Ra-226, Ra-228 und Th-228 wie bei den Schlämmen über zwei Größenordnungen, wobei die höchsten Messwerte für Ra-226 und Ra-228 ermittelt wurden.

Insgesamt weisen die Verteilungsparameter (Minimum, Maximum, Median) der Filtermaterialien niedrigere spezifische Aktivitäten als die Schlämme auf. Für Th-228 ist wie bei den Schlämmen davon auszugehen, dass sich dieses Nuklid aufgrund des radioaktiven Zerfalls des Mutternuklids Ra-228 im Rückstand bildet. Ferner zeigte sich, dass Messwerte für die spezifische Aktivität oberhalb von  $1 \text{ Bq/g}$  nur für die Radionuklide Ra-226 und Ra-228 (bzw. Th-228) auftreten.

Drei Proben von unbenutzten Filtermaterialien wiesen sehr geringe Aktivitätskonzentrationen auf und bestätigten die Annahme, dass die bei den benutzten Filtermaterialien ermittelten erhöhten Werte von den Ablagerungen aus dem Wasseraufbereitungsprozess stammen.

## Versuch einer Massenbilanzierung

Für sieben Wasserwerke (WW7, WW18, WW21, WW22, WW27, WW28 und WW29) wiesen die Schlämme Aktivitäten über der Überwachungsgrenze auf. Hierfür wurde versucht, eine Massenbilanz der Stoffströme aufzustellen. In den Wasserwerken WW7, WW21 und WW27 lagen auch die Werte für die Kiesproben über der Überwachungsgrenze. Leider lagen nur für das



**Abb. 3:** Ergebnisse der Radionukliduntersuchungen für WW7 (oben: Roh-/Reinwasser, Mitte: Filterkies, unten: Schlamm)

Wasserwerk WW7 Ergebnisse sowohl für die Roh- und Reinwasserproben als auch für den Schlamm und den Filterkies vor (**Abb. 3**).

Die Konzentrationen an Ra-226 und Ra-228 im Rohwasser werden im WW7 deutlich verringert. Für beide Radionuklide liegen auch in der Schlamm- und der Kiesprobe hohe Konzentra-

