

Abschlussbericht

Vorhaben Nr. 3616S12343

„Ermittlung und Bewertung der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen mit natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien (NORM)“

Auftraggeberin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
vertr. durch die Präsidentin des Bundesamtes für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49, 38201 Salzgitter

Auftragnehmerin: Nuclear Control & Consulting GmbH
Hinter dem Turme 24
38114 Braunschweig
E-mail: contact@nuclear-cc.de

Bearbeiter Team: Dr. Rainer Gellermann
Kristin Nickstadt
Christian Ahrens

Kurztitel: NORM Arbeitsplätze
AZ NCC.: DE001-06

Datum: Braunschweig, 30.09.2017

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

Zusammenfassung

Die Regelungen des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) vom 27. Juni 2017 betreffen auch Strahlenexpositionen durch natürlich vorkommende radioaktive Stoffe (NORM) in festgelegten Tätigkeitsfeldern. Für einige dieser Tätigkeitsfelder lagen bisher keine ausreichenden Informationen über die Höhe der Strahlenexpositionen, die Expositionspfade sowie über die Anzahl der betroffenen Arbeitnehmer vor. Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, die entsprechenden Informationen für diese Tätigkeitsfelder zu erheben, um den künftigen Umfang der strahlenschutzrechtlichen Maßnahmen zur Gewährleistung des Gesundheitsschutzes beruflich strahlenexponierter Personen festzustellen. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass in den untersuchten Tätigkeitsfeldern für etwa 300 bis 1000 Beschäftigte eine Expositionsabschätzung nach § 55 StrlSchG erforderlich sein kann. Bei etwa 50 bis 150 Beschäftigten könnte die effektive Dosis den Wert von 1 mSv im Kalenderjahr übersteigen und eine Pflicht zur Anzeige der Tätigkeit bei der Strahlenschutzbehörde und zur Expositionsermittlung gemäß § 56 StrlSchG vorliegen. Die vorgenannten Anzahlen hängen in hohem Maße von der Konservativität der anzuwendenden Methoden der Dosismodellierung ab. Als ein besonderes Problem wurde die Expositionsabschätzung bzw. -ermittlung von Mitarbeitern externer Firmen erkannt, die bei Wartungsarbeiten eingesetzt werden.

Summary

The regulations of the Radiation Protection Act (German: Strahlenschutzgesetz, StrlSchG) of 27 June 2017 also apply to radiation exposure to naturally occurring radioactive materials (NORM) in defined fields of practice. For some of these fields of practice, sufficient information about the level of radiation exposure pathways as well as the number of affected employees was not available. The purpose of the research project was to collect the relevant information for these fields of practice in order to assess the future extent of radiation protection measures that are needed to ensure the health protection of occupationally exposed persons. In the outcome, it was evaluated that a dose estimation according to § 55 StrlSchG may be required for 300 to 1000 employees in the investigated fields of practice in Germany. For about 50 to 150 employees, the estimated effective dose may exceed 1 mSv in the calendar year causing an obligation of notification to the authority and the duty according to § 56 StrlSchG to determine the exposure with a more realistic approach. The above numbers of employees depend to a large extent on the degree of conservatism applied in dose modeling. As a particular problem, the dose estimation or dose determination of workers who are performing maintenance work and are employed by external companies have been recognized.

I Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	12
2	Grundlagen und Untersuchungsansatz	13
2.1	Gesetzliche Anforderungen	13
2.2	Untergesetzliches Regelwerk	15
2.2.1	Vorbemerkungen	15
2.2.2	Richtlinie Arbeiten (2003).....	16
2.2.3	Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb).....	18
2.3	Internationale Arbeiten.....	19
2.4	Bewertung im Hinblick auf die Untersuchungen dieser Arbeit.....	22
3	Erfahrungen mit der Umsetzung von § 95 i.V. mit Arbeitsfeldern nach Anlage XI Teil B StrlSchV	27
3.1	Recherchen bei Landesämtern und Ministerien	27
3.2	Recherchen bei Branchenverbänden und Unternehmen	28
4	Konzeptioneller Untersuchungsansatz zum Messprogramm	29
4.1	Allgemeine Konzeption des Untersuchungsprogramms.....	29
4.2	Messungen und messtechnische Ausstattung	29
4.3	Klassifikation der Materialien	31
4.4	Berechnung der effektiven Dosis	33
4.4.1	Effektive Dosis	33
4.4.2	Teildosis durch Direktstrahlung	33
4.4.3	Teildosis durch Inhalation von Staub.....	34
4.4.4	Teildosis durch Direktingestion	36
5	Aufbereitung von Niob/Tantalerzen einschließlich der Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Polychlorerzen.....	37
5.1	Branchenspezifische Übersicht	37
5.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen.....	37
5.2.1	Prozessanalyse (Literaturauswertung)	37
5.2.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen.....	38
5.3	Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen - Abschätzung	39
5.3.1	Radioaktivität in Rohstoffen und Abfällen (Literaturauswertung)	39
5.3.2	Abschätzung von Strahlenexpositionen in Anlagen in Deutschland	41
5.4	Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen - Exemplarische Untersuchung	43
5.4.1	Anlagenbeschreibung und Expositionssituationen	43
5.4.2	Ermittlung von Strahlenexpositionen in exemplarisch untersuchten Anlagen.....	44
5.5	Anzahl der betroffenen Beschäftigten.....	45
5.6	Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung	45
6	Betrieb und Wartung von Anlagen der tiefen Geothermie.....	47
6.1	Branchenspezifische Übersicht	47
6.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen.....	47
6.2.1	Prozessanalyse (Literaturauswertung)	47
6.2.2	Expositionspfade.....	49
6.3	Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen.....	50
6.3.1	Radioaktivität in Anlagen	50
6.3.2	Abschätzung von Strahlenexpositionen in Anlagen in Deutschland	51
6.4	Modellierung möglicher Strahlenexpositionen	54
6.5	Anzahl der betroffenen Beschäftigten.....	55
6.6	Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung	56
7	Verwendung von Thorium und Uran zu chemisch-analytischen oder zu chemisch-präparativen Zwecken.....	57
7.1	Branchenspezifische Übersicht	57
7.1.1	Abgrenzung.....	57
7.1.2	Art und Menge von verwendeten Chemikalien	57
7.1.3	Verwendung von Thorium und Uran zu chemisch-präparativen Zwecken.....	59
7.1.4	Herstellung von Konsumgütern mit Zusatz radioaktiver Stoffe.....	59
7.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen.....	61

7.3	Ausmaß der Strahlenexposition bei chemisch-analytischen Tätigkeiten - Abschätzung ...	62
7.3.1	Charakterisierung der Strahlenquelle	62
7.3.2	Strahlungsfeld von Th-Lösungen	63
7.3.3	Äußere Strahlenexposition aus kontaminierten Flächen	64
7.3.4	Innere Strahlenexposition durch Ingestion	65
7.3.5	Inhalation von Radon-220	67
7.3.6	Inhalation von Partikeln	68
7.3.7	Modellierung möglicher Strahlenexpositionen	69
7.3.8	Expositionssituationen im normalen Arbeitsablauf	69
7.3.9	Exposition bei Störungen im Arbeitsablauf	72
7.3.10	Gesamtbewertung	73
7.4	Ausmaß der Strahlenexposition bei der Herstellung von thorierten Legierungen	74
7.4.1	Herstellung von thorierten W-Legierungen	74
7.4.2	Charakterisierung der Strahlenquelle	75
7.4.3	Expositionssituationen und Einschätzung der Exposition	76
7.4.4	Abschätzung von Strahlenexpositionen von Beschäftigten	77
7.4.5	Ermittlung von Strahlenexpositionen	79
7.4.6	Gesamtbewertung	80
7.5	Anzahl der betroffenen Beschäftigten	80
7.6	Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung	81
8	Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen	82
8.1	Branchenspezifische Übersicht	82
8.1.1	Abgrenzung der thorierten Legierungen von anderen Produkten mit Zusatz von Thorium	82
8.1.2	Thorierte Wolframelektroden	83
8.1.3	Bauteile mit W-Th-Legierungen (Konstruktionsteile)	83
8.1.4	Mg-Th-Legierungen	84
8.1.5	Th-kontaminierte Ti-Bauteile	84
8.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen	85
8.2.1	Lampenproduktion	85
8.2.2	Herstellung und Handhabung von Konstruktionsteilen	86
8.2.3	Mg-Th-Legierungen	86
8.2.4	Th-kontaminiertes Titan	87
8.3	Abschätzung der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen	87
8.3.1	Montage und Demontage von Teilen in der Lampenproduktion	87
8.3.2	Elektrodenfertigung für die Lampenproduktion	88
8.3.3	Herstellung und Handhabung von Konstruktionsteilen	89
8.3.4	Mg-Th-Legierungen in Flugzeugen	90
8.3.5	Th-kontaminiertes Titan	91
8.4	Ermittlung von Strahlenexpositionen	91
8.4.1	Elektrodenfertigung für die Lampenproduktion	91
8.4.2	Untersuchungen zu Strahlenexpositionen bei der Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen	92
8.4.3	Gesamtbewertung	94
8.5	Anzahl der betroffenen Beschäftigten	94
8.6	Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung	94
9	Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken	96
9.1	Branchenspezifische Übersicht	96
9.1.1	Abgrenzung der Tätigkeiten	96
9.1.2	Zementwerke mit Klinkerproduktion	96
9.1.3	Kohlekraftwerke	97
9.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen	98
9.2.1	Kohle als Strahlenquelle	98
9.2.2	Feuerfestmaterial als Strahlenquelle	100
9.2.3	Pb-210-Anreicherungen in Heizkesseln	100
9.2.4	Expositionspfade	101
9.3	Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen	101
9.3.1	Strahlenexpositionen in Zementwerken (Literatúrauswertung)	101

9.3.2	Untersuchungen zu Strahlenexpositionen bei Wartungsarbeiten in einem Zementwerk	103
9.3.3	Strahlenexpositionen in Kohlekraftwerken (Literaturauswertung)	107
9.3.4	Prüfung von Expositionsbedingungen in einem Kohlekraftwerk	108
9.3.5	Gesamtbewertung	109
9.4	Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten	111
9.5	Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung	113
10	Verarbeitung von zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe	115
10.1	Branchenspezifische Übersicht	115
10.1.1	Abgrenzung der zu betrachtenden Arbeitsplätze	115
10.1.2	Zirkonminerale und ihre Herkunft	115
10.1.3	Feuerfestindustrie in Deutschland	116
10.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen	116
10.2.1	Rohstoffaufbereitung	116
10.2.2	Herstellung von Feuerfesterzeugnissen	117
10.2.3	Recycling von Feuerfesterzeugnissen	117
10.3	Ausmaß und Abschätzung der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen	118
10.3.1	Radionuklidgehalte im Rohstoff	118
10.3.2	Expositionsbedingungen bei Zirkonoxidherstellung durch Schmelzreduktion	118
10.3.3	Expositionsbedingungen bei Zirkonoxidherstellung durch chemische Verfahren	119
10.3.4	Expositionsbedingungen in Zirkonmahlanlagen	120
10.3.5	Expositionsbedingungen bei der Herstellung von feuerfesten Erzeugnissen	121
10.4	Ermittlung von Strahlenexpositionen in exemplarisch untersuchten Anlagen	122
10.4.1	Rohstoffaufbereitung	122
10.4.2	Herstellung von Feuerfestmaterialien	126
10.4.3	Recycling von Feuerfestmaterialien	128
10.5	Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten	130
10.6	Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung	131
11	Handhabung von Schlämmen und Ablagerungen, die bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas, in der tiefen Geothermie und bei Reinigungstätigkeiten von Anlagen und Einrichtungen anfallen	132
11.1	Branchenspezifische Übersicht	132
11.1.1	Abgrenzung der zu betrachtenden Arbeitsplätze	132
11.1.2	Gewinnung und Aufbereitung von Erdöl- und Erdgas	132
11.1.3	Geothermie	133
11.1.4	Handhabung von kontaminierten Schrotten	133
11.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen	134
11.2.1	Gewinnung von Erdöl- und Erdgas	134
11.2.2	Aufbereitung von Erdöl	136
11.2.3	Geothermie	136
11.3	Ausmaß und Abschätzung von Strahlenexpositionen an Arbeitsplätzen	136
11.3.1	Ablagerungen in Anlagen der Gewinnung von Erdöl- und Erdgas	136
11.3.2	Aufbereitung von Erdöl	138
11.3.3	Ablagerungen in Anlagen der Geothermie	139
11.3.4	Ermittlung von Strahlenexpositionen in exemplarisch untersuchten Anlagen	139
11.4	Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten	142
12	Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände sowie Entfernung von radioaktiven Verunreinigungen von Grundstücken nach § 64 StrlSchG	143
12.1	Branchenspezifische Übersicht	143
12.1.1	Abgrenzung	143
12.1.2	Relevante Branchen	144
12.2	Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen	145
12.3	Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen	147
12.4	Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten	151
12.5	Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung	152
13	Ergänzende Erkenntnisse	153
14	Zusammenfassung	155
15	Literaturverzeichnis, Quellennachweis	158

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Auszug der Standardparameter der realistisch-konservativen Modellierung und der allgemeinen Werte der Umweltradioaktivität nach BgI Bb (BfS 2010)	19
Tabelle 2-2:	Expositionsannahmen für drei arbeitsplatzbezogene Expositionssituationen nach (Penfold u. a. 1999). Abkürzungen: W – Parameterwerte bilden wahrscheinliche Bedingungen ab; U – Parameterwerte bilden unwahrscheinliche Bedingungen ab.....	20
Tabelle 2-3:	Auswahl an Dosiskoeffizienten für die Direktstrahlung großer und kleiner Materialmengen nach (Internationale Atomenergie-Organisation 2006).....	21
Tabelle 4-1:	Messtechnische Ausstattung für die durchgeführten Untersuchungen an Arbeitsplätzen.	30
Tabelle 4-2:	Dosiskoeffizienten für die Berechnung von Umgebungsäquivalentdosisleistungen aus Messwerten der spezifischen Aktivität (Eckerman und Ryman 1993), (Vogt, Schultz, und Vahlbruch 2011) und der Schweizer Strahlenschutzverordnung (StSV (Bundesrat Schweiz, o. J.)).....	34
Tabelle 5-1:	Import von Rohstoffen zur Produktion von Niob, Tantal.....	37
Tabelle 5-2:	Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der nasschemischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen.....	39
Tabelle 5-3:	Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der pyrometallurgischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen.....	39
Tabelle 5-4:	Angaben zur Radioaktivität in den Rohstoffen der Niob-Tantal-Industrie (Literaturdaten).	40
Tabelle 5-5:	Abschätzung von Jahresdosen bei Tätigkeiten an Anlagenteilen der nasschemischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen bei Verarbeitung von Rohstoffen mit 25 Bq/g Summenaktivität (Modellannahmen s. Text).....	42
Tabelle 5-6:	Abschätzung von Jahresdosen bei Tätigkeiten an Anlagenteilen der pyrometallurgischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen bei Verarbeitung von Rohstoffen mit 25 Bq/g Summenaktivität (Modellannahmen s. Text).....	43
Tabelle 5-7:	Messwerte der Ortsdosisleistung in 1 m Abstand /Höhe.....	44
Tabelle 5-8:	Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Nb/Ta-Industrie.....	44
Tabelle 5-9:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigten eines Betriebes der Nb/Ta-Industrie mit pyrometallurgischem Verfahren.....	45
Tabelle 6-1:	Wertebereiche einer Auswahl von Radionuklidkonzentrationen in Geothermalwässern der tiefen Geothermie (Bohrungen > 400 m).....	48
Tabelle 6-2:	Anlagenteile und Expositionspfade bei der tiefen Geothermie.....	49
Tabelle 6-3:	Spezifische Radionuklidaktivitäten (Minimal-, Median- und Maximalwerte) der Scales-Proben aus Anlagen der tiefen Geothermie.....	50
Tabelle 6-4:	Beispielhafte Abschätzung einer effektiven Jahresdosis <i>E</i> für Beschäftigte einer Anlage der tiefen Geothermie (Bohrungen > 400 m) mit <i>EA</i> Dosis durch Direktstrahlung, <i>Einh</i> Dosis durch Inhalation und <i>Eing</i> Dosis durch Ingestion; <i>texp</i> Aufenthaltszeit gesamt ohne Unterscheidung von Arbeitsplatzszenarien.....	52
Tabelle 6-5:	Szenarien und zugehörige Angaben zur Tätigkeitsdauer nach Modellansätzen aus (Brasser u. a. 2014).....	53
Tabelle 6-6:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigte der Geothermie nach Ergebnissen einer Expositionsmodellierung.....	55
Tabelle 6-7:	Anzahl von Beschäftigten im Tätigkeitsfeld Handhabung von Schlämmen und Ablagerungen in der Tiefengeothermie.....	56
Tabelle 7-1:	Verwendete uran- und thoriumhaltige Chemikalien in Deutschland (Quelle: Internetseiten der Lieferanten, abgerufen Juni 2017).....	58
Tabelle 7-2:	Importmengen und Importeure von Thorium nach Deutschland.....	61
Tabelle 7-3:	Abschätzung der zusätzlichen Dosisleistung an der Oberfläche eines mit 0,1 Liter á 1 g/l Thorium gefüllten kugelförmigen Gefäßes. Th-Alter 1 Jahr. Erläuterungen s. Text.....	63
Tabelle 7-4:	Zusätzliche Dosisleistung an der Oberfläche von unterschiedlich großen Volumina mit Th—Lösung, 1 g/L (Basis: Kugelmodell; Th-Alter 1 Jahr).....	64
Tabelle 7-5:	Dosisleistung über einer mit Th-Standardlösung (1g/L, Th-Alter der Lösung 1 Jahr) kontaminierten Fläche. Geometriefaktor G = 0,1 (s. Text).....	65
Tabelle 7-6:	Dosiskoeffizienten zur Ermittlung der inneren Strahlenexposition für Nuklide der Th-232 Zerfallsreihe und für Th-230 (Deutscher Bundestag 2001b) durch Ingestion der	

	Bezugsaktivität einer Th-Chemikalie in Abhängigkeit vom Zeitraum seit Abtrennung des Thoriums aus Erzen („Th-Alter“).	66
Tabelle 7-7:	Dosiskoeffizienten zur Ermittlung der effektiven Inhalationsdosis für Nuklide der Zerfallsreihe des Thoriums und Th-230.	69
Tabelle 7-8:	Anzahl von Handhabungen und zugehörige Arbeitszeiten mit Kontakt zu Th-Lösungen mit unterschiedlichen Th-Konzentrationen.	70
Tabelle 7-9:	Abschätzung der aus den Th-Lösungen stammenden jährlichen Dosen durch äußere Strahlenexposition.	70
Tabelle 7-10:	Abschätzung der aus den Th-Lösungen stammenden und bei impulsartiger Freisetzung maximal möglichen jährlichen Dosen durch Inhalation von Rn-220.	71
Tabelle 7-11:	Mögliche jährliche Strahlenexpositionen (effektive Dosis) eines Labormitarbeiters in μSv	72
Tabelle 7-12:	Messwerte der Ortsdosisleistung (in $\mu\text{Sv/h}$) in einem Arbeitsraum, in dem Wolframoxid mit Thoriumnitrat dotiert, gemischt und reduziert wird (vgl. Kapitel 7.4.1).	78
Tabelle 7-13:	Messergebnisse der Raumluftüberwachung für zwei Untersuchungsperioden in den Jahren 2014 und 2015.	79
Tabelle 7-14:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte bei der Herstellung thoriierter Legierungen.	80
Tabelle 8-1:	Legierungsbestandteile von Mg-Th-Leichtlegierungen nach USA MIL Standard in %. Der verbleibende Magnesium-Anteil in den Legierungen ist > 90% („Total Materia - Die weltweit umfangreichste Datenbank“ o. J.).	84
Tabelle 8-2:	Messergebnisse ODL an einer thorierten Wolframelektrode (W2; Durchmesser 2 mm). Zykluszeit 10 s.	87
Tabelle 8-3:	Messwerte der Strahlenschutzkontrolle für Arbeitsplätze in der Elektrodenfertigung in der Lampenindustrie.	89
Tabelle 8-4:	Basisdaten der Arbeitsgänge in der Schmelzwerkstatt zur arbeitsplatzbezogenen Expositionsabschätzung.	92
Tabelle 8-5:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigten in der Schmelzwerkstatt.	94
Tabelle 9-1:	Überblick der Anlagentechnologien die in Zementwerken in Deutschland zum Einsatz kommen (VdZ 2017).	97
Tabelle 9-2:	Überblick der Anlagenarten mit Einzelleistung >100 MW (elektrisch) die in Kohlekraftwerken in Deutschland zum Einsatz kommen (UBA 2013).	98
Tabelle 9-3:	Wertebereiche oder Mittelwerte der spezifischen Aktivität von Kohlen nach (IAEA 2003). Angaben in Bq/kg.	99
Tabelle 9-4:	Spezifischen Aktivitäten in Bq/g von Feuerfestmaterialien in Klinkeröfen von Zementwerken nach (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).	102
Tabelle 9-5:	Werte zur Ermittlung der Dosis aus Direktstrahlung für Arbeitsplätze im Drehrohrofen. .	104
Tabelle 9-6:	Spezifischen Aktivitäten von Materialproben aus dem untersuchten Zementwerk (vgl. Anlage 1-WK-01.1.	105
Tabelle 9-7:	Beschreibung der Arbeitsplätze im Drehrohrofen mit Basisdaten zur arbeitsplatzbezogenen Expositionsabschätzung.	105
Tabelle 9-8:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv] für Beschäftigte bei der Durchführung von Wartungsarbeiten im Drehrohrofen.	106
Tabelle 9-9:	Beschreibung der Arbeitsplätze im Bereich Zyklon Vorwärmer mit Basisdaten zur arbeitsplatzbezogenen Expositionsabschätzung.	106
Tabelle 9-10:	Spezifischen Aktivitäten von Verbrennungsrückständen und Ablagerungen in Kohlekraftwerken. Daten aus (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).	107
Tabelle 9-11:	Abgeschätzte Dosiswerte aus der Wartung von Heizkesseln in Kohlekraftwerken. Daten aus (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).	108
Tabelle 9-12:	Tagesbezogene Expositionen von Beschäftigten bei Wartungsarbeiten.	110
Tabelle 10-1:	Angaben zur Radioaktivität in Rohstoffen und Prozessmaterialien der Schmelzreduktion in Bq/g.	118
Tabelle 10-2:	Angaben zur Radioaktivität in Rohstoffen, Prozessmaterialien und Abfällen der chemischen Zirkonoxidherstellung in Bq/g.	119
Tabelle 10-3:	Expositionsabschätzungen der Inhalationsdosen für Staubkonzentrationen in Zirkon Mahlanlagen (Literaturdaten nach (IAEA 2007)) unter Berücksichtigung von zwei Materialien.	121

Tabelle 10-4:	Spezifischen Aktivitäten von Prozessmaterialien der AZS Produktion.....	121
Tabelle 10-5:	Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 1).	123
Tabelle 10-6:	Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 2).	123
Tabelle 10-7:	Messwerte der Ortsdosisleistung bei der Herstellung von Zirkonoxid (Kontakt).....	123
Tabelle 10-8:	Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Herstellung von Zirkonoxid in Bq/g.	124
Tabelle 10-9:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 1).....	125
Tabelle 10-10:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 2).....	126
Tabelle 10-11:	Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien.	126
Tabelle 10-12:	Messwerte der Ortsdosisleistung bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien.	127
Tabelle 10-13:	Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Herstellung von Feuerfestmaterialien in Bq/g.....	127
Tabelle 10-14:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigte bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien.	128
Tabelle 10-15:	Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade beim Recycling von Feuerfestmaterialien.	129
Tabelle 10-16:	Messwerte der Ortsdosisleistung beim Recycling von Feuerfestmaterialien.	129
Tabelle 10-17:	Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Herstellung von Feuerfestmaterialien.	129
Tabelle 10-18:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigte beim Recycling von Feuerfestmaterialien.	130
Tabelle 11-1:	Erdöl- und Erdgasproduktion in Deutschland.	133
Tabelle 11-2:	NORM-Materialien in Anlagen zur Gewinnung von Erdöl und Erdgas nach (IAEA 2004b).	135
Tabelle 11-3:	Untersuchte Lokationen mit A) Anlagenkontaminationen oder B) sonstigen Auffälligkeiten.	137
Tabelle 11-4:	Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Reinigung von Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie.	140
Tabelle 11-5:	Luftstaub- und Langzeitstaubproben der Reinigung von Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie.	140
Tabelle 11-6:	Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte der Reinigung von Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie.	141
Tabelle 12-1:	Rückstandsmaterialien und zugehörige Materialtypen.	146
Tabelle 12-2:	Klassifikation der Expositionspfade bei der Lagerung von überwachungsbedürftigen Rückständen mit den in Tabelle 12-1 genannten Rückstandsmaterialien (Legende: 1 – höchste Relevanz bis 4 – geringste Relevanz; (n.r.) – nicht relevant).	147
Tabelle 12-3:	Szenarienbezogene Dosiskoeffizienten für die äußere Strahlenexposition und daraus errechnete spezifische Summenaktivitäten von gelagertem Rückstandsmaterial, bei deren Überschreitung die Bezugsdosis von 0,3 mSv bzw. 1 mSv überschritten sein kann.	149
Tabelle 12-4:	Szenarienbezogene Dosiskoeffizienten von Muster-Materialtypen (bezogen auf die Summenaktivität U-238max+Th-232max) für die Inhalationsdosis und daraus errechnete spezifische Summenaktivitäten (U-238max+Th-232max) von gelagertem Rückstandsmaterial, bei deren Überschreitung die Bezugsdosis von 0,3 mSv bzw. 1 mSv überschritten sein kann.	150
Tabelle 12-5:	Prüfwerte zur Abschätzung der Relevanz der Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände.	151
Tabelle 14-1:	Zusammenstellung der geschätzten Anzahl der Beschäftigten in Deutschland, für die eine Strahlenexposition nach § 55 StrlSchG zu prüfen ist und die, für die eine Anzeige nach § 56 StrlSchG möglich sein kann.	156

III **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2-1: Verhältnis der Dosis eines Säuglings durch Verzehr von Muttermilch zur Inhalationsdosis der Mutter für langlebige Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen.	24
Abbildung 2-2: Ingestionsdosen bei Tätigkeiten (Sensitivitätsprüfung).	25
Abbildung 4-1: Muster von Nuklidvektoren für NORM mit Angabe der U-235 Zerfallsreihe *) Faktor 21...31	31
Abbildung 4-2: Inhalationsdosiskoeffizienten bezogen auf die Gesamtalphaaktivität für unterschiedliche Muster-Materialtypen.	36
Abbildung 5-1: Fließschema der Tantalproduktion nach Schreiter (Schreiter 1962).	38
Abbildung 6-1: Normierte Nuklidanteile an Ablagerungen in Anlagen der Geothermie. Die beiden Säulen eines geologischen Herkunftsgebietes stehen für den jeweils höchsten und niedrigsten Werte der normierten Aktivität des Radionuklides.	51
Abbildung 6-2: Ergebnisse der Szenarienanalysen von Modellrechnungen aus (Brasser u. a. 2014).	54
Abbildung 7-1: Zeitliche Veränderung der Nuklidzusammensetzung in chemisch abgetrenntem Thorium (a) und daraus abgeleitete Veränderung der Dosisleistungskonstante (b) von 1 MBq chemisch abgetrenntem Th-232 im Gleichgewicht mit Th-228.	62
Abbildung 7-2: Zeitlicher Verlauf der normierten Gesamtaktivität von Rn-220 und seinen für die potentielle Alphaenergie relevanten Tochternukliden bei impulsartiger Freisetzung von Aktivität.	68
Abbildung 7-3: Normierte Radionuklidanteile von Thoriumnitrat und thoriertem Wolfram (Datenquelle: (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000)).	75
Abbildung 8-1: Im Schrott gefundene Konstruktionsteile mit W-Th-Legierungen (Elektroden zum Plasmaspritzen) und zugehörige Messdaten (Quelle: NCC).	83
Abbildung 8-2: Laufrad eines Turbinenteils mit Th-haltiger Ti-Legierung im Innenteil (gelber Pfeil). Foto: NCC.	85
Abbildung 8-3: Histogramm von Messwerten der Ortsdosisleistung in einem CNC-Raum zur Bearbeitung von thorierten Elektroden zur Lampenproduktion.	89
Abbildung 8-4: Dosisleistungen um Lagerbehälter mit Mg-Th-legierten Bauteilen von Flugzeugtriebwerken (Messungen: NCC Projekt).	90
Abbildung 9-1: Ergebnisse der Ortsdosisleistungsmessungen im Drehrohrofen (1 m oberhalb der Oberfläche und im Kontakt zum FF Material) im Vergleich zu Bereichen für die das FF Material nach dem Zustellplan bekannt und im Vorfeld auf Paletten gemessen wurde...103	103

IV Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Tätigkeitsfeldspezifische messtechnische Untersuchungen und Probenahmen
Anlage 1-NT-01.1: Tätigkeitsfeld NT, Betrieb 01, Untersuchung 1
Anlage 1-HA-01.1: Tätigkeitsfeld HA, Betrieb 01, Untersuchung 1
Anlage 1-WK-01.1: Tätigkeitsfeld WK, Betrieb 01, Untersuchung 1
Anlage 1-WK-01.2: Tätigkeitsfeld WK, Betrieb 01, Untersuchung 2
Anlage 1-WK-02.1: Tätigkeitsfeld WK, Betrieb 02, Untersuchung 1
Anlage 1-ZI-01.1: Tätigkeitsfeld ZI, Betrieb 01, Untersuchung 1
Anlage 1-ZI-02.1: Tätigkeitsfeld ZI, Betrieb 02, Untersuchung 1
Anlage 1-ZI-03.1: Tätigkeitsfeld ZI, Betrieb 03, Untersuchung 1
Anlage 1-EE-01.1: Tätigkeitsfeld EE, Betrieb 01, Untersuchung 1
Anlage 1-EE-01.2: Tätigkeitsfeld EE, Betrieb 01, Untersuchung 2
Anlage 1-EE-01.3: Tätigkeitsfeld EE, Betrieb 01, Untersuchung 3
- Anlage 2 Expositionsermittlungen an Arbeitsplätzen
Anlage 2-NT-01: Tätigkeitsfeld NT, Expositionsermittlung 01
Anlage 2-GT-01: Tätigkeitsfeld GT, Expositionsermittlung 01
Anlage 2-CA-01: Tätigkeitsfeld CA, Expositionsermittlung 01
Anlage 2-CA-02: Tätigkeitsfeld CA, Expositionsermittlung 02
Anlage 2-HA-01: Tätigkeitsfeld HA, Expositionsermittlung 01
Anlage 2-WK-01: Tätigkeitsfeld WK, Expositionsermittlung 01
Anlage 2-ZI-01: Tätigkeitsfeld ZI, Expositionsermittlung 01
Anlage 2-ZI-02: Tätigkeitsfeld ZI, Expositionsermittlung 02
Anlage 2-ZI-03: Tätigkeitsfeld ZI, Expositionsermittlung 03
Anlage 2-EE-01: Tätigkeitsfeld EE, Expositionsermittlung 01
- Anlage 3: Messergebnisse Gammaskpektrometrie der Hochschule Mannheim
- Anlage 4: Dokumentation der Umfrageergebnisse bei Landesämtern und Ministerien
Anlage 4.1: Anschreiben zur einheitlichen Abfrage der zuständigen Stellen
Anlage 4.2: Länderspezifische Anlage 1 zum Anschreiben an die zuständigen Stellen
Anlage 4.3: Schriftliche Antworten der zuständigen Stellen sofern vorhanden

V

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen für Tätigkeitsfelder

NT	Kürzel Tätigkeitsfeld: Aufbereitung von Niob/Tantal-erzen einschließlich der Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Polychlorerzen
GT	Tätigkeitsfeld: Betrieb und Wartung von Anlagen der tiefen Geothermie
CA	Tätigkeitsfeld: Verwendung von Thorium und Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide (sofern vorhanden) zu chemisch-analytischen oder zu chemisch präparativen Zwecken
HA	Tätigkeitsfeld: Handhabung, insbesondere Montage, Demontage, Bearbeiten und Untersuchen von Produkten aus thorierten Legierungen
WK	Tätigkeitsfeld: Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken
ZI	Tätigkeitsfeld: Verarbeitung von zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe
EE	Tätigkeitsfeld: Handhabung von Schlämmen und Ablagerungen, die bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas, in der tiefen Geothermie und bei Reinigungstätigkeiten von Anlagen und Einrichtungen anfallen
ÜR	Tätigkeitsfeld: Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände sowie Entfernung von radioaktiven Verunreinigungen von Grundstücken

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Umsetzung der Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 (Der Rat der Europäischen Union 2013) erfordert es, berufliche Strahlenexpositionen aus industriellen Tätigkeiten mit natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien (NORM) in einem Maße zu berücksichtigen, wie es durch die geltende Strahlenschutzverordnung (Deutscher Bundestag 2001a) (StrlSchV) in der Bundesrepublik Deutschland zum Teil noch nicht umgesetzt war. Um Kenntnisse über die zu erwartenden Strahlenexpositionen an Arbeitsplätzen mit NORM zu vervollständigen, sollten folgende Tätigkeitsfelder näher untersucht werden:

- 1) Aufbereitung von Niob/Tantal-erzen einschließlich der Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Polychlorerzen.
- 2) Betrieb und Wartung von Anlagen der tiefen Geothermie.
- 3) Verwendung von Thorium und Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide (sofern vorhanden) zu chemisch-analytischen oder zu chemisch präparativen Zwecken.
- 4) Handhabung, insbesondere Montage, Demontage, Bearbeiten und Untersuchen von Produkten aus thorierten Legierungen.
- 5) Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken.
- 6) Verarbeitung von zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe.
- 7) Handhabung von Schlämmen und Ablagerungen, die bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas, in der tiefen Geothermie und bei Reinigungstätigkeiten von Anlagen und Einrichtungen anfallen.
- 8) Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände sowie Entfernung von radioaktiven Verunreinigungen von Grundstücken.

Für die genannten Tätigkeitsfelder waren Arbeitsplätze auf dem Gebiet der Bundesrepublik zu identifizieren und entsprechend dem Profil der durchgeführten Arbeiten zu klassifizieren. Des Weiteren sollten für diese Arbeitsplätze

- mögliche Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen,
- das Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen für diese Expositionspfade und
- die Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten

ermittelt werden. Verschiedene Aufenthaltsorte, an welchen sich eine Person im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit aufhält, sollten mit der jeweiligen spezifischen Strahlenexposition und der Aufenthaltszeit berücksichtigt werden.

Soweit im Rahmen der Untersuchung weitere Tätigkeitsfelder mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung erkannt wurden, waren diese zu benennen.

2 Grundlagen und Untersuchungsansatz

2.1 Gesetzliche Anforderungen

Die in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen gingen von folgenden im StrlSchG formulierten Begriffen und Anforderungen aus.

Der § 4 Abs. 1 Satz Nr. 10 StrlSchG definiert Handlungen, die bei natürlich vorkommender Radioaktivität die Exposition oder Kontamination erhöhen können,

- a) soweit sie im Zusammenhang mit dem Aufsuchen, der Gewinnung, Erzeugung, Lagerung, Bearbeitung, Verarbeitung und sonstigen Verwendung von Materialien durchgeführt werden,
- b) soweit sie im Zusammenhang mit Materialien durchgeführt werden, die bei betrieblichen Abläufen anfallen, soweit diese Handlungen nicht bereits unter Buchstabe a fallen,
- c) soweit sie im Zusammenhang mit der Verwertung oder Beseitigung von Materialien durchgeführt werden, die durch Handlungen nach Buchstaben a oder b anfallen,
- d) soweit in ihrer Folge natürliche terrestrische Strahlungsquellen einwirken, ausgenommen die Exposition durch Radon, das aus dem Boden in die freie Atmosphäre austritt oder aus dem geogenen Untergrund herrührt und in Aufenthaltsräume eintritt, und soweit diese Handlungen nicht bereits unter die Buchstaben a bis c fallen und nicht zu einem unter Buchstabe a genannten Zweck erfolgen

als Tätigkeiten.

Im § 5 Nr. 7 StrlSchG werden Dosissschwellen für die beruflich exponierte Person festgelegt. Danach ist eine Person, die eine berufliche Exposition aus Tätigkeiten erhalten kann, die

- 1) eine effektive Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr überschreitet,
- 2) eine Organ-Äquivalentdosis für die Augenlinse von 15 Millisievert im Kalenderjahr überschreitet oder
- 3) eine Organ-Äquivalentdosis für die Haut, gemittelt über jede beliebige Hautfläche von 1 Quadratmeter unabhängig von der exponierten Fläche, von 50 Millisievert im Kalenderjahr überschreitet

als beruflich exponierte Person zu betrachten.

Bei Strahlenexpositionen durch natürlich vorkommende Radionuklide, deren Radioaktivität nicht genutzt wird, sind Expositionen, die die Schwellenwerte für die Organ-Äquivalentdosis für die Augenlinse oder die Organ-Äquivalentdosis für die Haut übersteigen praktisch auszuschließen. Beurteilungsrelevant ist daher ausschließlich die effektive Dosis.

Das StrlSchG fordert im § 55, dass derjenige, der in seiner Betriebsstätte eine Tätigkeit nach § 4 Abs. 1 Satz 1 Nummer 10 ausübt oder ausüben lässt, die einem der in Anlage 3 StrlSchG genannten Tätigkeitsfelder zuzuordnen ist, vor Beginn der Tätigkeit eine auf den Arbeitsplatz bezogene Abschätzung der Körperdosis durchzuführen hat. Die Abschätzung ist unverzüglich zu wiederholen, wenn der Arbeitsplatz so verändert wird, dass eine höhere Exposition auftreten kann.

In der Anlage 3 zum StrlSchG ist die Liste der Tätigkeitsfelder wie folgt neu gefasst:

1. Schleifen thorierte Schweißelektroden und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden,
2. Handhabung und Lagerung thorierte Gasglühstrümpfe,
3. Handhabung und Lagerung thoriumhaltiger Optikbauteile,
4. Verwendung von Thorium oder Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide, sofern vorhanden, zu chemisch-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken,
5. Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen, insbesondere Montage, Demontage, Bearbeiten und Untersuchen solcher Produkte,
6. Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Pyrochloreerzen,
7. Verwendung und Verarbeitung von Schlacke aus der Verhüttung von Kupferschiefererzen,
8. Aufarbeitung von Niob- und Tantalserzen,
9. Handhabung, insbesondere bei Wartungs- oder Reinigungstätigkeiten, von Schlämmen und Ablagerungen bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas sowie in der Tiefengeothermie,
10. Verarbeitung zirkonhaltiger Stoffe bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe,
11. Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken,
12. Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände und Entfernung von Kontaminationen von Grundstücken nach § 64 [StrlSchG].

Die Tätigkeitsfelder 3. und 9. bis 12. sind im StrlSchG zusätzlich zu den bereits in der StrlSchV genannten Arbeitsfeldern aufgeführt.

Mit dem Bezug auf die Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände verweist die o.g. Nr. 12 unmittelbar auf folgende Materialien:

- 1) Schlämme und Ablagerungen aus der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas und aus der Tiefengeothermie;
- 2) Kiese, Sande, Harze und Kornaktivkohle aus der Grundwasseraufbereitung;
- 3) nicht aufbereitete Phosphorgipse, Schlämme aus deren Aufbereitung sowie Stäube und Schlacken aus der Verarbeitung von Rohphosphat (Phosphorit);
- 4) Nebengestein, Schlämme, Sande, Schlacken und Stäube
 - a. aus der Gewinnung und Aufbereitung von Bauxit, Columbit, Pyrochlor, Mikrolyth, Euxenit, Kupferschiefer-, Zinn-, Seltene-Erden- und Uranerzen,
 - b. aus der Weiterverarbeitung von Konzentraten und Rückständen, die bei der Gewinnung und Aufbereitung dieser Erze und Mineralien anfallen;
- 5) Materialien, die den in Nummer 4 genannten Erzen entsprechen und die bei der Gewinnung und Aufbereitung anderer Rohstoffe anfallen;
- 6) Stäube und Schlämme aus der Rauchgasreinigung bei der Primärverhüttung in der Roheisen- und Nicht-eisenmetallurgie.

Da Rückstände im Sinne des StrlSchG auch ausgehobener oder abgetragener Boden und Bauschutt aus dem Abbruch von Gebäuden oder sonstigen baulichen Anlagen sind, wenn dieser Boden und Bauschutt Rückstände enthält und gemäß § 64 nach der Beendigung von Tätigkeiten oder gemäß § 141 von Grundstücken mit radioaktiven Altlasten sowohl im Zusammenhang mit Baumaßnahmen aber auch zum Zwecke der Sanierung entfernt werden, ist durch den Verweis in Anlage 3 Nr. 12 ein sehr breites Spektrum von Tätigkeitsfeldern unter dem Aspekt der Exposition von Beschäftigten zu betrachten.

Mit den zuvor beschriebenen Regelungen weitet das StrlSchG im Vergleich mit den Regelungen der StrlSchV 2001 seine Anforderungen auf bisher nicht benannte Tätigkeiten mit NORM aus und senkt die Dosischwelle für einen strahlenschutzrechtlichen Anzeigebedarf von derzeit 6 mSv im Kalenderjahr auf 1 mSv. Die daraus zu erwartenden Veränderungen im Hinblick auf die zu überwachenden Arbeitsplätze in Deutschland sollten mit der vorliegenden Arbeit abgeschätzt werden.

2.2 Untergesetzliches Regelwerk

2.2.1 Vorbemerkungen

Zur Abschätzung oder Ermittlung von Strahlenexpositionen aus Materialien mit natürlich vorkommenden Radionukliden hat das BfS mit der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) und den Berechnungsgrundlagen Bergbau (BfS 2010), abgekürzt BglBb, zwei untergesetzliche Regelwerke veröffentlicht. Mit der Richtlinie Arbeiten sollte das Verwaltungshandeln im Hinblick auf die Anforderungen vom Teil 3 Kapitel 1 und 2 StrlSchV bundeseinheitlich gestaltet werden. Außerdem sollten mit dieser Richtlinie den strahlenschutzfachlich nicht qualifizierten Verpflichteten aus Industrie und Gewerbe einfache Hilfen an die Hand gegeben werden, um für Arbeitsplätze aus ihrem Verantwortungsbereich Dosen abzuschätzen.

Im Unterschied dazu wurden die Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (BfS 2010) zur Ermittlung der Strahlenexposition in Interventionssituationen aufgrund bergbaulicher Hinterlassenschaften (bergbaubedingte Strahlenexposition) entwickelt. Sie sollten insbesondere angewandt werden bei der Beurteilung von Expositionssituationen im Zusammenhang mit

- der Nutzung, Stilllegung, Sanierung und Folgenutzung bergbaulicher Anlagen und Einrichtungen,
- der Nutzung, Sanierung und Folgenutzung anderer Grundstücke, die durch bergbauliche Anlagen und Einrichtungen kontaminiert wurden.

Beide Regelwerke sind aufgrund ihrer Anwendungsbereiche nicht unmittelbar geeignet, um damit die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Dosisabschätzungen vornehmen zu können. So sind z.B. die in der Richtlinie Arbeiten verwendeten Dosiskoeffizienten für die Inhalation auf nur zwei Materialtypen beschränkt. Durch die Fokussierung auf den Uranbergbau fehlen in den BglBb einige Parameterangaben für Radionuklide der Th-232-Zerfallsreihe und von Kalium-40.

Um einheitliche Grundlagen für die Abschätzung oder Ermittlung von Strahlenexpositionen ableiten zu können (s. Kapitel 4), sind in den folgenden Unterkapiteln die für die hier zu behandelnden Aufgaben wichtigsten

Inhalte beider Regelwerke zusammengestellt. Die dort enthaltenen Angaben reichen allerdings nicht aus, um ohne detaillierte Kenntnisse von konkreten Arbeitsplätzen Expositionsszenarien für die in dieser Arbeit zu behandelnden Tätigkeitsfelder zu beschreiben, wie sie z.B. für Erstabschätzungen benötigt werden. Aus diesem Grund wurden auch internationale Veröffentlichungen, insbesondere solche der Europäischen Kommission und der IAEA ausgewertet (s. Kapitel 2.3).

2.2.2 Richtlinie Arbeiten (2003)

In dieser Richtlinie werden zum einen Vorgehensweisen zur

- Abschätzung der Körperdosis bei Arbeiten, die einem Arbeitsfeld nach Anlage XI Teil B StrlSchV zuzuordnen sind

und zum anderen Vorgehensweisen

- zur Ermittlung der Körperdosis für Personen, die anzeigebedürftige Arbeiten ausüben,

festgelegt. Der Umfang von Untersuchungen und die Methoden der Dosisabschätzung bzw. -ermittlung bei Arbeiten im Sinne der StrlSchV sind in einem Leitfaden des BfS (Beck und Ettenhuber 2006) beschrieben.

Im Sinne des im StrlSchG angelegten Stufenkonzeptes zur strahlenschutzrechtlichen Überwachung dient die Abschätzung der Körperdosis zur Eingrenzung der Tätigkeiten, bei denen die Dosischwelle für eine berufliche Exposition überschritten sein kann, die Ermittlung der Körperdosis zur Festlegung von Maßnahmen zum Strahlenschutz und zur notwendigen Stufe der behördlichen Überwachung.

Anforderungen an die Abschätzung der Körperdosen

Nach den in (BMU 2003) bzw. (Beck und Ettenhuber 2006) enthaltenen Anforderungen, sind bei einer Abschätzung der Körperdosen bei den in der StrlSchV benannten Arbeitsfeldern (im Sinne des StrlSchG: Tätigkeitsfeldern)

- alle relevanten Expositionspfade zu betrachten
- alle im Verantwortungsbereich eines Verpflichteten vorkommenden Arbeitsplätze einzubeziehen und
- auch solche Arbeiten zu berücksichtigen, die im Laufe eines Kalenderjahrs anfallen, aber nicht in dem der Abschätzung zu Grunde gelegten Zeitraum durchgeführt wurden.

Als relevant für die Abschätzung der Strahlenexposition gelten nach (BMU 2003) alle Expositionspfade, die mehr als zehn Prozent zur Gesamtexposition beitragen. Explizit benannt werden die äußere Strahlenexposition und die Inhalation von Stäuben, Rauchen oder Aerosolpartikeln. Der Beitrag durch Ingestion liegt nach (BMU 2003) in der Regel unter zehn Prozent und kann daher außer Acht gelassen werden.

Nach den in der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) dargelegten Grundsätzen wird Radon nicht als Teil der Exposition von Beschäftigten, die Arbeiten in den Arbeitsfeldern der Anlage XI Teil B StrlSchV ausführen,

einbezogen. Für alle betrachteten Expositionen wird allerdings die Exposition durch Umgebungsstrahlung und Baumaterialien nicht als zu subtrahierender Teil der Gesamtexposition angesehen.

Da sich Arbeitnehmer im Laufe eines Jahres an unterschiedlichen Arbeitsorten aufhalten können, wird in (BMU 2003) darauf hingewiesen, dass als Arbeitsplatz die Gesamtheit aller Arbeitsorte zu verstehen ist, an denen ein Arbeitnehmer während eines Kalenderjahres beruflich tätig ist.

Nach den Darlegungen in (BMU 2003) soll die Abschätzung von Expositionen vorzugsweise auf Messungen beruhen. Dazu soll entweder die Körperdosis mit einem personengetragenen Messgerät gemessen werden oder es sollen für jeden Arbeitsort ortsspezifische Expositionsdaten erhoben werden, über deren (zeitgewichtete) Summe die Gesamtexposition der Person zu ermitteln ist. Derartige Messungen sind allerdings nur bei bereits ausgeführten Arbeiten (jetzt: Tätigkeiten) möglich. Daher sind nach Beck und Ettenhuber (2006) für die Abschätzung von Expositionen im Zweifelsfalle konservative Annahmen hinsichtlich der Expositionsbedingungen zulässig. Dafür sind die für jeden Arbeitsplatz des Beschäftigten ungünstigsten Expositionsszenarien heranzuziehen.

Die Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) gestattet den zuständigen Behörden, auch Abschätzungen anzuerkennen, die auf der Grundlage der spezifischen Aktivität der Materialien oder von sonstigen Daten, die für eine Bewertung der Strahlenexpositionen an dem betreffenden Arbeitsplatz relevant und hinreichend sind, durchgeführt wurden.

Als ein pauschales Kriterium für eine effektive Dosis von weniger als 6 mSv im Kalenderjahr bei Arbeiten nach Anlage XI Teil B StrlSchV wird eine Summe der jährlich aufgewendeten Zeit für die Arbeiten von weniger als 50 Stunden angegeben.

Anforderungen an die Ermittlung von Körperdosen

Die Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) fordert zur Ermittlung der Körperdosis bei anzeigebedürftigen Arbeiten (jetzt: Tätigkeiten) Messungen durchzuführen. Als zu messende Größen werden

- die Ortsdosis oder die Ortsdosisleistung und
- die Konzentration radioaktiver Stoffe in der Atemluft der Beschäftigten

benannt. Mit Messungen der Konzentration radioaktiver Stoffe in der Atemluft soll die für den Arbeitsplatz repräsentative Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration ermittelt werden.

Bei hohen Expositionen (effektive Dosis über 15 mSv im Kalenderjahr, davon über 6 mSv durch innere Exposition) soll eine Ermittlung der inneren Strahlenexposition auch durch Ermittlung der Körperaktivität oder der Aktivität der Ausscheidung erfolgen.

In der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) sind auch Anforderungen an die Messgeräte und die Formeln zur Berechnung von Dosen beschrieben.

2.2.3 Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb)

In den BglBb werden der:

- Aufenthalt in Gebäuden (Wohngebäude, Betriebsgebäude),
- Aufenthalt an unterirdischen Arbeitsplätzen (nur Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten),
- Aufenthalt im Freien,
- Verzehr von Muttermilch und lokal erzeugter Lebensmittel (pflanzliche und tierische Produkte sowie Wasser)

als Expositionsszenarien explizit aufgeführt. Diese Szenarien schließen die Exposition von Beschäftigten aber auch von Personen der Bevölkerung ein.

In der Praxis haben sich diese Berechnungsgrundlagen auch zur Abschätzung von Strahlenexpositionen als anwendbar erwiesen, die zum Zwecke der Entlassung von überwachungsbedürftigen Rückständen nach § 98 StrlSchV nach den Grundsätzen der Anlage XII Teil D bestimmt werden müssen. Auch bei der Sanierung von radioaktiven Hinterlassenschaften nicht bergbaulicher Herkunft wurden sie herangezogen (Gellermann, Günther, und Evers 2012).

Die BglBb enthalten Modelle zur Berechnung von Dosen der Expositionspfade:

- Äußere Exposition durch Gammastrahlung des Bodens,
- Exposition durch Inhalation von Staub,
- Exposition durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten,
- Exposition durch Ingestion von Muttermilch und lokal erzeugter Lebensmittel (Trinkwasser, Fisch, Milch und Milchprodukte, Fleisch und Fleischwaren, Blattgemüse, sonstige pflanzliche Produkte),
- Exposition durch Direktingestion von Boden.

Durch die in den BglBb vorgegebenen Standardparameter wird eine realistisch-konservative Modellierung angestrebt. Für die Prüfung der Einhaltung der Dosisgrenz- bzw. Dosisrichtwerte wird zunächst eine vereinfachte Prüfung ohne Berücksichtigung der natürlichen Expositionsanteile durchgeführt. Wird dabei eine Überschreitung für eine Referenzperson festgestellt, wird eine erneute Prüfung unter Abgrenzung der bergbaubedingten von der natürlichen Umweltradioaktivität vorgenommen. Dies erfolgt durch Abzug der allgemeinen Werte für die Berücksichtigung der spezifischen natürlichen Untergrund-Aktivität bzw. –Aktivitätskonzentration. Allerdings sind standortspezifische Werte den allgemeinen Werten der Umweltradioaktivität vorzuziehen. Die in Tabelle 2-1 zusammengestellten Werte enthalten einen Auszug der Standardparameter der realistisch-konservativen Modellierung und der allgemeinen Werte der Umweltradioaktivität nach BglBb (BfS 2010).

Tabelle 2-1: Auszug der Standardparameter der realistisch-konservativen Modellierung und der allgemeinen Werte der Umweltradioaktivität nach BglBb (BfS 2010)

Expositionspfad	Parameter	Werte
	Expositionsorte	Unterirdische Arbeitsplätze, Betriebsgebäude und Betriebsflächen im Freien
	Aufenthaltszeit	Realistische Zeiten bis 2000 h
Äußere Exposition (bis 20 m von Anlagen)	Konversionsfaktor für die Umrechnung der spezifischen Aktivität des Bodens (Uran-Radium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht) in die Umgebungsäquivalentdosisleistung im Freien in 1 m Höhe	$g_{ext} = 5,3 \cdot 10^{-10} \text{ Sv kg Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$
	Umrechnungsfaktor f_{kon}	0,6
	Abschirmwirkung $a_{x,s}$	Freifläche: 1 Massivbau: 0,1 Leichtbau: 0,3
Inhalation von Staub (bis 100 m von Anlagen)	Referenzwert der Schwebstaubkonzentration:	0,05 mg/m ³
	technischen Referenzwertes der Schwebstaubkonzentration von S-Staub aus der spezifischen Aktivität des Bodens	0,5 mg/m ³
	Aufkonzentrierungsfaktor, der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivitäten des Radionuklids r der Staubfraktion und der Gesamtprobe beschreibt	$AF_{0,02,r} = 4$ $AF_{0,05,r} = 2$
	Atemrate V	1,2 m ³ /h
Inhalation Radon	Ausschlusskriterium für bergbaubedingtes Rn-222	5 Bq/m ³ (15 Bq/m ³ bei Annahme von 10 Bq/m ³ als Hintergrundwert)
Ingestionsrate	Bodenaufnahmerate U_{Bo}	6 mg/h

2.3 Internationale Arbeiten

In den vergangenen 20 Jahren wurde eine Vielzahl an wissenschaftlichen Arbeiten publiziert, die sich mit der Strahlenexposition von Beschäftigten in NORM-Industrien befassen. Wichtige Arbeiten sind u.a. in den Proceedings zu den NORM-Tagungen enthalten (International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material und International Atomic Energy Agency 2005; International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008; International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material u. a. 2011; International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material und IAEA 2015; International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material 1997, 1998, 2001). Im Zusammenhang mit der Einführung von Regelungen zum Strahlenschutz bei natürlich vorkommenden Radionukliden (NORM) wurden in der Europäischen Union bereits in den 1990er Jahren diverse Studien zur Strahlenexposition von Beschäftigten ausgeführt (European Commission u. a. 1999; European

Commission 1999). Zur Ableitung von Referenzwerten wurden die in Tabelle 2-2 aufgeführten Parameter benutzt.

Tabelle 2-2: Expositionsannahmen für drei arbeitsplatzbezogene Expositionssituationen nach (Penfold u. a. 1999). Abkürzungen: W – Parameterwerte bilden wahrscheinliche Bedingungen ab; U – Parameterwerte bilden unwahrscheinliche Bedingungen ab.

Expositions-pfad	Parameter		Arbeiter an Hal-den oder Lager-beständen	Scales und stau-bige Rückstände	Ablagerungen in Rohren und Kesseln
	Strahlenquelle		100 bis 1000 m ³	1 m ³	100 m ³
Äußere Exposi-tion	Expositionszeit	W	400 h	100 h	400 h
		U	1000 h	400 h	2000 h
	Abstand		1 m	1 m	1 m
	Abschirmung		Keine	keine	5 mm Eisen
Inhalation (Staub, Aero-sole)	Expositionszeit	W	2000 h	100 h	keine
		U		400 h	
	Staubkonzentration / Aerosolkonzentra-tion	W	1 mg/m ³	10 mg/m ³ (Staub), 1 mg/m ³ (Pb, Po)	
		U	5 mg/m ³		
	Faktor Staubreduk-tion	W	0 %	50 %	
Inhalation (Ra-don)	Expositionszeit	W	2000 h	100 h	
		U		400 h	
	Luftwechselrate (La-gerhalle)	W	0,5-fach/h	0,5-fach/h	
		U	0,25-fach/h	0,25-fach/h	
	Raumgröße		4-faches Volu-men des Materi-als sofern größer als 100 m ³		
Ingestion	Expositionszeit		2000 h	100 h	keine
				400 h	
	Staubingestion	W	1,25 mg/h	5 mg/h	
		U	3,75 mg/h		
	Faktor Staubreduk-tion	W	0 %	50 %	

Durch die IAEA werden seit längerem wissenschaftliche Arbeiten und Praxiserfahrungen zu NORM ausge-wertet, um daraus Empfehlungen zum Strahlenschutz abzuleiten. In einer Serie von Safety Reports sind die radioaktiven und strahlenschutzseitigen Aspekte von NORM-Industrien beschrieben (IAEA 2007, 2004a,

2006, 2004b). In der verschiedene Industrien betrachtenden Veröffentlichung (IAEA 2006) sind Expositionsszenarien für Arbeiten mit diversen Materialien untersucht und daraus Kenngrößen ermittelt. In Tabelle 2-3 sind Dosiskoeffizienten aufgeführt, die bei der Abschätzung von möglichen Expositionen aus Werten der spezifischen Aktivität herangezogen werden können.

Tabelle 2-3: Auswahl an Dosiskoeffizienten für die Direktstrahlung großer und kleiner Materialmengen nach (Internationale Atomenergie-Organisation 2006)

Große Materialmengen	Ra-226+		Ra-228+		Th-228+		Gesamt
	[Bq/g]	µSv/h per Bq/g	[Bq/g]	µSv/h per Bq/g	[Bq/g]	µSv/h per Bq/g	
Zinn-Schlacke	1	0,40	0,7	0,22	0,7	0,38	0,82
Zirkonsande	1	0,37	0,1	0,20	0,1	0,35	0,43
Kleine Materialmengen	Ra-226+		Ra-228+		Th-228+		Gesamt
	[Bq/g]	µSv/h per Bq/g	[Bq/g]	µSv/h per Bq/g	[Bq/g]	µSv/h per Bq/g	
Filtertücher der Phosphorgipsherstellung	1	0,062	0,09	0,033	0,03	0,059	0,067
Zirkonhaltiges Material in der Feuerfestproduktion	1	0,058	0,13	0,031	0,1	0,055	0,068
Rückstände der Selten Erden Extraktion aus Rohstoffen	0,1	0,052	1	0,029	1	0,050	0,084
Ce Konzentrate (Glaserstellung)	0,05	0,062	1	0,034	1	0,058	0,095
Ablagerungen (Scale) in der TiO ₂ Pigmentproduktion	0,3	0,046	1	0,026	1	0,041	0,081
Scale und Schlamm der Erdöl- bzw. Erdgasproduktion	1	0,053	0,1	0,029	0,07	0,052	0,060

2.4 Bewertung im Hinblick auf die Untersuchungen dieser Arbeit

Die in der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) bzw. den dazu gehörenden Leitfaden (Beck und Ettenhuber 2006) etablierten Vorgehensweisen und Verfahren zur Umsetzung der Regelungen nach § 95 StrlSchV enthalten mit den Elementen

- Abschätzung von Strahlenexpositionen und
- Ermittlung von Strahlenexpositionen

einen stufenweisen Ansatz, der für die Beurteilung von Tätigkeiten geeignet ist, die den Tätigkeitsfeldern der Anlage 3 StrlSchG zuzuordnen sind. Dabei sollte die Abschätzung mit konservativen Parameterannahmen ermitteln, ob die Dosischwelle von 1 mSv im Jahr überschritten sein **kann**, die Ermittlung mit realistischen Parametern prüfen, wie hoch die Exposition tatsächlich **ist**. Im Rahmen dieses abgestuften Konzeptes ergeben sich aber aus dem bisher praktizierten Vorgehen einige Sachfragen, die für das in dieser Arbeit genutzte Vorgehen wie in Folgenden dargestellt, beantwortet wurden.

Berücksichtigung der Hintergrundexposition

Die bisher zur Anwendung empfohlene Vorgehensweise hob darauf ab, die gesamte bei der Berufsausübung erhaltene Strahlenexposition inklusive der natürlichen oder durch Baustoffe bedingten Exposition von Beschäftigten zu berücksichtigen. Dieser konservative Ansatz führt bei einer Aufenthaltszeit an Arbeitsplätzen von 2000 Std. im Jahr auf ca. 0,2 mSv äußere Strahlenexposition durch die allgemeine Hintergrundstrahlung. Zusätzlich ist bei einem (normalen) Hintergrund in Innenräumen von 50 Bq/m³ Rn-222 ggf. mit 0,6 mSv an Radonexposition zu rechnen. In Relation zur Dosischwelle von 6 mSv sind diese Werte von geringerer Bedeutung und konnten als konservativ-abdeckender Rahmen für den Strahlenschutz der Beschäftigten angesehen werden. Bei einer Dosischwelle von 1 mSv im Kalenderjahr können sich daraus aber Vorbelastungen ergeben, die den gesetzlich geforderten Strahlenschutz von der geografischen Lage eines Betriebes abhängig machen.

In dieser Untersuchung gehen wir daher davon aus, dass die zusätzliche Exposition durch die in Anlage 3 StrlSchG im Zusammenhang mit den Tätigkeitsfeldern benannten Materialien als bewertungsrelevante Größe zu betrachten ist. Wird die aus diesen Materialien resultierende Exposition ohne Berücksichtigung einer standorttypischen Radioaktivität und Strahlung am Ort der Tätigkeit abgeschätzt und unterschreitet diese den Schwellenwert des § 4 Abs. 1 Nr. 7 StrlSchG von 1 mSv im Kalenderjahr, dann kann, wie in den BglBb vorgesehen, ohne weitere Prüfung von der Einhaltung der relevanten Dosiswerte ausgegangen werden. Als entscheidendes Kriterium für die Einstufung einer Tätigkeit wird allerdings die effektive Dosis angesehen, die nach Abzug der standorttypischen Werte der Radioaktivität und Strahlung verbleibt.

