

Anreicherungen natürlich radioaktiver Materialien in Rohrleitungen und Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie

Rainer GELLERMANN*
* Fugro Consult GmbH
Daimlerstraße 18, 38112 Braunschweig
Mail: r.gellermann@fugro.de

Kurzfassung. Bei der Gewinnung von Erdöl und Erdgas werden in der Regel auch tiefe Grundwässer mit gefördert. Die in diesen Wässern enthaltenen Radionuklide (insbes. Ra-226, Ra-228) können sich in Rohrleitungen und Anlagen ablagern. Arbeiten an derart kontaminierten Anlagen erfordern einen sachgerechten Strahlenschutz. Im Beitrag wird gezeigt, wie radioaktive Ablagerungen entstehen, welche spezifischen Aktivitäten auftreten und welche Anforderungen an den Strahlenschutz bei Arbeiten an kontaminierten Anlagen zu stellen sind. Darüber hinaus wird gezeigt, dass auch andere Industrien von ähnlichen radioaktiven Ablagerungen betroffen sein können.

Einführung

Mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) im Jahr 2001 und der damit verknüpften Umsetzung der EU-Richtlinie 96/29 wurde der Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen in den Strahlenschutz einbezogen. Der Schwerpunkt der entsprechenden Vorgaben in Teil 3 der StrlSchV liegt dabei auf der Überwachung und Reduzierung der Strahlenexposition bei der Beseitigung von Produktionsrückständen aus Arbeiten. Die zu betrachtenden Produktionsrückstände sind die gemäß § 97 StrlSchV definierten überwachungsbedürftigen Rückstände, die in der Anlage XII Teil A der StrlSchV in Form einer Positivliste benannt sind. Eine Gruppe von Rückständen, die die Positivliste aufführt, sind „Schlämme und Ablagerungen aus der Gewinnung von Erdöl und Erdgas.“

Die radiologischen Besonderheiten dieser Rückstände und Fragen des Strahlenschutzes bei „Naturally Occurring Radioactive Materials“ (NORM) werden im vorliegenden Beitrag kurz dargestellt.

1. Natürlich vorkommende Radionuklide

In der Natur kommen mehr als 10 Radionuklide vor, die beim Urknall gebildet wurden und die aufgrund ihrer langen Halbwertszeit bis in die Gegenwart existieren. Von diesen Nukliden sind U-238, U-235, Th-232 und (mit Einschränkungen) K-40 von radiologischer Bedeutung.

Uran und Thorium kommen als Spurenelemente in allen geologischen Einheiten in mehr oder weniger großer Konzentration vor. Der mittlere Massengehalt dieser Stoffe in der Erdkruste liegt bei etwa 3 ppm (= mg/kg Gestein) für Uran und etwa 10 ppm für Thorium. Diesen Gehalten entsprechen spezifische Aktivitäten von 37 Bq/kg U-238 und 40 Bq/kg Th-232.

Die natürliche Radioaktivität resultiert aber nicht nur aus dem Vorkommen der sehr langlebigen Radionuklide U-238, U-235 und Th-232, sondern vor allem aus dem Sachverhalt, dass diese Radionuklide über zahlreiche wiederum radioaktive Tochternuklide in stabile (Blei)Nuklide zerfallen. Dadurch bilden sich die in Abbildung 1 dargestellten Zerfallsreihen.

	U-238 Reihe					Th-232 Reihe					U-235 Reihe						
U	238		234										235				
Pa		234												231			
Th	234		230				232		228				231		227		
Ac								228						227			
Ra			226				228		224						223		
Fr													(223)				
Rn			222						220						219		
At																	
Po			218		214		210		216		212				215		(211)
Bi				214		210				212						211	
Pb			214		210		206		212		208				211		207
Tl									208							207	

Abbildung 1: Natürlich vorkommende Zerfallsreihen. **Legende:** Zahlen: Massenzahlen der Nuklide. Senkrechte Linien: Alphazerfall. Diagonale Übergänge bei gleicher Massezahl: Betazerfall. Grau: Anfangs- und Endglieder der Reihen.

