

Hintergrundpapier zum Umgang mit natürlicher Radioaktivität in Anlagen der Tiefen Geothermie

Abkürzungen.....	2
1. Zusammenfassung.....	3
2. Einführung.....	4
3. Grundlagen	5
4. Radioaktive Materialien in der Tiefen Geothermie.....	7
4.1 Fluide.....	7
4.2 Ablagerungen aus salinaren Fluiden (Scaling).....	9
5. Strahlenschutz.....	12
5.1 Grundlagen	12
5.2 Strahlenexposition für Beschäftigte	16
5.3 Beseitigung von Materialien.....	18
6. Fazit	24
7. Danksagung.....	25
8. Autoren.....	26
9. Literatur.....	27

Abkürzungen

a	spezifische Aktivität (z.B. in Bq/g)
A	Aktivität (in Bq)
Ba/SrSO ₄	Baryt-Coelestin
Bq/g	Becquerel pro Gramm
Bq/l	Becquerel pro Liter
Bq/m ³	Becquerel pro Kubikmeter
DepV	Deponieverordnung
g/l	Gramm pro Liter
⁴⁰ K	Kalium-40
k.A.	keine Angaben
kJ/kg	Kilojoule pro Kilogramm
MWh	Megawattstunde
m	Meter
m ³ /h	Kubikmeter pro Stunde
mW/m ²	Milliwatt pro Quadratmeter
Mrd.	Milliarden
mSv	Millisievert
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material (natürlich vorkommende radiaktive Materialien)
nSv	Nanosievert
nSv/h	Nanosievert pro Stunde
²¹⁰ Pb	Blei-210 (lat.: plumbum)
PbS	Galenit; Bleisulfid
²²⁸ Ra	Radium-228
²²⁶ Ra	Radium-226
²²² Rn	Radon-222
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
t	Tonne(n)
T _{1/2}	Halbwertszeit
²²⁸ Th	Thorium-228
²³⁰ Th	Thorium-230
²³² Th	Thorium-228
²³⁴ U	Uran-234
²³⁵ U	Uran-235
²³⁸ U	Uran-238
μW/m ³	Mikrowatt pro Kubikmeter

1. Zusammenfassung

Ein bedeutender Teil der in der Erdkruste gespeicherten geothermischen Energie stammt vom Zerfall natürlicher radioaktiver Elemente. Die Nutzung der geothermischen Energie ist somit ohne die natürliche Radioaktivität nicht denkbar. Auswirkungen der natürlichen Radioaktivität (NORM) bei der Geothermienutzung müssen untersucht werden, da sie sowohl Arbeitsplätze als auch die Umwelt betreffen können.

Nach allen bisherigen Erkenntnissen können radioaktive Auswirkungen in Anlagen der Oberflächennahen Geothermie ausgeschlossen werden.

Bei tiefengeothermischen Anlagen wird Thermalwasser, das auch radioaktive Elemente enthalten kann, in den oberflächennahen Anlagenteilen in vollständig geschlossenen Systemen geführt. Durch Änderungen der Druck- und Temperaturbedingungen kann es innerhalb der Geothermieranlagen zur Ausfällung von Mineralen kommen, die radioaktiv belastet sein können. Auch in Filtern, mit denen Feststoffe dem Tiefenwasser entzogen werden, können radioaktive Minerale vorhanden sein.

Aufgrund der Wasserzusammensetzung können sich nach heutigem Kenntnisstand keine radioaktiven Ablagerungen in Anlagen im süddeutschen Molassebecken bilden. Bei Anlagen, die außerhalb des Molassebeckens betrieben werden, können vor allem an den Wärmeüberträgern Ablagerungen entstehen, die entsorgt werden müssen; das gilt auch für die Filterrückstände.

Die beim Umgang mit diesen Stoffen abgeschätzte obere Grenze der Strahlenexposition für die Beschäftigten in von NORM-Ablagerungen betroffenen Anlagen ist mit 3 Millisievert (mSv) im Sinne der Strahlenschutzverordnung nicht anzeigenbedürftig. Eine Strahlenexposition für Anlieger einer geothermischen Anlage besteht nicht.

Alle radioaktiv belasteten Stoffe, die der Anlage entnommen werden, sind entsprechend geltender Vorschriften zu entsorgen.

2. Einführung

Das große energetische Potenzial der Erdwärme, das in den obersten 3.000 Metern der Erdkruste rund 10 Billiarden (10^{16}) Megawattstunden (MWh) beträgt, resultiert mindestens zur Hälfte aus dem radioaktiven Zerfall natürlicher Radionuklide. Verantwortlich dafür sind vorrangig die Glieder der Zerfallsreihen des Urans (Uran-238-Reihe (^{238}U) bzw. Uran-235-Reihe (^{235}U)) und des Thoriums (Thorium-232-Reihe (^{232}Th)) sowie das in der natürlichen Isotopenzusammensetzung des Kaliums auftretende Nuklid ^{40}K . Die Uran-, Thorium- und Kalium-Gehalte der oberen Kruste können eine Wärmeproduktionsrate von 6 Mikrowatt pro Kubikmeter ($\mu\text{W}/\text{m}^3$) erreichen und damit rund zwei Drittel der natürlichen mittleren Wärmestromdichte von 70 Milliwatt pro Quadratmeter (mW/m^2) erzeugen.

Diese natürlichen Radionuklide können durch Wechselwirkungen an den Fest-Flüssig-Grenzflächen vom Gestein in die Fluide überreten. In den salinaren (salzhaltigen) Thermalwässern, die im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben energetisch in Geothermieanlagen zur Strom- oder Wärmegewinnung genutzt werden, sind Radionuklidkonzentrationen in der Größenordnung von einigen 10 Becquerel pro Liter (Bq/l) nachweisbar.

Veränderungen im chemisch-physikalischen Milieu führen unter Umständen zur Bildung radioaktiver Mineralablagerungen in oberirdischen Anlagebauteilen und Rohrleitungen. Standortabhängige spezifische Aktivitäten in der Größenordnung von bis zu einigen 1000 Becquerel pro Gramm (Bq/g) erfordern eine Berücksichtigung der Radioaktivität beim Arbeitsschutz in Geothermieanlagen und bei der Entsorgung auftretender Rückstände.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Konsequenzen des Auftretens radioaktiver Ablagerungen bei der Nutzung in Anlagen der Tiefen Geothermie und soll auf der Basis eines fundierten Verständnisses die Grundlage für einen verantwortungsvollen Umgang bilden.

3. Grundlagen

Natürliche Radioaktivität ist ein integraler Bestandteil unserer Umwelt und tritt in unterschiedlichen Gehalten in allen uns umgebenden Stoffen (z.B. in Gesteinen, Böden, Wässern) auf.

Radionuklide zerfallen spontan ohne äußere Einwirkungen. Als Maß für die Anzahl instabiler „Mutter“-Kerne, die pro Zeiteinheit in „Tochter“-Kerne zerfallen, wird die Aktivität eines radioaktiven Stoffes verwendet und durch die Einheit Becquerel (*Bq*) beschrieben. 1 *Bq* entspricht einer Aktivität von einem Zerfall pro Sekunde. Mit der Halbwertszeit ($T_{1/2}$) eines Radionuklides beschreibt man den Zeitraum, nach dem exakt die Hälfte der vorhandenen Kerne zerfallen ist.

Einen Überblick über die massebezogenen (spezifischen) Aktivitäten verschiedener Materialien, Nahrungsmittel sowie des menschlichen Körpers gibt Tab. 1.

Tab. 1: Mittlere spezifische Aktivitäten natürlicher Radionuklide in ausgewählten Materialien, Nahrungsmitteln und im menschlichen Körper

Material	^{238}U	^{230}Th	^{40}K
	Bq/kg		
Granit ¹	100 ^{a)}	120	1.000
Sand ¹	15 ^{a)}	16	380
Ziegel ¹	50 ^{a)}	52	700
Düngemittel ¹	400 ^{a)}	20	4.000
Boden ²	35	30	400
Nahrung ³	0,008	0,001	100
Mensch ²	-	-	56

^{a)} In der Referenz als Radium-226 (Teil der ^{238}U -Zerfallsreihe) ausgewiesen.

Von den sogenannten primordialen (seit Anbeginn der Erdgeschichte vorhandenen) radioaktiven Elementen mit Halbwertzeiten in der Größenordnung des Alters des Universums kommen in der Erdkruste vor allem das Kaliumisotop ^{40}K ($T_{1/2} = 1,3$ Mrd. Jahren), das Thoriumisotop Thorium-232 (^{232}Th ; $T_{1/2} = 14$ Mrd. Jahren) sowie das

¹ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Jahresbericht 2012 „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“, Bonn, Juni 2014.

² UNSCEAR 2000, Report on the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, Sources and effects of ionizing radiation, Annex B: Exposures from natural radiation sources, 2000.

³ Bundesamt für Strahlenschutz, Natürliche Radionuklide in Nahrungsmitteln, www.bfs.de/de/ion/nahrungsmittel/nahrung.html, 2012.

Uranisotop ^{238}U ($T_{1/2} = 4,5 \cdot \text{Mrd. Jahren}$) vor. Das Uranisotop ^{235}U ($T_{1/2} = 0,7 \text{ Mrd. Jahren}$) besitzt auf Grund der geringeren Halbwertzeit und Isotopenhäufigkeit gegenüber dem ^{238}U eine um den Faktor 21,7 niedrigere Aktivität und wird deshalb hier nicht weiter betrachtet.

^{232}Th und ^{238}U sind, im Gegensatz zu ^{40}K , Ausgangspunkte von mehrgliedrigen Zerfallsreihen, die bei stabilen Bleiisotopen enden (s. Abb. 1). In einem geschlossenen System, wie zum Beispiel in den Gesteinen der Erdkruste, bildet sich über geologische Zeiträume hinweg innerhalb dieser Zerfallsreihen ein so genanntes radioaktives Gleichgewicht aus, bei dem alle Radionuklide die gleiche Aktivität besitzen. Die Öffnung des Systems, beispielsweise durch Stoffaustausch an Fest-Flüssig-Grenzflächen, führt zu Differenzierungen zwischen diesen Radionukliden, die als radioaktive Ungleichgewichte sichtbar werden. Eine besondere Stellung unter den natürlichen Radionukliden nimmt das Radon-222 (^{222}Rn ; $T_{1/2} = 3,8 \text{ Tage}$) ein, welches beim Zerfall des ^{238}U entsteht. Durch seine Eigenschaft als Edelgas kann es sich besonders leicht in der Umwelt verteilen.