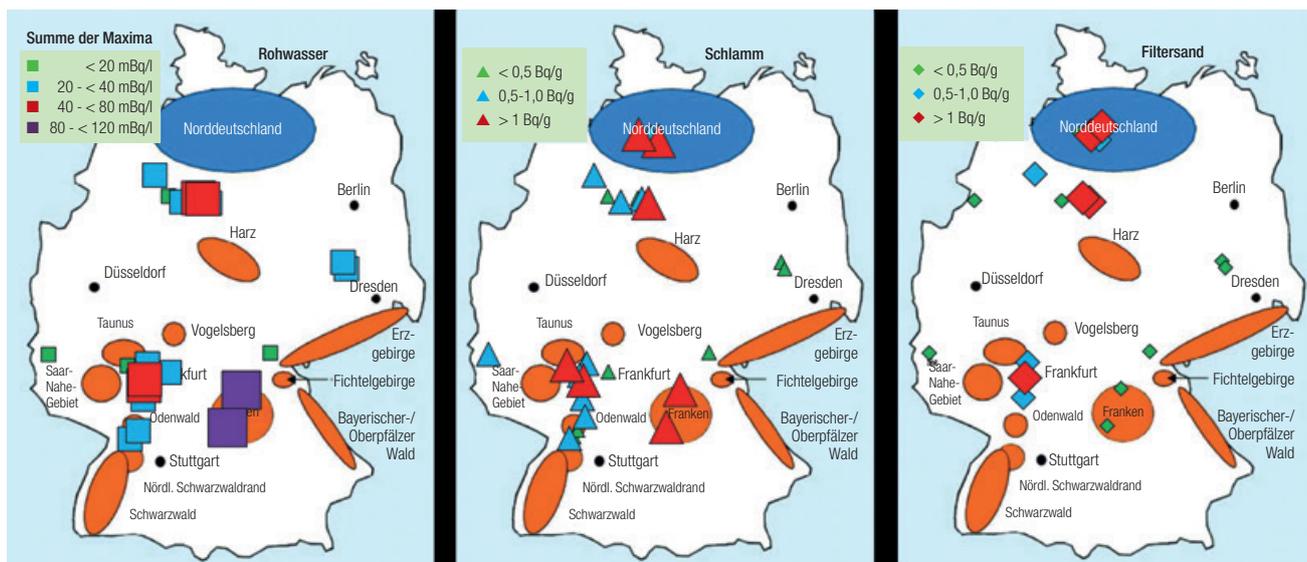


Abb. 4: Geografische Schwerpunkte der untersuchten Proben (Rohwasser, Schlamm, Filtersand)

Quelle: Lipp, Dilling [2]

tionen vor, wobei jeweils die Überwachungsgrenze überschritten wird. Im Aufbereitungsprozess lagern sich somit die aus dem Rohwasser entfernten Radionuklide sowohl im Schlamm als auch auf dem Filtermaterial an.

Im WW7 wird Grundwasser belüftet, nach Zugabe eines Flockungshilfsmittels über Einschichtfilter zur Enteisung und Entmanganung aufbereitet und anschließend durch Zugabe von Natronlauge chemisch entsäuert. Bei einer Gesamtaufbereitungsmenge von etwa 3,6 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr fallen ca. 45 Tonnen Eisenschlamm (Trockenrückstand) an, der in der Wasserwerks-eigenen Deponie gelagert wird. Die Klarwässer aus den Sedimentationsbecken (ca. 187.000 m<sup>3</sup>/a) werden in einen Vorfluter abgeleitet. Anhand dieser Angaben und der Messwerte im Roh- und Reinwasser kann eine theoretische Berechnung der Belastung des Schlammes erfolgen. Die Mengenangaben stammen dabei aus einer Umfrage, die 2012 im Rahmen des DVGW-Projekts W 9/01/10 „Ermittlung neuer Wege zur Verwertung von Wasserwerksrückständen“ durchgeführt wurde [2, 3]. Für die Berechnung wurde angenommen, dass über das Klarwasser keine Radionuklide ausgetragen werden und dass es zu keiner Anreicherung im Filtersand kommt.

Wie der Vergleich der Werte in **Tabelle 4** zeigt, wird für Ra-228 und Ra-226 eine ca. um den Faktor 3 geringere Belastung errechnet, als gemessen wurde. Für das Radionuklid Pb-210 stimmen die Werte hingegen näherungsweise überein; eine Erklärung hierfür steht noch aus.

In einem weiteren Beispiel (WW18) zeigten die Roh- und Reinwasseruntersuchungen kaum eine Veränderung der Gehalte an Radionukliden, während im WW22 eine deutliche Verminderung der Radionuklidgehalte Po-210 und Ra-228 im Aufbereitungsprozess festzustellen war.

Die Schlämme in den beiden Wasserwerken unterschieden sich im Wesentlichen nur bei den Werten für Th-228 und Pb-210. Aus den Ergebnissen der Roh- und Reinwasseruntersuchungen und den jährlich anfallenden Schlammengen, die der Datenerhebung 2012 entnommen wurden [3, 4], lassen sich für die beiden Wasserwerke wiederum theoretische Werte berechnen, die in **Tabelle 5** den gemessenen Werten gegenübergestellt sind. Demnach unterscheiden sich die berechneten sehr deutlich von den gemessenen Werten, wie dies auch für weitere Wasserwerke der Fall war (z. B. WW28 und WW29).

Allein anhand von Roh- und Reinwasseruntersuchungen kann daher keine zuverlässige Aussage über die Belastung der jeweiligen Schlämme oder der Filterkiese abgeleitet werden. Ebenso besteht kein Zusammenhang zwischen den Radionuklidgehalten der Schlämme und der Belastung der Filtermaterialien. Dies wird auch deutlich aus dem Vergleich der geografischen Verteilung der Radionuklidbelastungen der Rohwässer, Schlammproben und Filterkiesproben in **Abbildung 4**.

