Strahlenschutz bei der Nutzbarmachung der geothermischen Energie

AUTOREN
Detlev Degering
Jörg Dilling
Joachim Döring
Monika Ebert
Sebastian Feige
Kerstin Fleischer
Rainer Gellermann
Ulrike Haberlau
P. Andrew Karam
Matthias Köhler
Jürgen Mielcarek
Kristin Nickstadt
Simona Regenspurg

DANK
Die Schriftleitung dankt ***Matthias Köhler*** und ***Detlev Degering*** für ihren Einsatz und ihre Mitarbeit bei der Planung und Gestaltung dieses Schwerpunkts. Sie kümmerten sich auch um die Auswahl und Zusammenstellung der Unterthemen und die Gewinnung und Betreuung der fachkundigen Autoren. Unser besonderer Dank gilt allen beteiligten Autoren für die tätige Bereitschaft zur Mitarbeit und für ihre kompetenten Beiträge.

ZUSAMMENFASSUNG
Die bei der Energiegewinnung mithilfe der Tiefen Geothermie notwendigen Strahlenschutzmaßnahmen werden beschrieben, und zwar zum einen bei Betrieb und Wartung in der Anlage selbst, zum anderen bei der fach- und gesetzesgerechten Entsorgung radioaktiven Abfallmaterials, der sogenannten „Scales".

SUMMARY
Radiation Protection When Gaining Geothermal Energy
The radiation protection measures are described that are necessary when gaining geothermal energy. This concerns on the one hand radiation protection during operation and servicing the installations themselves, on the other hand the competent transport and disposal of radioactive wastes, the so-called scales, according to the applying rules.

Tiefe Geothermie – Ein neues Arbeitsfeld des Strahlenschutzes

Bei der Nutzung der Tiefen Geothermie mit hochsalinen Fluiden (> 100 g l^{-1}) ab Fördertiefen von > 2.000 m können sich in den oberirdischen Anlagenteilen TENORM-Ablagerungen bilden, die natürliche Radionuklide (^{226}Ra, ^{210}Pb, ^{228}Ra und ^{228}Th) mit erhöhten spezifischen Aktivitäten von bis zu 3.000 Bq g^{-1} enthalten.
Aufgrund der Erfahrungen mit Mengen und spezifischen Aktivitäten in ausgewählten Anlagen des Norddeutschen Beckens und des Oberrheingrabens ergibt sich, dass die dort anfallenden Betriebsabfälle unter Berücksichtigung der StrlSchV beseitigt und die Strahlenexposition für die Beschäftigten abgeschätzt werden müssen. Insgesamt sind in Deutschland bisher 55 t radioaktiv belasteter Materialien mit einer beurteilungsrelevanten Gesamtaktivität von 10 GBq angefallen.
Die Tiefe Geothermie kommt in der StrlSchV bisher nicht explizit vor. Wie die deutsche Strahlenschutzgesetzgebung zukünftig den Umgang mit den Rückständen/Materialien aus der Geothermie regeln wird, ist noch nicht absehbar. Die aktuell vorliegende Richtlinie 2013/59/Euratom, umzusetzen in deutsches Recht bis 2018, nennt unter anderem die „Gewinnung geothermischer Energie" als einen bzgl. der Exposition durch natürlich vorkommende radioaktive Materialien zu prüfenden Industriezweig. Das Dosiskriterium hierfür ist nach wie vor eine effektive Dosis von 1 mSv/a. Das Schwerpunktthema „Strahlenschutz bei der Nutzbarmachung der geothermischen Energie" fasst daher den gegenwärtigen Kenntnisstand in diesem für den Strahlenschutz neuen Arbeitsfeld zusammen.

Natürliche Radionuklide in Anlagen der Tiefen Geothermie Deutschlands – Herkunft und Auftreten

Geothermieanlagen nutzen zwei praktisch unerschöpfliche Energiereservoire. Dies ist zum einen der Wärmefluss aus Erdmantel und -kern, der ursprünglich aus dem gravitativen Prozess der Planetenbildung vor ca. 4,7 Milliarden Jahren herrührt. Die andere Quelle ist die kontinuierliche Wärmeproduktion als Folge von Zerfallsprozessen der natürlichen Radionuklide in der Erdkruste. In der Summe ergibt sich ein Wärmefluss durch die Erdoberfläche in der Größenordnung von mehreren 10^{13} W [1], von denen 50 bis 70 % aus radioaktiven Zerfällen gespeist werden. Seine Konstanz bedingt die Attraktivität der Nutzung geothermischer Energie als grundlastfähige Energieerzeugung gegenüber anderen diskontinuierlichen Trägern erneuerbarer Energien.

Fluide der Tiefen Geothermie

Als Resultat des Wärmeflusses steigt die Temperatur in der Erdkruste im Mittel um 30 bis 40 °C je km Tiefe. Der Bereich bis maximal 400 m Tiefe bei Temperaturen bis max. 25 °C wird durch die oberflächennahe Geothermie hauptsächlich für die Klimatisierung von Einzelgebäuden genutzt. Eine effektive Nutzung für die Produktion elektrischer Energie bzw. für die direkte Einspeisung in Fernwärmenetze erfordert jedoch Temperaturen > 100 °C, die in den sogenannten Niederenthalpie-Lagerstätten Deutschlands erst ab etwa 3 Kilometer Tiefe angetroffen werden.

Temperaturen > 100 °C erforderlich

Voraussetzung für den Transfer geothermischer Energie aus Tiefen von einigen Kilometern zur Erdoberfläche ist das Vorliegen eines Fluids als Transportmedium. Ein hohes geothermisches Potenzial haben daher geologische Formationen mit einem großen Anteil an Fluidvolumen sowie einem guten hydraulischen Transportverhalten. Beispiele dafür sind Aquifere in porösen Sandsteinformationen. Bei nicht ausreichender Wasserwegsamkeit werden durch hydraulische bzw. chemische Stimulationsmaßnahmen künstliche Fließwege zur Verbesserung der Aquifereigenschaften geschaffen (Enhanced Geothermal Systems – EGS). Neben porösen Formationen kann auch die Wärme des kristallinen Festgesteins genutzt werden, die Wasserführung erfolgt dort über vorhandene bzw. stimulierte Kluftsysteme.

„Thermischen Kurzschluss" vermeiden

In Abbildung 1 ist das Funktionsschema einer Anlage der Tiefen Geothermie dargestellt. Aus einem porösen Aquifer wird heißes Wasser bei Fließraten > 50 l/s in der Förderbohrung gepumpt und – nachdem über