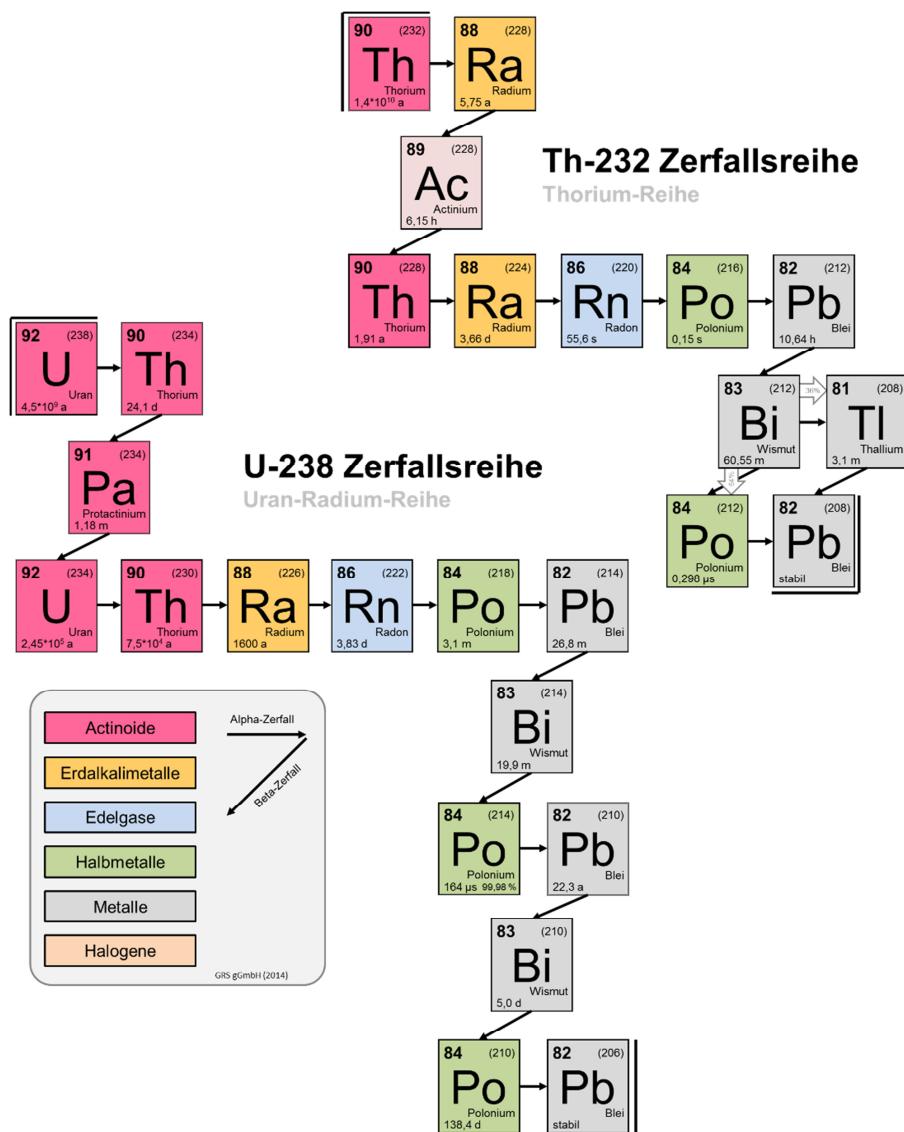


Abb. 1: Natürliche radioaktive Zerfallsreihen ^{238}U und ^{232}Th :
Uran und Thorium zerfallen über eine Reihe von gleichfalls radioaktiven Zerfallsprodukten. Die Reihen enden mit nicht-radioaktivem Blei.

Durch verschiedene mechanische, chemische oder thermische Vorgänge können natürliche Radionuklide akkumuliert und aufkonzentriert werden. Mit dem Begriff NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) werden Stoffe bezeichnet, in denen diese natürlichen Radionuklide angereichert sind und damit die allgemein im Boden vorhandene spezifische Aktivität überschreiten.⁴

4. Radioaktive Materialien in der Tiefen Geothermie

4.1 Fluide

Die in Anlagen der Tiefen Geothermie geförderten Fluide (Thermalwässer) sind radiologisch durch das Auftreten der natürlichen Radionuklide Radium-226 (^{226}Ra ; $T_{1/2} = 1600$ Jahre, ^{238}U -Zerfallsreihe), Radium-228 (^{228}Ra $T_{1/2} = 5,75$ Jahre, ^{232}Th -Zerfallsreihe), Radium-224 (^{224}Ra ; $T_{1/2} = 3,7$ Tage, Thorium-232-Zerfallsreihe), Blei-210 ($T_{1/2} = 20,4$ Jahre, ^{238}U -Zerfallsreihe) und ^{40}K ($T_{1/2} = 1,3$ Milliarden Jahre) gekennzeichnet. Diese Radionuklide zerfallen mit den angegebenen Halbwertszeiten, da sie durch ihre langlebigen Mutternuklide aus den Zerfallsreihen nicht kontinuierlich nachgebildet werden. Die beobachteten Radionuklidkonzentrationen sind von den geochemischen Randbedingungen des Nutzhorizontes abhängig und unterscheiden sich deutlich zwischen den einzelnen geographischen Regionen, wobei ein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Salinität (Salzgehalt) und Radionuklidkonzentration besteht. In Abb. 2 sind dazu eigene Analysen an geothermal genutzten Tiefenwässern zusammengestellt, wobei zusätzlich zur Veranschaulichung die Mediane der Konzentrationen der genannten Radionuklide in Trinkwässern aufgenommen wurden. Sie liegen im Vergleich zu den Gehalten salinärer Thermalwässer um bis zu vier Größenordnungen niedriger. Die Uran- und Thorium-Isotope (^{234}U , ^{238}U , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{228}Th) sind unter den im geothermalen Reservoir herrschenden geochemischen Bedingungen schwer löslich bis immobil und deshalb in den geförderten Nukliden nicht nachweisbar.

Die Kenntnis der Aktivitätskonzentrationen des geförderten Fluids ist für den Betrieb einer geothermischen Anlage unabdingbar. Nach heutigem Kenntnisstand sind eine Salinität größer 100 Gramm pro Liter (g/l) und Radionuklidkonzentrationen im Bereich oberhalb 1 Bq/l ein erstes Indiz für potenziell strahlenschutzrelevante Ablagerungen, wie sie im folgenden Abschnitt behandelt werden. Salinitäten von mehr als 100 g/l sind in den Fluiden des Oberrheingrabens und des Norddeutschen Beckens ab Tiefen von 2000 Meter zu erwarten⁵.

⁴ Der in der internationalen Literatur gleichfalls zu findende Begriff TENORM (Technological Enhanced Naturally Occurring Radionuclides) betont den technologischen, durch menschliche Handlungen herbeigeführten Prozess der Anreicherung von Radionukliden.

⁵ Wolfgramm, M., Rauppach, K., Thorwart, K., Mineralneubildungen und Partikeltransport im Thermalwasserkreislauf geothermischer Anlagen Deutschlands, Z. geolog. Wiss., Berlin 39 (2011) 3/4, 213 - 239.

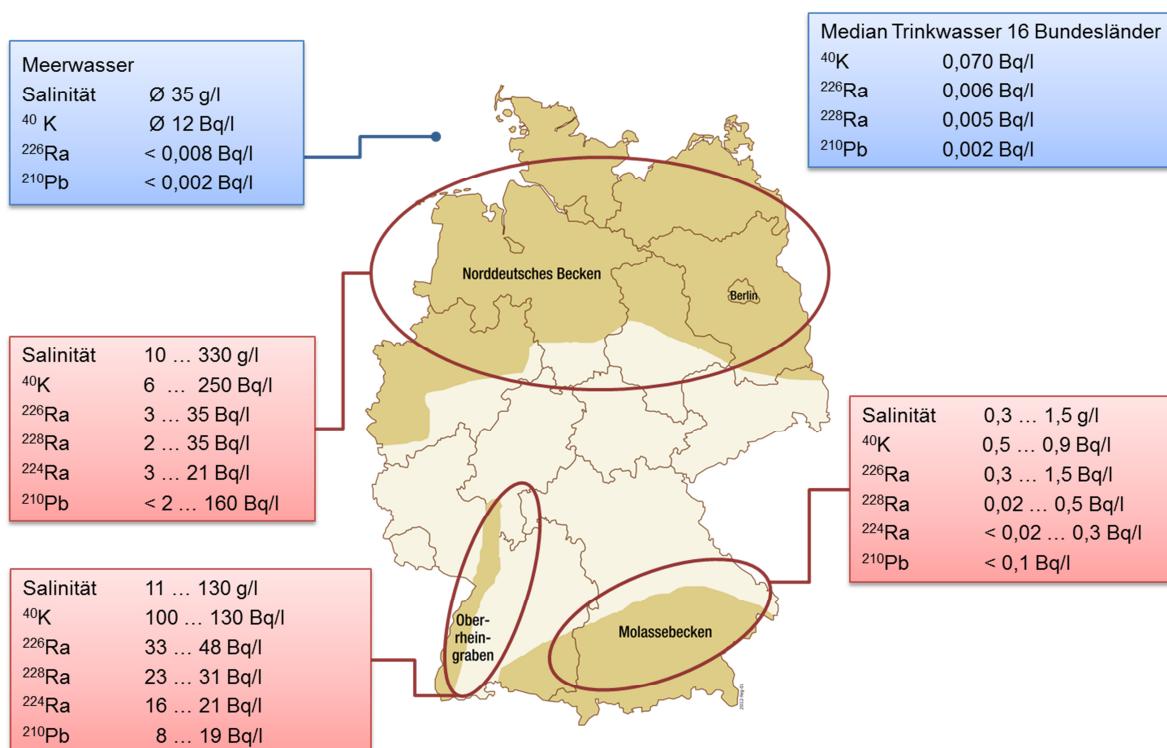


Abb. 2: Nuklidspezifische Aktivitätskonzentrationen von Fluiden aus für die Region typischen Anlagen⁶ und Vergleich mit dem Median des Trinkwassers in Deutschland⁷ und zusammengestellten Daten für Meerwasser⁸. Die Salinitäten wurden Laane (1992), IAEA (2014) und Gabriel et. al. (2006)⁹ entnommen.

