



Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



# Untersuchung von natürlich radioaktiven Materialien (NORM)

Abschlussbericht



# strahlung





Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



# Untersuchung von natürlich radioaktiven Materialien (NORM)

Abschlussbericht

UmweltSpezial

## Impressum

Untersuchung von natürlich radioaktiven Materialien (NORM)

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

Fax: 0821 9071-5556

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Bearbeitung:

LfU, Referat 41/Dr. Tobias Kloubert, Angelika Kunte

### Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

### Stand:

Januar 2015

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Natürliche Radioaktivität und NORM	7
2.2	Strahlenschutzrecht	9
2.3	Messtechnik zur Ermittlung der spezifischen Aktivität	10
2.4	Grundlagen der Berechnung der Strahlenexposition	11
<b>3</b>	<b>Zirkon- und Zirkonium-Industrie</b>	<b>13</b>
3.1	Einleitung	13
3.2	Ablauf der Untersuchungen, Firmenrecherche	14
3.3	Glasindustrie	16
3.4	Gießereien	18
3.5	Keramische Industrie und Keramikhersteller	21
3.6	Feuerfeststoffindustrie/Schamottehersteller	25
3.7	Strahlverfahrenstechnik, Strahlbetriebe	27
3.8	Strahlmittellieferanten	31
3.9	Zirkoniumhaltige Abfälle	32
3.10	Zusammenfassung – Zirkon- und Zirkonium-Industrie	33
<b>4</b>	<b>Zementherstellung, Instandhaltung von Klinkeröfen</b>	<b>36</b>
4.1	Einleitung	36
4.2	Erhebungsdaten	37
4.3	Zusammenfassung – Zementherstellung, Instandhaltung von Klinkeröfen	40
<b>5</b>	<b>Wartung von Heizkesseln in Kohlekraftwerken</b>	<b>41</b>
5.1	Einleitung	41
5.2	NORM in der Kohleverbrennung	43
5.3	Untersuchte Kraftwerke	43
5.4	Kraftwerk K1	44
5.5	Kraftwerk K2	47
5.6	Kraftwerk K3	54
5.7	Zusammenfassung – Wartung von Heizkesseln in Kohlekraftwerken	57

<b>6</b>	<b>Zinn-, Blei-, Kupferschmelzen</b>	<b>59</b>
6.1	Einleitung	59
6.2	Erhebungsdaten	59
<b>7</b>	<b>Grundwasserfilteranlagen – Natürliche Radionuklide in Filtermaterialien aus der Trinkwasseraufbereitung</b>	<b>61</b>
7.1	Einleitung	61
7.2	Arten der Trinkwasseraufbereitung	61
7.3	Praktische Durchführung und Untersuchungsumfang	62
7.4	Geologie und Georegion	63
7.5	Spezifische Aktivitäten der Filtermaterialproben	65
7.6	Einfluss von Aufbereitungsart, Filterstandzeit und jährlicher Durchflussmenge auf die Radionuklidanreicherung	68
7.7	Korrelation der spezifischen Aktivitäten von Radiumisotopen in Filtermaterialien und Rückspülschlämmen	70
7.8	Expositionsrechnungen für Arbeiten an Wasserfiltrationsanlagen	72
7.9	Mineralwasserhersteller und Brauereien	73
7.10	Zusammenfassung	75
<b>8</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung der NORM-Situation in Bayern</b>	<b>77</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>82</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Anhang I: Erhebungsbögen / Messprotokoll</b>	<b>87</b>
	<b>Anhang II: Gesamtübersicht der ermittelten Radionuklidaktivitäten</b>	<b>101</b>
	<b>Anhang III: Ergänzendes Tabellenmaterial zu Kapitel 7: Grundwasserfilteranlagen</b>	<b>113</b>

# 1 Einleitung

Die Richtlinie 2013/59/Euratom [European Commission, 2014] die für Materialien mit natürlicher Radioaktivität (Naturally Occurring Radioactive Material, NORM) relevante Grundnorm der Europäischen Kommission, enthält eine Liste mit Industrien, die NORM verwenden oder bei denen NORM anfallen. Die dort genannten Branchen bedeuten eine Erweiterung der bisher in der deutschen Strahlenschutzverordnung (StrSchV) aufgeführten überwachungsbedürftigen Rückstände (Anlage XII Teil A). Im Anhang VI der Richtlinie 2013/59/Euratom sind folgende Industriezweige zu finden:

- (1) Extraktion seltener Erden aus Monazit
- (2) Herstellung von Thoriumverbindungen und thoriumhaltigen Produkten
- (3) Verarbeitung von Niob-/Tantalierz
- (4) Erdöl- und Erdgasproduktion
- (5) Gewinnung geothermischer Energie
- (6) TiO<sub>2</sub>-Pigmentherstellung
- (7) Thermische Phosphorproduktion
- (8) Zirkon- und Zirkonium-Industrie
- (9) Herstellung von Phosphatdüngemitteln
- (10) Zementherstellung, Instandhaltung von Klinkeröfen
- (11) Kohlekraftwerke, Wartung von Heizkesseln
- (12) Herstellung von Phosphorsäure
- (13) Produktion von Primäreisen
- (14) Zinn- / Blei- / Kupferschmelze
- (15) Grundwasserfilteranlagen
- (16) Förderung von anderen Erzen als Uranerz

Die Richtlinie beschränkt sich dabei nicht auf Rückstände aus den angeführten Industriezweigen, sondern bezieht ebenso die zum Einsatz kommenden Rohstoffe, anfallende Abfälle, Zwischenprodukte und Endprodukte in den besagten Branchen bzw. die Exposition bei Arbeiten mit NORM ein.

Anhang VI war Anlass, im Zeitraum von September 2010 bis August 2013 das durch das Staatministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG) finanzierte Vorhaben zur „Untersuchung von natürlich radioaktiven Materialien (NORM)“ durchzuführen. Im Rahmen dieser Untersuchung fand eine bayernweite Erhebung der in der Positivliste genannten NORM-Gewerbebranche sowie eine Abschätzung der potentiellen Strahlenexposition durch Direktstrahlung, Inhalation und Ingestion bei Arbeiten mit NORM statt.

Von den in der Positivliste aufgeführten Industriezweigen ist gegenwärtig nur ein Teil in Bayern vertreten, darunter fallen die Bereiche 2, 4, 5, 8, 10, 11, 14 und 15. Die Thorium verarbeitende Industrie (Punkt 2) ist in Anlage XI Teil B StrSchV als relevantes Arbeitsfeld genannt. In Anlage XII Teil A StrSchV werden Rückstände aus der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas geregelt (Punkt 4). Sie sind daher nicht Gegenstand dieses Untersuchungsvorhabens.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Zirkon- und Zirkonium-Industrie, die Zementherstellung und Instandhaltung von Klinkeröfen, Kohlekraftwerke und die Wartungsarbeiten von Heizkesseln, Zinn-, Blei- und Kupferschmelzbetriebe und Grundwasserfilteranlagen eingehend untersucht.

Ein weiteres Ziel des Untersuchungsvorhabens ist die Fortführung der radiologischen Untersuchung von Rückständen aus bayerischen Wasserwerken. Die bereits im Bereich der Rückspülschlämme aus der Trinkwasseraufbereitung vorliegenden Daten [Mallick, 2006; Vornehm, 2008] wurden um eine Untersuchung des in Wasserwerken zum Einsatz kommenden Filtermaterials erweitert. Ziel ist es festzustellen, in wie weit ein Zusammenhang zwischen Aktivität des Filtermaterials und Geologie der Förderregion besteht und in wie weit ein Zusammenhang zu den Aktivitäten der Rückspülschlämme des jeweiligen Wasserwerkes vorliegt.

Um einen Überblick über die in Bayern ansässigen Betriebe dieser Branchen zu bekommen, wurden neben einer ausführlichen Recherche im Internet, zunächst die Gewerbeaufsichtsämter der Regierungsbezirke in Bayern angeschrieben. Diese leiteten die Anfrage an das bayerische Sozialministerium (StMAS) weiter. Dieses konnte mit einer Liste entsprechender Betriebe weiterhelfen.