Die festgestellten Unterschiede werden vermutlich durch die Herkunft der Grundwässer (z. B. Entnahmehorizont, Wasserbeschaffenheit)

und die Art des Aufbereitungsprozesses (z. B. Zugabe von Aufbereitungsstoffen, Filtrations- und Spülbedingungen) beeinflusst. Aufgrund der geringen Datenmenge ist hier eine systematische Auswertung nicht möglich.

## Expositionsabschätzung

Rückstände aus der Wasseraufbereitung sind derzeit nicht in der Liste der zu berücksichtigenden Rückstände nach der derzeitigen Strahlenschutzverordnung Anlage XII Teil B aufgeführt. Demzufolge gelten die in Anlage XII Teil C aufgeführten Überwachungsgrenzen nicht für Wasserwerksrückstände. Falls diese auf der Liste stehen würden, wäre für Schlämme und schlammartige Rückstände aufgrund der Konsistenz, der anfallenden Mengen und der Materialeigenschaften davon auszugehen, dass eine Überwachungsgrenze von 1 Bq/g anzusetzen wäre. Bei der Expositionsabschätzung ist der Wassergehalt der Schlämme zu berücksichtigen. Liegen keine konkreten Angaben zum Wassergehalt vor, wird in der Praxis mit einem Feststoffanteil von 10 Prozent gerechnet. Für Filterkiese würde entsprechend eine Überwachungsgrenze von 0,5 Bq/g unterstellt werden; hier erfolgt keine Korrektur zum Wassergehalt.

Grundsätzlich sind bei einer radiologischen Bewertung repräsentative Informationen zum Mengenaufkommen, zur spezifischen Aktivität, zur Herkunft und zum Verbleib der kontaminierten Rückstände erforderlich. Je detaillierter diese Informationen vorliegen, umso realistischer kann die Bewertung durchgeführt werden. Die Antworten in den zurückgegebenen Fragebögen bildeten somit die Grundlage für die Ableitung realitätsnaher Daten zu Aufenthaltszeiten in der Umgebung von Rückständen.

## Expositionen durch Filtermaterialien

Aus den Angaben in den Fragebögen zeigte sich, dass in einigen Wasserwerken die Filterkiese seit Inbetriebnahme

der Filter nicht ausgetauscht wurden. Das Filtermaterial verbleibt nach übereinstimmenden Angaben demnach 20 bis 25 Jahre im Wasserwerk. Manche Wasserversorger tragen allerdings regelmäßig einen Teil der Filterkiese ab: Dies ist notwendig, da das Filtermaterial in diesen Werken aufgrund der Bildung von Braunstein anwächst. Ein regelmäßiger Austausch des gesamten Filterkörpers erfolgt, wenn überhaupt, nur bei großen Sanierungsarbeiten oder bei der Stilllegung von Wasserwerken.

In den Fragebögen wurden gleichwohl keine konkreten Angaben über die Verwertung von Filterkiesen gemacht. In der Regel wurde lediglich angeführt, dass die Filterkiese an ein Entsorgungsunternehmen abgegeben wurden. Insofern konnte bei der Einzelfallbetrachtung nicht die tatsächliche Verwertungsvariante zu Grunde gelegt werden, stattdessen wurde das Szenario „Verwertung im Straßen-, Wege- und Landschaftsbau“ unterstellt. Als Expositionspfade wurden die Exposition durch äußere Gammastrahlung, die Inhalation von Radon sowie die unbeabsichtigte Ingestion von kontaminiertem Material berücksichtigt. Hinsichtlich des Radonpfades wurde unterstellt, dass sich die Beschäftigten im Wasserwerk in einem wenig belüfteten Innenraum befinden. Für die generische Betrachtung wurde zudem unterstellt, dass das Filtermaterial trockenfällt und eine Staubentwicklung nicht ausgeschlossen werden kann.