⁶ Degering, D., Köhler, M., Verbundvorhaben: Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen - Teilprojekt: Mobilisierung und Ablagerungsprozesse natürlicher Radionuklide, BMU Förderkennzeichen 0329937C, Abschlussbericht 27.10.2010.

Ebenso: Köhler, M., Degering, D., Fleischer, K., Steinbach, P., Brendler, V., Untersuchungen zum Umgang mit natürlicher Radioaktivität bei tiefer Geothermie, BMU Förderkennzeichen 0325166, Abschlussbericht 10.04.2013.

⁷ Beyermann, M., Bünger, T., Gehrcke, K. und Obrikat, D. [2009]: Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland, BfS-SW-06/09, Salzgitter, 2009.

⁸ Laane, R.W.P.M. : Background concentrations of natural compounds in rivers, sea water, atmosphere and mussels. Summary of the group reports written during the International Workshop on Background Concentrations of Natural Compounds held in The Hague, 6-10 April 1992. Report DGW-92.033
Ebenso: IAEA (2014): The environmental behaviour of radium. Revised edition. Vienna: IAEA. Online verfügbar unter www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs476_web.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2015.

Ebenso: Gabriel, H.-J., Goroncy, I., Herrmann, J., Nies, H., Wedekind, C.: Messverfahren zur kontinuierlichen Überwachung der künstlichen Gesamt-Gamma-Aktivitätskonzentration im Meerwasser. D-γ-GESAMT-MWASS-01. Leitstelle D für Meerwasser, Meerschwebstoff und -sediment, Messanleitungen für die „Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“, Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 14 S., 2006.

⁹ Stober, I., Jodocy, M., Hydrochemie der Tiefenwässer im Oberrheingraben - Eine Basis-information für geothermische Nutzungssysteme, Z. geol. Wiss., Berlin 39 (2011) 1, 39 - 57

Salinare Tiefenwässer mit erhöhten Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide sind aus einer Reihe weiterer bergbaulicher Industriezweige bekannt. Prozessbegleitwässer der Erdöl-Erdgasgewinnung oder Grubenwässer der Steinkohlegewinnung weisen ebenfalls teils beträchtlich erhöhte Aktivitätskonzentrationen auf, wobei die Prozesse der Anreicherung im Wasser durchaus vergleichbar sind.

4.2 Ablagerungen aus salinaren Fluiden (Scaling)

Beim Betrieb geothermischer Anlagen können die Änderungen der thermodynamischen Parameter Druck und Temperatur, elektrochemische Wechselwirkungen sowie die Förderraten (in der Größenordnung von 100 Kubikmeter pro Stunde und mehr) über einen langen Zeitraum zur Bildung von Ablagerungen, den sogenannten *Scale* (Abb. 3) führen.



Abb. 3: Typische radioaktive Scale aus einer Geothermieanlage: Flansch (links), Plattenwärmetauscher (rechts).

Radiologisch relevant sind die in Anlagen des Oberrheingrabens und des Norddeutschen Beckens auftretenden Mineralphasen aus Baryt-Coelestint-Mischkristallen (Ba/SrSO_4) und verschiedenen Sulfiden, insbesondere Galenit (PbS). Die chemische Analogie von Radium mit Barium (Ba) und Strontium (Sr) führt zu einem Einbau der Radiumnuklide (^{226}Ra , ^{228}Ra) in das Kristallgitter der schwer löslichen Barium-Strontium-Sulfate. Dagegen ist das Nuklid Blei-210, chemisch identisch zum inaktiven Blei, Bestandteil aller bleihaltigen Phasen. Treten weitere nichtradioaktive Mineralphasen wie z.B. Karbonate auf, führen diese als „verdünnendes“ Material zur Verringerung der auftretenden spezifischen Aktivitäten.

Die Quelle der Radionuklide in den Ablagerungen sind die Nuklide ^{226}Ra , ^{210}Pb und ^{228}Ra aus dem Fluid. Die Halbwertzeit des ^{224}Ra (^{232}Th -Zfallsreihe) ist mit 3,7

Ebenso: Wolfgramm, M., Thorwart, K., Rauppach, K., Brandes, J., Zusammensetzung, Herkunft und Genese geothermaler Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken (NDB) und deren Relevanz für die geothermische Nutzung, Z. geol. Wiss., Berlin 39 (2011) 3/4, 173 - 193

Ebenso: Birner, J., Mayr, C., Thomas, L., Schneider, M., Baumann, T., Winkler, A., Hydrochemie und Genese der tiefen Grundwässer im bayerischen Teil des süddeutschen Molassebeckens, Z. geol. Wiss., Berlin 39 (2011) 3/4, 291 - 308

Tagen so kurz, dass dieses in den Ablagerungen nicht vorkommt. Zusätzlich kann ^{228}Th ($T_{1/2} = 1,9$ Jahre) beobachtet werden, welches während der langen Betriebsdauer durch radioaktiven Zerfall des ^{228}Ra in den Ablagerungen selbst nachgebildet wird. ^{228}Th befindet sich nach wenigen Jahren mit dem Mutternuklid ^{228}Ra im radioaktiven Gleichgewicht. Weitere langlebige Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen wie ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{232}Th und ^{228}Th sowie das ^{40}K sind nur mit spezifischen Aktivitäten unterhalb der analytischen Nachweisgrenzen vorhanden.

Die beobachteten spezifischen Aktivitäten der Scale auf den inneren Oberflächen der Anlagenbauteile überstreichen je nach Zusammensetzung mehr als drei Größenordnungen (Tab. 2) und können als Maximum einige 1000 Bq/g erreichen. Sie liegen damit deutlich über den mittleren Werten dieser Radionuklide in der Erdkruste, erreichen aber nicht das geologische Maximum der spezifischen Aktivität, wie dieses zum Beispiel in Uranerzen auftritt.

Tab. 2: Schwankungsbereiche der spezifischen Aktivitäten von Ablagerungen aus Anlagen der Tiefen Geothermie des Norddeutschen Beckens und des Oberrheingrabens¹⁰ im Vergleich zu Mittelwerten von Böden¹¹, aus Uranerz (Pechblende) und anderen NORM-Materialien¹².

		^{226}Ra	^{210}Pb	$^{228}\text{Ra}, ^{228}\text{Th}$	^{40}K
		(Bq/g)			
Geothermie	Minimum	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,010
	Maximum	500	3 000	300	
Boden		0,035		0,030	400
Einlagerungen bei Grubenwasserableitungen Steinkohle		400	k.A.	15	k.A.
Erdöl-Erdgasförderung		15 000	2 000	2 800	k.A.

¹⁰ Köhler, M., Degering, D., Strahlenschutz in Anlagen der tiefen Geothermie, 42. Jahrestagung des Fachverbandes Strahlenschutz, Publikationsreihe FORTSCHRITTE IM STRAHLENSCHUTZ, FS-2010-153-T, ISSN 1013-4506, Köln TÜV Media 2010, 153 - 158.

¹¹ UNSCEAR 2000

¹² BMU (Hrsg.), Juni 2014

Vgl. International Association of Oil & Gas Producers -OGP(2008): Guidelines for the management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the oil & gas industry. Report No. 412

Vgl. Reichelt, A. & Sitte, B. (2004): Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände. Forschungsvorhaben StSch 4386. Teil 3a Bergbauliche Hinterlassenschaften der Steinkohle-Gewinnung. BMU-2007-695.

	^{226}Ra	^{210}Pb	$^{228}\text{Ra}, ^{228}\text{Th}$	^{40}K
	[Bq/g]			
Pechblende (Uranerz)	10^4			-

Die Nuklidzusammensetzung der einzelnen Scale schwankt dabei in einem großen Bereich; so wurden sowohl von Radium dominierte Ablagerungen als auch solche mit einem deutlichen Blei-210-Überschuss beobachtet. Zwischen ^{228}Ra und ^{226}Ra besteht erwartungsgemäß eine sehr gute Korrelation mit einem Proportionalitätsfaktor nahe 1 (s. Abb. 4), während diese zwischen den Gehalten an Radiumisotopen und ^{210}Pb nicht nachweisbar ist (s. Abb. 5).