Da davon ausgegangen werden kann, dass standorttypische Werte der Radioaktivität und Strahlung bei Expositionszeiten von unter 100 Std. im Jahr nur zu Dosen im Bereich von einigen 10 µSv führen, kann bei Beschäftigten, die weniger als 100 Std. im Kalenderjahr Tätigkeiten ausführen, die den Tätigkeitsfeldern der Anlage 3 StrlSchG zuzurechnen sind, der Hintergrundwert der Exposition in der Regel außer Acht gelassen werden.

Berücksichtigung von Radon(isotopen)

In der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) wurde eine Exposition durch Radon an Arbeitsplätzen nur für die Arbeiten, die den Arbeitsfeldern der Anlage XI Teil A StrlSchV zugehörig waren, berücksichtigt. Bei Arbeiten nach Anlage XI Teil B StrlSchV wurde eine Radonexposition nicht betrachtet.

Der grundsätzliche Ausschluss von Radon bei der Abschätzung oder Ermittlung von Expositionen bei Tätigkeiten mit NORM wird allerdings aus den folgenden Gründen für nicht sachgerecht erachtet:

- Radon kann auch in geringen Konzentrationen in erheblichem Maße zur Inhalationsdosis beitragen. Der im § 126 StrlSchG genannte Referenzwert bezieht sich auf bestehende Expositionssituationen (Teil 4 StrlSchG). Die Exposition durch Radon aus geplanten Tätigkeiten ist in die Regelungen des Teils 4 StrlSchG nicht einbezogen.
- Die im StrlSchG enthaltenen Regelungen zum Radon beziehen sich gemäß § 5 Abs. 28 nur auf das Radionuklid Rn-222 und dessen Zerfallsprodukte. Die in den Tätigkeitsfeldern nach Anlage 3 StrlSchG genannten Materialien sind aber vielfach durch Thorium und seine Zerfallsprodukte dominiert. Eine Exposition durch das aus diesen Materialien ggf. freigesetzte Rn-220 bei Tätigkeiten bedarf einer eigenen Prüfung und Bewertung.
- Einige der in der Anlage 3 StrlSchG genannten Tätigkeitsfelder (Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Pyrochlorerzen, Aufarbeitung von Niob- und Tantalserzen, Entfernung von Kontaminationen von Grundstücken) können große Mengen von radiumhaltigem Material betreffen. Vor allem aber im Tätigkeitsfeld „Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände“, das durch die Rückstandsdefinition nach Anlage 1 StrlSchG auch Nebengestein des Uranbergbaus einbezieht, ist nach langjähriger Praxis die Beurteilung von Radonexpositionen ein wesentlicher Teil radiologischer Gefahrenbeurteilungen.

In Fällen, in denen die Materialien, die als Träger der Radioaktivität in Anlage 3 StrlSchG benannt sind, Radonisotope in relevanten Mengen freisetzen (können), sollte daher auch die innere Exposition durch Radon betrachtet werden. Anknüpfend an die bisherigen Vorgehensweisen ist ein Ausschluss von Radonisotopen aus der Exposition sachgerecht, wenn hinreichend plausibel gezeigt werden kann, dass der Dosisbeitrag, des aus den Materialien stammenden Radons unter 10 % der gesamten effektiven Dosis einer Tätigkeit beträgt.

Berücksichtigung des Expositionspfades Muttermilch

Die in den BgIBb enthaltene Exposition durch Ingestion von lokal erzeugten Lebensmitteln ist für die Ermittlung von arbeitsplatzbezogenen Expositionen ohne Bedeutung. Allerdings kann, wie in (Beck und Ettenhuber 2006) ausgeführt wird, nicht ausgeschlossen werden, dass es durch die bei Arbeiten inkorporierten langlebigen Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen zu einer Strahlenexposition des ungeborenen Kindes oder die Aufnahme von Radioaktivität durch ein Kind über die Muttermilch kommt. Um diese Exposition zu begrenzen, soll nach (Beck und Ettenhuber 2006) bei solchen Arbeiten die innere berufliche Strahlenexpositionen von schwangeren oder stillenden Frauen durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen werden. Da Maßnahmen, die eine Aufnahme von Radioaktivität grundsätzlich ausschließen auf einen

Einsatz der betreffenden Frauen an anderen Arbeitsplätzen hinauslaufen, sind sie vor dem Hintergrund eines Gleichbehandlungsgebotes erst gerechtfertigt, wenn durch geeignete Abschätzungen nachgewiesen wurde, dass eine solche Maßnahme zum vorbeugenden Gesundheitsschutz für Mutter und Kind beiträgt.

Da die Exposition des Kleinkindes über den Pfad Muttermilch als Folge der Inhalation von Staub direkt mit der Inhalationsdosis der Mutter korreliert, kann einfach abgeschätzt werden, bei welchen Inhalationsdosen eine Exposition des Kleinkindes von 1 mSv im Jahr auftreten kann. Aus den Modellen der BglBb ergibt sich für ein Radionuklid „r“ als Verhältnis der Ingestionsdosis des Säuglings $E_{Ing,MM}$ zur Inhalationsdosis der (beruflich exponierten) Mutter $E_{Inh,Besch}$ die Beziehung

$$\frac{E_{Ing,MM}}{E_{Inh,Besch,r}} = \frac{200 [l/a] \cdot T_{MM,Inh,r} [d/kg]}{360 [d/a]} \cdot \frac{g_{Ing,<1a,r}}{g_{Inh,Besch,r}}$$

In der vorstehenden Gleichung sind $T_{MM,Inh,r}$ der Transferkoeffizient für den Radionuklidtransfer von der inhalierten Aktivität in die Muttermilch, $g_{Ing,<1a}$ der Ingestionsdosiskoeffizient für den Säugling und $g_{Inh,Besch}$ der Inhalationsdosiskoeffizient der Mutter.

In Abbildung 2-1 sind für die langlebigen Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen die Verhältniswerte Ingestionsdosis eines Säuglings als Folge des Verzehrs von Muttermilch ($E_{Ing,MM}$) zu Inhalationsdosis der Mutter (E_{inh}) berechnet mit den Dosiskoeffizienten der Beschäftigten nach BglBb dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass durch die Inhalation von Staub, in dem Ra-228 oder Pb-210, Po-210 dosisbestimmend sind, die Dosis des Säuglings bis zu ca. 2-fach höher ausfallen kann als die Inhalationsdosis der Mutter.

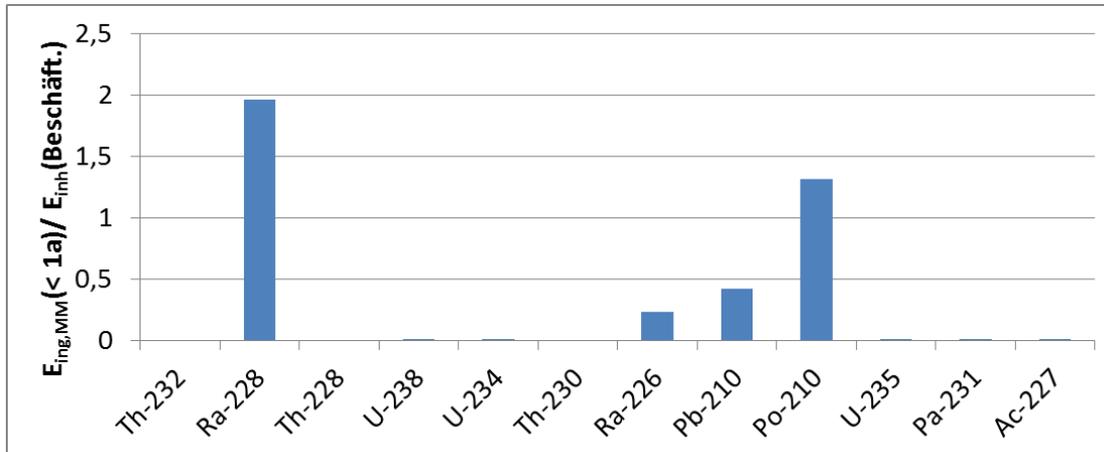


Abbildung 2-1: Verhältnis der Dosis eines Säuglings durch Verzehr von Muttermilch zur Inhalationsdosis der Mutter für langlebige Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen.

Da der Maßstab für die Exposition eines Säuglings nicht an der Dosischwelle für berufliche Exposition, sondern ggf. am Dosisgrenzwert für Einzelpersonen der Bevölkerung orientiert werden muss, sind die daraus resultierenden Konsequenzen grundsätzlicher Art und übersteigen den Rahmen dieser Arbeit. Die Exposition eines Säuglings als Folge der Staubinhalation einer Mutter wird daher in dieser Arbeit nicht auf die Bewertung von Messergebnissen angewandt. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass, sofern andere als

die drei genannten Radionuklide in signifikantem Maße zur Dosis beitragen, die Exposition des Radionuklidgemisches über den Muttermilchpfad stets niedriger ausfällt als die Inhalationsdosis der Mutter.

Berücksichtigung der Ingestion

In der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) wird davon ausgegangen, dass die Ingestion als Expositionspfad generell außer Acht gelassen werden kann. Grundlage dieser Einschätzung waren die in der Richtlinie Arbeiten betrachteten Materialien, die vorwiegend einem thoriumhaltigen Produkt (Materialtyp M6 (Th)) zugeordnet werden konnten. Um zu prüfen, wie weit diese Annahme auch für die gesamte Palette der hier zu betrachtenden NORM zutrifft, wurde für die in Abbildung 4-1 dargestellten Nuklidvektoren unter Verwendung der Bodenaufnahmerate nach BglBb von 0,06 g/h und einem Anreicherungsfaktor von 2 Ingestionsdosen bei Tätigkeiten errechnet. In Abbildung 2-2 sind die erhaltenen Ergebnisse in Abhängigkeit von der Expositionszeit dargestellt.

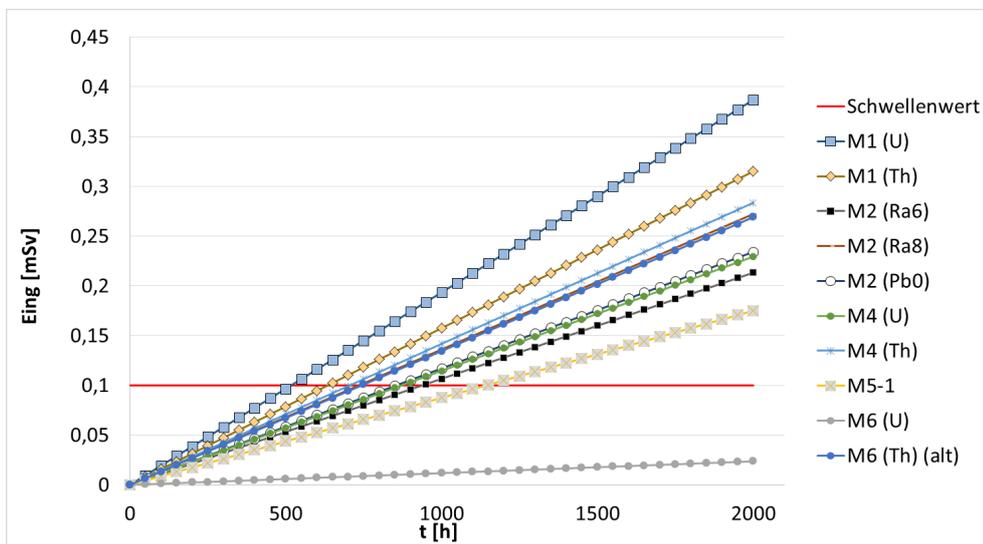


Abbildung 2-2: Ingestionsdosen bei Tätigkeiten (Sensitivitätsprüfung).

Das Diagramm zeigt, dass mit den Standardwerten für die Parameter Bodenaufnahme und Anreicherungs-faktor die Ingestion unabhängig vom Materialtyp nicht ausreicht, um bei beruflichen Tätigkeiten Expositionen im Bereich von 1 mSv im Kalenderjahr zu erreichen. Ab Expositionszeiten von etwas mehr als 500 h im Jahr kann die Ingestionsdosis eines Beschäftigten allerdings 10 % des beurteilungsrelevanten Wertes von 1 mSv im Kalenderjahr übersteigen.

Abschneidekriterium

Wie im Kapitel 2.2.2 ausgeführt, wird in der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) als ein pauschales Kriterium für das außer Acht lassen von Expositionen eine Summe der jährlich aufgewendeten Zeit für die expositionsrelevanten Arbeiten von weniger als 50 Stunden angegeben. Da sich diese Zeit allerdings auf eine effektive Dosis von weniger als 6 mSv im Kalenderjahr bezieht, wäre als Zeitkriterium einer beruflichen Exposition

von 1 mSv im Kalenderjahr eine Expositionszeit von unter 8 Stunden im Kalenderjahr heranzuziehen. Diese Zeit ist wiederum so gering und in Anbetracht von Unsicherheiten, die bei der Bestimmung von Expositionszeiten unter Praxisbedingungen bestehen, so unsicher, dass ein allein auf die Expositionszeit bezogenes Abschneidekriterium nicht sinnvoll erscheint.

3 Erfahrungen mit der Umsetzung von § 95 i.V. mit Arbeitsfeldern nach Anlage XI Teil B StrISchV

3.1 Recherchen bei Landesämtern und Ministerien

Zur Abfrage der bereits vorliegenden Erfahrungen mit Arbeitsplätzen nach Anlage XI Teil B StrISchV wurden Rechercheanfragen an Ministerien und Landesämter gestellt. Es wurde außerdem um Weiterleitung an die zuständigen Fachabteilungen innerhalb der zuständigen Landesämter und Ministerien gebeten. Zur einheitlichen Bezeichnung werden die unterschiedlichen Fachabteilungen als „zuständige Stellen“ bezeichnet.

Inhaltlich wurde die Rechercheanfrage an die zuständigen Stellen mit einem einheitlichen Fragebogen (Anlage 4.1) durchgeführt. Darin wurden Fragen zu Unternehmen, Arbeitsplätzen, typischen Expositionssituationen und zur Erhebung von Messwerten und Dosisermittlungen gestellt. Länderspezifisch wurde außerdem eine Anlage erstellt, die eine Auflistung der Tätigkeitsfelder und eine Auflistung der Vorkenntnisse zu Betrieben (in anonymer Form) enthielt (Anlage 4.2).

Die Auswertung der erhaltenen Antworten von den zuständigen Stellen (Anlage 4.3) zeigt für Gesamtdeutschland folgende Bedingungen auf:

- Einige Betriebe, die den Arbeitsfeldern nach Anhang XI Teil B StrISchV zuzurechnen sind, sind den zuständigen Stellen bekannt.
- Sofern eine Anzeigepflicht durch Überschreiten des Dosisgrenzwertes von 6 mSv im Kalenderjahr liegen entsprechende Anzeigen vor.
- Zusammenfassende Erkenntnisse über die Anzahl der Betriebe mit Expositionen unter 6 mSv / Kalenderjahr aber oberhalb von 1 mSv / Kalenderjahr liegen nicht vor, da aufgrund der fehlenden Anzeigepflicht keine Informationen an die zuständigen Stellen übermittelt werden.

Soweit die Antworten konkrete Angaben zu einzelnen Tätigkeitsfeldern und zugehörigen Betrieben enthielten, sind diese Angaben in den Untersuchungen zu den betreffenden Tätigkeiten mit ausgewertet worden.

Vom Landesamt für Umwelt des Freistaats Bayern wurden die folgenden umfassende Untersuchungen zu NORM-Exponierten Arbeitsplätzen mit Expositionsabschätzungen durchgeführt:

- Untersuchung natürlich radioaktiver Materialien (NORM) (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015)
- Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und Überwachungsbedürftige Rückstände (Mallik 2004)
- Innere Strahlenexposition beim Umgang mit thoriumhaltigen Materialien (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000)

In diesem Bericht wurden von den Untersuchungen des LfU gezielt die in der Richtlinie 2013/59/Euratom genannten und bisher durch die Anlage XI Teil B StrISchV nicht erfassten Tätigkeitsfelder mit ausgewertet.

3.2 Recherchen bei Branchenverbänden und Unternehmen

Für die Verbände und Unternehmen wurden tätigkeitsfeldspezifische Fragebögen erstellt, in welchen die allgemeinen Branchen-Informationen abgefragt wurden. Außerdem wurde abgefragt, ob eigene Messungen im Hinblick auf NORM-Exposition an Arbeitsplätzen durchgeführt wurden und ob die Arbeiten, die potentiell von NORM-Exposition betroffen sind, überwiegend von Beschäftigten der Anlagen selbst oder von Fremdfirmen ausgeführt werden.

Angefragt wurden folgende Verbände:

- Bundesverband Geothermie
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VdZ)
- VGB Powertech
- Verband der Deutschen Feuerfest-Industrie e.V. (VDFFI)
- Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V. (DGFS)
- Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)

Die erhaltenen Antworten der Verbände zeigen, dass dort teilweise Kenntnisse zu Arbeitsplätzen mit Strahlenexpositionen aus NORM vorhanden sind. Allerdings wurden von keinem der angefragten Verbände eigene Untersuchungen hinsichtlich der arbeitsplatzbezogenen effektiven Dosis für Beschäftigte bereitgestellt. Die verwertbaren Informationen aus der Befragung der Verbände wurden in den tätigkeitspezifischen Untersuchungsergebnissen ausgewertet.

4 Konzeptioneller Untersuchungsansatz zum Messprogramm

4.1 Allgemeine Konzeption des Untersuchungsprogramms

Angelehnt an das Stufenkonzept der Richtlinie 2013/59/Euratom und seiner Umsetzung im StrlSchG wurde das Untersuchungsprogramm dieser Studie mit einem zweistufigen Ansatz konzipiert. In einer ersten Stufe wurde auf der Grundlage von allgemein verfügbaren Kenntnissen eine konservative Abschätzung von Strahlenexpositionen vom Beschäftigten vorgenommen, um zu ermitteln, welche Strahlenexposition bei den Beschäftigten **aufreten können**. Dazu wurden zunächst aus einer Analyse von Prozessen heraus die für bestimmte Tätigkeiten relevanten Expositionspfade ermittelt. Zur Abschätzung von Dosen aus NORM Exposition wurden, soweit anwendbar, auf die im Kapitel 2 zusammengestellten Kenngrößen von Prozessen zurückgegriffen.

Als relevante Expositionspfade wurden berücksichtigt:

- Direktstrahlung
- Inhalation von Staub
- Inhalation von Radon
- Ingestion

Für die Expositionsabschätzung wurden die folgenden Basisdaten für die jeweils untersuchten Arbeitsplätze und die Beschäftigten erhoben oder abgeschätzt:

- Typische Ortsdosisleistungen,
- Typische Staubkonzentrationen,
- Aufenthaltszeiten, Schichtplan, Jahresarbeitszeit,
- Regelmäßigkeit der Tätigkeit, weitere Tätigkeiten mit NORM Expositionen,
- Typische Schutzausrüstung und weitere arbeitsplatzbezogene Gepflogenheiten.

In einer zweiten Stufe wurden konkrete Untersuchungen in ausgewählten Betrieben durchgeführt, um auf Basis gezielt erhobener Daten, realistische Strahlenexpositionen zu ermitteln. Die messtechnischen Untersuchungen wurden, wenn möglich, an Arbeitsplätze in den jeweiligen Tätigkeitsfeldern durchgeführt. Die Kenntnisse über die Arbeitsplätze wurden durch Recherchen und Vorgespräche mit Branchenverbänden und Mitarbeitern der jeweiligen Unternehmen erweitert und sowohl bei der Planung der Messungen als auch bei der durchzuführenden Expositionsermittlung berücksichtigt. Die messtechnischen Untersuchungen sind in Anlage 1 zusammengefasst, die Expositionsermittlungen in Anlage 2.

4.2 Messungen und messtechnische Ausstattung

Die messtechnischen Untersuchungen an Arbeitsplätzen wurden mit mobilen Messgeräten ausgeführt. Angaben zu den verwendeten Geräten sind in Tabelle 4-1 dokumentiert. Die Messungen wurden an den relevanten Expositionspfaden orientiert durchgeführt. Für die Abschätzung von Expositionen aus Direktstrahlung wurde die Ortsdosisleistung $H^*(10)$ mit einem für den Niedrigdosisbereich kalibrierten und in

Vergleichsmessungen des BfS überprüften Ortsdosisleistungsmessgerät (ODL-Messgerät) durchgeführt. Mit einem Kontaminationsmonitor (CoMo) wurden die Impulse der γ , β - und der α -Zerfälle gemessen. Zur Vor-Ort-Identifikation von Radionukliden wurde ein 2" NaI Gammaskpektrometer (RIIDEye) verwendet. Außerdem waren in Einzelfällen elektronische Dosimeter zur Ermittlung der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ im Einsatz.

Die Staubmessungen wurden mit dem stationären Luftstaubsammler (RADeCO H-810) durchgeführt. Der Luftstaub wurde auf einen Glasfaserfilter gezogen und nach der Beladung in einem geeigneten Gefäß verpackt. Die Massenbestimmung der Filterbeladung (Staub) erfolgte mit einer Laborwaage. Da sich die Staubuntersuchungen vor Ort auf zeitlich kurze Einsätze beschränkten, sind die dabei ermittelten Staubkonzentrationen nur als Anhaltspunkt für die bei den betreffenden Tätigkeiten typischen Staubkonzentrationen anzusehen.

Die Radonmessungen wurden mit einem AlphaGuard im Diffusionsmodus (Messtakt 10 Min.) durchgeführt.

Tabelle 4-1: Messtechnische Ausstattung für die durchgeführten Untersuchungen an Arbeitsplätzen.

Messparameter	Messgerät, Seriennummer/Hersteller, technische Spezifikationen
$H^*(10)$, Umgebungs-Äquivalentdosisleistung	6150 AD6/E (S/N 82989), Sonde 6150 AD-b/E (S/N 133613), Automess
$H_p(10)$ Personendosis	PM1610A (S/N 214094), Polimaster
γ , β - und α -Impulse	CoMo 170 (S/N 3598), S.E.A. und WIMP
Nuklididentifikation, Gammaskpektrometer	RIIDEye X-G (S/N 10392), 2" NaI-Detektor, Thermo Scientific
Luftstaubsammler	RADeCO, Air Volume Totalizer, Model H-810-2, (S/N 0303), SAIC
Radon	Alphaguard PQ2000 (S/N EF0207)

Die gammaskpektrometrischen Laboranalysen wurden mit den folgenden Messgeräten und Auswertungsprogrammen durchgeführt:

- Germanium-Detektor ORTEC GEM30 P4 mit ORTEC DSPEC jr. 2.0. Die Messdatenerfassung und Auswertung erfolgte mit ORTEC GammaVision 7.01
- Niederenergie-Germanium Detektor Canberra GL0210R mit NIM-Elektronik (Tennelec TC909 Power Supply, TC 950 Bias Supply und TC243 Amplifier). Die Messdatenerfassung und Auswertung erfolgte mit Canberra Genie 2000 V 3.2.

Für die gammaskpektrometrischen Messungen wurde ein standardisiertes Verfahren, das vor mehreren Jahren von der Produktkontrollstelle Jülich für die Messung radioaktiver Abfallprodukte zertifiziert wurde, verwendet. Zur Effizienzkalibrierung der Detektoren wurden Standards eingesetzt, die aus zertifizierten Standardlösungen in definierten Messgeometrien erstellt wurden. Zur Datenanalyse wurden die Programme Genie2000 (Canberra) bzw. GammaVision (ORTEC) und die installierten Routinen der Ermittlung der Messunsicherheiten nach DIN 11929 verwendet. Zur Qualitätssicherung wurden zertifizierte Standards vermessen.

4.3 Klassifikation der Materialien

Die in den Tätigkeitsfeldern der Anlage 3 StrlSchG vorkommenden Materialien sind bezüglich ihrer Nuklidzusammensetzung und den daraus resultierenden radiologischen Eigenschaften teilweise deutlich unterschiedlich. Unter Bezug auf die (technischen) Prozesse, die zur Ausbildung der Nuklidzusammensetzung führen, wurden in (Gellermann u. a. 2007) sechs Materialtypen, M1 bis M6 unterschieden. Für beispielhaft festgelegte Muster von Nuklidzusammensetzungen sind in Abbildung 4-1 Radionuklidanteile dargestellt.

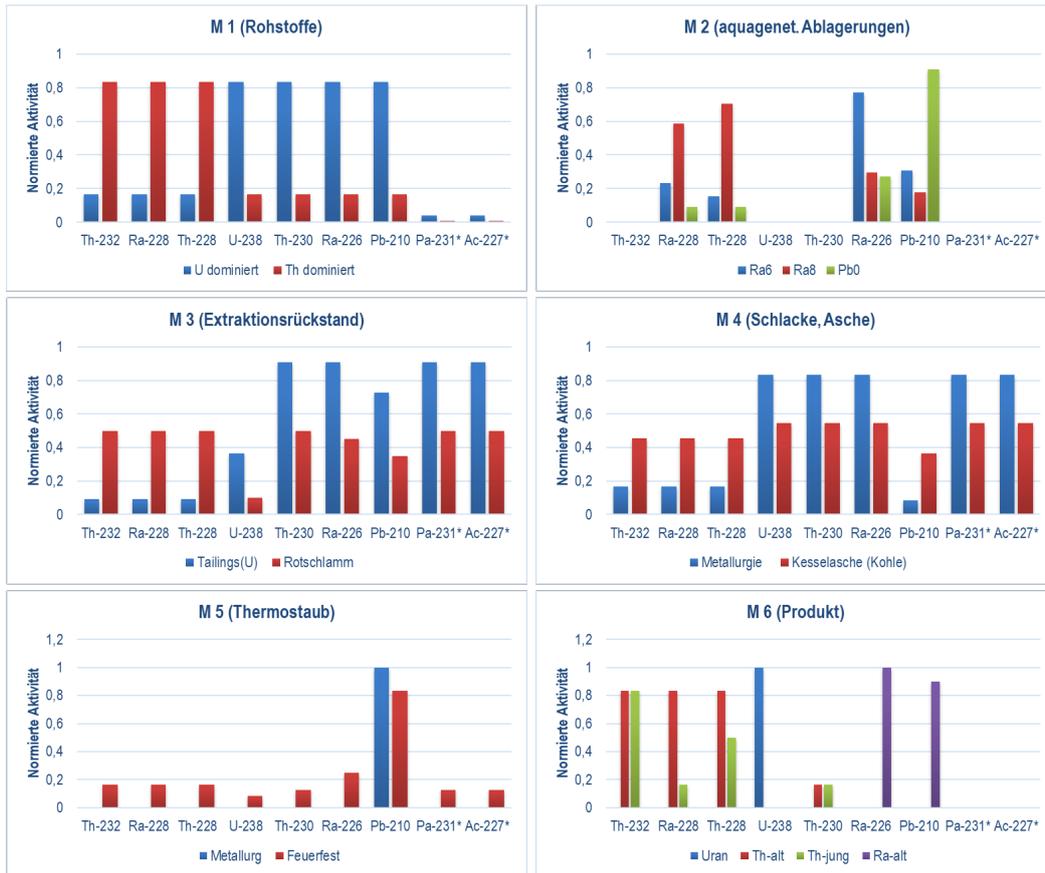


Abbildung 4-1: Muster von Nuklidvektoren für NORM mit Angabe der U-235 Zerfallsreihe *) Faktor 21.

Den in Abbildung 4-1 aufgeführten normierten Nuklidvektoren liegt eine Normierung der gemessenen spezifischen Aktivität „a“ eines Radionuklids „r“ gemäß

$$a_{r,N} = \frac{a_r}{a_{U-238,max} + a_{Th-232,max}} \quad (1)$$

zugrunde. Die Normierung erfolgt in Anlehnung an Anlage XII Teil B StrlSchV auf die Summe der maximalen spezifischen Aktivität der Radionuklide der Nuklidketten U-238sec und Th-232sec. Zusätzlich sind in den Diagrammen der Abbildung 4-1 auch Nuklidanteile von den langlebigen Radionukliden der U-235-Zerfallsreihe dargestellt. Diese Anteile sind mit dem Faktor 21 korrigiert, um das Gleichgewicht / Ungleichgewicht mit den Radionukliden der U-238-Zerfallsreihe sichtbar zu machen.

Die Materialtypen sind nicht ein-eindeutig aus den Radionuklidmustern abzulesen, sondern primär aus den zugrunde liegenden Prozessen der Materialentstehung abzuleiten.

M1 – Rohstoffe: Geologische Mineralien und Erze. Aufgrund der langsamen Bildungsraten und / oder des hohen geologischen Alters (mehr als 1 Mio. Jahre) befinden sich die Zerfallsreihen im Aktivitätsgleichgewicht. Je nachdem, welche der beiden Zerfallsreihen die höhere spezifische Aktivität aufweist, wird zwischen den Subtypen U-dominiert oder Th-dominiert unterschieden.

M2 – Fällungsprodukte und Fe-Mn-Hydroxide (Ablagerungen, Scales) mit sorbierten Radionukliden aus wässrigen Lösungen. Ein typischer Bildungsprozess sind Fällungsreaktionen unlöslicher Erdalkalisalze (meist Sulfate, teilweise Karbonate) oder Metallsulfide (Pb-Sulfid). Abhängig vom Radionuklid der höchsten spezifischen Aktivität kann zwischen Ra-226-dominiertem, Ra-228-dominiertem und Pb-210-dominiertem Subtyp unterschieden werden. Ein Sonderfall des Pb-210-dominierten Subtyps sind Ablagerungen von Radon-Folgeprodukten (Pb-210) aus der Gasphase.

M3 – Extraktionsrückstände: Chemisch behandelte Rohstoffe, wobei bestimmte Radionuklide mit extrahiert wurden. Abhängig von den benutzten Chemikalien können sich sehr unterschiedliche Muster der Nuklidanreicherung ergeben. Bei Aufschluss der Rohstoffe im schwefelsauren Milieu werden Uran und Thorium gelöst, Radium nicht und Blei nur eingeschränkt.

M4 – Schlacken und Aschen: Materialien, die hohen Temperaturen (meist über 1000 °C) ausgesetzt waren. Typisch ist eine Verminderung von Pb-210 und Po-210 Aktivitätskonzentrationen. Je nachdem, welche Zerfallsreihe im Rohmaterial dominierte, kann zwischen den Subtypen U-dominiert und Th-dominiert unterschieden werden.

M5 - Thermostaub: Stäube, die bei hohen Temperaturen (meist über 1000 °C) über den Abluftpfad aus einem Prozess ausgetragen wurden. Typisch ist eine Anreicherung von Pb-210 und Po-210. Während Stäube aus Schmelz- und Sinterprozessen in der Eisen- und Nichteisenmetallurgie praktisch nur Pb-210 und Po-210 in angereicherter spezifischer Aktivität enthalten (Subtyp Pyrometallurgie), wird beim Brennen von Mineralen bei Temperaturen über 1500 °C offensichtlich auch Radium mit ausgetrieben und gelangt in den Staub (Subtyp Mineralik).

M6 - Produkt. Zielgerichtet hergestellte Materialien mit den chemisch isolierten, radioaktiven Elementen Uran, Thorium oder Radium¹. Während beim Uran nur die sehr kurzlebigen Tochternuklide Th-234, Pa-234 so schnell nachwachsen, dass sie für den Strahlenschutz als im Gleichgewicht mit dem U-238 beachtet werden können, muss beim chemisch abgetrennten Thorium über den Zeitraum von zwei bis drei Jahrzehnten mit ausgeprägten Veränderungen der Aktivitätsverhältnisse in der Zerfallsreihe gerechnet werden. Aus diesem Grund werden als Subtypen U-Produkt, Th-Produkt, jung und Th-Produkt, alt unterschieden.

¹ Produkte mit Radium wurden stets zur Nutzung der radioaktiven Eigenschaften hergestellt. Sie werden daher im Strahlenschutz nicht als NORM eingestuft.

4.4 Berechnung der effektiven Dosis

4.4.1 Effektive Dosis

Bei der Ermittlung der Strahlenexposition sind gemäß Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) grundsätzlich alle Expositionspfade zu betrachten. Die zu ermittelnde effektive Dosis eines Beschäftigten ergibt sich folglich als Summe der Teildosen:

$$E = E_A + E_{Inh} + E_{Ing} \quad (2)$$

- E – effektive Dosis einer Referenzperson
- E_A – Teildosis durch äußere Strahlenexposition (Direktstrahlung)
- E_{Inh} – Teildosis durch Inhalation. Hier: Inhalation von Staub und ggf. Inhalation von Radon.
- E_{Ing} – Teildosis durch Ingestion. Hier: ggf. Direktiongestion von Material. Verzehr von Nahrungsmitteln ist nicht zu betrachten.

Die Teildosen können ebenfalls Summen von weiteren Teildosen darstellen.

4.4.2 Teildosis durch Direktstrahlung

Die zusätzliche äußere Strahlenexposition $E_{A,j}$ einer Referenzperson j durch Gammastrahlung an verschiedenen Expositionsorten s kann gemäß BglBb berechnet werden nach:

$$E_{A,j} = f_{Kon,j} \cdot \sum_s (\dot{H}^*(10)_s - \dot{H}^*(10)^U) \cdot t_{Exp,j,s} \cdot a_s \quad (3)$$

Hierbei ist

- $\dot{H}^*(10)_s$ Umgebungs-Äquivalentdosisleistung (ODL) in 1 m Höhe am Expositionsort s in $\mu\text{Sv/h}$
- $\dot{H}^*(10)^U$ Umgebungs-Äquivalentdosisleistung der natürlichen Gammastrahlung im Freien in 1 m Höhe am Expositionsort s in $\mu\text{Sv/h}$
- $f_{Kon,j}$ Umrechnungsfaktor von Umgebungs-Äquivalentdosis in effektive Dosis.
- $t_{Exp,j,s}$ Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in Stunden h
- a_s Faktor zur Berücksichtigung der Abschirmwirkung am Expositionsort s

Umrechnung Umgebungs-Äquivalentdosis in effektive Dosis

Bei Tätigkeiten an industriellen Anlagen liegen vielfach divergente Strahlungsfelder vor und der Körper eines Beschäftigten wird in unterschiedlichem Maße der Strahlung ausgesetzt. Für die Ermittlung von realen Körperdosen ist daher eine Messung mit körpergetragenen Dosimetern nötig.

Für die Abschätzung der äußeren Strahlenexposition wird zumeist ein homogenes Strahlungsfeld unterstellt, dessen Dosisleistung sich aus einer szenarienseitig festzulegenden kürzesten Entfernung zu einer NORM-Strahlenquelle ergibt.

Der Umrechnungsfaktor $f_{kon,j}$ von Umgebungs-Äquivalentdosis in effektive Dosis liegt nach Angaben in den BglBb für Bodenstrahlung bei 0,6. Für andere divergente Strahlungsfelder hat die Strahlenschutzkommission (SSK 2000) Zusammenhänge zwischen Umgebungs-Äquivalentdosis und effektiver Dosis detaillierter beschrieben.

Abschätzung der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung (ODL) aus Messwerten der spezifischen Aktivität

Der § 55 StrlSchG fordert, bereits vor Beginn von Tätigkeiten Abschätzungen der Dosis von Beschäftigten vorzunehmen. Da für eine solche Abschätzung Messwerte der ODL grundsätzlich nicht vorliegen können, es allerdings aus der Kenntnis der Prozesse und der Ausgangsmaterialien möglich ist, Aussagen zur spezifischen Aktivität von NORM abzuleiten (s. (Gellermann 2008)), kann mit geeigneten Modellen aus Messwerten der spezifischen Aktivität in Ausgangsmaterialien eines geplanten Prozesses die ODL abgeschätzt werden.

Die Größe $\dot{H}^*(10)$ ist abhängig von der spezifischen Aktivität, der Gamma-Energie sowie der Dichte und der Geometrie der Strahlungsquelle. Für Strahlenquellen mit einfachen Geometrien sind analytische Formeln zur Berechnung des Strahlungsfeldes aus der Literatur bekannt.

In Tabelle 4-2 sind Dosiskoeffizienten für die Berechnung von Umgebungsäquivalentdosisleistungen zusammengestellt.

Tabelle 4-2: Dosiskoeffizienten für die Berechnung von Umgebungsäquivalentdosisleistungen aus Messwerten der spezifischen Aktivität (Eckerman und Ryman 1993), (Vogt, Schultz, und Vahlbruch 2011) und der Schweizer Strahlenschutzverordnung (StSV (Bundesrat Schweiz, o. J.)).

	Einheit	U-238+	Ra-226+	Ra-228+	Th-228+	K-40
Punktquelle	($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq / m ²)	0,010	0,298	0,145	0,193	0,0211
Bodenoberfläche	($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq / m ²)	0,0828	5,76	3,34	5,06	0,526
Boden 0–1 cm	($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq / m ³)	0,00051	0,039	0,022	0,033	0,0034
Boden 0-5 cm	($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq / m ³)	0,0014	0,113	0,062	0,097	0,010
Boden 0-15 cm	($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq / m ³)	0,0020	0,182	0,099	0,159	0,016
Boden (infinite)	($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq / m ³)	0,0022	0,215	0,115	0,197	0,020

4.4.3 Teildosis durch Inhalation von Staub

In der Richtlinie Arbeiten ist vorgesehen, die effektive Dosis E durch innere Strahlenexpositionen aus dem Messwert der Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration der luftgetragenen Radioaktivität zu berechnen. Dafür ist die Formel

$$E = 1,2 \cdot e \cdot c \cdot T \quad (4)$$

zu benutzen. Darin bedeuten

- 1,2 die Atemrate im Beruf in m³/h,
- *e* der Dosiskoeffizient für die effektive Dosis bezogen auf die Gesamt-Alpha-Aktivität der Staub und Aerosolpartikel in Sv/Bq,
- *c* die mittlere Gesamt Alpha-Aktivitätskonzentration in Bq/m³, die repräsentativ für die Atemluft der Person während ihrer Aufenthaltsdauer an dem Arbeitsplatz oder den Arbeitsorten ist, und
- *T* die Aufenthaltsdauer des Beschäftigten an dem Arbeitsplatz oder den Arbeitsorten in h.

Als Dosiskoeffizient „*e*“ wird für Arbeiten mit thorierten Legierungen oder sonstigen thoriumhaltigen Chemikalien (M6-Material vom Sub-Typ Thorium-Produkt) ein Wert von 1,6E-5 Sv/Bq vorgegeben. Für Arbeiten mit uranhaltigen Chemikalien (M6-Material vom Sub-Typ Uran-Produkt) oder die Verwendung und Verarbeitung von Schlacke aus der Verhüttung von Kupferschiefererzen (M4-Material Sub-Typ urandominiert) ist der Wert 5,6E-6 Sv/Bq zu verwenden.

Nach den Modellen der BglBb errechnet sich die Strahlenexposition durch Inhalation von radioaktiv belastetem Staub nach:

$$E_{Inh,j} = C_{Luft} \cdot \dot{V}_j \cdot t_{Exp,j} \cdot g_{Inh,r} \quad (5)$$

Hierbei sind

\dot{V}_j	Atemrate für die Referenzperson <i>j</i> in m ³ /h.
$t_{Exp,j}$	Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson <i>j</i> am Expositionsort in h
$C_{Luft,r}$	Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids <i>r</i> in der Atemluft für den Expositionsort in Bq/m ³
$g_{Inh,r,j}$	Inhalationsdosiskoeffizient für das Radionuklid <i>r</i> und die Referenzperson <i>j</i> in Sv/Bq

Die Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids in der Luft *C* kann, soweit kein standortspezifischer Wert vorliegt, errechnet werden aus:

$$C_{Luft} = S_{Staub} \cdot C_{Mat} \cdot AF \quad (6)$$

S_{Staub}	Inhalationsrelevante Schwebstaubkonzentration (Aerodynamischer Durchmesser < 10 µm)
C_{Mat}	Spezifische Aktivität des Radionuklids <i>r</i> in dem für die Staubbildung relevanten Material
AF	Aufkonzentrierungsfaktor, der das mittlere Verhältnis der spezifischen Aktivitäten des Radionuklids <i>r</i> der Staubfraktion und der Gesamtprobe beschreibt (dimensionslos)

Zur Modellierung der Inhalationsdosis von Beschäftigten sind die Dosiskoeffizienten aus der Zusammenstellung im Bundesanzeiger Nr. 160a und b vom 28.08.2001 Teil III zu verwenden (Deutscher Bundestag

2001b). Diese Inhalationsdosiskoeffizienten entsprechen den in der ICRP-Publikation 60 (ICRP 1991) empfohlenen und der ICRP Publikation 119 (ICRP u. a. 2012) veröffentlichten Werten für einen AMAD (mean activity median aerodynamic diameter) von 5 µm und unterscheiden sich im Hinblick auf die Lungenabsorption je nach chemischer Form. Durch die in der ICRP-Veröffentlichung 103 (ICRP 2007) veränderten Gewebewichtungsfaktoren können sich in Zukunft Veränderungen an den Werten ergeben.

In Anlage 5 sind die Inhalationsdosiskoeffizienten der Radionuklide natürlicher Zerfallsreihen für die Schutzgröße effektive Dosis zusammengestellt. Außerdem ist aufgeführt, welche Absorptionsklassen laut BglBb und laut Richtlinie Arbeiten verwendet werden soll. Berechnet man mit den Daten die Inhalationsdosiskoeffizienten für unterschiedliche Muster-Materialtypen bezogen auf einen Wert der Gesamtalphaaktivität, wobei in einer Rechenvariante die kurzlebigen Radon-Folgeprodukte eingerechnet, in einer anderen nicht berücksichtigt wird, dann ergeben sich die Werte nach Abbildung 4-2.

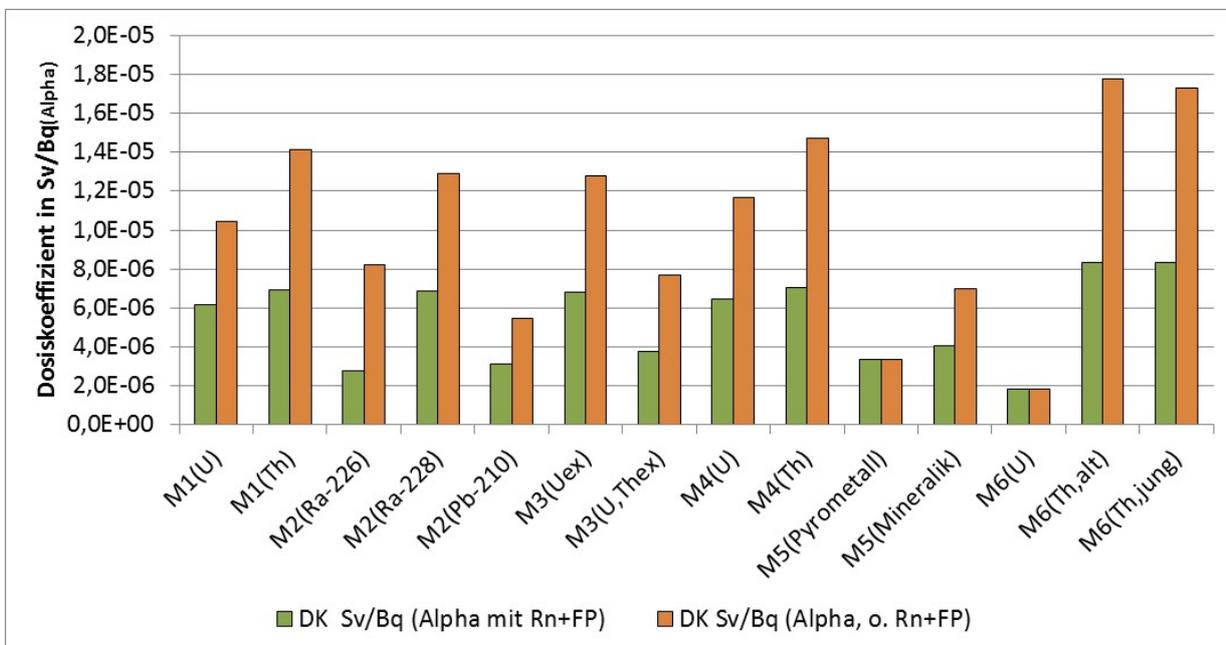


Abbildung 4-2: Inhalationsdosiskoeffizienten bezogen auf die Gesamtalphaaktivität für unterschiedliche Muster-Materialtypen.

4.4.4 Teildosis durch Direktingestion

In der Richtlinie Arbeiten ist eine Ermittlung der Ingestionsdosis nicht vorgesehen. Die BglBb berücksichtigt die Ingestion. Wie im Kapitel 2.4 diskutiert, trägt die Ingestionsdosis nur zu einem relativ geringen Anteil zur gesamten Strahlenexposition eines Beschäftigten aus seiner Tätigkeit bei. Da sich die Exposition aus der Ingestion aber nicht prinzipiell ausschließen lässt, wurde die Ingestionsdosis bei den Expositionsermittlungen in der Regel mit betrachtet, konnte jedoch aufgrund der niedrigen Beiträge (< 10%) zur Gesamtdosis in einigen Fällen außer Acht gelassen werden. Eine messtechnische Ermittlung der Ingestion hat nicht stattgefunden.

5 Aufbereitung von Niob/Tantalерzen einschließlich der Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Polychlorerzen

5.1 Branchenspezifische Übersicht

In Deutschland gibt es ein Unternehmen welches Niob und Tantal aus importierten Erzen gewinnt. Weiterhin werden niob- und tantalhaltige Schlacken und andere Recyclingmaterialien aufbereitet.

Nach Angaben im Rohstoffbericht 2015 (BGR 2016) wurden die in Tabelle 5-1 aufgeführten Jahresmengen an Rohstoffen zur Produktion von Niob, Tantal importiert.

Tabelle 5-1: Import von Rohstoffen zur Produktion von Niob, Tantal.

	2012	2013	2014	2015	Lieferland 2015	Anteil in %
Aschen und Rückstände [t]	12.305	5.412	21.585	798	Malaysia	44,7
					USA	35,2
					Japan	16,1

5.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

5.2.1 Prozessanalyse (Literaturauswertung)

Die in der Anlage 1 StrlSchG aufgeführten Minerale Columbit, Mikrolith, Euxenit und Pyrochlor sind Niob- und Tantalерze, wobei Columbit vor allem als Tantalерz, Pyrochlor als Niobерz genutzt wird. Sie werden in Deutschland nicht abgebaut, allerdings werden diese Minerale zur Herstellung von Tantal verarbeitet. Die konkreten Verfahren sind nicht veröffentlicht. Nach einer allgemeinen Prozessbeschreibung aus (TIC 2017) werden folgende Prozessschritte zur Herstellung von Tantal benutzt:

- Behandlung der Erze mit einer Mischung aus Fluss- und Schwefelsäure bei erhöhten Temperaturen.
- Lösung von Tantal und Niob aber auch von zahlreichen Begleitstoffen (incl. Uran und Thorium).
- Filtration des Aufschlussrestes und Weiterverarbeitung der Lösung mittels Flüssigextraktion (mit Methyl-Isobuthylketon, MIBK) oder mittels Ionenaustausch.

Endprodukte dieses Prozesses sind Kalium-Tantal-Fluorid (K_2TaF_7) oder Tantaloxid (Ta_2O_5). Das Niob wird über die Neutralisation des Niobfluorid-Komplexes mit Ammoniak als Hydroxid abgetrennt und durch Kalzination zum Nioboxid (Nb_2O_5) umgewandelt.

Vom Internationalen Studienzentrum für Tantal und Niob (TIC 2017a) werden aber auch alternative Methoden beschrieben, die bei hohen Temperaturen über die Bildung von gasförmigem Oxichlorid zu $NbCl_5$ und $TaCl_5$ verlaufen. Die in Reinform abgetrennten Chloride werden dann durch Kalzination (Nb) oder durch Zugabe von Ammoniak (Ta) zu Oxiden umgewandelt.

Ein Flussbild eines bereits älteren Prozesses, bei dem Fluss- und Salzsäure eingesetzt werden, ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

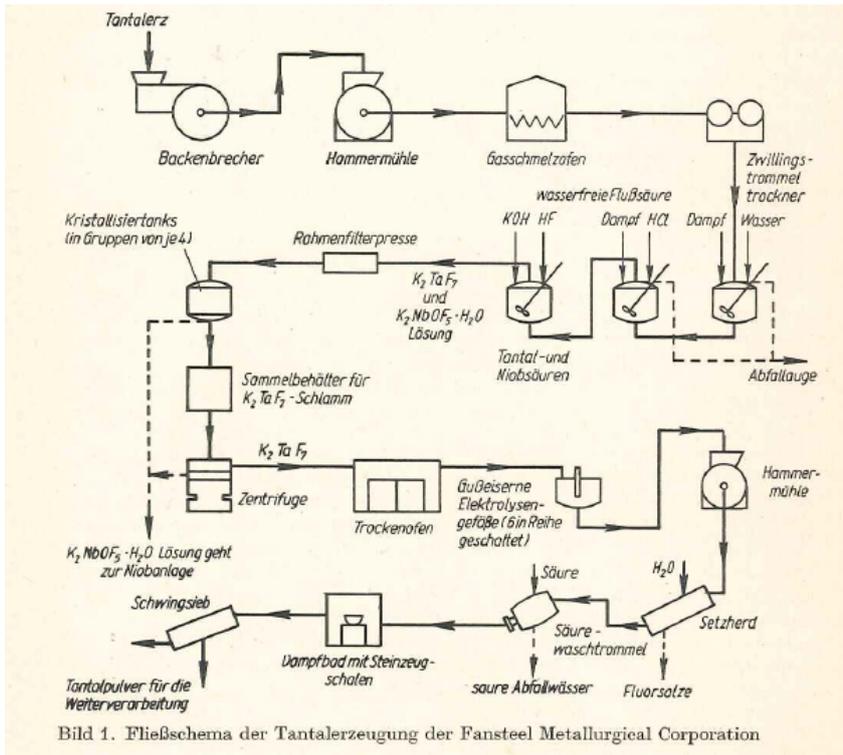


Abbildung 5-1: Fließschema der Tantalproduktion nach Schreiter (Schreiter 1962).

Neben den zuvor beschriebenen nasschemischen Verfahren gibt es auch Schmelzverfahren (Pyrometallurgie). Schlacken oder wertstoffhaltige Schrotte und Schlämme werden mit Zuschlagsstoffen in Elektroschmelzöfen verarbeitet. Als Produkt entstehen Ta-Nb-reiche Metalllegierungen.

5.2.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

Aus den im vorhergehenden Kapitel enthaltenen Prozessbeschreibungen können die in Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 aufgeführten Expositionspfade für die Exposition von Beschäftigten abgeleitet werden.

Tabelle 5-2: Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der nasschemischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen.

Prozessschritt	Anlagenteile	Expositionspfade
Annahme, Entladen und Lagerung der Rohstoffe	Lager	Direktstrahlung, bei Anlieferung in loser Schüttung auch (kurzfristig) Staub.
Vorbehandlung mit mechanischer Aufbereitung	Backenbrecher, Hammermühle	Direktstrahlung, Staub, (Hautkontakt und Ingestion). Aufgrund relativ kleiner Mengen ist eine Erhöhung der Radonkonzentration durch Freisetzung aus den Rohstoffen nicht zu erwarten.
Nasschemischer Aufschluss und Verfahrensschritte der Reinigung	Geschlossene Anlagenteile (Autoklaven, Rührkesseln), in denen teilweise hochreaktive Flüssigkeiten befinden (z.B. Flusssäure)	Direktstrahlung, abgeschirmt
Abnahme der Reinigungsrückstände (Schlämme) Anmerkung: Durch Zusatz von Neutralisationsmitteln ist mit einer deutlich geringeren spezifischen Aktivität als in den Ausgangsstoffen zu rechnen.	Filterpressen, Sammelbehälter	Direktstrahlung, (Hautkontakt, Ingestion) Die Schlämme sind zunächst feucht, so dass sie nicht zur Staubbildung führen.

Tabelle 5-3: Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der pyrometallurgischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen.

Prozessschritt	Anlagenteile	Expositionspfade
Annahme, Entladen und Lagerung der Rohstoffe	Lager	Direktstrahlung, evtl. Staub
Herstellung von Einsatzmischungen	Werkhalle	Direktstrahlung, evtl. Staub
Schmelzen	Lichtbogenofen	Direktstrahlung, Staub
Schlackeabtransport und Schlackelagerung	Schmelzanlage, betrieblicher Lagerplatz	Direktstrahlung, (Hautkontakt, Ingestion)
Filterstaubabtransport	Staubsammler	Staub, Direktstrahlung

5.3 Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen – Abschätzung

5.3.1 Radioaktivität in Rohstoffen und Abfällen (Literaturoswertung)

Aus der Literatur wurden die in Tabelle 5-4 aufgeführten Angaben zur Radioaktivität in den Rohstoffen der Niob-Tantal-Industrie zusammengestellt.

Tabelle 5-4: Angaben zur Radioaktivität in den Rohstoffen der Niob-Tantal-Industrie (Literaturdaten).

Material	U-238 Zerfallsreihe [Bq/g]	Th-232-Zerfallsreihe [Bq/g]	Quelle
Pyrochlor	6-10	7-80	(a)
Pyrochlorschlacke (Deutschland)	7-14	15-30	(b)
Niob-Erz (Brasilien)	0,93-4,55	0,90-6,39	(a)
Nb-Ta-Konzentrat	bis 70	bis 8,0	(a)
Ta-Erz	0,06	0,005	(a)
Zinnschlacke (für Ta-Produktion)	4,0	11,0	(a)
Zinn-Nebenprodukt („Amang“)	2,0-17,8	3,0-326,7	(a)

Quelle: (a) - (International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008, 437 N. Tsurikov), (b) (Gellermann, Schulz, und Küppers 2003)

Vom TIC wurde eine Studie zum Transport von Nb-Ta-Rohstoffen erarbeitet, in der auch Untersuchungen zur Radioaktivität vorgenommen wurden (TIC 2016). Nach Angaben in (TIC 2017b) wurden von 67 Transportladungen von Tantalit und Zinnschlacke die spezifische Aktivität bestimmt. In 95% der Fälle wurden Summenwerte U-238 + Th-232 zwischen 5 Bq/g und 50 Bq/g gemessen. Die Mittelwerte der spezifischen Aktivität für Tantalit lagen bei 20 Bq/g, die für Zinnschlacke bei 25 Bq/g. Die Mehrzahl (78%) der Transportladungen von Tantalit und 45% der Transportladungen von Zinnschlacke hatten spezifische Summenaktivitäten von mehr als 10 Bq/g.

Bezüglich der Radionuklidzusammensetzung kann (auch nach Angaben in (TIC 2017b) von einem Gleichgewicht in den Zerfallsreihen ausgegangen werden (Materialtyp M1). Bei Zinnschlacke ist mit einer Störung des Aktivitätsgleichgewichtes in den Zerfallsreihen zu rechnen, wobei insbesondere Pb-210 und seiner Zerfallsprodukte in Relation zum Ra-226 abgereichert sind (Materialtyp M4).

Die Gesamt-Alpha-Aktivität von M1-Material kann mit

- 8,4 Bq je Bq U-238,max (hier: U-238sec (Anteile der U-235-Reihe eingeschlossen),
- 6,0 Bq je Bq Th-232max (hier: Th-232sec)

die von M4-Material mit

- 7,5 Bq je Bq U-238max (hier: Ra-226; Po-210/Ra-226 zu 0,2 angenommen, Anteile der U-235-Reihe eingeschlossen),
- 6,0 Bq je Bq Th-232max (hier: Th-232sec)

berechnet werden.

Bezüglich der Nuklidzusammensetzung ist bei den Rohstoffen der Nb-Ta-Metallurgie von einer tendenziell höheren Aktivität von Radionukliden der Th-232-Zerfallsreihe als denen der U-238-Zerfallsreihe auszugehen. In Filterstaub aus den Elektroschmelzen (M5-Material) werden in der Fachliteratur sehr hohe Pb-210, Po-210 Aktivitäten von 100 bis 500 Bq/g angegeben (European Commission u. a. 1999).

5.3.2 Abschätzung von Strahlenexpositionen in Anlagen in Deutschland

Wie im Kapitel 5.1 beschrieben, existieren in Deutschland Anlagen der Niob-Tantalindustrie, die sowohl mittels nasschemischer Verfahren als auch mit Schmelzverfahren Niob- und Tantalprodukte erzeugen. Die dabei möglichen Strahlenexpositionen der Beschäftigten hängen in hohem Maße von der Radioaktivität der verarbeiteten Rohstoffe ab.

Werden zur konservativen Abschätzung von Strahlenexpositionen die grob orientierenden spezifischen Kenngrößen nach Tabelle 2-3 verwendet (0,82 $\mu\text{Sv/h}$ per Bq/g für Zinnschlacke), dann ist bei der pyrometallurgischen Verarbeitung bei einer spezifischen Aktivität von mehr als 1,2 Bq/g in den verarbeiteten Zinnschlacken die Dosisschwelle von 1 mSv im Kalenderjahr überschritten. Da die am Weltmarkt verfügbaren Zinnschlacken jedoch nach den Angaben in Tabelle 5-4 deutlich höhere spezifische Aktivitäten aufweisen, wäre mit dieser Abschätzung zu schlussfolgern, dass bei den betreffenden Prozessen ein Anzeigebedarf nach § 56 StrlSchG vorliegt. Die im § 56 Abs. 2 geforderte Bestimmung der Körperdosis durch einen Sachverständigen nach § 172 wird jedoch stets ein anderes Ergebnis zur Folge haben als die mit den o.g. Dosiskoeffizienten erhaltene (s. Kapitel 5.4).

Mit den in Tabelle 2-2 zusammengestellten (generischen) Szenarien und Parametern können für die nach allgemeiner Kenntnis in der Industrie vorkommenden Arbeitsorte orientierende Abschätzungen der möglichen Exposition vorgenommen werden.

Legt man nach den Angaben in Kapitel 5.3.1 eine spezifische Aktivität von

- 10 Bq/g U-238sec
- 15 Bq/g Th-232sec

zugrunde, dann können für die Prozessschritte nach Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 die expositionszeitbezogenen Dosiskoeffizienten von (gerundet)

- 11 $\mu\text{Sv/h}$ effektive Dosis für die äußere Strahlenexposition,
- 3,3 $\mu\text{Sv/h}$ effektive Dosis durch Inhalation von Staub

abgeschätzt werden. Grundlagen dieser Abschätzungen sind:

- Der Konversionsfaktor für Umgebungsäquivalentdosis von 0,53 $\mu\text{Sv/h}$ je Bq/g U-238sec (vgl. Tabelle 2-1) und von 0,86 $\mu\text{Sv/h}$ je Bq Th-232sec (umgerechnet von UNSCEAR 2008 United Nations 2010 Anhang B, Paragraph 81 mit dem dort genannten Umrechnungsfaktor für Umgebungsäquivalentdosis in effektive Dosis für Erwachsene von 0,7).
- Dem Umrechnungsfaktor f_{kon} nach Tabelle 2-1 von 0,6.
- Eine Schwächung der Direktstrahlung aus Anlagen infolge einer Wandstärke von 5 mm Eisen um den Faktor 0,8 (Abgeschätzt für Ra-226 mit dem Freeware-Programm Rad Pro Calculator).
- Eine Gesamtalphabetaktivität von 8,3 Bq/g je Bq/g U-238sec und 6,0 Bq/g je Bq/g Th-232sec.
- Eine Staubkonzentration von 1 mg/m^3 nach Tabelle 2-2 (wahrscheinliche Expositionssituation).
- Der Dosiskonversionskoeffizient der Richtlinie Arbeiten (BMU 2003) von 16 $\mu\text{Sv/Bq}$ für Pyrochlorerze.

Mit diesen Dosiskoeffizienten und Expositionszeiten nach Tabelle 2-2 von 400 Std. im Jahr für Direktstrahlung und 2000 Std. im Jahr für Exposition durch Staub werden die in Tabelle 5-5 aufgeführten Dosiswerte abgeschätzt.

Die Ingestion ist selbst bei den in Tabelle 2-2 aufgeführten für die betrachtete Industrie (über-)konservativen Annahmen von 2000 Std. Expositionszeit mit 1,25 mg/h Aufnahmerate sowie den Ingestionsdosiskoeffizienten nach BglBb mit Dosiswerten von ca. 0,08 mSv so gering, dass sie in Anbetracht der Unsicherheiten von Dosis-schätzungen aber auch von Dosisermittlungen für die Gesamtdosis außer Acht gelassen werden kann.

Tabelle 5-5: Abschätzung von Jahresdosen bei Tätigkeiten an Anlagenteilen der nasschemischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen bei Verarbeitung von Rohstoffen mit 25 Bq/g Summenaktivität (Modellannahmen s. Text).

Prozessschritt	Äußere Strahlenex- position	Innere Strahlenex- position
Annahme, Entladen und Lagerung der Rohstoffe	4,4 mSv	<< 6 mSv
Vorbehandlung mit mechanische Aufbereitung	4,4 mSv	6,6 mSv
Nasschemischer Aufschluss und Verfahrensschritte der Reinigung	4,4 mSv	(keine)
Abnahme der Reinigungsrückstände (Schlämme)	0,4 mSv	(keine)

In Tabelle 5-6 sind abgeschätzte Jahresdosen aufgeführt, die analog zu den Abschätzungen für die nasschemischen Prozesse für die Schmelztechnologie erhalten wurden. Bei diesen Abschätzungen wurde nicht berücksichtigt, dass

- die spezifische Aktivität in der Schlacke durch das Ausschmelzen der Wertmetalle höher sein kann als die der eingesetzten Erze,
- Filterstaub vor allem durch starke Anreicherungen von Pb-210 eine andere Nuklidzusammensetzung aufweist als das Rohmaterial. Da allerdings im Modell der Richtlinie Arbeiten ein Aktivitätsgleichgewicht bei der Gesamtalphaaktivität eingeht, ist dadurch implizit eine Anreicherung von Pb-210, Po-210 bis zum ca. 10- fachen grob mit abgedeckt.

Tabelle 5-6: Abschätzung von Jahresdosen bei Tätigkeiten an Anlagenteilen der pyrometallurgischen Produktion von Niob- und Tantalverbindungen bei Verarbeitung von Rohstoffen mit 25 Bq/g Summenaktivität (Modellannahmen s. Text).