Folgende Eigenschaften der Zerfallsreihen sind wesentlich:

- Die Aktivität der Tochternuklide in den Zerfallsreihen ist bei einem hinreichend langen Abschluss eines Systems von der Umgebung (U-238-Reihe ca. 1 Mio. Jahre, Th-232 Reihe ca. 50 Jahre) gleich der Aktivität der Mutternuklide („Aktivitätsgleichgewicht“). Das ist in der Regel in Gesteinen der Fall.
- Wird das Aktivitätsgleichgewicht durch physikalische oder chemische Prozesse gestört, so stellt sich durch radioaktive Umwandlungen erneut ein Gleichgewicht ein. Die Zeitkonstante, mit der diese Gleichgewichtseinstellung erfolgt, wird durch die Halbwertszeit der Tochternuklide bestimmt. Dabei kann es sowohl zu einer Abnahme der Aktivität („Zerfall“) als auch zu einer Zunahme („Nachwachsen“) kommen.
- Die von Gesteinen ausgehende messbare Umgebungsstrahlung wird vor allem durch kurzlebige gammastrahlende Radionuklide (Bi-214, Ac-228, Bi-212, Tl-208) hervorgerufen.
- Bei Inkorporation wirken vor allem die langlebigen Alphastahler (U-238, Th-230, Ra-226, Pb-210, Po-210, Th-232, Ra-228, Th-228) dosisverursachend.
- Eine besondere Gruppe von Radionukliden sind Rn-222 und seine kurzlebigen Tochternuklide (Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214).

2. Radioaktivität in Erdöl- und Erdgaslagerstätten

Die Förderung von jährlich rund 13 Mrd. m³ Erdgas in Deutschland deckt etwa 14 % des deutschen Erdgasbedarfs, die von jährlich 2,5 Mio. t Erdöl ca. 3 % der inländischen Mineralölnachfrage. Die Lagerstätten, aus denen diese Rohstoffe gefördert werden, sind geologische Fallenstrukturen, in denen das aus tieferen Horizonten aufsteigende leichte Gas oder Öl durch dichte Deckschichten zurückgehalten wird. Nutzbare Lagerstätten sind (bisher) relativ gut durchlässige, poröse Speichergesteine. Solche Speichergesteine von Erdöl sind vor allem Sandsteine und Kalksteine der Jura- und Kreidezeit (Alter ca. 100 – 200 Mio. Jahre), die in Teufen von 1 000 bis 2 000 m liegen. Erdgaslagerstätten befinden sich hauptsächlich in 3 000 bis 5 000 m tiefen Ablagerungen des Zechstein und des Rotliegenden (Alter ca. 250 bis 300 Mio. Jahre) [1].

Weder die Speichergesteine der Erdöl- noch die der Erdgaslagerstätten besitzen Uran- oder Thoriumgehalte, die im Rahmen der natürlichen Variabilität als erhöht zu bezeichnen sind.

Erdöl- und Erdgaslagerstätten enthalten aber neben (unter) Gas oder Öl auch Wasser. Dieses Lagerstättenwasser ist stark salzhaltig, chemisch neutral bis schwach sauer und befindet sich in einer sauerstofffreien (anoxischen) Umgebung. In einem solchen Milieu ist Uran weitgehend unlöslich und kommt daher in Lagerstättenwässern nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Thorium ist im neutralen und schwach sauren pH-Bereich generell nur sehr wenig löslich und verbleibt ungelöst im Gestein.

Die Konzentration des Erdalkalielementes Radium im Grundwasser wird durch die Fällung unlöslicher Sulfate der Erdalkalimetalle Strontium, Barium begrenzt. Unter den o.g. Milieubedingungen der Lagerstättenwässer wird aber gelöstes Sulfat zu Sulfid (H₂S → Sauer gas) oder Schwefel reduziert. Sulfatfreie hochsalinare Lagerstättenwässer („Typ A“) können deshalb Strontium, Barium und Radium in wesentlich höheren Konzentrationen enthalten als sulfathaltiges Grundwasser. Radium kann aber auch in relativ hohem Umfang gelöst werden, wenn in sulfathaltigen salinaren Wässern Barium fehlt, so dass es nicht zur BaSO₄-Bildung kommt („Typ B“).