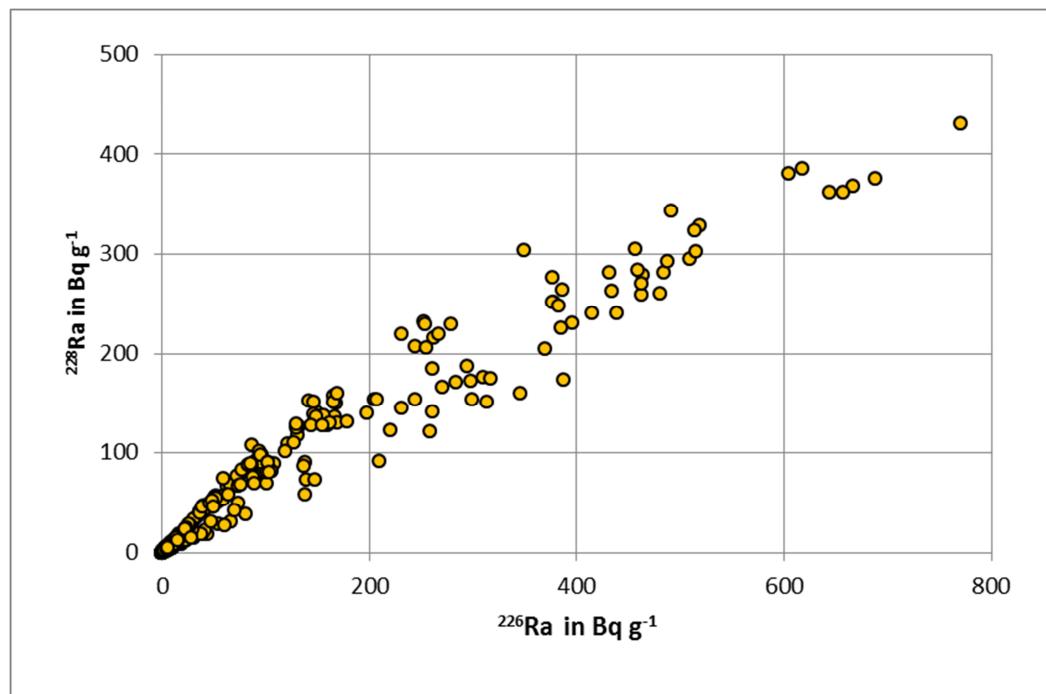


Abb. 4: Korrelationen zwischen ^{228}Ra und ^{226}Ra in Scale aus verschiedenen Regionen

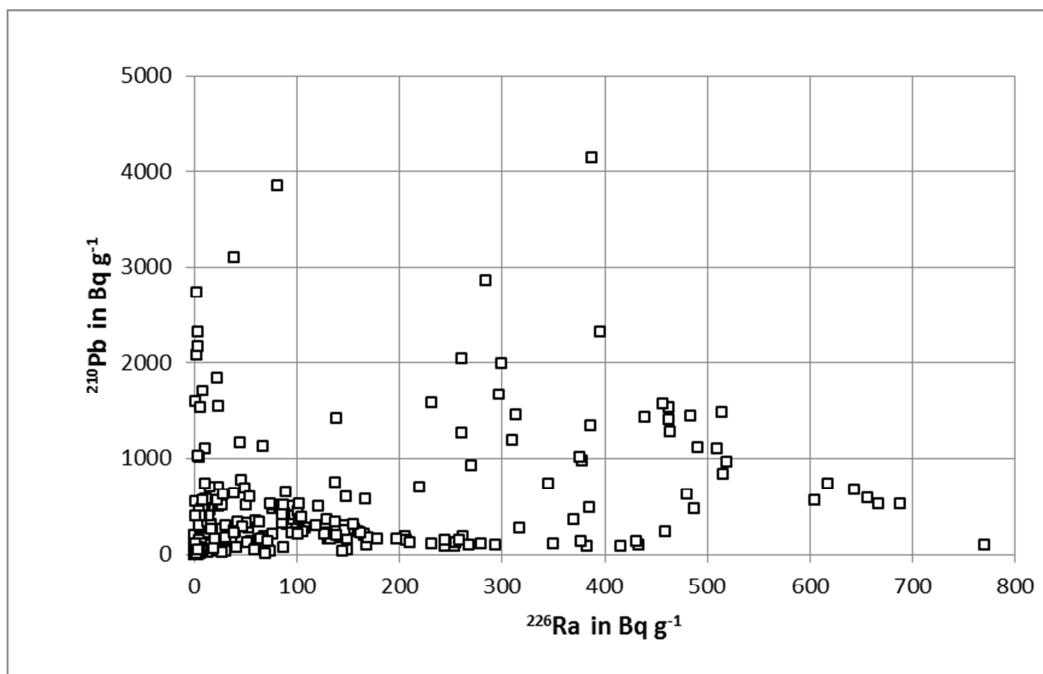


Abb. 5: Korrelationen zwischen ^{210}Pb und ^{226}Ra in Scale aus verschiedenen Regionen

5. Strahlenschutz

NORM-Materialien mit erhöhter natürlicher Radioaktivität von mehr als 0,2 Bq/g können den strahlenschutzrechtlichen Regelungen unterliegen. Ausgehend von der Charakterisierung der Fluide und der Ablagerungen bezüglich natürlicher Radioaktivität werden in diesem Abschnitt die Schlussfolgerungen dargestellt, die sich daraus für die Handhabung und Entsorgung ergeben.

5.1 Grundlagen

Die Einwirkung der von radioaktiven Stoffen ausgehenden ionisierenden Strahlung auf den menschlichen Körper wird als *Strahlenexposition* (Strahlenbelastung) bezeichnet. Die Bewertungsgröße „effektive Dosis“ (Einheit Sievert (Sv)) berücksichtigt sowohl die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Strahlungsarten (Alpha-, Beta- oder Gamma-Strahlung) und -energien als auch die unterschiedliche Empfindlichkeit der menschlichen Organe und Gewebe sowie die Biokinetik der einzelnen Radionuklide. Die effektive Dosis ist keine Messgröße, sie ist vielmehr die Summe der Beiträge aus unterschiedlichen Expositionspfaden (Abb. 6):

- externe Exposition durch Gamma-Strahlung,
- interne Exposition durch Inhalation von Staub,
- interne Exposition durch Inhalation von Radon (einschließlich seiner Zerfallsprodukte),
- Aufnahme von Radioaktivität in den Verdauungstrakt direkt vom Boden bzw. über Nahrungsmittel und Trinkwasser

Allein für die äußere Strahlenexposition stehen Messgeräte zur Verfügung, deren Anzeigewerte der Dosisleistung in Nano-Sievert pro Stunde multipliziert mit einer angenommenen Aufenthaltsdauer eine Abschätzung der Dosis ermöglichen. Die aus

allen anderen Expositionspfaden resultierenden Strahlenexpositionen werden durch Abschätzung der in den menschlichen Körper aufgenommenen Aktivität (Becquerel) und Multiplikation mit tabellierten Dosiskonversionsfaktoren (Sievert pro Becquerel) berechnet.

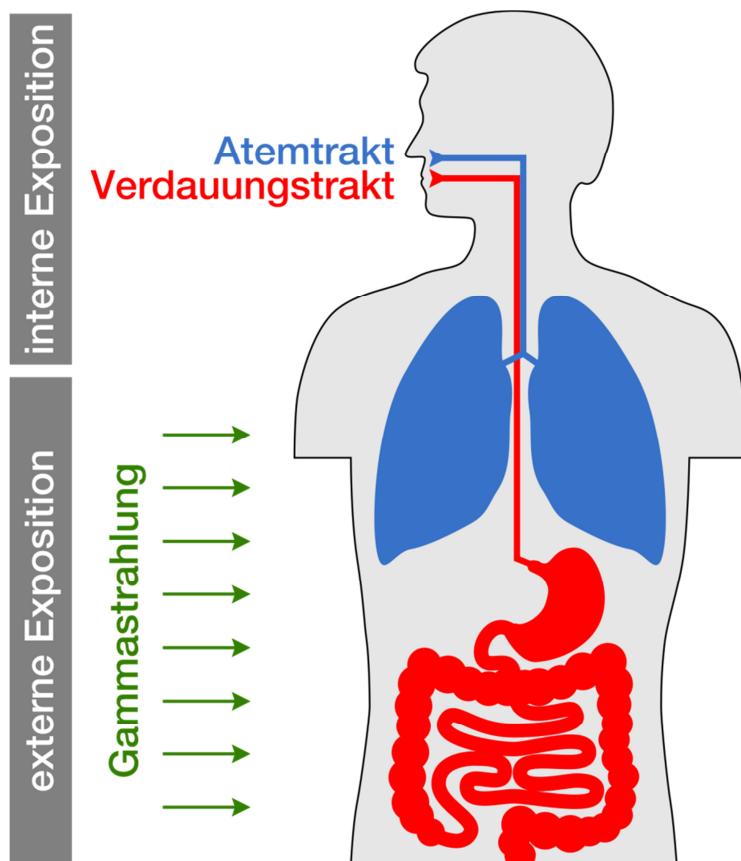


Abb. 6: Schematische Darstellung der Expositionspfade bei Strahlenwirkungen

Natürliche Strahlenquellen führen in Deutschland zu einer mittleren jährlichen Strahlenexposition je Einwohner von 2,1 Millisievert [mSv]¹³. Beiträge hierzu liefern die Strahlung aus dem Weltall (14 %), die terrestrische Strahlung aus Böden und Baumaterialien (19 %) sowie die Aufnahme von Radioaktivität mit der Nahrung (14 %). Die Inhalation (Einatmung) von Radon und seiner kurzlebigen Zerfallsprodukte liefert mit 52 % den Hauptbeitrag zur natürlichen Strahlenexposition. Die Strahlenexposition durch natürliche Strahlenquellen unterliegt beträchtlichen Schwankungen von 1 bis 6 mSv¹⁴, die vor allem durch die Beschaffenheit des geologischen Untergrundes, aber auch durch die Lebens- und Ernährungsgewohnheiten sowie die Höhe des Aufenthaltsortes über Meeressniveau verursacht werden.

¹³BMU (Hrsg.), Juni 2014.

¹⁴ ebd.

Die mittlere jährliche Strahlenexposition aus zivilisatorischen Quellen summiert sich auf 1,9 Millisievert (mSv) je Einwohner¹⁵ und wird fast vollständig durch die Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in der Medizin, insbesondere durch die Röntgendiagnostik, verursacht. Die Summe aus weiteren Quellen (Forschung, Technik, Tschernobyl- und Kernwaffenfallout, kerntechnische Anlagen) liegt unter 0,05 Millisievert.