Die generelle Vorgehensweise zur Datenerhebung bestand dann in einer schriftlichen Kontaktaufnahme mit den betreffenden Betrieben. Darin wurde das Untersuchungsvorhaben erläutert und um eine Teilnahme an diesem gebeten. Jeder Branche wurde ein auf die jeweiligen NORM-Einsatzstoffe und Verarbeitungsprozesse ausgelegter Erhebungsbogen (Anhang I) zugesandt. Ebenso wurde erfragt, ob die Bereitschaft besteht, Materialproben von diesen NORM-Stoffen bereitzustellen und ggf. eine Ortseinsicht zur Beurteilung der zu erwartenden jährlichen Strahlenexposition durch Arbeiten mit NORM durchführen zu lassen.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Natürliche Radioaktivität und NORM

Die primordialen Radionuklide Uran-238, Th-232 und Uran-235 sind bedingt durch ihre langen Halbwertszeiten (U-238: 4,4 Mrd. Jahre, Th-232: 14 Mrd. Jahre, U-235: 700 Mio. Jahre) bis heute in der Erdkruste allgegenwärtig vorhanden. Sie stellen die Ausgangsnuklide der drei in Abb. 1 dargestellten natürlichen Zerfallsreihen dar.

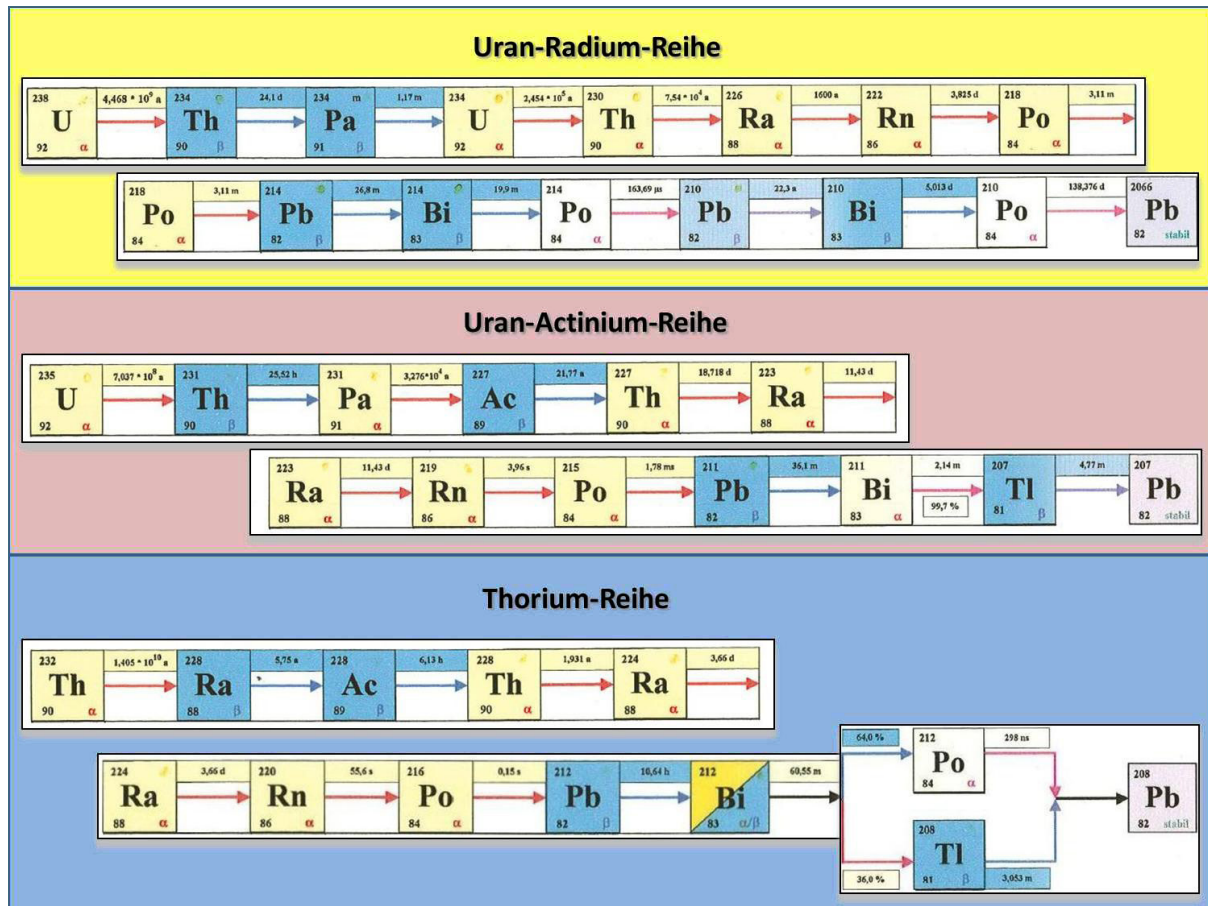


Abb. 1: Die drei natürlichen Zerfallsreihen [B.P.S. Engineering GmbH]

#### 2.1.1 Vorkommen von U-238

Uran ist in der Erdkruste mit durchschnittlich 4 mg/kg Gestein enthalten und gehört damit zu den häufig vorkommenden Elementen [REGITZ, 1992]. Seine Halbwertszeit beträgt 4,5 Milliarden Jahre. Es ist aufgrund seiner geochemischen Eigenschaften ubiquitär verbreitet. Höhere Urangehalte kommen in kristallinen Gesteinen, vor allem in Graniten und Sandsteinen vor [GATZWEILER, 1996]. In der Natur tritt es überwiegend in den Oxidationsstufen +4 und +6 auf. Das vierwertige Ion ist dabei in Wasser nahezu unlöslich. Dies bedingt, dass die Konzentration von Uran in reduzierendem wässrigem Milieu sehr gering ist. Eine wesentlich größere