In den betrachteten Einzelfällen ergibt sich für die Beschäftigten im Wasserwerk rechnerisch eine Jahresdosis zwischen 11 und 830  $\mu\text{Sv}$ . Der Hauptanteil (etwa 75 Prozent) ist auf eine Exposition durch Radon zurückzuführen (9–600  $\mu\text{Sv}$ ), die Exposition durch äußere Gammastrahlung macht zwischen 2 und 230  $\mu\text{Sv}$  aus. Der Beitrag durch unbeabsichtigte Ingestion kontaminierten Materials beträgt weniger als 5  $\mu\text{Sv}$  und kann im Vergleich zu den beiden anderen Expositionspfaden vernachlässigt werden. Die große Spannweite ergibt sich durch die in den

## WASSERZÄHLER-SCHACHT



1977

1993

1995

- **1977:** Vertrieb der ersten Wasserzähler-Schächte
- **seitdem:** Installation von über 100.000 EWE-Wasserzähler-Schächten
- **2017– die neue Generation:** FLEXORIPP-Wasserzähler-Schacht



**WASSER BERLIN INTERNATIONAL**  
Fachmesse und Kongress  
für die Wasserwirtschaft  
28.–31. März 2017

Besuchen Sie uns:  
**Halle 4.2**  
**Stand 300**



**Tabelle 4: Vergleich der berechneten und gemessenen Belastung für WW7**

Radionuklid	Berechnung	Messung	Messung/
	Bq/g TM	Bq/g TM	Berechnung
Ra-228	0,620	1,750	2,8
Ra-226	0,453	0,800	1,8
Pb-210	0,016	0,020	1,3

Quelle: Lipp, Dilling [2]

**Tabelle 5: Vergleich der berechneten und gemessenen Belastung des anfallenden Schlamms für WW18 mit geringer Veränderung und WW22 mit deutlicher Veränderung im Aufbereitungsprozess**

Radionuklid	WW18		WW22	
	Berechnung	Messung	Berechnung	Messung
	Bq/g TM	Bq/g TM	Bq/g TM	Bq/g TM
Ra-228	0,71	1,00	3,32	0,96
Ra-226	0,08	0,93	2,12	1,17
Pb-210	-0,08	0,13	0,76	0,06
U-238	0,47	0,20	3,17	0,17

Quelle: Lipp, Dilling [2]

Fragebögen angegebenen Expositionszeiten bei der Abtragung der Filterkiese. Bei den beiden Wasserwerken mit den höchsten Expositionen erfolgt die Abtragung manuell per Schaufel, während bei den anderen Wasserwerken die Filterkiese abgesaugt werden. Die Jahresdosis von Fahrern der Transportunternehmen beträgt selbst im ungünstigsten Fall weniger als 10 µSv. Für Beschäftigte in Deponien oder in Verwertungsbetrieben ergibt sich rechnerisch in der ungünstigsten Fallkonstellation eine Jahresdosis von etwa 40 µSv, wovon die Exposition durch äußere Gammastrahlung etwa 30 µSv ausmacht. Gründe für die geringeren Expositionen im Vergleich zu denen im Wasserwerk sind die kürzeren Expositionszeiten und die Annahme, dass die Tätigkeiten im Freien oder in gut belüfteten Räumen ausgeführt werden. Eine Exposition der Bevölkerung kann bei der Einzelfallanalyse vernachlässigt werden.

Für die generische Expositionsabschätzung wird konservativ für Beschäftigte von spezialisierten Entsorgungsfirmen eine jährliche Expositionszeit von 1.000 Stunden im Wasserwerk zugrunde gelegt. Fahrer und Beschäftigte bei der Verwertung (z. B.

Straßenbauarbeiter) bzw. Deponierung gehen mit einer jährlichen Expositionszeit von 200 Stunden in die Bewertung ein.

Für das Personal von Entsorgungsunternehmen ist die Exposition durch Radon Rn-222 (2.400 µSv) bei Arbeiten im Wasserwerk mit Abstand am höchsten: Aus der Exposition durch äußere Gammastrahlung ergibt sich für beide Radionuklide zusammen eine Dosis von 750 µSv, für die Exposition durch die Inhalation von Staub etwa 300 µSv.

Sofern eine Inhalation von Rn-222 nicht ausgeschlossen werden kann, kann sich bei einer spezifischen Aktivität von 1 Bq/g unter ungünstigen Annahmen, beispielsweise zur Luftwechselrate allein über diesen Expositionspfad ohne technische Hilfsmaßnahmen, eine Überschreitung des Dosisrichtwertes von 1 mSv im Kalenderjahr ergeben. Durch intensive Belüftung während der Arbeiten im Wasserwerk lässt sich der Dosisbeitrag über Rn-222 jedoch erheblich reduzieren.