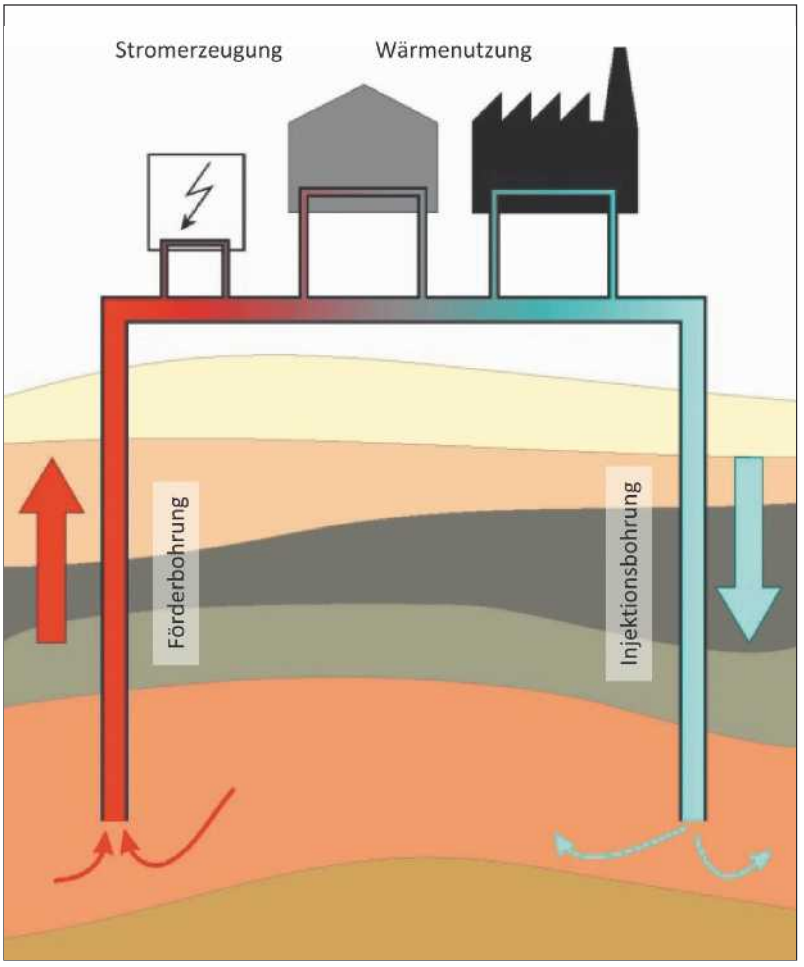

Abb. 1: Schema einer Anlage der Tiefen Geothermie; nach [2], ergänzt

Wärmetauscher die Energie für Stromerzeugung bzw. Heizzwecke entnommen wurde – das abgekühlte Wasser in einer Injektionsbohrung wieder verpresst (geothermische Dublette). Im Aquifer beträgt die Entfernung der Bohrungen einige Kilometer, sodass ein „thermischer Kurzschluss" der Dublette vermieden wird.

Regionen in Deutschland, die für die Nutzung der Tiefen Geothermie geeignete geologische Formationen aufweisen, sind in Abbildung 2 dargestellt.

Geologisch gesehen werden im Norddeutschen Becken vorrangig Sandsteinformationen des Trias und des Jura genutzt, von geringerer Bedeutung sind Sedimente des Perms und der Kreide. Im Oberrheingraben liegt der Schwerpunkt auf der Nutzung von stimulierbaren Formationen des Trias, während im Molassebecken im Wesentlichen der Malm (Oberer Jura) als Nutzaquifer dient [4]. Dementsprechend unterschiedlich stellt sich die Geochemie der geförderten Fluide dar. Tiefenwässer des Norddeutschen Beckens sind hauptsächlich hochsaline, Natrium-Kalzium-Chlorid-dominierte Fluide mit Salinitäten im Bereich 10 bis 330 g/l [5]. Ein hoher Mineralisationsgrad ist ebenfalls für die Wässer des Oberrheingrabens typisch. Hier werden für Natrium-Kalium-Kalzium-Chlorid-Tiefenfluide Salinitäten im Bereich 10 bis 130 g/l erreicht [6]. Dagegen weisen die Wässer des Molassebeckens durchweg geringe Gesamtmineralgehalte von 0,4 bis 12 g/l auf [7].

Die Wärme des kristallinen Festgesteins wird in Deutschland noch nicht genutzt. Als Modellsystem dafür kann die EGS-Anlage im elsässischen Soultz-sous-Forêts dienen, deren Thermalwasser aus stark geklüftetem Granit gefördert wird. Das Fluid ähnelt in seiner Zusammensetzung den salinen Tiefenwässern des Oberrheingrabens. Da generell in Wässern des tiefen Kristallins erhöhte Salinitäten nachgewiesen wurden [8], ist es sehr sinnvoll, die Erkenntnisse über hochmineralisierte Fluide auch auf zukünftige vergleichbare Anlagen in Deutschland zu übertragen.

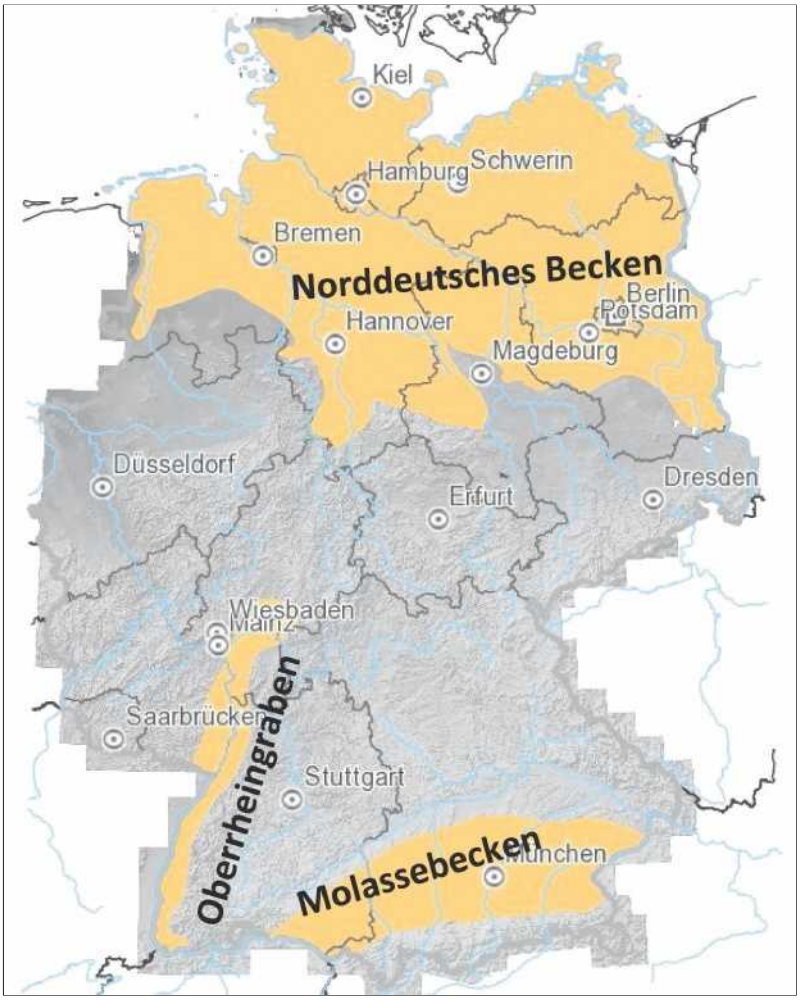

Abb. 2: Regionen in Deutschland mit erhöhtem geothermischen Potenzial; nach [3]

Natürliche Radionuklide in Geothermiefluiden

Betrachtet man die Aktivitätskonzentrationen der charakteristischen Radium-Isotope ^{226}Ra und ^{228}Ra in Fluiden aus Geothermieanlagen (Abb. 3), so erkennt man deutlich eine Beziehung zum Chemismus der Wässer.

Die salinen Wässer des Norddeutschen Beckens und des Oberrheingrabens weisen um Größenordnungen höhere Radium-Gehalte auf als die gering mineralisierten des Molassebeckens. Dabei entsprechen die Isotopenverhältnisse der erstgenannten Wässer dem durch die Zerfallsreihen vorgegebenen Muster, während im Malmkalkstein eine ^{226}Ra-Anreicherung auftritt.

In diesem Beitrag wird auf eine detaillierte Beschreibung der Radionuklidgehalte in Malmwässern verzichtet, da dort keine strahlenschutzrelevanten Fragestellungen auftreten.

Abbildung 4 zeigt die für saline Geothermiewässer typische Radionuklidzusammensetzung, hier am Beispiel des Fluids der Anlage Neustadt-Glewe.