Löslichkeit besitzt Uran mit der Wertigkeit +6. Dies ist unter anderem auf die Bildung von sehr gut löslichen Karbonat-Komplexverbindungen zurück zu führen. Uran kann daher in sauerstoffreichen Gewässern, wie bspw. Flüssen, Seen und oberflächennahen Grundgewässern enthalten sein [MERKEL / SPERLING, 1998]. Organische Materie ist in der Lage Uran aufzunehmen und zu speichern [DEGES, 1977]. Grünalgen können Uran mit einem Faktor von 10<sup>5</sup> gegenüber der Konzentration des umfließenden Gewässers akkumulieren [MANN / FYFE, 1985]. Dies ist unter anderem ein Grund, dass sich Uran und seine Zerfallsprodukte in fossilen Brennstoffen wie Erdöl und Kohle und folglich in deren Verbrennungsrückständen befinden.

### 2.1.2 Vorkommen von Th-232

Der mittlere Gehalt an Thorium in der Lithosphäre wird auf 7 bis 13 mg/kg geschätzt [WEDEPOHL, 1978]. Seine Halbwertszeit beträgt 140 Milliarden Jahre. Höhere Konzentrationen finden sich in Ganzerzen ( $\text{ThSiO}_4$ ), in Flusssseifen (Monaziten) und vergesellschaftet mit Carbonatiten. Thorit ( $\text{ThSiO}_4$ ) ist isomorph zu Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ ). Durch die Fähigkeit zur Ausbildung von Mischkristallen enthält Zirkon daher stets Thorium in zum Teil beträchtlichen Konzentrationen [MERKEL / SPERLING, 1998]. In Wasser liegt Thorium im alkalischen Bereich als neutrale  $\text{Th}(\text{OH})_4$ -Spezies vor. Die Löslichkeit von  $\text{Th}^{4+}$ -Ionen ist stark vom pH-Wert und dem jeweiligen Komplexbildner abhängig. Organische Liganden sind in der Lage die Konzentration im wässrigen Milieu um den Größenfaktor vier zu erhöhen [HERMAN, 1980]. Thorium reichert sich sehr effektiv auf Tonmineralien und organischen Teilchen an [KIM, 1992] und findet sich dementsprechend in Lagerstätten fossiler Brennstoffe wieder.