Beim Expositionsszenario „Verwertung im Straßen-, Wege- oder Landschaftsbau“ liegt die abgeschätzte

Jahresdosis für alle Personengruppen für Ra-226 in einer Spannweite von 47 bis 62 µSv und für Ra-228 zwischen 89 und 122 µSv, wobei die Bevölkerungsgruppe der Säuglinge (< 1 Jahr) jeweils die höchsten Werte aufweist. In der Summe der beiden Radionuklide wird der Richtwert für die effektive Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr bei einer zugrunde gelegten spezifischen Aktivität von jeweils 1 Bq/g klar unterschritten. Allerdings sind – wie die vorliegende Studie gezeigt hat – höhere Radionuklidgehalte von 1 bis 10 Bq/g in den Filterkiesen nicht unüblich, sodass eine Überschreitung des Dosisrichtwertes nicht ausgeschlossen werden kann.

Beim Expositionsszenario „Einlagerung auf einer Deponie“ liegt die abgeschätzte Jahresdosis für Ra-226 für alle Personengruppen in einer Spannweite von 92 bis 401 µSv und für Ra-228 zwischen 94 und 347 µSv. In der Summe über die beiden Radionuklide bleibt der Richtwert für die effektive Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr bei einer zugrunde gelegten spezifischen Aktivität von jeweils 1 Bq/g unterschritten. Bei Radionuklidgehalten von 1 bis 10 Bq/g in den Filterkiesen kann jedoch eine Überschreitung des Dosisrichtwertes nicht ausgeschlossen werden.

Bei den üblichen Werten für die spezifische Aktivität kann unter konservativen Annahmen eine Überschreitung des Dosisrichtwertes für Personen der Bevölkerung für die Expositionsszenarien „Verwertung im Straßen-, Wege- oder Landschaftsbau“ und „Einlagerung auf einer Deponie“ ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

### Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bei der hier beschriebenen Datenerhebung handelt es sich um eine stichprobenhafte Untersuchung von Wasserwerksrückständen aus Wasserversorgungsunternehmen, die Wasserwerke zur Enteisung und Entmanganung betreiben. Ziel war es, Proben der Fil-

terschlämme und -sande sowie der Roh- und Reinwässer zu entnehmen und vom Bundesamt für Strahlenschutz mittels radiochemischer (Wasserproben) und gammaspektrometrischer (Feststoffproben) Methoden auf den Gehalt an natürlichen Radionukliden zu untersuchen, um ihre radiologische Relevanz bewerten zu können. Das BFS hat für einzelne Rückstände eine Expositionsabschätzung vorgenommen.

Die für die Roh- und Reinwässer maximal ermittelten Aktivitätskonzentrationen sind demnach deutlich niedriger als die Referenz-Aktivitätskonzentrationen. Unter der Annahme eines Trinkwasserkonsums von 730 Liter pro Jahr lagen die in allen Proben der Reinwässer ermittelten Dosiswerte unter 0,025 mSv im Kalenderjahr und damit weit unter der Richtdosis von 0,1 mSv gemäß Trinkwasserverordnung [6].

Von den untersuchten Schlämmen wies etwa ein Viertel der Proben in der Summe eine Aktivität von mehr als 1 Bq/g, bezogen auf die Tro-

ckenmasse, auf. Wie oben erwähnt, sind die Schlämme jedoch für die Expositionsabschätzung nicht heranzuziehen.

Relevant im Sinne der neuen Gesetzgebung sind Filtermaterialien, deren spezifische Aktivität über der Überwachungsgrenze von 0,5 Bq/g liegt. Von den im Rahmen des Projektes untersuchten Filtermaterialien betrifft dies etwa die Hälfte der Proben, für die die Exposition abzuschätzen war.