Auch Pb-210 kann in erhöhten Konzentrationen (verglichen mit „normalen“ Süßwässern) in salinaren Tiefenwässern vorkommen.

Radon (Rn-222) wird durch das chemische Milieu nicht beeinflusst. Die Radonkonzentrationen in Lagerstätten und Lagerstättenwasser werden daher zunächst durch die Freisetzung von Radon aus der Gesteinsmatrix bestimmt und liegen in der Größenordnung von 10 – 100 Bq/l.

In Tabelle 1 sind Konzentrationen chemischer und radioaktiver Stoffe in salinaren Tiefenwässern und oberflächennahen Grundwässern angegeben.

Tabelle 1: Konzentrationen chemischer und radioaktiver Stoffe in salinaren Tiefenwässern und in gering mineralisierten Grundwässern

	Salinare Lösung Typ A	Salinare Lösung Typ B	Süßwasser
Salzgehalt, gesamt	> 100 g/l	Ca. 200 g/l [4]	< 1 g/l
Cl	10.000 – 200.000 mg/l	137000 mg/l [4]	10 – 100 mg/l
SO ₄	< 10 mg/l	470 mg/l [4]	10 – 1000 mg/l
Ca	3000 – 30000 mg/l	8409 mg/l [4]	10 – 1000 mg/l
Sr	300 – 3000 mg/l	440 mg/l [4]	0,1 – 10 mg/l
Ba	30 – 300 mg/l	5,3 mg/l [4]	< 0,1 mg/l
Ra-226	1 – 100 Bq/l	8- 9 Bq/l [5]	1 – 41 mBq/l [6]
U-238	0,1 – 1 mBq/l	1 - 10 mBq/l [5]	1 – 100 mBq/l [6]

2. Anreicherungsprozesse bei der Gewinnung von Erdöl und Erdgas

Während des Gewinnungsprozesses der Kohlenwasserstoffe gelangt das Lagerstättenwasser als unerwünschtes Nebenprodukt an die Erdoberfläche, wird dort in Aufbereitungsanlagen von Öl oder Gas getrennt und wieder in den Untergrund eingepresst. Die massenbezogene Aktivität von Radium als dominantem Radionuklid ist auch in Lagerstättenwässern mit hohen Radiumkonzentrationen geringer als die der meisten Gesteine und Böden. Daher führt die von den Wässern ausgehende ionisierende Strahlung praktisch nicht zur Erhöhung der Umgebungsstrahlung.

In den ober- und unterirdischen Produktionsanlagen kann es jedoch durch Druck- und Temperaturänderungen oder durch Zumischung anderer Flüssigkeiten zu Ausfällungen gelöster Salze kommen. Eine Übersicht über dabei entstehende Ablagerungen zeigt die Tabelle 2.

Tabelle 2: Typen von Ablagerungen in Anlagen der Erdöl-Erdgasindustrie. Aus [2]

Typ	Radionuklide	Charakteristika	Vorkommen
Ra-dominierte Krusten (Scale)	Ra-226, Ra-228, Ra-224 und ihre Zerfallsprodukte	Harte Ablagerungen von Ca, Sr, Ba-Sulphaten und Karbonaten	Rohgas- und Rohölproduktions- und Transporteinrichtungen, LaWa-Leitungen
Ra-dominierte Schlämme (Scale)	Ra-226, Ra-228, Ra-224 und ihre Zerfallsprodukte	Sand, Ton, Paraffine und Schwermetalle	Separatoren, Absetztanks etc.
Pb-haltige Krusten	Pb-210 und seine Zerfallsprodukte	Feste Bleiablagerungen	Rohgas- und Rohölproduktions- und Transporteinrichtungen, LaWa-Leitungen
Pb-haltige Filme	Pb-210 und seine Zerfallsprodukte	Sehr dünne Filme	Öl- und Gasaufbereitung, Speicher und Transport
Po-haltige Filme	Po-210	Sehr dünne Filme	Kondensataufbereitung