Prozessschritt	Äußere Strahlenexposition	Innere Strahlenexposition
Annahme, Entladen und Lagerung der Rohstoffe	4,4 mSv	<< 6 mSv
Herstellen der Einsatzmischung	4,4 mSv	6,6 mSv
Schmelzen	4,4 mSv	6,6 mSv
Schlackeabtransport und Schlackelagerung	4,4 mSv	< 6 mSv
Filterstaubabtransport	4,4 mSv	6,6 mSv

Die hier vorgelegten Abschätzungen sind allerdings durch ihre sehr generische Betrachtungsweise wenig geeignet, um die tatsächlichen Expositionen zu beschreiben, die in den deutschen Betrieben der Niob-Tantalproduktion vorkommen.

5.4 Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen – Exemplarische Untersuchung

5.4.1 Anlagenbeschreibung und Expositionssituationen

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei der Tantal-Niob-Produktion wurden im Juni 2017 gezielte Untersuchungen durchgeführt. Die Protokolle, Messdaten und Fotos dieser Untersuchungen sind in der Anlage 1-NT-01 beigefügt.

Die untersuchte Anlage stellt im pyrometallurgischen Verfahren aus Zinnschlacken sowie weiteren Rohstoffen und Zuschlagsstoffen niob- und tantalreiche Metalllegierungen her.

Der Verarbeitungsprozess umfasst folgende Tätigkeiten:

- Bereitstellung von Rohstoffen überwiegend als loses Schüttgut (Außenlager),
- Bereitstellung von Rohstoffen überwiegend als loses Schüttgut (Innenlager),
- Innerbetrieblicher Transport von Rohstoffen und Rückständen
- Zusammenstellen der Ansatzmischung / Wiegeanlage
- Betreuung des Schmelzvorgangs (Ofenstand)
- Handhaben von Big-Bags mit Ofen-Filterstaub

In Tabelle 5-7 sind die Messwerte der Ortsdosisleistung aus Anlage 1-NT-01 zusammengefasst. Die Rohstoffe und Zuschlagsstoffe des Prozesses weisen sehr unterschiedliche Dosisleistungen auf, die auf unterschiedliche Radionuklidgehalte schließen lassen. Die maximalen Dosisleistungen von Haufwerken und großen Materialmengen in den Schüttboxen sind für die Expositionsermittlung in Bezug auf gehandhabte Materialmassen, Abstand der Beschäftigten und Abschirmwirkung anzupassen. Auf dem Fahrersitz eines Radladers im Nahbereich zu Produktionsrückständen (Dosisleistung 3,5 µSv/h) wurden 0,22 µSv/h bei einer Dosisleistung außen in 1 m Höhe von 0,42 µSv/h gemessen.

Tabelle 5-7: Messwerte der Ortsdosisleistung in 1 m Abstand /Höhe.

Rohstoffaußenlager		Lagerhalle Rohstoffmischung	
Großes Haufwerk Zinnschlacke	3,0-4,5 µSv/h in 5 m: 0,60 µSv/h in 10 m: 0,40 µSv/h	Zuschlagstoff	0,15-0,182 µSv/h
Me-Schrott	0,160 µSv/h	Zuschlagstoff	0,5 µSv/h
Me-Konzentrat	0,124-0,163 µSv/h	Rohstoff T	1,5 µSv/h in 30 cm: 2,1 µSv/h
Rohstoff F	0,190 µSv/h	Rohstoff	0,227 µSv/h
Rohstoff S	2,7 µSv/h	Rohstoff	0,18 µSv/h
Brechkoks	0,14 µSv/h	Rohstoff N	0,092-0,13 µSv/h
Rückstand S	3,5 µSv/h in 2 m: 0,9 µSv/h Fahrersitz Radlader: 0,22 µSv/h	Ansatzmischung	1,9-2,4 µSv/h in 10 cm: 6,02 µSv/h

In Tabelle 5-8 sind die spezifischen Aktivitäten der untersuchten Materialproben enthalten. Der Filterstaub aus dem Schmelzprozess weist eine spezifische Aktivität von 26 Bq/g Pb-210 auf, die deutlich unterhalb der in Kapitel 5.3.1 benannten Literaturwerte von 100 bis 500 Bq/g liegt. Als potentielle Staubquelle wird der Filterstaub aus dem Schmelzprozess, auch aufgrund der durchgeführten Granulierung, als weniger relevant für die Expositionsmodellierung eingeschätzt und in Kapitel 5.4.2 nicht explizit dargestellt.

Tabelle 5-8: Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Nb/Ta-Industrie.

Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g
Zinnschlacke	5,25	4,12	1,51	6,82	8,62
Filterstaub Ofen S6	0,33	0,39	26	0,61	0,12
Einsatzmaterial	0,82	0,69	0,47	1,19	1,46

5.4.2 Ermittlung von Strahlenexpositionen in exemplarisch untersuchten Anlagen

Die Dosismodellierung für die Verarbeitung von Rohstoffen mit einer mittleren spezifischen Aktivität von 10 Bq/g U-238max+Th-232max befindet sich in Anlage 2-NT-01. Dafür wurden als mittlere Dosisleistungen und mittlere Staubkonzentrationen, basierend auf Messwerten, für die Prozessschritte abgeleitet:

- Wiegeanlage: 0,3 µSv/h und 0,5 mg/m³
- Ofenstand: 0,2 µSv/h und 2,5 mg/m³
- Lagerplatz Schlacke: 0,5 µSv/h und 1,5 mg/m³

Tabelle 5-9 enthält die Ergebnisse der Expositionsmodellierung. Die zusätzliche effektive Dosis ergibt sich als Summe der Exposition bei der eigentlichen Arbeit. In dem betrachteten Betrieb werden die Beschäftigten im Rahmen eines Personaleinsatzplans eingesetzt. Auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher

Einsatzorte und unterschiedlicher Arbeiten kann das 1 mSv-Kriterium für einzelne Beschäftigte erreicht bzw. überschritten werden.

Tabelle 5-9: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigten eines Betriebes der Nb/Ta-Industrie mit pyrometallurgischem Verfahren.

	Lager	Ofenstand	Lagerplatz Schlacke
Direktstrahlung [mSv/a]	0,147	0,182	0,088
Inhalation [mSv/a]	0,200	1,86	0,043
Direktingestion [mSv/a]	0,040	0,073	0,003
Summe [mSv/a]	0,39	2,11	0,13

5.5 Anzahl der betroffenen Beschäftigten

In den Betrieben der Nb-Ta-produzierenden Industrie sind derzeit (Stand 2017) ca. 500 Mitarbeiter (Bereich Pyrometallurgie) und 300 Mitarbeiter (Nasschemie) beschäftigt. Von diesen Mitarbeitern sind bedeutende Anteile in Verwaltung / Management tätig. Die meisten Arbeiten, die direkt an den produzierenden Anlagen ausgeführt werden, sind überwachungs- und Steuerungsaufgaben.

Für eine Schätzung der Personen, die unmittelbar Tätigkeiten ausführen, die den Tätigkeitsfeldern des StrlSchG zuzuordnen sind, kann von maximal 20% der Mitarbeiter der jeweiligen Unternehmen ausgegangen werden. Von diesen ca. 160 Personen sind aber schätzungsweise nur 30% (ca. 50 Personen) auf Arbeitsplätzen tätig, für die eine berufliche Strahlenexposition nicht bereits aufgrund der realen Tätigkeitsprofile ausgeschlossen werden kann. Für diese Personen liegen in den Betrieben arbeitsplatzbezogene Gefährdungsanalysen vor, die bei der Umsetzung des StrlSchG um die Einschätzung von Strahlenexpositionen zu ergänzen sind.

5.6 Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung

Die möglichen Expositionen der Beschäftigten hängen in hohem Maße von der Radioaktivität der Rohstoffe ab. Durch Entwicklungen am Weltmarkt müssen die Unternehmen auf unterschiedliche Lieferanten zurückgreifen, um die Rohstoffversorgung sicher zu stellen. Damit müssen Materialien mit unterschiedlichen Gehalten an den radioaktiven Spurenelementen Uran und Thorium verarbeitet werden. Durch die Eigenkontrolle der Unternehmen wird aber gewährleistet, dass Kenntnisse zur Radioaktivität der Rohstoffe vorhanden sind. Eine Abschätzung, ob sich daraus wesentliche Veränderungen der Expositionssituation ergeben, ist damit bereits vor einem Einsatz solcher Rohstoffe grundsätzlich möglich.

Durch die im Rahmen dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse kann nicht hinreichend beurteilt werden, welche Expositionen bei Wartungsarbeiten und Reparaturen an Anlagenteilen auftreten. Da allerdings Anlagen, die dem Tätigkeitsfeld Aufbereitung von Niob/Tantalzerzen und Verarbeitung von Polychlorerzen zuzuordnen sind, in Deutschland nur an wenigen Orten vorhanden sind, ist im Unterschied zu anderen Tätigkeitsfeldern wie z.B. der Erdöl-Erdgasproduktion, nicht von spezialisierten Servicefirmen auszugehen, die die Wartungsarbeiten an den hier betrachteten Anlagen auch an anderen Standorten ausführen. Allerdings

kann auch nicht von vornherein ausgeschlossen werden, dass solche Servicefirmen in anderen Anlagen, die anderen Tätigkeitsfeldern der Anlage 3 StrlSchG zugehörig sind, tätig sind.

6 Betrieb und Wartung von Anlagen der tiefen Geothermie

6.1 Branchenspezifische Übersicht

Anlagen der tiefen Geothermie lassen sich in hydrothermale und petrothermale Systeme unterscheiden. Die relevanten Anlagen in Deutschland nutzen überwiegend hydrothermale Reservoirs im Oberrheingraben, dem Molassebecken und dem Norddeutschen Becken („Bundesverband Geothermie: Einstieg in die Geothermie“ 2017).

In Deutschland wurden Anlagen der tiefen Geothermie im Rahmen von umfangreichen Forschungsvorhaben untersucht. Sowohl zur Mobilisierung und Ablagerung als auch zum Umgang mit natürlicher Radioaktivität an Anlagen der tiefen Geothermie wurden in den Jahren 2004 bis 2012 von VKTA Dresden Untersuchungen durchgeführt (Köhler, M. u. a. 2013; Degering, Köhler, und Friedrich 2009). Die Anzahl der untersuchten Anlagen ist im Forschungsbericht mit 21 angegeben. Dies entspricht etwa 65% der Anlagen in Deutschland (Nach Bundesverband Geothermie sind 33 Anlagen in Betrieb („Bundesverband Geothermie: In Deutschland“ 2017)). Die Untersuchungen decken somit eine hinreichend große Anzahl für eine repräsentative Beurteilung der Expositionen in Anlagen der tiefen Geothermie ab.

Nach Prognosen der BGR ist für den Ausbau der tiefen Geothermie in Deutschland mit wachsenden Zahlen von Anlagen zu rechnen (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2015).

6.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

6.2.1 Prozessanalyse (Literaturauswertung)

Die Gewinnung von geothermaler Energie aus dem tiefen und daher hinreichend heißen Untergrund erfolgt über Bohrungssysteme, bei denen in Injektionsbohrungen kühles Wasser in den Untergrund gepresst und an Förderbohrungen heißes Wasser entnommen wird. Abhängig von der Durchlässigkeit und Beschaffenheit der genutzten geologischen Horizonte unterscheidet man hydrothermale Systeme, bei denen das heiße Wasser in einem bereits natürlicherweise heißen Grundwasserleiter vorliegt und petrothermale Systeme, bei denen das Gestein natürlicherweise trocken (nur wenig wasserleitend) ist und erst nach einem Aufbrechen (Fracking) hinreichend durchlässig ist, um einen Wasserkreislauf zu etablieren, der dem Gestein Energie entzieht (Hot-Dry-Rock, HDR Verfahren oder moderner Hot Fractured Rock-Systeme, HFR).

Tiefe Erdwärmesonden, die Wärmeenergie aus einer beliebigen Gesteinsabfolge mittels eines Wärmeträgermediums entziehen, das in einem geschlossenen Kreislauf in einer Sonde zirkuliert, sind für die hier zu prüfenden Strahlenschutzfragen ohne Belang und werden nicht weiter betrachtet.

In Deutschland werden derzeit drei große Gebiete zur geothermalen Energiegewinnung genutzt:

- das süddeutsche Molassebecken,
- das norddeutsche Becken,
- der Oberrheingraben.

Durch die besonderen Milieubedingungen im heißen geologischen Untergrund nimmt der Energieträger Wasser nicht nur Wärmeenergie auf, sondern ist auch Träger chemischer Prozesse bei denen aus dem Gestein Radionuklide herausgelöst und in den Fluiden abtransportiert werden können.

In den Untersuchungen (Köhler u. a. 2014; Bundesverband Geothermie 2016; Köhler, M. u. a. 2013) wurden für die Radionuklidkonzentrationen der Geothermiestandorte im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken Aktivitätskonzentrationen in Geothermalwässern in einer Größenordnung oberhalb der Aktivitätskonzentrationen an Geothermiestandorten des Molassebeckens festgestellt (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Wertebereiche einer Auswahl von Radionuklidkonzentrationen in Geothermalwässern der tiefen Geothermie (Bohrungen > 400 m).

	Ra-226 [Bq/l]	Pb-210 [Bq/l]	Ra-228 [Bq/l]	Ra-224 [Bq/l]	K-40 [Bq/l]	Salinität [g/l]
Molassebecken	0,3-1,5	< 0,1	0,02-0,5	<0,02-0,3	0,5-0,9	0,3-1,5
Norddeutsches Becken *)	3-35	<2-160	2-35	3-21	6-250	10-330
	7,9 ± 0,8	-	9,5 ± 0,5	8,3 ± 0,8	24,5 ± 0,8	-
Oberrheingraben *)	33-48	8-19	23-31	16-130	100-130	11-130
	51,6 ± 1,2	15,8 ± 1,2	32,5 ± 0,4	21,2 ± 0,5	133 ± 5	-

*) Wertebereiche nach (Köhler u. a. 2014; Bundesverband Geothermie 2016). Angaben mittlerer Werte nach (Köhler, M. u. a. 2013)

Wesentliche Quelle für die Radioaktivität in Geothermieanlagen und die daraus resultierende Strahlenexposition von Beschäftigten ist die Mitfällung und Ablagerung von Radionukliden aus den Geothermiefluiden und Geothermalwässern in sog. Scales (Anhaftungen) an Anlagenteilen wie Rohren und Wärmetauschern. Diese Ablagerungen sind seit langem bekannt und wurden im Hinblick auf ihre Entstehung und die unterschiedlichen Radionuklidgehalte der Geothermalwässer aus den verschiedenen geologischen Formationen umfassend untersucht (Köhler u. a. 2014; Degering, Köhler, und Friedrich 2009). Maßgeblicher Parameter für die Konzentration der Radionuklide in Geothermalwässern und somit auch das Aktivitätspotential für die Kontamination in Anlagenteilen ist die Salinität der Geothermiefluide.

Da der Prozess der geothermischen Energiegewinnung ein weitgehend autonomer Kreislaufprozess ist, bedarf es im Normalbetrieb nur einer Steuerung und Kontrolle der zumeist geschlossenen Anlagen. Allerdings müssen die Anlagen regelmäßig gewartet werden, wodurch es zu Expositionen von Beschäftigten kommen kann.

Wichtige Anlagenteile, die Kontakt mit den heißen Geothermiefluiden aufweisen, sind:

- Rohrleitungen
- Pumpen
- Filter
- Wärmetauscher

6.2.2 Expositionspfade

Aus Untersuchungen des VKTA (Köhler, M. u. a. 2013) geht hervor, dass im Normalbetrieb von Anlagen der tiefen Geothermie eine erhöhte Direktstrahlung in der Nähe von Rohrleitungen und im Umfeld der Anlagenteile mit großen Temperaturdifferenzen wie z.B. Wärmetauschern auftreten kann. In extremen Fällen wurden bis zu 12 $\mu\text{Sv/h}$ Ortsdosisleistung in einer Entfernung von 1 m zu Anlagenteilen gemessen.

Bei Inspektions- und Wartungsarbeiten, die an geöffneten Anlagenteilen durchgeführt werden, besteht nach Einschätzungen in (Köhler, M. u. a. 2013) ein erhöhtes Expositionsrisiko, wobei neben der Direktstrahlungskomponente die Wahrscheinlichkeit für die Aufnahme von Staub durch Inhalation und Ingestion erhöht ist.

Allerdings wird in der Regel durch Arbeitsschutzvorkehrungen, die aufgrund anderer chemischer Gefahrstoffe vorgeschrieben sind (Tragen von Mundschutz und Handschuhen sowie entsprechende Hygienevorschriften), bereits eine erhebliche Minimierung der Aufnahmerisiken erzielt.

Von der GRS (Brasser u. a. 2014) wurde im Rahmen eines vom BMWi geförderten Vorhabens in den Jahren 2008 bis 2014 eine umfassende Systemanalyse der geothermalen Energieerzeugung vorgenommen. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Programmsystem entwickelt, mit dem Strahlenexpositionen des Anlagenpersonals und von Personen der Bevölkerung abgeschätzt und bewertet wurden. Grundlage der Modellrechnungen waren Expositionsszenarien, die im Wesentlichen auf den Arbeiten des VKTA aufbauten. Neben den bereits vom VKTA betrachteten Expositionspfaden Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion wurde auch das Radon als Expositionspfad einbezogen.

Aus den im vorhergehenden Kapitel enthaltenen Prozessbeschreibungen und den Angaben in den zitierten Berichten können die in Tabelle 6-2 aufgeführten Expositionspfade für die Exposition von Beschäftigten abgeleitet werden.

Tabelle 6-2: Anlagenteile und Expositionspfade bei der tiefen Geothermie.

Prozess	Anlagenteile	Expositionspfade
Anlagensteuerung und Inspektionen im laufenden Betrieb	Rohrleitungen, Pumpen, Filter, Wärmetauscher	Direktstrahlung
Wartungsarbeiten an geöffneten Anlagen	Rohrleitungen, Pumpen, Filter, Wärmetauscher	Direktstrahlung, ggf. Radon, Staub, orale Partikelaufnahme nach Schmierkontamination von Händen
Dampf Abblasen	Speicherbecken zur Zwischenspeicherung von Förderwasser bis zur Injektion	Inhalation Aerosole und Radon; nur in Anfahrphase

Unabhängig von radioaktiv kontaminierten Ablagerungen in den Anlagen ist die Freisetzung von Radon als Expositionspfad zu betrachten. Bei Aquiferen mit normalen spezifischen Aktivitäten des Matrixgesteins (ca. 50 kBq/m^3 U-238) kann mit einer typischen Rn-222-Konzentration im Grundwasser von ca. 10 bis 30 kBq/m^3 gerechnet werden. Da die Löslichkeit von Gasen generell und die des Edelgases Radon im Besonderen im

Wasser mit steigender Temperatur stark abnimmt, ist bei einer Freisetzung von heißem Wasser oder Wasserdampf auch mit der Freisetzung von Radon zu rechnen. Ähnlich wie bei Anlagen der Wasseraufbereitung sind erhöhte Radonkonzentrationen allerdings nur zu erwarten, wenn größere Mengen an Wasser in einen Raum mit beschränktem Luftaustausch entgasen oder Wasserdampf in einen solchen Raum austritt.

6.3 Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen

6.3.1 Radioaktivität in Anlagen

Die Arbeitsplätze im Bereich der tiefen Geothermie, die von Strahlenexpositionen aus NORM betroffen sein können, sind vor allem in Anlagen im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken zu suchen. Die bekanntesten und bereits mehrfach untersuchten Anlagen befinden sich in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern (Neustadt-Glewe), Brandenburg (Groß Schönebeck) und Rheinland-Pfalz (Gebiet Landau).

Auf Basis von 180 Scaleproben aus zwei Anlagen im norddeutschen Becken und 114 Scaleproben aus einer Anlage im Oberrheingraben wurden in (Köhler, M. u. a. 2013) die in Tabelle 6-3 aufgeführten spezifischen Radionuklidaktivitäten für die jeweiligen Anlagen ermittelt. Für das hinsichtlich der Höhe der spezifischen Aktivität dominierende Pb-210 wurden maximale Werte in Höhe von 5500 Bq/g gemessen.

Berechnet man aus den in Tabelle 6-3 enthaltenen Datensätzen und in Kenntnis der geringfügigen Anteile von U-238, Th-230 und Th-232 die normierten Aktivitäten gemäß Gleichung (1), dann ergeben sich die in Abbildung 6-1 dargestellten Verhältnisse. Wie bereits aufgrund der Genese zu erwarten, entsprechen die Nuklidvektoren dem Materialtyp M2, wobei die Ablagerungen im Molassebecken dem Sub-Typ M2(Ra-226) und die im Norddeutschen Becken und Oberrheingraben dem Sub-Typ M2(Pb-210) zuzuordnen sind.

Tabelle 6-3: Spezifische Radionuklidaktivitäten (Minimal-, Median- und Maximalwerte) der Scales-Proben aus Anlagen der tiefen Geothermie.

	Ra-226 [Bq/g]			Pb-210 [Bq/g]			Ra-228 [Bq/g]			Th-228 *) [Bq/g]		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Molassebecken	0,013	0,042	0,39	0,011	0,028	0,065	0,002	0,011	0,026	0,002	0,003	0,020
Norddeutsches Becken	0,009	38	430	0,013	170	770	0,008	41	300	0,002	16	240
Oberrheingraben	0,009	34	770	0,013	500	5500	0,008	18	430	0,002	6,1	130

*) Aufgrund des hydrothermalen Prozesses ist von Ra-228 und Ra-224 zum Zeitpunkt der Ablagerung auszugehen. Th-228 wächst ab dem Zeitpunkt der Ablagerung aus dem Ra-228 nach.

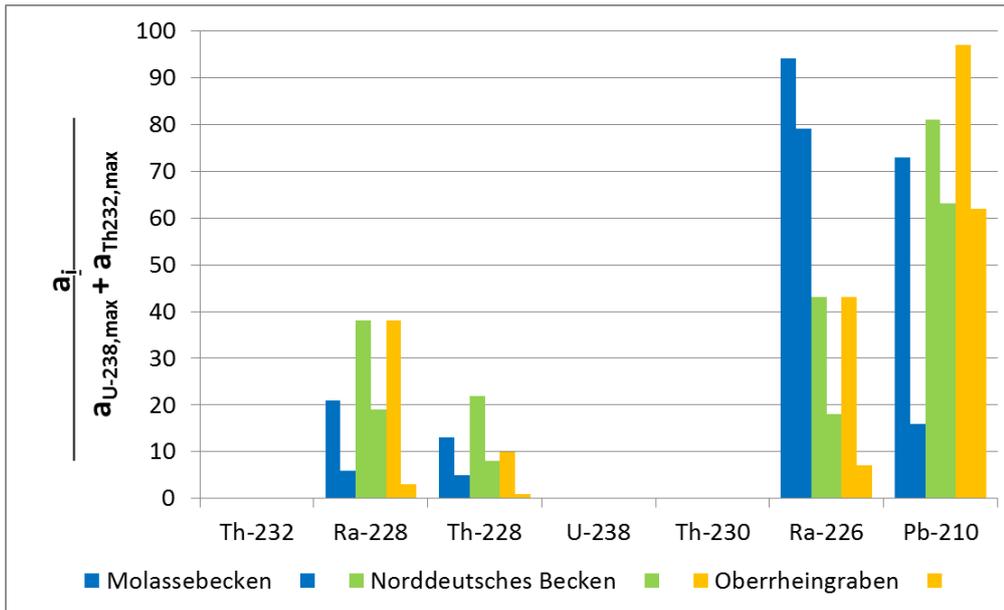


Abbildung 6-1: Normierte Nuklidanteile an Ablagerungen in Anlagen der Geothermie. Die beiden Säulen eines geologischen Herkunftsgebietes stehen für den jeweils höchsten und niedrigsten Werte der normierten Aktivität des Radionuklides.

Die Gesamt-Alpha-Aktivität des Ra-226-dominierten M2-Materials der Geothermie des Molassebeckens (Pb-210/Ra-226 ca. 0,5; Ra-228/Ra-226 ca. 0,1; Th-228/Ra-228 ca. 0,5) kann mit etwa

- 4,5 Bq je Bq U-238max („max“ hier Ra-226; keine Anteile der U-235-Reihe),
- 2,5 Bq je Bq Th-232max

und die für das Pb-210 dominierte M2-Material aus dem Oberrheingraben und dem Norddeutschen Becken (Ra-226/Pb-210 ca. 0,25; Ra-228/Pb-210 ca. 0,2; Th-228/Ra-228 ca. 0,5) mit etwa

- 2,0 Bq je Bq U-238max („max“ hier Pb-210; keine Anteile der U-235-Reihe),
- 2,5 Bq je Bq Th-232max

berechnet werden.

Setzt man die in Tabelle 6-3 aufgeführten Mittelwerte der spezifischen Radionuklidaktivitäten in Scales in Relation zu den Konzentrationen der Geothermalwässern nach Tabelle 6-1 so ergeben sich Anreicherungsfaktoren (EF = spezifische Aktivität in Scales / spezifische Aktivität im Fluid) für die direkt aus dem Wasser stammenden Radionuklide Ra-226, Pb-210 und Ra-228 in Scales im Norddeutschen Becken von $EF \approx 2000$. Für das Gebiet des Oberrheingrabens ergeben sich etwas geringere Anreicherungen für Ra-226 und Ra-228 von $EF \approx 1000$ aber ein deutlich höherer Anreicherungsfaktor für Pb-210 von $EF \approx 40.000$.

6.3.2 Abschätzung von Strahlenexpositionen in Anlagen in Deutschland

Für typische Expositionsszenarien in Geothermieanlagen mit salinen Fluiden wurden von VKTA die effektiven Jahresdosen für Beschäftigte beispielhaft abgeschätzt (Tabelle 6-4) (Köhler, M. u. a. 2013).

Tabelle 6-4: Beispielhafte Abschätzung einer effektiven Jahresdosis E für Beschäftigte einer Anlage der tiefen Geothermie (Bohrungen > 400 m) mit E_A Dosis durch Direktstrahlung, E_{inh} Dosis durch Inhalation und E_{ing} Dosis durch Ingestion; t_{exp} Aufenthaltszeit gesamt ohne Unterscheidung von Arbeitsplatzszenarien.

Expositionsszenario	t_{exp}	E_A	E_{inh}	E_{ing}	E
	[h]	[mSv]	[mSv]	[mSv]	[mSv]
Arbeiten in der Filterhalle	100	0,048	-	-	0,048
Visuelle Inspektion der Anlage	100	1,2	-	-	1,2
Wechsel des Vorfilters (Förderbohrung)	20	0,004	-	-	0,004
Wechsel des Hauptfilters (Injektionsbohrung)	10	0,013	-	-	0,013
Reinigung der Filter	30	0,12	0,035		0,18
Inspektion und Reinigung Wärmetauscher (geöffnet)	10	0,080	-	-	0,080
Allg. Revisions- und Wartungsarbeiten an geöffneten Anlageteilen	120	0,96	-	0,20	1,2
Aufenthalt in der Wasserdampf Wolke beim Anfahren	20	-	0,11		0,11
Arbeiten an Pumpe	20	0,0096	-	0,059	0,69
Sonstige Arbeiten	1570	0,16		-	0,16

Für die Expositionsabschätzung an Arbeitsplätzen zur Wartung geothermischer Anlagen mit relevanten Anreicherungen von NORM wurden für die Anlagen des Oberrheingrabens und des Norddeutschen Beckens konservativ abgeschätzte effektive Jahresdosen zwischen 1,5 mSv und 3 mSv im Kalenderjahr ermittelt (Köhler, M. u. a. 2013). Dabei wurde für die Revisions- und Wartungsarbeiten an geöffneten Anlageteilen eine Ingestionsdosis errechnet, die mehr als 10% der Gesamtdosis für die betreffende Tätigkeit ausmacht.

Aus der Abschätzung geht allerdings nicht eindeutig hervor, inwiefern mehrere Beschäftigte die Arbeiten ausführen und ob es sich um Beschäftigte der jeweiligen Anlage oder um Fremdfirmen handelt.

Aufbauend auf den Daten des VKTA wurden im Rahmen des Projektes GeoSys durch die GRS (Brasser u. a. 2014) ergänzende Untersuchungen zu Strahlenexpositionen von Beschäftigten an Anlagen der tiefen Geothermie durchgeführt. Mittels einer Ereignisbaumanalyse wurden Daten und deren Unsicherheiten in die Analyse einbezogen.

Die in (Brasser u. a. 2014) betrachteten Szenarien, mit denen für eine konkrete Anlage eine modellgestützte Analyse von Strahlenexpositionen durchgeführt wurde, sind in Tabelle 6-5 zusammengestellt. Nicht berücksichtigt wurde der Aufenthalt von Referenzpersonen am Aufschlagpunkt bei Freisetzung von NORM infolge eines Unfalls.

Tabelle 6-5: Szenarien und zugehörige Angaben zur Tätigkeitsdauer nach Modellansätzen aus (Brasser u. a. 2014).

Szenario	Frequenz [Anzahl/a]	Dauer [h/Vorgang]	Dauer, gesamt [h/a]
R01: Allgemeine Arbeiten Anlage (in-door)	228,0-256,0	0,5	114-128
R02: Inspektion Anlage Bereich Wärmetauscher/Generator	228,0-256,0	0,5	114-128
R03: Filterwechsel Grobfilterkolonne	2,0-3,0	1,0	2-3
R04: Filterwechsel Feinfilterkolonne	98,0-161,0	1,0	98-161
R05: Reinigung Filterkörbe, Siebe u. Gehäuse	0,33-1,0	1,0	0,3-1
R06: Arbeiten am offenen Wärmetauscher	0,33-1,0	20,0	6,7-20
R07: Arbeiten an offener Anlage, Revisionen	15,0	0,0	0
R08: Dampf-Abblasen der Anlagen (z. B. Separator)	50,0	0,5	25
R09: Arbeiten an Reinjektionspumpe	1,0-3,0	8,0	8-24
R10: Andere Arbeiten	228,0-256,0	6,86	1564-1756
R11 Summe, Gesamtdosis		39,4	1932-2246

Bezüglich der Expositionsbedingungen wird in (Brasser u. a. 2014) zwischen Arbeiten bei geschlossenen Anlagenteilen (Inspektionen der Anlage, Lagerung von verwahrten Rückständen am Standort) und Arbeiten bei geöffneten Anlagenteilen oder separierten Rückständen unterschieden.

Für die in Tabelle 6-5 aufgeführten Szenarien wurden nach Angaben in (Brasser u. a. 2014) 5000 Wertekombinationen der expositionsrelevanten Parameter berechnet und die Ergebnisse zu Häufigkeitsverteilungen aggregiert. Im Ergebnis dieser Modellanalyse werden für sechs der untersuchten Szenarien Dosiswerte errechnet, die generell unter 0,5 mSv liegen. Nur für die vier Szenarien: Inspektion der Anlage (R02), Filterwechsel (R04), Dampf Abblasen (R08) und Arbeiten an Reinjektionspumpe (R09) wurden Dosiswerte von teilweise mehr als 1 mSv errechnet. In diesen Dosiswerten sind Beiträge durch Radon mit enthalten.

Durch das Kumulieren aller Einzelverteilungen wurde eine Gesamt-Dosis (R11) errechnet, deren Median bei etwa 4,3 mSv liegt. In (Brasser u. a. 2014) wird darauf hingewiesen, dass nach Angaben der Betreiber die beobachteten Jahresdosen unter 1 mSv/a bleiben. Als ein möglicher Grund wird auf hohe Konservativitäten oder sogar unzutreffende Annahmen des Modells verwiesen. Da die in Abbildung 6-2 dargestellten Kurven zu Szenarien gehören, bei denen in der Realität wahrscheinlich unterschiedliche Beschäftigte tätig sind, spiegelt die kumulierte Gesamt-Dosis nach Abbildung 6-2 vermutlich nicht die realen Expositionen wider und die Einschätzung der Betreiber erscheint plausibel. Allerdings beruhen die den Betreibern bekannten Dosiswerte üblicherweise auf der Auswertung von Personendosimetern, mit denen innere Expositionen nicht erfasst werden können.

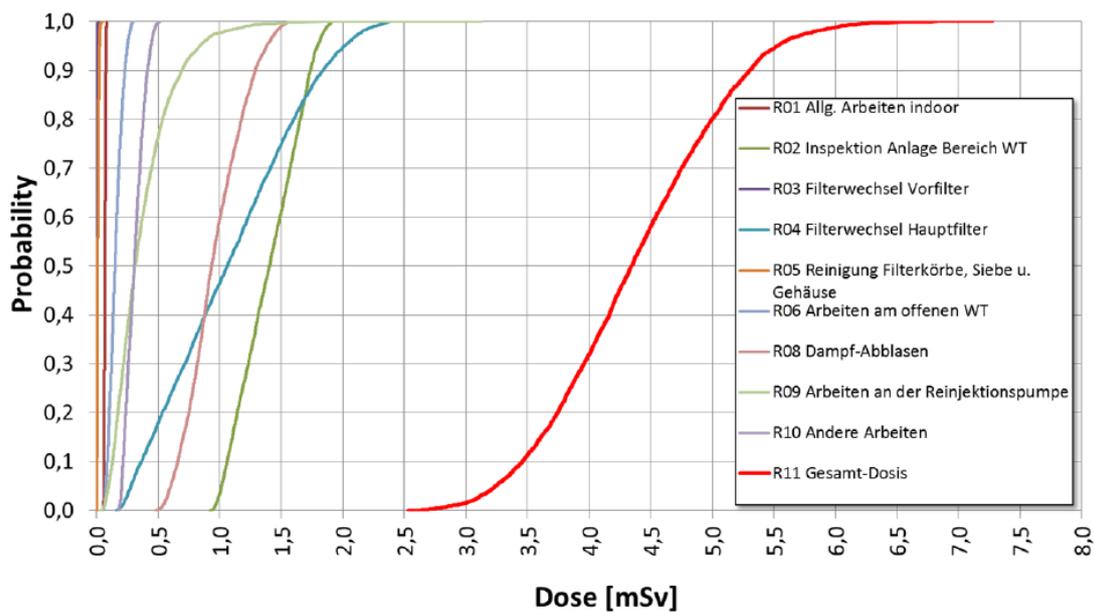


Abbildung 6-2: Ergebnisse der Szenarienanalysen von Modellrechnungen aus (Brasser u. a. 2014).

6.4 Modellierung möglicher Strahlenexpositionen

Im Normalbetrieb einer geothermischen Anlage sind Beschäftigte von Geothermieanlagen hauptsächlich durch Gammastrahlung exponiert. Bei Wartungs- und Reparaturarbeiten kommen Expositionen durch Inhalation und Direktingestion hinzu. Für eine eigene Dosismodellierung unter Bezug auf die in dieser Arbeit verwendeten Modelle und Parameter wurde ein Beschäftigter betrachtet, der eine geothermische Anlage betreut und die routinemäßigen Arbeiten (z.B. wöchentliche Filterwechsel) durchführt. Aufgrund der geringen Anzahl von relevanten Anlagen und deren Lage in Deutschland ist die Betreuung mehrerer Anlagen durch eine Person unrealistisch. Ausgenommen davon sind Fremdfirmen die Reinigungsarbeiten durchführen, die bei einer Anlage ca. alle 2-3 Jahre notwendig sind.

Die Dosismodellierung für Beschäftigte der Geothermie mit einer mittleren spezifischen Aktivität der Ablagerungen von 1000 Bq/g U-238max+Th-232max befindet sich in Anlage 2-GT-01. Um die strahlungsrelevanten Eigenschaften der Materialien zu berücksichtigen, wurden zwei Nuklidvektoren (radiumdominiert und Pb-210-dominiert) betrachtet.

Basierend auf Kapitel 6.3.2 wurden Prozessschritte, Aufenthaltszeiten etc. für die Dosismodellierung angesetzt. Mittlere Dosisleistungen ergaben sich aus Messwerten aus (Köhler, M. u. a. 2013). Generell haben die Betriebsdauer der Anlage und der Zeitpunkt der letzten Reinigung einen Einfluss auf die Dosisleistung. Diese ist ebenfalls abhängig von den Anlagenteilen und der Verteilung der Materialablagerungen in diesen Anlagenteilen. Staubkonzentrationen wurden aus den allgemeinen Expositionsbedingungen abgeleitet.

Tabelle 6-6 enthält die Ergebnisse der Expositionsmodellierung. Die zusätzliche effektive Dosis ergibt sich als Summe der Exposition bei der eigentlichen Arbeit. Die Modellierungen zeigen, dass das 1 mSv-Kriterium

überschritten wird, wenn ohne Arbeitsschutzmaßnahmen gearbeitet wird. Auch die Inhalation von Radon aus dem Separator kann zu einer Dosis von 1 mSv führen, wenn Arbeitsschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt werden. Durch die konservative Modellierung (außer Acht lassen von spezifischem Arbeitsschutz) überschätzen die hier errechneten Dosen die realen Expositionen mit hoher Wahrscheinlichkeit. Zusätzliche, in der vorgenommenen Modellierung nicht berücksichtigte Expositionszeiten der Beschäftigten sind aber z.B. bei der Einweisung von Reinigungsteams möglich.

Tabelle 6-6: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigte der Geothermie nach Ergebnissen einer Expositionsmodellierung.

	Allgemeine Arbeiten Anlage	Inspektion der Anlage	Filterwechsel	Arbeiten an Pumpe	Separatordampf ablassen
100 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 1 radiumdominiert)					
Direktstrahlung [mSv/a]	0,035	0,280	0,056	0,011	-
Inhalation [mSv/a]	0,025	0,025	0,251	0,050	-
Direktgestion [mSv/a]	-	-	0,604	0,121	-
Inhalation Radon [mSv/a]	-	-	-	-	1,17
Summe [mSv/a]	0,060	0,305	0,912	0,182	1,17
100 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 2 Pb-210 dominiert)					
Direktstrahlung [mSv/a]	0,007	0,056	0,014	0,003	-
Inhalation [mSv/a]	0,059	0,059	0,589	0,118	-
Direktgestion [mSv/a]	-	-	1,00	0,201	-
Inhalation Radon [mSv/a]	-	-	-	-	1,17
Summe [mSv/a]	0,066	0,11	1,61	0,32	1,17

6.5 Anzahl der betroffenen Beschäftigten

In Deutschland wurden 2017 nach Angaben des Bundesverbandes Geothermie 33 Anlagen der tiefen Geothermie mit einer thermischen Leistung von 303 MW und einer elektrischen Leistung von 36,9 MW betrieben, zwei weitere waren im Bau (Bundesverband Geothermie 2017).

Von den betriebenen Anlagen befinden sich 22 in Bayern, 4 Anlagen im oder am Rand des Oberrheingraben (Landau und Insheim in Rheinland-Pfalz, Bruchsal in Baden-Württemberg und Heubach / Groß Umbach in Hessen), 5 Anlagen im Norddeutschen Becken (Neustadt-Glewe, Neubrandenburg und Waren in Mecklenburg-Vorpommern, Neuruppin und Prenzlau in Brandenburg) und 2 Nordrhein-Westfalen, von denen eine Anlage in Marl die Wärme aus dem nicht mehr genutzten Schacht des Bergwerks Auguste Victoria zur Heizung von 4 Einfamilienhäusern nutzt (EnergieAgentur.NRW 2017).

Damit kann die Zahl der Anlagen, an denen radiologisch relevante Ablagerungen auftreten (können) mit ca. 10 abgeschätzt werden. Da die Anlagen im Normalbetrieb weitgehend automatisch laufen, bedarf es zur Steuerung und Überwachung nur wenig Personal. Nach Informationen von M. Köhler (pers. Mitteilung 2017) ist pro Standort mit weniger als 10 Personen zu rechnen. Von diesem Personal sind ca. 3-5 Personen direkt mit der Steuerung und Kontrolle von Anlagenteilen befasst. Darüber hinaus sind allerdings weitere Personen mit der Wartung und ggf. Reparatur der Anlagen tätig. Diese Personen sind aber nur zeitweise an den betreffenden Anlagen tätig.

Tabelle 6-7: Anzahl von Beschäftigten im Tätigkeitsfeld Handhabung von Schlämmen und Ablagerungen in der Tiefengeothermie.

	Gesamtzahl Beschäftigte	Bemerkungen
Überwachung und Steuerung	Ca. 30	Anlagen mit radioaktiven Ablagerungen
Wartung und Reparaturen	30 - 100	Nur zeitweise im Einsatz an Geothermieanlagen. Ggf. an mehreren Anlagen (externe Tätigkeit nach § 59 StrlSchG).

Bisher gibt es keine Hinweise, dass z.B. durch Freisetzung von Radon auch Beschäftigte an Anlagen im süddeutschen Molassebecken in einem Ausmaß exponiert werden, das eine vertiefende Prüfung der Expositionssituation erfordert.

6.6 Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung

Im Forschungsbericht (Brasser u. a. 2014) werden einige Aspekte angesprochen, die bei Anlagen der Geothermie (aber auch anderen Anlagen mit innenliegenden Kontaminationen) bei der Dosisabschätzung oder Dosisermittlung eine Rolle spielen.

Bei äußerer Strahlenexposition ist die operative Messgröße, die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ (ODL) nur dann repräsentativ für die Ermittlung der Körperdosis, wenn sich die betreffende Person in einem uniformen Strahlungsfeld aufhält. Die Kontamination von Anlagenteilen führt aber insbesondere im Nahbereich der Anlagen zu divergenten Strahlungsfeldern und damit zu einer für den Körper ungleichmäßigen Exposition. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass eine Überwachung mit Filmdosimetern vielfach zu unauffälligen Expositionen führt.

Die Abschätzung von Inhalationsdosen auf der Grundlage von Annahmen zur Staubkonzentration am Arbeitsplatz wird häufig nicht durch Messungen gestützt. In (Brasser u. a. 2014) wird daher vorgeschlagen, in Anlehnung an die Vorgehensweise nach RiPhyCo (BMU 2007) die Umgangsaktivität zu ermitteln und von diesem Wert ausgehend die inhalierbare / inkorporierbare Aktivität als Faktor zu berücksichtigen.

7 Verwendung von Thorium und Uran zu chemisch-analytischen oder zu chemisch-präparativen Zwecken

7.1 Branchenspezifische Übersicht

7.1.1 Abgrenzung

Uran- und thoriumhaltige Chemikalien werden derzeit in Deutschland zu chemisch-analytischen Zwecken in verschiedenen Laboren verwendet:

- Analyselabore wie Radionuklid-Labore, Chemische Labore zur Umweltüberwachung,
- Analyselabore der arbeitsmedizinischen Überwachung (z.B. Ausscheidungsanalyse),
- Labore für Elektronenmikroskopie,
- Forschungslabore der chemischen und pharmazeutischen Industrie,
- Forschungslabore an wissenschaftlichen Einrichtungen und Hochschulen.

Im Weiteren werden nur Tätigkeiten betrachtet, die nicht im Rahmen eines strahlenschutzrechtlich genehmigten Umgangs mit radioaktiven Stoffen erfolgen und bei der die ionisierende Strahlung nicht gezielt genutzt wird. Radioanalytische Labore oder Forschungseinrichtungen, bei denen solche Chemikalien ggf. auch vermittels der ionisierenden Strahlung gemessen werden, werden daher nicht betrachtet.

7.1.2 Art und Menge von verwendeten Chemikalien

Von speziellen Lieferantenfirmen aus Deutschland werden die in Tabelle 7-1 zusammengestellten Chemikalien angeboten. Im Rahmen ihres Komplettservice bieten auch ausländische Gerätehersteller wie z.B. PerkinElmer Standardchemikalien zur Kalibrierung der Messgeräte an.

Hauptverwendungen der hier betrachteten Chemikalien sind Standardlösungen in der Analytik.

Durch die Aufnahme des Parameters Uran in die TrinkwV ist bei den Chemielaboren für Trinkwasseranalytik der Bedarf an Standardlösungen mit Uran gestiegen. Weiterhin werden, wie Nachfragen bei chemischen Analyselaboren ergaben, auch Feststoffproben (Boden, Bauschutt, etc.) im Umfang von größenordnungsmäßig 10^3 Stück mit chemischen Verfahren, insbesondere ICP-MS untersucht.

Außer als Standardlösungen in der quantitativen Analytik werden Uranylverbindungen als Kontrastmittel in der Elektronenmikroskopie verwendet. Solche Anwendungen sind aus Universitätskliniken und Forschungszentren bekannt. Der Lieferant Science Service verweist darauf, dass er diese Chemikalien an deutsche Kunden nur abgibt, wenn eine gültige Umgangsgenehmigung für radioaktive Stoffe vorliegt.

Weitere Anwendungen im Rahmen chemisch-analytischer Verfahren sind ggf. bei speziellen Forschungsarbeiten zu erwarten und sind daher (wenn überhaupt) auf Einzelfälle beschränkt.

Tabelle 7-1: Verwendete uran- und thoriumhaltige Chemikalien in Deutschland (Quelle: Internetseiten der Lieferanten, abgerufen Juni 2017).

Lieferant	Produktbezeichnung lt. Katalog	Spezifikation	Anmerkungen
Aldrich	Thorium nitrate hydrate	99% (T), ~4 mol/mol water	Derzeit nicht verfügbar
Sigma-Aldrich	Uranium atomic absorption standard solution	1000 µg/mL U in 1 wt.% HNO ₃	Verfügbarkeit: Das Produkt wurde gestrichen
	Thorium Standard for AAS	1000 µg/mL Th in 5% HNO ₃	Verfügbarkeit: Das Produkt wurde gestrichen
EMD Millipore	Thorium ICP standard	Th(NO ₃) ₄ in HNO ₃ 2-3% 10 mg/l	Standard-Handelsgröße 100 ml in Plastikflasche
	Uranium ICP standard	UO ₂ (NO ₃) ₂ in HNO ₃ 2-3% 10 mg/l	Standard-Handelsgröße 100 ml in Plastikflasche
Science Service (München)	Uranylacetat, Pulver	A.C.S. abgereichertes Uran	Standard-Handelsgröße 25 g
	Uranylacetat, Lösung	Vorgefertigte, gebrauchsfertige Lösung. Erhältlich als 0,5%, 1%, 2%, 3% und 4%ige Lösung. Andere Konzentrationen auf Anfrage. Abgereichertes Uran	Standard-Handelsgröße 100 ml
	Uranyl Formiat	Abgereichertes Uran	Standard-Handelsgröße 1 g; 5 g
SERVA Electrophoresis (Heidelberg)	Uranylacetat·2H ₂ O	Reinst	Standard-Handelsgröße 5 g; 25 g

Andere früher eingesetzte Chemikalien, wie z.B. Magnesiumacetat-Uranylacetat-Lösung (Kahanes Reagenz) zur quantitativen Natrium-Bestimmung sind inzwischen ohne praktische Bedeutung, da andere instrumentelle Techniken verfügbar sind.

Als Hersteller der Uranchemikalien werden in den zugehörigen Sicherheitsdatenblättern zumeist Firmenstandorte in den USA benannt. Die Hersteller verwenden isotopisch abgereichertes Uran (DU), so dass die derzeit gehandelten Uranchemikalien kein Uran in natürlicher Isotopenzusammensetzung enthalten. Aus diesem Grund werden die Uranchemikalien (soweit es sich nicht um Altbestände handelt) nach den Anforderungen von Teil 2 StrlSchV behandelt und erfordern bei einer Aktivität von mehr als 1E+04 Bq U-238 (ca. 1,5 Gramm) eine Umgangsgenehmigung nach § 7 StrlSchV.

Wie schon an den Standard-Handelsmengen erkennbar, ist die derzeit in Deutschland verbrauchte Menge an diesen Chemikalien nicht sehr groß. Die je Versuch eingesetzten Mengen werden mit Mikrogramm bis Milligramm eingeschätzt und die Gesamtmenge des in Deutschland für chemisch-analytische Zwecke verbrauchten Urans ist in der Größenordnung von 10⁰ kg verteilt auf ca. 10² Einrichtungen zu veranschlagen.

Für Thorium kann von ähnlichen Mengen wie beim Uran ausgegangen werden.

Uran- und thoriumhaltige Präparate werden auch für Schulversuche in allgemeinbildenden Schulen sowie Berufsschulen verwendet. Allerdings sind diese Verwendungen nicht dem Tätigkeitsfeld der analytisch-

präparativen Verwendung unter Ausnutzung chemischer oder physikalischen Eigenschaften zuzurechnen. Vielmehr wird dabei die ionisierende Strahlung gezielt genutzt, so dass damit ein Umgang nach § 5 Abs. (39) Nr. 1a StrlSchG vorliegt.

7.1.3 Verwendung von Thorium und Uran zu chemisch-präparativen Zwecken

Die Verwendung von Thorium und Uran zu chemisch-präparativen Zwecken ist in der StrlSchV nicht genauer spezifiziert. In der (nichtamtlichen) Begründung zur StrlSchV aus dem Jahr 2001 (BMU 2001) wird auf eine Stellungnahme der SSK (SSK 1997) verwiesen und festgestellt, dass die Herstellung von thorierten Konsumgütern wie Schweißelektroden und Gasglühstrümpfen Tätigkeiten im Sinne des § 3 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchV sind. Sie unterliegen der Genehmigungspflicht nach § 106 StrlSchV und wurden deshalb nicht als Arbeitsfelder in Anlage XI StrlSchV aufgenommen.

Wird die Herstellung von thorierten Produkten ausgenommen, dann reduziert sich das Tätigkeitsfeld „Verwendung von Thorium und Uran zu chemisch-präparativen Zwecken“ auf Labortätigkeiten, wie sie bereits im Kapitel 7.1.1 beschrieben wurden. Als ein praktiziertes Beispiel wäre die Verwendung von Uranylverbindungen als Kontrastmittel in der Elektronenmikroskopie diesem Tätigkeitsfeld zuzuordnen.

In solchem Fall sind die chemisch-analytischen und chemisch-präparativen Tätigkeiten ein Tätigkeitsfeld mit praktisch gleichen Expositionsbedingungen. Expositionspfade zu diesem Tätigkeitsfeld sind im Kapitel 7.2 und Abschätzungen zum Ausmaß der Strahlenexposition im Kapitel 7.3 beschrieben.

Durch den im StrlSchG realisierten Wegfall des Regelungsbereichs „Arbeiten“ und die Präzisierung des Begriffs „Umgang“ (der natürlich vorkommende radioaktive Stoffe nur dann einbezieht, wenn sie auf Grund ihrer Radioaktivität, zur Nutzung als Kernbrennstoff oder zur Erzeugung von Kernbrennstoffen verwendet werden), ist eine Genehmigung für den Zusatz radioaktiver Stoffe nicht über § 12 (3) StrlSchG möglich, sondern nur im Zusammenhang mit dem Schutz der Verbraucher gemäß § 40 StrlSchG erforderlich.

Aufgrund dieser rechtlichen Rahmenbedingungen ist eine weiter gefasste Interpretation des Begriffes „chemisch-präparative Verwendung“ nötig, um die Tätigkeiten der Beschäftigten beim Zusatz vor allem von Thorium zu Konsumgütern in den Strahlenschutz zu integrieren. Um die daraus abzuleitenden Konsequenzen im Sinne der Aufgabenstellung dieser Untersuchung ermitteln zu können, werden die derzeit in Deutschland ausgeübten Tätigkeiten dieser Branche im folgenden Kapitel beschrieben.

7.1.4 Herstellung von Konsumgütern mit Zusatz radioaktiver Stoffe

Produkte mit Zusatz von Uran natürlicher Isotopenzusammensetzung werden in Deutschland derzeit nicht hergestellt. Wie eine Auswertung von Importstatistiken (BAFA 2014) zeigt, wurde das von 2012 – 2014 importierte Natururan hauptsächlich für kerntechnische Zwecke verwendet (Empfänger: Firmen URENCO und Advanced Nuclear Fuels). Ein kleiner Teil ging an das Institut für Transurane in Karlsruhe und die Enrichment Techn. Comp. Limited in Jülich. Alle diese Verwendungen liegen außerhalb der hier zu prüfenden Tätigkeiten.

Thorierte Teile werden in der Lampenproduktion verwendet als (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000)

- thorierte Wolframelektroden oder Elektrodenbeschichtungen,
- ThO₂-Sinterkörper als Elektrodeneinsätze,
- Th-Metallfolien als Elektrodenbauteile,
- ThJ₄-haltige Füllsubstanzen.

Darüber hinaus werden thorierte Wolframlegierungen verwendet als

- Schweißelektroden,
- Bauteile (z.B. Düsen) für Spezialmaschinen.

Die Thorium-Gehalte dieser Produkte variieren. Üblich sind Beimengungen von 0,35-0,55% (WT4), 0,8-1,2% (WT10, F288 Typ 2A), 1,7-2,2% (WT20, F288 Typ 2B), 2,8-3,2% (WT30) und 3,8-4,2% (WT40) („Total Materia - Die weltweit umfangreichste Datenbank“ 2016).

In der Militärtechnik ist die Verwendung von ThO₂ als Teil eines IR-Strahlers in MILAN-Panzerabwehrraketen allgemein bekannt („MILAN“ 2017).

Verwendet, aber nicht (mehr) in Deutschland hergestellt werden thorierte Gasglühstrümpfe, thorierte Magnesiumlegierungen, thorierte Optiken, uranhaltige Trimmgewichte, Abschirmbehälter aus Uranmetall, Uranglas. Die Verwendung dieser fertigen Produkte erfolgt aber nicht zu Zwecken, die in ein Tätigkeitsfeld „chemisch-präparativ“ einzuordnen sind. Soweit solche Tätigkeiten dem Tätigkeitsfeld Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen zuzuordnen sind, werden sie im Kapitel 8 genauer betrachtet.

Als „*Verwendung zu chemisch-präparativen Zwecken*“ werden im Weiteren Prozesse untersucht, bei denen in Deutschland Thoriumverbindungen bei der Herstellung von Produkten gezielt zugesetzt werden, um chemische und oder physikalische Eigenschaften von Thorium aber nicht seine Radioaktivität zu nutzen.

Zur Herstellung solcher Produkte wurden nach Angaben des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) und des BMU/BMUB im Zeitraum 2011-2014 die in Tabelle 7-2 aufgeführten Mengen an Thorium importiert (BAFA 2014).

Tabelle 7-2: Importmengen und Importeure von Thorium nach Deutschland.

Empfänger (Quelle)	Datum	Menge	Versenderland
AREVA (1)	11.04.2014	13,155 kg	Frankreich
(k.A.)	2014	35 kg	USA
Ges. für Wolframindustrie (1)	20.11.2013	123,032 kg	USA
KIT (1)	22.11.2013	0,5 g	USA
OSRAM (1)	07.05.2012	0,407 kg	USA
OSRAM (1)	15.06.2012	203,5 kg	Indien
OSRAM (1)	05.10.2012	100,0 kg	USA
G.L.E. mbH (1)	14.06.2012	0,044 kg	USA
(k.A.)	2011	204 kg	Hongkong (JB 2011)

(1) (BAFA 2014), Datum = Anzeige-/Abfertigungsdatum; (k.A.) Jahresberichte „Umweltradioaktivität und Strahlenschutz“ Herausgegeben vom BMU / BMUB zum jeweils genannten Jahr

7.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

Die Verwendung von Thorium zu chemisch-analytischen Zwecken findet in Laboratorien und Forschungseinrichtungen statt. Die Expositionsbereiche innerhalb eines Laboratoriums hängen von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten ab. Für generelle Expositionsszenarien kann jedoch von Standardsituationen ausgegangen werden. Dazu gehören:

- Lagerung der Thorium-Standardlösung
- Handhabung der Thorium-Standardlösung
- Handhabung der verdünnten Probenlösungen
- Bedienung und Wartung des Analysegerätes
- Lagerung von Abfallgebinden innerhalb des Labors

Für die zuvor identifizierten Szenarien sind folgende Expositionen der Beschäftigten grundsätzlich zu betrachten:

- Äußere Exposition durch Gammastrahlung (Direktstrahlung).
- Exposition der Hände und der Haut aufgrund der durchgeführten Arbeiten (Hautkontaktpfad).
- Exposition durch Direktingestion von Haut- und Kleidungskontaminationen (Ingestionspfad).
- Exposition durch Inhalation von Staub oder Aerosol (Inhalationspfad).
- Exposition durch Inhalation von Radon-220.

Die Exposition durch Direktingestion von Haut- und Kleidungskontaminationen (Ingestionspfad) ist aufgrund der bei Laborarbeiten zu unterstellenden guten fachlichen Praxis als unbedeutender Expositionspfad zu bewerten. Auch die Exposition durch Staub ist aufgrund der üblicherweise flüssigen Form, in der Th-Chemikalien gehandhabt werden, bei realistischer Betrachtung belanglos. Um trotzdem eine Vorstellung zu

erhalten, ob aus der chemisch-analytischen Verwendung von Thorium ein Anzeigebedarf nach § 56 StrlSchG resultieren kann, werden im Kapitel 7.3 modellhaft Expositionen der o.g. Expositionspfade untersucht.

Deutlich andere Expositionsbedingungen als in Laboratorien liegen vor, wenn im gewerblichen oder industriellen Maßstab thorierte Legierungen durch Zusatz von Thorium hergestellt werden. Solche Verwendungen zu „präparativen Zwecken“ werden im Kapitel 7.4 gesondert untersucht.

7.3 Ausmaß der Strahlenexposition bei chemisch-analytischen Tätigkeiten - Abschätzung

7.3.1 Charakterisierung der Strahlenquelle

Um zu prüfen, ob bei chemisch-analytischen Tätigkeiten das Ausmaß der Strahlenexposition einen Anzeigebedarf nach § 56 StrlSchG zur Folge haben könnte, wird im Folgenden die Dosis abgeschätzt, die bei chemisch-analytischen Verwendungen von 1 L Thorium-Standardlösung im Kalenderjahr zu erwarten ist.

Thorium-Standardlösungen sind handelsübliche Chemikalien mit typischerweise 1 g/l Thorium, die in 100 ml Flaschen geliefert werden (s. Tabelle 7-1). Bei allen anderen im Analyseprozess evtl. vorkommenden Lösungen bzw. Präparaten ist die Thoriumkonzentration als Folge von Verdünnungen niedriger.

Da bei der Herstellung von Thoriumchemikalien sowohl das Ra-228 als auch Ra-224 und Folgeprodukte weitgehend abgetrennt werden (M6-Material), entsteht ein radioaktives Ungleichgewicht, das sich zeitlich nach den radioaktiven Zerfallsgesetzen verändert (Abbildung 7-1). Für eine Expositionsabschätzung ist daher zwischen „jungem“ Thorium (Zeit seit Abtrennung aus Mineralen/Erzen bis 10 Jahre) und „altem“ Thorium (Zeit seit Abtrennung aus Mineralen/Erzen über 20 Jahre) zu unterscheiden.

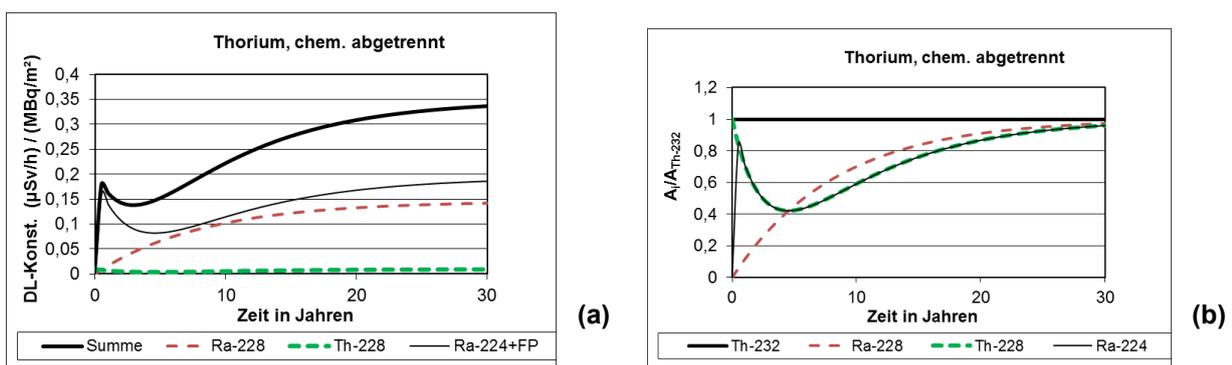


Abbildung 7-1: Zeitliche Veränderung der Nuklidzusammensetzung in chemisch abgetrenntem Thorium (a) und daraus abgeleitete Veränderung der Dosisleistungskonstante (b) von 1 MBq chemisch abgetrenntem Th-232 im Gleichgewicht mit Th-228.

Für die Verwendung von Th-Chemikalien in Laboren kann davon ausgegangen werden, dass die benutzten Lösungen nicht aus alten Lagerbeständen bezogen werden, sondern relativ frisch hergestellte Chemikalien sind.

7.3.2 Strahlungsfeld von Th-Lösungen

Das dosisrelevante (gamma-)Strahlungsfeld um Thoriumlösungen wird hauptsächlich von den kurzlebigen Tochternukliden der Th-232-Zerfallsreihe Ac-228, Pb-212 und Tl-208 verursacht. Diese Radionuklide kommen in einer Lösung in konstanten Verhältnissen mit den längerlebigen Vorgängern Ra-228 ($Ac-228/Ra-228 = 1,0$) und Th-228 ($Pb-212/Th-228 = 1,0$, $Tl-208/Th-228 = 0,36$) vor. Berechnet man ausgehend von einem anfänglichen Aktivitätsgleichgewicht in der Th-232-Zerfallsreihe (Th-232sec) und mit der Annahme einer vollständigen Abtrennung von Radiumisotopen (Ra-228, Ra-224) die zeitlich veränderlichen Aktivitätsanteile der Zerfallskette Th-232 – Ra-228 (Ac-228) – Th-228 – Ra-224 mit Folgeprodukten, so ergeben sich die in Abbildung 7-1(a) dargestellten Kurven. Mit den Gamma-Dosisleistungskonstanten der einzelnen Radionuklide (für das Modell Punktquelle) nach Tabelle 4-2 kann damit die zeitliche Veränderung der Dosisleistungskonstante einer Thoriumchemikalie errechnet werden. Es ergibt sich der in Abbildung 7-1(b) dargestellte Kurvenverlauf. Dieser Kurvenverlauf zeigt, dass „junge“ Th-Chemikalien in den ersten 10 Jahren nach einer Abtrennung des Thoriums aus Mineralien eine deutlich geringere äußere Strahlenexposition verursachen als „alte“ (mehr als 30 Jahre) Chemikalien.