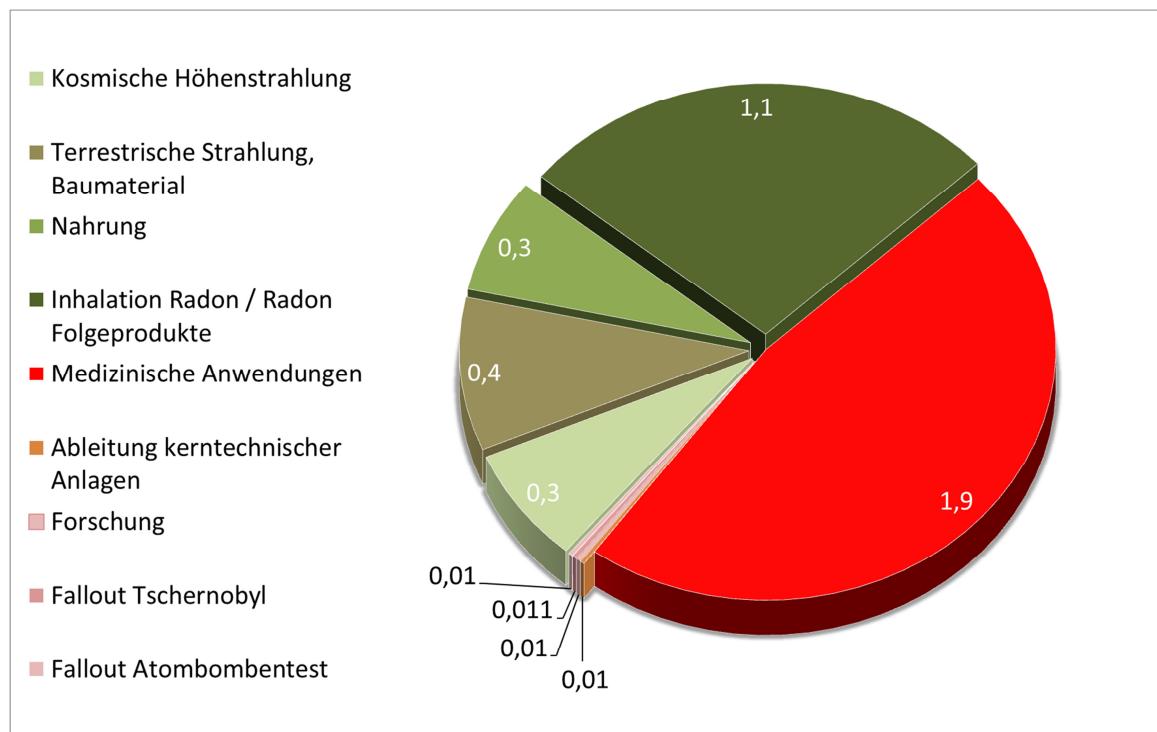


Abb. 7: Einzelbeiträge zur mittleren jährlichen Strahlenexposition in Millisievert aus natürlichen und künstlichen Strahlenquellen (Daten für 2012)¹⁶

Der Strahlenschutz, d.h. der Arbeitsschutz beim Umgang mit radioaktiven Stoffen (geregelt in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)¹⁷, orientiert sich in seiner Zielstellung bei natürlichen Strahlenquellen am oben erwähnten natürlichen Expositionsniveau. Die Regelungen der Verordnung besitzen bei natürlichen Strahlungsquellen allerdings nicht die gleiche Regelungsbreite und -tiefe wie die Bestimmungen zur künstlichen Radioaktivität. Schließlich sind die Einwirkungsmöglichkeiten auf natürlicherweise vorhandene radioaktive Quellen erheblich geringer als die auf künstliche radioaktive Quellen.

¹⁵ ebd.

¹⁶ ebd.

¹⁷ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, [2002, 1459]), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793).

Der abgeleitete Richtwert für zusätzliche Strahlenexpositionen der Bevölkerung im Zusammenhang mit NORM beträgt 1 Millisievert (mSv) pro Jahr. Für die Beschäftigten an betroffenen Arbeitsplätzen sind Strahlenschutzmaßnahmen nach StrlSchV zu ergreifen, wenn die Strahlenexposition 6 mSv im Kalenderjahr überschreitet. Zulässig sind Arbeiten bis zu einer effektiven Dosis von 20 mSv im Kalenderjahr. Darüber hinaus gilt ein allgemeines Minimierungsprinzip. Es fordert, auch bei Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte die Strahlenexposition mit vernünftigen Mitteln so gering wie möglich (ALARA, **as low as reasonably achievable**) zu halten.

Das geforderte Schutzziel für die Strahlenexposition von < 1 Millisievert im Kalenderjahr gilt als eingehalten, solange die spezifische Aktivität der Umgangsstoffe für Einzelnuklide der ^{238}U - und ^{232}Th -Zerfallsreihen < 0,2 Bq/g ist.

In Anlagen der Tiefen Geothermie können die spezifischen Aktivitäten der Nuklide ^{226}Ra , Blei-210, ^{228}Ra und ^{228}Th unter bestimmten Bedingungen diesen Wert von 0,2 Bq/g deutlich übersteigen (s. Tab. 2). Mögliche erhöhte Strahlenexpositionen beim beruflichen Umgang mit diesen Stoffen sind daher in Betracht zu ziehen.

Für eine Abschätzung der Strahlenexposition bedarf es der Festlegung eines konkreten Expositions-Szenarios, welches für eine Anlage und einen Beschäftigten die Dauer der Arbeiten im Zusammenhang mit radioaktiven Stoffen und die zugehörigen Expositionspfade erfasst.

Ein Anlagenbetreiber ist verpflichtet eine Expositionsabschätzung vorzunehmen, wenn die Anlage einem in der StrlSchV explizit genannten Arbeitsfeld zugeordnet werden kann. Die Tiefe Geothermie ist derzeit in der Verordnung noch nicht ausdrücklich berücksichtigt. Können jedoch erheblich erhöhte Strahlenexpositionen nicht ausgeschlossen werden, trifft die zuständige Behörde unter Anwendung eines Auffangtatbestandes eine entsprechende Anordnung für die Anwendung von Strahlenschutzmaßnahmen. Eine frühzeitige Berücksichtigung des Strahlenschutzes in Anlagen der Tiefengeothermie im Oberrheingraben und im Nordeutschen Becken belegt die Fürsorgepflicht des Arbeitgebers.

Das internationale strahlenschutzrechtliche Regelwerk befindet sich gegenwärtig im Umbruch. Die Umsetzung der neuen europäischen „Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung“¹⁸ kann neue Aspekte gegenüber den hier getroffenen Aussagen ergeben. Der Schutz von Beschäftigten und Personen der Bevölkerung vor ionisierender Strahlung infolge eines Umgangs mit NORM wird nicht mehr, wie bislang in einem separaten Teil (Teil 3 BSS 96/29 EURATOM) geregelt, sondern vollständig in das Gesamtsystem des Strahlenschutzes integriert.

¹⁸ 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. Richtlinie 2013/59/Euratom. Fassung vom 5. Dezember 2013, 06.02.2014.

5.2 Strahlenexposition für Beschäftigte

Im **Normalbetrieb** einer geothermischen Anlage kann eine Strahlenexposition von Beschäftigten ausschließlich durch die äußere γ -Strahlung erfolgen. Sie wird durch radioaktive Ablagerungen an den Innenseiten von Anlagenteilen emittiert und dringt durch die Rohrwandungen leicht durch. Erhöhte Werte treten bevorzugt in der Nähe von Wärmetauscher auf, weil sich dort aufgrund der signifikanten Temperaturdifferenz und der großen Oberflächen die meisten Ablagerungsprozesse vollziehen und somit ein Großteil der radioaktiven Stoffe ablagert. Dort konnten Umgebungs-Äquivalentdosisleistungen im Abstand von 1 m in der Größenordnung von einigen 10 Mikrosievert pro Stunde ($\mu\text{Sv}/\text{h}$) festgestellt werden¹⁹. Im Vergleich dazu ist die mittlere Umgebungs-Äquivalentdosisleistung unbelasteten Bodens mit 57 Nanosievert pro Stunde (nSv/h)²⁰ um den Faktor 200 niedriger als der hier genannte Extremwert.

Bei einer abgeschätzten Aufenthaltsdauer für einen mit Revisionsarbeiten in der Anlage beauftragten Beschäftigten von 100 Stunden lässt sich für diesen Expositionspfad eine Dosis von 1,2 mSv für das Kalenderjahr abschätzen, welche bereits in die Größenordnung der oben angegebenen strahlenschutzrechtlichen Richtwerte kommt. Die Beschäftigten einer Geothermieranlage sind deshalb nach Vorliegen ähnlicher Messergebnisse umgehend über die erhöhte γ -Strahlung in der Umgebung der Wärmetauscher aufzuklären. In der Regel ist bereits durch eine Beschränkung der Aufenthaltsdauer auf das unbedingt notwendige Maß eine deutliche Reduktion der Strahlenexposition zu erreichen.

Eine Strahlenexposition für einen Passanten oder Anwohner durch den Betrieb einer geothermischen Anlage kann durch den Abstand zwischen dem Punkt mit der höchsten Dosisleistung, dem Wärmetauscher, und der Grenze des Betriebsgeländes von mindestens einigen 10 m ausgeschlossen werden.