Nach Angaben des WEG [1] fallen in Deutschland jährlich zwischen 70 und 250 t an Produktionsschlämmen und abgelösten Scales an. Der Mittelwert der letzten 10 Jahre liegt bei 130 t pro Jahr. Die Gesamtmenge der Stahlschrotte mit anhaftenden NORM schwankt sehr stark und liegt pro Jahr zwischen 20 und 500 t; im Mittel der letzten 10 Jahre sind jährlich 218 Tonnen Stahlschrott mit anhaftenden NORM angefallen. Etwa 95 Prozent dieser Menge können nach einer Reinigung als nicht-kontaminierter Schrott entsorgt werden.

Die spezifische Aktivität der Ablagerungen ergibt sich aus der Masse der aus der Lösung abgeschiedenen Salze und die darin mitgefällte Mengen an Radionukliden. Da Barium und Strontium auch nur in sehr geringen Konzentrationen in den Lagerstättenwässern vorkommen, sind in den Ablagerungen durch die Mitfällung die gelösten Radionuklide Ra-226, Ra-228 um das 5000 – 50000fache verglichen mit dem Lagerstättenwasser angereichert. Die Bandbreite der spezifischen Aktivität von Rückständen wird vom Wirtschaftsverband Erdöl- Erdgasgewinnung (WEG) zwischen weniger als 5 Bq/g und in seltenen Einzelfällen bis zu 1000 Bq/g angegeben. Nach den Angaben dieser Quelle ist die spezifische Aktivität von mehr als 50 % der NORM-Stoffe kleiner als 50 Bq/g, lediglich 9% weisen mehr als 250 Bq/g auf [1].

Eine Übersicht über die Nuklidzusammensetzung von Ablagerungen aus der Erdöl-Erdgasgewinnung im Vergleich zu anderen NORM zeigt Abbildung 2. In dieser Abbildung wurden die jeweiligen Aktivitäten normiert auf die Summe U-238max + Th-232max, wobei „max“ das Nuklid der jeweiligen Zerfallsreihe meint, das in dieser Reihe die höchste spezifische Aktivität aufweist (s. [3]).