Höherer Radium-Gehalt in salinen Wässern

Das Isotopenmuster ist durch starke radioaktive Ungleichgewichte gekennzeichnet, die auf die Spannbreite der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Glieder der natürlichen Zerfallsreihen zurückzuführen sind. Die höchste Löslichkeit wird für die Radium-Isotope ^{226}Ra, ^{228}Ra und ^{224}Ra erreicht, deren Akti-

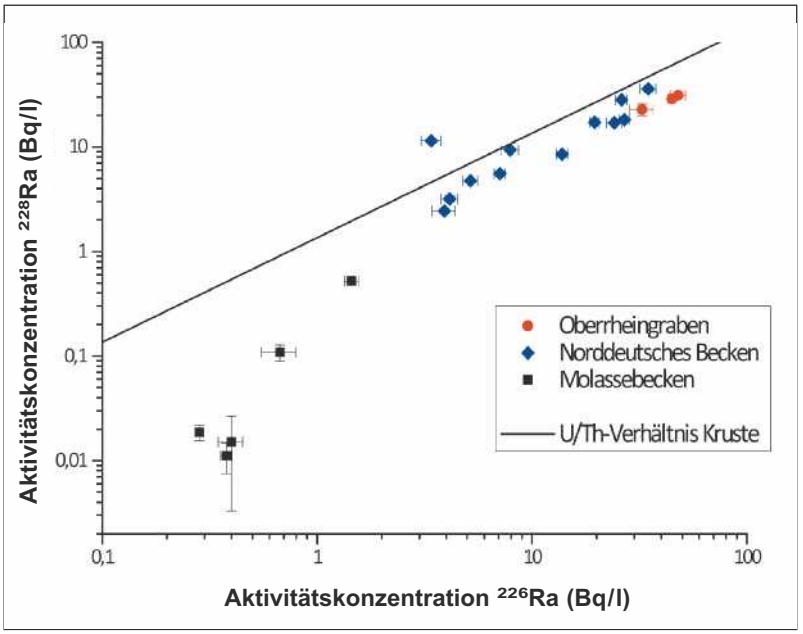

Abb. 3: Aktivitätskonzentrationen von ^{226}Ra und ^{228}Ra in Fluiden von Geothermieanlagen. Die durchgezogene Linie entspricht dem mittleren Aktivitätsverhältnis zwischen der ^{238}U- und der ^{232}Th-Zerfallsreihe in der Erdkruste.

vität nicht durch ihre Mutternuklide unterstützt wird. Infolge des natürlichen Aktivitätsverhältnisses von 21,7 zwischen der ^{238}U- und der ^{235}U-Zerfallsreihe liegt das der ^{235}U-Reihe zuzuordnende ^{223}Ra unterhalb der Nachweisgrenze. Kurzlebige Tochternuklide wie ^{228}Ac und ^{212}Pb werden während der Wasserförderung aus den langlebigen Mutternukliden gebildet. Weiterhin wurden im Fluid ^{210}Pb und ^{210}Po sowie das den Kalium-Gehalt repräsentierende ^{40}K nachgewiesen. Alle Isotope des Urans und Thoriums liegen unterhalb der Nachweisgrenze. Das auftretende radioaktive Ungleichgewicht ist von komplexer Natur und stark zeitabhängig, sodass für eine korrekte Berechnung der Radionuklidgehalte zum Probenahmezeitpunkt ein auf mathematischen Modellen basierendes Messprogramm erforderlich ist [10].

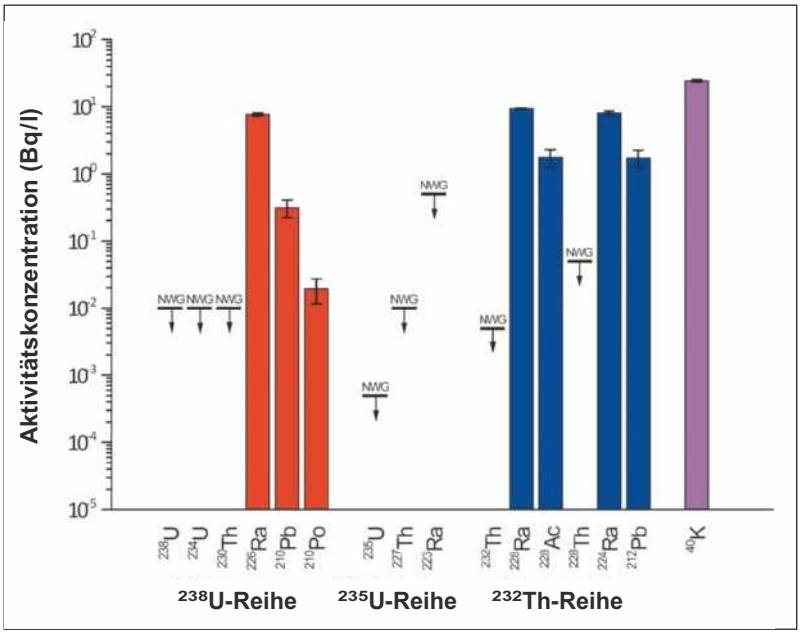

Abb. 4: Radionuklidzusammensetzung des Fluids aus der Geothermieanlage Neustadt-Glewe zum Zeitpunkt der Förderung [9]; „NWG" bezeichnet die Nachweisgrenze des Analyseverfahrens.

Die gemessenen Wertebereiche der Konzentrationen ausgewählter Radionuklide in Wässern der Tiefen Geothermie sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Sichtbar werden noch einmal die deutlichen Unterschiede zwischen Norddeutschem Becken und Oberrheingraben auf der einen Seite und dem Molassebecken auf der anderen. Vergleichbare Nuklidkonzentrationen können auch in stark mineralisierten balneologisch genutzten Thermalwässern beobachtet werden.

Alpha-Rückstoß in Mineralkörnern

Als der für die Radionuklidfreisetzung hauptsächlich verantwortliche Prozess wird der Alpha-Rückstoß in Mineralkörnern des Aquifergesteins angesehen. Dabei erhält der Produktkern des Alpha-Zerfalls aufgrund der Impulserhaltung eine kinetische Energie, die zu seiner Verschiebung innerhalb des Kristallgitters um einige 10 nm führt. An Mineraloberflächen können die Rückstoßkerne über diesen Prozess in das Fluid eintreten. Unter den geochemischen Bedingungen des Aquifers sind dann Uran und Thorium nur gering löslich, während in Verbindung mit der erhöhten Chlorid-Konzentration Radium dauerhaft im Thermalwasser verbleibt [11, 12]. Im Rahmen dieses Modells besteht eine enge Korrelation zwischen dem U/Th-Verhältnis im Quellgestein und dem ^{226}Ra/^{228}Ra-Verhältnis im Wasser. Für die Größe der Radium-Konzentration in Lösung ist neben Uran- und Thorium-Gehalt des Gesteins auch seine spezifische Oberfläche verantwortlich. Für den Aquifer der Geothermieanlage Neustadt-Glewe konnte über dieses Modell sowohl die absolute Konzentration der Radium-Isotope als auch deren

Zerfallsreihe	Radionuklid	Aktivitätskonzentration (Bq/l)		
		Norddeutsches Becken	Oberrheingraben	Molassebecken
^{238}U	^{226}Ra	3 ... 35	33 ... 48	0,3 ... 1,5
	^{210}Pb	< 2 ... 160	8 ... 19	< 0,1
^{232}Th	^{228}Ra	2 ... 35	23 ... 31	0,02 ... 0,5
	^{224}Ra	3 ... 21	16 ... 21	< 0,02 ... 0,3
–	^{40}K	6 ... 250	100 ... 130	0,5 ... 0,9

Tab. 1: Wertebereiche ausgewählter Radionuklidkonzentrationen in Geothermiewässern zum Zeitpunkt der Probenahme am Bohrungskopf

Aktivitätsverhältnis befriedigend erklärt werden [9]. Das ebenfalls auftretende ^{210}Pb ist dagegen eher als Zerfallsprodukt von gelöstem ^{222}Rn anzusehen.

Verbleib der Radionuklide

Anlagen der Tiefen Geothermie entsprechend Abbildung 1 stellen im Allgemeinen geschlossene Kreislaufsysteme dar. Die Veränderung der thermodynamischen Fluidparameter Temperatur und Druck sowie der Kontakt mit Anlagenkomponenten führt jedoch dazu, dass ein geringer Teil der Inhaltsstoffe Sekundärminerale bildet, die in der Anlage verbleiben.