¹⁹ Birner, J. et.al., 2011

²⁰ BMU (Hrsg.), Juni 2014

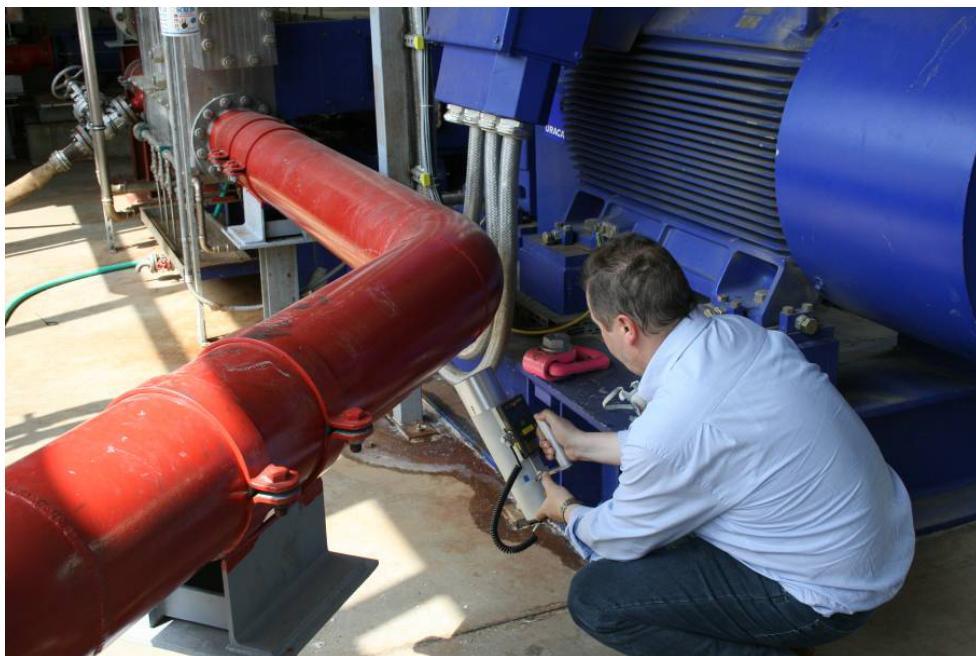


Abb. 8: Messung der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung an der Außenseite eines Rohres zwischen Wärmetauscher und Injektionsbohrung (Abstand = 10 cm, Messgerät Automess Szintomat 6134 A)

Bei allen **Arbeiten an geöffneten Anlageteilen** (Filterwechsel, Austausch von Rohrleitungen, Öffnen von Wärmetauschern) besteht zusätzlich zu der Strahlenexposition durch γ -Strahlung (hier auch in einem geringeren Abstand als beim Normalbetrieb) eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass radioaktive Ablagerungen durch Staubinhalaion, Aufnahme von Partikeln über Hand-Mund- bzw. Hand-Nase-Kontakt in den menschlichen Körper gelangen und einen Beitrag zur inneren Strahlenexposition der Beschäftigten liefern.

In der Regel erfolgen diese Arbeiten jedoch am feuchten Material, so dass die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung gegenüber dem Umgang im trockenen Zustand deutlich geringer ist. Durch einfache Regeln aus dem Arbeitsschutz, wie Ess- und Trinkverbot, Tragen von Schutzhandschuhen, eines Schutzoverall (der in der Anlage verbleibt) und ggf. eines Mundschutzes kann eine Exposition vermieden werden. Nach Beendigung der Arbeiten sind die Hände und das mit den Rückständen in Kontakt gekommene Werkzeug zu reinigen. Diese Schutzmaßnahmen sind ohnehin durch den Gehalt an Schwermetallen in den Umgangsstoffen geboten.

Ein Expositionsrisiko durch das Einatmen von ^{222}Rn konnte bei Konzentrationen in der Luft von 50 - 100 Becquerel pro Kubikmeter (Bq/m^3) nicht festgestellt werden. Ausführliche Informationen hierfür sind in einem gesonderten Hintergrundpapier²¹ zu finden.

²¹ Kemske, J.; Feige, S.; Ostwald, B.; Rüter, H. & Woith, H.(2013): Hintergrundpapier zum Edelgas Radon und seiner Bedeutung in der Geothermie. CtV-Bundesverband Geothermie.

Generell besteht bei Arbeiten an offenen Anlagenkomponenten das Risiko, dass aus Unkenntnis mögliche radiologische Gefahren nicht erkannt und somit auch keine Maßnahmen zur Minderung ergriffen werden. Deshalb müssen alle Beschäftigte, die mit Arbeiten an geöffneten Anlageteilen beauftragt sind, rechtzeitig und umfassend über die Gefahrenpotenziale und mögliche Schutzmaßnahmen aufgeklärt werden.

Abschätzungen der resultierenden Jahresdosen für Beschäftigte in Anlagen der Tiefen Geothermie (Daten verschiedenster Anlagen und Regionen) zeigten, dass die Jahresdosis mit einer Wahrscheinlichkeit von 98 % unter 6 mSv bleibt²². Konservative deterministische Abschätzungen für einzelne Anlagen kommen zu der Aussage dass die effektive Dosis im Jahr nicht größer als 3,0 mSv ist. Dabei wird der Hauptteil (ca. 87 %) durch den Expositionspfad „Äußere Exposition durch γ -Strahlung“ hervorgerufen.

Die effektive Dosis für die Beschäftigten der Geothermieranlage ist im Kalenderjahr kleiner als 6 Millisievert, damit sind die Arbeiten gegenüber der Behörde im Sinne der StrlSchV nicht anzeigenbedürftig.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen dass das zukünftig relevante Schutzziel der Strahlenexposition der Beschäftigten mit Umsetzung der oben genannten Richtlinie¹⁸ in deutsches Recht 1 mSv betragen wird. Um diesen potentiell verschärften Forderungen zu entsprechen, müssen zukünftig bisher verwendete Konservativitäten bei der Abschätzung einer potentiellen Strahlenexposition vermieden und ggf. auch bislang nicht notwendige Maßnahmen zur Reduktion der Strahlenexposition am Arbeitsplatz ergriffen werden.

5.3 Beseitigung von Materialien

Geltungsbereich und Überblick

Bisher sind in Anlagen der Tiefen Geothermie des Norddeutschen Beckens und des Oberrheingrabens NORM-Rückstandsmaterialien in der Größenordnung von einigen 10 Tonnen angefallen. Der praktizierte Einsatz von Inhibitoren kann jedoch die Ablagerungsraten von Scale mit Baryt-Coelestin-Mischkristallen drastisch reduzieren.

Radioaktiv kontaminierte Materialien aus der Geothermie sind bisher keine „überwachungsbedürftigen Rückstände“ nach der StrlSchV. In der bisherigen Praxis wurden sie als „sonstige Materialien“ eingestuft, da auf Grund der spezifischen Aktivität eine erhöhte Strahlenexposition bei deren Beseitigung nicht ausgeschlossen werden kann. Die

Tab. 3: Durch Nutzung der Tiefen Geothermie bisher (im Zeitraum von 10 Jahren) in Deutschland angefallene NORM-Rückstände und Vergleich mit der jährlichen Abfallmenge aus der Erdöl-Erdgas-Industrie. a - nach StrlSchV beurteilungsrelevante spezifische Aktivität, A - aus a berechnete Aktivität. gibt einen Überblick über Art, Masse und Aktivität der deutschlandweit zu entsorgenden Materialien. Aus den Abb.

²² Brasser, T.; Cannepin, R.; Feige, S.; Frieling, G.; Herbert, H.-J.; Heinen, C.; Strack, C. & Vieten, C. (2014): GeoSys. Systemanalyse der geothermalen Energieerzeugung ; Teil A: Synthesebericht, Teil B: Ausführliche Ergebnisdokumentation (CD-ROM). GRS, Bd. 316, II, 77 S, ISBN 978-3-939355-95-3, GRS: Köln [u.a.], 2014.

9 und 10 wird deutlich, dass einerseits kontaminierte Schrotte die Hauptmasse bilden und andererseits die Ablagerung den Großteil der Aktivität beinhalten. Der Vergleich mit den Mengen der Rückstände aus der Erdöl-Erdgasindustrie zeigt bezüglich der Aktivitäten eine ähnliche Dimension der zu bewältigenden Entsorgungsaufgabe.

Alle Materialien mit spezifischen Aktivitäten > 0,2 Bq/g müssen unter Beachtung der Regelungen der StrlSchV beseitigt werden. Viele Metallverwerter, Deponien und Abfallverbrennungsanlagen besitzen heute Eingangsmonitore, die eine unwissentliche Annahme kontaminiierter Materialien verhindern sollen.

Im Folgenden sind für die einzelnen Materialklassen mögliche und erprobte Beseitigungswege beschrieben.

Tab. 3: Durch Nutzung der Tiefen Geothermie bisher (im Zeitraum von 10 Jahren) in Deutschland angefallene NORM-Rückstände²³ und Vergleich mit der jährlichen Abfallmenge aus der Erdöl-Erdgas-Industrie²⁴. a - nach StrlSchV beurteilungsrelevante spezifische Aktivität, A - aus a berechnete Aktivität.

	Material	Masse	spezifische Aktivität	(Gesamt-) Aktivität	Beseitigungs- weg
		[t]	[Bq/g]	[Bq]	
Geothermie	scaleartig	15	1.200	3×10^{10}	Deponierung
	brennbar	10	200	2×10^9	Verbrennung
	Schrott	30	2	6×10^7	Einschmelzen
	Summe	55	200	$1,1 \times 10^{10}$	
Erdöl/ Erdgas	Schrott und Produktions- rückstände	340	40	$1,36 \times 10^{10}$	Deponierung, Einschmelzen

²³ Köhler et.al., 2013

²⁴ Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. Hannover, www.erdoel-erdgas.de, 2012.