Für den Bezugszeitpunkt von 1 Jahr ab Abtrennung des Thoriums aus einem Erz kann für eine Standardlösung von 1 g/L Thorium (4 kBq/L) und für ein Volumen V von 0,1 Liter die in Tabelle 7-3 angegebene Dosisleistung (DL) an der Oberfläche eines als Kugel ($R = 2,88$ cm) mit homogener Aktivitätsverteilung angenommenen Gebindes abgeschätzt werden. Bei dieser Abschätzung wurde Th-230 mit einem Aktivitätsanteil von 20% bezogen auf Th-232 mit einbezogen. Dieser Wert ist nicht altersabhängig, sondern widerspiegelt das U/Th-Verhältnis im zur Herstellung benutzten Erz. Der Th-230/Th-232-Wert kann deutlich unterschiedlich ausfallen. Der hier angesetzte Wert soll nur zur Orientierung dienen.

Tabelle 7-3: Abschätzung der zusätzlichen Dosisleistung an der Oberfläche eines mit 0,1 Liter á 1 g/l Thorium gefüllten kugelförmigen Gefäßes. Th-Alter 1 Jahr. Erläuterungen s. Text.

Nuklid	A_i/A_{Th-232}	CA	A	h_{10}	G	DL
		[kBq/m ³]	[kBq]	[nSv m ² /(h kBq)]	[1/m ²]	[nSv/h]
Th-232	1,00	4000	0,400	0,001	1,81E+03	0,7
Ra-228+	0,114	455	0,046	0,145	1,81E+03	11,9
Th-228	0,713	2852	0,285	0,002	1,81E+03	1,0
Ra-224+	0,716	2865	0,287	0,207	1,81E+03	107,3
Th-230	0,2	800	0,080	0,001	1,81E+03	0,1
Summe						121,2

Die Abschätzung der Tabelle 7-3 ist konservativ im Hinblick auf die Dosisleistung, da sowohl die Geometrie (Kugel) als auch die Vernachlässigung von Eigenabsorption und Wandabsorption die realen

Dosisleistungen tendenziell überschätzen. Sie zeigt aber, dass an der Standardlösung eine im Vergleich zur Hintergrundstrahlung (ca. 80-120 nSv/h) messbare Erhöhung der Dosisleistung auftreten kann.

Die zusätzliche Dosisleistung an der Oberfläche des Gefäßes sinkt zunächst nach 2,5 Jahren auf ca. 100 nSv/h ab und steigt danach bis auf ca. 250 nSv/h an. Bis zu 10 Jahre nach der Abtrennung des Thoriums verbleibt die Dosisleistung unter 165 nSv/h.

Für Abfüllungen mit anderen Volumina ergeben sich mit dem Modellansatz des Kugelmodells die in Tabelle 7-4 aufgeführten Dosisleistungen an der Oberfläche und in Abständen von 3 cm bis 30 cm. Diese Daten machen deutlich, dass eine Strahlenwirkung auf den Körper, für die ein Abstand von ca. 30 cm als typisch angesetzt werden kann, nur zu äußerer Bestrahlung mit Umgebungsäquivalentdosisleistungen von weniger als 1 nSv/h führt. Die Dosisleistungen im Kontakt oder im Nahbereich bis 10 cm sind nur für eine Exposition der Hand aussagekräftig.

Tabelle 7-4: Zusätzliche Dosisleistung an der Oberfläche von unterschiedlich großen Volumina mit Th-Lösung, 1 g/L (Basis: Kugelmodell; Th-Alter 1 Jahr).

Vol.	DL (Oberfläche)	DL(Oberfl. + 3 cm)	DL(Oberfl. + 10 cm)	DL(Oberfl. + 30 cm)
	nSv/h	nSv/h	nSv/h	nSv/h
1000 mL	261	88,3	26,4	5,15
100 mL	165	20,4	4,08	0,62
10 mL	56,2	3,63	0,52	0,068
1 mL	18	0,52	0,06	7E-3
0,1 mL	12,1	0,06	6,3E-03	7,30E-04
0,01 mL	5,6	6,80E-03	6,50E-04	7,40E-05

7.3.3 Äußere Strahlenexposition aus kontaminierten Flächen

Eine äußere Strahlenexposition aus kontaminierten Flächen ist möglich, wenn es durch Verschütten größerer Flüssigkeitsmengen zu einer Kontamination von Flächen im Arbeitsbereich kommt. Dieser Fall tritt im normalen Arbeitsablauf nicht auf, kann aber nach Zerbrechen einer Flasche mit Th-Standardlösung als Kontamination einer Fläche, z.B. Laborfußboden, vorkommen.

Als Szenario für die Modellierung von Strahlungsfeldern wird in Anlehnung an (Brenk Systemplanung GmbH 2004) für diesen Fall angenommen, dass eine Kontamination der Oberfläche von einer kreisförmigen Verteilung mit einem Radius von 1,5 m vorliegt (Gesamtfläche etwa 7 m²). Für die exponierte Person wird ein Abstand von 1 m zur kontaminierten Oberfläche unterstellt. Da die kontaminierte Oberfläche begrenzt ist, fließt in die Berechnung ein geometrischer Faktor ein, der die Dosis, die auf der Grundlage des Dosisfaktors für eine unendlich ausgedehnte Fläche basiert, entsprechend reduziert (Richter, Eich, und Richter 2014).

Die Dosisleistung durch die externe Exposition einer ausgelaufenen bzw. auf einer Oberfläche verteilten Quelle DL_F kann demnach anhand der folgenden Formel abgeschätzt werden:

$$DL_F = A_F \cdot (R_{Gamma} + R_{Beta}) \cdot G \quad (7)$$

A_F	Aktivität pro Fläche beim Austritt von Aktivität (Bq/m ²)
R_{Gamma}	effektive Dosisrate 1 m über unendlich ausgedehnter Ebene für Gammastrahlung (Sv/h je Bq/m ²)
R_{Beta}	effektive Dosisrate 1 m über unendlich ausgedehnter Ebene für Betastrahlung (Sv/h je Bq/m ²)
G	Geometriefaktor für eine kontaminierte Fläche mit einem Radius von 1,5 m im Verhältnis zu einer unendlichen Fläche (= 0,1).

Die Dosisleistung über einer mit Standardlösung aus einer vollen 100 ml-Flasche mit 1 %iger Th-Lösung kontaminierten Fläche ist in Tabelle 7-5 abgeschätzt. Die Dosiskoeffizienten R_{Gamma} wurden aus (Deutscher Bundestag 2001b) entnommen und in die hier genutzte Einheit umgerechnet. Die Betastrahlung trägt vor allem zur Hautdosis bei und kann bei den sehr geringen effektiven Dosen außer Acht gelassen werden.

Tabelle 7-5: Dosisleistung über einer mit Th-Standardlösung (1g/L, Th-Alter der Lösung 1 Jahr) kontaminierten Fläche. Geometriefaktor $G = 0,1$ (s. Text).

Nuklid r	A_r/A_{Th-232}	A_F [Bq/m ²]	R_{Gamma} [nSv/h je Bq/m ²]	DL_F nSv/h
Th-232 (oTN)	1,00	267	1,76E-06	<0,001
Ra-228 (Ac-228)	0,114	30	7,9E-03	0,024
Th-228 (Ra-224 mTN)	0,715	191	4,7E-03	0,090
Th-230 (oTN)	0,20	53	2,4E-06	<0,001
Summen				0,114

(oTN / mTN = ohne / mit Tochternuklide, s. (Deutscher Bundestag 2001b))

Die Daten der Tabelle 7-5 zeigen, dass die Dosisleistung über einer mit Th-Lösung kontaminierten Flächen äußerst gering ist.

7.3.4 Innere Strahlenexposition durch Ingestion

Ein Modell, das die Aktivitätsaufnahme bei Arbeiten mit einem Direktkontakt zu kontaminierten Oberflächen beschreibt, wurde z.B. zur Herleitung der Oberflächenkontaminationen nach Anlage III Tabelle 1 Spalte 4 StrlSchV benutzt (BMU 2001). Danach kann die Aktivitätsaufnahme abgeschätzt werden gemäß

$$A_{ing,r,s} = \sum_r a_F \cdot f \cdot I \cdot \Delta T \quad (8)$$

a_F	flächenbezogene Aktivität für Radionuklid r in Bq cm ⁻²
f	Transferfaktor: Haut/(Kleidung)-Hand - Mund (=0,01)
I	Kontaktrate mit kontaminierter Fläche (=1,25 cm ² /h)
ΔT	Expositionszeit (h).

Für die hier zu betrachtenden Arbeiten wird eine solche regelmäßige Aktivitätsaufnahme aus einer größeren kontaminierten Oberfläche nicht stattfinden. Die geringe Menge an gehandhabter Lösung und die insgesamt geringe Zahl von Handhabungen begrenzen die Möglichkeit der Schütt-/Tropfverluste und damit auch die mögliche orale Aufnahme in den Körper. Im Zusammenhang mit der Handhabung von Th-Chemikalien im normalen Laborbetrieb wird daher eine Ingestion von Thorium ausgeschlossen.

Bei (einmaligen) Ereignissen, bei denen eine radioaktive Flüssigkeit freigesetzt wird, wird in Modellen zur Ableitung von Freigrenzen im Zusammenhang mit Transporten (Richter, Eich, und Richter 2014) ein Anteil der Gesamtaktivität $1E-5$ unabsichtlich durch Ingestion z.B. über die Hände aufgenommen.

Die Strahlenexposition durch Ingestion dieser Aktivität E_{ing} kann berechnet werden nach:

$$E_{ing} = \sum_r A_{ing,r} \cdot g_{ing,r} \tag{9}$$

$A_{ing,r}$ - Aktivitätsaufnahme von Radionuklid r in Bq

$g_{ing,r}$ - Ingestionsdosiskoeffizient der Referenzperson für das Radionuklid r in Sv/Bq

Tabelle 7-6: Dosiskoeffizienten zur Ermittlung der inneren Strahlenexposition für Nuklide der Th-232 Zerfallsreihe und für Th-230 (Deutscher Bundestag 2001b) durch Ingestion der Bezugsaktivität einer Th-Chemikalie in Abhängigkeit vom Zeitraum seit Abtrennung des Thoriums aus Erzen („Th-Alter“).

Nuklid r	Ingestionsdosiskoeffizient $g_{ing,r}$ für Beschäftigte [Sv/Bq]	Bezugsaktivität [Bq]		
		Th-Alter 1 a	Th-Alter 10 a	Th-Alter >> 30 a
Th-232	2,20E-07	1,0	1,0	1,0
Ra-228	6,70E-07	0,114	0,7011	1,0
Th-228	7,20E-08	0,713	0,5921	1,0
Ra-224	6,50E-08	0,716	0,5915	1,0
Th-230	2,10E-07	0,2	0,2	0,2
		Dosiskoeffizient	Radionuklidgemisch	[Sv/Bq(Th-232)]
		4,36E-07	8,13E-07	1,07E-06

Die radionuklidspezifischen Dosiskoeffizienten $g_{ing,r}$ können aus der Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis (BMU 2007) bzw. dem Bundesanzeiger (Deutscher Bundestag 2001b) entnommen werden. In Tabelle 7-6 sind, soweit in (Deutscher Bundestag 2001b) unterschiedliche Werte für die biologische Verfügbarkeit f_1 aufgeführt sind, die jeweils höchsten Werte verwendet und daraus für drei „Alterswerte“ die auf die Ingestion von 1 Bq Th-232 bezogenen Dosiskoeffizienten des Radionuklidgemisches einer Th-Lösung berechnet.

Da die Ingestionsdosis in hohem Maße vom Ra-228 beeinflusst wird, fällt, wie Daten in Tabelle 7-6 zeigen, bei sehr frischen Lösungen die Ingestionsdosis um mehr als den Faktor 2 geringer aus, als bei alten

Lösungen. Bei einem Alter der Chemikalie von 10 Jahren ist allerdings der Dosiskoeffizient bereits auf ca. 80% seines stationären Wertes angestiegen.

7.3.5 Inhalation von Radon-220

Da im hier betrachteten Modellfall nur Flüssigkeiten gehandhabt werden, ist eine Strahlenexposition durch Inhalation von radioaktiv belastetem Staub praktisch ausgeschlossen. Allerdings kann es bei der Handhabung von Lösungen zu einer Freisetzung des Edelgases Rn-220 und darüber zu einer Inhalationsdosis kommen.

Die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-220 und seinen kurzlebigen Folgeprodukten erfolgt gemäß (BfS 2010) auf der Grundlage eines Dosiskoeffizienten, der auf dem dosimetrischen Lungenmodell nach ICRP 50 basiert. Dabei wird nur die Inhalation der kurzlebigen Folgeprodukte berücksichtigt, da das vom inhalierten Radon-220 verursachte Strahlenrisiko vernachlässigt werden kann.

Aus der Konzentration der in der Luft befindlichen Folgeprodukte von Rn-220 errechnet sich eine potentielle Alphaenergiekonzentration PAEC (in nJ/m³) gemäß

$$\text{PAEC (nJ/m}^3\text{)} = 5,32\text{E-}4 \times C(\text{Po-216}) + 69,1 \times C(\text{Pb-212}) + 6,56 \times C(\text{Bi-212})$$

wobei die Konzentrationen $C(\text{Po-216})$, $C(\text{Pb-212})$, $C(\text{Bi-212})$ in Bq/m³ anzugeben sind.

Der Dosiskoeffizient der Referenzperson j für die aus dem radioaktiven Zerfall der Rn-220 Folgeprodukte potentielle Alpha-Energie-Exposition kurzlebiger Radon-220-Zerfallsprodukte beträgt (BfS 2010):

$$g_{\text{pot(Rn220),j}} = 0,5 \text{ Sv m}^3 \text{ J}^{-1} \text{ h}^{-1} = 0,5 \text{ nSv m}^3 \text{ nJ}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

und bezieht sich somit nur auf die kurzlebigen Zerfallsprodukte. Er gilt nur für die Berechnung der effektiven Dosen am Arbeitsplatz ("Beschäftigte" und Referenzperson ">17a" (BfS 2010) bei einer langfristig wirksamen Exposition. Im hier zu betrachtenden Fall sind allerdings Freisetzungen von Rn-220 nur realistischerweise zu erwarten, wenn unmittelbar mit den Lösungen gearbeitet wird. Das bedeutet, dass kurzfristig eine bestimmte Aktivität an Rn-220 in die Luft eines Arbeitsplatzes eintreten kann. Unter Laborverhältnissen ist durch Ventilation des Arbeitsplatzes über Abzüge ein Einatmen dieser Aktivität praktisch ausgeschlossen. Um eine Obergrenze möglicher Expositionen aus solchen Freisetzungen abzuschätzen, kann die bei impulsartigen Freisetzungen einer bestimmten Menge an Rn-220 entstehende Aktivität an Folgeprodukten und deren potentielle Alphaenergie berechnet werden.

In Abbildung 7-2 ist der zeitliche Verlauf der für die potentielle Alphaenergie relevanten Tochternuklide des Rn-220 bei impulsartiger Freisetzung von 1 Bq Rn-220 Aktivität dargestellt.

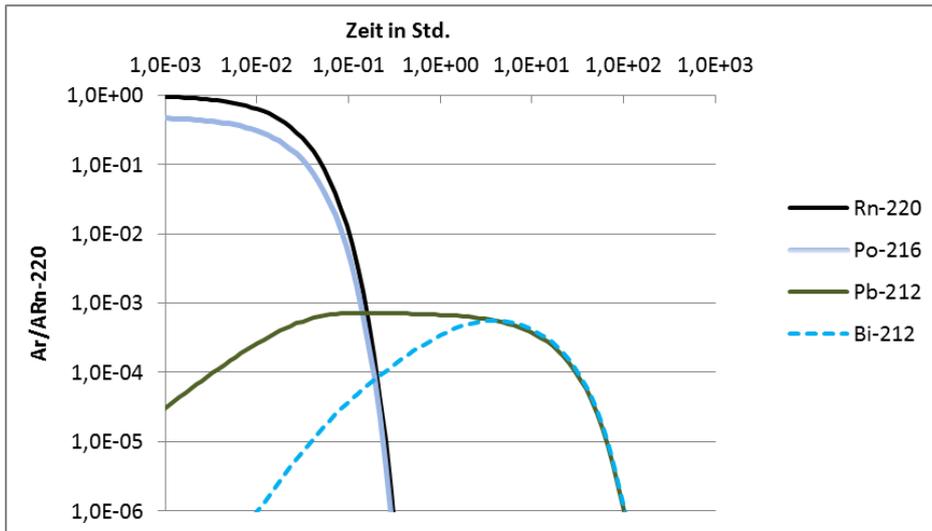


Abbildung 7-2: Zeitlicher Verlauf der normierten Gesamtaktivität von Rn-220 und seinen für die potentielle Alphaenergie relevanten Tochternukliden bei impulsartiger Freisetzung von Aktivität.

Unterstellt man, dass die aus dem Zerfall von 1 Bq Rn-220 entstehenden Tochternuklide, vor allem das Pb-212 vollständig eingeatmet werden, dann ergibt sich integriert über die Zeit eine **maximale Dosis** aus der impulsartigen Freisetzung von **1 Bq Rn-220 von 0,39 nSv**. Dieser Wert ist allerdings für eine realistische Expositions Betrachtung bei einmaliger Freisetzung stark konservativ überschätzend, da der Hauptanteil der errechneten Exposition aus den Pb-212 stammt und die aus dem Zerfall von Rn-220 gebildete Aktivität dieses Radionuklids aufgrund seiner relativ langen Halbwertszeit von 10,6 Std. von einem Beschäftigten nicht vollständig eingeatmet werden kann.

7.3.6 Inhalation von Partikeln

Obwohl bei Arbeiten mit Flüssigkeiten kein Staub unmittelbar entsteht, können bei unsachgemäßem Arbeiten und Verschütten von Flüssigkeiten auf abgetrockneten Flächen thoriumhaltige Partikel verbleiben, die bei einer Aufwirbelung zu Inhalationsdosen führen können. Um auch solchen – unwahrscheinlichen – Expositionsfall in die Betrachtungen einzubeziehen, kann mit einem analogen Ansatz wie beim Ingestionsmodell eine fiktive Inhalationsdosis errechnet werden.

Die aus der Inkorporation der Aktivität A resultierende Inhalationsdosis errechnet sich nach:

$$E_{Inh} = \sum_r A_{Inh,r} \cdot g_{Inh,r} \quad (10)$$

$A_{Inh,r}$ - inhalativ inkorporierte Aktivität Bq

$g_{Inh,r,j}$ - Inhalationsdosiskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j in Sv/Bq.

Mit den Dosiskoeffizienten nach der Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis (BMU 2007) und den zeitlich veränderlichen Anteilen der einzelnen Radionuklide in der Th-Lösung ergeben sich die in Tabelle 7-7 aufgeführten und auf die Inhalation von 1 Bq Th-232 bezogenen Dosiskoeffizienten für das Radionuklidgemisch einer Th-Chemikalie.

Tabelle 7-7: Dosiskoeffizienten zur Ermittlung der effektiven Inhalationsdosis für Nuklide der Zerfallsreihe des Thoriums und Th-230.

Nuklid r	Inhalationsdosiskoeffizient $g_{Inh,r}$ für Beschäftigte *)	Bezugsaktivität [Bq]		
		[Sv/Bq]	Th-Alter 1 a	Th-Alter 10 a
Th-232	2,90E-05	1	1	1
Ra-228	1,70E-06	0,114	0,7011	1
Th-228	2,50E-05	0,713	0,5921	1
Ra-224	2,40E-06	0,716	0,5915	1
Th-230	5,60E-06	0,2	0,2	0,2
		Dosiskoeffizient Radionuklidgemisch [μ Sv/Bq(Th-232)]		
		49,9	47,5	59,2

*) AMAD (activity median aerodynamic diameter) = 5 μ m.

Da die Inhalationsdosis vor allem durch die Thoriumisotope Th-232 und Th-228 beeinflusst wird, ist selbst bei einem Alter der Lösung, in der Th-228 minimale Aktivitäten aufweist (ca. 5 Jahre nach Herstellung einer Chemikalie), der Dosiskoeffizient des Gemisches noch ca. 70% des Wertes einer alten Lösung. Für einen Zeitraum bis zu 15 Jahren nach Abtrennung des Thoriums ist die Verwendung eines Dosiskoeffizienten von 50 μ Sv/Bq(Th-232) für Inhalationsbetrachtungen ein praktikabler Wert.

7.3.7 Modellierung möglicher Strahlenexpositionen

7.3.8 Expositionssituationen im normalen Arbeitsablauf

Die bei der Verwendung von Thoriumlösungen möglichen Expositionen hängen von der Dauer der Tätigkeit ab, bei denen die Thoriumlösung direkt gehandhabt wird. In Tabelle 7-8 sind für einen fiktiven Laborprozess bei dem 1 Liter 0,1%ige (1 g/L) Th-Standardlösung im Kalenderjahr in unterschiedlichen Verdünnungsstufen verwendet wird, Parameterwerte für die Handhabung der Thoriumlösungen zusammengestellt. Die Parameterwerte basieren nicht auf einer detaillierten Untersuchung eines konkreten Laborprozesses, wurden aber unter Verwendung von Angaben eines Forschungslabors zusammengestellt.

Für den Gesamtprozess ergibt sich aus den Daten der Tabelle 7-8 eine jährliche Arbeitszeit von 63 Std., die als Expositionszeit im Zusammenhang mit der Verwendung von Thoriumlösungen zu veranschlagen ist. Für die weiteren Abschätzungen wird (konservativ) angenommen, dass nur eine Person alle zu betrachtenden Handlungen ausführt.

Tabelle 7-8: Anzahl von Handhabungen und zugehörige Arbeitszeiten mit Kontakt zu Th-Lösungen mit unterschiedlichen Th-Konzentrationen.

Tätigkeitsschritt	Handhabungsform	Vol. [ml]	Th-Konz.	Anzahl /a	Arbeitszeiten mit Kontakt je Handhabung
Handhabung der Th-Standards (Th in 2% HNO ₃ mit c=1 g/L)	100 mL Flasche	100	0,1%	10	10 Minuten
Herstellung verdünnter Lösungen	100 ml Flasche /	100	0,1%	100	3 Minuten
	Messkolben	10	0,01%	100	3 Minuten
Analyseschritt A	Messkolben	10	0,01%	50	1 Minute
	/ Pipette	1	0,01%	500	1 Minute
	/ Vial	10	0,001%	500	1 Minute
Analyseschritt B	Messkolben	10	0,01%	50	1 Minute
	/-Spritze	1 E-02	0,01%	500	1 Minute
	/ Vial	0,1	0,001%	500	1 Minute
Aufnahme und Sammeln der Reste		100	0,001%	1000	1 Minute-

Abschätzung der äußeren Strahlenexposition

Mit den in Tabelle 7-4 aufgeführten zusätzlichen Dosisleistungen für äußere Strahlenexposition bei unterschiedlich großen Volumina der Th-Lösung und den Kenngrößen der Handhabung nach Tabelle 7-8 sind in Tabelle 7-9 Werte der Dosis für die Hand und eine Körperdosis für einen mittleren Abstand der Handhabung von 0,3 m von der Th-Lösung errechnet. Bei der Berechnung der Körperdosis wurde ein Umrechnungsfaktor von Umgebungs-Äquivalentdosis in effektive Dosis für den Fall stark divergierender Strahlungsfelder bei der Bestrahlungsgeometrie „von vorn“ (PAR.AP) mit 0,7 berücksichtigt (vgl. SSK 2000). Abschirmeffekte wurden vernachlässigt.

Tabelle 7-9: Abschätzung der aus den Th-Lösungen stammenden jährlichen Dosen durch äußere Strahlenexposition.

Tätigkeitsschritt	Handhabungsform	Handhabungszeit	DL (Kontakt)	DL (0,3m)	Dosis (Hand)	Dosis (Körper)
		Minuten	[nSv/h]	[nSv/h]	[nSv]	[nSv]
Handhabung der Th-Standards (Th in 2% HNO ₃ mit c=1 g/L)	100 mL Flasche	100	165	0,62	275	0,7233
Herstellung verdünnter Lösungen	100 ml Flasche /	300	165	0,62	825	2,1700
	Messkolben	300	5,6	6,80E-03	28	0,0238
Analyseschritt A	Messkolben	50	5,6	6,80E-03	4,7	0,0040
	/ Pipette	500	2,6	7,00E-04	21,7	0,0041
	/ Vial	500	0,56	6,80E-04	4,7	0,0040
Analyseschritt B	Messkolben	50	5,6	6,80E-03	4,7	0,0040
	/-Spritze	500	1,2	7,30E-05	10,0	0,0004
	/ Vial	500	0,56	7,00E-05	4,7	0,0004
Aufnahme und Sammeln der Reste		1000	1,6	6,20E-03	26,7	0,0723
Summe					1205	3,0

Abschätzung der möglichen Ingestionsdosis

Im normalen Arbeitsablauf wird eine Ingestion von Thorium als unrealistisch ausgeschlossen.

Inhalation von Rn-220

Da das Edelgas Radon in Wasser gut löslich ist, wird angenommen, dass die Freisetzung von Rn-220 nur stattfindet, wenn Th-Lösungen von einem Bereitstellungsgefäß (Flasche bzw. einem Messkolben) in ein anderes Gefäß (Messkolben, Vial, Pipette) übertragen werden. Die einfache Handhabung von Gefäßen mit Th-Lösung und auch das Öffnen solcher Gefäße wird nicht als Quelle von Rn-220 in der Luft angesehen.

Da Rn-220 durch den Zerfall von Ra-224 entsteht, ist in einer Th-Lösung die Rn-220-Konzentration von der Konzentration des Th-228 abhängig und kann in den ersten Jahren nach Abtrennung des Thoriums aus einem Erz weniger als die Hälfte der Th-232-Konzentration betragen (s. Abbildung 7-1). Unterstellt man für frisch bezogene Th-Lösungen ein „Abtrennungsalter“ zwischen 1 und 15 Jahren, dann ist für diesen Zeitraum die Rn-220-Konzentration geringer als 75% der Th-232-Konzentration. Mit einem Rn-220/Th-232-Verhältnis von 0,75 und den Angaben zu den Handhabungen nach Tabelle 7-10 ergibt sich eine (maximale) Freisetzung von 3900 Bq Rn-220. Mit dem Modell nach Kapitel 7.3.5 errechnet sich daraus eine (konservativ überschätzende) Inhalationsdosis von 1,5 µSv,

Tabelle 7-10: Abschätzung der aus den Th-Lösungen stammenden und bei impulsartiger Freisetzung maximal möglichen jährlichen Dosen durch Inhalation von Rn-220.

Tätigkeitsschritt	Handhabungsform	Vol.	Th-Konz.	Th-228	Handhabung [Anzahl/a]	Freisetzung Rn-220 [Bq]
		[ml]		[Bq]		
Handhabung der Th-Standards (Th in 2% HNO ₃ mit c=1 g/L)	100 mL Flasche	100	0,1%	300	10	(keine)
Herstellung verdünnter Lösungen	100 ml Flasche /	100	0,1%	300	100	(keine)
	Messkolben	10	0,01%	3	100	300
Analyseschritt A	Messkolben	10	0,01%	3	50	(keine)
	/ Pipette	1	0,01%	0,3	500	150
	/ Vial	10	0,001%	0,3	500	150
Analyseschritt B	Messkolben	10	0,01%	3	50	(Keine)
	/-Spritze	0,1	0,01%	0,03	5000	150
	/ Vial	1	0,001%	0,03	5000	150
Aufnahme und Sammeln der Reste		100	0,001%	3	1000	3000
Summe						3900

*) Die Freisetzung aus dem Bereitstellungsgefäß wird im Zusammenhang mit einem unbeabsichtigten Freisetzen im Kapitel 7.3.9 betrachtet.

Die Tabelle 7-11 fasst die Ergebnisse der Expositionsmodellierungen zusammen. Auf die unterschiedlich hohe Konservativität der Modelle, insbesondere die extreme Konservativität des Rn-220 Inhalationsmodells ist hinzuweisen.

Tabelle 7-11: Mögliche jährliche Strahlenexpositionen (effektive Dosis) eines Labormitarbeiters in μSv .

	Direktstrahlung	Inhalation	Ingestion	Effektive Dosis
Organdosis in μSv	1,2 (Hand)			
Körperdosis in μSv	0,003	1,5 (Rn-220)	(keine)	1,5

Eine Zusammenfassung der Modelldaten und Modellergebnisse enthält Anlage 2-CA-01.

Im Ergebnis ist festzustellen: **Bei normalem Ablauf von Laborarbeiten und Einhalten einer guten fachlichen Praxis treten bei der Verwendung von Thorium zu chemisch-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken keine nach Maßstäben des Strahlenschutzes relevanten Expositionen auf.**

Dies gilt auch, wenn

- die Kontaktzeiten von Beschäftigten mit den Lösungen bis zum 10-fachen länger angesetzt werden als hier beschrieben oder
- die verwendeten Th-Lösungen „alt“ im Sinne von Kapitel 7.3.1 sind.

7.3.9 Exposition bei Störungen im Arbeitsablauf

Als ein Ereignis mit möglicher radiologischer Auswirkung wird ein Herunterfallen, Zerschlagen und Auslaufen eines 100 ml-Gefäßes mit Th-Standardlösung betrachtet. Dieses Gefäß enthält 100 ml Lösung mit 400 Bq Th-232.

Direktstrahlung

Zeit zur Beseitigung der verschütteten Flüssigkeit: 1 Stunde

Mit der in Kapitel 7.3.2 abgeschätzten Dosisrate über einer kontaminierten Fläche endlichen Durchmessers von 0,114 nSv/h ergibt sich bei einer konservativ hoch angesetzten Aufenthaltszeit von 1 Std. nur eine aus der Lösung stammende Dosis von 0,0001 μSv .

Abschätzung der möglichen Ingestionsdosis:

Basierend auf dem Modell nach (Richter, Eich, und Richter 2014). (s. Kapitel 7.3.4, Gleichung 9) ergibt sich:

- Ingestionsanteil: $1\text{E}-5 \rightarrow 0,004 \text{ Bq Th-232 mit Tochternukliden}$
- Dosiskoeffizient: $1 \mu\text{Sv/Bq Th-232 mit Tochternukliden (Bezug: Thorium „Alt“)}$
- Ingestionsdosis: $0,004 \mu\text{Sv}$

Inhalation von Rn-220

- Freisetzung Rn-220 von 400 Bq (konservativ: Gesamtaktivität Rn-220 im Gleichgewicht mit Th-232 in einer 100 ml-Flasche.)
- Mit der konservativ überschätzenden, nur theoretisch möglichen Inhalation aller Tochternuklide, die in Folge der Freisetzung gebildet werden und dem damit abgeleiteten Dosiskoeffizienten von 0,39 nSv je 1 Bq Rn-220 (Kapitel 7.3.5), ergibt sich eine (maximale) Inhalationsdosis für Rn-220 und Folgeprodukte von 0,16 $\mu\text{Sv/h}$.

Abschätzung einer fiktiven Inhalationsdosis:

Ein Übertritt von Partikeln der Th-Standardlösung in die Laborluft ist erst nach Abtrocknen von verschütteten Flüssigkeiten möglich. Um auch solchen – unwahrscheinlichen – Expositionsfall in die Betrachtungen einzubeziehen, wird mit einem Mengenansatz, der sich an das Ingestionsmodell nach (Richter, Eich, und Richter 2014) anlehnt, eine **fiktive** Inhalationsdosis errechnet. Durch den Bezug auf einen Anteil der Gesamtaktivität, der zur Inhalationsdosis führt, ist die Expositionszeit von einem Kalenderjahr abgedeckt.

- Inhalationsanteil: 1E-5 → 0,005 Bq Th-232 mit Tochternukliden
- Dosiskoeffizient: 50 µSv/Bq Th-232 mit Tochternukliden (s. Kapitel 7.3.6)
- Inhalationsdosis: 0,25 µSv

Auch bei Störungen im normalen Ablauf der Laborarbeiten mit einem Zerbrechen eines der dabei gehandhabten Gebindes mit Th-Standardlösung treten keine nach Maßstäben des Strahlenschutzes relevanten Expositionen auf. Dies gilt auch, wenn die getroffenen Annahmen zur Expositionssituation im Rahmen realistisch-konservativer Abschätzungen verändert werden. Insbesondere führt ein höheres Alter der Standardlösung mit einem Gleichgewicht aller Tochternuklide in der Th-232-Zerfallsreihe nur zu etwa 25% höheren Dosen, die damit klar im Bereich nicht signifikanter Expositionen verbleiben.

7.3.10 Gesamtbewertung

Das Tätigkeitsfeld Verwendung von Uran- und Thorium zu chemisch-analytischen und chemisch-präparativen Zwecken als Teil von Tätigkeiten mit NORM kann auf die Verwendung von Thorium beschränkt werden, da nach den Rechercheergebnissen die derzeit in Deutschland vertriebenen Uranchemikalien aus abgereichertem Uran hergestellt sind und damit nicht als Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung anzusehen sind.

Soweit die Verwendung von Thorium in Laboratorien oder Forschungseinrichtungen nicht im Rahmen von strahlenschutzrechtlich genehmigten Tätigkeiten (im Sinne der StrlSchV) erfolgt, ist nach den Rechercheergebnissen von relativ kleinen Mengen an verwendeten Standardlösungen auszugehen. Für ein Szenario, das die Verwendung von jährlich 1 Liter 1%ige Th-Standardlösung beinhaltet, zeigen Modellierungsergebnisse:

- Die Dosisschwelle für berufliche Strahlenexposition nach § 5 StrlSchG wird mit großem Abstand eingehalten. Die abgeschätzten Strahlenexpositionen der Körperdosis liegen (deutlich) unter 10 µSv im Kalenderjahr und können damit aus strahlenschutzfachlicher Sicht außer Acht gelassen werden.
- Das bei Verwendung von Th-Lösungen am höchste exponierte Organ, die Hand, erhält nach den vorliegenden Abschätzungen eine Dosis von 1,2 µSv. Setzt man diese Dosis in Relation zum Grenzwert der Organdosis für die Hände von 150 mSv im Kalenderjahr, der für Personen unter 18 Jahre gilt, die weniger als 6 mSv im Kalenderjahr exponiert werden dürfen (§ 95(7) StrlSchV) wird die Geringfügigkeit der Dosis evident.

- Auch bei einer bis zum 10-fachen längeren Kontaktzeit der Beschäftigten mit den Th-Lösungen bleiben die Dosen unter 10 μSv im Kalenderjahr und damit im Bereich der radiologisch vernachlässigbaren (de minimis) Dosen.
- Selbst im Falle eines ungeplanten Zerbrechens eines Gefäßes mit 100 ml der genutzten Standardlösung sind die mit der Beseitigung eines solchen Schadens verbundenen zusätzlichen Strahlenexpositionen deutlich kleiner als 10 μSv .

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Verwendung von Uran und Thorium zu chemisch-analytischen und chemisch-präparativen Zwecken (im Sinne von Kapitel 7.1.1 und 7.1.2) auch ohne Anwendung von Strahlenschutzmaßnahmen keinen Anzeigebedarf zur Folge haben wird. Das Tätigkeitsfeld

Verwendung von Thorium oder Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide, sofern vorhanden, zu chemisch-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken,

sollte daher aus der Anlage 3 StrlSchG gestrichen oder hinsichtlich der damit gemeinten Inhalte, insbesondere im Hinblick auf präparative Tätigkeiten im Sinne der Herstellung von Produkten (s. Kapitel 7.4), präziser gefasst werden.

7.4 Ausmaß der Strahlenexposition bei der Herstellung von thorierten Legierungen

7.4.1 Herstellung von thorierten W-Legierungen

Die Herstellung von thorierten W-Legierungen erfolgt pulvermetallurgisch. Eine Prozessbeschreibung zur Herstellung von thorierten Lampenelektroden enthält die Arbeit (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000). Angaben zur Herstellung von Schweißelektroden enthält das Patent DE 3835328 C1 der Gesellschaft für Wolframindustrie Traunstein (WIT).

Aus den genannten Unterlagen können die dem Stand der Technik entsprechenden Verfahrensschritte und Prozessparameter entnommen werden.

Die Dotierung des Wolframs erfolgt entweder, indem pulverförmiges Wolframoxid mit in Wasser gelöstem Thoriumnitrat $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ benetzt wird oder indem Thoriumoxid, ThO_2 zu einem feinkörnigen Wolframpulver hinzugefügt wird. Nach einem Mischvorgang wird bei der Thoriumnitrattechnik das benetzte Wolframoxid in einem Reduktionsofen unter Wasserstoffatmosphäre erhitzt, um das Nitrat zu Oxid und das Wolframoxid zu Wolfram zu reduzieren. Dieser Verfahrensschritt entfällt bei der Zugabe von Thoriumoxid.

Aus dem so hergestellten ThO_2 -dotierten W-Pulver werden anschließend Stäbe gepresst. Beim Pressvorgang werden Drücke bis zu 2200 bar angewandt. Jeder Pressvorgang dauert ca. 10 Minuten.

Beim anschließenden Sintern wird der gepresste W-Stab auf Temperaturen bis zu 2800 °C unter Schutzgasatmosphäre erhitzt. Der Sinterprozess dauert etwa 15 Minuten. Danach liegen feinere Wolframkörner mit gleichmäßiger Einlagerung der ThO_2 -Partikel an den Korngrenzen vor.

Im nächsten Verfahrensschritt, dem mechanischen Bearbeiten des Sinterstabs, werden durch Walzen, Hämmern, Ziehen die Produkte geformt. Durch Erhitzen der Teile auf Temperaturen von 1500 °C wird neben

der Längung des Stabes gleichzeitig eine weitere Homogenisierung erreicht. Nach der abschließenden Rekristallisation, bei der der Stab unter Schutzgas auf eine Temperatur von etwa 2000 °C erhitzt wird, ergibt sich ein rekristallisierter Stab, bei dem grobes, gut bearbeitbares Wolframgefüge mit gleichmäßiger ThO₂-Partikelverteilung vorliegt. Der so hergestellte Stab kann weiterbearbeitet werden, um kleinere Enddurchmesser zu erreichen.

Zum Abschluss erfolgt ein Zuschneiden auf Produktlänge, bei Schweißelektroden auch Anschleifen und Kennzeichnen mit Farbsignatur sowie das Verpacken der Produkte.

7.4.2 Charakterisierung der Strahlenquelle

Die bei der Herstellung thoriertes W-Legierungen gehandhabten Materialien enthalten, wie im Kapitel 7.1.4 beschrieben, abhängig von der Th-Dotierung spezifische Th-232-Aktivitäten von 40 Bq/g (1%) bis 160 Bq/g (4%). Höhere spezifische Aktivitäten enthalten das zur Dotierung verwendete ThO₂ (ca. 3600 Bq/g) und Th(NO₃)₄ · 4H₂O (ca. 2500 Bq/g).

Bei einer in einem Betrieb zur Herstellung von W-Legierungen verarbeiteten Jahresmenge von 100 kg Thorium (s. Tabelle 7-2) und bei einer mittleren Dotierung von 2% ist mit einer Gesamtmasse der hergestellten Produkte von ca. 5 Tonnen zu rechnen.

Nach der Klassifikation von Kapitel 4.3 handelt es sich sowohl bei den hergestellten Produkten als auch beim zugesetzten ThO₂ um M6-Material, wobei die Nuklidzusammensetzung vom Zeitraum seit Abtrennung des Thoriums abhängt. Bezüglich der zeitlichen Veränderungen des Strahlungsfeldes gelten die im Kapitel 7.3 beschriebenen Zusammenhänge analog. Aus den Angaben in (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000) kann der Nuklidvektor nach Abbildung 7-3 abgeleitet werden. Nach diesem Messbefund hatte das verwendete Thoriumnitrat ein Alter von 4–5 Jahren und entspricht damit dem Materialtyp M6-Th₂jung.

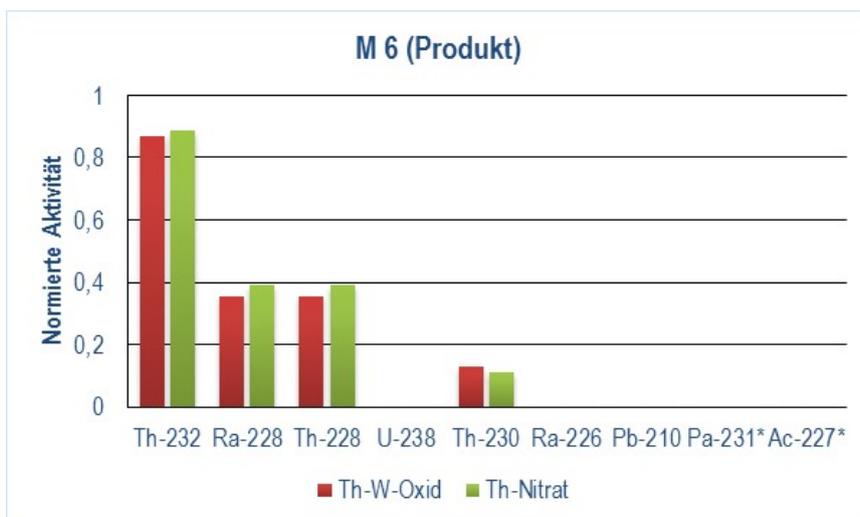


Abbildung 7-3: Normierte Radionuklidanteile von Thoriumnitrat und thoriertem Wolfram (Datenquelle: (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000)).

Die von einer größeren Anzahl an Stäben oder Elektroden ausgehende Direktstrahlung erreicht (abhängig von der Gebindegröße) Dosisleistungen im Kontakt zu den Produkten von deutlich mehr als 1 $\mu\text{Sv/h}$, teilweise mehr als 10 $\mu\text{Sv/h}$. Die höchsten Dosisleistungen kommen direkt an den Gebinden mit ThO_2 vor und erreichen Dosisleistungen am Gebinderand bis ca. 50 $\mu\text{Sv/h}$.

Durch die hohen Temperaturen in einigen Prozessschritten muss mit dem Entweichen von Rn-220 und dem Verdampfen von Radium, Blei und Polonium aus den hergestellten Legierungen gerechnet werden. Für das Edelgas Rn-220 muss bei hoch erhitzten Stäben von einem weitgehend vollständigen Entweichen des Rn-220 ausgegangen werden. Soweit die Behandlung der Legierung unter Schutzgasatmosphäre stattfindet, findet allerdings keine Freisetzung in die Raumluft statt. Die aus dem Rn-220 ggf. resultierenden Inhalationsdosen können bei Vorliegen von Messwerten nach den Modellen der BglBb berechnet werden.

Die bei hohen Temperaturen ebenfalls als Gase verdampfenden Metalle Radium, Blei und Polonium können im Staub und ggf. in Aerosolen zu völlig anderen Nuklidzusammensetzungen führen als im Ausgangsmaterial. Bei Prozessführung unter Schutzgasatmosphäre ist eine direkte Freisetzung in die Raumluft auszuschließen.

Die bereits bei Temperaturen von unter 1000°C verdampfenden Po-Isotope Po-216 und Po-212 sind aufgrund der kurzen Halbwertszeit und der nur sehr geringen Inhalationsdosiskoeffizienten für die Inhalationsdosis ohne Bedeutung. Für das bei Temperaturen über 1000°C bereits deutlich verdampfende Blei besitzt das Nuklidpaar Pb-212, Bi-212 (Halbwertszeit ca. 11 Std.) einen relativ geringen Inhalationsdosiskoeffizienten. Eine dosisrelevante Freisetzung von Pb-212, Bi-212 ist bei den hier betrachteten Prozessen nicht zu erwarten. Aufgrund deutlich längerer Halbwertszeit können Ra-228 + Ra-224 für die Staubinhalation dosisrelevant sein, wenn sie in höheren Aktivitätskonzentrationen als Th-232 + Th-228 vorkommen. Derartige Anreicherungen können in Stäuben aus Anlagen, in denen Elektroden Temperaturen über 1500°C ausgesetzt wurden, vorkommen. Der mit dem Schutzgas vor Öffnen der Sinterhaube abgesaugte Sinterruß kann daher eine andere Radionuklidzusammensetzung aufweisen als die Legierung. Soweit beim Öffnen der Sinterhaube Partikel als Staub freiwerden, können sie ebenfalls Ra-228 dominierte Aktivitäten aufweisen. In der ausgewerteten Literatur finden sich dazu bisher keine speziellen Untersuchungsbefunde.

7.4.3 Expositionssituationen und Einschätzung der Exposition

Im gesamten Prozess der Herstellung von der Zugabe des ThO_2 zum W-Pulver, dem Mischen bis hin zum Verpacken und Lagern sind für die Beschäftigten Strahlenexpositionen möglich.

Bei Dosisleistungen im Nahfeld zu den Materialien von teilweise deutlich mehr als 1 $\mu\text{Sv/h}$ sind nach den konservativen Modellannahmen, wie sie den im Kapitel 2.3 zusammengestellten Parametersätzen zugrunde liegen, bei Arbeitszeiten von 2000 Std. im Kalenderjahr mehr als 1 mSv an jährlicher Dosis möglich. Außerdem können durch Abriebeffekte und vor allem durch Verflüchtigung von Radium (und ggf. Rn-220,

Pb-212) bei sehr hohen Temperaturen, in den Prozessschritten von der Zugabe des ThO₂ zum W-Pulver bis zur Rekristallisation, Stäube (oder Aerosole) entstehen, die zu Inhalationsdosen führen.

Aus diesen Gründen sind berufliche Strahlenexpositionen von Beschäftigten in Anlagen, die im oben beschriebenen Umfang thorierte Produkte herstellen, realistisch möglich. In der Praxis werden aber bei den hier betrachteten Arbeiten stets Arbeits- und Strahlenschutzmaßnahmen realisiert und außerdem sind die Beschäftigten nicht dauerhaft an ungünstigen Einwirkstellen tätig.

7.4.4 Abschätzung von Strahlenexpositionen von Beschäftigten

Für die vorliegende Studie wurden NCC Ergebnisse von Arbeitsplatzüberwachungen in einem Betrieb zur Verfügung gestellt, in dem in den vergangenen Jahren thorierte Wolframelektroden hergestellt wurden. Außerdem standen die in (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000) beschriebenen Ergebnisse zur Verfügung.

In der Arbeit von (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000) wurde im Mai 1998 die Thorium-Inkorporation von sechs Beschäftigten eines Unternehmens der Lampenindustrie untersucht. Die Untersuchung fand in einer Kalenderwoche statt, in der die Personen im Drei-Schicht-System Dotierungen von Wolfram mit Thorium vornahmen. Von jedem Probanden wurden in der betreffenden Woche Stuhlproben eingesammelt und alphaspektrometrisch untersucht. Bei allen sechs Arbeitern wurde eine Inkorporation von Thorium nachgewiesen. Die aus den Messwerten abzuleitende Erhöhung der Thorium-Ausscheidung zeigte keinen Bezug zu den Schutzfaktoren der getragenen Atemschutzmasken. Aus den Daten wurde von (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000) abgeleitet, dass im Fall einer Inkorporation durch Inhalation, unabhängig davon ob der Proband vorzugsweise mit Thoriumnitrat oder Thoriumoxid Kontakt hatte, die Retentionsklasse M zutreffend ist. Allerdings weisen die Autoren der genannten Arbeit auch darauf hin, dass ihre Befunde, in Kenntnis weiterer Ergebnisse von Urinproben, auf eine Ingestion als Hauptzufuhrpfad hindeuten.

Obwohl in der Arbeit (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000) keine Dosiswerte ausgewiesen werden, zeigen die Ergebnisse, dass es offensichtlich trotz des praktizierten Arbeitsschutzes und dem Tragen von Atemschutzmasken zu einer Inkorporation von Thorium gekommen war. In Anbetracht der kurzen Zeit der Untersuchung von nur einer Woche ist der Befund als Hinweis darauf zu werten, dass für solche Tätigkeiten die Strahlenexposition nicht außer Acht gelassen werden kann.

Neuere Ergebnisse einer physikalischen Strahlenschutzkontrolle an Arbeitsplätzen der Lampenproduktion, an welchen thorierte Wolframelektroden hergestellt werden, wurden von einem Betrieb für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt. In diesen Dokumenten sind Messbefunde von Dosisleistungsmessungen, Kontaminationskontrollen und einer kontinuierlichen Raumluftüberwachung enthalten. Außerdem wurden Einzelmessungen von den betrieblichen Fachkräften ausgeführt. Zur Probenahme der Raumluft wurden personengetragene Probenahmegeräte (PPG), ein mobiler Staubsammler (Gravikon VC 25) und ein stationärer Staubsammler (FHT 243 C) eingesetzt.

Messergebnisse der Ortsdosisleistung an Arbeitsorten in einem „Dopraum“, in dem Wolframoxid mit Thoriumnitrat dotiert, gemischt und reduziert wird (vgl. Kapitel 7.4.1), sind in Tabelle 7-12 aufgeführt. Sie zeigen,

dass praktisch nur im Lagerbereich Dosisleistungen von über 1 $\mu\text{Sv/h}$ vorkommen. Ein weiterer Expositionsort mit deutlich über dem Hintergrund liegenden Strahlungswerten befindet sich im Bereich der Mischer. Wenn sich auf dem Tisch thoriumhaltiges Material befindet, kann auch in diesem Bereich des Raumes die ODL erhöht sein.

Messergebnisse der Raumlufüberwachung mit dem stationären Raumlufsammler (SRL, Luftdurchsatz 20 m^3 je Std., Sammelzeit 50 bis 500 Std. je Probe) sind in Tabelle 7-13 zusammengestellt. Die dort aufgeführten Werte geben den Wertebereich mehrerer Messungen an. Die Laboranalyse der Staubproben erfolgte alphaspektrometrisch, so dass das Th-232 direkt ermittelt werden konnte.

Tabelle 7-12: Messwerte der Ortsdosisleistung (in $\mu\text{Sv/h}$) in einem Arbeitsraum, in dem Wolframoxid mit Thoriumnitrat dotiert, gemischt und reduziert wird (vgl. Kapitel 7.4.1).

Jahr/Monat	Tisch	Eingang	Palettenlager	Waschplatz	Vor der Seitentür	Mischer 1	Mischer 2	Grenze 1	Rücklaufbahn Ofen 4	Ofen 4 – Einlauf	Ofen 4 – Auslauf	Platz vor dem Ofen	Grenze 2	Vor den Spinten
14/5	0,52	0,08	1,72	0,09	0,18	0,48	0,68	0,07	0,12	0,08	0,03	0,05	0,04	0,07
14/6	0,18	0,24	3,42	0,16	0,12	0,17	0,32	0,09	0,11	0,11	0,12	0,08	0,07	0,10
15/4	0,13	0,08	3,07	0,09	0,08	0,18	0,36	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06	0,14

Tabelle 7-13: Messergebnisse der Raumlufüberwachung für zwei Untersuchungsperioden in den Jahren 2014 und 2015.

	Dopraum	Presserei	Sinterei	Formkörper *)
Th-232 in mBq/m ³	19-29	1,8-10,3	16,3-152	0,9-2,1
Th-232 in mBq/m ³	15-20	3,2-6,1	62-64	2,8-9,0

*) Kurzzeitsammlung von Staub. Sammelzeit nur 1 bis 2 Std.

Zur Beurteilung der Messergebnisse kann mit einem Dosiskoeffizienten von ca. 50 µSv/Bq für Thorium mit einem Th-Alter von unter 10 Jahren (s. Tabelle 7-7) für eine Vollzeittätigkeit (2000 Std. im Jahr) die Th-232-Konzentration in der Luft errechnet werden, die zu eine Folgedosis von 1 mSv führt. Mit einer Standard-Atemrate von 1,2 m³ je Std. ergibt sich eine Th-232-Konzentration von 8 mBq/m³. Dieser Wert wird im Dopraum und besonders in der Sinterei überschritten.

7.4.5 Ermittlung von Strahlenexpositionen

In den ausgewerteten Unterlagen wird mitgeteilt, dass die tatsächlichen Expositionszeiten der Beschäftigten deutlich unter 2000 Std. im Jahr liegen und außerdem bei Arbeiten in den genannten Räumen Staubschutzmasken mit einem Rückhaltegrad von mehr als 99% getragen werden. In einer personenbezogenen Aufschlüsselung werden

- für das Jahr 2014 Expositionszeiten im Dopraum zwischen 20 und 135 Std. und im Bereich Sintern / Pressen zwischen 1 und 162 Std. genannt,
- für das Jahr 2015 Expositionszeiten im Dopraum ebenfalls zwischen 20 und 135 Std. und im Bereich Sintern / Pressen zwischen 2 und 147 Std.

(Personen mit Null Std. Exposition werden hier nicht einbezogen).

Ohne Berücksichtigung der Staubschutzmasken aber unter Anrechnung individuell ermittelter Staubkonzentrationen werden in den ausgewerteten Unterlagen daraus für einzelne Beschäftigte Inhalationsdosen von maximal 0,30 mSv im Dopraum (Jahr 2014) und bis zu 0,22 mSv beim Sintern/Pressen (Jahr 2015) ausgewiesen.

Mit den Ergebnissen der amtlichen Filmdosimeter, die im Jahr 2014 eine maximale externe Dosis von 0,3 mSv und für das Jahr 2015 eine maximale externe Dosis von 0,5 mSv auswiesen, werden effektive Dosen von jeweils unter 1 mSv im Kalenderjahr angegeben.

Eine nach den Standardmodellen und unter Berücksichtigung der den beschriebenen Situationen als angemessen realistisch eingeschätzten Parameter durchgeführte Modellierung ist in Anlage 2-CA-02 beigefügt. Danach ergeben sich die in Tabelle 7-14 aufgeführten Dosiswerte. Auch diese Werte liegen unter 1 mSv, allerdings wird in der Sinterei das Dosiskriterium von 1 mSv nahezu erreicht.

Tabelle 7-14: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte bei der Herstellung thoriierter Legierungen.

Material: 2% Th	Dopraum	Presserei	Sinterei	Formkörper
Alter 5 Jahre	0,18	0,06	0,44	0,05
Alter 10 Jahre	0,39	0,16	0,96	0,14

7.4.6 Gesamtbewertung

Bei der Herstellung von thorierten W-Legierungen wurde in den vergangenen Jahren ThO₂-in Mengen von mehr als 100 kg nach Deutschland importiert und verarbeitet.

Die Verarbeitung dieser Mengen führt ohne geeigneten Strahlenschutz zu einer potentiellen Exposition, die den Schwellenwert der beruflichen Strahlenexposition übersteigen kann. Die tatsächlich ermittelten Expositionen sind allerdings geringer. Exemplarisch ausgewertete Daten eines Betriebes der Lampenproduktion wiesen effektive Dosen von unter 1 mSv im Kalenderjahr aus. Diese Ergebnisse und frühere Untersuchungsergebnisse, bei denen mittels Ausscheidungsanalyse die Inkorporation von Thorium direkt analysiert wurde, führen allerdings zu widersprüchlichen Ergebnissen. Sowohl der Umfang der Inkorporation als auch die Frage, welcher Expositionspfad hauptsächlich zur Inkorporation beiträgt, sind nicht zuverlässig geklärt.

Eine Überwachung der Strahlenexposition bei der Herstellung thoriierter Wolframlegierungen wird weiterhin für nötig gehalten. Da die bisher für solche Tätigkeiten praktizierte Genehmigung nach § 7 StrlSchV nicht den Regelungen des StrlSchG entspricht, sollte das Tätigkeitsfeld

Verwendung von Thorium oder Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide, sofern vorhanden, zu chemisch-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken,

hinsichtlich der präparativen Tätigkeiten im Sinne der Herstellung von Produkten, im untergesetzlichen Regelwerk erläutert oder in späteren Gesetzesänderungen präziser gefasst werden. Ohne eine solche Änderung ist eine Anordnung der Behörde nach § 55 (2) zur Durchführung einer Abschätzung möglich. Allerdings kann eine solche Abschätzung unter Verweis auf die bisherigen Messungen und Erfahrungen dazu führen, dass nachgewiesen wird, dass das Kriterium der beruflichen Strahlenexposition nicht erfüllt ist und folglich für das Tätigkeitsfeld kein Strahlenschutz der Beschäftigten mehr nötig ist. Eine solche Situation kann ggf. vermieden werden, wenn die im § 55 StrlSchG zu prüfende Frage, ob die Strahlenexposition von Beschäftigten den Wert der beruflichen Exposition übersteigen kann, mit anderen methodischen Ansätzen bewertet wird als die tatsächlich vorkommende Exposition.

7.5 Anzahl der betroffenen Beschäftigten

Wie im Kapitel 7.1 beschrieben, ist in Deutschland derzeit mit einem Gesamtverbrauch von ca. 1 kg (abgereichertem) Uran und einer ähnlichen Menge an Thorium zu chemisch-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken verteilt auf ca. 100 Einrichtungen zu rechnen. Zusätzlich zu den vorgenannten Verbrauchsmengen können z.B. in Forschungseinrichtungen oder Labors mit Umgangsgenehmigungen weitere

Mengen an Uran- oder Thoriumchemikalien bei strahlenschutzrechtlich zugelassenen Tätigkeiten verbraucht werden.

Für die Einrichtungen, bei denen Verantwortliche aufgrund der Verwendung von Uran- oder Thorium-Chemikalien zu chemisch-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken gemäß § 55 (1) StrlSchG eine Dosisabschätzung durchzuführen haben, ergaben die im Kapitel 7.3 dargestellten Abschätzungen, dass ein Anzeigebedarf für dieses Tätigkeitsfeld nicht zu erwarten ist. Auch wenn bei der o.g. Größenordnung von Einrichtungen mit ca. 200 -500 Personen zu rechnen ist, die mit Thoriumchemikalien beruflich in Kontakt kommen, so ist bei keiner dieser Personen zu erwarten, dass sich aus dieser Tätigkeit eine berufliche Strahlenexposition ergibt.

Berufliche Strahlenexpositionen sind aber nach den Abschätzungen von Kapitel 7.4 bei der Herstellung thoriierter Wolframelektroden nicht auszuschließen. Wie im Kapitel 7.1.4 beschrieben, werden thorierte Legierungen vor allem in der Lampenproduktion (3 – 5 Unternehmen in Deutschland) und bei der Herstellung von Schweißelektroden (1 Unternehmen in Deutschland) verwendet. Nicht alle Unternehmen der Lampenproduktion, die thorierte Elektroden einsetzen, stellen die verwendeten Elektroden selbst her.

Aus Angaben der Unternehmen, die thorierte Wolframlegierungen herstellen, kann eine Anzahl von

30 – 50

Personen abgeschätzt werden, die unmittelbar in den betreffenden Anlagen tätig sind. Für diese Personen ist bei Vollzeittätigkeit in den Anlagen eine potentielle Strahlenexposition von mehr als 1 mSv im Kalenderjahr nicht auszuschließen. Die realen Strahlenexpositionen können aufgrund des praktizierten Strahlenschutzes und einer in der Regel nur zeitweisen Tätigkeit in den expositionsrelevanten Anlagenteilen geringer als 1 mSv im Kalenderjahr liegen.

Durch die zunehmende Substitution von Thorium, die abnehmende Nachfrage nach thorierten Produkten und ggf. eine Verlagerung der Arbeiten in das Ausland ist zukünftig eher mit einem Rückgang der Beschäftigtenzahlen in den hier untersuchten Tätigkeitsfeldern in Deutschland zu rechnen.

7.6 Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung

In den hier ausgewerteten Expositionsabschätzungen wurde eine Inkorporation von Ra-228 (+ ggf. Ra-224), mit höheren spezifischen Aktivitäten als das Mutternuklid Th-232 nicht betrachtet. Bei der als Messmethode verwendeten Alphaspektrometrie wird Thorium chemisch isoliert. Die Einbeziehung von Ra-228 und Ra-224 in Expositionsermittlungen erfolgt ggf. über eine Gleichgewichtsannahme zu den Vorgängernukliden.

Die Prozessanalyse (s. Kapitel 7.4.1) zeigt aber, dass aufgrund der vorkommenden Temperaturen, vor allem beim Sintern, Radiumisotope durch Verdampfen in höherem Maße freigesetzt werden können. Damit ist eine zusätzliche Inhalationsdosis möglich, deren Relevanz geklärt werden sollte.

8 Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen

8.1 Branchenspezifische Übersicht

8.1.1 Abgrenzung der thorierten Legierungen von anderen Produkten mit Zusatz von Thorium

Das Tätigkeitsfeld „Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen, insbesondere Montage, Demontage, Bearbeiten und Untersuchen solcher Produkte“ umfasst (im nicht-kerntechnischen Bereich):

- die Verwendung von thorierten Wolframelektroden in der Lampenproduktion (s. Kapitel 7.1.4),
- die Weiterverarbeitung von Legierungsteilen zu fertigen Produkten (Konstruktionsteile),
- die Montage, Demontage und das Bearbeiten thoriumhaltiger Magnesium- und Titanlegierungen in der Luftfahrttechnik, sowohl im zivilen als auch im militärischen Bereich.

In der Arbeit (Sternad, Kratzel, und Hellmann 2000) werden als weitere technische Anwendungen von Thorium in metallischer Form:

- der Einsatz von reinen Thorium im Elektronenröhrenbau und bei Quecksilberlampen,
- die Verwendung von Th-Cu-Ag-Legierungen bei der Herstellung von Thermistoren

genannt. Bei anderen Verwendungen, wie

- Pt-Th-Zusätze bei Katalysatoren für die Ammoniak-Verbrennung
- ThO₂ als Zusatz in IR-Strahlern

liegen keine Legierungen vor, so dass diese Handhabungen ggf. nicht in das hier zu untersuchende Tätigkeitsfeld fallen.

Die Tätigkeitsfelder 1 bis 3 der Anlage 3 StrlSchG (1. Schleifen thorierte Schweißelektroden und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden, 2. Handhabung und Lagerung thorierte Gasglühstrümpfe, 3. Handhabung und Lagerung thoriumhaltiger Optikbauteile) betreffen zwar ebenfalls thorierte Produkte, werden aber in dieser Arbeit nicht näher untersucht.

Für das zu untersuchende Tätigkeitsfeld werden im Weiteren die Verwendung von thorierten Wolframelektroden in der Lampenproduktion, die Verwendung von thorierten Wolframlegierungen im Maschinen und Anlagenbau (z.B. bei Anlagen zum Plasmaspritzen) sowie die Handhabung von thorierten Mg-Th-Legierungen bei der Wartung oder beim Rückbau von Flugzeugen betrachtet.