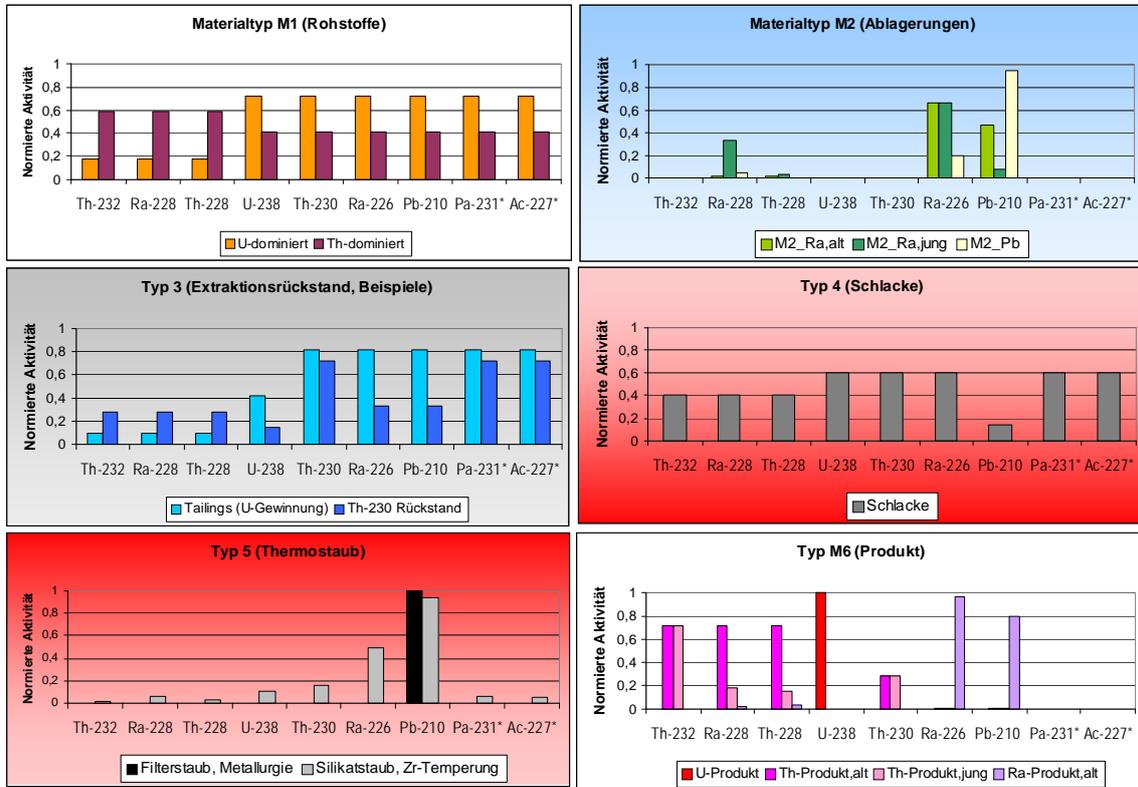


Abbildung 2: Normierte Radionuklidanteile bei verschiedenen NORM. Rückstände der Erdöl-Erdgasgewinnung gehören zum Materialtyp M2

3. Strahlenschutz bei Arbeiten mit NORM

Die in der Erdöl-Erdgasindustrie anfallenden NORM werden nicht zielgerichtet aufgrund ihrer Radioaktivität oder zur Nutzung der ionisierenden Strahlung hergestellt. Aus diesem Grund unterliegen sie nicht den Regelungen nach Teil 2 der StrlSchV. Vielmehr wird der Strahlenschutz bei natürlich vorkommenden Radionukliden als ein besonderer Teil (Teil 3) in der StrlSchV geregelt. Handlungen mit NORM-Stoffen werden dabei als Arbeiten bezeichnet. Arbeiten sind von Tätigkeiten im Sinne der StrlSchV zu unterscheiden.

Beruflich strahlenexponiert sind Personen bei Arbeiten nur dann, wenn die effektive Dosis im Kalenderjahr 6 mSv überschreiten kann. Das Anlagen- und Feldpersonal der Erdöl- und Erdgasgewinnung gehört nicht zu diesem Personenkreis. Eine Abschätzung des WEG für den "worst case" hat ergeben, dass die Exposition geringer als 1 mSv/a ist und damit keine über den konventionellen Arbeitsschutz hinausgehenden Maßnahmen notwendig sind. Diese Abschätzung wurde inzwischen durch Messungen in den WEG-Mitgliedsfirmen bestätigt [2].

Die StrlSchV regelt in ihrem Anwendungsbereich den Strahlenschutz, wenn bei der Verwertung oder Beseitigung von überwachungsbedürftigen Rückständen für Einzelpersonen der Bevölkerung der Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr überschritten sein kann (§ 97 Abs. 1 StrlSchV). Arbeiten an kontaminierten Anlagen oder

Anlagenteilen der Erdöl-Erdgasindustrie, die nicht im direkten Zusammenhang mit der Entsorgung von Rückständen stehen, unterliegen daher formal nicht der StrlSchV.

Unabhängig davon hat die Industrie eigene Standards entwickelt, nach denen der Strahlenschutz bei der Exploration und Produktion von Erdöl/Erdgas („E&P Industrie“) derzeit organisiert wird. Ziel dieser Maßnahmen ist es, die Strahlenbelastung auch unterhalb von Grenzwerten für alle Personen so gering wie möglich zu halten.