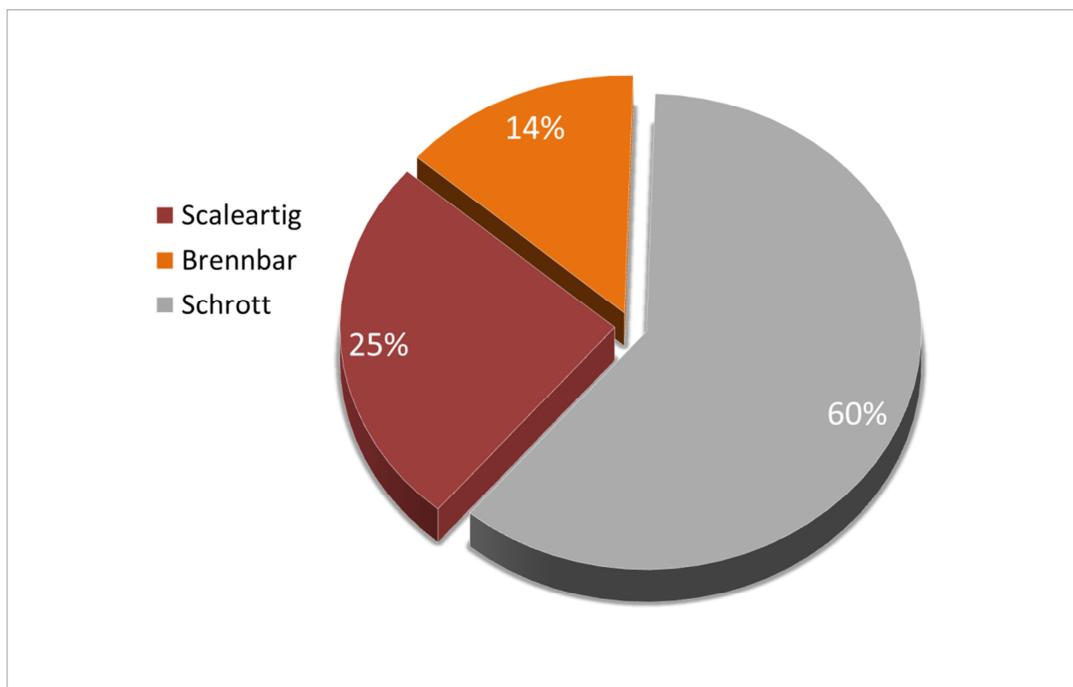


Abb. 9: Masseverteilung von NORM aus der Tiefen Geothermie

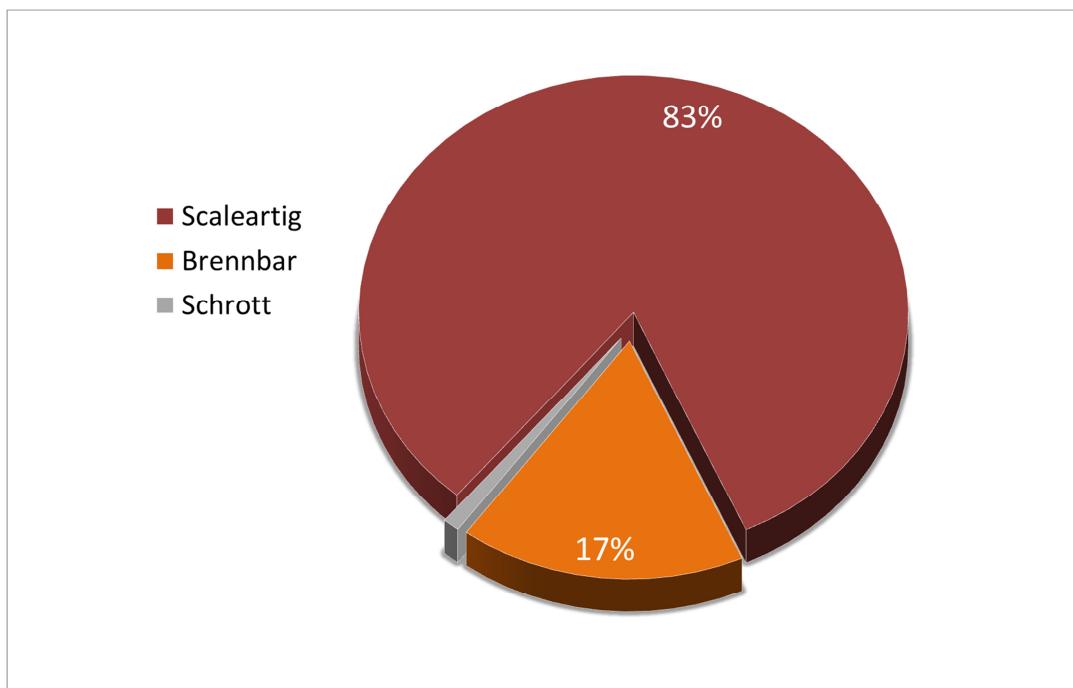


Abb. 10: Aktivitätsverteilung von NORM aus der Tiefen Geothermie

Deponierung

„Sonstige Materialien“ können auf einer Deponie eingelagert werden, wenn der Nachweis der Einhaltung einer effektiven Dosis im Kalenderjahr von 1 mSv erbracht wird [StrlSchV, Anlage XII, Teil D]. Bei der Deponierung werden neben den Handlungen zur Einlagerung der Materialien, die ausschließlich den Deponiearbeiter betreffen, auch Ableitungen aus dem Deponiekörper in die Expositionsabschätzung einbezogen. Zur Einhaltung der Schutzziele kann bei einzulagernden Materialien mit spezifischen Aktivitäten von > 100 Bq/g eine Immobilisierung der Radionuklide realisiert werden.

Entsprechend der konkreten Annahmebedingungen der Deponie sind nach Deponieverordnung (DepV)²⁵ außerdem bestimmte chemische Grenzwerte im Feststoff und in den nach Wasserkontakt herausgelösten Substanzen (Eluate) einzuhalten.

Der beschriebene Beseitigungsweg wird bereits für Materialien aus geothermischen Anlagen beschritten.

Verbrennung

Die beim Betrieb einer geothermischen Anlage anfallenden Filtersäcke, kontaminierten Schutanzüge etc. müssen aus abfallrechtlichen Gründen in einer Sonderabfallverbrennungsanlage beseitigt werden, da Materialien mit einem Brennwert H_o von mehr als 6000 Kilojoule pro Kilogramm (kJ/kg) Trockenmasse nicht mehr ohne Vorbehandlung auf einer Deponie abgelagert werden dürfen²⁶. Auch für diesen Beseitigungsweg ist der Nachweis der Einhaltung des 1 Millisievert-Kriteriums erforderlich.

Einschmelzen

Für Metallschrott ist nach aktuellem Abfallrecht²⁷ eine Wiederverwertung zu bevorzugen. Für das Einschmelzen von metallischen Bauteilen (Abb. 11), die an den Innenflächen NORM-Ablagerungen enthalten, ist ebenfalls eine strahlenschutzrechtliche Unbedenklichkeit (Einhaltung des 1 Millisievert-Kriteriums) nachzuweisen. Dies wäre durchaus in vielen Fällen zu erreichen, da hier die Bezugsmenge die Masse der zu entsorgenden Schrottes ist, wodurch deutlich niedrigere spezifische Aktivitäten ausgewiesen werden können als die oben für die Scale angegebenen (

Tab. 3: Durch Nutzung der Tiefen Geothermie bisher (im Zeitraum von 10 Jahren) in Deutschland angefallene NORM-Rückstände und Vergleich mit der jährlichen Abfallmenge aus der Erdöl-Erdgas-Industrie. a - nach StrlSchV beurteilungsrelevante spezifische Aktivität, A - aus a berechnete Aktivität.). Da aber die handelsüblichen

²⁵ Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 28 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist, Anlage 3.

²⁶ ebd.

²⁷ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) v. 24.04.2013 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert am 22.05.2013 (BGBl. I S. 1324)

Annahmebedingungen für Stahlschrott²⁸ wesentlich restriktiver als die Forderungen des Strahlenschutzrechtes sind, ist generell mit einer Abweisung auch von geringfügig kontaminiertem Schrott durch den Schrotthandel zu rechnen. Aus diesem Grunde ist es generelle Praxis, das Einschmelzen in einer für die Verarbeitung von NORM-Materialien ausgelegten und strahlenschutzrechtlich genehmigten Anlage vorzunehmen.



Abb. 11: Bereitstellung von Bauteilen aus einer geothermischen Anlage zum Einschmelzen. Zur Verhinderung von Aktivitätsaustrag sind die Rohröffnungen verschlossen. Die Außenseiten der Rohre sind nicht kontaminiert.

Transport

Mit der Entlassung aus der Überwachung oder einem genehmigungsrechtlich äquivalenten Vorgang im Zusammenhang mit dem §102 der StrlSchV sind die zu entsorgenden Materialien keine radioaktiven Stoffe im Sinne der StrlSchV mehr. Im Gegensatz dazu kann dennoch nach ADR/GGVSE²⁹ ein Transport nach „Klasse 7,

²⁸ Handelsübliche Lieferbedingungen für die Lieferung von unlegiertem Stahlschrott vom 01.05.2002. Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), Düsseldorf.

²⁹ Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens vom 30.September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (kurz: ADR) vom 18.August 1969 (BGBl 1969 II, S. 1489), geändert durch die 15. ADR-Änderungsverordnung vom 15. Juni 2001 (BGBl 2001 II, S. 654), zuletzt geändert durch die Anlage zur 16. ADR-Änderungsverordnung vom 14.Dezember 2002 (BGBl 2002 II, S. 2922 Anlageband).

Ebenso: Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße und mit Eisenbahnen (Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahnen, kurz: GGVSE) in der Fassung des Artikels 1 der GefÄndV2001 vom 11. Dezember 2001 (BGBl I, S. 3529, vom 17. Dezember 2001).

radioaktiver Stoff“ notwendig sein, da in vielen Fällen die Prüfwerte für die niedrigste Transportkategorie überschritten sind. Eine derartige Einstufung schränkt die in Frage kommenden Deponien und Sonderabfallverbrennungsanlagen drastisch ein, da diesen häufig eine Annahme von Klasse-7-Transporten genehmigungsrechtlich untersagt ist.

6. Fazit

Bei der Nutzung der Tiefen Geothermie mit hochsalinaren Fluiden (mehr als 100 g/l) ab Fördertiefen von mehr als 2000 Metern können sich Ablagerungen bilden, die natürliche Radionuklide mit erhöhten spezifischen Aktivitäten enthalten und die als NORM Gegenstand der Regelungen des Strahlenschutzes sind.

Aus bisherigen Erkenntnissen sind radioaktive Ablagerungen für einzelne Anlagen der Tiefen Geothermie im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben zu erwarten. Dieses Risiko kann für Anlagen der Oberflächennahen Geothermie und für Anlagen der Tiefen Geothermie des Molassebeckens ausgeschlossen werden.