Die Gesamtmasse der in Deutschland hergestellten thorierten Wolframlegierungen kann auf der Grundlage der Importmengen von Thorium nach Tabelle 7-2 mit ca. 5 bis 10 Tonnen pro Jahr abgeschätzt werden. Hinzu kommen importierte Produkte, über die keine Mengenangaben ermittelt werden konnten. Ein Teil der vorgenannten Gesamtmasse betrifft die WIG-Schweißelektroden, die hier nicht weiter betrachtet werden. In Anbetracht der hohen Dichte von Wolfram (19,2 g/cm³) ist das zugehörige Volumen deutlich kleiner als 1 m³, so dass keine großvolumigen Bestände als Strahlenquelle zu erwarten sind.

Bei der regulären Wartung von Flugzeugen fallen derzeit keine thorierte Magnesiumlegierungen mehr an. Es gibt allerdings Altbestände, insbesondere in der Sammelstelle für radioaktive Abfälle der Bundeswehr, und beim Abwracken älterer Maschinen können vereinzelt solche Teile anfallen.

Das Thorium als Strahlenquelle ist in allen diesen Tätigkeitsfeldern vom Materialtyp M6, wobei die Strahlungseigenschaften vom Alter des Thoriums abhängen.

8.1.2 Thorierte Wolframelektroden

Thorierte Wolframelektroden sowie Thoriumjodat (ThJ_4) werden in einigen Arten von Hochdrucklampen (HDI-Lampen), z.B. Hg-Halogendampflampen und Xenon-Gasentladungslampen verwendet. Nach Angaben in (Langenscheidt 2008) werden thoriumdotierte Elektroden mit dem Kürzel „Gzz“ gekennzeichnet, wobei „zz“ den Thoriumanteil in ‰ angibt. Übliche Typen sind G7, G18 oder G30 Elektroden. Die Rohlinge dieser Elektroden haben üblicherweise eine Länge von 35-40 mm mit Durchmessern in den Abstufungen 0,5 mm, 0,6 mm, 0,7 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2 mm. Die Elektroden sind zumeist „gerommelt“, d.h. die Kante der Stirnfläche ist leicht abgerundet.

8.1.3 Bauteile mit W-Th-Legierungen (Konstruktionsteile)

Konstruktionsteile sind einbaufertige Bauteile, die nach vorgegebenen Standards und Maßen gefertigt werden. Solche Teile werden sowohl in Deutschland hergestellt, kommen aber auch als Teile von Maschinen oder Anlagen nach Deutschland. Sie kommen als temperaturbeständige und abriebfeste Teile vor allem in Düsen zum Plasmaspritzen zum Einsatz. Bei der Wartung von entsprechenden Anlagen können sie ausgetauscht und gesammelt werden. Dabei wurde bisher die Radioaktivität der Teile offensichtlich nicht beachtet, wie das mehrfache Auffinden solcher Teile im Schrott belegt (Abbildung 8-1).



Masse:	49,35 kg	83,1 kg
DL (Oberfl)	2,7 $\mu\text{Sv/h}$	1,7 $\mu\text{Sv/h}$
DL (0,5 m)	0,18 $\mu\text{Sv/h}$	0,17 $\mu\text{Sv/h}$

Abbildung 8-1: Im Schrott gefundene Konstruktionsteile mit W-Th-Legierungen (Elektroden zum Plasmaspritzen) und zugehörige Messdaten (Quelle: NCC).

8.1.4 Mg-Th-Legierungen

Die im Flugzeugbau verwendeten Mg-Th-Legierungen sind üblicherweise Präzisions-Gussstücke mit einer hohen Warmfestigkeit und optimierten Materialeigenschaften bei hohen Temperaturen (Kainer 2006). Für viele Thorium-Legierungen, die in der Flugzeugindustrie Verwendung finden, sind Beimengungen von 2,5% bis 4% Thorium üblich (Oak Ridge Associated Universities 2009). Eine unvollständige Auflistung von Legierungen mit charakteristischen chemischen Zusammensetzungen ist in Tabelle 8-1 aufgeführt.

Tabelle 8-1: Legierungsbestandteile von Mg-Th-Leichtlegierungen nach USA MIL Standard in %. Der verbleibende Magnesium-Anteil in den Legierungen ist > 90% („Total Materia - Die weltweit umfangreichste Datenbank“ o. J.).

	Cu	Mn	Ni	SE	Th	Zn	Zr	Andere
HK31A	0,1		0,01		2,5-4	0,3	0,5-1	0,3
HK31XA	0,1		0,01		2,5-4	0,3	0,4-1	0,3
HM21A		0,45-1,1			1,5-2,5			0,3
HM31A		1,2			2,5-3,5			0,3
HZ32XA	0,1		0,01	0,1	2,5-4	1,7-2,5	0,5-1	0,3
ZH62A	0,1		0,01		1,4-2,2	5,2-6,2	0,5-1,0	0,3

Übliche Bauteile in Triebwerken sind Halbschalen, Luftbremsen Leiträder (Stators), Filter (Scavenger) mit Abmessungen im Bereich von einigen Dezimetern bei Dicken von einigen Zentimetern.

Da die derzeit in Europa vorhandenen Mengen an Mg-Th-Bauteilen im Bereich von mehreren 10 Tonnen liegen, und die Entsorgungsoptionen beschränkt sind, wurden in der Vergangenheit diverse Möglichkeiten untersucht, um diese Teile zu verwerten oder die radioaktiven Bestandteile abzutrennen. In Großbritannien wurde von der Fa. Magnesium Elektron („Magnesium Elektron | Magnesium Alloys Supplier“ o. J.) ein Recycling durch Einschmelzen entwickelt und angeboten. Nach aktuellen Recherchen besteht dieses Angebot allerdings nicht mehr.

Alternative Entwicklungen betrafen die nasschemische Abtrennung von Thorium und dem nachgewachsenen Ra-228. Die International Processing Services GmbH (IPS) mit Sitz in Freiberg plant den Aufbau einer derartigen Anlage.

8.1.5 Th-kontaminierte Ti-Bauteile

Im Schrott von Flugzeugen wurden in den vergangenen Jahren mehrfach Titanlegierungen mit radioaktiven Kontaminationen festgestellt. Die Gesamtmasse dieser Teile lag bei deutlich über 1 Tonne. Eine von NCC untersuchte Turbinenschaufel zeigt Abbildung 8-2.

Die im Innern dieses Turbinenteils gemessenen Dosisleistungen lagen zwischen 160 nSv/h und 250 nSv/h. Aus einer gamma-spektrometrischen Analyse wurde eine spezifische Aktivität von $0,50 \pm 0,15$ Bq/g Th-232 abgeleitet.

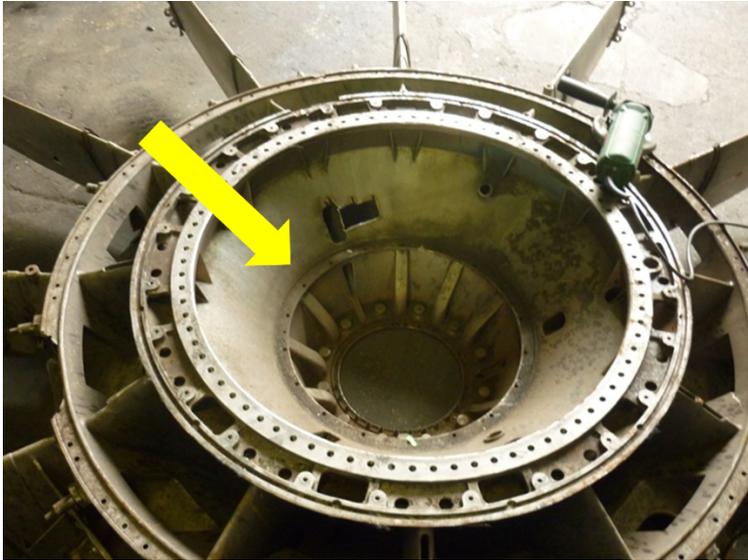


Abbildung 8-2: Lauffrad eines Turbinenteils mit Th-haltiger Ti-Legierung im Innenteil (gelber Pfeil). Foto: NCC.

Aufgrund der sehr geringen Thoriumanteile (massenbezogen 0,012%) ist nicht von einer gezielten Zugabe von Thorium als Legierungselement zum Titan, sondern eher von einer (ungewollten) Verunreinigung des Titanmetalls auszugehen. Eine entsprechende Anfrage bei der Titanium Information Group (TIG) bestätigte diese Annahme. In der Antwort (Arthur 2017) wird darauf verwiesen, dass Titanerze (z.B. Rutil) auch Thorium in erhöhten Gehalten führen und eine daraus resultierende Kontamination des Metalls möglich ist. Ein gezielter Zusatz von Thorium zu Titan oder Titanlegierungen ist nicht bekannt.

8.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

8.2.1 Lampenproduktion

Die Lampenproduktion läuft weitgehend in automatisierten Prozesslinien ab. Soweit thorierte Elektroden dabei verwendet werden, wirkt als Expositionspfad ausschließlich die äußere Strahlenexposition durch Direktstrahlung.

Die hergestellten Lampen weisen – von besonderen Modellen abgesehen - aufgrund der geringen Gesamtaktivität des Thoriums in den eingebauten Elektroden und des Abstandes der Elektrode vom äußeren Lampenkörper praktisch keine messbare Erhöhung der Dosisleistung mehr auf.

In den betreffenden Betrieben der Lampenproduktion werden allerdings auch Teile mechanisch bearbeitet (z.B. mittels CNC-Fräsen) und ggf. Materialprüfungen unterzogen. An solchen Arbeitsplätzen zur

Elektrodenfertigung kann es durch die Bearbeitungs- und Prüfprozesse, zu denen auch ein Erhitzen (Sintern) gehören kann, zu Freisetzungen von Staub und damit ggf. inneren Strahlenexpositionen kommen.

Eine Expositionssituation durch Direktstrahlung ergibt sich auch durch das Sammeln von nicht nutzbaren thorierten Teilen in Sammelboxen.

8.2.2 Herstellung und Handhabung von Konstruktionsteilen

Die Herstellung von Konstruktionsteilen mit thorierten Elementen erfolgt durch Zusammenfügen vorgefertigter Teile. Die W-Th-Teile werden dazu mit Kupfer vergossen und mittels mechanischer Verfahren (Drehen, Dreh-Fräsen, Schleifen, Fräsen, Überdrehen, Überfräsen, Pressen, Sintern, Bohren, CAD-CAM („Konstruktionsteile aus Wolfram, Molybdän und Werkstoffverbunden von Wolfram Industrie“ o. J.)) zu den jeweiligen Produkten weiter verarbeitet.

Aufgrund der relativ geringen Temperatur von geschmolzenem Kupfer (Schmelzpunkt 1085 °C) ist eine Freisetzung von metallischen Radionukliden durch Verdampfen praktisch auszuschließen. Bei einer Erhitzung der W-Th-Teile ist eine Freisetzung von Rn-220 grundsätzlich möglich. Durch das weitgehende Einbetten der Teile aus W-Th-Legierung ist die Direktstrahlung zumindest reduziert.

Bei der Handhabung von Konstruktionsteilen mit W-Th-Bestandteilen ist zwischen Neubau und Wartung (oder Abbau) von Anlagen zu unterscheiden. Werden neue Konstruktionsteile in Anlagen eingebaut, ist praktisch nur von Direktstrahlung als Expositionspfad auszugehen. Soweit Einzelteile gehandhabt werden, ist aufgrund der meist geringen Abmessungen die Hand das besonders exponierte Organ. Messbar erhöhte Dosisleistungen in einem Abstand von 0,3 m und mehr können auftreten, wenn größere Mengen an W-Th-Konstruktionsteilen gesammelt vorliegen (s. Abbildung 8-1).

Da die W-Th-Konstruktionsteile an besonders beanspruchten Stellen eingesetzt werden, ist ein Verschleiß und damit eine mechanische oder elektrische Abnutzung mit Verbreitung von Partikeln in den Anlagen auszugehen. Hinweise, dass aus diesem verschleiß Kontaminationen an (inneren) Oberflächen entstehen, die zu Expositionen führen können, wurden im Zuge der durchgeführten Recherchen nicht gefunden.

8.2.3 Mg-Th-Legierungen

Wie bereits im Kapitel 8.1 beschrieben, fallen derzeit bei regulären Wartungsarbeiten von Flugzeugen keine Mg-Th-legierten Bauteile mehr an. Beim Abwracken von älteren Flugzeugen können vereinzelt Bauteile mit Mg-Th-Legierungen anfallen. Diese Teile werden üblicherweise nicht weiter mechanisch behandelt, sondern ausgesondert und entsorgt. Von daher sind hauptsächlich äußere Strahlenexpositionen bei der Demontage oder Montage und beim Lagern von Teilen in Sammelboxen zu betrachten.

Gänzlich andere Expositionssituationen können entstehen, wenn Mg-Th-Legierungen nasschemisch aufgeschlossen werden, um die radioaktiven Bestandteile abzutrennen. Hier ist abhängig von der konkreten Prozessführung sowohl mit Direktstrahlung als auch mit der Freisetzung von Rn-220 und ggf. auch

Staubbildung (z.B. beim Trocknen von Rückständen) zu rechnen. In besonderem Maße können Strahlenexpositionen entstehen, wenn die genutzte Anlage gewartet wird und dafür ansonsten geschlossene Teile der Anlage geöffnet werden.

8.2.4 Th-kontaminiertes Titan

Die bisher in Deutschland aufgefundenen Teile mit thoriumkontaminiertem Titan befanden sich im Wertstoffrecycling. Eine Bearbeitung der Teile ist nicht vorgesehen. Von daher ist nur der Expositionspfad Direktstrahlung wirksam. Bei den bisher gemessenen Dosisleistungen ist eine berufliche Strahlenexposition auszuschließen. Eine Anzeige nach § 56 StrlSchG ist nicht nötig.

8.3 Abschätzung der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen

8.3.1 Montage und Demontage von Teilen in der Lampenproduktion

Wie im Kapitel 8.1 beschrieben, haben die in der Lampenproduktion verwendeten Elektroden üblicherweise eine Länge von 35-40 mm und Durchmessern bis maximal 2 mm. Messungen in unterschiedlichen Abständen an einer Elektrode mit 2% Thorium (Th-Alter > 10 Jahre) und einem Durchmesser von 2 mm sind in Tabelle 8-2 aufgeführt. Die Messungen wurden mit einem 2x2" NaI-Detektor (RIIDEye X) an einem (leicht) abgeschirmten Messplatz ausgeführt.

Tabelle 8-2: Messergebnisse ODL an einer thorierten Wolframelektrode (W2; Durchmesser 2 mm). Zykluszeit 10 s.

Messabstand	Abstand Quelle – Detektor (effektiv)	Messwert (nSv/h)	Hintergrund (nSv/h)	Messwert – Hintergrund (nSv/h *)
0 cm	6 cm	98-105	13-19	85-86
3 cm	9 cm	70-76	14-21	56-55
5 cm	11 cm	45-54	15-22	30-32
8 cm	14 cm	37-41	16-24	21-17

*) jeweils minimaler Messwert – minimaler Hintergrund bzw. maximaler Messwert – maximaler Hintergrund.

Aus den Messdaten kann für den Nahbereich direkt an der Elektrode eine Gamma-Dosisleistung am Finger von ca. 250 nSv/h extrapoliert werden. Für Entfernungen größer als 30 cm ist mit einem Beitrag zur Umgebungsstrahlung von weniger als 1 nSv/h zu rechnen.

Da die Herstellung von Lampen in automatisierten technologischen Linien abläuft, ist eine direkte Handhabung von thorierten Elektroden nur beim Beschicken von Maschinen nötig. Ansonsten halten sie die Beschäftigten in mehr als 30 cm Entfernung von den Elektroden auf und bei Dosisleistungen, die auch bei Elektroden mit 4% Thorium (G40) im Bereich von 1 nSv/h zu veranschlagen sind, ergeben sich rechnerisch Dosisleistungen von deutlich unter 10 µSv im Jahr.

Eine Anzeige dieser Tätigkeiten nach § 56 StrlSchG ist nicht erforderlich.

8.3.2 Elektrodenfertigung für die Lampenproduktion

In den Betrieben der Lampenproduktion, die thorierte Elektroden einsetzen, werden Rohelektroden für die weitere Montage konfektioniert und vorbehandelt. Im Rahmen dieser Elektrodenfertigung werden Rohelektroden sowohl mittels mechanischer Verfahren (z.B. CNC-Fräsen) als auch mittels thermischer Behandlung (Sintern) bearbeitet. Bei diesen Tätigkeiten handhaben die Beschäftigten größere Mengen an Elektrodenmaterial und es kann zu Staubbildung kommen.

Als Grundlage für die Bewertung von Strahlenexpositionen bei Arbeiten zur Elektrodenfertigung in der Lampenproduktion wurden von einem Unternehmen Messberichte zur Verfügung gestellt, die in Umsetzung behördlicher Anforderungen erstellt wurden. In diesen Dokumenten sind Messbefunde von Dosisleistungsmessungen und Messungen der Aktivitätskonzentration in der Raumluft enthalten. Zur Ermittlung der Aktivitätskonzentration in der Luft wurden stationäre Staubsammler (FHT 243 C) eingesetzt.

Die mittels Messungen überwachten Arbeiten betrafen:

- Ein Th-Labor (HBO-Raum).
- Einen Sinterelektrodenraum.
- Einen Raum mit CNC-Technik zur mechanischen Bearbeitung von Elektroden zur Vorbereitung der Montage. In diesem Raum befinden sich neben zwei Arbeitsplätzen Lagerschranke mit Elektrodenmaterial und Abfallfässer zur Sammlung der thorierten Materialien.
- Einen Wertstoffsammelcontainer. In diesen Sammelcontainer werden nach den übermittelten Angaben monatlich 1-2 Fässer mit Elektrodenresten verbracht.

Die Messergebnisse von vier verschiedenen Räumen, in welchen thorierte Elektroden konfektioniert und vorbehandelt werden, sind in Tabelle 8-3 zusammengestellt. Die Messergebnisse der Raumluftüberwachung wurden aus der alpha-spektrometrischen Analyse von Staubproben erhalten, die mit einem stationären Raumluftsammler (Luftdurchsatz 20 m³ je Std., Sammelzeit 50 bis 500 Std. je Probe) erhalten wurden. Ein Histogramm der Messwerte der Ortsdosisleistung im CNC-Raum zeigt Abbildung 8-3. Am Hauptarbeitsort der Beschäftigten wird in den Unterlagen eine Dosisleistung im Bereich zwischen 0,1 µSv/h bis 0,2 µSv/h angegeben.

Tabelle 8-3: Messwerte der Strahlenschutzkontrolle für Arbeitsplätze in der Elektrodenfertigung in der Lampenindustrie.

Parameter (Jahr)	HBO-Raum (Th-Labor)	Sinterelektrodenraum	CNC-Raum	Wertstoffsammelcontainer
ODL (2014)	0,1-0,6 µSv/h	(k.A.)	0,06-3,5 µSv/h	0,54-3,22 µSv/h *)
ODL (2015)	0,1-0,6 µSv/h	(k.A.)	0,05-3,8 µSv/h	0,4-3,3 µSv/h *)
Th-232 im Staub (2014)	2,3-135 mBq/m³	2,3 mBq/m³	3,2-3,6 mBq/m³	(k.A.)
Th-232 im Staub (2015)	0,15-29 mBq/m³	2,3-3,3 mBq/m³	5,3-7,3 mBq/m³	(k.A.)
Kontamination von Oberflächen (2014)	<0,02-1,2 Bq/cm² Th-232	< 0,02-0,31 Bq/cm² Th-232	< 0,02-0,39 Bq/cm² Th-232	(k.A.)
Kontamination von Oberflächen (2015)	<0,02-2,06 Bq/cm² Th-232	< 0,02-1,03 Bq/cm² Th-232	< 0,02-0,12 Bq/cm² Th-232	(k.A.)

*) Messungen außen am Container.

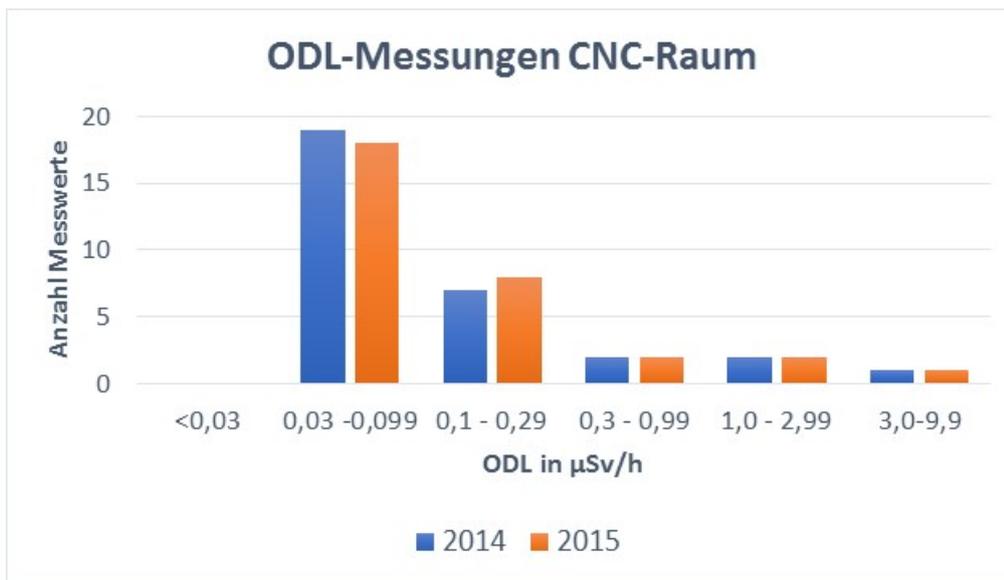


Abbildung 8-3: Histogramm von Messwerten der Ortsdosisleistung in einem CNC-Raum zur Bearbeitung von thorierten Elektroden zur Lampenproduktion.

Die Messdaten zeigen, dass in den Arbeitsräumen sowohl durch eine Direktstrahlung von Teilen von mehr als 1 µSv/h als auch durch Inhalation von Staub bei Staubkonzentrationen über 8 mBq/m³ (s. Kapitel 7.4.4) zu Jahresdosen kommen kann, die über 1 mSv liegen.

8.3.3 Herstellung und Handhabung von Konstruktionsteilen

Die Herstellung von Konstruktionsteilen mit W-Th-Legierungsbestandteilen erfolgt derzeit in Deutschland in einem Betrieb, der auch ansonsten thorierte Wolframprodukte erzeugt. Die Herstellung der

Konstruktionsteile ist von der Herstellung der thorierten Legierungen selbst technisch getrennt. Die bei der Herstellung auftretenden Strahlenexpositionen sind so gering, dass eine strahlenschutzrechtliche Überwachung nach behördlicher Prüfung als nicht erforderlich eingestuft wurde.

Bei der Handhabung von Konstruktionsteilen bei der Montage oder Demontage von Maschinen oder Anlagen sind die auftretenden äußeren Strahlenexpositionen der Einzelteile als ebenfalls gering zu bewerten. Auch wenn im Nahbereich um Gebinde mit gesammelten Teilen die Dosisleistung messbar erhöht ist (s. Abbildung 8-1), ist aufgrund der kurzen Expositionszeiten und der bereits in 0,5 m Entfernung deutlich unter 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ liegenden Dosisleistung eine berufliche Strahlenexposition durch die Handhabung von thorierten Konstruktionsteilen praktisch auszuschließen.

Eine Anzeige dieser Tätigkeiten nach § 56 StrlSchG ist bei den derzeit bekannten Mengen und Verwendungszwecken (vorzugsweise Elektroden für das Thermische- / Plasma-Spritzen) nicht erforderlich.

8.3.4 Mg-Th-Legierungen in Flugzeugen

Messungen der ODL an Sammelboxen und Fässern mit Mg-Th-Bauteilen mit spezifischen Aktivitäten von ca. 90 Bq/g Th-232 im annähernden Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten (Materialtyp M6, Th-alt) erbrachten die in Abbildung 8-4 dargestellten Ergebnisse.

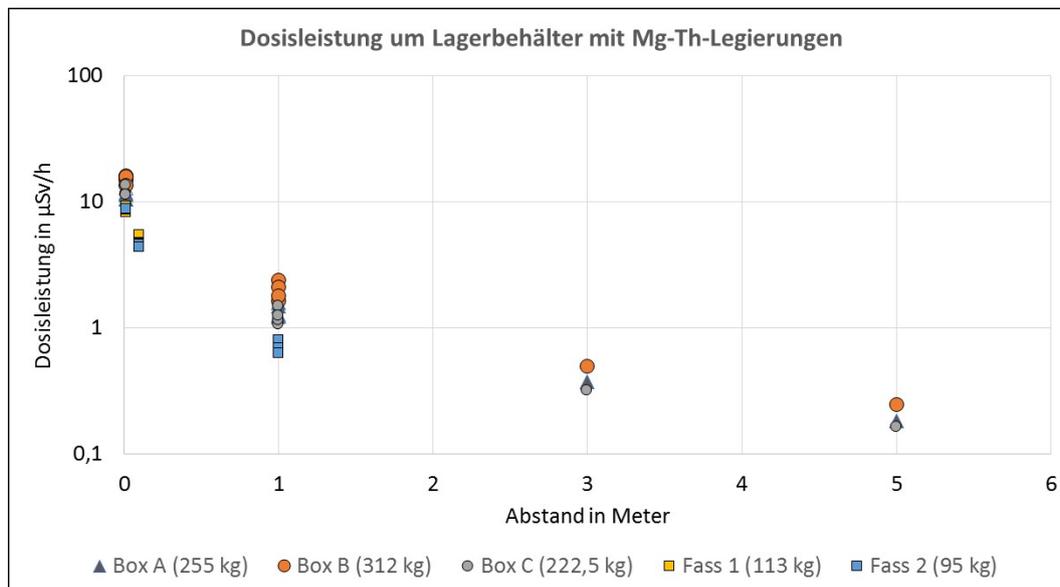


Abbildung 8-4: Dosisleistungen um Lagerbehälter mit Mg-Th-legierten Bauteilen von Flugzeugtriebwerken (Messungen: NCC Projekt).

Im Nahbereich (Abstand 0,3 m bis 1 m) von Lagerbehältern mit 0,1-0,3 Tonnen Mg-Th-legierten Bauteilen ist folglich mit Dosisleistungen von ca. 1 $\mu\text{Sv/h}$ bis 5 $\mu\text{Sv/h}$ zu rechnen. Allerdings können auch in Abständen von 3 m von solchen Lagerbehältern die Dosisleistungen noch bis auf Werte von 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ erhöht sein.

Da derartige Teile nur relativ selten anfallen, ist eine durchgängige Handhabung über eine volle Jahresarbeitszeit nicht realistisch. Vielmehr ist in Kenntnis der Gesamtmengen solcher über längere Zeiten gesammelter Teile die Handhabungszeit mit Mg-Th-legierten Teilen von einzelnen Beschäftigten konservativ auf weniger als 10 Std. im Jahr einzuschätzen. Selbst unter Annahme, dass in dieser Zeit eine Dosisleistung von 5 $\mu\text{Sv/h}$ einwirkt, ist mit Jahresdosen von unter 0,1 mSv zu rechnen. Eine Anzeige nach § 56 StrlSchG von Tätigkeiten, bei denen Mg-Th-Bauteile sporadisch anfallen können, ist daher nicht erforderlich.

Bei einer chemischen Aufarbeitung von Mg-Th-Legierungen, bei denen gezielt die radioaktiven Bestandteile abgetrennt werden, kommt es zur Anreicherung von Radionukliden in Stoffströmen und damit zu potentiell deutlich erhöhten Strahlungsfeldern, die im Bereich von über 1 $\mu\text{Sv/h}$ liegen können. Für das Betriebspersonal einer solchen Anlage ist eine berufliche Strahlenexposition ohne gezielte Strahlenschutzmaßnahmen nicht auszuschließen. Eine genauere Prüfung der Expositionssituationen ist aufgrund der derzeit noch in der Planungsphase befindlichen Anlage nicht möglich. Allerdings ist aufgrund des abschätzbaren Durchsatzes einer solchen Anlage (maximal wenige Tonnen Legierungsmaterial im Jahr) bei Umsetzung geeigneter Maßnahmen davon auszugehen, dass die Jahresdosis von Beschäftigten auf unter 1 mSv reduziert werden kann.

8.3.5 Th-kontaminiertes Titan

Bei den bisher gemessenen Dosisleistungen an gefundenen Teilen (s. Kapitel 8.3.5) ist eine berufliche Strahlenexposition auszuschließen. Eine Anmeldung nach § 56 StrlSchG ist nicht nötig.

8.4 Ermittlung von Strahlenexpositionen

8.4.1 Elektrodenfertigung für die Lampenproduktion

Von zwei Betrieben der Lampenproduktion standen personenbezogene Daten mit Ermittlungen der Strahlenexposition für die Jahre 2014 und 2015 zur Verfügung. In den ausgewerteten Unterlagen wird mitgeteilt, dass die tatsächlichen Expositionszeiten der Beschäftigten deutlich unter 2000 Std. im Jahr liegen und sich der Aufenthalt an Orten mit hohen Dosisleistungen auf kurze Zeiten (einige Minuten täglich) beschränkt.

In einer personenbezogenen Aufschlüsselung werden für Arbeiten im HBO-Raum im Jahr 2014 Inhalationsdosen von 497 μSv bei 459 Std. Expositionszeit und 13 μSv bei 29 Std. Expositionszeit ermittelt. Die aus den amtlichen Filmdosimetern ermittelte maximale externe Dosis durch Arbeiten mit Thorium für das Jahr 2014 wird mit 2 mSv angegeben. Die analogen Daten für das Jahr 2015 belaufen sich auf Inhalationsdosen von 169 μSv bei 604 Std. Expositionszeit und 41,5 μSv bei einer Expositionszeit von 96 Std. Die externe Dosis der Filmdosimeter wird wieder mit 2 mSv angegeben.

Für die Beschäftigten, die im CNC-Raum tätig waren, wurden weder im Jahr 2014 noch im Jahr 2015 bei den dosimetrisch überwachten Personen Dosiswerte registriert. Eine personenbezogene Inhalationsdosis wurde nicht ermittelt, da der für eine Dosis von 6 mSv abgeleitete Konzentrationswert von 61 mBq/m^3 mit Abstand eingehalten war (vgl. Tabelle 8-3).

8.4.2 Untersuchungen zu Strahlenexpositionen bei der Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei der Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen wurde die Verarbeitung von Spanmaterialien und Abfällen aus der Herstellung von Konstruktionsteilen (vgl. Kapitel 8.3.3) sowie die Verarbeitung von Konstruktionsteilen, die in unterschiedlichen Anlagen als „Funde“ gesichert wurden, in einem Betrieb der Metallrecyclingwirtschaft untersucht. Im September 2017 wurde eine gezielte Untersuchung bei einer Versuchsschmelze in der Schmelzwerkstatt durchgeführt. Die Protokolle, Messdaten und Fotos dieser Untersuchungen sind in der Anlage 1-HA-01.1 beigefügt.

Für die Verarbeitung von ca. 1000 kg Konstruktionsteile oder Spanmaterial, aufgeschlüsselt nach den durchgeführten Arbeitsgängen, wurden in der Expositionsmodellierung (Anhang 2-HA-01) die in Tabelle 8-4 aufgeführten Basisdaten verwendet. Als Materialien wurde ein ca. 10 Jahre altes Thorium (Materialtyp M6 Produkt, Th) mit zwei unterschiedlichen Thoriumanteilen (ca. 0,05% und 0,1%) zugrundegelegt.

Die in 1 m Höhe über dem Boden gemessenen brutto ODL Messwerte in der Schmelzwerkstatt liegen zwischen 0,068-0,412 $\mu\text{Sv/h}$. Im Kontakt zu den Behältern mit Konstruktionsteilen können lokal erhöhte Werte von 0,978-1,45 $\mu\text{Sv/h}$ auftreten. Der Mittelwert kann mit 0,205 $\mu\text{Sv/h}$ (brutto) angegeben werden. Als Erhöhung der ODL durch die Handhabung thorierte Legierungen kann für den Aufenthalt im Raum daher der Netto-Wert von 0,13 $\mu\text{Sv/h}$ nach Abzug des Hintergrundwertes (0,08 $\mu\text{Sv/h}$) als Erhöhung des allgemeinen Hintergrundes in der Schmelzwerkstatt angegeben werden.

Tabelle 8-4: Basisdaten der Arbeitsgänge in der Schmelzwerkstatt zur arbeitsplatzbezogenen Expositionsabschätzung.

Arbeitsort, Arbeitsgänge	Dauer/Person [h]	Staub (gemessen) [mg/m ³]	Repräsentative ODL (netto) [$\mu\text{Sv/h}$]
Werkbank: Material Bereitstellen, Klassieren, Wiegen und in den Tiegel füllen, Bestimmung des Abbrandes und Entnahme der nicht verflüssigten Metallfraktion	200	0,5 (87 mBq/m ³ Th-228)	0,17 (Material 1) 0,36 (Material 2)
Schmelzofen: Tiegel in den Schmelzofen einbringen und Beobachten der Schmelze, Tiegel entnehmen, verflüssigte Metallfraktion abgießen	120	0,5 (87 mBq/m ³ Th-228)	0,13 (Material 1) 0,28 (Material 2)
Lagerung	400	-	0,07 (Material 1) 0,15 (Material 2)

An der Werkbank wird das Spanmaterial klassiert und die Tiegel werden befüllt. Das nicht klassierte Spanmaterial 1 weist im Kontakt 1,2-1,4 $\mu\text{Sv/h}$ (brutto) auf. In 20-30 cm Abstand kann von einer Netto-ODL von 0,14 $\mu\text{Sv/h}$ ausgegangen werden. Um kurzzeitige Aufenthalte in geringer Distanz und die Exposition der

Hände zu berücksichtigen, wird als repräsentativer Wert 0,17 µSv/h für die Arbeiten an der Werkbank festgelegt. Dieser Wert gilt für das Bereitstellen, Klassieren, Wiegen, den Schmelztiegel befüllen, Bestimmung des Abbrands und der Entnahme der Schlacke aus dem erkalteten Schmelztiegel.

Als Zeitansatz kann von ca. zwei Drittel der Gesamtarbeitszeit an diesem Arbeitsplatz ausgegangen werden. Ähnliche Expositionsbedingungen herrschen bei der Überwachung des Schmelzvorganges allerdings kann aufgrund des geringeren Dosisbeitrages eines einzelnen Schmelztiegels der erhöhte Hintergrundwert von 0,13 µSv/h als repräsentativ angenommen werden.

Die Staubuntersuchungen wurden während der Aufbereitung von Spanmaterial und während des Schmelzens durchgeführt. Bei den durchgeführten Arbeiten wurde eine Staubkonzentration von 0,5 mg/m³ festgestellt. Aufgrund des in den Konstruktionsteilen und den Spänen vorliegenden Thoriums wurde als Bezugswert der Wert des Th-228 mit 87 mBq/m³ verwendet. Die erhöhten Ra-226 Aktivitätskonzentrationen konnten der Materialverarbeitung nicht direkt zugeordnet werden und wurden für die Expositionsermittlung außer Acht gelassen.

Die bereits verarbeiteten Konstruktionsteile (W(Th)-Teile) sowie Schmelztiegel und Schlacken, lagern zum Erkalten in der Schmelzwerkstatt. Daraus resultieren in der Nähe der Zwischenlagerungsgebäude erhöhte ODL Messwerte bis 1,45 µSv/h. Die fertig abgeschmolzenen Reste werden gesondert nach Chargen gesammelt. An den abtransportierten Gebinden wurden im Kontakt 2,86 µSv/h an einem 22 kg Gebinde und 2,94 µSv/h an einem 14 kg Gebinde gemessen. Die ODL in einem Abstand von 0,5 m wurde noch in Höhe des doppelten Hintergrundwertes (0,16 µSv/h) gemessen.

Eine dauerhafte Lagerung in der Schmelzwerkstatt erfolgt nicht, da die verarbeiteten Konstruktionsteile und den. Allerdings können während der Lagerung bis zur Abholung erhöhte Expositionsbedingungen durch Direktstrahlung in der Schmelzwerkstatt herrschen. Die mittlere Erhöhung in der gesamten Schmelzwerkstatt liegt bei ca. 0,07 µSv/h netto ODL. Eine Staubexposition ist für die Lagerung nicht zu unterstellen.

Die mit diesen Daten (Verarbeitung von ca. 1000 kg in 320 h zzgl. 400 h Lagerung pro Kalenderjahr) modellierte Strahlenexposition für Beschäftigte in einer Schmelzwerkstatt ist in Tabelle 8-5 aufgeführt. Die ausführliche Zusammenstellung der Daten enthält Anhang 2-HA-01.

Tabelle 8-5: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigten in der Schmelzwerkstatt.

		Werkbank	Schmelzofen	Lagerung
		Material 1 mit 0,05 % Th (ca. 10 Jahre alt)		
Direktstrahlung [mSv/a]		0,028	0,011	0,020
Inhalation [mSv/a]		0,020	0,012	0,071
Summe [mSv/a]		0,053	0,026	0,100
		Material 2 mit 0,1 % Th (ca. 10 Jahre alt)		
Direktstrahlung		0,050	0,023	0,042
Inhalation		0,059	0,035	0,206
Summe [mSv/a]		0,129	0,071	0,288

8.4.3 Gesamtbewertung

Die Untersuchungen zur Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen ergaben, dass bei der Montage und Demontage solcher Produkte in dem in Deutschland derzeit durchgeführten Umfang keine beruflichen Strahlenexpositionen zu erwarten sind. Werden solche Produkte aber weiterbearbeitet, können daraus berufliche Strahlenexpositionen resultieren. Die Fertigung von thorierten Elektroden für die Lampenproduktion ist als eine solche Tätigkeit anzusehen, für die eine Anzeige nach § 56 StrlSchG erforderlich sein kann.

Die in einer Schmelzwerkstatt durchgeführten Untersuchungen wurden im Rahmen einer Versuchsschmelze von Spanmaterialien durchgeführt. Bei der Schmelze von Konstruktionsteilen ist keine Staubexposition zu erwarten. Insofern wäre selbst bei einer ganzjährigen Vollzeittätigkeit in der Schmelzwerkstatt keine Exposition > 1 mSv zu erwarten.

8.5 Anzahl der betroffenen Beschäftigten

Nach den im Kapitel 8.4.3 beschriebenen Ergebnissen führt nur die Fertigung von thorierten Elektroden für die Lampenproduktion zu relevanten Strahlenexpositionen. Nach Auskünften von lampenproduzierenden Firmen, werden thorierte Elektroden nicht von allen Unternehmen hergestellt und verwendet.

Die in diesem Tätigkeitsfeld direkt beschäftigten Personen können derzeit mit **10 bis 30 Personen** eingeschätzt werden. Durch die Substitution solcher Elektroden kann sich der Umfang der Arbeiten und damit auch die Anzahl der betroffenen Beschäftigten zukünftig verringern.

8.6 Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung

Wie bereits im Kapitel 8.1.1 beschrieben, deckt das Tätigkeitsfeld „Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen, insbesondere Montage, Demontage, Bearbeiten und Untersuchen solcher Produkte“ nicht alle Verwendungen von Thorium bzw. Thoriumverbindungen bei der Herstellung von Produkten ab. Auch

durch die Tätigkeitsfelder „Schleifen thoriierter Schweißelektroden und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden“, „Handhabung und Lagerung thoriierter Gasglühstrümpfe“ sowie „Handhabung und Lagerung thoriumhaltiger Optikbauteile“ sind z.B. der Zusatz von ThO₂ zu IR-Strahlern oder eine Verwendung von thoriumhaltigen Katalysatoren nicht im StrlSchG erfasst. Tätigkeiten, die im Zusammenhang mit der Verwendung von ThO₂ stehen, sind z.B. aus Brandenburg bekannt.

Bezüglich der Strahlenexpositionen von Beschäftigten ist zu beachten, dass stationäre Staubsammler, die über längere Zeiten den Luftstaub beproben zu einer Unterschätzung der tätigkeitsbezogenen Inhalation führen können, sofern sie auch in Zeiten, in denen nicht gearbeitet wird, betrieben werden (van der Steen u. a. 2004). Außerdem können im Einzelfall in den Tätigkeitsfeldern, in denen Th-Legierungen gehandhabt werden, auch noch andere Strahlenquellen mit Radionukliden natürlichen Ursprungs, wie z.B. zirkonhaltige Stoffe oder Kr-85 im Kryptongas in der Lampenindustrie, zusätzlich zu einer Exposition beitragen. Bei einer Beschränkung der Dosisermittlung auf die Thoriumlegierungen als Strahlenquelle können daher die tatsächlichen Dosen unterschätzt werden.

Aus den Erfahrungen von NCC bei der Prüfung von Strahlenalarmen ergibt sich, dass thoriumhaltige Legierungen, die nicht als radioaktive Stoffe klassifiziert sind, als Metallschrott entsorgt werden und dadurch Alarme an Portalmessanlagen ausgelöst werden. Da für solche Materialien nur eingeschränkt Entsorgungswege existieren, führte dies in der Vergangenheit teilweise zur Ansammlung thoriumhaltiger Produkte bei Firmen, die mit den Produkten aus thorierten Legierungen umgehen und ihre radiologisch auffälligen Schrottlieferungen zurücknehmen müssen oder bei Schrottsammel- und Verwertungsbetrieben, die entsprechende Schrotte auf ihrem Betriebsgelände verwahren müssen. Um das Entstehen von solchen „Funden“ zu vermeiden, sollte sichergestellt werden, dass thorierte Teile, unabhängig von der Einstufung der Tätigkeit als anzeigebedürftig oder nicht, bei einem Ausbau separat gesammelt und geordnet entsorgt werden.

9 Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken

9.1 Branchenspezifische Übersicht

9.1.1 Abgrenzung der Tätigkeiten

Die Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken stellt ein für Deutschland neues Tätigkeitsfeld dar. Kohlekraftwerke und die Strahlenexposition der Bevölkerung durch Emissionen von Flugaschen wurden bereits in den 1970er Jahren diskutiert (Kirchner, Merz, und Schiffers 1974). Auch spätere Untersuchungen erbrachten keine Hinweise auf relevante Expositionen (Vom Berg und Puch 1996).

Bei den Wartungsarbeiten ist zwischen zwei unterschiedlichen Fallbedingungen zu unterscheiden:

- Kurzzeitige Wartungs- und Reparaturarbeiten mit geringen Aufenthaltszeiten (< 1 Woche).
- Grundlegende Revisionsarbeiten mit Aufenthaltszeiten von > 1 Woche.

Die Arbeiten werden in der Regel von spezialisierten Fachfirmen ggf. unter Einbeziehung regional verfügbarer Hilfskräfte ausgeführt. Sowohl in den ausführenden Firmen als auch in den Betreiberfirmen spielten Radioaktivität und Strahlenschutz bei den Wartungsarbeiten keine Rolle.

Aufgrund der allgemeinen Kenntnisse zu den technischen Prozessen bei der Zementproduktion (s. Kapitel 9.1.2) und der Kohlkraftwerke (Kap. 9.1.3) sind als Quelle für die Strahlenexposition bei Wartungsarbeiten alle potentiell im Vergleich zur allgemeinen Umweltradioaktivität erhöhten Aktivitäten natürlich vorkommender Radionuklide in

- den Prozessrückständen (Zementstäube bzw. Aschen oder Flugstäube der Verbrennung),
- dem Feuerfestmaterial der Heizkessel und ggf.
- durch die hohen Prozesstemperaturen bedingten Pb-210, (Po-210)-Anreicherungen an Anlagenteilen

zu betrachten. Durch die Festlegung des Gesetzgebers sind Tätigkeiten in anderen Industriebereichen mit ähnlichen Expositionssituationen für die Bewertung von Expositionen zunächst auszuschließen. Im Kapitel 9.5 werden jedoch einige Industriebereiche kurz angesprochen, die zu einer Strahlenexposition beitragen können.

Deutlich erhöhte spezifische Aktivitäten wurden in festen Ablagerungen an der Kesselwand gemessen. Wie schon in der internationalen Literatur beschrieben (vgl. Kapitel 9.2.3) liegen die Werte teilweise über 100 Bq/g. Eine Bestimmung von Po-210 an der Probe „Ablagerung P1“ ergab einen Wert von 138 Bq/g.

9.1.2 Zementwerke mit Klinkerproduktion

Bei der Zementherstellung in Klinkeröfen herrschen Temperaturen von ca. 900-1700 °C. Brennräume, die Temperaturen in dieser Größenordnung ausgesetzt sind, werden in der Regel mit Feuerfestmaterial

ausgekleidet, um angrenzende Bauteile aus Metall o.ä. zu schützen. Dies gilt ebenfalls für an die angrenzenden Bauteile, wie z.B. den Zyklon-Vorwärmer, in dem die Ausgangsstoffe für die Zementherstellung, das sog. Rohmehl, bei ca. 400-900 °C vorgewärmt werden (Bauinformant 2017).

Als Brennstoff werden in Zementwerken neben Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks auch sekundäre Brennstoffe wie z.B. Altreifen, thermisch verwertbare Abfälle oder Tiermehl eingesetzt (VdZ 2002).

In 2016 waren in Deutschland 22 Unternehmen (Konzerngesellschaften in konsolidierter Form) in der Zementproduktion tätig. Mit 53 Zementwerken wurden insgesamt 23.423 Tausend Tonnen Klinker produziert (VdZ 2017). Die vorwiegend eingesetzte Ofentechnologie in der Zementproduktion sind Klinkeröfen, die mit einer Zyklonvorwärmer-Technik ausgestattet sind (vgl. Tabelle 9-1).

Tabelle 9-1: Überblick der Anlagentechnologien die in Zementwerken in Deutschland zum Einsatz kommen (VdZ 2017).

Ofentechnologie	Anlagen 2017	Kapazität [t/d]
Öfen mit Zyklonvorwärmer	39	100.760
Öfen mit Rostvorwärmer	6	5.500
Schachtöfen	8	1.200

Die Wartungsarbeiten an Klinkeröfen und am Zyklon-Vorwärmer finden nach Angaben des VdZ in der Regel als Winterrevisionen statt. Dabei werden wesentliche Reparaturen an der Ausmauerung des Klinkerofens und der technischen Anlage durchgeführt. Für kleinere wichtige Eingriffe und Reparaturen kann der Klinkerofen auch zu anderen beliebigen Zeitpunkten abgeschaltet und nach Abkühlung betreten werden.

Als Orientierungswert wird in der Arbeit (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) angegeben, dass für 1 Mio. Tonnen Zementklinker ca. 400 Tonnen Feuerfestmaterial im Wartungsprozess anfallen. Demnach wären im Jahr 2016 ca. 9.400 Tonnen Feuerfestmaterial aus Wartungsarbeiten an Klinkeröfen angefallen.

9.1.3 Kohlekraftwerke

Deutschlandweit sind nach einer Zusammenstellung des Umweltbundesamtes (UBA 2013) noch 114 Kraftwerksanlagen mit Einzelleistung > 100 MW (elektrisch) in Betrieb, die mit dem Primärenergieträger Braun- oder Steinkohle befeuert werden. Diese Kraftwerke verfügen in Summe über ein Leistungspotential von 50.438 MW elektrischer Bruttoleistung und 17.141 MW thermischer Leistung. Außerdem sind noch etliche Kraftwerke mit einer geringeren Einzelleistung am Netz. Die Kraftwerksanlagen werden, wie man den Angaben in Tabelle 9-2 entnehmen kann, im Falle von Dampfkraftwerken überwiegend zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt. Bei Heiz- und Industriekraftwerken entspricht die thermische Leistung in etwa der elektrischen Leistung.

Tabelle 9-2: Überblick der Anlagenarten mit Einzelleistung >100 MW (elektrisch) die in Kohlekraftwerken in Deutschland zum Einsatz kommen (UBA 2013).

Anlagentypen	Anlagen 2016	Elektrische Bruttoleistung	Fernwärmeleistung
		[MW]	[MW]
Dampfkraftwerke	65	34.724	2.487
Heiz- und Industriekraftwerke	49	15.714	14.655

In 2015 waren nach Angaben des UBA 47 Braunkohlekraftwerke mit insgesamt 78 Kraftwerksblöcken und 67 Steinkohlekraftwerke mit 101 Kraftwerksblöcken in Betrieb (UBA 2015). Die Inbetriebnahme neuer Braunkohlekraftwerke stagnierte seit 2013 und geplante Projekte wurden aufgrund der unsicheren politischen Rahmenbedingungen nach Angaben des UBA zum Zeitpunkt April 2015 zunächst zurückgestellt und nicht gebaut. 3 Steinkohlekraftwerksblöcke befanden sich 2015 in der Planung bzw. im Probetrieb. Die Altersstruktur der kohlebefeuernden Kraftwerke insgesamt liegt zwischen 35 und 50 Jahren, wobei einige Kraftwerke modernisiert wurden. Nach Angaben des VGB und des UBA wird über Stilllegungen von Kraftwerken auf Basis der Wirtschaftlichkeit entschieden. Eine genauere Angabe zur Durchführung von regulären Wartungsarbeiten in Heizkesseln ist nach Auskunft des VGB derzeit nicht möglich.

9.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

9.2.1 Kohle als Strahlenquelle

Sowohl für Zementwerke als auch für Kraftwerke stellt Kohle einen Eintragungspfad für Radionuklide dar. Während Kohle in Zementdrehrohröfen nur als Brennstoff verwendet wird und die eingetragene Asche im Zement verdünnt wird, liefert Kohle in Kohlekraftwerken den Hauptmassenstrom. Allerdings werden je nach Kraftwerkstyp neben Kohle (Braunkohle, Steinkohle) auch Reststoffe zur thermischen Verwertung wie z.B. Müll, Holzreste oder Erdgas und Öl verbrannt.

Die Radionuklidgehalte der Verbrennungsprodukte hängen von der Art und Qualität der eingesetzten Kohle, vor allem aber von der Lagerstätte, aus der sie gewonnen wurde, ab. In Deutschland werden derzeit neben einheimischer Braunkohle importierte Steinkohlen verbrannt.

Angaben zur Radioaktivität der deutschen Braunkohlen wurden bereits in den 1970er Jahren publiziert (Kirchner, Merz, und Schiffers 1974). Eine neuere Untersuchung ergab in guter Übereinstimmung mit älteren Daten eine mittlere spezifische Aktivität in der U-238-Zerfallsreihe (U-238, Ra-226, Pb-210) von ca. 11 Bq/kg (0,011 Bq/g) und für Radionuklide der Th-232-Zerfallsreihe ca. 5 Bq/kg (0,005 Bq/g) (Schulz, Kunze, und Hummrich 2016).

Eine weltweite Übersicht über die Radioaktivität von Kohlen nach Daten aus (IAEA 2003) ist in Tabelle 9-3 zusammengestellt. Die dort aufgeführten Angaben zeigen, dass es in einigen Regionen Kohlen mit spezifischen Aktivitäten vor allem von Radionukliden der U-238-Zerfallsreihe von deutlich über 100 Bq/kg (0,1 Bq/g) gibt. In der internationalen Literatur sind weitere Daten von Kohlen mit höherer Radioaktivität

publiziert. So sind in (Flues u. a. 2005) Messungen an brasilianischen Kohlen aufgeführt, die für Rohkohle einen Wertebereich für U-238 bis 807 Bq/kg (0,87 Bq/g) angeben. Aufgrund der lagerstättenabhängigen Unterschiede der Radionuklidgehalte ist das Potential für den Einzelfall jedoch schwer abschätzbar, da in der Regel auch eine Vermischung der Kohle unterschiedlicher Herkunftslagerstätten stattfindet (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).

In verschiedenen Studien aus den 90-er Jahren wurden die unterschiedlichen Prozessschritte in Kohlekraftwerken hinsichtlich der Anreicherung und Verteilung von Radionukliden untersucht. Die Verbrennungsrückstände von Kohlebrennstoffen zusammengefasst und hinsichtlich der zu erwartenden Radionuklidgehalte untersucht (Vom Berg und Puch 1996; Becker, Mugrauer, und Lehmann 1994).

Tabelle 9-3: Wertebereiche oder Mittelwerte der spezifischen Aktivität von Kohlen nach (IAEA 2003). Angaben in Bq/kg.

Land	U-238	Th-230	Ra-226	Pb-210	Th-232	Ra-228	K-40
Australien	8,5–47	21–68	19–24	20–33	11–69	11–64	23–140
Brasilien	72		72	72	62	62	
Ägypten	59		26		8	8	
Griechenland (B)	117–390		44–206	59–205		9–41	
Ungarn	20–480				12–97		30–384
Italien (B)	23 ± 3				18 ± 4		218 ± 15
Polen	<159				<123		<785
Rumänien	<415		<557	<510	<170		
Großbritannien	7–19	8,5–25,5	7,8–21,8		7–19		55–314
USA	6,3–73		8,9–59,2	12,2–77,7	3,7–21,1		
Türkei	23–291				12–68		67–284

(B) – Braunkohle (Lignite)

Aufgrund von Hochtemperaturprozessen kann es zur Verlagerung von Pb-210 und damit einhergehend zu einer Akkumulation von Pb-210 und Po-210 kommen. Ausgehend von Untersuchungen an NORM-Rückständen wurden in (Gellermann u. a. 2007) für Verbrennungsprozesse Radionuklidanreicherungen in Aschen folgende Anreicherungsfaktoren (EF) bestimmt:

- Steinkohle: EF = 2,5 bis 15
- Braunkohle: EF = 8 bis 50

Die Anreicherungsfaktoren für Pb-210 und Po-210 wurden in einer SSK Empfehlung im Staub von Kohlekraftwerken mit 100 respektive 200 genannt (SSK 1981). Die tatsächlichen Anreicherungen von

Radionukliden hängen allerdings immer von der Kraftwerkstechnologie sowie den konkreten Gegebenheiten der Anlagen ab (Gellermann u. a. 2007).

Aus eigenen Messergebnissen an Braunkohlekraftwerken leiteten (Schulz, Kunze, und Hummrich 2016) für Kesselasche Anreicherungen von U-238, Ra-226, Ra-228, Th-228 um etwa den Faktor 5 und in Flugaschen Anreicherungen um den Faktor 10 ab. Für Pb-210 fanden sie in der Kesselasche eine Verminderung der Aktivitätskonzentration, in der Flugasche eine Anreicherung um den Faktor 15.

Um die Verbrennungsrückstände der Kohlekraftwerke strahlenschutzseitig bewerten zu können, sind zumindest orientierende Angaben zur Radioaktivität von Importkohlen nötig. Ein außer Acht lassen der Radioaktivität von Kohlen bis zu spezifischen Aktivitäten unterhalb der international für NORM empfohlenen Freigrenze von 1 Bq/g reicht dabei aufgrund der prozessbedingten Anreicherung von Radionukliden nicht aus (s. Kapitel 9.5).

9.2.2 Feuerfestmaterial als Strahlenquelle

Die feuerfeste Auskleidung von Drehrohröfen und Heizkesseln wird zumindest teilweise mit zirkonhaltigen Baustoffe ausgeführt. Diese Materialien enthalten häufig eine deutlich höhere Radioaktivität als andere Baustoffe und stellen bei Wartungsarbeiten eine Strahlenquelle dar.

Eine Ausmauerung von Heizkesseln ist in Kohlekraftwerken nach Angaben des VGB (Puch 2017) nur noch in alten Kraftwerkstypen vorhanden. Neue Anlagen besitzen Stahlkessel, die nicht mehr gemauert werden müssen. Da ältere Anlagen im Zuge der Energiewende als erstes vom Netz gehen werden, wurden die Wartungsarbeiten an den Feuerfest-Ausmauerungen nach Angaben des VGB deutlich zurückgefahren bzw. gar nicht mehr durchgeführt (Puch 2017).

9.2.3 Pb-210-Anreicherungen in Heizkesseln

Durch die hohen Temperaturen im Brennraum eines Heizkraftwerkes werden die leichter verdampfenden Elemente Polonium, Blei und Kalium ganz oder zu wesentlichen Teilen verdampft. Soweit sich die Metalle danach an Aschepartikel anlagern, sinkt die spezifische Aktivität durch die mineralischen Bestandteile der Aschen stark ab.

(Huijbregts, de Jong, und Timmermanns 2000) zeigten aber, dass sich an Wasser-(dampf) gekühlten Wärmetauschern im Brennraum Bleiablagerungen bilden können, die spezifische Aktivitäten von über 100 Bq/g Pb-210 aufweisen.

In der Arbeit von (Robles u. a. 2008) wurden solche Ablagerungen in einem Kohlekraftwerk in Spanien gezielter untersucht. Dabei wurden an Rohren von Wärmeaustauschern Ortsdosisleistungen (ODL) gemessen und Oberflächenkontaminationen bestimmt. Es zeigten sich bei sehr geringen Werten der ODL im Allgemeinen (15–20 nSv/h) geringe Erhöhungen bis auf 50 nSv/h an Teilen mit erhöhter Betakontamination. Die Pb-210-Kontamination wurde nicht im Detail gemessen, sondern nur als Betazählrate mit einen

Kontaminationsmonitor CoMo 170 bestimmt. Hier konnten deutlich erhöhte Werte bis zu über 100 ips gemessen werden. Außerdem wurde die Po-210 Oberflächenkontamination mittels alpha-spektrometrischer Methoden ermittelt. Dabei wurden Werte zwischen $(3,6 \pm 0,6)$ mBq/cm² und (29 ± 6) mBq/cm² erhalten. Unter Bezug auf messtechnisch nicht erfasste Szenarienbedingungen (Staubkonzentration von 0,01 Bq/m³) und (für Umgang mit radioaktiven Stoffen im Sinne der bisherigen Terminologie) abgeleitete Grenzwerte für Oberflächenkontaminationen wurde für eine Dauer von Wartungsarbeiten von bis zu 456 Std. im Jahr eine radiologische Unbedenklichkeit konstatiert.

Eine belastbare Grundlage, um die Relevanz von Pb-210/Po-210-Schichten auf Metallrohren der Wärmetauscher für den Strahlenschutz bei Wartungsarbeiten beurteilen zu können, liegt durch diese Untersuchungen nicht vor. Untersuchungen an deutschen Kohlekraftwerken werden im Kapitel 9.3.1 ausgewertet.

9.2.4 Expositionspfade

Die Arbeitsbedingungen bei der Wartung von Heizkesseln und Drehrohröfen sind durch hohe Temperaturen und sehr trockene Anlagenteile gekennzeichnet. Von daher besteht ein hohes Potential für die Bildung von Staub, aber auch für die Verschmutzung von Haut und Kleidung.

Als wichtigste Expositionspfade sind anzusehen:

- Inhalation von Staub, insbesondere dem aus Feuerfestmaterial entstehenden aber auch Staub aus Asche in Kohlekraftwerken oder ggf. Pb-210-haltigen Stäuben bei der Reinigung von Wärmetauschern.
- Äußere Strahlung vor allem durch Feuerfestmaterial, in besonderen Fällen auch durch Aschen.

Andere Expositionspfade, wie die Inhalation von Radon oder die Ingestion sind nach den bisherigen Kenntnissen zu den Prozessen von geringerer Bedeutung und können, soweit keine konkreten Hinweise auf besondere Expositionsbedingungen vorliegen, außer Acht gelassen werden.

9.3 Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen

9.3.1 Strahlenexpositionen in Zementwerken (Literaturlauswertung)

In der Arbeit (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) sind Untersuchungen zur Abschätzung der Strahlenexposition in 6 Zementwerken beschrieben. Dabei wurden Ofenwartungen und Revisionen unterschiedlicher Größenordnung berücksichtigt. In keiner der Anlagen waren nach Angaben in (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) Öfen mit stark zirkonhaltigen Feuerfestmaterialien ausgekleidet. Den Spritzmassen waren maximal 1-2% ZrSiO₄ zu Stabilisationszwecken beigemischt.

Messungen der ODL an gelagerten Paletten mit Feuerfestmaterial und in den Drehrohröfen ergeben nur in einem der beiden Werke an einem als „Ofenausgang“ bezeichneten Messpunkt Werte über 0,3 µSv/h und lagen ansonsten nur geringfügig bis ca. 0,2 µSv/h über dem Hintergrundwert.

Die spezifischen Aktivitäten und weitere Angaben zu den in (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) untersuchten Feuerfestmaterialien sind in Tabelle 9-4 auszugsweise für verschiedene Bereiche zweier Klinkeröfen aufgeführt. Sie beziehen sich auf das herausgebrochene Feuerfestmaterial.

Die Messungen zeigten, dass sowohl an der Flammenfront als auch im Bereich der Zyklon-Vorwärmer erhöhte Pb-210 Aktivitätskonzentrationen vorkommen. Am Ofenausgang hingegen wurden im Feuerfestmaterial niedrige Pb-210 Aktivitätskonzentrationen festgestellt, wobei die übrigen Radionuklide im Aktivitätsgleichgewicht vorlagen.

Tabelle 9-4: Spezifischen Aktivitäten in Bq/g von Feuerfestmaterialien in Klinkeröfen von Zementwerken nach (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).

Betrieb	Bereich	Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
A	Zyklonstufe 1	Spritz	< 0,2	<0,1	0,32	0,0721	0,070
	Zyklonstufe 2	Spritz	<0,1	<0,02	0,68	0,011	0,018
	Übergang Zyklon/Ofeneinlauf	Stein	<0,1	0,09	0,15	0,0943	0,099
	Ofenmitte	Stein	<0,07	<0,02	<0,01	0,0011	<0,001
	Ofenausgang	Stein	<1	<0,3	<0,01	0,281	0,29
B	Flammenfront	Stein	<0,03	<0,03	0,204	0,0147	0,0147
	Ofenausgang	Spritz	0,73	0,74	0,086	0,243	0,25

Zur Abschätzung von Expositionen wurden mit Standardparametern von 1,2 m³/h Atemrate, einer Staubkonzentration von 1 mg/m³ und einer Ingestionsrate von 6 mg/h Dosiswerte errechnet. Als Expositionszeit wurden ausgehend von einer Dauer der Wartungsarbeiten von 7 bis 14 Tagen ein Wert von 80 Std. zugrunde gelegt. Mit diesem Ansatz ergaben sich als effektive Dosis je Wartungsintervall und Arbeiter 0,033 mSv für Zementwerk A und 0,015 mSv für Zementwerk B (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015). Der größte Beitrag zur Dosis (0,024 mSv im Zementwerk A; 0,012 mSv im Zementwerk B) stammt von der äußeren Strahlenexposition. Die Anteile der Ingestionsdosis lagen mit maximal 0,001 mSv deutlich geringer als die der Inhalation und sind in Relation zur abgeschätzten Gesamtdosis geringer als 10%.