Diese Bildung fester Niederschläge, sogenannter „Scales", tritt vorrangig in Anlagen auf, die stark mineralisierte Wässer führen. Insbesondere im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben muss daher mit Scale-Bildung in Anlagenkomponenten gerechnet werden. Dies betrifft vorrangig Wärmetauscher sowie Installationen auf der „kalten" Seite vor der Injektionsbohrung. Diese Niederschläge sind vergleichbar mit Ablagerungen, die in Förderanlagen der Erdöl-/Erdgasindustrie beobachtet werden.

Bildung fester Niederschläge

Strahlenschutzrelevant sind zwei häufig auftretende mineralogische Hauptphasen in den Scales saliner Geothermiewässer [13, 14]: eine Ba/$SrSO_4$-Mischphase mit deutlich ausgebildeten Baryt/Coelestin-Mischkristalliten sowie eine sulfidhaltige Phase. Letztere wurde in Scales des Norddeutschen Beckens als gut ausgebildete Galenit-(PbS)-Kristallite beobachtet, während im Oberrheingraben röntgenamorphe nanokristalline (Pb, Cu, Sb, As)-Mischsulfide auftraten. Die Bedeutung dieser Phasen für den Verbleib von Radionukliden aus der Lösung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Entsprechend diesem Modell akkumulieren die Sulfat-Phasen aufgrund der chemischen Analogie von Ba, Sr und Ra die Radium-Isotope ^{226}Ra, ^{228}Ra und ^{224}Ra. Während ^{224}Ra anfänglich mit einer Halbwertszeit von 3,6 d zerfällt, wird über den Zerfall des ^{228}Ra im Zeitbereich von Jahren das Tochternuklid ^{228}Th mit seinen Folgeprodukten nachgebildet. In der Nomenklatur der Strahlenschutzverordnung enthalten die Sulfat-Phasen demnach die Radionuklide ^{226+}Ra, ^{228+}Ra und ^{228+}Th, wobei für Berechnungen häufig vereinfachend von einem Gleichgewicht ^{228+}Ra = ^{228+}Th ausgegangen wird. Aufgrund seiner im Vergleich zu ^{226}Ra deutlich geringeren

Anzeige

HelmholtzZentrum münchen
Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

Strahlenschutzkurse im technischen Bereich:

Grundlagenkurs nach RöV (Modul RM) für FK-Gruppe R3: 15.06.2015 und als **Internet-Fernkurs** mehrmals im Jahr

Grundlagenkurs nach StrlSchV für Fachkundegruppen mit geringem Anforderungsniveau (Modul GG) für FK-Gruppen S1.x, S2.1 und S6.1: 11.-12.11.2014, 03.-04.03.2015, 10.-11.11.2015

Grundlagenkurs nach StrlSchV für Fachkundegruppen mit erhöhtem Anforderungsniveau (Modul GH) für FK-Gruppe S2.2 (schließt auch S1.x, S2.1 und S6.1 mit ein): 22.-24.09.2014, 23.-25.03.2015, 21.-23.09.2015

Kurs für den Umgang mit offenen und umschlossenen radioaktiven Stoffen (Module GH und OG) für FK-Gruppe S4.1 (schließt auch S1.x, S2.1, S2.2, S5 und S6.1 mit ein): 22.-26.09.2014, 23.-27.03.2015, 21.-25.09.2015

Kurs für genehmigungsbedürftige Beschäftigung in fremden Anlagen oder Einrichtungen (Module GG und FA) für FK-Gruppe S5 (schließt auch S1.x, S2.1 und S6.1 mit ein): 11.-13.11.2014, 03.-05.03.2015, 10.-12.11.2015

Fachkunde-Aktualisierung für FK-Gruppen nach StrlSchV: S1.x, S2.x, S3.x, S4.x, S5 und S6.1: 16.09.2014, 24.11.2014, 02.02.2015, 11.05.2015, 15.09.2015

Fachkunde-Aktualisierung für FK-Gruppen nach RöV: R1 bis R5, R7, R8 und R10: 17.11.2014, 09.03.2015, 06.07.2015, 16.11.2015

Weitere Informationen sowie unsere Kurse im medizinischen Bereich finden Sie auf unseren Internet-Seiten:
http://www.helmholtz-muenchen.de/kurse

Helmholtz Zentrum München
Institut für Strahlenschutz, Kursorganisation
Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg (bei München)

Tel.: 089 / 3187 4040 Fax: 089 / 3187 1684
E-Mail: strahlenschutzkurse@helmholtz-muenchen.de

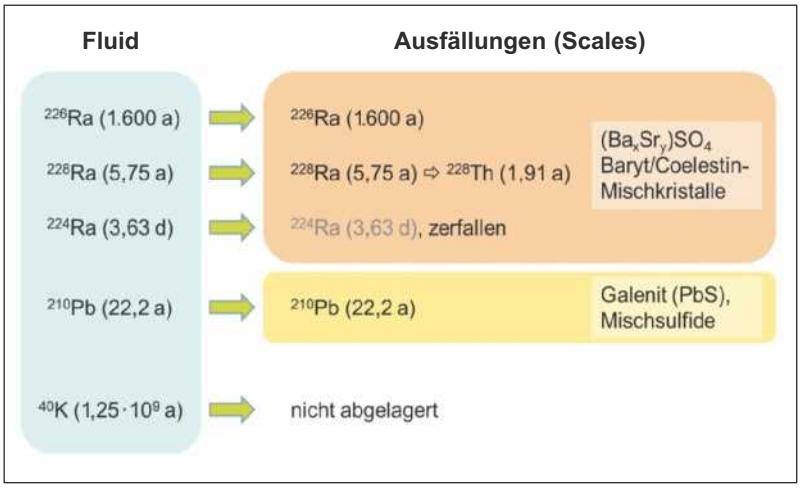

Abb. 5: Akkumulation von Radionukliden aus den Geothermiefluiden in den Hauptphasen der Anlagen-Scales

Aktivität wird ^{223}Ra auch hier vernachlässigt.

Die Sulfid-Phasen akkumulieren demgegenüber das mit dem inaktiven Blei chemisch identische Nuklid ^{210}Pb. Im Zeitverlauf bildet sich auch hier ein Gleichgewicht mit den Töchtern, d. h. $^{210++}$Pb, heraus.

Aus der Sicht des Strahlenschutzes können die deponierten natürlichen Radionuklide aufgrund ihrer Strahlungseigenschaften (Tab. 2) zu praktisch allen Expositionspfaden beitragen. Dabei ist zu beachten, dass für die externe Dosisexposition neben der γ-Strahlungskomponente auch die Bremsstrahlungsproduktion von Radionukliden mit hohen $E_{\beta,\,max}$ zu berücksichtigen ist (vgl. dazu [16]). Ein typisches Beispiel dafür ist $^{210++}$Pb, das außerhalb von technischen Anlagen praktisch nicht über seine schwache niederenergetische γ-Linie (E_γ = 47 keV, 4,3 %), sondern nur über das intensive Bremsstrahlungsspektrum des ^{210}Bi Beiträge zum Strahlungsfeld in einer Anlage liefert.