Die NORM-Ablagerungen können die natürlichen Radionuklide ^{226}Ra , Blei-210, ^{228}Ra und ^{228}Th mit spezifischen Aktivitäten im Bereich von 0,1 bis 3.000 Bq/g enthalten. Die beim Umgang mit diesen Stoffen abgeschätzte obere Grenze der Strahlenexposition für die Beschäftigten in von NORM-Ablagerungen betroffenen Anlagen ist mit 3 mSv im Kalenderjahr in der gleichen Größenordnung wie die ohnehin vorhandene mittlere Strahlenexposition durch natürliche Strahlenquellen von 2,1 Millisievert. Eine Strahlenexposition durch eine geothermische Anlage für die Anwohner besteht nicht.

Die Beseitigung von radioaktiv kontaminierten Materialien aus Geothermieranlagen kann je nach Materialart auf einer Deponie (ohne oder mit Immobilisierung), durch Verbrennung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage oder durch Einschmelzen geschehen. Dabei müssen neben dem hier behandelten Strahlenschutzrecht auch alle abfallrechtlichen und transportrechtlichen Regelungen Berücksichtigung finden.

Der verantwortungsbewusste Umgang mit erhöhter natürlicher Radioaktivität in der Tiefen Geothermie ist eine Aufgabe, die eine enge Zusammenarbeit von Anlagenbetreibern, Beschäftigten, für den Strahlenschutz zuständigen Behörden, Bergamt und Sachverständigen erfordert.

Weitere Details liefern die Abschlussberichte der Förderprojekte^{6,23,25} und weitere Veröffentlichungen³⁰.

[³⁰] Degering, D., Köhler, M., [Ed.] (2014): Fachbeiträge zum Schwerpunktthema: Strahlenschutz bei der Nutzbarmachung der geothermischen Energie Strahlenschutzpraxis 03/2014, - 45. Fachverband für Strahlenschutz e.V., für Deutschland und die Schweiz Mitgliedsgesellschaft der IRPA International Radiation Protection Association (Hrsg.). TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group. Köln

7. Danksagung

Die Autoren danken allen Beteiligten und nicht explizit als Autoren genannten Kolleginnen und Kollegen. Besonderer Dank gilt den Anlagenbetreibern für die Bereitschaft, Untersuchungen während des Betriebes der Anlagen zuzulassen und alle Fragen umfassend zu diskutieren. Die Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb mehrerer Projekte gefördert.

8. Autoren

Dr. rer. nat. Detlev Degering

Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.

Postfach 510119

01314 Dresden

Tel.: +49 (0)351.411 62 69

Fax: +49 (0)351.411 62 37

E-Mail: Detelev.Degering@vkta.de

Internet: www.vkta.de

Sebastian Feige

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Bereich Strahlen- und Umweltschutz, Abt. Strahlenschutz

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Tel.: +49 (0)30.885 89-148

Fax: +49 (0)30.885 89-10148

E-Mail: sebastian.feige@grs.de

Internet: www.grs.de

Dr. rer. nat. Matthias Köhler

Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.

Postfach 510119

01314 Dresden

Tel.: +49 (0)351.260 20 98

Fax: +49 (0)351.260 31 90

E-Mail: Matthias.Koehler@vkta.de

Internet: www.vkta.de

9. Literatur

Bundesamt für Strahlenschutz, Natürliche Radionuklide in Nahrungsmitteln, <http://www.bfs.de/de/ion/nahrungsmittel/nahrung.html>, 2012.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Jahresbericht 2012 „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“, Bonn, Juni 2014.

Beyermann, M., Bünger, T., Gehrcke, K. und Obrikat, D. (2009): Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland, BfS-SW-06/09, Salzgitter, 2009.

Birner, J., Mayr, C., Thomas, L., Schneider, M., Baumann, T., Winkler, A., Hydrochemie und Genese der tiefen Grundwässer im bayerischen Teil des süddeutschen Molassebeckens, Z. geol. Wiss., Berlin 39 (2011) 3/4, 291 - 308

Brasser, T.; Cannepin, R.; Feige, S.; Frieling, G.; Herbert, H.-J.; Heinen, C.; Strack, C. & Vieten, C. (2014): GeoSys. Systemanalyse der geothermalen Energieerzeugung ; Teil A: Synthesebericht, Teil B: Ausführliche Ergebnisdokumentation (CD-ROM). GRS, Bd. 316, II, 77 S, ISBN 978-3-939355-95-3, GRS: Köln [u.a.], 2014.

Degering, D., Fleischer, K., Köhler, M., Abfallrechtliche Gesichtspunkte bei der Deponierung von NORM-Abfällen aus Geothermieranlagen, Strahlenschutzpraxis 03/2014, 30 - 32.

Degering, D., Köhler, M., Verbundvorhaben: Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen - Teilprojekt: Mobilisierung und Ablagerungsprozesse natürlicher Radionuklide, BMU Förderkennzeichen 0329937C, Abschlussbericht 27.10.2010.

Degering, D., Köhler, M., Natürliche Radionuklide in Anlagen der Tiefen Geothermie Deutschlands - Herkunft und Auftreten, Strahlenschutzpraxis 03/2014, 4 - 9.

Feige, S., Radon in der Tiefen Geothermie - Ein Informationsträger unter Beobachtung, Strahlenschutzpraxis 03/2014, 33 - 35.

Dilling, J., Döring, J., Ebert, M., Mielcarek, J., Regensburg, S., Strahlenschutz in der Geothermieranlage des Deutschen Geoforschungszentrums (GFZ) Potsdam in Groß Schönebeck (Brandenburg), Strahlenschutzpraxis 03/2014, 15 - 19.

Gabriel, H.-J., Goroncy, I., Herrmann, J., Nies, H., Wedekind, C.: Messverfahren zur kontinuierlichen Überwachung der künstlichen Gesamt-Gamma-Aktivitätskonzentration im Meerwasser. D-γ-GESAMT-MWASS-01. Leitstelle D für Meerwasser, Meerschwebstoff und -sediment, Messanleitungen für die „Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“, Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 14 S., 2006.

Gellermann, R., Nickstadt, K., Radiologische Rahmenbedingungen für eine Entsorgung von Materialien der Geothermie auf Deponien, Strahlenschutzpraxis 03/2014, 23 - 29.

Haberlau, U., Entsorgung von Materialien aus der Tiefen Geothermie - Erfahrungen aus der behördlichen Praxis, Strahlenschutzpraxis 03/2014, 20 - 22.

IAEA (2014): The environmental behaviour of radium. Revised edition. Vienna: IAEA. Online verfügbar unter: www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs476_web.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2015.

Kemski, J.; Feige, S.; Ostwald, B.; Rüter, H. & Woith, H. (2013): Hintergrundpapier zum Edelgas Radon und seiner Bedeutung in der Geothermie. GtV-Bundesverband Geothermie.

Köhler, M., Degering, D., Fleischer, K., Steinbach, P., Brendler, V., Untersuchungen zum Umgang mit natürlicher Radioaktivität bei tiefer Geothermie, BMU Förderkennzeichen 0325166, Abschlussbericht 10.04.2013.

Köhler, M., Degering, D., Strahlenschutz in Anlagen der tiefen Geothermie, 42. Jahrestagung des Fachverbandes Strahlenschutz, Publikationsreihe FORTSCHRITTE IM STRAHALENSCHUTZ, FS-2010-153-T, ISSN 1013-4506, Köln TÜV Media 2010, 153 - 158.

Köhler, M., Degering, D., Strahlenschutz in ausgewählten Anlagen der Tiefen Geothermie Deutschlands - Ein Überblick, Strahlenschutzpraxis 03/2014, 10 - 14.

International Association of Oil & Gas Producers -OGP(2008): Guidelines for the management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the oil & gas industry. Report No. 412

Laane, R.W.P.M. : Background concentrations of natural compounds in rivers, sea water, atmosphere and mussels. Summary of the group reports written during the International Workshop on Background Concentrations of Natural Compounds held in The Hague, 6-10 April 1992. Report DGW-92.033

Reichelt, A. & Sitte, B. (2004): Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände. Forschungsvorhaben StSch 4386. Teil 3a Bergbauliche Hinterlassenschaften der Steinkohle-Gewinnung. BMU-2007-695.

Stober, I., Jodocy, M., Hydrochemie der Tiefenwässer im Oberrheingraben - Eine Basisinformation für geothermische Nutzungssysteme, Z. geol. Wiss., Berlin 39 (2011) 1, 39 - 57

UNSCEAR 2000, Report on the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, Sources and effects of ionizing radiation, Annex B: Exposures from natural radiation sources, 2000.

Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. Hannover, <http://www.erdöl-erdgas.de>, 2012.

Wolfgramm, M., Rauppach, K., Thorwart, K., Mineralneubildungen und Partikeltransport im Thermalwasserkreislauf geothermischer Anlagen Deutschlands, Z. geolog. Wiss., Berlin 39 (2011) 3/4, 213 - 239.

Wolfgramm, M., Thorwart, K., Rauppach, K., Brandes, J., Zusammensetzung, Herkunft und Genese geothermal Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken (NDB) und deren Relevanz für die geothermische Nutzung, Z. geol. Wiss., Berlin 39 (2011) 3/4, 173 - 193

Gesetzestexte und Richtlinien

Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens vom 30.September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (kurz: ADR) vom 18.August 1969 (BGBl 1969 II, S. 1489), geändert durch die 15. ADR-Änderungsverordnung vom 15. Juni 2001 (BGBl 2001 II, S. 654), zuletzt geändert durch die Anlage zur 16. ADR-Änderungsverordnung vom 14.Dezember 2002 (BGBl 2002 II, S. 2922 Anlageband).

Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 28 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist, Anlage 3.

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) v. 24.04.2013 (BGBl. I S. 212) , zuletzt geändert am 22.05.2013 (BGBl. I S. 1324)

Handelsübliche Lieferbedingungen für die Lieferung von unlegiertem Stahlschrott vom 01.05.2002. Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling-und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), Düsseldorf.

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. Richtline 2013/59/Euratom. Fassung vom 5. Dezember 2013, 06.02.2014.

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, [2002, 1459]), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793).

Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße und mit Eisenbahnen (Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahnen, kurz: GGVE) in der Fassung des Artikels 1 der GefÄndV2001 vom 11. Dezember 2001 (BGBl I, S. 3529, vom 17. Dezember 2001).