### 2.1.3 Vorkommen von Radium

Radium kommt in der Erdkruste nur in sehr geringer Konzentration von etwa  $7 \times 10^{-12}$  % bzw. 0,7 ng/kg vor und stellt damit eines der seltensten Elemente dar [REGITZ, 1992]. Es entsteht als Zerfallsprodukt von Uran und Thorium. Höhere Konzentrationen in der Lithosphäre sind daher an die Gehalte seiner Mutternuklide gebunden. Die Halbwertszeiten der unterschiedlichen Nuklide liegen bei 3,64 Tagen für Ra-224 und reichen bis 1600 Jahre für Ra-226. Radium tritt als Erdalkalimetall immer zweiwertig positiv auf. In Wasser löst es sich gut in Form seiner Salze, wie den Halogeniden Chlorid und Bromid, ebenso als Nitrat oder Acetat. Schwer bzw. nahezu unlöslich ist es als Sulfat, Carbonat, Oxalat und als Phosphat. Bei hohen Sulfatgehalten bildet Radium jedoch einen stabilen und löslichen  $\text{RaSO}_4$ -Komplex aus, wodurch es beispielsweise in sauren Grubengewässern des Uranbergbaus zu erhöhten Radiumkonzentrationen kommen kann [Merkel / Sperling, 1998].

### 2.1.4 Definition von NORM

NORM umfasst alle natürlich vorkommenden Rohstoffe, Produkte sowie Abfälle, welche Einlagerungen von natürlichen Radionukliden (U-238, Th-232, U-235, K-40 und deren Zerfallsprodukte) besitzen. Um der Bezeichnung NORM gemäß der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) formal gerecht zu werden, muss mindestens eines dieser Radionuklide eine spezifische Aktivität von mehr als 1 Bq/g aufweisen [HAIDASAN, 2011].

Ein Charakteristikum von NORM ist, dass diese Materialien nicht aufgrund ihrer enthaltenen Radionuklide gefördert und genutzt werden. Radioaktivität tritt lediglich als Begleiterscheinung auf.

### 2.1.5 Strahlung im Alltag

Der Mensch ist ständig von radioaktiver Strahlung umgeben. Sie stammt zum einen aus der Natur, zum anderen werden in modernen Industriegesellschaften künstliche Strahlenquellen genutzt. Künstliche radioaktive Strahlung entsteht z. B. in einem Röntgengerät oder in einem Kernkraftwerk bei der Spaltung von Uran.

Die mittlere effektive Jahresdosis der Bevölkerung in Deutschland setzt sich zusammen aus der Strahlung von natürlichen und künstlichen Quellen und beträgt in Summe pro Person rund **4 mSv im Jahr**. Abb. 2 veranschaulicht die Dosisanteile aus natürlicher und künstlicher Strahlung.