Die Expositionsabschätzung für diese Einzelfälle zeigte, dass keine unzulässige Dosis vorlag. Dies ist vor allem daraus begründet, dass es sich um vergleichsweise geringe Mengen handelte und die Expositionszeiten kurz waren. Unter solchen Bedingungen kann die zuständige Behörde auf Antrag gemäß § 58 Absatz 2 des Entwurfes zum neuen Strahlenschutzgesetz (Referentenentwurf) Rückstände aus der Verpflichtung der Überwachung entlassen.

Der Umgang mit Filtermaterialien stellt für viele WVU nicht den Regelfall dar. Filtersande verbleiben üblicherweise bis zu 25 Jahren in

Advertorial

## PowerGRIT® – Sicherer. Schneller. Leichter.

ICS versteht sich seit mehr als 25 Jahren als Problemlöser für alle Themen rund um den Schnitt von Beton, Rohren und weiteren Materialien. Ob für Bauunternehmen im Hoch- und Tiefbau, den Rohrleitungsbau oder auch für professionelle Dienstleister im Bereich der Baudienstmechanik: ICS-Diamantketten für Beton- und Rohr-

schnitte bieten in Verbindung mit unserem breiten Sortiment an Kettensägen jedem Kunden eine Lösung an.

Die ICS®-Kettensägen für Versorgungsleitungen haben mit ihrer revolutionären neuen Schleiftechnik die Sicherheit enorm verbessert: Es gibt keinen Rückschlag beim Einste-

chen und die Technik vereinfacht zusätzlich den Zugang und die Arbeitsposition beim Trennen der Rohre. Diese patentierte Auswahl von Sägen wurde exklusiv von ICS entworfen, um ein breites Spektrum an Materialien – von duktilem Gusseisen bis zu Plastikrohren – zu trennen, und dies mit weniger Aushub. Die Möglichkeit, von nur einer Seite das Rohr ganz durchzuschneiden, reduziert radikal den Zeitaufwand der Arbeit. Erledigen Sie Ihre nächste Arbeit sicherer, schneller und leichter mit den ICS-PowerGrit-Sägen.

*Die PowerGrit-Technologie bietet mit viel weniger Aushubarbeiten einen wesentlich besseren Zugang zur Schneidstelle.*



Quelle: ICS, Blount Europe S.A.

WASSER BERLIN INTERNATIONAL:  
Halle 1.2, Stand 206

Kontakt: [www.icsdiamondtools.de](http://www.icsdiamondtools.de)

den Filtern, bis ein Austausch erforderlich wird. Geht man von einem Grundwasserwerk aus, das acht Filter mit einer Filterfläche von jeweils 60 m<sup>2</sup> pro Filter mit einer Schütthöhe von 2,5 m aufweist, so handelt es sich bei einem vollständigen Austausch des Filtermaterials um eine Menge von 1.200 m<sup>3</sup> bzw. 1.920 t Filtersand, die einmalig in zeitlichen Abständen von 25 Jahren anfällt. In den Einzelfällen, in denen die Oberschichten der Filter regelmäßig abgeschält werden, um die Filterkörner zu entfernen, die im Aufbereitungsprozess größer gewachsen sind, handelt es sich um deutlich geringere Mengen, mit denen umgegangen wird.

Der bei der Expositionsabschätzung vom BfS gewählte Ansatz von 5.000 t Filtermaterial trifft daher nur in sehr seltenen Einzelfällen für ein Wasserwerk zu: Er kommt nur in solchen Wasserwerken vor, die eine große Wassermenge aufbereiten. In Deutschland sind dies überwiegend Anlagen, die Uferfiltrat, Talsperrenwasser oder Seewasser aufbereiten. Diese Anlagen fallen allerdings, wie oben beschrieben, nicht unter die Regelung der EURATOM-Richtlinie. Allerdings sind gemäß der Richtlinie 2013/59/EURATOM auch relevante Sekundärindustrieweige zu bewerten. Mit Blick auf Rückstände aus der Wasseraufbereitung sind hier in erster Linie Entsorgungsunternehmen zu nennen, die sich auf die Sanierung von Wasserwerken spezialisiert haben. Die Beschäftigten dieser Betriebe gehen mit größeren Massenströmen um, damit einhergehend ergeben sich größere Expositionszeiten.