Radionuklid	α-Energie E_α/MeV	β-Maximalenergie $E_{\beta,max}$/MeV	γ-Energie E_γ/keV
$^{226+}$Ra	4,78 (^{226}Ra) 5,49 (^{222}Rn) 6,00 (^{218}Po) 7,69 (^{214}Po)	1,02 (^{214}Pb) 3,27 (^{214}Bi)	295, 352 (^{214}Pb) 609, 1.120, 1.764 (^{214}Bi)
$^{228+}$Ra	–	0,05 (^{228}Ra) 2,12 (^{228}Ac)	911, 969 (^{228}Ac)
$^{228+}$Th	5,42 (^{228}Th) 5,69 (^{224}Ra) 6,29 (^{220}Rn) 6,78 (^{216}Po) 6,05 (^{212}Bi) 8,79 (^{212}Po)	0,57 (^{212}Pb) 2,25 (^{212}Bi) 5,00 (^{208}Tl)	239 (^{212}Pb) 583, 2.614 (^{208}Tl)
$^{210++}$Pb	5,30 (^{210}Po)	0,06 (^{210}Pb) 1,16 (^{210}Bi)	–

Tab. 2: Zusammenstellung typischer Energien, die beim Zerfall der in Scales auftretenden natürlichen Radionuklide auftreten. Für die α-Umwandlung wurde jeweils die intensivste Linie angegeben; die aufgeführten γ-Linien besitzen Energien E_γ > 100 keV und Emissionswahrscheinlichkeiten > 15 %; Daten nach [15]

Die spezifischen Aktivitäten der Ablagerungen bzw. des kontaminierten Materials aus den Anlagen überstreichen dabei einen weiten Bereich. In Tabelle 3 sind Analyseergebnisse zusammengestellt, die aus 180 Proben aus dem Norddeutschen Becken bzw. 114 Proben aus dem Oberrheingraben gewonnen wurden. Dabei werden Maximalwerte von einigen 100 Bq/g für die Radium-Isotope bzw. einigen 1.000 Bq/g für ^{210}Pb erreicht. Im Gegensatz dazu konnten an Scale-Proben aus dem Molassebecken keine erhöhten Werte der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide festgestellt werden [13]. Die Ablagerungen aus hochmineralisierten Fluiden weisen dabei eine gute Korrelation zwischen ^{226}Ra und ^{228}Ra auf, die der Korrelation in den Geothermiewässern entspricht (Abb. 3).

Maximal einige 1.000 Bq/g für ^{210}Pb

Dagegen fehlt diese Korrelation zwischen ^{226}Ra und ^{210}Pb vollständig (Abb. 6). Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Ablagerungsprozesse der dazugehörigen Mineralphasen unabhängig voneinander verlaufen. Als Bildungs-

Der etwas andere Kommentar, heute zum Thema: Geothermie und Radioaktivität I

In den Wässern der Tiefe gibt's leider
auch Schmutz,
der ist radioaktiv, drum braucht's
Strahlenschutz.
Kompetente Experten müssen da ran,
denn nur so und nur dann
bringt die Geothermie den erstrebten Nutz.

Rupprecht Maushart, Straubenhardt

		Spezifische Aktivität (Bq/g)		
		^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb
Nord-deutsches Becken	Minimum	0,009	0,008	0,013
	Maximum	430	300	770
	Median	**38**	**41**	**170**
Oberrhein-graben	Minimum	0,009	0,008	0,013
	Maximum	770	430	5.500
	Median	**34**	**18**	**500**

Tab. 3: Spezifische Aktivitäten natürlicher Radionuklide in Proben von Ablagerungen bzw. von kontaminiertem Material aus Anlagen der Tiefen Geothermie in Deutschland [13]

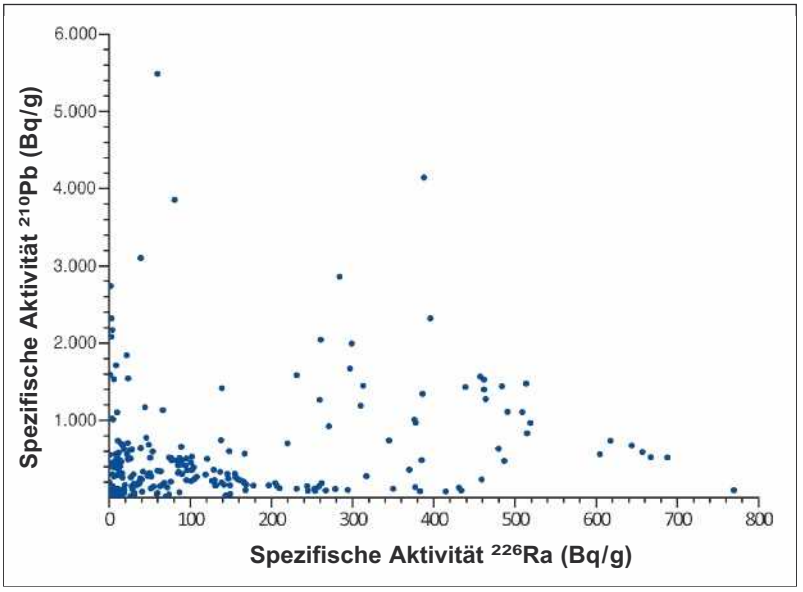

Abb. 6: Spezifische Aktivitäten von ^{226}Ra und ^{210}Pb in Proben von Ablagerungen bzw. von kontaminiertem Material aus Anlagen der Tiefen Geothermie in Deutschland (n = 294)

mechanismus der Ba/Sr-Sulfat-Phasen wird allgemein die Übersättigung der abgekühlten und entspannten Lösung bezüglich dieser Inhaltsstoffe angesehen, während die Bildung der Sulfid-Phasen auf elektrochemische Prozesse zurückgeführt wird.

Die Menge der abgelagerten Aktivität stellt jedoch insgesamt nur einen Bruchteil des Gesamtumsatzes dar. Wie eine Bilanz für die Anlage Neustadt-Glewe zeigte [9], passierte im Zeitraum 1994 bis 2008 eine Gesamtfördermenge von $7{,}4 \cdot 10^6$ m^3 die Anlage. Dies entspricht pro Radionuklid einer transportierten Gesamtaktivität in der Größenordnung von 10^{10} Bq. Der in Ablagerungen oberirdisch verbleibende Aktivitätsanteil lag dabei bei $< 10^{-3}$. Im Gegensatz zu anderen NORM-produzierenden Industrien verbleibt somit in der Tiefen Geothermie die überwiegende Aktivitätsmenge in der unterirdischen Lagerstätte.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit für die Förderung durch 2 Projekte (FKZ 0329937C bzw. 0325166), in deren Rahmen ein Großteil der vorgestellten Ergebnisse gewonnen wurden.

Detlev Degering, Matthias Köhler ❑

Anzeige

TÜV SÜD
Mehr Sicherheit.
Mehr Wert.

Strahlenschutz in Medizin, Forschung und Industrie

Tagung
9.–10. Dezember 2014
in Dresden

Informieren Sie sich über die neuesten Entwicklungen und aktualisieren Sie Ihre Fachkunde auf unserer diesjährigen Tagung in Dresden.

Themen der Tagung
- Gesetzliche Grundlagen, Regelwerk und Normen
- Strahlenschutz in Forschung und Industrie
- Strahlenschutz in der Praxis
- Strahlenschutzaspekte in der Medizin
- Exkursion: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

Veranstaltungspreis
780,00 € zzgl. gesetzlicher USt.
420,00 € für Vertreter von Aufsichts- und Genehmigungsbehörden.

Anmeldung und Auskünfte
TÜV SÜD Akademie GmbH
Tagungen und Kongresse
Viktoria Wolter
Telefon +49 89 5791-2410
congress@tuev-sued.de
www.tuev-sued.de/tagungen
TÜV®

Strahlenschutz in ausgewählten Anlagen der Tiefen Geothermie – Ein Überblick

Die Besonderheit des Strahlenschutzes bei natürlicher Radioaktivität mit erhöhten spezifischen Aktivitäten (TENORM) besteht darin, dass der Gesetzgeber diese Regelungen in StrlSchV [1], Anlage XI, Teil B auf explizit genannte Arbeitsfelder mit erhöhten Expositionen durch Uran, Thorium und deren Zerfallsprodukte ohne Radon begrenzt hat. Mit dieser Einschränkung soll eine Ausweitung der gesetzlichen Regelungen auf radiologisch unbedenkliche Arbeitsfelder vermieden werden. Die Tiefe Geothermie ist gegenwärtig als Arbeitsfeld in der StrlSchV nicht aufgenommen, sodass vorerst keine formale Notwendigkeit besteht, nach § 95 (1) StrlSchV die Strahlenexposition für die Beschäftigten abzuschätzen. Ähnliches wie für die Arbeitsfelder gilt für die Betriebsabfälle aus der Tiefen Geothermie, die in der Liste der nach StrlSchV zu berücksichtigenden Rückstände (Anlage XII, Teil A) nicht enthalten sind.