Aus diesen konservativ ausgelegten Abschätzungen wird im Bericht (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) geschlussfolgert, dass auch bei mehreren Wartungsarbeiten im Jahr das Dosiskriterium von 1 mSv nicht überschritten wird.

Allerdings können nach (BG BAU 2017) Staubkonzentrationen von 21,0-65,6 mg/m³ E-Staub und 3,57 bis < 5,00 mg/m³ A-Staub im Bereich Abbruch- und Ausbruch von Feuerfestauskleidungen in einem Drehrohrofen auftreten (5 Messungen im Zuge von Arbeitsplatzuntersuchungen im Jahr 2002). Daraus ableitbare Expositionsszenarien ergeben deutlich höhere Dosisbeiträge.

9.3.2 Untersuchungen zu Strahlenexpositionen bei Wartungsarbeiten in einem Zementwerk

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei der Wartung eines Drehrohrofens zur Zementproduktion wurde im Januar 2017 eine gezielte Untersuchung durchgeführt. Die Protokolle, Messdaten und Fotos dieser Untersuchungen sind in den Anlagen 1-WK-01.1 und Anlage 1-WK-01.2 beigefügt.

Im untersuchten Zementwerk wurden die Ausbrucharbeiten, die mit der höchsten Staubexposition einhergehen, von einer Firma ausgeführt, deren Mitarbeiter den Rest des Jahres nicht in NORM exponierten Tätigkeitsfeldern arbeiten. Daher sind für die Beschäftigten Einsätze in ähnlichen Expositionssituationen unwahrscheinlich.

Für den Einbau von FF-Material sind spezialisierte Fachfirmen aus dem Bereich Feuerungs- und Schornsteinbau tätig. Deren Mitarbeiter sind allerdings ganzjährig in vergleichbaren Expositionssituationen tätig, allerdings ggf. nicht ausschließlich in den gesetzlich aufgeführten Tätigkeitsfeldern (s. Kapitel 9.5).

Drehrohrofen Ausbruch und Einbau von Feuerfest-Material (FF-Material)

Nach den durchgeführten vor-Ort Untersuchungen und der gemeinsamen Begehung der jeweiligen Werksbereiche konnten die in Tabelle 9-7 aufgeführten Arbeitsplätze als potentiell von NORM Exposition betroffene im Bereich Drehrohrofen eingestuft werden. An diesen Arbeitsplätzen waren insgesamt 8-10 Beschäftigte im Einsatz. Als die am höchsten exponierte Personen wurden der „Maschinenführer Abbruchbagger Drehrohrofen“, der „Maurer von Feuerfestmaterial im Drehrohrofen“ und der „Bediener Steinsäge“ identifiziert. Für diese drei Personen sind in Anlage 2 WK-01 Expositionsmodellierungen enthalten.

Als maximale Ortsdosisleistung wurden im Drehrohrofen Messwerte bis zu 0,6 $\mu\text{Sv/h}$ registriert. Die Messwerte im Drehrohrofen sind aufgrund der unterschiedlichen verbauten Feuerfestmaterialien nicht einheitlich (Abbildung 9-1).

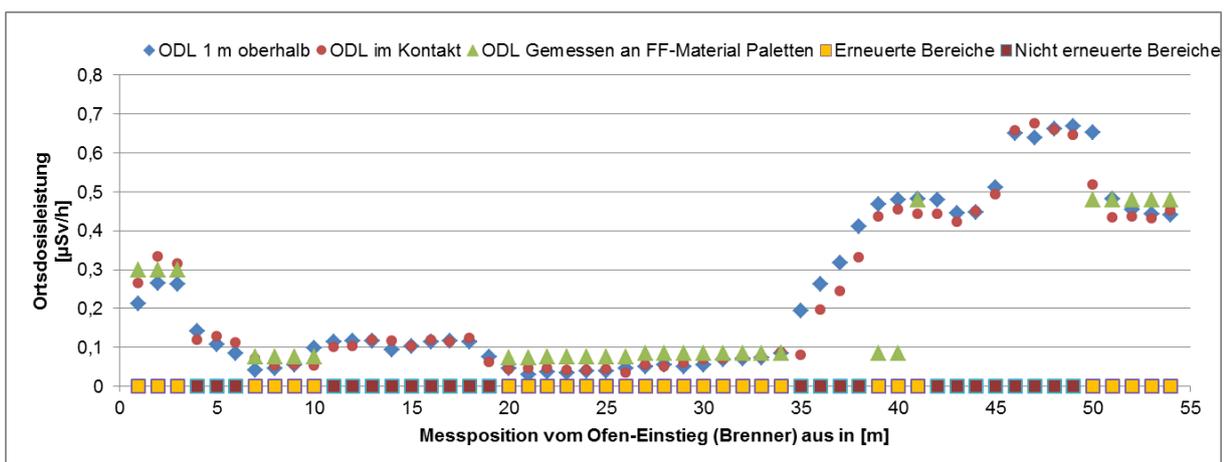


Abbildung 9-1: Ergebnisse der Ortsdosisleistungsmessungen im Drehrohrofen (1 m oberhalb der Oberfläche und im Kontakt zum FF Material) im Vergleich zu Bereichen für die das FF Material nach dem Zustellplan bekannt und im Vorfeld auf Paletten gemessen wurde.

Nach dem Zustellplan (Abbildung 9-1, gekennzeichnet als „Erneuerte Bereiche“) wurden im Zuge der Maßnahme 26,8 m Feuerfestmaterial ausgetauscht.

Basierend auf einer Abbruchrate von 1 m Feuerfestauskleidung in 3-6 Std. (MW = 4,5 Std.) ergeben sich die in Tabelle 9-5 aufgeführten Gesamt-Aufenthaltszeiten für den Arbeitsplatz „Maschinenführer Abbruchbagger Drehrohren“. Für den Arbeitsplatz „Maurer von Feuerfestmaterial im Drehrohren“, der mit einer Zustellrate von ca. 1 m in 7 Stunden arbeitet, ergeben sich die in Tabelle 9-5 aufgeführten Aufenthaltszeiten.

Tabelle 9-5: Werte zur Ermittlung der Dosis aus Direktstrahlung für Arbeitsplätze im Drehrohren.

FF-Material	Strecke	Aufenthaltsdauer „Maschinenführer Abbruchbagger Drehrohren“	Aufenthaltsdauer „Maurer von Feuerfestmaterial im Drehrohren“	ODL (1m oberhalb)
	[m]	[h]	[h]	[µSv/h]
FF-Material 1	2	9	14	0,21-0,26
FF-Material 2	9,8	44	70	0,05-0,08
FF-Material 3	3,6	16	25	0,04-0,09
FF-Material 4	1,2	5	7	0,03-0,04
FF-Material 5	3	14	21	0,04-0,05
FF-Material 6	7,2	32	50	0,44-0,65
Summen	26,8	121	187	MW: 0,135-0,195

Auf dem Fahrersitz des Abbruchbaggers wurden beim Ausbruch von FF-Materialien in Bereichen mit der höchsten Ortsdosisleistung an den FF-Materialien bis zu 0,28 µSv/h gemessen.

Der Einbau von FF-Material erfolgte durch Zustellen der vorher entfernten Bereiche. Die Exposition aus Direktstrahlung für die Beschäftigten Abbrecher sowie für die Maurer/Ofenbauer geht daher von den jeweils verwendeten Materialien und den angrenzenden Bereichen der noch verbliebenen Feuerfestausmauerung hervor. Vereinfachend wurde für die Expositionsmodellierung in Anlage 2-WK-01 davon ausgegangen, dass die ausgebrochenen und die wieder eingebauten FF-Materialien eine ähnliche ODL aufwiesen. Für den Abbrecher gilt daher der mittlere ODL Wert von 0,17 µSv/h der in 1 m oberhalb der FF-Materialien im Drehrohren ermittelten ODL Messwerte (vgl. Tabelle 9-5). Für den Maurer wird jedoch aufgrund des geringeren Abstandes zum FF-Material eine etwas höhere ODL von 0,2 µSv/h (gemittelt aus den Messwerten an Paletten mit FF-Material) angenommen. Aufgrund der von Hintergrundstrahlung weitestgehend abgeschirmten Bedingungen im Drehrohren wurde auf einen Abzug desselben verzichtet.

Die Staubkonzentrationen wurden während der Ausbruchphase anhand von 4 Einzelproben mit Werten zwischen 3 und 25 mg/m³ ermittelt. Der Mittelwert dieser Messungen von 12,2 mg/m³ wurde zur Expositionsmodellierung zugrunde gelegt. In Tabelle 9-6 sind Materialien aufgeführt, die zum Teil als potentielle Staubquellen in die Expositions Betrachtung einbezogen werden. Eine relevante Staubexposition ist für den Arbeitsplatz „Maurer von Feuerfestmaterial im Drehrohren“ nur zu unterstellen, sofern staubende Feuerfestmörtel angerührt werden. Während der durchgeführten Untersuchungen wurden jedoch überwiegend vorkonditionierte Fertigmörtel verwenden, die ohne Staubentwicklung verarbeitet wurden.

Das Zuschneiden von FF-Material erfolgt an einer Steinsäge mit Wasser-Umlaufspülung. Die durchgeführten Staubmessungen ergaben einen Wert von 0,36 mg/m³. Durch den Aufenthalt in der Nähe von FF-Material ist eine zusätzliche netto Dosisleistung (DL) von 0,05 µSv/h ermittelt worden (DL Brutto = 120 µSv/h, Hintergrund ODL = 0,07 µSv/h).

Tabelle 9-6: Spezifischen Aktivitäten von Materialproben aus dem untersuchten Zementwerk (vgl. Anlage 1-WK-01.1).

Bereich	Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
		Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g
Ofeneinlauf	Feuerfestmaterial *	0,21	0,14	0,10	0,15	0,19
Zyklon	Staubmaterial/Rohmehl	< 0,15	< 0,06	< 0,02	< 0,06	< 0,03
Verdampfungskühler	Staubablagerung	< 0,13	< 0,05	< 0,01	< 0,05	< 0,03

*) Referenz zu Staubprobe Arbeitsplatz „Maschinenführer Abbruchbagger Drehrohrofen“.

Die in Anlage 2-WK-01 aufgeführte Expositionsermittlung basiert auf den in Tabelle 9-7 aufgeführten Aufenthaltszeiten, Staubmesswerten bzw. Annahmen und der Annahme eines einheitlichen Materials mit einer Aktivitätskonzentration von 0,4 Bq/g U-238max+Th-232max. Der Nuklidvektor für die Bestimmung der Dosiskoeffizienten wurde von der Probe WK-1701-07 (Anlage 1-WK01.1) abgeleitet.

Tabelle 9-7: Beschreibung der Arbeitsplätze im Drehrohrofen mit Basisdaten zur arbeitsplatzbezogenen Expositionsabschätzung.

Person, Werkzeug	Dauer/Person [h]*	Staub (ohne PSA) [mg/m ³]	Personenaufenthalt
Maschinenführer Abbruchbagger Drehrohrofen	40	12,2 (Messwerte 3-25) (21,0-65,6 E-Staub ⁺)	1 Person pro Schicht in 3 Schichten in 24h *)
Fahrer An- und Abtransport von Feuerfestbaustoffen und Ausbruchmaterial	10	(wie Maschinenführer, aber zeitl. kürzer)	Mehrere Personen im Kurzeinsatz (max. 1-2 Std. pro Schicht)
Maurer von Feuerfestmaterial im Drehrohrofen	95	1,0 (11,3-19,3 #)	1 Person pro Schicht, 2 Schichten in 24h
Bediener Steinsäge	45	0,39 (0,42-21,1 #)	1 Person pro Schicht, 2 Schichten in 24h

*) Nach Angaben der befragten Mitarbeiter Vor-Ort; *) nach (BG BAU 2017); #) Mögliche Staubkonzentrationen in Anlehnung an ähnliche Arbeitsplätze aus der TRGS 559 Anlage 1.

Die, soweit möglich mit den erhobenen Daten, ansonsten mit Standardparametern ausgeführten Dosismodellierungen in Anlage 2-WK-01 ergeben die in Tabelle 9-8 aufgeführten Werte. Die Ergebnisse stimmen weitgehend mit den im Kapitel 9.3.1 beschriebenen Ergebnissen der Untersuchungen in (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) überein.

Tabelle 9-8: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv] für Beschäftigte bei der Durchführung von Wartungsarbeiten im Drehrohrofen.

	Abbruch FF-Material	Einbau FF-Material	Sägen FF-Material
	Material mit 1 Bq/g U-238max+Th-232max		
Direktstrahlung	0,005	0,013	0,002
Inhalation *)	0,034	0,005	0,001
Direktingestion	0,0002	0,001	0,0003
Summe [mSv pro Woche]	0,039	0,019	0,003

Zyklon-Vorwärmer Abbruch von FF-Material

Die in Tabelle 9-9 aufgeführten Arbeitsplätze sind im Bereich des Zyklon-Vorwärmers als potentiell von NORM Exposition betroffen anzusehen. An diesen Arbeitsplätzen waren insgesamt 18–20 Personen direkt mit der Ausführung der Arbeiten beschäftigt.

In der Zyklon-Vorwärmer-Einheit wurden Ortsdosisleistungswerte bis zu 0,15 µSv/h an den untersuchten Arbeitsplätzen gemessen. Die Arbeiten wurden mit Pressluftschlämmern von Hand durchgeführt. Daher ist mit hohen Staubkonzentrationen im unmittelbaren Arbeitsumfeld zu rechnen, die mindestens den im Drehrohrofen ermittelten Staubkonzentrationen entsprechen. Im Falle der Beschäftigten in der untersuchten Anlage wurde die Verwendung von Atemschutzgeräten von Mitarbeitern bestätigt. In Kenntnis dieser Expositionsbedingungen sind die Expositionen dieser Arbeitsplätze geringer als die aus den Arbeiten zum Ausbruch und Einbau von Feuerfest-Material (FF-Material) im Drehrohrofen. Die arbeitsplatzbezogenen Abschätzungen der Expositionen von Arbeiten am Drehrohrofen decken daher die Arbeitsplätze im Bereich Zyklon-Vorwärmer mit ab.

Tabelle 9-9: Beschreibung der Arbeitsplätze im Bereich Zyklon Vorwärmer mit Basisdaten zur arbeitsplatzbezogenen Expositionsabschätzung.

Tätigkeit, Werkzeug	Dauer/Person [h]*	Staub (ohne PSA) [mg/m ³] [#]	Personenaufenthalt
Abbruch, Bediener Pressluftschlammern (Atemschutzsystem*)	80	1,36 - 98,79	2 Personen pro Schicht *) 2 Schichten in 24h
An- und Abtransport von Feuerfestbaustoffen und Abbruchmaterial	10	1,36 - 98,79	Mehrere Personen im Kurzeinsatz (max. 1-2 Std. pro Schicht)
Gerüstbauarbeiten Auf- und Abbau	60	unbekannt	4 Personen pro Schicht, 2 Schichten
Inspektion, Reinigung und Wartung, Montagewerkzeug	10	unbekannt	1 bis 2 Personen, ca. 2 x jährlich, untersch. Aufenthaltszeiten *)
Spritzen von feuerfester Auskleidung im Zyklon (Atemschutzsystem*)	120	1,36 - 98,79	3 Personen pro Schicht, 2 Schichten in 24h

*) Nach Angaben der befragten Mitarbeiter Vor-Ort. #) Staubkonzentrationen in Anlehnung an TRGS 559 Anlage 1.

9.3.3 Strahlenexpositionen in Kohlekraftwerken (Literaturlauswertung)

Im Bericht (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) wurden Strahlenexpositionen bei Wartungsarbeiten in drei Kohlekraftwerken untersucht. Zwei dieser Kraftwerke (K1, K2) waren mit einem Kohleverbrauch von 32.000 t bzw. 36.000 t im Jahr eher kleinere Anlagen, ein Kraftwerk (K3) hatte einen Jahresverbrauch von 800.00 t.

Analysenergebnisse der Verbrennungsrückstände und Ablagerungen aus den untersuchten Kohlekraftwerken sind in Tabelle 9-10 zusammengestellt.

Tabelle 9-10: Spezifischen Aktivitäten von Verbrennungsrückständen und Ablagerungen in Kohlekraftwerken. Daten aus (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).

Kraftwerk	Bereich	Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
			Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g
K1	Verbrennungsrückst	Nassschlacke	0,17	0,12	0,044	0,059	0,059
		Flugasche	0,22	0,18	0,22	0,085	0,085
		REA-Produkt	<0,03	<0,01	<0,01	0,001	0,001
	Feuerungszone	Kesselstaub	0,30	0,24	0,13	0,11	0,11
	Überhitzer	Staub (dunkel)	0,19	0,1	0,097	0,065	0,068
	Überhitzer	Staub (hell)	0,32	0,21	0,141	0,125	0,116
K2	Verbrennungsrückst	Schlacke	0,088	0,14	<0,01	0,097	0,093
		Flugasche	0,32	0,23	0,13	0,181	0,172
		REA-Produkt	<0,1	<0,05	0,065	0,01	0,01
	Kessel (Höhe 0,8 m)	Rückstand	0,42	0,37	<0,06	0,236	0,233
	Überhitzer	Ablagerung (bräunl.)	0,40	0,24	0,17	0,166	0,18
	Überhitzer	Ablagerung (gräulich)	<0,4	<0,07	0,065	<0,02	0,007
K3	Verbrennungsrückst.	Schlacke	0,21	0,1	0,06	0,157	0,16
		Flugasche	0,26	0,18	0,212	0,215	0,217
		REA-Produkt	<0,06	<0,01	<0,02	<0,001	<0,001
	Kesselnrückstände	Anhaftung P1	<1	<0,2	156	0,14	0,14
		Anhaftung P3	<1	<0,3	36	0,11	0,12
		Anhaftung P8	<7	<1	168	<0,2	<0,1
		Staub, lose	<0,2	0,14	0,15	0,115	0,113

Die im Rahmen der Untersuchung zum Bericht (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) ermittelten spezifischen Aktivitäten von Kohlen wiesen sämtlich Werte unter 0,05 Bq/g für alle Radionuklide der U-238 und Th-232-Zerfallsreihe auf, wobei in den meisten Fällen die Aktivität der U-238-Zerfallsreihe höher als die der Th-232-Zerfallsreihe lag.

Alle Messergebnisse mit Ausnahme von drei Werten aus Kesselanhaftungen liegen für alle ausgewiesenen Radionuklide unter 0,5 Bq/g. Die spezifische Aktivität der U-238-Zerfallsreihe ist in dem meisten Fällen um den Faktor 1,5 bis 2,5 höher als die der Th-232-Zerfallsreihe.

In den Schlacken sind die spezifischen Pb-210 Aktivitäten niedriger, was für den Hochtemperaturprozess bekannt ist (M5-Material, Asche). In den untersuchten Flugaschen wurden keine erhöhten Pb-210 Aktivitätskonzentrationen nachgewiesen, da das Pb-210 erst mit der Rauchgasentschwefelung abgeschieden wurde (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).

Mit den Standardparametern von 1,2 m³/h Atemrate, einer anlagenspezifischen Staubkonzentration und einer Ingestionsrate von 6 mg/h wurden aus den Messdaten in (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) Dosiswerte errechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-11 zusammengestellt. Die Dosisabschätzung für das Kraftwerk K3 wurde dabei nach Darstellung in (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) als „Worst-Case-Abschätzung“ angelegt. Aus diesem Grund wurde bei der Staubinhalation von den höchsten zulässigen Staubkonzentrationen ausgegangen und außerdem mit den höchsten gemessenen Werten für Pb-210(Po-210) gerechnet. In den Ergebnissen ist festzustellen, dass aufgrund der sehr hohen Staubkonzentration in diesem Fall die Ingestion in einem nicht vernachlässigbaren Maße zur Gesamtdosis beiträgt.

Tabelle 9-11: Abgeschätzte Dosiswerte aus der Wartung von Heizkesseln in Kohlekraftwerken. Daten aus (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015).

	Einheit	Kraftwerk K1	Kraftwerk K2	Kraftwerk K3
Feuerungstechnik		Einblasfeuerung	Rostfeuerung	Einblasfeuerung
Arbeitstage		15	3	1
Expositionszeit	Std.	120	32	10
Direktstrahlung	mSv	0,016	0,006	0,001
Staubkonzentration	mg/m ³	1	1	10
Inhalation	mSv	0,002	0,001	0,075
Ingestion	mSv	0	0	0,017
Gesamt	mSv	0,018	0,007	0,093

9.3.4 Prüfung von Expositionsbedingungen in einem Kohlekraftwerk

Expositionsbedingungen bei Mauerarbeiten an einem Heizkessel eines Kohlekraftwerkes wurden in einem Heizkraftwerk eines Industriebetriebes untersucht. Die dabei erhobenen Daten sind in Anlage 1-WK-02.1 dokumentiert.

Die höchsten Dosisleistungen an Arbeitsplätzen wurden im Kesselraum mit über 0,5 µSv/h ermittelt. Als am höchsten exponierte Personengruppe sind daher die dort beschäftigten Maurer anzusehen. Für diese Personengruppe können Dosisbeiträge für die einzelnen Expositionspfade abgeschätzt werden:

- Äußere Strahlenexposition: 0,0046 mSv pro Einsatztag durch äußere Strahlenexposition (0,57 µSv/h bei einem 8 stündigen Arbeitstag). Dabei wird davon ausgegangen, dass bei dieser

Berechnung kein Abminderungsfaktor für Bodenstrahlung angewendet wird, da von einer 4π -Geometrie des Strahlungsfeldes auszugehen ist.

- Inhalation: 0,00057 mSv pro Einsatztag bei einer anhand der gemessenen Dosisleistungen abgeschätzten spezifischen Aktivität im Staub von 0,9 Bq/g U-238max + Th-232max und Staubkonzentrationen von 1 mg/m³ ohne Anreicherungsfaktor Feinfraktion.
- 6E-05 mSv pro Einsatztag durch Ingestion bzw. orale Aufnahme von Staub.

Die gesamte effektive Dosis je 8-stündigem Arbeitstag wird damit zu 0,0052 mSv abgeschätzt, wovon 87% auf die äußere Strahlenexposition entfallen. Die Ingestion trägt praktisch nur unbedeutend zur Dosis bei.

Bei einem 2-wöchigen Einsatz (10 Arbeitstage) kann daraus eine Strahlenexposition von 0,05 mSv abgeschätzt werden. Eine solche Dosis führt nur bei dauerhafter Tätigkeit, d.h. mindestens 200 Arbeitstage in solcher Expositionssituation zu einer beruflichen Strahlenexposition.

Nach den in Anlage 1-WK-02.1 aufgeführten Messwerten der spezifischen Aktivität von Kesselasche des untersuchten Kraftwerks, kann für Mitarbeiter, die die Ascheentsorgung durchführen, eine effektive Dosis von 0,0013 mSv je Arbeitstag abgeschätzt werden. Die Dosisbeiträge für die einzelnen Expositionspfade sind:

- 1,16E-03 mSv (88%) pro Einsatztag durch äußere Strahlenexposition,
- 0,15E-03 mSv (11%) pro Einsatztag durch Inhalation (bei Staubkonzentration von 0,5 mg/m³, technischer Referenzwert nach Berechnungsgrundlagen Bergbau (BfS 2010) und Anreicherungsfaktor Feinfraktion von 2) und
- 0,015E-03 mSv (1%) pro Einsatztag durch Ingestion bzw. orale Aufnahme von Staub.

Da die Asche allerdings nicht bei Wartungsarbeiten anfällt, sondern als eine Daueraufgabe durchzuführen ist, ergeben sich bei 220 Arbeitstagen im Kalenderjahr Dosiswerte von ca. 0,3 mSv, die deutlich unter dem Dosiskriterium von 1 mSv verbleiben.

9.3.5 Gesamtbewertung

Sowohl die hier ausgewerteten Untersuchungen des Berichtes (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) als auch die im Rahmen dieser Arbeit ausgeführten Untersuchungen führen auf ähnliche Ergebnisse. Sie zeigen sehr klar, dass ein einziger Einsatz bei Wartungsarbeiten in Kohlekraftwerken und Zementwerken in keinem wahrscheinlichen Szenario zu einer Überschreitung des Dosiskriteriums von 1 mSv im Kalenderjahr führen wird. Durch mehrfache Einsätze in verschiedenen Anlagen können Beschäftigte von spezialisierten Wartungsfirmen allerdings eine Jahresdosis ansammeln, die nach Kriterien des StrlSchG nicht außer Acht gelassen werden kann.

Eine fachlich belastbare Abschätzung oder Ermittlung solcher Jahresdosen ist nur möglich, wenn die ein-satzbezogenen Dosen quantifiziert werden. Da die in diesem Bericht zusammengestellten Dosiswerte sich auf sehr unterschiedliche Zeiträume beziehen, ist ein einheitlicher Bezug zur Bewertung nötig. In

Tabelle 9-2 sind die in den vorhergehenden Kapiteln abgeschätzten Dosiswerte (als μSv -Werte) zusammengestellt und auf einen Arbeitstag normiert.

Tabelle 9-12: Tagesbezogene Expositionen von Beschäftigten bei Wartungsarbeiten.

	Bezug Kapitel	Eff. Dosis (gesamt)	Zeitbezug	Eff. Dosis je Tag (8 h)
Zementwerk A	9.3.1	33 μSv	80 h	3,3 μSv
Zementwerk B	9.3.1	15 μSv	80 h	1,5 μSv
Zementwerk/Abbruch FF	9.3.2	39 μSv	40 h	7,8 μSv
Zementwerk/Einbau FF	9.3.2	19 μSv	95 h	1,6 μSv
Zementwerk/ Sägen FF	9.3.2	3 μSv	45 h	0,5 μSv
Kohlekraftwerk K1	9.3.3	18 μSv	120 h	1,2 μSv
Kohlekraftwerk K2	9.3.3	7 μSv	32 h	1,8 μSv
Kohlekraftwerk K3	9.3.3	93 μSv	10 h	74 μSv
Kohlekraftwerk/ Maurer Heizkessel	9.3.4	5,2 μSv	8 h	5,2 μSv
Kohlekraftwerk/Ascheentsorger	9.3.4	1,3 μSv	8 h	1,3 μSv

Geht man davon aus, dass bei einer realistischen Zahl von maximal 200 Einsatztagen im Jahr eine mittlere arbeitstägliche Dosis von 5 μSv erforderlich ist, um das Dosiskriterium von 1 mSv zu erreichen, dann wird deutlich, dass nur wenige der untersuchten Arbeiten zu solchen Dosiswerten führen. Die relevanten Arbeiten sind insbesondere Abbruch- und Mauerarbeiten mit zirkonhaltigen Feuerfestmaterial. Die Reinigung von Kesseln oder Rohren von Dampfleitungen in den Kohlekraftwerken ist nach den Daten der Tabelle 9-12 ein besonders zu beachtender Aspekt. Da derartige Teile in allen Kraftwerken, auch solchen ohne gemauerte Kessel vorkommen, sind auch bei modernen Anlagen die Expositionen durch Pb-210-haltige Ablagerungen an den Kessel- oder Rohrleitungswänden ein zu beachtender Sachverhalt.

Obwohl die Daten zeigen, dass außer im Falle der Pb-210-haltigen Ablagerungen an Kesseln oder Rohrleitungen die äußere Strahlenexposition den größten Anteil zur Dosis beiträgt, ist eine personendosimetrische Überwachung mit Filmdosimetern nicht ausreichend, da wichtige Anteile der Körperdosis aus der Inhalation resultieren können. Die im Rahmen dieser Arbeit ausgeführten Untersuchungen zeigen, dass an Arbeitsplätzen Staubkonzentrationen vorliegen können, die deutlich höher sind als der in den Dosisabschätzungen in (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) benutzte Standardwert von 1 mg/m³. Eine durchgängige Ermittlung der Staubkonzentration (ggf. durch Analyse von Staubfiltermasken (Schulz u. a. 2012)) ist aufwendig und nach derzeitiger Einschätzung für eine Routineüberwachung wenig geeignet. Eine alternative Möglichkeit wird in der Verwendung von Bezugswerten aus Untersuchungen zum Arbeitsschutz bei den jeweiligen Tätigkeiten gesehen.

So wurden Staubkonzentrationen bei Abbruch- und Ausbrucharbeiten von Feuerfestverkleidungen in einem Drehrohrofen mit 21-66,6 mg/m³ E-Staub durch 5 Messungen ermittelt (BG BAU 2017). Der A-Staub lag in diesen Messungen unter 5 mg/m³ und in einer Messung bei 3,57 mg/m³. Für Abbrucharbeiten (mit offenem Führerhaus und ohne Staubfilterung der Kabinenluft) sind in der TRGS 559 Expositionswertebereiche von 1,36 – 98,79 mg/m³ (MW 18,21 mg/m³) für E-Staub aufgeführt (TRGS 559 2010).

Für alle Arbeiten mit starker Staubbildung bestehen Regelungen hinsichtlich der anzuwendenden Arbeitsschutzmaßnahmen, die unter anderem die Benutzung einer Atemschutzmaske FFP 2 o.ä. vorschreiben (TRGS 559 2010). Beobachtungen bei den hier beschriebenen Untersuchungen zeigten jedoch, dass nicht in jedem Falle von einer ordnungsgemäßen Anwendung der persönlichen Schutzausrüstung auszugehen ist. Von daher ist bei den hier betrachteten Tätigkeitfeldern im Zusammenhang mit Abschätzungen von möglichen Strahlenexpositionen die unabgeminderte Verwendung der Staubkonzentration als geeigneter Ansatz zu betrachten.

Da die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Arbeiten, die im Rahmen eines einzelnen Wartungseinsatzes ausgeführt werden, eine Strahlenexposition in Höhe des Dosiskriteriums von 1 mSv nicht erwarten lassen, ist es nötig zur Einschätzung der möglicherweise betroffenen Personen (s. Kapitel 9.4) Kriterien zu definieren, mit denen die Zahl dieser Personen eingegrenzt werden kann. Arbeiten, für die nach derzeitigem Kenntnisstand das Überschreiten einer Jahresdosis nicht ausgeschlossen werden **kann**, sind

- Arbeiten, von Beschäftigten, die mehr als 100 Tage im Kalenderjahr Wartungsarbeiten an Klinkeröfen der Zementproduktion oder an Heizkesseln in Kohlekraftwerken vornehmen, in denen zirkonhaltige Feuerfestmaterialien verbaut sind oder verbaut werden,
- Arbeiten, von Beschäftigten, die mehr als 10 Tage im Kalenderjahr Wartungsarbeiten an Heizkesseln in Kohlekraftwerken vornehmen, bei denen Pb-210-haltige Ablagerungen entfernt werden.

Die vorgenannten Werte wurden aus den tagesbezogenen Dosiswerten der Tabelle 9-12 unter vorsorglicher Beachtung der Unsicherheiten und hohen Variabilität der tatsächlichen Staubkonzentration an betreffenden Arbeitsplätzen festgelegt. Es ist allerdings davon auszugehen, dass beim größten Teil der so identifizierten Arbeitsplätze eine einzelfallbezogene Ermittlung zu kumulierten Jahresdosen unter 1 mSv führen wird.

Bezüglich der Wartung von Heizkesseln und der Freisetzung von Pb-210(Po-210)-haltigen Stäuben aus Ablagerungen an den Kesselwänden oder Rohrleitungen gibt es bisher keine hinreichenden Untersuchungen, um die Expositionsbedingungen konkreter zu quantifizieren.

9.4 Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten

Nach den Angaben im Kapitel 9.1 gibt es in Deutschland derzeit

- 53 Zementwerke und
- 110 Kohlekraftwerke mit ca. 180 Kraftwerksblöcken (ab 100 MW)

Geht man davon aus, dass die Anlagen jährlich gewartet und dabei teilweise erneuert werden müssen, dann werden in Deutschland jährlich ca. 230 Wartungseinsätze durchgeführt. Bei einer mittleren Dauer von 10 Tagen je Einsatz werden rechnerisch mindestens 23 Firmen benötigt, um diese Einsätze zu realisieren. Die wirkliche Zahl ausführender Firmen ist deutlich größer zu veranschlagen. Da aber Firmen, deren Beschäftigte nur 1- bis 2-mal jährlich solche Wartungseinsätze ausführen, nach derzeitigem Kenntnisstand keine Strahlenexpositionen erhalten, die das Dosiskriterium von 1 mSv erreichen, sind nur solche Firmen ggf. betroffen, die eine größere Zahl solcher Wartungseinsätze im Jahr ausführen. Daraus ergibt sich, dass die in den Werken fest angestellten Mitarbeiter, die organisatorisch, kontrollierend oder praktisch helfend bei Wartungen tätig sind, nicht von den Regelungen des StrlSchG betroffen sein werden.

Von der spezialisierten Firmen, die als externe Firmen die hier betrachteten Arbeiten ausführen ist unter Bezug auf den oben abgeschätzten Bedarf von ca. 3–10 Firmen auszugehen, die die im Kapitel 9.3.5 aufgeführten Zahlen an Einsätzen in den beiden gesetzlich vorgeschriebenen Bereichen ausführen. Nach den gewonnenen Erfahrungen sind bei den Wartungen ca. 10 bis 30 Personen unmittelbar tätig, von denen ca. 3 bis 10 Arbeiten ausführen, die ggf. expositionsrelevant im Sinne des Dosiskriteriums von 1 mSv sind.

Die Gesamtzahl der ggf. nach § 59 StrlSchG hinsichtlich der Exposition abzuschätzenden Beschäftigten kann damit bei einer weitgefassten Einbeziehung aller bei solchen Arbeiten tätigen Personen

100 bis 300

betragen.

Bei einer stärkeren Begrenzung auf Expositionssituationen, bei denen Arbeiter unmittelbar staubbildende Arbeiten mit zirkonhaltigem Feuerfestmaterial ausführen, ist mit

30 bis 100 Personen

zu rechnen, deren Strahlenexposition zu bewerten wäre. Abhängig von den Anforderungen an den Realismus von Dosismittlungen ist die Zahl der als beruflich strahlenexponiert einzustufenden Personen um noch eine Größenordnung geringer, also im Bereich von

3 bis 10 Personen

einzuschätzen.

Speziell im Bereich der Kohlekraftwerke ist darauf hinzuweisen, dass ein Weiterbetrieb der alten Anlagen häufig nicht geplant ist und damit keine Wartungen, sondern eher Rückbauarbeiten zu den hier untersuchten Expositionssituationen beitragen können. Rückbauarbeiten sind aber bei enger Auslegung der gesetzlichen Anforderung nicht als Tätigkeit im Sinne des StrlSchG zu betrachten. Nach Angaben des VGB besitzen Kraftwerke mit neuere Kraftwerkstechnologie in Stahl ausgeführte Brennerräume und kommen gänzlich ohne zirkonhaltige Feuerfestausmauerung aus (Puch 2017). Allerdings ist in solchen Anlagen die Bildung von Pb-210-haltigen Ablagerungen ebenfalls möglich und bei Wartungsarbeiten folglich zu beachten.

9.5 Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung

Die Untersuchungen zum Tätigkeitsfeld Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken zeigten, dass der überwiegende Teil dieser Tätigkeiten durch Mitarbeiter von speziellen Wartungsfirmen ausgeführt wird. In diesen Wartungsfirmen gibt es bisher kaum eine Befassung mit dem Thema Radioaktivität und Strahlenschutz. Die nach § 59 StrlSchG für die Dosisabschätzung bei diesen externen Tätigkeiten verpflichteten haben daher keine oder nur geringe Erfahrungen mit Strahlenexpositionen. Da, wie durch die Untersuchungen gezeigt, die Staubinhalation als Expositionspfad unbedingt einbezogen werden muss, genügt eine Überwachung mit Filmdosimetern nicht.

Voraussetzung für eine belastbare Abschätzung oder Ermittlung von Strahlenexpositionen sind Arbeitszeiterfassungen, die auch Informationen zu den einsatzbezogenen Tätigkeiten enthalten. Daneben wären zumindest (konservativ abgeschätzte oder direkt ermittelte) Staubkonzentrationen von relevanten Arbeitsplätzen erforderlich. In Anbetracht sehr unterschiedlicher Bedingungen an den Einsatzorten stellt das für bisher nicht mit solchen Abschätzungen befasste Personen eine beträchtliche Herausforderung dar.

Da derzeit Importkohle nicht gezielt auf Radioaktivität überwacht werden muss, ist die Verwendung von Kohlen mit höherer Radioaktivität grundsätzlich möglich. Um spezifische Aktivitäten der Aschen im Bereich von $1 \text{ Bq/g } C_{\text{U-238max}} + C_{\text{Th-232max}}$ und damit ggf. relevante Strahlenexpositionen bei Wartungsarbeiten (oder der Entsorgung der Aschen) zu vermeiden, sollte die Kohle weniger als $0,1 \text{ Bq/g U-238}$ (und Th-232) enthalten. Zumindest im Zusammenhang mit der Ermittlung von Strahlenexpositionen bei der Wartung von Heizkesseln in Kohlekraftwerken sollten daher auch die Radioaktivität der Aschen geprüft werden.

Eine weitere, vor allem für die betroffenen Beschäftigten zu klärende Frage betrifft ihre Exposition in anderen Anlagen als den im StrlSchG genannten. Sowohl nach den Untersuchungen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015) als auch nach eigenen Kenntnissen treten in diversen Industriebereichen ähnliche Expositionen wie in den gesetzlich geregelten Tätigkeitsfeldern auf. Beispiele sind:

- Wartungs- und Reparaturarbeiten an Glasschmelzwannen,
- Handhabung von Zirkonsanden und Formimpfmitteln in Gießereibetrieben,
- Handhabung von Aschen aus der Biomaterialverbrennung.

Ähnlich wie Drehrohröfen in Zementwerken sind auch Glasschmelzwannen in regelmäßigen Intervallen zu warten bzw. zu reparieren. Da in Glasschmelzwannen aufgrund der höheren Anforderungen an die Lebensdauer in der Regel FF-Materialien mit höheren Zirkongehalten eingesetzt werden, liegen dort auch häufig höhere spezifische Aktivitäten natürlicher Radionuklide vor. Aufgrund der hohen Temperaturen in Glasschmelzwannen kann es in Staubablagerungen zu Pb-210-Anreicherungen kommen.

Die Arbeiten werden ähnlich wie bei den Wartungsarbeiten in Drehrohröfen und Heizkesseln von spezialisierten Fachfirmen ausgeführt. Nur kurze Zeit dauernde Wartungsarbeiten (bis 1 Woche) sind z.B. das Entfernen von Kammerstäuben oder die Reinigung von Anlagenteilen. Kaltreparaturen für den Austausch des FF-Materials im Wärmetauscher und im Wannenbereich dauern in der Regel mehrere Tage bis zu wenigen Wochen. Dabei fallen erhebliche Massen an FF-Material (teilweise mehr als 1000 Tonnen) an, die mehr als

1 Bq/g $C_{U-238max} + C_{Th-232max}$ enthalten können. Bei begleitenden Messungen wurden ODL Messwerte von $>1 \mu Sv/h$ im Kontakt ermittelt (Messungen im Rahmen von NCC Projektbearbeitung).

Durch das StrlSchG ebenfalls nicht erfasst sind Tätigkeiten in Kraftwerken, die keine Kohle verbrennen. In der internationalen Fachliteratur werden Emissionen von Pb-210(Po-210) auch bei schwerölbefeuerten Kraftwerken und Gaskraftwerken beschrieben (Al-Masri u. a. 2014). Außerdem sind in Erdgasleitungen Ablagerungen von Pb-210, die durch den radioaktiven Zerfall des im Gas enthaltenen Rn-222 gebildet wurden, bekannt (Godoy u. a. 2005). Daher ist z.B. auch an Gaskraftwerken eine Pb-210-haltige Ablagerung an Kesselwänden oder Wärmeaustauschern nicht auszuschließen. Konkrete Angaben zu solchen Ablagerungen konnten in der Fachliteratur nicht gefunden werden.

Deutlich höhere spezifische Aktivitäten als in Aschen der üblicherweise verbrannten Kohlen, können bei der Verbrennung von Biomasse entstehen. Bei der Verbrennung von Holzpellets können sich Radionuklide je nach Wassergehalt um den Faktor $EF = 200$ bis 1000 in der Asche anreichern. Das ist ein deutlich höherer Anreicherungsfaktor als der für die Verbrennung von Steinkohle ($EF = 2,5$ bis 15) oder von Braunkohle ($EF = 8$ bis 50) bestimmte Anreicherungsfaktor (Gellermann u. a. 2007).

Nach (BG BAU 2017) sind 2015/2016 bei der Reinigung von Holzpellets- und Hackschnitzelanlagen Staubexpositionen in Höhe von $6,18-14,2 \text{ mg/m}^3$ E-Staub und $0,74-3,21 \text{ mg/m}^3$ A-Staub gemessen worden.

Nach Angaben in (SSK 2014) wurden in einer Mischprobe der Rostasche und Elektrofilterasche spezifische Aktivitäten von ca. 30 Bq/kg U-238, 50 Bq/kg Ra-226 und ca. 4000 Bq/kg Pb-210 sowie ca. 500 Bq/kg Cs-137 vorgefunden. Aus der Untersuchung an einem Biomassekraftwerk wurden in Mischproben aus Elektrofilterasche und Zyklonasche spezifische Aktivitäten von ca. 50 Bq/kg U-238, Ra-226, $2900 - 4900 \text{ Bq/kg}$ Pb-210 und $300 - 800 \text{ Bq/kg}$ Cs-137 bestimmt. Bei eigenen projektbezogenen Untersuchungen wurden an Filteraschen aus Bioheizkraftwerken Pb-210-Aktivitäten bis 560 Bq/kg und Cs-137 bis 5000 Bq/kg gemessen. An Fässern mit diesen Aschen konnten Dosisleistungen von über $1 \mu Sv/h$ festgestellt werden. Diese Messergebnisse geben zumindest Hinweise auf mögliche Inhalationsdosen bei der Durchführung von Wartungsarbeiten in Biomassekraftwerken, die nach Strahlenschutzaspekten zu beachten wären.

10 Verarbeitung von zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe

10.1 Branchenspezifische Übersicht

10.1.1 Abgrenzung der zu betrachtenden Arbeitsplätze

Zirkon ist ein natürlich vorkommendes Zirconium-Silikat, $Zr[SiO_4]$, das u.a. zur Herstellung von Feuerfestmaterial verarbeitet und genutzt wird. Das hochfeste und daher auch als Schleifmittel genutzte Zirkoniumdioxid (Zirkonoxid, Zirkonia) wird aus Zirkon hergestellt.

Basierend auf den Recherchen zu Betrieben in Deutschland kann davon ausgegangen werden, dass alle in Deutschland ausgeführten Produktions- und Verarbeitungsschritte, bei denen zirkonhaltige Ausgangsstoffe eingesetzt werden, mit importierten Rohstoffen ausgeführt werden.

Zum Tätigkeitsfeld „Verarbeitung von zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe“ zugehörig werden alle Arbeitsplätze verstanden, die im Bereich der Herstellung von Zirkonmehlen oder der Aufbereitung von Rohstoffen liegen, da sie einen direkten Bezug zur Verarbeitung von zirkonhaltigen Stoffen haben und zur Herstellung feuerfester Werkstoffe beitragen. Die Abgrenzung feuerfester Werkstoffe erfolgt auf Basis der Definition des VDFFI nachdem geformte und ungeformte feuerfeste Erzeugnisse unterschieden werden (VDFFI 2017). Geformte feuerfeste Erzeugnisse sind weiter unterteilbar in

- dichte geformte Erzeugnisse wie Steine, Formteile, Schmelztiegel, Rohre usw. und
- poröse, wärmedämmende Erzeugnisse wie Wolle und Feuerleichtsteine.

Zu ungeformten feuerfesten Erzeugnissen gehören Mörtel, Betone, Zemente und Mischungen pulverförmiger oder pastöser Erzeugnisse wie z.B. Sande, Schlichten und Formimpfmittel.

Nicht zur Herstellung feuerfester Erzeugnisse gehören die Nutzungen von zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung von

- technischen Keramiken, Fliesen, Keramikbauteilen und Porzellan,
- Strahlgut, Abrasivmaterialien und Schleifscheiben,
- Zahnkeramiken, Kosmetika,
- Beschichtungsmaterialien (z.B. für thermisches Spritzen und Plasmaspritzen).

Nach Angaben der Zircon Industry Association (ZIA) werden global betrachtet nur 10% des gesamten Zirkons für Feuerfeststeine verbraucht; 14% werden als Sande und Formen in Gießereien verwendet. Die restlichen 76% werden in chemischen Produkten (14%), Fliesen und Sanitärwaren (55%) und in anderen Verwendungen (7%) genutzt (Zircon Industry Association 2015).

10.1.2 Zirkonminerale und ihre Herkunft

Für die Herstellung feuerfester Werkstoffe werden Baddeleyit oder Zirkoniumsilicat („Zirkon“, $ZrSiO_4$) als Ausgangsminerale verwendet. Weltweit betrachtet sind die Lagerstätten und Reserven mit den größten

Vorkommen in Australien (64%), Süd Afrika (18,6%) und Indien (4,5%) gefolgt von Mozambique (1,2%), USA (> 1%), China (> 1%) und weiteren Ländern (9,6%). In 2017 sind schätzungsweise 75 Mio. Tonnen Zirkonoxid als Reserven weltweit vorhanden (USGS 2017).

Eine bergbauliche Gewinnung von Zirkonmineralen in Deutschland wird in den Rohstoffberichten der BGR (BGR 2016) nicht aufgeführt und findet demnach nicht statt.

10.1.3 Feuerfestindustrie in Deutschland

Die Produktion von 1,6 Mio. Tonnen feuerfester Erzeugnisse wurde zum größten Teil in der Roheisen- und Stahlindustrie (72%) sowie in Eisen- und Nichteisenmetallgießereien umgesetzt. Danach folgen sog. thermische Prozessanlagen wie Zement-, Kalk- und Glasindustrie (Grömling 2008).

Die mineralischen Rohstoffe Bauxit, Magnesit, Dolomit und Ton werden durch thermische Behandlung zu feuerfesten Rohstoffen wie z.B. Sinter- und Schmelzkorund bzw. -magnesia, Doloma und Schamotte verarbeitet. Weitere synthetisch hergestellte Rohstoffe sind z.B. Edelkorund, Tabular-Tonerde, Sinter- und Schmelzmullit. Die feuerfesten Erzeugnisse werden aus den feuerfesten Rohstoffen nach Rezepturen gemischt und entsprechend der geplanten Einsatzzwecke als geformte oder ungeformte feuerfeste Erzeugnisse produziert (Grömling 2008).

Der Einsatz von Zirkonoxid erfolgt in der Regel zur Verbesserung der Eigenschaften von feuerfesten Erzeugnissen wie z.B. pH-Neutralität, geringer Ausdehnungskoeffizient bei hohen Temperaturen und hohe Schmelztemperatur von 2100–2300 °C. Außerdem ist Zirkonoxid wenig löslich in Glas- oder Metallschmelzen und ist chemisch weitestgehend inert, widerstandsfähig gegen Erosion und Korrosion und lässt sich gut recyceln.

Für die Herstellung von Feuerfesterzeugnissen wird nach (Barthel u. a. 2000) unter Verweis auf Angaben des VDFFI eine Verwendung von Bauxit in 10% und von Zirkon/Baddeleyit in 1% der Feuerfesterzeugnisse angegeben. Demnach wären unter Zugrundelegung der genannten 1,6 Mio. Tonnen nur 16 Tsd. Tonnen Feuerfesterzeugnisse zirkonhaltig.

10.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

10.2.1 Rohstoffaufbereitung

Durch **Schmelzreduktion** zirkonhaltiger Rohstoffe im Lichtbogenofen mit Koks bei ca. 2700-2800°C wird relativ reines Zirkonoxid („Fused Zirconia“, ZrO_2) gewonnen. Durch Beigabe von Magnesium, Yttrium oder Calcium werden Kristallstrukturen der Zirkonminerale stabilisiert und Produkte für die Herstellung feuerfester Erzeugnisse aufbereitet. Die flüchtigen Fremdbestandteile inkl. des enthaltenen Quarzes gehen in die Gasphase über und werden abgeschieden. Das Schmelzprodukt enthält lediglich Verunreinigungen, die nicht in die Gasphase übergehen und die hinzugegebenen Stabilisatoren. Aufgrund der hohen

Temperaturen werden die enthaltenen flüchtigen Radionuklide wie Pb-210, Po-210 und teilweise auch Ra-226 ausgetrieben. Letzteres wird zum Teil mit dem Silikatstaub wieder abgeschieden.

Die **chemische Gewinnung** von Zirkonoxid erfolgt in der Regel durch Herstellung löslicher Zwischenprodukte und die Rückgewinnung durch Fällung. Der chemische Prozess zerstört die Kristallstruktur der Zirkonminerale und setzt die enthaltenen Radionuklide teilweise frei. Ein häufig angewendeter Prozess ist die Fusion von Ätznatron und Zirkon bei 600-700°C. Das entstehende Natrium-Zirkonat (Na_2ZrO_3) wird in Salzsäure gelöst und bildet Zirkonoxychlorid (ZOC). Aus ZOC kann nach weiteren chemischen Bearbeitungsschritten das Zirkonoxid (ZrO_2) durch Kalzinierung oder Fällung mit einem alkalischen Reagenz gewonnen werden (IAEA 2007). Die Radionuklide werden zum Teil mit den entstehenden Prozessabfällen abgeführt. Da es sich in der Regel um flüssige Prozessabfälle handelt, ist eine Bildung von Scales in Tanks und Rohrleitungen nicht auszuschließen. Dies ist im Falle von Wartungsarbeiten an diesen Anlagenteilen mit einem erhöhten Expositionsrisiko verbunden (Selby, J.H., International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008, Seite 103-104).

10.2.2 Herstellung von Feuerfesterzeugnissen

Die Hersteller von Feuerfestprodukten verwenden zirkonhaltige Mehle, Sande oder Granulate, mischen diese mit weiteren Zusätzen und produzieren geformte oder ungeformte feuerfeste Erzeugnisse. Dies kann sowohl über Schmelz-Guss-Verfahren als auch über Sinterverfahren und anschließendes Brennen erfolgen. Typische Zirkongehalte in Feuerfeststeinen liegen bei 30-40%. In anderen geformten Produkten sind auch Zirkongehalte bis 94% bekannt. Die Formgebung im Sinterverfahren erfolgt durch Hochdruckpressen oder durch isostatisches Pressen. Die Nachbearbeitung von verdichteten Erzeugnissen erfolgt üblicherweise durch Schneiden und Schleifen (Brunk 2012). Bei staubenden Arbeiten, wie z.B. Mischen und Vermengen von zirkonhaltigen Rohstoffen, Bearbeiten von Produkten durch Säge- oder Schleifarbeiten oder Wartungsarbeiten an Anlagen für die Herstellung zirkonhaltiger Feuerfesterzeugnisse können erhöhte Staubexpositionen auftreten.

10.2.3 Recycling von Feuerfesterzeugnissen

Zirkonhaltige Feuerfesterzeugnisse werden vielfach recycelt und in Mineralmahlwerken aufbereitet. Die Mineralwerke arbeiten gesammelte Materialchargen in Kampagnen ab und führen die sortierten Recycling-Produkte dem Herstellungsprozess von feuerfesten Erzeugnissen zu. Die Aufbereitung erfolgt in der Regel in einem mehrstufigen Prozess aus Brechern, Sortier- und Klassieranlagen. Die klassifizierten Granulate werden in Bigbags verpackt und den Herstellern von feuerfesten Erzeugnissen zugeführt.

Durch die Nutzung der Feuerfesterzeugnisse in unterschiedlichen industriellen Prozessen kann es zu Verunreinigungen durch chemische Stoffe kommen, die zu einer Einstufung als gefährliche Abfälle führen und ein Recycling verunmöglichen.

10.3 Ausmaß und Abschätzung der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen

10.3.1 Radionuklidgehalte im Rohstoff

Zirkoniumsilicat und Baddeleyit enthalten primordiale, natürlich vorkommende Radionuklide, die in das Kristallgitter während der Kristallisation aus der Schmelze eingebaut wurden. Die Radionuklidgehalte liegen nach (International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008) häufig bei 250-350 ppm Uran und 100-200 ppm Thorium. Durch Verunreinigungen können zum Teil auch höhere Radionuklidgehalte vorliegen, diese können jedoch auch auf z.B. einzelne Körner beigemengte Monazitsande zurückzuführen sein. Die üblichen spezifischen Aktivitäten werden in (IAEA 2007) mit 1-4 Bq/g für die Radionuklide der U-238 Zerfallsreihe (entsprechend können 0,05-0,2 Bq/g für die U-235 Zerfallsreihe angenommen werden) und mit 0,5-1 Bq/g für die der Th-232 Zerfallsreihe angegeben. Durch radioaktiven Zerfall liegen die Radionuklide U-238, U-235 und Th-232 im Rohstoff in der Regel im säkularen Gleichgewicht mit ihren jeweiligen Tochternukliden vor.

10.3.2 Expositionsbedingungen bei Zirkonoxidherstellung durch Schmelzreduktion

Für durch Schmelzen gewonnenes Zirkonoxid werden von (IAEA 2007) für U-238 2-5 Bq/g angegeben. Im Prozess der Schmelzreduktion wurden Radionuklidzusammensetzungen von 3-4,5 Bq/g U-238 im Rohmaterial, 4,5-6,8 Bq/g U-238 im Zirkonoxid und 6 Bq/g Ra-226 im Silikat-Nebenprodukt, das über die Gasphase ausgetragen wird, festgestellt (Selby, J.H., International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008, Seite 102). Aus der Literatur wurden weitere Angaben zur Radioaktivität in den Rohstoffen und Prozessmaterialien der Schmelzreduktion in Tabelle 10-1 zusammengestellt.

Tabelle 10-1: Angaben zur Radioaktivität in Rohstoffen und Prozessmaterialien der Schmelzreduktion in Bq/g.

Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Po-210	U-235	Th-232
Zirkonsand	3,61	3,22	2,71	2,75	0,14	0,52
Entstaubung Fusionsofen	0,36	0,15	21	35	0,002	0,003
Fusionsofen Abgasfilter	-	-	n.d.	28	-	-
Entstaubung Mahlwerk	1,2	1,0	1,0	1,3	0,006	0,18
Abscheidefilter Mahlwerk	-	-	n.d.	6,1	-	-
Produkte 1, 2 und 3	1,7	1,4-1,6	0,75-1,3	0,7-1,3	0,008-0,009	0,25-0,31
Schlämme	1,6	1,5	1,2	1,2	0,009	0,24

Quelle: (ZAMPIERI, C., et al. in International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material und International Atomic Energy Agency 2005, Seiten 240-245).

Aufgrund der Umverteilung von Radionukliden in den thermischen Aufbereitungsprozessen, kann es zu deutlichen Abweichungen der Aktivitätsverteilung vom radioaktiven Gleichgewicht kommen. Daher sind für den Expositionspfad Inhalation bei z.B. Reinigungsarbeiten an Entstaubungsanlagen der Ofenabluft Ra-226 und Pb-210 zu betrachten, da diese ab ca. 1400°C thermisch mobilisiert werden können und zum Großteil

mit dem Staub (Thermostaub) abgeschieden werden. Dies gilt ebenfalls für Po-210, das bereits ab einer Temperatur von ca. 800°C mobilisierbar ist. In einer Abschätzung von Kollektivdosen für Personen der Bevölkerung wurden insbesondere aus der Ingestion von Po-210 und Pb-210 relevante Dosen für Personen der Bevölkerung abgeleitet (ZAMPIERI, C., et al. in International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material und International Atomic Energy Agency 2005, Seiten 240-245).

Nach der Gewinnung von Zirkonoxid finden verschiedene Zerkleinerungs- und Mahlprozesse statt, um aus dem Rohstoff weiter verarbeitbare Zwischenprodukte wie z.B. Zirkonoxidmehle und Zirkonoxidgranulate herzustellen. Die Zwischenprodukte werden in der Regel in Säcke oder Big-Bags verpackt.

Für Anlagen die Schmelzreduktion durchführen, wurden in der Literatur Dosisabschätzungen von 0,07-0,26 mSv/a aus Direktstrahlung und 0,6-3 mSv/a aus der Inhalation von Staub ermittelt (Selby, J.H., International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008, Seite 103).

10.3.3 Expositionsbedingungen bei Zirkonoxidherstellung durch chemische Verfahren

Die unterschiedlichen chemischen Verfahren zur Herstellung von Zirkonoxid variieren hinsichtlich der Prozessgestaltung und führen daher zu verschiedenen Expositionsbedingungen an Arbeitsplätzen. Für die Produkte der Gewinnung von Zirkonoxid aus dem alkalischen Schmelzaufschluss und dem Zwischenprodukt Zirkonoxychlorid (ZOC) werden in der Literatur relativ geringe Aktivitätskonzentrationen < 0,1 Bq/g angegeben (vgl. Tabelle 10-2).

Tabelle 10-2: Angaben zur Radioaktivität in Rohstoffen, Prozessmaterialien und Abfällen der chemischen Zirkonoxidherstellung in Bq/g.

Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Th-232	Ra-228	Th-228
Zirkonsand *)	3,8	3,9	-	0,96	0,61	0,58
ZOC *)	<0,08	<0,04	-	-	<0,01	<0,04
Zirkon Produkt	-	0,003	-	-	0,004	0,0003
ZOC (Abfall) **)	0,23	6,5	0,41	-	0,51	0,66
Abfälle (Waste stream) *)	1,5	1,0		0,22	0,18	0,25

*) Ermittelte Aktivitätskonzentrationen nach Angaben in (IAEA 2007); **) Projektdaten NCC.

Basierend auf NCC Projektdaten wurden allerdings auch deutlich höhere Radionuklidgehalte von 6,5 Bq/g Ra-226 in ZOC Abfällen gemessen. Die Radionuklide gehen in Abhängigkeit von der Prozessführung überwiegend in die Abwässer oder können als Scales in Rohrleitungen und Tanks zurück bleiben (IAEA 2007). In Ablagerungen können die Radionuklide zu hohen Aktivitätskonzentrationen akkumulieren. Es wurden Ra-226 Aktivitätskonzentrationen von mehr als 5000 Bq/g in Tanks zur Behandlung flüssiger Rückstände einer Ionenaustauscheranlage festgestellt (IAEA 2007; Hipkin und Shaw 1999).

Üblicherweise sind in großtechnischen chemischen Anlagen, nur kurzzeitige Aufenthalte in der direkten Umgebung der Anlagen notwendig. Insbesondere in Bereichen, die der Abfallbehandlung dienen, sind außer zu Wartungs- und Reparaturzwecken keine längerfristigen Aufenthalte vorgesehen. Im Falle der hohen

Aktivitätskonzentrationen der Ablagerungen in Tanks zur Behandlung flüssiger Rückstände einer Ionenaustauscheranlage wurden in der direkten Umgebung 400 $\mu\text{Sv/h}$ gemessen (Hipkin und Shaw 1999).

Inwiefern die Anreicherung von Radionukliden in Anlagen einen Normalfall darstellt, kann aufgrund der unterschiedlichen Prozesse und Aufbereitungsschritte nicht sicher beurteilt werden. Allerdings kann in der Regel von einer Verlagerung und Akkumulation der Radionuklide ausgegangen werden, wenn sowohl das Produkt als auch die Ableitungen geringe Aktivitätskonzentrationen aufweisen, während im Rohstoff erhöhte Radionuklidgehalte festgestellt wurden.

Die jährlichen effektiven Dosen für den alkalischen Schmelzaufschluss werden in der Literatur mit weniger als 1 mSv angegeben. Die Herstellung von Zirkonoxid trägt demnach mit 0,6 mSv und die Behandlung der flüssigen Rückstände mit 0,3 mSv im Jahr zur effektiven Dosis bei. Für die Herstellung aus Baddeleyite ist ein höherer Wert von bis zu 3 mSv im Jahr angegeben (IAEA 2007).

10.3.4 Expositionsbedingungen in Zirkonmahlanlagen

Zur Staubexposition in Mahlwerken liegen vielfach nur stichprobenhafte Untersuchungen vor. Staubmessungen sind als Momentaufnahmen zu betrachten und können je nach Anlagentechnik, Aufstellungsort der Probenahmetechnik, Probenahmezeitraum und -zeitpunkt stark variieren (van der Steen u. a. 2004). Die in Zirkonmahlanlagen üblichen Staubkonzentrationen liegen nach (IAEA 2007) in einem Wertebereich zwischen 2-10 mg/m^3 . Die luftgetragenen spezifischen Aktivitäten mit einer angenommenen spezifischen Aktivität von 4 Bq/g U-238sec und 1 Bq/g Th-232sec im staubenden Material, werden in (IAEA 2007) für Staubkonzentrationen von 2 mg/m^3 und 10 mg/m^3 wie folgt abgeschätzt:

- Einzelnuclide U-238 Zerfallsreihe: 8 mBq/m^3 bzw. 40 mBq/m^3 ,
- Einzelnuclide Th-232 Zerfallsreihe: 2 mBq/m^3 bzw. 10 mBq/m^3 ,
- Gesamtalphaaktivität: 50 mBq/m^3 bzw. 250 mBq/m^3 .

Die daraus ableitbaren Inhalationsdosen bei einer Atemrate von 1,2 m^3/h , 2000h Aufenthaltszeit und einem Dosiskoeffizienten von 1,0 E-05 Sv/Bq (Gesamtalpha ohne Radon) liegen bei 1,2 mSv bzw. bei 6 mSv (Dosiskoeffizient bestimmt nach Anlage 5, Materialtyp M1 (U) ohne Radon und Töchter).