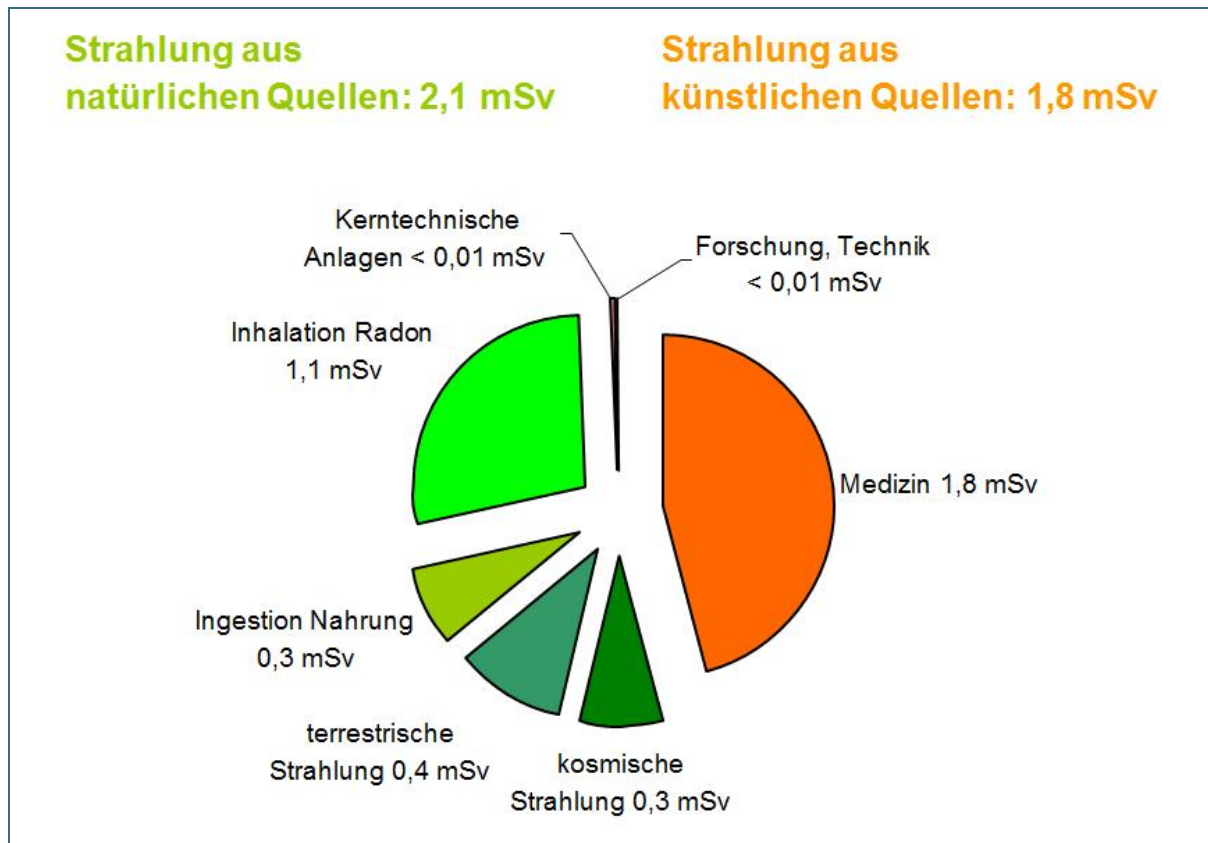


Abb. 2: Durchschnittliche Jahresdosis pro Person in Deutschland [Bundesamt für Strahlenschutz, 2012]

## 2.2 Strahlenschutzrecht

Im Vertrag der EURATOM (Europäische Atomgemeinschaft) vom 25.03.1957 wurden einheitliche Sicherheitsnormen (Grundnormen) für den Schutz von Arbeitskräften und der Bevölkerung definiert [EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2011]. Die Mitgliedsstaaten sind verpflichtet, diese nach der derzeit aktuellsten Fassung, entsprechend der Richtlinien 96/29/EURATOM festgelegten Grundnormen in die nationale Gesetzgebung zu übernehmen.

Im Jahre 1976 war daraus die deutsche Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) hervorgegangen und wurde seitdem mehrfach novelliert.

Erstmals seit 2001 wird in Teil 3 §§ 97 – 102, i. V. m. Anlage XII der Strahlenschutzverordnung der Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen (NORM) geregelt.

Anlage XII Teil A der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) enthält eine Aufzählung von Rückständen, bei denen die natürliche Radioaktivität zu beachten ist und für die Überwachungsgrenzen festgelegt wurden („überwachungsbedürftige Rückstände“). In Teil B der Anlage XII der StrlSchV sind die Überwachungsgrenzen festgelegt. Im Regelfall beginnt die Überwachungsgrenze bei 1 Bq/g für die Summe der größten Einzelaktivitäten der Nuklide der U-Ra- und der Th-Reihe. Wird zwar die Überwachungsgrenze überschritten, der Richtwert von 1 mSv/a jedoch nicht, so kann bei der zuständigen Behörde nach § 98 StrlSchV eine Entlassung der Rückstände aus der Überwachung beantragt werden. Tritt in einer der relevanten Zerfallsreihen der Fall auf, dass sämtliche Nuklide eine spezifische Aktivität unterhalb von 0,2 Bq/g aufweisen, so bleibt diese Zerfallsreihe bei der Ermittlung der Überwachungsgrenze unberücksichtigt.