Dennoch ist es aus Sicht der Autoren erforderlich, aufgrund der Mengen und spezifischen Aktivitäten in ausgewählten Anlagen der Tiefen Geothermie des Norddeutschen Beckens und des Oberrheingrabens die Strahlenexposition für die Beschäftigten auch ohne explizite behördliche Aufforderung abzuschätzen und die dort anfallenden Betriebsabfälle unter Berücksichtigung der StrlSchV zu beseitigen.

Strahlenexposition für Beschäftigte

Normalbetrieb

Im Normalbetrieb einer geothermischen Anlage erfolgt eine Strahlenexposition von Beschäftigten ausschließlich durch die äußere Strahlung, die durch radioaktive Ablagerungen an den Innenseiten von Anlageteilen emittiert wird und die die Rohrwandungen leicht durchdringt. Erhöhte Werte treten bevorzugt in der Nähe von Wärmetauschern auf, weil sich dort aufgrund der signifikanten Temperaturdifferenz und der großen Oberflächen die meisten Fällungsprozesse vollziehen und somit ein Großteil der radioaktiven Scales abgelagert wird. Dort konnten maximale Umgebungs-Äquivalentdosisleistungen $\dot{H}^*(10)$ im Abstand von 1 m von 12 µSv h^{-1} festgestellt werden.

Tiefe Geothermie kein Arbeitsfeld in StrlSchV

Arbeiten an geöffneten Anlageteilen

Bei allen Arbeiten an geöffneten Anlageteilen wie z. B. Filterwechsel, Austausch von Rohrleitungen sowie Öffnen von Wärmetauschern besteht zusätzlich zu der Strahlenexposition durch γ-Strahlung (hier auch in einem geringeren Abstand als beim Normalbetrieb) eine erhöhte Ingestions- bzw. Inhalationswahrscheinlichkeit. In der Regel erfolgen diese Arbeiten jedoch am feuchten Material, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung gegenüber dem Umgang im trockenen Zustand deutlich geringer ist. Durch einfache Maßnahmen aus dem Repertoire des Arbeitsschutzes wie z. B. Tragen von Schutzhandschuhen bzw. eines Mundschutzes, die ohnehin durch den Gehalt an Schwermetallen in den Umgangsstoffen notwendig sind, kann eine Strahlenexposition deutlich reduziert werden.

Radiologisches Risiko aus Unkenntnis

Ein Expositionsrisiko durch das Einatmen von ^{222}Rn konnte bei gemessenen Aktivitätskonzentrationen in der Luft von 50 bis 100 Bq m^{-3} nicht festgestellt werden.

Generell besteht bei derartigen Arbeiten das Risiko, dass aus Unkenntnis mögliche radiologische Gefahren nicht erkannt und somit auch keine Maß-

	E_E	$E_{inh+ing}$	E	E_E
	(mSv)	(mSv)	(mSv)	Anteil
Anlage Norddeutsches Becken	0,89	0,56	**1,5**	61 %
Anlage Oberrheingraben	1,1	0,60	**1,7**	65 %
	2,6	0,40	**3,0**	87 %
Prüfwert	–	–	6,0	–
Natürliche Strahlenquellen	0,70	1,4	2,1	33 %

Tab. 1: Beispiele für Expositionsabschätzungen (effektive Dosis E durch äußere Strahlung E_E und Inhalation und Ingestion $E_{inh+ing}$) für Beschäftigte in ausgewählten Anlagen der Tiefen Geothermie Deutschlands und Vergleich mit der mittleren Strahlenexposition durch natürliche Strahlenquellen

Prinzip	StrlSchV	StrlSchV, Anlage III, Tabelle 1	$^{226+}$Ra	$^{210++}$Pb	$^{228+}$Ra	$^{228+}$Th
			(Bq cm^{-2})			
Eingeschränkte Freigabe von Gebäuden zum Abriss	Teil 2	Spalte 10	0,9	–	4,0	3,0
Uneingeschränkte Freigabe von Gebäuden	Teil 2	Spalte 8	0,5	1,0	0,4	0,1
§ 44, außerhalb eines Strahlenschutzbereiches	Teil 2	Spalte 4	1,0	1,0	1,0	0,1
Vorschlag der Autoren	Teil 3	–	**20**	**20**	**20**	**2**

Tab. 2: Vorschlag zur Etablierung flächenbezogener Grenzwerte zur Nutzung als Richtwert für die Dekontamination von Bodenflächen und Platten-Wärmetauschern

nahmen zur Minderung ergriffen werden. Deshalb müssen alle mit Arbeiten an geöffneten Anlageteilen Beschäftigten (auch von Nachauftragnehmern) rechtzeitig über die Gefahrenpotenziale und die notwendigen Schutzmaßnahmen umfassend aufgeklärt werden. Beschäftigte in ausgewählten geothermischen Anlagen können einer zusätzlichen Strahlenexposition ausgesetzt werden, deren effektive Dosis im Jahr nicht größer als 3,0 mSv ist (Tab. 1). Alle Werte wurden anhand der angegebenen Expositionszeiten und recherchierten Expositionsszenarien (siehe auch [2]) sehr konservativ abgeschätzt. Es wird deutlich, dass der Hauptteil (ca. 60–85 %) durch den Expositionspfad „äußere Exposition durch γ-Strahlung" hervorgerufen wird. Die effektive Dosis für die Beschäftigten der Geothermieanlagen ist im Kalenderjahr kleiner als 6 mSv, damit sind die Arbeiten gegenüber der Behörde nach § 95 StrlSchV nicht anzeigebedürftig.

Unkontrollierte Verschleppung von Aktivität

Mit den zukünftigen neuen EU-Strahlenschutz-Grundnormen wird sich bei der Bewertung der hier abgeschätzten beruflichen Strahlenexposition eine neue Sichtweise etablieren.

Bewertung von Bodenkontaminationen

Bei Reinigungs-, Reparatur- und Umbauarbeiten besteht die Gefahr, dass Scales unkontrolliert auf Bodenflächen gelangen und sich dort akkumulieren. Das Gefahrenpotenzial besteht in der unkontrollierten Verschleppung von Aktivität und in der Generierung von Altlasten, die erst beim Rückbau von Anlagen zum Tragen kommen.

Die StrlSchV macht keine klaren Vorgaben, bei welcher Oberflächenkontamination das dem Regelungsbereich zugrunde liegende 1-mSv-Kriterium eingehalten wird.

Die dort genannten flächenbezogenen nuklidspezifischen Grenzwerte (z. B. 0,1 Bq cm^{-2} für $^{228+}$Th) basieren auf einer tolerierbaren Dosis von einigen 10 µSv und sind für den hier relevanten Umgang mit natürlicher Radioaktivität um einen Faktor 100 zu konservativ.

Das Fehlen entsprechender flächenbezogener Grenzwerte zur Anwendung in der Geothermie wurde durch die Autoren thematisiert (u. a. [3]), jedoch konnte bisher noch keine Vereinbarung erreicht werden. Ein entsprechender Vorschlag ist in Tabelle 2 zusammengefasst, wobei ein Faktor 20 beim Übergang von den flächenbezogenen Grenzwerten aus dem kerntechnischen Bereich (akzeptierbare Exposition von einigen 10 µSv = 50 µSv) zum Regelungsbereich der natürlichen Radioaktivität (akzeptierbare Exposition von 1.000 µSv) Verwendung findet. Die vorgeschlagenen flächenbezogenen Grenzwerte können auch als Zielwerte für die Dekontamination von Wärmetauscher-Oberflächen dienen.

Anzeige

HOCHSCHULE HANNOVER
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES AND ARTS
Zentrum für Studium und Weiterbildung

Seminare zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

Endlagerung radioaktiver Abfälle - Grundlagen, Produktkontrolle, Dokumentation
Vermittlung der Fachkenntnisse zur Erstellung einer Endlagerdokumentation
13. - 17.10.2014
1560 € zzgl. USt.

Endlagerung am Beispiel Schacht Konrad
Ein Tag Theorie + ein Tag Exkursion zur Schachtanlage
16. - 17.09.2014
650 € zzgl. USt.