Für typische Staubexpositionen in Zirkonmahlanlagen wurden bei gleichen Bedingungen (Aufenthaltszeit von 2000 Std. und einer Atemrate von 1,2 m^3/h) die in Tabelle 10-3 aufgeführten Dosisabschätzungen von zwei Staubmaterialien aus Tabelle 10-1

- Material 1: Zirkonsand 4,1 Bq/g und
- Material 2: Entstaubung Mahlwerk 1,5 Bq/g

mit den jeweiligen beurteilungsrelevanten Aktivitätskonzentrationen durchgeführt. Die Dosiskoeffizienten wurden auf Basis nuklidspezifischer Dosiskoeffizienten und der Nuklidzusammensetzung der Materialien bestimmt. In Tabelle 10-3 sind in Zirkonmahlanlagen übliche Staubkonzentrationen aus (IAEA 2007) sowie die Inhalationsdosen für die jeweils betrachteten Materialien aufgeführt.

Tabelle 10-3: Expositionsabschätzungen der Inhalationsdosen für Staubkonzentrationen in Zirkon Mahlanlagen (Literaturdaten nach (IAEA 2007)) unter Berücksichtigung von zwei Materialien.

	Staub	E_{Inh.} Material 1 *)	E_{Inh.} Material 2 **)
	[mg/m ³]	[mSv]	[mSv]
Zirkon Mahlanlage (USA)	0,8	0,35	0,14
Zirkon Mehlproduktion (Indien)	0,4-3,4	0,17-1,5	0,07-0,6
Zirkon Mehlproduktion (UK)	0,4-1,5	0,17-0,66	0,07-0,27
Sackabfüllung	1,9-2,7	0,83-1,2	0,34-0,48
Staubkaskaden von Portalen	3,6	1,6	0,64
Manuelles Beladen einer Nassmahlanlage	5,8-9,0	2,5-3,9	1,0-1,6
Wartungsarbeiten in einer Mahlanlage	2,0-2,8	0,88-1,2	0,35-0,50
Sand mit einer mechanischen Schaufel in Trichter laden	1,9	0,83	0,34

Dosiskoeffizienten Beschäftigte nach BglBb: *) 4,5E-05 Sv/Bq; **) 4,9E-05 Sv/Bq.

Den Expositionsabschätzungen zufolge kann bereits ab einer Staubkonzentration von 2,5 mg/m³ (Material 1) bzw. 6 mg/m³ (Material 2) das Dosiskriterium von 1 mSv im Kalenderjahr überschritten werden. Werden die Dosisbeiträge aus Direktstrahlung mit 0,1 µSv/h (Konversionsfaktor = 0,7) und der Ingestion von Staub ebenfalls berücksichtigt, kann das Dosiskriterium ab einer Staubkonzentration von 2 mg/m³ des Materials 1 und ab 5 mg/m³ des Materials 2 überschritten werden. Unter Berücksichtigung einer Staubkonzentration von 0,5 mg/m³ für Anlagen mit optimierten Bedingungen hinsichtlich der Staubreduktion kann das 1 mSv bei einer Ortsdosisleistung von 0,52 µSv/h (Material 1) bzw. von 0,63 µSv/h (Material 2) erreicht werden.

10.3.5 Expositionsbedingungen bei der Herstellung von feuerfesten Erzeugnissen

Die bei der Herstellung zirkonhaltiger feuerfester Erzeugnisse zum Einsatz kommenden Zirkonoxidmehle und -granulate enthalten Aktivitätskonzentrationen in vergleichbarer Höhe zu den in Kapitel 10.3.4, Tabelle 10-1 angegebenen Produkten. Allerdings werden Zirkonoxidmehle in der Regel nur in geringerem Umfang gehandhabt, da sie als Zusatzstoff mit anderen Rohstoffen eingesetzt werden.

Für die AZS Feuerfestproduktion sind in Tabelle 10-4 Aktivitätskonzentrationen verschiedener Prozessmaterialien und Produkte angegeben.

Tabelle 10-4: Spezifischen Aktivitäten von Prozessmaterialien der AZS Produktion.

Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Po-210	Th-232	Ra-228	Th-228
	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g
AZS Material 1	1,48	1,68	0,214	-	-	0,252	0,243
AZS Materialien	1,7-1,8	1,4-1,6	0,95-1,3	0,7-1,4	0,3	-	-
Ofenstaub	0,36	0,15	21	35	0,02	-	-
Schlamm	1,6	1,5	1,2	1,2	0,2	-	-

Quelle: (International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material und International Atomic Energy Agency 2005).

Für Anlagen die Feuerfesterzeugnisse herstellen, wurden Dosisabschätzungen von weniger als 0,6 mSv/a aus Direktstrahlung und 0,01-0,2 mSv/a aus der Inhalation von Staub ermittelt (Selby, J.H., International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008, Seite 106).

In Untersuchungen des LfU an einem Betrieb zur Herstellung von Feuerfeststeinen wurde festgestellt, dass die Herstellung von zirkonhaltigen Feuerfesterzeugnissen in Kampagnen stattfindet. Diese können mehrere Jahre auseinanderliegen und in einen Zeitraum von wenigen Wochen durchgeführt werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015). Inwiefern auch andere Betriebe nur in Kampagnen mit einer beschränkten Dauer zirkonhaltige Feuerfesterzeugnisse herstellen, ist in der Literatur nicht weiter beschrieben. Für die im VDFFI organisierten Hersteller konnte jedoch bestätigt werden, dass zirkonhaltige Feuerfesterzeugnisse bis auf eine Ausnahme in Kampagnen hergestellt werden (Müller 2017). Die Kampagnenhäufigkeit ist für die jew. Betriebe unterschiedlich. Aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen (nicht zirkonhaltigen) Feuerfesterzeugnisse, die hergestellt werden, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem zeitlich beschränkten Umgang mit zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung von Feuerfesterzeugnissen ausgegangen werden. Daher ist für die Expositionsabschätzung ein reduzierter Arbeitszeitanatz von 400 Std. nach Tabelle 2-2 zu wählen. Abgesehen von Arbeitsplätzen, die ganzjährig mit zirkonhaltigen Stoffen umgehen, ist daher ein Bruchteil (20%) der Exposition anzunehmen, die bei der Produktion der zirkonhaltigen Rohstoffe in z.B. Zirkonmahanlagen auftreten kann.

Bei einer angenommenen spezifischen Aktivität, vergleichbar zu der in Kapitel 10.3.4 aufgeführten von 4 Bq/g U-238sec und 1 Bq/g Th-232sec im staubenden zirkonhaltigen Rohstoff, wäre das Dosiskriterium von 1 mSv für Staubkonzentrationen von 2 mg/m³ deutlich unterschritten (0,24 mSv) und für 10 mg/m³ mit 1,2 mSv überschritten.

10.4 Ermittlung von Strahlenexpositionen in exemplarisch untersuchten Anlagen

10.4.1 Rohstoffaufbereitung

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei einer Anlage der Zirkonoxidherstellung wurden im Juni 2017 gezielte Untersuchungen durchgeführt. Die Protokolle, Messdaten und Fotos dieser Untersuchungen sind in der Anlage 1-ZI-02 beigefügt.

Die Untersuchungen wurden in einem Unternehmen durchgeführt, das mit Y bzw. MgO stabilisiertes Zirkonoxid (Prozesslinie 1) und Zirkonkorund (Prozesslinie 2) herstellt. In Tabelle 10-5 sind die Prozessschritte und die abgeleiteten Expositionspfade für Prozesslinie 1 zusammengefasst. Entsprechend enthält Tabelle 10-6 die Angaben für die Prozesslinie 2.

Tabelle 10-5: Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 1).

Prozessschritt	Anlagenteile	Expositionspfade
Annahme, Entladen und Lagerung der Rohstoffe	Rohstofflager	Direktstrahlung
Schmelze	Ofenstand und Messwarte	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Ablösen der Sinterkruste nach dem Abkühlen im Blocklager (manuell)	Reinigungsplattform	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Brechen, sieben, mahlen	Brechanlage	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Aufgemahlenes Material mit Wasser versetzt; rühren	Attritor- u. Draismühle, Zentrifuge	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Trocknen der Produkte; verpacken	Trockenofen, Deagglomeration	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Kommissionieren der Produkte	Versandlager	Direktstrahlung

Tabelle 10-6: Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 2).

Prozessschritt	Anlagenteile	Expositionspfade
Annahme, Entladen und Lagerung der Rohstoffe	Rohstofflager	Direktstrahlung
Schmelze	Arbeitsbühne vor Ofen	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Zerkleinerung (brechen, sieben, mahlen)	Magnetabscheider, Schüttelsiebanlage, Brechanlage	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Herstellen verschiedener Produktmischungen	Mischraum	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion

In Tabelle 10-7 sind Messwerte der Ortsdosisleistung der Rohstoffe von Prozesslinie 1 und 2 zusammengefasst. Diese wurden als Parameter für die Expositionsermittlung zugrunde gelegt, sofern keine Messwerte direkt vom Arbeitsplatz vorlagen (Ofenstand, Arbeitsbühne etc.).

Tabelle 10-7: Messwerte der Ortsdosisleistung bei der Herstellung von Zirkonoxid (Kontakt)

Prozesslinie 1				Prozesslinie 2	
Rohstofflager		Blocklager		Rohstofflager	
Big Bags mit Rohstoffmischungen	0,18 µSv/h 0,33 µSv/h 0,80 µSv/h	Block	0,31 µSv/h in 1 m: 0,175 µSv/h	Big Bag Zirkonsand	1,2 µSv/h in 1 m: 0,52 µSv/h
Big Bag Rohstoff Y	0,15 µSv/h	Block	0,81 µSv/h in 1 m: 0,22 µSv/h	Big Bag Baddeleyit	2,2 µSv/h in 1 m: 1,0 µSv/h
		Block	0,53 µSv/h	Silo Tonerde	0,15 µSv/h

In Tabelle 10-8 sind die spezifischen Aktivitäten der untersuchten Materialproben enthalten. Das eingesetzte Y-Oxid weist keine erhöhten spezifischen Aktivitäten auf. Die Probe Y8 Vorzerkleinerung stellt das noch nicht vollständig aufgemahlene Produkt dar. Als Reststoffe gehen aus dem Produktionsprozess (Prozesslinie 1) hervor:

- Der Filterstaub der Schmelzanlage (Probe Y6/8 Filterstaub) mit einer spezifischen Aktivität von 6 Bq/g U-238max+Th-232max. Da bereits aufbereitete Rohstoffe eingesetzt werden, dominiert nicht das Radionuklid Pb-210.
- Der Filterstaub aus der Brechanlage (Probe Filterstaub Linie Yttrium) mit einer spezifischen Aktivität von 1,7 Bq/g U-238+Th-232max. Der Nuklidvektor entspricht dem des hergestellten Produktes.
- Schlamm der Abwasserreinigungsanlage mit etwa 10 Bq/g U-238max+Th-232max (nicht beprobt).

Als Reststoffe gehen aus dem Produktionsprozess (Prozesslinie 2) hervor:

- Der Filterstaub aus der Schmelzanlage (Probe ZK40 DCFG). Da die eingesetzten Rohstoffe noch nicht thermisch aufbereitet worden sind, enthält dieser Filterstaub 18 Bq/g Pb-210.
- Der Filterstaub aus der Brechanlage (Probe ZK40 Filterstaub) mit einer spezifischen Aktivität von 2 Bq/g U-238+Th-232max. Der Nuklidvektor entspricht dem des hergestellten Produktes.

Tabelle 10-8: Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Herstellung von Zirkonoxid in Bq/g.

Prozesslinie 1:					
Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
Y-Oxide, ceramic grade	< 0,09	< 0,04	< 0,50	< 0,04	< 0,02
Y8 Vorzerkleinerung	0,82	1,9	< 0,65	0,17	0,09
Y6/8 Filterstaub	5,50	4,95	3,17	0,55	0,39
Filterstaub Linie Yttrium	0,71	1,54	< 0,59	0,13	0,13
Prozesslinie 2:					
Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
ZK40 Filterstaub	1,48	1,85	< 0,64	0,11	0,20
ZK40 DCFG	0,26	0,44	17,8	< 0,04	0,02

Die Dosismodellierung für die Herstellung von Zirkonoxid befindet sich in Anlage 2-ZI-02. Um die strahlungsrelevanten Eigenschaften der Materialien zu berücksichtigen, wurden mit mittleren spezifischen Aktivität von 2,5 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 1, ZrO₂ aus Schmelzprozessen) und 0,7 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 2, chemisch hergestelltes ZrO₂) zwei Varianten für die Prozesslinie 1 betrachtet. Im Vergleich zu den Literaturwerten in Kapitel 10.3.2 und Kapitel 10.3.3 weist auch chemisch hergestelltes Zirkonoxid je nach Qualität eine leicht erhöhte spezifische Aktivität auf.

Für die Herstellung von Zirkonkorund (Prozesslinie 2) wurden Materialien mit einer mittleren spezifischen Aktivität von 1,8 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 1, für Herstellung ZK25) und 2,6 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 2, für Herstellung ZK40) angesetzt.

Die mittleren Dosisleistungen für die Beschäftigten wurden aus den Messwerten der gehandhabten Materialien und die mittleren Staubkonzentrationen basierend auf mündlich mitgeteilten Messwerten sowie der vorliegenden Expositionsbedingungen abgeleitet.

Tabelle 10-9 enthält die Ergebnisse der Expositionsmodellierung für die Prozesslinie 1. Die zusätzliche effektive Dosis ergibt sich als Summe der Exposition bei der eigentlichen Arbeit. Nur für Beschäftigte auf der Reinigungsplattform kann das 1 mSv-Kriterium überschritten werden. Diese Beschäftigten tragen jedoch eine Staubmaske, so dass die tatsächliche Dosis unterhalb von 1 mSv/a liegen wird. Die Mitarbeiter des betrachteten Betriebes arbeiten nicht permanent in einem Prozessschritt, sondern wechseln innerhalb der Abteilungen.

Betrachtet man Rohstofflager und Versandlager als Dauerarbeitsplatz (2000 h Aufenthalt), so kann das 1 mSv Kriterium allein durch Direktstrahlung nicht erreicht werden.

Tabelle 10-9: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 1).

	Schmelze	Reinigungs- plattform	Brechanlage, Sieb, Kugel- mühle	Attritor- u. Drai- smühle, Zentri- fuge	Trockenofen, Deagglomera- tion
2,5 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 1, ZrO2 aus Schmelzprozessen)					
Direktstrahlung	0,001	0,294	0,028	0,007	0,070
Inhalation	0,026	0,854	0,028	0,028	0,071
Direktingestion	0,002	0,007	0,002	0,002	0,006
Summe [mSv/a]	0,03	1,16	0,06	0,04	0,15
0,7 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 2, chemisch hergestelltes ZrO2)					
Direktstrahlung	0,001	0,084	0,014	0,007	0,035
Inhalation	0,007	0,247	0,008	0,008	0,021
Direktingestion	0,001	0,004	0,001	0,001	0,004
Summe [mSv/a]	0,01	0,34	0,02	0,02	0,06

Tabelle 10-10 enthält die Ergebnisse der Expositionsmodellierung für die Prozesslinie 2. Die zusätzliche effektive Dosis ergibt sich als Summe der Exposition bei der eigentlichen Arbeit. Das 1 mSv-Kriterium kann nur für einen Beschäftigten im Mischraum überschritten werden, wenn er mehr als 880 Stunden dort arbeitet. Die Mitarbeiter des betrachteten Betriebes arbeiten nicht permanent in einem Prozessschritt, sondern wechseln innerhalb der Abteilungen.

Tabelle 10-10: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte bei der Herstellung von Zirkonoxid (Prozesslinie 2).

	Rohstofflager	Schmelze	Zerkleinerung	Mischraum
1,8 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 1, für Herstellung ZK24)				
Direktstrahlung	0,084	0,021	0,001	0,105
Inhalation	-	0,051	0,021	0,256
Direktingestion	-	0,005	0,002	0,005
Summe [mSv/a]	0,08	0,08	0,02	0,37
2,6 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 2, für Herstellung ZK40)				
Direktstrahlung	0,084	0,021	0,001	0,175
Inhalation	-	0,077	0,031	0,383
Direktingestion	-	0,013	0,005	0,013
Summe [mSv/a]	0,08	0,11	0,04	0,57

Die resultierenden Dosisbeiträge durch Arbeiten mit Reststoffen (Filterstäuben aus Schmelz- und Brechanlagen) variieren je nach Szenarienbedingungen bei Abfüllung, Filterwechsel und Kontrollgängen. Erst bei Tätigkeiten von mehr als 80 Stunden im Jahr kann das 1 mSv-Kriterium erreicht werden (Annahme Staubkonzentration 10 mg/m³).

10.4.2 Herstellung von Feuerfestmaterialien

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei einer Anlage zur Herstellung von Feuerfestmaterialien wurden im Juni 2017 gezielte Untersuchungen durchgeführt. Die Protokolle, Messdaten und Fotos dieser Untersuchungen sind in der Anlage 1-ZI-01 beigefügt.

Die Untersuchungen wurden in einem Unternehmen durchgeführt, das zirkonhaltige Mehle mit weiteren Zusätzen mischt und die Formgebung im Sinterverfahren durch Hochdruckpressen durchführt. In Tabelle 10-11 sind die Prozessschritte und die abgeleiteten Expositionspfade zusammengefasst. Zusätzlich wurde ein Beschäftigter im Lager betrachtet.

Tabelle 10-11: Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien.

Prozessschritt	Anlagenteile	Expositionspfade
Überwachung der Mahlanlage	Mahlanlage (Granulator)	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Überwachung der Pressanlage	Pressanlage	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Annahme, Entladen und Lagerung der Rohstoffe	Lager	Direktstrahlung

In Tabelle 10-12 sind Messwerte der Ortsdosisleistung aus dem Betrieb zusammengefasst. Für die Expositionsermittlung wurden die Messwerte direkt vom Arbeitsplatz bzw. für den Arbeitsplatz im Lager, die Messwerte von den Rohstoffen, zugrunde gelegt.

Tabelle 10-12: Messwerte der Ortsdosisleistung bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien.

Mahlanlage (Granulator)		Pressanlage		Lagerbestände	
an Arbeitsplätzen	0,15-0,36 µSv/h	an Arbeitsplätzen	0,105-0,14 µSv/h	Big Bag Al ₂ O ₃	0,13-0,20 µSv/h
Gebinde mit Produkt (Granulat)	0,68 µSv/h	fertiggestellte Teile (Düsen)	in 1 m: 0,19 µSv/h	Big Bag ZrO ₂ Bruch	1,3-1,4 µSv/h in 0,5 m: 0,56 µSv/h in 1 m: 0,36 µSv/h
Granulator (innen)	0,45 µSv/h			Big Bag ZrO ₂ 0-0,1	1,6 µSv/h in 0,5 m: 0,775 µSv/h in 1 m: 0,41 µSv/h
auf Zr-Mehl im Behälter	0,95 µSv/h			Big Bag Baddeleyit	1,5 µSv/h in 1 m: 0,36 µSv/h
Zr-Mehl (aus der Mühle)	0,711 µSv/h in 1 m: 0,26 µSv/h			Gebindestapel Baddeleyit	in 0,5 m: 0,80-0,93 µSv/h in 1 m: 0,53-0,68 µSv/h

In Tabelle 10-13 sind die spezifischen Aktivitäten der untersuchten Materialproben enthalten. Die beprobten Ausgangsmaterialien weisen erhöhte spezifische Aktivitäten auf. Die Probe Zr-Oxid Mahlanlage entspricht der eingesetzten Rohstoffmischung. Der Nuklidvektor findet sich auch im hergestellten Produkt wieder. Beim Sintern der Düsenstücke wird Pb-210 im Produkt abgereichert. Als Reststoff geht aus dem Produktionsprozess der Filterstaub (Granulierprozess) hervor. Sinterstäube fallen nicht an.

Tabelle 10-13: Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Herstellung von Feuerfestmaterialien in Bq/g.

Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
Z-99-100, Zr-Oxid synthetisch	2,32	1,39	0,22	0,17	0,85
Zr-Oxid Ausgangsmaterial Baddeleyit	5,31	7,07	4,22	0,22	0,31
Zr-Oxid Mahlanlage	3,08	3,84	1,86	0,16	0,23
Filterstaub Granulierprozess	4,32	3,49	0,54	0,26	0,37
Düsenstücke gebrannt	3,36	4,54	0,19	0,16	0,24
Düsenstücke nicht gebrannt	3,75	4,47	2,25	0,14	0,24

Die Dosismodellierung für die Herstellung von Feuerfestmaterialien befindet sich in Anlage 2-ZI-01. Um die strahlungsrelevanten Eigenschaften der Materialien zu berücksichtigen, wurde die Rohstoffmischung mit einer mittleren spezifischen Aktivität von 4,3 Bq/g U-238_{max}+Th-232_{max} betrachtet. Diese liegt im Bereich der Literaturwerte (siehe Kapitel 10.3).

Die mittleren Dosisleistungen und die Staubkonzentrationen für die Beschäftigten wurden basierend auf Messwerten abgeleitet zu:

- Mahlanlage (Granulator): 0,3 µSv/h und 1,2 mg/m³
- Pressanlage: 0,1 µSv/h und 0,7 mg/m³
- Lager: 0,7 µSv/h

Im Rahmen der regulären Arbeitsplatzüberwachung wurden im betreffenden Werk Staubkonzentrationen gemessenen:

- Anlage Granulator: 1,42 mg/m³ E-Staub; 0,58 mg/m³ A-Staub
- Anlage Siebstation: 0,75 mg/m³ E-Staub; 0,21 mg/m³ A-Staub

Die Größenordnung der in den durchgeführten Untersuchungen gemessenen Staubkonzentrationen stimmt überein. Allerdings konnte nicht genau zugeordnet werden, ob es sich bei den jew. Staubprobenahmen um vergleichbare Sammelzeiten und um dieselben Standorte handelte.

Tabelle 10-14 enthält die Ergebnisse der Expositionsmodellierung für Dauerarbeitsplätze in der Mahlanlage und der Pressanlage. Die zusätzliche effektive Dosis ergibt sich als Summe der Exposition bei der eigentlichen Arbeit. Für den Beschäftigte in der Mahlanlage kann bei einem Dauerarbeitsplatz das 1 mSv-Kriterium erreicht werden.

Tabelle 10-14: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigte bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien.

	Mahlanlage (Granulator)	Pressanlage	Lager
Direktstrahlung [mSv/a]	0,378	0,126	0,098
Inhalation [mSv/a]	0,559	0,326	0
Direktingestion [mSv/a]	0,072	0,072	0
Summe [mSv/a]	1,01	0,52	0,10

10.4.3 Recycling von Feuerfestmaterialien

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei einer Anlage zum Recycling von Feuerfestmaterialien wurden im September 2017 gezielte Untersuchungen durchgeführt. Die Protokolle, Messdaten und Fotos dieser Untersuchungen sind in der Anlage 1-ZI-03 beigefügt.

Die Untersuchungen wurden in einem Unternehmen durchgeführt, das auch zirkonhaltige Feuerfestmaterialien (AZS Aluminium-Zirkonium-Silikate) recycelt. In Tabelle 10-15 sind die Prozessschritte und die abgeleiteten Expositionspfade zusammengefasst.

Tabelle 10-15: Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade beim Recycling von Feuerfestmaterialien.

Prozessschritt	Anlagenteile	Expositionspfade
Überwachung der Mineralmühle	Mahlanlage	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Störungsbehebung in der Mineralmühle	Pressanlage	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Transport (Radlader)	Lagerplatz und diverse	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion

Tabelle 10-16 enthält in zusammengefasster Form die Messwerte der Ortsdosisleistung aus dem Betrieb. Für die Expositionsermittlung wurden die Messwerte direkt vom Arbeitsplatz bzw. für den Arbeitsplatz auf dem Lagerplatz, die Messwerte von Recyclingmaterialien, zugrunde gelegt.

Tabelle 10-16: Messwerte der Ortsdosisleistung beim Recycling von Feuerfestmaterialien.

Mineralmühle		Lagerplatz	
an Arbeitsplätzen	0,055-0,085 µSv/h	Haufwerk AZS R Z35 (Fe) haltig	1,4 µSv/h
nahe am Förderband	0,133-0,153 µSv/h	Haufwerk AZS R Z35 RG verglast	1,54-1,65 µSv/h
am Material	0,22-0,25 µSv/h		

In Tabelle 10-17 sind die spezifischen Aktivitäten der untersuchten Materialproben enthalten. Das Rohmaterial weist eine erhöhte spezifische Aktivität auf, die durch aufmahlen nicht zunimmt. Als Reststoff geht aus dem Prozess der Staub der Mahlanlage und der Staub der Abluftreinigung hervor. Diese Stäube weisen geringere spezifische Aktivitäten auf, die vermutlich auf Mischung mit anderen Stäuben (Recycling von nicht zirkonhaltigen Materialien) zurückzuführen ist.

Tabelle 10-17: Spezifischen Aktivitäten von Materialproben der Herstellung von Feuerfestmaterialien.

Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g
AZS-R Z30N4 Rohmaterial Mahlstufe 2	1,9	2,25	1,12	0,24	0,34
AZS-R Z30N4 < 1mm Produkt Mahlstufe 2	1,5	1,84	1,4	0,25	0,29
Staub Mahlanlage	0,49	0,69	0,57	0,12	0,16
Staub Abluftreinigung	0,11	0,17	< 0,45	0,07	0,05
Bärenschnitt	0,23	0,21	< 0,54	0,16	0,16

Die Dosismodellierung für das Recycling von Feuerfestmaterialien befindet sich in Anlage 2-ZI-03. Um die strahlungsrelevanten Eigenschaften der Materialien zu berücksichtigen, wurde das Rohstoffmaterial mit einer mittleren spezifischen Aktivität von 2,3 Bq/g U-238max+Th-232max betrachtet. Diese liegt im Bereich der Literaturwerte (siehe Kapitel 10.3). Wie sich aus den Messwerten der Ortsdosisleistung auf dem

Lagerplatz ableiten lässt, werden in diesem Betrieb auch Feuerfestmaterialien mit höheren spezifischen Aktivitäten recycelt. Diese Recyclingmaterialien wurden jedoch nicht in der betrachteten Kampagne verarbeitet.

Die mittleren Dosisleistungen und die Staubkonzentrationen für die Beschäftigten wurden basierend auf Messwerten abgeleitet zu:

- Überwachung Mineralmühle: 0,05 $\mu\text{Sv/h}$ und 10 mg/m^3 (der Messwert von 1 mg/m^3 wurde auf 10 mg/m^3 erhöht)
- Störungsbehebung Mineralmühle: 0,15 $\mu\text{Sv/h}$ und 10 mg/m^3 (der Messwert von 1 mg/m^3 wurde auf 10 mg/m^3 erhöht)
- Transport (Radlader): 0,4 $\mu\text{Sv/h}$ und 1 mg/m^3

Tabelle 10-18 enthält die Ergebnisse der Expositionsmodellierung für die Dauer von 3-4 Kampagnen, die jährlich zum Recycling von zirkonhaltigem Feuerfestmaterial durchgeführt werden. Die zusätzliche effektive Dosis ergibt sich als Summe der Exposition bei der eigentlichen Arbeit. Für den Beschäftigten in der Mineralmühle ist bei der derzeitigen Anzahl der Kampagnen das 1 mSv-Kriterium eingehalten, auch wenn Feuerfestmaterialien mit höheren spezifischen Aktivitäten (vgl. Anlage 1-ZI-03.1) recycelt werden.

Tabelle 10-18: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition für Beschäftigte beim Recycling von Feuerfestmaterialien.

	Überwachung Mineralmühle	Störungsbehebung Mineralmühle	Transport (Radlader)
Direktstrahlung [mSv/a]	0,003	0,002	0,028
Inhalation [mSv/a]	0,110	0,028	0,014
Direktgestion [mSv/a]	0,002	0,0004	0,002
Summe [mSv/a]	0,11	0,03	0,04

10.5 Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten

In der Feuerfestindustrie waren in Deutschland nach Angaben des VDFFI um das Jahr 2008 insgesamt 6500 Beschäftigte tätig (Grömling 2008). In 2017 waren als Mitglieder des VDFFI 31 Betriebe gelistet.

Die Herstellung von zirkonhaltigen Feuerfesterzeugnissen findet in den meisten Betrieben in Kampagnen statt, wobei einzelne Kampagnen auf eine Dauer von wenigen Wochen und die Handhabung der staubenden zirkonhaltigen Rohstoffe vermutlich auf wenige Tage im Jahr begrenzt werden kann (Müller 2017; Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015). Die durch die Handhabung der zirkonhaltigen Rohstoffe exponierten Beschäftigten gehören zum mit der Herstellung von feuerfesten Erzeugnissen beauftragten Personal und werden mit 3-10 Beschäftigten je Betrieb abgeschätzt. In der deutschen Feuerfestindustrie sind demnach voraussichtlich

100 bis 300

Beschäftigte NORM exponiert und es müssten arbeitsplatzbezogene Abschätzungen durchgeführt werden. Die Gruppe der Arbeitsplätze für welche die Jahresdosis von 1 mSv überschritten sein kann, ist für zwei untersuchte Betriebe mit jeweils einem Arbeitsplatz und für die gesamte Industrie schätzungsweise mit

10 bis 30

Beschäftigten anzugeben.

10.6 Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung

Weitere Einsatzbereiche von Zirkonmehlen sind die Herstellung von Glasuren in der Keramikherstellung für nichtindustrielle Einsatzzwecke wie z.B. Fliesen und Sanitäreinrichtungen sowie die Herstellung von Porzellan (Selby, J.H. in International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA 2008). Nach Untersuchungen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) wurden für unterschiedliche Arbeitsplätze in mehreren Betrieben effektive Dosen zwischen 0,006 – 0,803 mSv im Jahr abgeschätzt. In die Abschätzungen gehen einheitlich Staubkonzentrationen von 1 mg/m³ ein, was in Anbetracht der unterschiedlichen Arbeitsplatzbedingungen sicherlich nicht in Übereinstimmung mit den realen Staubkonzentrationen ist. Unter Berücksichtigung geringfügig höherer Staubkonzentrationen kann eine Überschreitung des 1 mSv im Kalenderjahr an Arbeitsplätzen der Keramikproduktion an sich nicht ausgeschlossen werden.

11 Handhabung von Schlämmen und Ablagerungen, die bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas, in der tiefen Geothermie und bei Reinigungstätigkeiten von Anlagen und Einrichtungen anfallen

11.1 Branchenspezifische Übersicht

11.1.1 Abgrenzung der zu betrachtenden Arbeitsplätze

Beim Betrieb von Anlagen der Erdöl- und Erdgasgewinnung sowie der Geothermie treten Ablagerungen an Anlagenteilen wie z.B. Rohren, Eruptionskreuzen, Ventilen und Wärmetauschern auf, die durch Mitfällung von Radionukliden aus den geförderten oder thermisch genutzten Fluiden entstehen. In Abscheideeinrichtungen und Filtern können sich Schlämme ansammeln, die erhöhte Radionuklidgehalte aufweisen können.

Die Wartungsarbeiten der in Deutschland vorhandenen Anlagen der tiefen Geothermie sind bereits im Tätigkeitsfeld „Betrieb und Wartung von Anlagen der Geothermie“ in Kapitel 6 dargestellt. Demnach erfolgt eine genauere Betrachtung in vorliegendem Tätigkeitsfeld nur unter Maßgabe der ergänzenden Aspekte der Handhabung von Ablagerungen und Schlämmen z.B. bei der Reinigung von Anlagenteilen durch externe Firmen.

Zum Tätigkeitsfeld zugehörig werden alle Arbeitsplätze verstanden, die in Anlagen der primären Gewinnung von Erdöl und Erdgas, der Aufbereitung von Erdöl und Erdgas (Raffinerien) Schlämme und Ablagerungen handhaben sowie Anlagen, die als Dienstleister für die vorgenannten Anlagen und Anlagen der Geothermie Schlämme und Ablagerungen zu Reinigungszwecken handhaben.

Nicht zum Tätigkeitfeld zählt die Entsorgung von Schlämmen durch thermische Behandlung, Verbrennung und die Entsorgung der mineralischen Rückstände z.B. auf Deponien.

11.1.2 Gewinnung und Aufbereitung von Erdöl- und Erdgas

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 7,8 Milliarden Kubikmeter Erdgas und 2,4 Millionen Tonnen Erdöl gefördert. Wie bereits in den vorherigen Jahren war die Erdgasproduktion rückläufig. Die Erdölproduktion wurde im Vergleich zum Vorjahr auf stabilem Niveau gehalten („Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)“ 2017). Regional betrachtet, ergeben sich die in Tabelle 11-1 aufgeführten Werte (LBEG 2017). In Niedersachsen wurden im Jahr 2016 8,1 Mio. m³ Erdgas und 0,080 Mio. t Erdöl gefördert. Daneben ist Schleswig-Holstein mit 1,3 Mio. t Erdölförderung zu nennen. Derzeit wird von vier großen Unternehmen in Deutschland Erdöl oder Erdgas gefördert. Je nach Zuordnung der Konsortien sind weitere Unternehmen vorhanden.

Tabelle 11-1: Erdöl- und Erdgasproduktion in Deutschland.

	Produktion Erdöl 2016 [Mio. t]	Produktion Erdgas 2016 [Mio. m ³]
Nordsee	0,002	0,043
Nördlich der Elbe	1,307	-
Oder/Neiße-Elbe	0,014	-
Elbe-Weser	0,110	3,738
Weser-Ems	0,193	4,651
Westlich der Ems	0,505	0,142
Oberrhheintal	0,187	-
Alpenvorland	0,037	0,013
Thüringer Becken	-	0,020
Summe Deutschland	2,355	8,608

Nach (Mineralöl Wirtschaftsverband e.V. 2016) gibt es derzeit 13 Raffinerien in Deutschland, die eine Rohölverarbeitungskapazität von 102 Mio. Tonnen im Jahr 2016 verarbeitet haben. Die unterschiedlichen Raffinerien führen nicht alle dieselben Aufbereitungsschritte durch. Insofern sind für die weitere Betrachtung nur diejenigen relevant, die Aufbereitungsschritte durchführen bei welchen es zu NORM-Ablagerungen kommen kann.

Die Raffinerien sind durch 9 Pipelines mit wichtigen Umschlagplätzen wie z.B. Häfen und den Nachbarländern vernetzt. Es ist davon auszugehen, dass in den Raffinerien überwiegend ausländische Rohstoffe verarbeitet werden, da die innerdeutsche Produktion nur einen geringen Bruchteil der verarbeiteten Gesamtkapazität beträgt (vgl. Tabelle 11-1). Beim Transport von Erdgas kann es durch das enthaltene Edelgas Radon (Pb-210, Po-210 als Tochternuklide) zu Abscheidungen an Oberflächen kommen (IAEA 2004b). Auch bei Gasfernleitungsnetzen, wo zum Schutz von Anlagen (Verdichter) an zentralen Stellen Filteranlagen installiert sind, werden Feststoffe aus dem Gasstrom entfernt, die Pb-210 und Po-210 enthalten können. Der Anfall an Produktionsschlämmen und abgelösten Scales variiert in Deutschland zwischen 70 und 250 t pro Jahr. Der Mittelwert der letzten 10 Jahre liegt bei 130 t pro Jahr („Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)“ 2017).

11.1.3 Geothermie

Die branchenspezifische Übersicht zur Geothermie ist in Kapitel 6.1 angegeben.

11.1.4 Handhabung von kontaminierten Schrotten

Die Gesamtmasse an Stahlschrotten mit anhaftenden Scales 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 Scales angefallen. Etwa 95 Prozent dieser Menge kann nach der Reinigung als nicht-kontaminierter Schrott

entsorgt werden. Ca. 90 Prozent des kontaminierten Stahlschrotts fällt in den Erdgasförderbetrieben an, ca. 10 Prozent in den Ölförderbetrieben. Schlämme und Scales fallen zu 98 Prozent bei der Gasproduktion an („Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)“ 2017).

Der Stahl wird i.d.R. im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes als Rohstoff wiedergewonnen. Die Radioaktivität des kontaminierten Stahlschrotts befindet sich im Scale. Die Dekontamination des Schrottes wird durch das Einschmelzen oder durch Reinigung erreicht. Beim Einschmelzen des Stahls gelangen die Scales in die Schlacke. Der eingeschmolzene, unbelastete Stahl wird stofflich verwertet. Die Schlacke wird in zugelassenen Deponien entsorgt. Darüber hinaus kann belasteter Stahlschrott, in Abhängigkeit von den Entsorgungswegen, auch direkt auf zugelassenen Deponien entsorgt werden, wenn z.B. aus technischen Gründen ein Einschmelzen nicht möglich ist („Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)“ 2017).

Aufgrund der Vorgaben der Metallrecyclingwirtschaft nur Schrotte anzunehmen, die frei von ionisierender Strahlung sind, wurden die Schrotte in der Vergangenheit überwiegend in einer Anlage in Deutschland eingeschmolzen. Diese Anlage wird jedoch im Jahr 2018 ersatzlos geschlossen. Insofern ist die Exposition von Beschäftigten an dieser Stelle nicht weiter zu betrachten.

Für die Entsorgung von NORM-Kontaminierten Schrotten auf Deponien wurden, sofern es sich um Rückstände im Sinne von Anlage XII Teil A StrlSchV handelte, in der Vergangenheit Entlassungsverfahren nach § 98 StrlSchV durchgeführt. Das Tätigkeitsfeld „Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände sowie Entfernung von radioaktiven Verunreinigungen von Grundstücken nach § 64 StrlSchG“ wird in Kapitel 12 behandelt.

11.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

11.2.1 Gewinnung von Erdöl- und Erdgas

Die primäre Gewinnung von Erdöl und Erdgas erfolgt durch Bohrungen auf Sondenplätzen. Die Verarbeitung der geförderten Rohstoffgemische erfolgt zumeist auf separaten Betriebsplätzen. Über Feldleitungen werden die Rohstoffgemische von den Sondenplätzen zu zentralen Plätzen geleitet, wo das Lagerstättenwasser abgetrennt und in die Lagerstätte zurückgeführt wird. Die geförderten Rohstoffgemische können durch das mitgeführte Lagerstättenwasser und die darin vorherrschenden chemischen Bedingungen zu NORM-Ablagerungen in diversen Anlagenteilen führen.

In Hinblick auf die Radioaktivität der NORM-Ablagerungen kann zwischen radiumdominierten und Pb-210-dominierten Ablagerungen unterschieden werden. Radiumdominierte Ablagerungen enthalten Ra-226 und Ra-228 als primär ausgefallene Radionuklide (s. BMU 2003). Sowohl radiumdominierte als auch Pb-210 dominierte Ablagerungen können in Rohgas- und Rohölproduktions- und Transporteinrichtungen und Lagerstättenwasser-Leitungen vorkommen. Eine eindeutige materialbezogene Zuordnung bzw. eine Zuordnung von Nuklidvektoren zu Förderfeldern ist nicht möglich. Bei der Erdölgewinnung treten im Allgemeinen eher radiumdominierte Ablagerungen, bei der Erdgasgewinnung eher Pb-210 dominierte Ablagerungen auf.

Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Ablagerungen nach (IAEA 2004b) ist in Tabelle 11-2 aufgeführt.

Tabelle 11-2: NORM-Materialien in Anlagen zur Gewinnung von Erdöl und Erdgas nach (IAEA 2004b).

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
Kondensate	Po-210	In Lösung	Gasproduktion
Erdgas	Rn-222 (Pb-210, Po-210 als Tochter nuklide)	Edelgas Abscheidungen an den Oberflächen (Filme oder Stäube)	Verbraucher, Gasaufbereitung, Speicher und Transport
Lagerstättenwasser	Ra-226, Ra-228, Ra-224 und /oder Pb-210	Meist hoch salin	Alle Produktionsanlagen, Disposalanlagen

Scales, die als festhaftende Ablagerungen in Rohren und Anlagenteilen der Erdöl- und Erdgas-Industrie anfallen, entstehen durch Ausfällungen und Ablagerungen sulfatischer Barium-/Strontium- Verbindungen oder von elementarem Blei aus Lagerstättenwasser. Scales kommen hauptsächlich in Anlagenteilen mit festen Inkrustationen vor. Sie sind häufig mit Schrott-Materialien z.B. ausgebauten Förderrohren, verbunden. Scalehaltige Reinigungsgemische, z.B. aus der Reinigung von Rohren, bestehen technologisch bedingt aus zerriebenen Scales und Wasser, aus Sandstrahlgut und Scales oder auch aus Schlamm-Scale-Gemischen.

Schlämme fallen in der Erdöl- und Erdgas-Industrie überwiegend als nicht verfestigte Ablagerungen in Anlagenteilen (z.B. Tanks, Behälter, Separatoren) an. Außerdem fallen schlammartige Rückstände aus unterschiedlichen Stufen des Aufbereitungs-, Reinigungs- und Produktionsprozesses der Erdöl- und Erdgasgewinnung an. Die Schlämme besitzen meist hohe Wasseranteile und signifikante Anteile an Kohlenwasserstoffen (Öl). Schlämme diverser Konstitution entstehen vor allem als Ergebnis der Mitförderung von Lagerstättenwasser, das gelöste und ungelöste Salze sowie Gesteinspartikel enthält. Sie setzen sich in Leitungen und Anlagenteilen, in denen dieses Lagerstättenwasser durchgeleitet oder aufgefangen wurde, ab. Bei der Abtrennung von wässrigen Komponenten in der Gasreinigung fallen ebenfalls schlammige Ablagerungen an.

In der Erdöl- und Erdgasgewinnungsindustrie kann es nach (BVEG 2010) bei folgenden Arbeiten zu einem Kontakt mit festen oder schlammigen Ablagerungen kommen:

- Ziehen von Steigrohren und Pumpgestängen an Gasförder- und an Ölförderbohrungen
- Obertägiges Handling der Steigrohre
- Umgang beim Abtransportieren der Steigrohre und Pumpgestänge vom Sonden- zum Betriebsplatz
- Transportieren der Steigrohre und Pumpgestänge zum Reinigungsbetrieb
- Befahren von Behältern sowie Reinigen dieser Behälter in Gas- und Ölförderbetrieben
- Arbeiten an Anlagen von Gas- und Ölförderbetrieben, (Rohrleitungen, Filter, Armaturen, kleine Behälter)
- Molchen
- Transportieren von Rückständen aus der Reinigung von Anlagenteilen

11.2.2 **Aufbereitung von Erdöl**

Die Radioaktivität von Rohölen ist lagerstättenabhängig. Das angelieferte Rohöl wird bereits an der Lagerstätte von Wasser und Sand gereinigt. In der Raffinerie wird das Rohöl in einem ersten Schritt entsalzen, indem unter Zusatz von Wasser eine Roherdöl-Wasser-Emulsion hergestellt wird. Das Salz löst sich in der wässrigen Phase dieser Emulsion. Die Emulsion wird dann in einem elektrostatischen Entsalzer wieder getrennt, wobei das Wasser mit den Salzen entsprechenden Aufbereitungsanlagen zugeführt wird und das entsalzte Rohöl weiter zur Destillation gepumpt wird. Dabei können sich Radionuklide im Entsalzer (Anreicherung in Schlämmen) und der angeschlossenen Abwasserreinigung ansammeln (DGMK 2004).

11.2.3 **Geothermie**

Eine systematische Charakterisierung der NORM-Ablagerungen und der Ursachen für die Mobilisierung von Radionukliden im Aquifer ist in (Degering, Köhler, und Friedrich 2009) gegeben. Darin wurden verschiedene Geothermiestandorte in Deutschland untersucht.

Die relevanten Informationen für Anlagen der tiefen Geothermie sind in Kapitel 6.2 zusammengestellt. Demnach fallen NORM-Kontaminationen überwiegend in Anlagen auf, die in den Formationen „Norddeutsches Becken“ und „Oberrheingraben“ liegen.

11.3 **Ausmaß und Abschätzung von Strahlenexpositionen an Arbeitsplätzen**

11.3.1 **Ablagerungen in Anlagen der Gewinnung von Erdöl- und Erdgas**

Die spezifischen Aktivitäten von Ablagerungen ergeben sich aus der Masse der aus der Lösung abgeschiedenen Salze und der darin mitgefällten 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 teilweise um das 5.000–50.000-fache verglichen mit dem Lagerstättenwasser angereichert (Gellermann 2011).

Nach (IAEA 2004b) liegt die spezifische Aktivität in Scales und Schlämmen zwischen 0,1 Bq/g und bis zu 15.000 Bq/g für die Radiumisotope. Im Allgemeinen sind weniger Radiumisotope in den Schlämmen als in den Scales enthalten. Im Gegensatz dazu ist Pb-210 weniger in Scales, dafür mehr in den Schlämmen (bis zu 1000 Bq/g) enthalten.

Inwiefern die Anlagen der Erdöl-Erdgasgewinnung von Ablagerungen radioaktiver Stoffe betroffen sind, richtet sich nach den Eigenschaften der Gesteinsschichten aus denen gefördert wird und nach dem Alter der Förderanlagen und der damit verbundenen Zunahme der Lagerstättenwassermenge. Für eine Überprüfung von Förderanlagen eignen sich Messungen der Gamma-Dosisleistung. In Tabelle 11-3 wurden im Rahmen von NCC Projekten durchgeführte Messungen der Gamma-Dosisleistung an Anlagen von insgesamt 1418 Lokationen im Hinblick auf den Kontaminationsstatus ausgewertet. Die Messungen wurden mit Dosisleistungsmessgeräten 6150 AD6/E mit Sonde 6150 AD-b/E (Hersteller: Automess) direkt im Kontakt zu den Anlagenteilen ausgeführt.

Bei der Auswertung wurde unterschieden, ob es sich um

- A) Anlagenkontaminationen in Form von festhaftenden Scales an inneren Oberflächen der Anlagen oder
- B) Sonstige Auffälligkeiten in Form von Betriebsmitteln und Abfällen

handelt. Nur etwa 16% aller überprüften Lokationen wiesen erhöhte Ortsdosisleistungen durch festhaftende radiumhaltige Ablagerungen in den Anlagenteilen auf, wovon nur in 7% der Lokationen (ca. 100) Dosisleistung >0,5 µSv/h gemessen wurden. Auf den übrigen Lokationen mit festhaftenden Anlagenkontaminationen (ca. 123) lagen die Messwerte unterhalb von 0,5 µSv/h.

Tabelle 11-3: Untersuchte Lokationen mit A) Anlagenkontaminationen oder B) sonstigen Auffälligkeiten.

		Lokationen (% Anteil)
A	Ohne Anlagekontaminationen	1195 (84%)
	Mit Anlagekontaminationen	223 (16%)
B	Ohne sonstige Auffälligkeiten	1354 (95%)
	Mit sonstigen Auffälligkeiten	64 (5%)

Sofern sich Beschäftigte für regelmäßige Kontrollgänge auf Sondenplätzen (ohne Öffnung von Anlagenteilen) aufhalten, lässt sich aus der Ortsdosisleistung und der Aufenthaltszeit unmittelbar auf die effektive Dosis schlussfolgern. Für einen Großteil der Anlagen in Deutschland (über 80%) kann eine relevante NORM-Kontamination und für einen noch größeren Teil der Anlagen (über 90%) die Möglichkeit einer relevanten Strahlenexposition der Beschäftigten bei regulären Kontrollgängen ausgeschlossen werden.

Bei Arbeiten an geöffneten Anlagen und Ausrüstungen ist zusätzlich die innere Exposition durch Inhalation von Staub und ggf. durch Radon zu betrachten.

Nach (IAEA 2004b) führt die Inhalation von radiumhaltigen Ablagerungen (5 µm AMAD) mit 10 Bq/g Ra-226 (inkl. Tochternuklide) und 10 Bq/g Ra-228, Ra-224 (inkl. Tochternuklide) zu einer effektiven Dosis von 0,1-1 mSv je Aufnahme von 1 g (in Anhängigkeit des aus Ra-228 nachwachsenden Radionuklides Th-228). Für 1 µm AMAD liegt die effektive Dosis noch um 25-30% höher.

Für Beschäftigte der Erdöl- und Erdgasindustrie gelten strikte Arbeitsschutzmaßnahmen aufgrund chemischer Gefährdungen (Kohlenwasserstoffe, Benzol, Quecksilber), so dass weitestgehend von einer Vermeidung der inneren Strahlenexposition auszugehen ist.

Ein aus Sicht des Strahlenschutzes nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Radonexposition. Befinden sich die radioaktiven Ablagerungen in geschlossenen Produktions-Systemen, kommt es zu erhöhten Radongaskonzentrationen in der Luft. Als Folge des Radonzerfalles kann es zu Pb-210(Po-210) Ablagerungen kommen (BVEG 2010).

Werden zur konservativen Abschätzung von Strahlenexpositionen die grob orientierenden spezifischen Kenngrößen nach Tabelle 2-3 verwendet (0,060 µSv/h per Bq/g für Scales, Schlämme), dann sind je Expositionspfad folgende spezifische Aktivitäten nötig, damit ein Beschäftigter eine effektive Dosis von 0,1 mSv innerhalb von 100 h Expositionszeit erhält:

- äußere Strahlenexposition: 22 Bq/g Ra-226 und 2 Bq/g Ra-228
- Inhalation von Staub: 90 Bq/g Ra-226 und 9 Bq/g Ra-228
- Direktinhalation: 130 Bq/g Ra-226 und 13 Bq/g Ra-226

Grundlagen dieser Abschätzungen sind:

- Umrechnungsfaktor für Umgebungsäquivalentdosis in effektive Dosis für Erwachsene von 0,7
- Staubkonzentration von 1 mg/m³ und Aufkonzentrierungsfaktor von 1
- Dosiskonversionskoeffizienten der Berechnungsgrundlage Bergbau
- Bodenaufnahmerate von 6 mg/h

Die Reinigung von mit radioaktiven Ablagerungen kontaminierten Anlagenteilen erfolgt in der Regel durch externe Dienstleister und nicht durch die Beschäftigten der Anlagenbetreiber.

11.3.2 Aufbereitung von Erdöl

Im Prozessablauf einer Raffinerie stellt der Entsalzer das relevanteste Anlagenteil, wo ggf. Radionuklide aus dem restlichen Lagerstättenwasser ausgefällt werden können. Messungen der Ortsdosisleistungen in einer im Rahmen eines NCC Projektes untersuchten Raffinerie ergaben keine Werte oberhalb des natürlichen Hintergrundes. Erhöhte Messwerte wären aufgrund der dicken Stahlwände der Anlagenteile auch erst bei hohen spezifischen Aktivitäten oder großen Mengen an Ablagerungen zu erwarten.

Eine Probe vom Bodensatz eines Rohöltanks einer Raffinerie wies eine spezifische Aktivität von 0,3 Bq/g Ra-226 und 0,1 Bq/g Ra-228 auf. Von den bei diversen Prozessschritten einer Raffination entstehenden Resten, wies eine Schlacke eines thermischen Spaltprozesses eine spezifische Aktivität von 0,2 Bq/g Ra-226 und 0,1 Bq/g Ra-228 auf. Der Filterstaub der Verbrennungsanlage zeigte eine Anreicherung des Radionuklides Pb-210, wie es für Filterstäube von Abgasreinigungsanlagen üblich ist.

Insgesamt ist für Schlämme und Ablagerungen aus der Aufbereitung von geringen spezifischen Aktivitäten auszugehen, aus denen keine relevante Erhöhung der Strahlenexposition für die Beschäftigten resultiert.

11.3.3 Ablagerungen in Anlagen der Geothermie

Die Scales in Geothermie Anlagen können Radiumisotope in Aktivitätskonzentrationen von 0,009-770 Bq/g Ra-226 und 0,008-430 Bq/g Ra-228 enthalten (Köhler, M. u. a. 2013). Diese treten in der Regel korreliert in Standortspezifischen Verhältnissen auf. In Pb-210 Ablagerungen wurden Aktivitätskonzentrationen von 0,013-5.500 Bq/g Pb-210 gemessen (Köhler, M. u. a. 2013).

Expositionsabschätzungen von Anlagen der tiefen Geothermie sind bereits in Kapitel 6.3.2 zusammengestellt. Das 1 mSv-Kriterium kann erreicht werden. Reinigungen der Produktionsbohrung erfolgen durch Fremdfirmen. In der in Kapitel 11.3.4 exemplarisch untersuchten Anlage werden auch NORM-kontaminierten Metallteilen aus der Geothermie gereinigt.

11.3.4 Ermittlung von Strahlenexpositionen in exemplarisch untersuchten Anlagen

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei Reinigungstätigkeiten an Anlagen der Erdöl-/Erdgas-Produktion wurden im November 2016 und Juli 2017 gezielte Untersuchungen durchgeführt. Die Protokolle, Messdaten und Fotos dieser Untersuchungen sind in Anlage 1-EE-01.1 bis Anlage 1-EE-01.3 beigefügt.

Die Untersuchungen wurden in einem Unternehmen durchgeführt, das die Reinigung von NORM-kontaminierten Steigrohren der Erdöl- und Erdgasindustrie durch Fräsen oder Sandstrahlen (Trockenverfahren) durchführt. Aufgrund der trockenen Arbeitsverfahren können in der Fräs- und Strahlanlage potentiell Stäube entstehen. Neben der Inhalation von Staub stellt auch die Direktstrahlung einen realistischen Expositions-pfad für die Beschäftigten dar. Für die exemplarische Untersuchung wurden daher die folgenden Arbeitsplätze ausgewählt:

- Anlagenbediener Fräshalle
- Anlagenbediener Strahlhalle

Als weitere Beschäftigte sind Maschinisten für Transportvorgänge von NORM-kontaminierten Materialien sowie Personen die ggf. ein Waschvorgang durchführen (sofern die angelieferten Rohre ölhaltig sind) zu nennen. Diese Beschäftigten haben jedoch kürzere Expositionszeiten.

Die untersuchte Anlage reinigt lediglich als Nebenaufgabe NORM-kontaminierte Rohre aus der Erdöl-/Erdgas-Produktion, so dass keine Dauerarbeitsplätze anzusetzen sind. Die Bearbeitung erfolgt in Kampagnen.

Aus den Prozessen können die in Tabelle 11-4 aufgeführten Expositionspfade für die Exposition von Beschäftigten abgeleitet werden.

Tabelle 11-4: Prozessschritte, Anlagenteile und Expositionspfade bei der Reinigung von Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie.

Prozessschritt	Anlagenteile	Expositionspfade
Waschen von öligen Rohren, Hochdruckreiniger	Waschplatz	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Fräsen	Fräshalle	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Innenstrahlung mit Abrasivmitteln	Strahlhalle	Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion
Transportvorgänge	Gesamtes Firmengelände	Direktstrahlung

Messwerte der Ortsdosisleistung können der Anlage 1-EE-01.1 und Anlage 1-EE-01.2 entnommen werden. NORM-kontaminierte Rohre aus der Erdöl/Erdgas-Produktion weisen sehr verschiedene Dosisleistungen auf, die auf unterschiedliche Radionuklidgehalte zurückzuführen sind. Auch die Mächtigkeit und die Verteilung der Ablagerungen im Inneren der Rohre (Abschirmung) ist zu beachten. Die maximalen Dosisleistungen treten bei den angesammelten Reinigungsrückständen auf.

Der Anlagenbediener der Fräse steht in der Regel am Steuerpult der Anlage. Nur wenn die im Staubfang befindlichen Fässer mit Reinigungsrückständen getauscht oder neue Rohre in die Fräsanlage eingeführt werden, befindet sich der Anlagenführer in Bereichen, die eine höhere ODL aufweisen. Als maximale Ortsdosisleistung wurden am Rohrstapel bis zu 10,4 µSv/h registriert, am Steuerpult der Fräsanlage wurden 0,6 µSv/h gemessen. Die Messwerte im NORM-Lagerraum waren zum Zeitpunkt der Untersuchung < 10µSv/h.

Tabelle 11-5: Luftstaub- und Langzeitstaubproben der Reinigung von Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie.

Material	U-238	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228
	mBq/m ³				
Luftstaub Fräsanlage	< 17,1	< 7,5	< 4,8	< 7,7	< 3,3
Luftstaub Strahlanlage 1	< 15,2	< 5,0	< 32,4	< 5,5	< 2,4
Luftstaub Strahlanlage 2	< 72,4	< 28,3	5425	< 29,1	< 11,8
	Bq/m ²				
Langzeitstaub Fräshalle *)	< 12,2	66,1	66,4	2,66	2,88
Langzeitstaub Strahlhalle *)	< 7,29	8,11	115	1,28	2,10

*) die Langzeitstaubproben wurden durch Abwischen mit einem Tuch entnommen.

In Tabelle 11-5 sind die spezifischen Aktivitäten der untersuchten Materialproben enthalten. Im Frässtaub und im Langzeitstaub aus der Fräshalle sind die typischen Radionuklide aus der Erdöl/Erdgas-Industrie wiederzufinden. Das Mutternuklid U-238 ist aufgrund der Entstehung der Ablagerungen aus radiumhaltigen Lagerstättenwasser nicht enthalten. Aus der Langzeitstaubprobe der Strahlhalle lässt sich die Bearbeitung von Pb-210 dominierten Rohren erkennen, die bei einer Nachmessung im Juli 2017 gezielt untersucht wurde (siehe unten).

In der Fräshalle und der Strahlhalle wurden in unmittelbarer Umgebung der Arbeitsplätze der Maschinenführer Luftstaubproben genommen. Bei der Wiederholungsmessung in der Strahlhalle im Juli 2017 wurden bei einem Strahlstaub mit 300 Bq/g Pb-210, im Luftstaub (Strahlanlage 2) 723 Bq/g Pb-210 gemessen. Daraus wurde ein Aufkonzentrierungsfaktor von 2 für die Strahlhalle abgeleitet.

Die Dosismodellierung für die Reinigung von NORM-kontaminierten Rohren mit einer mittleren spezifischen Aktivität der Ablagerungen von 100 Bq/g U-238max+Th-232max befindet sich in Anlage 2-EE-01. Um die strahlungsrelevanten Eigenschaften der Materialien zu berücksichtigen, wurden zwei Nuklidvektoren (radiumdominiert und Pb-210-dominiert) betrachtet. Als mittlere Dosisleistungen und mittlere Staubkonzentrationen, basierend auf Messwerten, wurden für die Prozessschritte abgeleitet:

- Fräshalle: 1,5 µSv/h (Material 1) bzw. 0,15 µSv/h (Material 2) und 0,14 mg/m³ Staub,
- Strahlhalle: 1 µSv/h (Material 1) bzw. 0,15 µSv/h (Material 2) und 3 mg/m³ Staub.

Tabelle 11-6 enthält die Ergebnisse der Expositionsmodellierung. Die zusätzliche effektive Dosis ergibt sich als Summe der Exposition bei der eigentlichen Arbeit. In dem betrachteten Betrieb werden die Prozessschritte von jeweils anderen Personen ausgeführt. Die Berechnungen zeigen, dass das 1 mSv-Kriterium auch bei relativ kurzen Aufenthaltszeiten überschritten wird, wenn keine Arbeitsschutzmaßnahmen (insbesondere Staubmasken) angewendet werden.

Tabelle 11-6: Zusätzliche potentielle Strahlenexposition [mSv/a] für Beschäftigte der Reinigung von Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie.

	Waschplatz	Fräshalle	Strahlhalle	Transportvorgänge
	100 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 1 radiumdominiert)			
Direktstrahlung	0,070	0,210	0,140	0,350
Inhalation	0,080	0,045	1,91	-
Direktingestion	0,020	0,080	0,080	-
Summe [mSv/a]	0,17	0,34	2,13	0,35
	100 Bq/g U-238max+Th-232max (Material 2 Pb-210 dominiert)			
Direktstrahlung	0,007	0,02	0,014	0,018
Inhalation	0,295	0,16	7,07	-
Direktingestion	0,050	0,201	0,201	-
Summe [mSv/a]	0,35	0,39	7,29	0,02

11.4 Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten

Die Zahl der Mitarbeiter der Mitgliedsunternehmen im Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e. V. (2016) lag im Jahr 2016 bei 8.655 („Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)“ 2017). Die Zahl der Beschäftigten, sowohl in Erdgas, Erdöl und Geothermie Betrieben, als auch in den Betrieben die Reinigungsarbeiten und Ölfeldservice durchführen, ist viel geringer. Die Anzahl der von NORM-Expositionen betroffenen Arbeitsplätze beträgt nach Schätzungen

100-300.

Davon sind nach den aus den durchgeführten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen nur ca.

10-30

Beschäftigte der Unternehmen die Reinigungsarbeiten ausführen von einer Exposition > 1 mSv/Kalenderjahr betroffen.

12 Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände sowie Entfernung von radioaktiven Verunreinigungen von Grundstücken nach § 64 StrlSchG

12.1 Branchenspezifische Übersicht

12.1.1 Abgrenzung

Im Zusammenhang mit industriellen Prozessen, bei denen Rückstände anfallen, findet in den allermeisten Fällen auch eine Lagerung der Rückstände auf dem Betriebsgelände bis zum Abtransport zur Entsorgung statt. Da es sich bei den überwachungsbedürftigen Rückständen um radioaktive Stoffe im Sinne des StrlSchG handelt, sind die Vorschriften der BImSchV oder des KrWG nicht anzuwenden. Das StrlSchG fordert aber im § 61 (4) unabhängig von den Ergebnissen einer Expositionsabschätzung nach § 55 (1) StrlSchG, jede Lagerung von überwachungsbedürftigen Rückständen bei der Behörde anzumelden. Mit dieser Information ist es der Behörde grundsätzlich möglich, eine Abschätzung der Strahlenexposition zu verlangen (§ 55 (2) StrlSchG).

Um die Strahlenexposition aus der Lagerung von überwachungsbedürftigen Rückständen abschätzen zu können, ist es nötig, dieses Tätigkeitsfeld hinreichend klar von den sonstigen betrieblichen Prozessen, die zum Anfallen der Rückstände führen, abzugrenzen. Sowohl das StrlSchG als auch das für Rückstände sachlich-inhaltlich angrenzende KrWG enthalten keine Definition des Begriffes. Im Anhang 4 BImSchV wird der Begriff Lagerung auf die Lagerung von Abfällen für länger als 1 Jahr (Langzeitlagerung) bezogen. Davon unterschieden wird die zeitweilige Lagerung (Zwischenlagerung), die weniger als 1 Jahr dauert.

Zwischenlager im Sinne der TA Abfall ist eine ortsfeste Abfallentsorgungsanlage, in der Abfälle entgegengekommen, vorbereitend behandelt, für die weitere Entsorgung zusammengestellt oder gelagert werden. Eine solche Anlage ist nach den Vorschriften des BImSchG und seiner untergesetzlichen Regelungen genehmigungsfrei, wenn sie eine Lagerkapazität von weniger als 30 Tonnen aufweist und die Abfälle für weniger als 1 Jahr gelagert werden.