Im Leitfaden des WEG [2] wird empfohlen, den Umgang mit radioaktiven Stoffen natürlichen Ursprungs ähnlich wie den Umgang mit Gefahr- und gefährlichen Arbeitsstoffen zu organisieren und erhöhte Arbeitsschutzmaßnahmen anzuwenden. Hierfür werden von den E&P Unternehmen zuständige Personen für den Strahlenschutz benannt. Diese zuständigen Personen beraten die Betriebe und die Mitarbeiter bei Arbeiten mit NORM. Sie sind auch Ansprechpartner für externe Firmen, sofern Fragen zum Strahlenschutz zu klären sind. Generelle Schutzmaßnahmen von Beschäftigten werden in Betriebsanweisungen festgeschrieben.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass eigene systematische Untersuchungen an zahlreichen Anlagen gezeigt haben, dass keineswegs alle Anlagen der E&P Industrie radioaktive Kontaminationen aufweisen. Ein Großteil der Anlagen ist zumindest in Bezug auf die einfach kontrollierbare Gammastrahlung von Ra-Ablagerungen unauffällig. Als kontaminiert gelten in der E&P Industrie Anlagen, bei denen Dosisleistung um mehr als das Doppelte über dem lokalen Hintergrundwert liegt. Soweit noch nicht bekannt und in einem Kataster erfasst, sind Anlagen vor Beginn von Arbeiten auf Strahlung zu kontrollieren. Wird bei solchen Messungen festgestellt, dass die Strahlung in einem vorgesehenen Arbeitsbereich über dem Doppelten des Hintergrundwertes liegt, sieht der WEG Leitfaden eine spezielle Arbeitserlaubnis vor, die erst nach erfolgter Unterweisung erteilt wird.

Im Sinne eines vorsorgenden Gesundheitsschutzes empfiehlt der WEG weiterhin, bei Arbeiten an radioaktiv kontaminierten Anlagen die folgenden Schutzmaßnahmen zu treffen [2]:

- Mitarbeitern mit Hautverletzungen oder offenen Wunden ist die Arbeit zu untersagen (Resorption über die Wunden).
- Die Aufenthaltsdauer im Einflussbereich der radioaktiven Stoffe natürlichen Ursprungs ist so gering wie möglich zu halten.
- Der Abstand zu den radioaktiven Stoffen ist so groß wie möglich zu halten.
- Der Arbeitsgang ist möglichst nicht zu unterbrechen, um Kontaminationen nicht zu verbreiten.
- Das Öffnen von geschlossenen Systemen, in denen Radon vermutet wird, hat von der windzugewandten Seite zu erfolgen.
- Beim Öffnen und Befahren von ungenügend belüfteten Systemen, in denen Radon mit höherer Konzentration auftritt und trotz Belüftung keine hinreichende Reduktion der Radonkonzentration herbeigeführt werden kann, wird situationsgebundener Atemschutz empfohlen.
- Eine "Scale"-Staubentwicklung bei Zerlege- Trennarbeiten ist durch Befeuchten mit Wasser zu unterbinden.
- Zum Schutz von Boden und Wasser sind Ableitungen zu vermeiden.
- Radioaktive Stoffe sind in dafür gekennzeichneten Behältern zu sammeln.
- Um die Aufnahme von radioaktiven Stoffen in den Körper zu vermeiden, ist das Essen, Trinken und Rauchen während der Arbeit verboten.
- Benutzte Geräte sind nach der Arbeit sorgfältig zu reinigen und ggfs. freizumessen.
- Schutzausrüstungen, die nicht gereinigt werden können (Einmalanzüge, Putzlappen etc.) sind in dafür gekennzeichneten Behälter getrennt von den übrigen radioaktiven Stoffen zu sammeln und fachgerecht zu entsorgen.

4. Andere Industrien und Materialien mit NORM

Materialien mit natürlich vorkommenden Radionukliden, bei denen der Strahlenschutz nicht außer Acht gelassen werden kann, fallen aber nicht nur bei der Erdöl- und Erdgasgewinnung an. Salinare Tiefenwässer werden auch im Steinkohlebergbau angeschnitten und bei der tiefen Geothermie genutzt. In beiden genannten Bereichen kann es daher zu ähnlichen radiumhaltigen Ablagerungen kommen. Auch bei der Nutzung von geringer mineralisierten Wässern z.B. in Heilbädern oder sogar der Trink- oder Mineralwasserproduktion können Ablagerungen mit Radiumanreicherungen entstehen. In den letztgenannten Fällen sind die spezifischen Aktivitäten deutlich geringer als im Fall der Ablagerungen aus hochsalinaren Lösungen, erreichen aber durchaus ein Niveau von 1 bis 3 Bq/g Ra-226. Außer den Rückständen der Erdöl- Erdgasindustrie sind die vorgenannten Materialien bisher nicht in der Positivliste nach Anlage XII Teil A StrlSchV enthalten. Diese Situation reflektiert den Kenntnisstand am Ende der 1990er Jahre, führt aber im Einzelfall zu einer sehr deutlichen Ungleichbehandlung ähnlicher Materialien bzw. zu einem unterschiedlichen Strahlenschutz bei Arbeiten.