Information:
0511/9296-3321 u. 3320
(Herr Pehl / Frau Badenhop)
weiterbildung@hs-hannover.de
www.hs-hannover.de/zwt

	Kategorie	Verfahrensbedingte Verbindung der Scales mit	Masse (t)	*a* (Bq g^{-1})	*A* (Bq)	Beseitigungsweg
Geothermie	Scale-artig	Strahlgut aus Reinigungsarbeiten, Boden	15	1.200	10^{10}	Deponierung
	brennbar	Abdeckfolien, Schutzmitteln, Filtersäcken	10	200	10^{9}	Verbrennung
	Schrott	Rohrwandung	30	2,0	10^{7}	Einschmelzen
	Summe		55	200	10^{10}	–
Erdöl/ Erdgas	Schrott und Produktionsrückstände		340	40	10^{10}	Deponierung, Einschmelzen

Tab. 3: Durch Nutzung der Tiefen Geothermie im Zeitraum von 2000 bis 2012 in Deutschland angefallene TENORM-Rückstände und Vergleich mit der jährlichen Abfallmenge aus der Erdöl-Erdgas-Industrie [5];
***a*: nach StrlSchV beurteilungsrelevante spezifische Aktivität, *A*: aus a berechnete Aktivität**

Beseitigung von Betriebsabfällen

Materialkategorien und -bilanzen

Wie die durch die Autoren durchgeführte Erhebung der deutschlandweit zu entsorgenden TENORM-Materialien aus der Tiefen Geothermie zeigt [4], sind bisher 55 Tonnen radioaktiv belasteter Betriebsabfälle in den Kategorien „Scale-artig", „brennbar" und „Schrott" angefallen (Tab. 3). Aus Abbildung 1 wird deutlich, dass einerseits kontaminierter Schrott die Hauptmasse bildet und andererseits die Scales den Großteil der Aktivität beinhalten. Gegenwärtig werden in mehreren Anlagen Inhibitoren zur Reduzierung des Scale-Wachstums eingesetzt. Perspektivisch ist mit einer Mengenreduzierung und einer Veränderung des Nuklidvektors der anfallenden Scale-artigen Betriebsabfälle zu rechnen.

Großteil der Aktivität in den Scales

Allgemeine Verfahrensweise

Ausgewählte Betriebsabfälle aus der Tiefen Geothermie sind wegen der enthaltenen erhöhten natürlichen Radioaktivität dem Bereich der „Arbeiten" (StrlSchV § 3 (1) Nr. 2b) zuzuordnen und die Stoffe im Weiteren als „Materialien" nach StrlSchV § 3 (2) Nr. 20 einzustufen. Aufgrund dieser Einstufung fällt die Beseitigung des Materials in den Regelungsbereich von Teil 3 Kapitel 3 § 97 bis § 102 StrlSchV („Schutz der Bevölkerung bei natürlich radioaktiven Stoffen"). Wegen ihrer Art und spezifischen Aktivität sind diese nach § 102 als „sonstige Materialien" eingestuft. Eine Einordnung als „zu berücksichtigender Rückstand" nach § 97 kann nicht erfolgen, da die Betriebsabfälle aus der Geothermie nicht unter die Stoffliste nach Anlage XII Teil A fallen.

„Sonstige Materialien" können einer Verwertung (als Input in einen technischen Prozess) bzw. Beseitigung (Deponierung, Verbrennung) zugeführt werden, wenn sichergestellt ist, dass für diese Wege die Strahlenexposition der Beschäftigten und für die Bevölke-

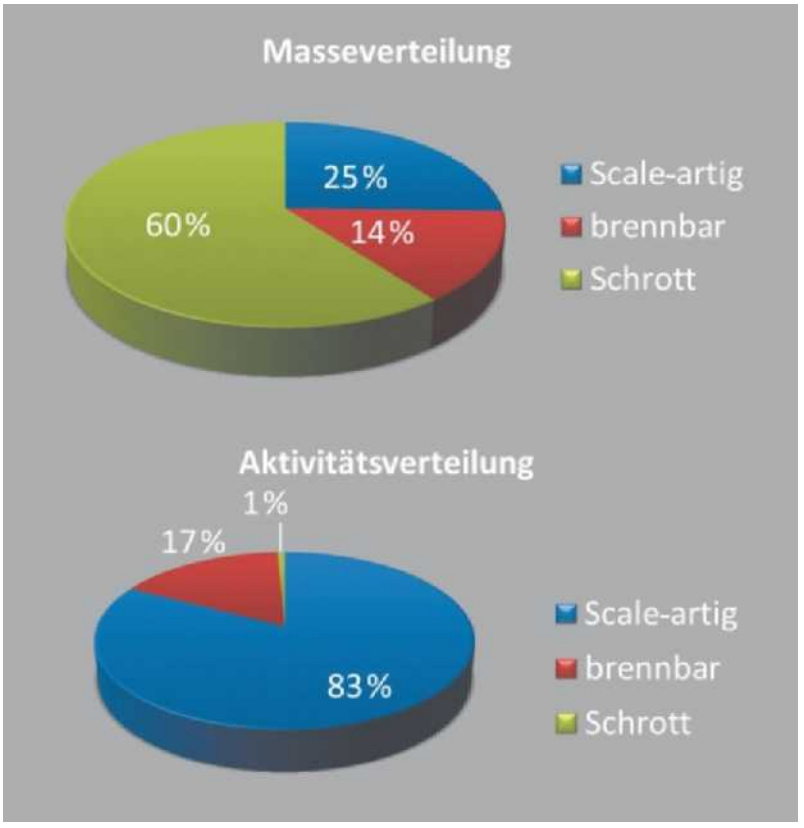

Abb. 1: Masse- und Aktivitätsverteilung von TENORM aus der Tiefen Geothermie

rung kleiner als 1 mSv im Kalenderjahr ist (im Weiteren als „1-mSv-Kriterium" verwendet). Die für den Strahlenschutz zuständige Behörde trifft nach § 102 hierfür die erforderlichen Anordnungen, die festlegen, wo die Materialien aufzubewahren und in welcher Weise die Materialien zu beseitigen sind.

Aus Praktikabilitätsgründen kann die fachliche Bewertung eines Materials in Anlehnung an die Verfahrensweise nach § 97 und § 98 erfolgen, wobei das zu entsorgende Material den zu berücksichtigenden Rückständen (Anlage XII, Teil A) gleichgesetzt wird.

Materialien vor Beseitigung sichern

Der Eigentümer hat Materialien vor ihrer Beseitigung oder Verwertung gegen Abhandenkommen und vor dem Zugriff durch Unbefugte zu sichern. Sie dürfen an andere Personen nur zum Zwecke der Beseitigung oder Verwertung abgegeben werden.

Im Folgenden sind für die einzelnen Kategorien der Betriebsabfälle mögliche Beseitigungswege beschrieben.

Deponierung im vereinfachten Verfahren

Im vereinfachten Verfahren können sonstige Materialien gemeinsam mit anderen Rückständen oder Abfällen deponiert werden (Anlage XII, Teil C), wobei der Nachweis der Einhaltung des 1-mSv-Kriteriums erfolgt ist, wenn der Mittelwert der spezifischen Aktivität über alle auf der Deponie innerhalb von 12 Monaten beseitigten aktiven Materialien (überwachungsbedürftige Rückstände bzw. sonstige Materialien) und sonstigen inaktiven Abfälle kleiner als ein in der StrlSchV tabellierter Prüfwert (je nach Deponie 0,05 … 1 Bq g^{-1}) ist. Dieses vereinfachte Verfahren ist für besonders überwachungsbedürftige Deponien auf beurteilungsrelevante spezifische Aktivitäten a_b < 50 Bq g^{-1} und für Standarddeponien auf 10 Bq g^{-1} begrenzt.