Um in einer rechtsverpflichtenden Weise die Abschätzung von Strahlenexpositionen im Zusammenhang mit der Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände umsetzen zu können, ist daher eine Klärung des Begriffes für den Strahlenschutz nötig.

Für diese Untersuchung werden im Weiteren unter Lagerung die Prozesse verstanden, mit denen die Entsorgung von überwachungsbedürftigen Rückständen unmittelbar vorbereitet wird (Konditionierung und Verpackung) sowie das unbewegte Liegenlassen unverpackter Rückstandsmengen bzw. Stehenlassen von Gebinden mit verpackten Rückständen auf dem Betriebsgelände des Betriebes und das Verladen zur Beseitigung oder Verwertung an anderen Orten. Nur bei der vorbereitenden Behandlung der Rückstände und beim Verladen kommt es zu einer Handhabung der Materialien.

Radioaktive Verunreinigungen durch bergbauliche oder industrielle Rückstände auf Grundstücken können sowohl als Bodenkontaminationen, liegengebliebene Lagerbestände oder Kontaminationen von Gebäuden und Anlagenteilen vorkommen. Sie sind nach § 64 StrlSchG so zu entfernen, dass die Rückstände keine Einschränkung der Nutzung begründen. Maßstab für eine Grundstücksnutzung ohne Einschränkungen ist,

dass die Exposition, der Einzelpersonen der Bevölkerung durch die nicht entfernten Rückstände ausgesetzt sind, den Richtwert einer effektiven Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr nicht überschreitet. Die Expositionsabschätzung des § 55 StrlSchG bezieht sich allerdings nicht auf den Richtwert der effektiven Dosis bei späteren Nutzungen, sondern auf die Tätigkeit des Entferns der Verunreinigung.

12.1.2 Relevante Branchen

Wie bereits im Kapitel 2.1 erwähnt, sind in Bezug auf überwachungsbedürftiger Rückstände folgende Branchen von den Regelungen des StrlSchG betroffen:

- Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas
- Tiefengeothermie;
- Grundwasseraufbereitung
- Verarbeitung von Rohphosphat (Phosphorit);
- Aufbereitung oder Weiterverarbeitung von Konzentraten und Rückständen von Bauxit, Niob-Tantal-Erzen, Kupferschiefer-, Zinn-, Seltene-Erden- und Uranerzen,
- Roheisen- und Nichteisenmetallurgie.

Von diesen Branchen sind die Verarbeitung von Niob-Tantal-Erzen, die Tiefengeothermie sowie die Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas direkt als Tätigkeitsfelder benannt. Weitergehende Untersuchungen zu diesen Tätigkeitsfeldern sind in den Kapiteln 5, 6 und 11 enthalten.

Auch die Verwendung und Verarbeitung von Kupferschieferschlacken ist als Tätigkeitsfeld in Anlage 3 StrlSchG benannt. Eine Prüfung von derzeit anfallenden Schlacken der Kupfermetallurgie mittels Dosisleistungsmessung erbrachte keine Hinweise auf eine erhöhte Radioaktivität. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass nur die Kupferschieferschlacken des Mansfelder Reviers ggf. strahlenschutzseitig zu prüfen sind.

Die Mansfelder Kupferschieferschlacken wurden hauptsächlich im Straßen-, Wege und Landschaftsbau, teilweise auch im Wasserbau verwendet. Diese Verwendung ist aufgrund der seit 2001 geltenden strahlenschutzrechtlichen Anforderungen praktisch eingestellt worden. Bei einer Entfernung von solchen Schlackesteinen von Grundstücken bei Baumaßnahmen sind unter Bezug auf § 141 StrlSchG die Rückstandsregelungen anzuwenden. In diesem Zusammenhang könnte die (zeitweilige) Lagerung von Schlackesteinen ein zu prüfender Sachverhalt nach § 55 StrlSchG sein.

Nicht erfasst durch die Tätigkeitsfelder nach Anlage 3 StrlSchG sind die Verarbeitung von Bauxit, Zinnerz, Seltene-Erden-Erzen, Rohphosphat, die Aufbereitung von Grundwasser und die Eisen- und Nichteisenprimärmetallurgie. Eine Sonderrolle kommt dem Uranbergbau zu, dessen Stilllegung und Sanierung nach § 149 StrlSchG einer Genehmigung bedarf. Eine Prüfung des Anzeigedarfs im Sinne von § 55 StrlSchG ist daher nicht gegeben.

Eine großtechnische Verarbeitung von Bauxit findet derzeit in einem Werk in Niedersachsen statt. Dabei fällt als Rückstand Rotschlamm an, dessen Radioaktivität unter der allgemeinen Überwachungsgrenze liegt

(Gellermann u. a. 2007) und der auf einer betrieblichen Rotschlammhalde ortsnah beseitigt wird. Eine Lagerung des Rotschlammes vor der Entsorgung findet daher nicht statt.

Zinnerze und Selten-Erden-Erze werden derzeit in Deutschland nicht abgebaut. Die Erschließung von Lagerstätten im Erzgebirge (Zinn) und Nordsachsen (Seltene-Erden) wurde jedoch bereits öffentlich diskutiert. In naher Zukunft ist daraus allerdings kein Anfall überwachungsbedürftiger Rückstände zu erwarten.

Eine Weiterverarbeitung von Konzentraten der Zinnerzverarbeitung im Rahmen der Niob-Tantal-Metallurgie findet bei der Aufbereitung von Niob-Tantal-erzen statt (s. Kapitel 5).

In den pyrometallurgischen Prozessen können große Mengen an Stäuben anfallen (Gellermann u. a. 2007), die soweit sie nicht vor Ort beseitigt werden, bis zur Entsorgung gelagert werden müssen.

Bei der Grundwasseraufbereitung, nicht nur zur Trink- sondern auch zur Brauchwassergewinnung für industrielle Zwecke (z.B. Papierindustrie) werden benutzte Filterkiese, Filtersande- oder Ionenaustauscherharze bis zur Entsorgung ebenfalls gelagert.

Die Verarbeitung von Rohphosphat zur Düngerproduktion wurde in Deutschland Ende der 1990er Jahre praktisch eingestellt. Grundsätzlich kann ein Anfallen von Rückständen, insbesondere Phosphogips aus der Verarbeitung von Rohphosphat nicht ausgeschlossen werden. Radioaktive Ablagerungen mit spezifischen Aktivitäten von deutlich über 1 Bq/g sind vor allem in Anlagen zu erwarten, in denen Rohphosphate nasschemisch aufgeschlossen und verarbeitet werden (Reichelt 2005).

Die in der Anlage 1 Nr. 5 StrlSchG genannte „Gewinnung und Aufbereitung anderer Rohstoffe“ schließt bergbauliche Anlagen („Gewinnung“) und Anlagen, in denen bergbaulich gewonnene Rohstoffe in einem ersten Verarbeitungsschritt aufbereitet werden, ein. Durch den Bezug auf „Materialien, die den in Nummer 4 genannten Erzen entsprechen“ sind aber z.B. radiumhaltige aquagenetische Ablagerungen (M2-Materialien) oder Pb-210-haltige Stäube thermischer Prozesse (M5-Material) als beurteilungsrelevante Materialien in solchen Anlagen nicht zu berücksichtigen. Bergbauliche Prozesse, bei denen es in der Vergangenheit zu Ablagerungen von Nebengesteinen mit erhöhter natürlicher Radioaktivität kam, sind z.B. von Halden des Steinkohlenbergbaus in Oberfranken (Halde am Stollen St.-Katharina bei Stockheim“ (Reichelt, Wiegand, und Leopold 2005) oder Halden des Erzbergbaus im Schwarzwald (Reichelt u. a. 2007) bekannt. Bergbau, der aktuell zu solchen Ablagerungen führt, ist offensichtlich nicht bekannt. Die Abfrage bei den Länderbehörden (s. Kapitel 3.1) erbrachte keine diesbezüglichen Ergebnisse.

12.2 Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen

Die (unbewegte) Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände führt ggf. zu Strahlenexpositionen durch Direktstrahlung und soweit es sich um eine unverpackte (offene) Lagerung handelt, kann auch Inhalation von Staub zur Exposition beitragen. Bei der Lagerung von Ra-226-haltigen Rückständen (in Innenräumen) kann es außerdem zu Exposition durch Inhalation von Radon kommen.

Alle Handhabungen der Rückstände, darunter auch solche zur Entfernung radioaktiver Verunreinigungen von Grundstücken können auf allen im Kapitel 4 beschriebenen Expositionspfaden zur Strahlenexpositionen führen.

Aufgrund der typischen Materialeigenschaften (s. Tabelle 12-1) können für einzelne überwachungsbedürftige Rückstände die besonders zu beachtenden Expositionspfade bereits generisch klassifiziert werden. Eine entsprechende Aufstellung enthält Tabelle 12-2.

Tabelle 12-1: Rückstandsmaterialien und zugehörige Materialtypen.

Prozess	Rückstandsmaterial	Materialtyp
Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas	Schlämme	M2(Ra6)
	Ablagerungen („Scales“)	M2(Pb)
Tiefengeothermie		
Grundwasseraufbereitung	Kiese, Sande,	M2(Ra6)
	Harze	M6(U)
	Kornaktivkohle	M2(Ra6)
Verarbeitung von Rohphosphat (Phosphorit)	Phosphorgipse, Schlämme, Stäube, Schlacken*	M3 M2(Ra6) oder M3 (M5, M4)
Aufbereitung oder Weiterverarbeitung von Konzentraten und Rückständen von Niob-Tantal-Erzen, Kupferschiefer-, Zinn-, Seltene-Erden-Erzen	Nebengestein, Schlämme, Sande, Schlacken Stäube	M1(U) od. M1(Th) M1, M2 M4(U) od. M4(Th) M1(U), od. M1(Th) od. M5
Gewinnung und Aufbereitung anderer Rohstoffe	Nebengesteine	M1(U) od. M1(Th)
Roheisen- und Nichteisenmetallurgie.	Stäube,	M5
	Schlämme	M5

*) Stäube und Schlacken der thermischen P-Produktion fallen in Deutschland z.Z. nicht an.

Die Klassifikation der relevanten Expositionspfade in Tabelle 12-2 berücksichtigt die typischen Eigenschaften der jeweils benannten Form, in der die Materialien vorliegen. Wichtigster Expositionspfad bei einer Lagerung ist die Direktstrahlung.

Der Inhalationspfad kann entfallen, wenn die Rückstände in Gebinden verpackt vorliegen, die eine Staubbildung ausschließen (z.B. Fässer).

Der Expositionspfad Radon kann in der Regel bei der (ruhenden) Lagerung von Schlämmen außer Acht gelassen werden.

Tabelle 12-2: Klassifikation der Expositionspfade bei der Lagerung von überwachungsbedürftigen Rückständen mit den in Tabelle 12-1 genannten Rückstandsmaterialien (Legende: 1 – höchste Relevanz bis 4 – geringste Relevanz; (n.r.) – nicht relevant).

Materialtyp	Materialform	Direktstrahlung	Inhalation Staub	Inhalation Radon	Ingestion*
M1(U)	Nebengestein, Sande	1	2	3	4
M1(Th)	Schlämme	1	2	4	3
	Stäube	1	2	3	4
M2 (Ra6)	Schlämme	1	4	2	3
M2(Ra8)	Ablagerungen	1	2	3	4
	Kornaktivkohle	1	2	3	4
M2 (Pb)	Schlämme	3	2	4	1
	Ablagerungen	2	1	4	3
M3	P-Gips;	1	2	3	4
	P-Schlämme	1	3	4	2
M4(U); M4(Th)	Schlacken	1	2	3	4
M5	Stäube	3	1	(n.r.)	2
	Schlämme	3	2	(n.r.)	1
M6 (U)	Harze	1	(n.r.)	(n.r.)	4

*) nur bei einer aktiven Handhabung der Rückstände als Expositionspfad möglich.

Eine Ingestion kann nur bei einer aktiven Handhabung der Rückstände als Expositionspfad auftreten und hat daher keinen Bezug zur Dauer der Lagerung. Aufgrund der geringen Dosisrelevanz der Ingestion (s. Abbildung 2-2) ist es praktisch auszuschließen, dass die Ingestion, selbst bei Materialien, bei deren Handhabung sie die Exposition dominieren kann, zu Dosiswerten im Bereich von 1 mSv im Kalenderjahr führt.

Soweit sich durch die Lagerung (z.B. durch Abtrocknen von Schlämmen an den Oberflächen) oder eine Behandlung der Rückstände im Rahmen der Entsorgungsvorbereitung diese Eigenschaften verändern, sind bei Kenntnis der konkreten Fallbedingungen auch die Expositionspfade ggf. neu zu beurteilen.

12.3 Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen

Das Ausmaß der Strahlenexposition von Beschäftigten bei der Lagerung von überwachungsbedürftigen Rückständen wird in erster Linie bestimmt durch

- die Dauer des Aufenthaltes in expositionsrelevanten Umgebungen in Nähe der Lagerbestände,
- die Menge und spezifische Aktivität der gelagerten Rückstände sowie
- die tatsächlich wirksamen Expositionspfade.

Wie die Tabelle 12-2 zeigt, ist bereits die Vielfalt der möglichen Expositionspfade erheblich. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, die Strahlenexposition im Zusammenhang mit der Lagerung von überwachungsbedürftigen Rückständen für alle Fallbedingungen vorab zu beurteilen.

Als bekannt für eine Abschätzung der Strahlenexposition kann aber die spezifische Aktivität und Radionuklidzusammensetzung des überwachungsbedürftigen Rückstands vorausgesetzt werden, da diese Bestimmung für die Einstufung eines Materials als überwachungsbedürftiger Rückstand zwingende Voraussetzung ist. Davon ausgehend können mit den Kennziffern der Tabelle 2-3 und bezogen auf die in der StriSchV verwendete Summenaktivität U-238max + Th-232max Expositionen für Beschäftigte im Umfeld von Lagermengen abgeschätzt werden.

Für Rückstände, für die die äußere Strahlenexposition infolge von Direktstrahlung als wichtigster Expositionspfad ausgewiesen ist, kann mit den Dosiskoeffizienten für die Direktstrahlung großer und kleiner Materialmengen nach Tabelle 2-3 eine Abschätzung der Jahresdosis für Beschäftigte vorgenommen werden. Dazu sind in Tabelle 12-3 spezifische Summenaktivitäten berechnet, bei deren Überschreitung auch von einem Überschreiten der jeweils genannten Bezugsdosis von 0,3 mSv bzw. 1 mSv auszugehen ist. Die Szenarienannahmen wurden aus Tabelle 2-2 übernommen (jährliche Expositionszeit 400 Std. bei großen Mengen; 100 Std. + Staubreduktion 50% bei kleinen Mengen). Die in Tabelle 2-3 genannten „großen“ bzw. „kleinen“ Materialmengen werden unter Bezug auf deutsche Regelungen (s. Kapitel 12.1.1) auf eine maximale gelagerte Masse von 30 Tonnen bezogen.

In der Tabelle 12-3 sind keine Angaben für den Materialtyp M5 aufgeführt, da die diesbezüglichen Pb-210-haltigen Stäube oder Schlämme aus der Primärmetallurgie keine signifikante Gammastrahlung aufweisen.

U-beladene Ionenaustauscher aus der Grundwasseraufbereitung (M6(U)-Material) kommen nur in der Mengenkategorie „< 30 t“ vor. Sie können spezifische Aktivitäten von U-238 von 100–200 Bq/g enthalten und werden in Gebinden (Fässern) aufbewahrt. Messungen in Lagerräumen mit Fässern mit beladenen Ionenaustauschern (U-238-Aktivitäten ca. 70 Bq/g) ergaben Dosisleistungen von maximal 0,7 µSv/h (Projekterfahrung NCC). In Anbetracht der geringen Mengen ist bei einer gesicherten und zugangsbeschränkten Lagerung das Erreichen einer Dosis von 1 mSv aus der Lagerung praktisch auszuschließen.

Die Daten der Tabelle 12-3 zeigen, dass bei einer Lagerung großer Mengen überwachungsbedürftiger Rückstände spezifische Summenaktivitäten von mindestens 5 Bq/g vorliegen müssen, damit eine solche Lagerung bei einer für solche Lager realistischen Aufenthaltszeit von 400 Std. zu einer beruflichen Strahlenexposition durch äußere Strahlenexposition führt. Bei kleineren Lagermengen müssen deutlich höhere spezifische Aktivitäten vorliegen, damit ein Verdacht auf berufliche Expositionen allein durch äußere Strahlenexposition begründet ist.

Tabelle 12-3: Szenarienbezogene Dosiskoeffizienten für die äußere Strahlenexposition und daraus errechnete spezifische Summenaktivitäten von gelagertem Rückstandsmaterial, bei deren Überschreitung die Bezugsdosis von 0,3 mSv bzw. 1 mSv überschritten sein kann.

Materialtyp	Dosiskoeff. nach Tabelle 2-3 bezogen auf Radionuklid mit Maximalaktivität	Dosiskoeff. Bezogen auf Summenaktivität	Summenaktivität U-238max + Th-232max für eine Bezugsdosis	
			0,3 mSv	1 mSv
	µSv/h per Bq/g	µSv/h per Bq*/g	Bq*/g	Bq*/g
Materialmengen über 30 Tonnen				
M1(U)	0,425	0,39	1,9	6,4
M1(Th)		0,50 (+)	1,5	5,0
M2(Ra6)		0,40 (+)	1,9	6,3
M2(Ra8)		0,50 (+)	1,5	5,0
M2(Pb)		0,15 (+)	5,0	16,7
M3		0,40 (+)	1,9	6,3
M4(U)	0,82	0,48	1,6	5,2
M4(Th)		0,55	1,4	4,5
Materialmengen unter 30 Tonnen				
M1(U)	0,067	0,060	50	167
M1(Th)		0,075 (+)	40	133
M2(Ra6)	0,060 - 0,068	0,054 - 0,061	49 - 56	164 – 185
M2(Ra8)	0,081	0,062	48	161
M2(Pb)		0,020 (+)	150	500
M3	0,084	0,077	39	130
M4(U)		0,060 (+)	50	167
M4(Th)		0,075 (+)	40	133

*) Summe U-238max+Th-232max (+) aufgrund der allgemeinen Materialeigenschaften unter Verwendung von Nuklidvektoren von Muster-Materialtypen übertragen.

Da allerdings auch unter Lagerbedingungen eine Staubbildung nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, sind bei staubenden Rückständen auch Expositionsbeiträge durch Inhalation zu berücksichtigen. In Tabelle 12-4 sind daher unter Bezug auf die Szenarienannahmen nach Tabelle 2-3 und für die der Abbildung 4-1 zugrundeliegenden Muster-Nuklidvektoren die spezifischen Aktivitäten berechnet, die zu einer Inhalationsdosis von 0,3 mSv bzw. 1 mSv führen. Ein Anreicherungsfaktor für die Feinstaubfraktion wurde dabei nicht berücksichtigt.

Tabelle 12-4: Szenarienbezogene Dosiskoeffizienten von Muster-Materialtypen (bezogen auf die Summenaktivität U-238max+Th-232max) für die Inhalationsdosis und daraus errechnete spezifische Summenaktivitäten (U-238max+Th-232max) von gelagertem Rückstandsmaterial, bei deren Überschreitung die Bezugsdosis von 0,3 mSv bzw. 1 mSv überschritten sein kann.

Materialtyp	Dosiskoeffizient	Materialmenge über 30 t		Materialmenge unter 30 t	
		0,3 mSv	1 mSv	0,3 mSv	1 mSv
	$\mu\text{Sv/Bq}^*$	Bq^*/g	Bq^*/g	Bq^*/g	Bq^*/g
M1 (U)	49,7	2,5	8,4	10	34
M1 (Th)	48,5	2,6	8,6	10	34
M2 (Ra6)	11,4	11	37	44	146
M2 (Ra8)	25,4	4,9	16	20	66
M2(Pb0)	9,4	13	44	53	177
M3	48,0	2,6	8,7	10	35
M4 (U)	47,2	2,6	8,8	11	35
M4(Th)	48,0	2,6	8,7	10	35
M5	3,36	37	124	149	496

* Summe U-238max+Th-232max.

Unter Berücksichtigung der Relevanz der Expositionspfade nach Tabelle 12-2 wurden aus den in Tabelle 12-3 und Tabelle 12-4 aufgeführten Werten für die Bezugsdosis 1 mSv unter Anwendung der Summenformel Prüfwerte für die spezifische Aktivität von Lagerbeständen überwachungsbedürftiger Rückstände abgeleitet. Die in Tabelle 12-5 aufgeführten Werte wurden aus den Rechenwerten auf maximal 2 zählende Ziffern abgerundet.

Übersteigen (repräsentative) Messwerte an den entsprechenden Rückständen diesen Prüfwert, dann kann die Dosischwelle von 1 mSv/a überschritten sein. Sofern es allerdings bei Materialien der Materialtypen M1, M2, M3 und M4 bei Lagerung in Räumen mit wenig Luftaustausch durch Freisetzung von Radon zur Exposition durch Radon kommen kann, muss dieser Sachverhalt ggf. fallspezifisch beurteilt werden.

Bezüglich der Entfernung von Kontaminationen von Grundstücken kann auf der Grundlage der bei NCC vorliegenden Erfahrungen bei der Sanierung von Altlasten geschlussfolgert werden, dass diese Maßnahmen aufgrund der begrenzten Zeitdauer ihrer Durchführung bei üblichem Arbeitsschutz nicht zu Dosiswerten der Beschäftigten über 1 mSv führen. Sofern solche Arbeiten allerdings von externen Firmen ausgeführt werden, ist die Frage der kumulativen Jahresdosis zu beachten. Als Relevanzschwelle für solche kurzzeitigen Tätigkeiten könnten die in Tabelle 12-5 aufgeführten Prüfwerte herangezogen werden.

Tabelle 12-5: Prüfwerte zur Abschätzung der Relevanz der Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände.

Materialtyp	Materialform	Expositionspfad	Prüfwert Bq*/g (Summenaktivität)	
			Unter 30 t	Über 30 t
M1(U) M1(Th)	Nebengestein, Sande	D,S	20	3
	Schlämme	D,S		
	Stäube	D,S		
M2(Ra6) M2(Ra8)	Schlämme	D	160	5 (Ra8), 6 (Ra6)
	Ablagerungen	D,S	40 (Ra8)	4 (Ra8)
	Kornaktivkohle	D,S	70 (Ra6)	5 (Ra6)
M2(Pb)	Schlämme	(S)	(170)	(40)
	Ablagerungen	S,D	130	10
M3	P-Gips;	D,S	20	5
	P-Schlämme	D	130	6
M4(U); M4(Th)	Schlacken	D,S	20	3
M5	Stäube	S	490	120
	Schlämme	(S)	(490)	(120)

*) U-238,max + Th-232,max

12.4 Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten

Überwachungsbedürftige Rückstände im Sinne der Anlage 1 StrlSchG fallen in Deutschland in zahlreichen Betrieben an. In den früheren Untersuchungen (Gellermann, Schulz, und Küppers 2003), (Gellermann u. a. 2007) wurden die Mengen und Aktivitäten der bisher lt. StrlSchV geregelten Rückstände ausführlich beschrieben.

Legt man die in Tabelle 12-5 abgeleiteten Prüfwerte zugrunde, dann können folgende Industriebereiche bzw. Prozesse hinsichtlich möglicher strahlenschutzseitiger Relevanz der Rückstandslagerung ausgeschlossen werden:

- Rohphosphatverarbeitung: zu geringe spezifische Aktivität der Rückstände; derzeit keine Verarbeitung in Deutschland.
- Bauxitverarbeitung: zu geringe spezifische Aktivität der Rückstände (typischer Wertebereich unter 1 Bq/g; M3 Material).
- Primärverhüttung: zu geringe spezifische Aktivität der Rückstände (typischer Wertebereich unter 50 Bq/g, M5-Material).

Die Aufbereitung von Grundwasser führt zwar zu größerem Mengen an Rückstandsmaterialien, allerdings zumeist in kleinerem Mengen als 30 t und mit spezifischen Aktivitäten deutlich unter 10 Bq/g (Gellermann u. a. 2010). Nur für sehr wenige Materialien aus der Aufbereitung von Mineralwasser und aus Kurbädern sind Messwerte von Ra-226 und / oder Ra-228 bekannt, die in die Größenordnung von 50 Bq/g

Summenaktivität reichen. Von daher sind in der Wasserausbereitung kaum Arbeitsplätze im Zusammenhang mit der Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände zu erwarten, die zu beruflicher Strahlenexposition führen. Auf die Anmerkungen im Kapitel 12.5 ist hinzuweisen.

Daraus ergibt sich, dass nur in folgenden Bereichen mit Lagerbeständen zu rechnen ist, die nach einer konservativen Abschätzung zu einem genaueren Prüfungsbedarf der Expositionssituationen führen:

- Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas
- Geothermie
- Niob-Tantal-Industrie

Unter Bezug auf die in diesen Branchen insgesamt in den Tätigkeitsfeldern tätigen Personen, kann die Anzahl der ggf. zu prüfenden Arbeitsplätze mit

30 – 100

Und die der ggf. anzuzeigenden Tätigkeiten mit

ca. 10 – 30

abgeschätzt werden.

12.5 Ergänzende Erkenntnisse mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung

Durch die Definition eines eigenen Tätigkeitsfeldes für die Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände ist es nötig, Expositionen dieses Tätigkeitsfeldes separat von anderen betrieblichen Prozessen und deren Strahlenexpositionen abzuschätzen oder ggf. auch zu ermitteln. Da aber, wie gezeigt, sich zumindest in einigen Fällen, die Lagerung direkt an betriebliche Prozesse anschließt, die ebenfalls als Tätigkeiten eingestuft sind (Niob-Tantal Metallurgie, Erdöl-Erdgasgewinnung, Geothermie), führt eine solche getrennte Expositionsabschätzung bzw. -ermittlung ggf. zu Unterschätzungen der tatsächlichen Dosis von Personen, die aufgrund ihrer betrieblichen Aufgaben in beiden Tätigkeitsfeldern eingesetzt sind. Durch geeignete Vorschriften im untergesetzlichen Regelwerk sollte daher dafür gesorgt werden, dass in solchen Fällen die möglichen Dosen aller zu beachtenden Tätigkeitsfelder für einzelne Beschäftigte im Zusammenhang abgeschätzt oder ermittelt werden.

13 Ergänzende Erkenntnisse

Anzeigen nach § 55 StrISchG

Die Untersuchung zeigt, dass für die Beschäftigten in den in Anlage 3 StrISchG benannten Tätigkeitsfeldern eine allgemeine und konservative Abschätzung zu Ergebnissen führt, die die Schwelle der beruflichen Exposition von 1 mSv im Kalenderjahr teilweise deutlich überschreiten. Eine detailliertere Ermittlung der Expositionen, die auf konkreten Arbeitsprofilen einzelner Beschäftigter aufbaut, führt aber nur in wenigen Fällen zu Expositionen oberhalb der vorgenannten Schwelle. Von daher hängt die Zahl der nach § 56 StrISchG anzuzeigenden Tätigkeiten in hohem Maße davon ab, ob zwischen der Anforderung von § 56 (1) Satz 1: „Ergibt die Abschätzung, dass die Körperdosis einen der Werte für die Einstufung als beruflich exponierte Person überschreiten **kann**, so hat der zur Abschätzung Verpflichtete der zuständigen Behörde die Tätigkeit schriftlich anzuzeigen“ und der Forderung von § 56 (2) Nr. 1 b, nach der in einem der Anzeige beizufügenden Prüfbericht eines behördlich bestimmten Sachverständigen „die mögliche Körperdosis der beruflich exponierten Personen **bestimmt** ist“, eine Trennung möglich und vom Gesetzgeber gewollt ist.

Da die Umsetzung von § 55 (1) Satz 1 StrISchG, nach der der Verantwortliche für eine Tätigkeit nach Anlage 3 StrISchG vor Beginn der Tätigkeit eine auf den Arbeitsplatz bezogene Abschätzung der Körperdosis durchzuführen hat, für den Fall, dass nach dieser eigenen Abschätzung die Dosischwelle für alle Beschäftigte eingehalten wird, keine nachprüfbaren Belege verlangt, ist für diese erste Abschätzung weder eine methodische Grundlage anzuwenden noch ein Sachverständiger hinzuzuziehen. Es ist folglich zu erwarten, dass die Anzeige von den Betrieben sehr unterschiedlich gehandhabt wird und in hohem Maße dem subjektiven Ermessen der Verantwortlichen überlassen bleibt. Gleiches gilt für die Forderung von § 55 (1) Satz 2, nach der die Abschätzung unverzüglich zu wiederholen ist, wenn der Arbeitsplatz so verändert wird, dass eine höhere Exposition auftreten kann.

Anzeigen nach § 59 StrISchG

Tätigkeiten, die zu Expositionssituationen führen, die nach Maßstäben des StrISchG nicht außer Acht gelassen werden können, werden häufig von Mitarbeitern von Fremdfirmen ausgeführt, die von den betreffenden Unternehmen für Wartungs- und Reparaturarbeiten beauftragt werden. Solche Mitarbeiter erhalten aber bei einem einzelnen Einsatz nur in ungewöhnlichen Fällen eine Exposition von mehr als 1 mSv. Die Herausforderung für einen Strahlenschutz, der den Anforderungen des StrISchG gerecht werden soll, besteht darin, die Einzelexpositionen der Beschäftigten an verschiedenen Einsatzorten zu erfassen und zu sammeln.

Dafür ist eine auf kürzere Expositionszeiten bezogene Dosis als Erfassungsschwelle nötig. Eine solche Erfassungsschwelle sollte nicht über 10 µSv je Arbeitswoche liegen, da ansonsten kleinere Dosen zu stark außer Acht gelassen werden. Praktikabel könnte eine Dosis von 5 µSv je Arbeitswoche sein.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass

- Beschäftigte deutscher Unternehmen auch in den in Anlage 3 genannten Arbeitsfeldern im (europäischen) Ausland tätig sein können und zu klären ist, ob auch dort die Pflichten des deutschen StrlSchG anzuwenden sind,
- Fremdfirmen über unterschiedliche Verträge auch Beschäftigte aus anderen europäischen Ländern einsetzen können,
- Expositionen durch die im StrlSchG explizit genannten oder über die Definition der Tätigkeit (vor allem „Wartungsarbeiten“) implizit umschriebenen Materialien auch bei Arbeiten vorkommen können, die nicht auf der Positivliste der Anlage 3 stehen.

Referenzpersonen für die Ermittlung von Expositionen

Die als Basis von Expositionsmodellierungen nötige Zuordnung von Personen zu den Referenzpersonen „Personen der Bevölkerung“ oder „Beschäftigte“ wird nicht einheitlich gehandhabt. So wurden in (GRS 2014) „Personen, die berufliche Arbeiten im Zusammenhang mit der Errichtung, dem Betrieb, der Wartung, der Instandsetzung oder der Stilllegung von Anlagen der geothermalen Energie-nutzung durchführen, ohne dass diese Tätigkeiten oder Arbeiten der Überwachung (Jahresdosen $< 6 \text{ mSv/a}$) unterliegen“, als Referenzperson „Erwachsener“ („ $> 17 \text{ a}$ “) betrachtet und modelliert. Für die von diesen Personen ausgeführten Arbeiten wurde eine Zeit von maximal 2.000 Stunden pro Jahr zugelassen.

Ähnliche Modellansätze wurden auch von NCC in diversen Gutachten realisiert.

Es ist aber andererseits schwer vermittelbar, dass nur dann Personen als „Beschäftigte“ modelliert werden, wenn sie eine Dosis erhalten (können), die für eine Referenzperson „Bevölkerung / Erwachsener“ den Schwellenwert für berufliche Exposition von 1 mSv im Kalenderjahr übersteigt (und im Grenzfall danach evtl. sogar wieder unter 1 mSv liegt). Die Betrachtung einer Person in einer beruflichen Expositionssituation als Person der Bevölkerung führt auch zu Konflikten mit der Begrenzung der Strahlenexposition für Personen der Bevölkerung, die nach § 80 StrlSchG die Exposition aus allen genehmigungs- oder anzeigebedürftigen Tätigkeiten einschließen soll. Ohne eine klare Trennung von beruflichen Expositionen und Expositionen der Bevölkerung wäre es nötig, die unter einer Schwelle von 1 mSv im Kalenderjahr liegenden Expositionen als Vorbelastung von Einzelpersonen der Bevölkerung zu betrachten, woraus sich Implikationen für die Einhaltung des Grenzwertes ergeben, die erheblich sein können.

Muttermilchpfad

Die Frage, ob bzw. bei welchen Tätigkeiten der Muttermilchpfad bei der Dosisabschätzung oder Dosisermittlung berücksichtigt werden soll, bedarf der Klärung (s. Kapitel 2.4).

14 Zusammenfassung

Zur Umsetzung der Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 ist es erforderlich, berufliche Strahlenexpositionen aus industriellen Tätigkeiten mit natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien (NORM) zu berücksichtigen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollten Kenntnisse über die zu erwartenden Strahlenexpositionen an Arbeitsplätzen mit NORM vervollständigt werden. Für die folgenden Tätigkeitsfelder waren Arbeitsplätze auf dem Gebiet der Bundesrepublik zu identifizieren und entsprechend dem Profil der durchgeführten Arbeiten zu klassifizieren.

- NT Aufbereitung von Niob/Tantal-erzen einschließlich der Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Polychlorerzen.
- GT Betrieb und Wartung von Anlagen der tiefen Geothermie.
- CA Verwendung von Thorium und Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide (sofern vorhanden) zu chemisch-analytischen oder zu chemisch präparativen Zwecken.
- HA Handhabung, insbesondere Montage, Demontage, Bearbeiten und Untersuchen von Produkten aus thorierten Legierungen.
- WK Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken.
- ZI Verarbeitung von zirkonhaltigen Stoffen bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe.
- EE Handhabung von Schlämmen und Ablagerungen, die bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas, in der tiefen Geothermie und bei Reinigungstätigkeiten von Anlagen und Einrichtungen anfallen.
- ÜR Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände sowie Entfernung von radioaktiven Verunreinigungen von Grundstücken nach § 64 StrlSchG.

Als Grundlage der Bewertung sollten für diese Arbeitsplätze

- mögliche Expositionspfade durch natürliche Strahlenquellen,
- das Ausmaß der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen für diese Expositionspfade und
- die Anzahl der von den verschiedenen Expositionspfaden betroffenen Beschäftigten

ermittelt werden. Soweit im Rahmen der Untersuchung weitere Tätigkeitsfelder mit strahlenschutzfachlicher Bedeutung erkannt wurden, waren diese zu benennen.

Die Untersuchungen wurden zum einen anhand von Recherchen in den zuständigen Behörden der Bundesländer und bei Industrieverbänden und Einzelbetrieben, zum anderen durch gezielte Untersuchungen in ausgewählten Betrieben, eine Auswertung von den bei NCC vorliegenden Projekterfahrungen sowie einer ergänzenden Daten- und Literaturrecherche ausgeführt.

Im Ergebnis der Untersuchung wurde für alle der zu untersuchenden industriellen Tätigkeiten eine Anzahl von Personen abgeschätzt, für die eine Abschätzung der Strahlenexposition gemäß § 55 StrlSchG

durchzuführen wäre. Auf der Grundlage der jeweiligen Arbeitsprofile, der Charakteristika der NORM als Strahlenquelle und der relevanten Expositionspfade wurden dazu mit konservativen Annahmen geprüft, inwieweit eine Überschreitung der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr auftreten kann. Mittels stärker realistischer Modellierungen und mit exemplarischen Untersuchungen wurde eingegrenzt, inwieweit bei den zu bewertenden Tätigkeiten tatsächlich mit beruflichen Strahlenexpositionen zu rechnen ist. Alle diese Abschätzungen und Modellierungen wurden anhand vorhandener methodischen Grundlagen (BglBb, Richtlinie Arbeiten, IAEA-Standards, Veröffentlichungen der Europäischen Kommission) bearbeitet, wobei Festlegungen von den jeweiligen szenarienbezogenen Modellparametern im Ermessen der Bearbeiter festgelegt werden mussten, da das hierzu nötige Regelwerk für diese Tätigkeitsfelder noch nicht ausgearbeitet ist. Aus diesem Sachverhalt ergeben sich Unsicherheiten sowohl im Hinblick auf die modellierten Expositionen als auch im Hinblick auf die damit abgeschätzten Anzahlen von betroffenen Beschäftigten. Um diese Unsicherheit Rechnung zu tragen, sind die in Tabelle 14-1 aufgeführten Anzahlen der Beschäftigten in den jeweiligen Tätigkeitsfeldern in logarithmisch unterteilten Klassen angegeben. Die Anzahlen der Tabelle 14-1 verstehen sich als Beschäftigtenzahlen. Da insbesondere bei Schichtarbeit mehrere Beschäftigte an einem Arbeitsplatz tätig sind, sind die Zahlen der ggf. zu prüfenden Arbeitsplätze tendenziell kleiner als die Beschäftigten.

Tabelle 14-1: Zusammenstellung der geschätzten Anzahl der Beschäftigten in Deutschland, für die eine Strahlenexposition nach § 55 StrlSchG zu prüfen ist und die, für die eine Anzeige nach § 56 StrlSchG möglich sein kann.

Tätigkeitsfeld (Kürzel)	Anzahl der ggf. zu prüfenden Arbeitsplätze	Anzahl der zu Erwartenden Arbeitsplätze > 1 mSv / Kalenderjahr
NT	30-100	3-10
GT	30-100	3-10
CA	0	0
CA (+)	30-100	10-30
HA	10-30	3-10
WK	30-100	3-10
ZI	30-100	10-30
EE	100-300	10-30
ÜR	30-100	3-10

(+) Unter diesem Tätigkeitsfeld wird die Herstellung von thorierten Legierungen durch Zusatz radioaktiver Stoffe (Thorium) im Sinne einer „präparativen“ Tätigkeit verstanden.

Für das Tätigkeitsfeld „Verwendung von Thorium und Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide (sofern vorhanden) zu chemisch-analytischen oder zu chemisch präparativen Zwecken“ ergab die Untersuchung, dass Tätigkeiten, die diesem Tätigkeitsfeld im engeren Sinne zuzurechnen sind, bei den derzeit in Deutschland praktizierten Anwendungen selbst bei konservativer Abschätzung von Dosen keine Anhaltspunkte erkennen lassen, dass es hierbei (aufgrund dieser Tätigkeit) zu Strahlenexpositionen in der Größenordnung von 1 mSv/a kommt. Nur wenn der Zusatz von Thorium bei der Herstellung von thorierten Legierungen als „präparative Verwendung“ angesehen wird, sind diesem Tätigkeitsfeld Arbeiten zuzuordnen, die einen Strahlenschutz erfordern.

Das Tätigkeitsfeld „Verwendung von Thorium und Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide (sofern vorhanden) zu chemisch-analytischen oder zu chemisch präparativen Zwecken“ sollte daher möglichst neu formuliert werden, um unnötige Abschätzungen von Strahlenexpositionen in chemischen Labors und Kliniken zu vermeiden.

Im Ergebnis unserer Untersuchungen müssen wir feststellen, dass die in § 55 StrlSchG formulierte gesetzliche Anforderung an einen (nicht fachkundigen) Verpflichteten, eine Dosisabschätzung vorzunehmen, zu erheblichen Unsicherheiten bei der Umsetzung führt. Die nicht unmittelbar messbare Größe effektive Dosis ist zu komplex und kann für die Tätigkeitsfelder nicht auf die Überwachung der äußeren Strahlenexposition mit Filmdosimeter reduziert werden. Es wäre daher für eine praktikable Umsetzung deutlich vorteilhafter, wenn für jedes der zu regelnden Tätigkeitsfelder ähnlich wie auch sonst im Strahlenschutz verwendet, Freigrenzen für NORM sowohl hinsichtlich der spezifischen (Summen-)Aktivität als auch der dazu gehörenden Gesamtaktivität festgelegt werden, bei deren Überschreitung eine fachkundige Person eine Ermittlung der Strahlenexposition vorzunehmen hat.

15 Literaturverzeichnis, Quellennachweis

- Al-Masri, Mohammad, Kh Haddad, A.W. Doubal, I Awad, und Y Al-Khatib. 2014. „Assessment of soil contamination by Po-210 and Pb-210 around heavy oil and natural gas fired power plants“. *Journal of environmental radioactivity* 132C (März):89–93. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.018>.
- Arthur, D. 2017. „Thoriumhaltige Titanlegierungen“, 9. November 2017.
- BAFA. 2014. „Einfuhr und Ausfuhr von Kernbrennstoffen und Ausgangsstoffen 01.01.2012 - 30.04.2014“. http://umweltfairaendern.de/wp-content/uploads/2014/07/03-BAFA_Tabelle-zu-Frage1.pdf.
- Barthel, R., W. Goldammer, W. Hake, und E. Kugler. 2000. „Eingrenzung und Bewertung der von den vorgesehenen NORM-Regelungen der Novelle der StrlSchV betroffenen Bereiche“. 9410/2. Aachen.
- Bauinformant. 2017. „Kompendium Zement und Beton | Bauinformant bloggt Beton“. 2017. <https://bauinformant.wordpress.com/2009/08/09/kompendium-zement-und-beton/>.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. 2015. „Untersuchungen von natürlichen radioaktiven Materialien (NORM)“. UmweltSpezial. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Beck, T., und E. Ettenhuber. 2006. „Überwachung von Strahlenexpositionen bei Arbeiten Leitfaden für die Umsetzung der Regelungen nach Teil 3 Kapitel 1 und 2 der StrlSchV“. BfS-SW-03/06, ISSN 1611-8723. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz.
- Becker, Dietrich E., Otto Mugrauer, und K.-H. Lehmann. 1994. *Strahlenexposition durch den Umgang mit Reststoffen aus der Kohleverbrennung*. Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BfS. 2010. „Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen – Bergbau), urn:nbn:de:0221-20100329966“. BfS-SW-07/10. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz. https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-20100329966/3/BfS_2010_SW_07_10_Bergbau.pdf.
- BG BAU. 2017. „Staubexposition an Arbeitsplätzen“, 24. Oktober 2017.
- BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg. 2016. *Deutschland - Rohstoffsituation 2015*. Hannover.
- BMU. 2001. „Begründung zur Novelle der StrlSchV aus dem Jahr 2001“, 2001. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/strlsv_novelle_2001_begrueendung.pdf.
- . 2003. „Anlage zum RdSchr. vom 15.12.2003 – RS II 3 - 15506/9 – Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 Strahlenschutzverordnung vom 15. Dezember 2003“, 15. Dezember 2003. https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/rsh/3-bmub/3_82.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- . 2007. „Anlage zum RdSchr. vom 12.1.2007 – RS II 3 - 15530/1 – Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis Teil 2: Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Inkorporationsüberwachung) (§§ 40, 41 und 42 StrlSchV) vom 12. Januar 2007; Anhang 7.3“, 12. Januar 2007.

- Brasser, Thomas, Remi Cannepin, Sebastian Feige, Gerd Frieling, Horst-Jürgen Herbert, Christoffer Heinen, Christian Strack, und Christoph Vieten. 2014. „Systemanalyse der geothermalen Energieerzeugung. Teil B. Ausführliche Ergebnisdokumentation“. GRS-316 (Teil B). GRS gGmbH.
- Brenk Systemplanung GmbH. 2004. „Fortentwicklung des radiologischen Modells für die Berechnung von Freigabewerten für die Freigabe zur Beseitigung“. BS-Nr. 0107-01. Aachen.
- Brunk, F. 2012. „Feuerfeste Zirkon-Erzeugnisse“. gehalten auf der DERA-Rohstoffdialog, Berlin, Dezember 11. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/RD_zr_brunk.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 2015. „Energiestudie 2015 - Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen“. Hannover. http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- Bundesrat Schweiz. o. J. *Schweizer Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (Stand am 28. Dezember 2001)*.
- „Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)“. 2017. 2017. <http://www.bveg.de/>.
- Bundesverband Geothermie. 2016. „Hintergrundpapier zum Umgang mit natürlicher Radioaktivität in Anlagen der Tiefen Geothermie“. http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/Hintergrundpapier_NORM_Radioaktivitaet-Tiefengeothermie.pdf.
- . 2017. „Projektliste_Tiefe_Geothermie_2017.pdf“. Tiefe Geothermieprojekte in Deutschland. 31. August 2017. http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/wissenswelt/Projekte/Projektliste_Tiefe_Geothermie_2017.pdf.
- „Bundesverband Geothermie: Einstieg in die Geothermie“. 2017. 2017. <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/einstieg-in-die-geothermie.html>.
- „Bundesverband Geothermie: In Deutschland“. 2017. 2017. <http://www.geothermie.de/wissenswelt/geothermie/in-deutschland.html>.
- BVEG. 2010. „Technische Regel für Arbeiten mit natürlicher Radioaktivität“. Hannover: Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie (BVEG). <http://www.bveg.de/content/download/10239/117891/file/BVEG%20Technische%20Regel%20f%C3%BCr%20Arbeiten%20mit%20nat%C3%BCrlicher%20Radioaktivit%C3%A4t.pdf>.
- Degering, D., M. Köhler, und H.-J. Friedrich. 2009. „Verbundvorhaben: Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen, Teilprojekt: Mobilisierung und Ablagerungsprozesse natürlicher Radionuklide : Schlussbericht ; Hauptteil, Teil 1: Radioaktivität“. <https://doi.org/10.2314/GBV:617432031>.
- Der Rat der Europäischen Union. 2013. *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. – Der Rat der Europäischen Union, veröffentlicht am 17.01.2014*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&rid=1>.

- Deutscher Bundestag. 2001a. *Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 der Verordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010) geändert worden ist.*
- . 2001b. *Dosiskoeffizienten bei innerer beruflicher Strahlenexposition (Beilage 160 a und b zum Bundesanzeiger vom 28. August 2001).* <http://www.bfe.bund.de/DE/bfe/gesetze-regelungen/dosiskoeffizienten/dosiskoeffizienten.html>.
- DGMK. 2004. „Information Radioaktivität in Rohölen“. 23/04. Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
- Eckerman, Keith F., und Jeffrey C. Ryman. 1993. „EXTERNAL EXPOSURE TO RADIONUCLIDES IN AIR, WATER, AND SOIL“. No. 12. FEDERAL GUIDANCE REPORT No 12. EPA.
- EnergieAgentur.NRW. 2017. „Grubenwassernutzung Schacht Auguste Victoria in Marl - Netzwerk Geothermie NRW - EnergieAgentur.NRW“. 2017. <http://www.energieagentur.nrw/geothermie/netzwerk-geothermie/grubenwassernutzung-schacht-auguste-victoria-in-marl>.
- European Commission. 1999a. *Establishment of Reference Levels for Regulatory Control of Workplaces Where Materials Are Processed Which Contain Enhanced Levels of Naturally Occurring Radionuclides*. Bd. 107. Radiation Protection. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- . , Hrsg. 1999b. *Reference Levels for Workplaces Processing Materials with Enhanced Levels of Naturally Occurring Radionuclides: A Guide to Assist Implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) Concerning Natural Radiation Sources*. Bd. 95. Radiation Protection. Luxembourg: Off. for Official Publ. of the Europ. Communities.
- Flues, Marlene, Ira M.C. Camargo, Paulo M. Figueiredo, Paulo S.C. Silva, und Barbara P. Mazilli. 2005. „RADIONUCLIDES CONCENTRATION IN COAL USED IN BRAZILIAN POWER PLANTS“. In . Santos, SP.
- Gellermann, Rainer. 2008. „Phenomenological Model of TENORM Formation in Industrial Processes“. *Kern-technik* 73 (3):90–96. <https://doi.org/10.3139/124.100548>.
- . 2011. „Anreicherung natürlich radioaktiver Materialien in Rohrleitungen und Anlagen der Erdöl- und Erdgasindustrie“. Seminarvortrag gehalten auf der Aktuelle Fragen der Durchstrahlungsprüfung und des Strahlenschutzes, Dortmund, September 15. <http://www.dgzfp.de/Portals/ds11/BB/CD/v07.pdf>.
- Gellermann, Rainer, P. Günther, und B. Evers. 2012. „Beurteilung von Bodenkontaminationen mit Radioaktivität im Gebiet Hannover-List nach Maßstäben und Ansätzen der BBodSchV“. *Altlastenspektrum*, Nr. 1/2012 (Februar):13–18.
- Gellermann, Rainer, C. Reifenhäuser, Elisabeth Albrecht, P. Franke, Eiko Hermann, Hartmut Schulz, und Frank Ulrich. 2010. „Über die radiologische Relevanz von Rückständen aus Wasserförderung, Wassergewinnung und Wasserbehandlung in Deutschland“. In *Natürliche und künstliche Radionuklide in unserer Umwelt*. (Herausg.: A. Neu, A. Bayer, Th. Steinkopff), 119–26. Köln: TÜV Media.
- Gellermann, Rainer, Astrid Schellenberger, Dietmar Weiß, Alexandra Müller, und Hartmut Schulz. 2007. „Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs. (Bericht I) Teil B: Erweiterung

- des Anwendungsbereichs auf NORM-Rückstände“. BMU-2007-697. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs697_01.pdf.
- Gellermann, Rainer, Hartmut Schulz, und Christian Küppers. 2003. „Mengenaufkommen an NORM-Rückständen für das deutsche Entsorgungskonzept“. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz. https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/berichte/ion/Endbericht-SR2416.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Godoy, Jose, Franciane Gomes, Aloisio Cordilha, Luiz Ernesto Matta, und Maria Luiza Godoy. 2005. „Pb-210 content in natural gas pipeline residues („black-powder“) and its correlation with the chemical composition“. *Journal of environmental radioactivity* 83 (Februar):101–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.02.018>.
- Grömling, Michael. 2008. *Ein volkswirtschaftliches Porträt der deutschen Baustoffindustrie*. Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e. V.
- Hipkin, J., und P. V. Shaw. 1999. „Working with ores containing naturally occurring radioactive materials“. In *Managing Internal Exposures (Proc. 3rd European ALARA Network Workshop, Neuherberg, Germany, 1999)*, EAN, Fontenay-aux-Roses, France.
- Huijbregts, W.M.M., M.P. de Jong, und C.W.M. Timmermanns. 2000. „Hazardous accumulation of radioactive lead on the water wall tubes in coal fired boilers“. *Anti Corrosion Methods and Materials* Vol. 47 (No. 5):274–79.
- IAEA. 2003. „Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation“. <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6789/Extent-of-Environmental-Contamination-by-Naturally-Occurring-Radioactive-Material-NORM-and-Technological-Options-for-Mitigation>.
- . 2004a. „Occupational Radiation Protection in the Mining and Processing of Raw Materials“. <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6907/Occupational-Radiation-Protection-in-the-Mining-and-Processing-of-Raw-Materials>.
- . 2004b. „Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry“. <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6747/Radiation-Protection-and-the-Management-of-Radioactive-Waste-in-the-Oil-and-Gas-Industry>.
- . , Hrsg. 2006. *Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials*. Safety Reports Series 49. Vienna: Internat. Atomic Energy Agency.
- . 2007. *Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries*. <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/7673/Radiation-Protection-and-NORM-Residue-Management-in-the-Zircon-and-Zirconia-Industries>.
- ICRP. 1991. „1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.“ *ICRP Publication 60 Annals of the ICRP* 21 (1-3).
- . 2007. „The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection“. *ICRP Publication 103 Ann. ICRP* 37 (2-4).

- . 2012. „Compendium of Dose Coefficients based on ICRP publication 60“. *ICRP Publication 119* (Annals of the ICRP 41(Suppl.)). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146645313000110>.
- International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material. 1997. „Naturally occurring radioactive material (NORM I): proceedings of the First International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, held in Amsterdam, 8 - 10 September 1997“. 1997. <http://norm1.eu-norm.org/>.
- . 1998. „Naturally occurring radioactive material (NORM II): proceedings of the Second International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, held in Krefeld, 10 - 13 November 1998“. 1998. <http://norm2.eu-norm.org/>.
- . 2001. „Naturally occurring radioactive material (NORM III): proceedings of the Third International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, held in Brussels, 17 - 21 September 2001“. 2001. <http://norm3.eu-norm.org/>.
- International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, und IAEA, Hrsg. 2015. *Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VII) Proceedings of an International Symposium Held in Beijing, China 22-26 April 2013*. Vienna: IAEA. <http://public.eblib.com/choice/PublicFullRecord.aspx?p=4853251>.
- International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, und International Atomic Energy Agency, Hrsg. 2005. *Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM IV): Proceedings of an International Conference Held in Szczyrk, Poland, 17-21 May 2004*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Universidad de Sevilla, und IAEA, Hrsg. 2008. *Naturally Occurring Radioactive Material: (NORM V) ; Proceedings of the Fifth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material ; and Held in Seville, 19 - 22 March 2007*. Publication / Division of Scientific and Technical Information, International Atomic Energy Agency 1326. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material, Université Hassan II Mohammedia, Jāmi'at al-Qādī 'Ayyād, und International Atomic Energy Agency, Hrsg. 2011. *Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VI): Proceedings of the Sixth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material Organized by the Hassan II University of Mohammedia and the Cadi Ayyad University of Marrakesh in Cooperation with the International Atomic Energy Agency and Held in Marrakesh, Morocco, 22-26 March 2010*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Internationale Atomenergie-Organisation, Hrsg. 2006. *Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials*. Safety Reports Series 49. Vienna: Internat. Atomic Energy Agency.
- Kainer, Karl U. 2006. *Magnesium Alloys and Technologies*. John Wiley & Sons.
- Kirchner, H., E. Merz, und A. Schiffers. 1974. „Radioaktive Emissionen aus mit rheinischer Braunkohle befeuerten Kraftwerksanlagen“. *Braunkohle* 1974 (November):340–45.
- Köhler, M., D. Degering, Fleischer, K., und Steinbach, P. 2013. „Abschlussbericht BMU 0325166“. <https://doi.org/10.2314/GBV:773917756>.

- Köhler, M., J. Dilling, J. Döring, M. Ebert, S. Feige, K. Fleischer, Rainer Gellermann, u. a. 2014. „Strahlenschutz bei der Nutzbarmachung der geothermischen Energie“. *Strahlenschutzpraxis*, Nr. 03/2014. http://www.fs-ev.org/fileadmin/user_upload/05_SSP/Probeartikel/Probeartikel_2014_3.pdf.
- „Konstruktionsteile aus Wolfram, Molybdän und Werkstoffverbunden von Wolfram Industrie“. o. J. *Wolfram Industrie* (blog). Zugegriffen 22. November 2017. <https://wolfram-industrie.de/produkte/konstruktionsteile/>.
- Langenscheidt, Oliver. 2008. „Elektroden für HID-Lampen - Diagnostik und Simulation.“ Bochum: Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Ruhr-Universität.
- LBEG. 2017. „Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2016“. Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- „Magnesium Elektron | Magnesium Alloys Supplier“. o. J. Zugegriffen 22. November 2017. <https://www.magnesium-elektron.com/>.
- Mallik, Ronzon. 2004. „Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftige Rückstände“. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- „MILAN“. 2017. *Wikipedia*. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=MILAN&oldid=169363437>.
- Mineralöl Wirtschaftsverband e.V. 2016. „Raffinerien und Pipelines in Deutschland“. Berlin. <https://www.mwv.de/wp-content/themes/mwv/images/map/mwv-raffineriestandorte-und-mineraloelfernleitungen-deutschland-karte.pdf>.
- Müller, F. 2017. „Expositionsermittlung in der Feuerfestindustrie“, 16. November 2017.
- Oak Ridge Associated Universities. 2009. „Magnesium-Thorium Alloy (ca. 1980s)“. 20. Januar 2009. <http://www.ora.ou.gov/ptp/collection/consumer%20products/magthor.htm>.
- Puch, K.-H. 2017. Fachgespräch „Forschungsvorhaben NORM-Arbeitsplätze“.
- Reichelt, Andreas. 2005. „Industrielle Hinterlassenschaften der Rohphosphat-Verarbeitung“. 3b / StSch 4386. Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM - Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände. München: TÜV Industrie Service GmbH, TÜV SÜD.
- Reichelt, Andreas, Matthias Niedermayer, Beate Sitte, und Peter Hamel Michael. 2007. „Historische Recherche zur Ermittlung der radiologischen Relevanz von NORM-Rückständen und Konzepte zur Standortidentifikation“. BMU-2007-695. Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM - Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände. Bonn. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs695_teil_1.pdf.
- Reichelt, Andreas, Jens Wiegand, und Karsten Leopold. 2005. „Orientierende radiologische Untersuchungen an bergbaulichen Hinterlassenschaften der Steinkohle-Gewinnung“. 4a / StSch 4386. Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM - Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände. München: TÜV Industrie Service GmbH, TÜV SÜD.

- Richter, Cornelia, Patrick Eich, und Cornelia Richter. 2014. *Berechnung von Aktivitätsgrenzwerten - Freigrenzen: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 4*. Untersuchungen zur Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe, Teil 1.2. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS).
- Robles, Beatriz, Juan Mora, David Cancio, Antonio Baeza, und Jose Corbacho. 2008. „Radiological investigation in the boiler's maintenance operations in a Coal-Fired Power Plant“. In .
- Schreiter, Willy. 1962. *Seltene Metalle*. Bd. 3. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- Schulz, Hartmut, Eckhard Ettenhuber, Rainer Gellermann, und Astrid Schellenberger. 2012. „Fortführung und technische Betreuung der Internetplattform zum europäischen Netzwerk für natürlicherweise auftretende radioaktive Materialien (NORM)-Datenbank. Vorhaben 3609S10006.“ BfS-RESFOR-69/12. Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz. urn:nbn:de: 0221-201210019649.
- Schulz, Hartmut, Christian Kunze, und Holger Hummrich. 2016. „Balance of Natural Radionuclides in Lignite-Based Power Generation and Consequences for the Use of Residues and by-Products“. gehalten auf der EAN-NORM-Workshop, Stockholm, Dezember 6.
- SSK. 1981. „Zum Vergleich der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kohlekraftwerken und aus Kernkraftwerken“. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission. Bonn. http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/1981/1981_02.pdf?__blob=publicationFile.
- . , Hrsg. 1997. *Strahlenexposition an Arbeitsplätzen durch natürliche Radionuklide: Stellungnahme der Strahlenschutzkommission*. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 10. Stuttgart: G. Fischer.
- . , Hrsg. 2000. *Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition*. Bd. 43. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission. München: Urban & Fischer.
- . 2014. „Strahlenschutzfragen bei der Nutzung neuer Energien“. Bonn. https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2014/Klausurtagung_NeueEnergien.pdf?__blob=publicationFile.
- Steen, J. van der, C.W.M. Timmermanns, A.W. van Weers, J.P. Degrange, C. Lefaure, und P.V. Shaw. 2004. „Strategies and Methods for Optimisation of Protection against Internal Exposures of Workers from Industrial Natural Sources (SCOMPIE)“. NGR Report 20790/04.60901/P.
- Sternad, Thomas, Ulrich Kratzel, und Herbert Hellmann. 2000. „Innere Strahlenexposition beim berufsbedingten Umgang mit thoriumhaltigen Materialien“. Abschlussbericht zum Untersuchungsvorhaben. Kulmbach: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Außenstelle Norbayern, Messstelle für Radiotoxikologie. [http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug_app000004?SID=163811089&ACTIONxSESSx-SHOWPIC\(BILDxKEY:%27Ifu_stra_00001%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug_app000004?SID=163811089&ACTIONxSESSx-SHOWPIC(BILDxKEY:%27Ifu_stra_00001%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).
- TIC. 2016. „Transporting NORM - A guide for the transport of Niobium (Nb) and Tantalum (Ta) raw materials that are naturally occurring radioactive materials (NORM)“. Lasne, Belgium: Tantalum-Niobium International Study Center. https://www.tanb.org/images/Transporting%20NORM%20-%20A%20guide%20for%20Nb%20and%20Ta%20raw%20materials%20%28T_I_C_%20December%202016%29%281%29.pdf.

- . 2017a. „TIC - Home“. 2017. <https://www.tanb.org/index>.
- . 2017b. „TIC - Transport of NORM“. 2017. <https://www.tanb.org/view/transport-of-norm>.
- „Total Materia - Die weltweit umfangreichste Datenbank“. o. J. Zugegriffen 3. Mai 2016. <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=DE>.
- TRGS 559. 2010. *TRGS 559 - Technische Regeln für Gefahrstoffe: Mineralischer Staub. Ausgabe: Februar 2010 zuletzt geändert und ergänzt GMBL 2011 S. 578-579 [Nr. 29]*.
- UBA. 2013. „Datenbank ‚Kraftwerke in Deutschland‘“. Text. Umweltbundesamt. 30. Juli 2013. <http://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland>.
- . 2015. „Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen - Status quo und Perspektiven“. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/daten_und_fakten_zu_braun-_und_steinkohlen_aktualisierung_2015_08_web.pdf.
- United Nations. 2010. „UNSCEAR 2008: Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with Scientific Annexes“. New York. http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf.
- USGS. 2017. „Mineral Commodity Summaries“.
- VDFFI. 2017. Feuerfest. 2017. <http://www.vdfffi.de/feuerfest/index.html>.
- VdZ. 2002. *Zement Taschenbuch 2002*. Düsseldorf: Bau+Technik. https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zement-Taschenbuch/Zement-Taschenbuch_2002.pdf.
- . 2017. „Statistische Daten zum Zementmarkt in Deutschland auf einen Blick Zahlen und Daten“. 24. August 2017. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/a-wichtige-daten-auf-einen-blick/#c18539>.
- Vogt, Hans-Gerrit, Heinrich Schultz, und Jan-Willem Vahlbruch. 2011. *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes: mit 56 Tabellen und 76 Diagrammen*. 6., Überarb. Aufl. München: Hanser.
- Vom Berg, W., und K.-H. Puch. 1996. „Radioaktivität von Verbrennungsrückständen aus Kohlekraftwerken“. *VGB Kraftwerkstechnik* 76 (8):681–87.
- Zircon Industry Association. 2015. *Technical handbook on zirconium and zirconium compounds*. https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/cdn.webcloudserver.com/zircon/Zirconium+technical+handbook+2015_final.pdf.