Aufbauend auf internationalen Erfahrungen der vergangenen 20 Jahre seit Einführung der NORM-Thematik in den Strahlenschutz durch die IAEA und die anschließende Grundnormen-Direktive 96/29EURATOM aus dem Jahr 1996 bereitet die EU derzeit eine Neufassung der Grundnormen zum Strahlenschutz vor. In dieser neuen Direktive wird die bisherige unverbindliche Positivliste der EU in eine verbindliche Liste überführt. Nach dem Entwurfsstand der EU-BSS von Februar 2010 sind auf der Liste enthalten:

- Gewinnung Seltener Erden aus Monazit
- Produktion von Thoriumverbindungen/ Herstellung thoriumhaltiger Produkte
- Verarbeitung von Niob-/ Tantalzerzen
- Erdöl- und Erdgasproduktion
- Herstellung von Titanoxid-Pigmenten
- Thermische Phosphorproduktion
- Zirkon- und Zirkoniaindustrie
- P-Düngerherstellung
- Zementherstellung, Instandhaltung der Klinkeröfen
- Kohlekraftwerke, Instandhaltung der Kessel
- P-Säureproduktion
- Roheisenproduktion
- Zinn-/Blei-/ Kupferverhüttung
- Grundwasserbehandlung

Der Uranbergbau und die Uranerzverarbeitung sind als Teil des nuklearen Brennstoffkreislaufs nicht auf dieser Liste aufgeführt. Eine Ergänzung der Liste durch nationale Behörden soll möglich sein. Die genannten Industrien sollen beim Überschreiten einer Freigrenze von 1 Bq/g je Zerfallsreihe der Behörde Anzeige erstatten. Abhängig von der Situation ist der Strahlenschutz zu planen und zu realisieren.

Alle bisherigen Erfahrungen zeigen, dass Arbeiten mit NORM keine extremen Strahlenexpositionen verursachen. Ein Grund für diesen Sachverhalt ist sicherlich ein sachgemäßer Arbeitsschutz/Strahlenschutz. Dieser Schutz von Beschäftigten und Personen der Bevölkerung wird auch in Zukunft Maßstab für den Strahlenschutz sein. Die Umsetzung der neuen EU Grundnormen wird deshalb gerade auf dem Feld „Arbeiten mit NORM“ neue Herausforderungen bringen.

Referenzen

- [1] WEG Informationen Internet (2011)
- [2] Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. Leitfaden für Arbeiten mit natürlicher Radioaktivität (hier genutzt: Stand 2006).
- [3] Abschlussbericht zum Vorhaben StSch 4416: Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs. Teil B: Erweiterung des Anwendungsbereichs auf NORM-Rückstände. Bericht I: Vorkommen und Entstehung von radiologisch relevanten Bodenkontaminationen aus bergbaulichen und industriellen Prozessen. 06.10.2006. Verfasser: R. Gellermann, H.Schulz, D. Weiß. Veröffentl.: http://www.bfs.de/de/ion/anthropg/altlasten/fachinfo/forschungs_vh/Abschlussbericht_StSch4416_Teil_1.pdf
- [4] Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland. GFZ-Potsdam, STR97/15, Geothermie Report 97-1, gtr0200.pdf
- [5] D. Degering, M. Köhler: Natürliche Radionuklide in Anlagen der tiefen Geothermie. Geothermiekongress 2009. Bochum, 17-19 November 2009
- [6] M. Beyermann, T. Bünger, K. Gehrcke, D. Obrikat: Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland. BfS-SW-06/09. urn:nbn:de:0221-20100319945