Materialien wie z. B. Rückstände aus der Zirkon-Industrie und aus der Trinkwasseraufbereitung sind bisher nicht in der oben genannten Positivliste enthalten und unterliegen daher zunächst auch nicht den Regelungen der StrlSchV. Kann bei Arbeiten mit diesen Materialien oder deren Entsorgung die

Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung so erheblich erhöht werden, dass Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich sind, trifft die zuständige Behörde die erforderlichen Anordnungen. Als „erheblich erhöht“, wird in Anlehnung an § 97 StrlSchV, eine Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung von mehr als 1 Millisievert pro Jahr (1 mSv/a) angesehen; im vorliegenden Bericht als „Dosiskriterium“ bezeichnet. Solange dies nicht der Fall ist, sind Rückstände aus den o. g. Bereichen keine radioaktiven Stoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 des Atomgesetzes. In diesem Fall ist für die Entsorgung von NORM nur das Abfallrecht zu beachten.

### 2.3 Messtechnik zur Ermittlung der spezifischen Aktivität

Die untersuchten Proben wurden mit einem hochauflösenden Gammaskpektrometer mit Germanium-Halbleiter-Detektor nuklidspezifisch gemessen. Die Radionuklide Th-234, Pa-234m, Th-230, Ra-226, Pb-214, Bi-214, Pb-210, Ac-228, Ra-224, Pb-212, Bi-212, Tl-208, U-235, Th-227, Ra-223 und Pb-211 wurden anhand der Energien ihrer Gammalinien identifiziert und quantifiziert. Weitere Radionuklide konnten aus gemessenen Nukliden abgeleitet werden: U-238 aus U-235, Ra-228 aus Ac-228 und Th-228 aus Pb-212.

Materialproben im flüssigen Zustand (z. B. Schlichten) wurden zur Probenvorbereitung bei 80 °C getrocknet. Grobkörnige, kompakte oder inhomogene Proben mussten zur Bestimmung der nuklidspezifischen Aktivität gemahlen werden, um sie in eine homogenisierte Form zu bringen. Anschließend wurden die Proben, je nach Art und Menge, in eine kalibrierte Messgeometrie überführt und gemessen. Die gewählte Geometrie richtete sich nach der Menge der Probe. Die Messzeit betrug üblicherweise 50.000 Sekunden.

Da die von den Radionukliden emittierten Gammastrahlen teilweise von der Probe wieder absorbiert werden (dieser Effekt ist umso stärker, je niedriger die Energie der Gammastrahlung bzw. je größer die Dichte des Materials ist), muss nach der Messung eine sog. Dichtekorrektur durchgeführt werden. Für diese Korrektur spielt die Schüttdichte und die chemische Zusammensetzung der Probe eine große Rolle. Aus diesem Grund erwies sich bei einigen Proben mit hoher Schüttdichte und fehlenden Angaben zu den Inhaltsstoffen, wie z. B. aus der Zirkonindustrie oder allgemein bei Reststoffgemischen, die Bestimmung der spezifischen Aktivität der Radionuklide Pb-210, Th-230 und Th-234 teilweise als problematisch. Aufgrund der ungenauen Elementzusammensetzungen resultierten daher vereinzelt zu große Unsicherheiten bei den Aktivitäten, so dass diese nicht mit angegeben werden.

Aktivitäten lassen sich auch indirekt von anderen Nukliden ableiten. Kurze Halbwertszeiten der Tochternuklide bedingen, dass sich diese nach kurzer Zeit mit dem Mutternuklid im Gleichgewicht befinden. Daher können für die Dosisberechnung von Th-228 die Aktivitätswerte eines der Tochternuklide (z.B. Ra-224 oder Pb-212, Gleichgewicht nach wenigen Wochen), soweit dies möglich ist, zur Aktivitätsbestimmung verwendet werden. Ebenso kann Ra-228 über die Aktivität von Ac-228 bestimmt werden, mit dem es sich binnen eines Monats im Gleichgewicht befindet.