Da davon auszugehen ist, dass die Filtermaterialien mit steigender Verweilzeit im Filter steigende Konzentrationen an Radionukliden aufweisen können, wird den WVU mit großen Aufbereitungsmengen (> 20 Mio. m<sup>3</sup>/a) und entsprechend großen Filterflächen vor einem geplanten Austausch der Filtermaterialien empfohlen, radiologische Untersuchungen durchführen zu lassen. WVU mit Aufberei-

tungsmengen < 10 Mio. m<sup>3</sup>/a sollten aus dem künftigen Regelungsbereich des neuen Strahlenschutzgesetzes durch die zuständige Behörde entlassen werden können.

Die im vorliegenden Projekt erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse sollen vor allem im DVGW-Arbeitsblatt W 256 [10] Berücksichtigung finden, das derzeit in Bearbeitung ist.

## Danksagung

Ohne die Bereitschaft und den Einsatz der Wasserversorgungsunternehmen, Proben von den Roh- und Reinwässern, den Wasserwerksrückständen und den Filtermaterialien zu entnehmen und für Analysen zur Verfügung zu stellen und darüber hinaus selbst Detailfragen geduldig zu beantworten, wäre diese Datenerhebung nicht zustande gekommen. Hierfür möchten die Autoren den vielen ungenannten Mitwirkenden herzlich danken.

Einen großen Beitrag im Zusammenhang mit den durchgeführten Analysen hat das Labor des Bundesamtes für Strahlenschutz geleistet. Stellvertretend richtet sich unser Dank an Frau Dr. Margit Beyermann und Herrn Uwe-Karsten Schkade.

Unser Dank gilt auch dem DVGW, der durch die Freigabe der finanziellen Mittel die Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens geschaffen hat. ■

## Literatur

- [1] RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/EURATOM, 90/641/EURATOM, 96/29/EURATOM, 97/43/EURATOM und 2003/122/EURATOM.
- [2] Lipp, P., Dilling, J.: Datenerhebung für eine Expositionsabschätzung gegenüber ionisierender Strahlung durch Wasserwerksrückstände. Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W 2/02/14, 2016.
- [3] Lipp, P.: Ermittlung neuer Wege zur Verwertung von Wasserwerksrückständen. Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W 9/01/10, 2013.
- [4] Lipp, P., Dammann E.: Wasserwerksrückstände – Ergebnisse einer Umfrage 2012. Energie | Wasser-Praxis – DVGW-Jahresrevue 12/2013, S.42-48.
- [5] <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/bo-den/radon-karte.html>

[6] Dritte Verordnung zur Änderung der Trinkwasserverordnung vom 18. November 2015, BGBl. Jahrgang 2015 Teil I Nr. 46, Seite 2076, Bonn, 25.11.2015.

[7] Czeslik, U., Degering, D., Gleisberg, B., Hampe, D., Köhler, M.: Analysemethoden zur Untersuchung von Radioaktivität im Trinkwasser. Strahlenschutzpraxis 2/2013.

[8] Beyermann, M., Bünger, V., Gehrcke, K., Obrikat, D.: Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesamt für Strahlenschutz. Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt. BfS-SW-06/09. urn:nbn:de:0221-20100319945.

[9] StrlSchV 2001: Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 der Verordnung vom 27. April 2016 (BGBl. I S. 980) geändert worden ist.

[10] DVGW-Arbeitsblatt W 256 – Entwurf – Reduktion von Radionukliden bei der Wasseraufbereitung und Entsorgung der anfallenden Rückstände (Stand 2016).

## Die Autoren

**Dr. Pia Lipp** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung Technologie und Wirtschaftlichkeit im TZW.

**Jörg Dilling** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet SW 1.2 „Natürlich vorkommende radioaktive Materialien, radiologische Altlasten“ im Bundesamt für Strahlenschutz, Außenstelle Berlin.

## Kontakt:

Dr. Pia Lipp  
TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser  
Abteilung Technologie und Wirtschaftlichkeit  
Karlsruher Str. 84  
76139 Karlsruhe  
Tel.: 0721 9678-127  
E-Mail: [pia.lipp@tzw.de](mailto:pia.lipp@tzw.de)  
Internet: [www.tzw.de](http://www.tzw.de)