Deponierung im vollständigen Verfahren

Überschreitet die beurteilungsrelevante spezifische Aktivität a_b die Grenze von 50 Bq g^{-1}, ist für den Einzelfall die Strahlenexposition (StrlSchV, Anlage XI, Teil D) zu berechnen und die Einhaltung des 1-mSv-Dosiskriteriums explizit nachzuweisen. Dabei sind alle Expositionen einzubeziehen, die auf dem vorgesehenen Beseitigungsweg durch Behandlung, Lagerung und Ablagerung der Rückstände auftreten können. Dabei werden im Gegensatz zu anderen Regelungsbereichen der StrlSchV nur realistische Expositionspfade und Annahmen verwendet. Die Abschätzung der Dosis erfolgt auf Basis der Berechnungsgrundlagen Bergbau [6], der Richtlinie Arbeiten [7] und der Richtlinie Inkorporationsüberwachung [8].

Deponierung nach Stabilisierung

Kritischer Pfad für die Strahlenexposition ist in der Regel der Austrag von Radionukliden mit dem Deponiesickerwasser. Deshalb wird bei spezifischen Aktivitäten > 100 Bq g^{-1} angestrebt, durch Stabilisierung die Eluateigenschaften der auf eine Deponie zu verbringenden Gebinde zu verbessern, um auf diesem Wege den Schutz des Grundwassers sicherzustellen.

Entsprechend den konkreten Annahmebedingungen der Deponie sind nach Deponieverordnung (DepV) [9] außerdem bestimmte chemische Grenzwerte im Feststoff und in den nach Wasserkontakt herausgelösten Substanzen einzuhalten. Ausführliche Informationen hierzu werden auf S. 30 dieses Heftes gegeben.

Die beschriebenen Beseitigungswege zur Deponierung wurden bereits mehrfach für Materialien aus geothermischen Anlagen im Tonnenmaßstab praktisch realisiert.

Verbrennung

Die beim Betrieb einer geothermischen Anlage anfallenden Filtersäcke, kontaminierten Schutzanzüge usw. müssen aus abfallrechtlichen Gründen in einer

Anzeige

Strahlenschutzkurse im technischen Bereich in Jülich

Herbst 2014

Grundkurs - Modul GG 390,-
10. – 11.11.

Grundkurs - Modul GH 475,-
27. - 29.10.
01. - 03.12.

Spezialkurs § 15
Modul FA 260,-
(Module GG oder GH Voraussetzung)
12.11.

Umschlossene Stoffe
Modul UH 380,-
(Modul GH Voraussetzung)
04. - 05.12.

Offene Stoffe
Modul OG 380,-
(Modul GH Voraussetzung)
30. - 31.10.
Modul OH 690,-
(Modul GH Voraussetzung)
08. – 11.12.
Modul K 260,-
(Modul OH Voraussetzung)
12.12.

Aktualisierungskurse
Module AR, AU 210,-
20.10. und 15.12.
Modul AFA 50,-
(Module AR, AU Voraussetzung)
20.10. und 15.12.
Modul AO 130,-
(Module AR, AU Voraussetzung)
20.10. und 15.12.
Modul AB 160,-
(Module AR, AU, AO Voraussetzung)
21.10. und 16.12.

Röntgenkurse
Modul RM (R3) 230,-
05.11.
Module RG+Z1 (R2.2) 560,-
05. – 07.11.
Module RH+Z3 (R2.1) 920,-
24. – 27.11.

Aktualisierungskurse RöV
Module ARG + ARA (6h) 230,-
03.11.
Modul ARG (4h) 155,-
04.11.

Laserschutzkurs 500,-
29.09. – 30.09.

Kursstätte für Strahlenschutz an der FH Aachen, Campus Jülich
Heinrich-Mußmann-Str. 1
52428 Jülich
Tel.: 0241 / 6009-53116
weiterbildung@fh-aachen.de
Mitglied im Qualitätsverbund (QSK)

Nuklid	$a_{ADR,nat}$ (Bq g^{-1})	A_{ADR} (Bq)
$^{226+}$Ra	100	10^4
$^{210++}$Pb	100	10^4
$^{228+}$Ra	100	10^5
$^{228+}$Th	10	10^4

Tab. 4: Spezifische Aktivität $a_{ADR,nat}$ für freigestellte Stoffe und Gesamtaktivität A_{ADR} für eine freigestellte Sendung nach ADR/GGVSEB unter Berücksichtigung der Klausel für natürliche Stoffe

Sonderabfallverbrennungsanlage beseitigt werden, da Materialien mit einem Brennwert H_0 von > 6.000 kJ kg^{-1} Trockenmasse nicht mehr ohne Vorbehandlung auf einer Deponie abgelagert werden dürfen [9]. Auch für diesen Beseitigungsweg ist der Nachweis der Einhaltung des 1-mSv-Kriteriums erforderlich. Dieser Beseitigungsweg scheiterte bisher an der praktischen Umsetzung, da für den Betreiber einer Sonderabfallverbrennungsanlage der potenzielle Erlös aus den zu verbrennenden Mindermengen in der Größenordnung von 10 t den notwendigen genehmigungsrechtlichen Aufwand nicht abdeckt.

Einschmelzen

Für Metallschrott ist nach aktuellem Abfallrecht eine Rezyklierung durch Einschmelzen zu bevorzugen. Im Falle von radioaktiv kontaminiertem Schrott aus der Tiefen Geothermie ist für diesen Beseitigungsweg ebenfalls die Einhaltung des 1-mSv-Kriteriums nachzuweisen. Da aber die handelsüblichen Annahmebedingungen für Stahlschrott [10] wesentlich restriktiver als die Forderungen des Strahlenschutzrechtes sind, ist mit einer Abweisung auch von geringfügig kontaminierten Materialien durch den Schrotthandel zu rechnen. Deshalb ist es Praxis, die durch natürliche Radionuklide kontaminierten Anlageteile aus der Geothermie durch Einschmelzen in der GERTA-Anlage der Firma Siempelkamp Nukleartechnik GmbH (SNT) zu verwerten. SNT ist berechtigt, Stahl- und Eisenmetalle aller Qualitäten mit chemischer und/oder radioaktiver Kontamination natürlichen Ursprungs anzunehmen und zu verarbeiten, wobei der Anteil an nicht metallischen Stoffen 5 % nicht übersteigen darf [11]. Entsprechend dem genehmigten Leistungsumfang werden die metallischen Schmelzprodukte in den Wertstoffkreislauf eingeführt und die Schlacken und Stäube genehmigungskonform entsorgt.

Stahlschrott-Annahmebedingungen restriktiv

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/GGVSEB [12, 13] ein Transport als „Klasse 7, radioaktiver Stoff" notwendig sein, da in vielen Fällen die Prüfwerte für das Nuklid ^{228}Th sowohl bezüglich der spezifischen Aktivität von 10 Bq g^{-1} als auch bezüglich der Gesamtaktivität von 10^4 Bq für die niedrigste Transportkategorie überschritten sind (Tab. 4). Eine derartige Einstufung schränkt die infrage kommenden Deponien und Sonderabfallverbrennungsanlagen drastisch ein, da diesen häufig eine Annahme von Klasse-7-Transporten genehmigungsrechtlich untersagt ist.

Fazit

Die abgeschätzte obere Grenze der Strahlenexposition für die Beschäftigten einer Geothermieanlage beträgt 3 mSv im Kalenderjahr und liegt in der gleichen Größenordnung wie die ohnehin vorhandene mittlere Strahlenexposition durch natürliche Strahlenquellen von 2,1 mSv.

Die Beseitigung von radioaktiven Betriebsabfällen aus Geothermieanlagen erfolgt nach § 102 StrlSchV und erfordert den Nachweis der Einhaltung des 1-mSv-Kriteriums. Je nach Materialart kann die Beseitigung auf einer Deponie (ohne oder mit Stabilisierung), 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 ausgewählten Anlagen der Tiefen Geothermie ist eine Aufgabe, die eine enge Zusammenarbeit von Anlagenbetreiber, Beschäftigten, für den Strahlenschutz zuständigen Behörden, Bergamt und Sachverständigen erfordert.

Danksagung

Die Autoren danken allen am Projekt 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. Teile der Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit gefördert (Förderkennzeichen 0325166).

Matthias Köhler, Detlev Degering ❑