Die Aktivität von U-238 kann durch eine gammaskpektrometrische Analyse nicht ermittelt werden, da U-238 ein Alphastrahler ist und nur in sehr geringem Maße Gammastrahlung emittiert. Allerdings kann durch das natürliche Isotopenverhältnis von U-235 zu U-238 - dieses liegt bei 1 zu 21,74 - aus der Aktivität von U-235 die Aktivität von U-238 abgeleitet werden. U-234 kommt in Feststoffen annähernd im Verhältnis 1 zu 1 mit U-238 vor. Die für U-238 berechneten Aktivitäten können folglich bei Feststoffen ebenso für die Aktivität von U-234 herangezogen werden. Bei Rückständen aus der Wasseraufbereitung ist dieser Rückschluss allerdings aufgrund des abweichenden Konzentrationsverhältnisses in flüssigen Medien nicht möglich.

Bei Betriebseinsichten wurden an Arbeitsplätzen mit NORM Messungen der jeweiligen Gamma-Ortsdosisleistung (ODL) vorgenommen. Die dabei ermittelten Werte wurden für spätere Abschätzungen der zu erwartenden Jahresdosen herangezogen. In Zement- und Kohlekraftwerken wurden au-

ßerdem mittels eines Kontamaten die Alphastrahlung und die Summe der Beta- und Gammastrahlung gemessen. Eine Unterscheidung zwischen Beta- und Gammastrahlung war aus gerätetechnischen Gründen nicht möglich.

## 2.4 Grundlagen der Berechnung der Strahlenexposition

Die Abschätzung der Exposition durch Arbeiten mit NORM wurde im Wesentlichen nach den „Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität“ [BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, 2010] durchgeführt. Diese sehen auch vor, dass die gesamte natürliche Gammastrahlung, welcher der Beschäftigte ausgesetzt ist, mit in die Berechnung einbezogen wird.

Alle Radionuklide der drei natürlichen Zerfallsreihen (U-238, U-235, Th-232 und Folgeprodukte) wurden berücksichtigt, soweit sie durch Gammaskopie ermittelt werden konnten. Die jährliche effektive Dosis ( $E_{\text{eff}}$ ), die für den einzelnen Beschäftigten im untersuchten Betrieb berechnet wird, setzt sich folglich aus der Summe der Exposition durch direkte Strahlung ( $E_{\text{dir}}$ ), Inhalation ( $E_{\text{inh}}$ ) und Ingestion ( $E_{\text{ing}}$ ) zusammen und wird in mSv/a angegeben (Gl. 1). Im Folgenden werden die einzelnen Teil-Expositionen erläutert (Gl. 2 ff).

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{dir}} + E_{\text{inh}} + E_{\text{ing}} \quad (\text{Gl. 1})$$

### Direkte Exposition

$$E_{\text{dir}} = \frac{\sum_s \dot{H}^*(10)_s \times t_{\text{exp},j,s}}{1000} \quad (\text{Gl. 2})$$

$E_{\text{dir}}$  Effektive Jahresdosis durch Gammastrahlung für die Referenzperson in mSv/a

$\dot{H}^*(10)_s$  Umgebungs-Äquivalentdosisleistung am Expositionsort s in  $\mu\text{Sv/h}$

$t_{\text{exp},j,s}$  Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h/a

### Exposition durch Inhalation

$$E_{\text{inh}} = 1000 \times \sum_s (\dot{v} \times a_{\text{luft},s} \times t_{\text{exp},j,s} \sum_r C_{\text{luft},r,s} \times g_{\text{inh},r}) \quad (\text{Gl. 3})$$

$E_{\text{inh}}$  Effektive Jahresdosis durch Inhalation von Staub für die Referenzperson in mSv/a

$\dot{v}$  Atemrate für die Referenzperson in  $\text{m}^3/\text{h}$

$a_{\text{luft},s}$  Staubgehalt der Luft am Expositionsort s in  $\text{g}/\text{m}^3$

$t_{\text{exp},j,s}$  Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h/a

$C_{\text{luft},r,s}$  Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids r in der Außenluft für den Expositionsort s in  $\text{Bq}/\text{m}^3$

$g_{\text{inh},r}$  Inhalationsdosiskoeffizient für das Radionuklid r in Sv/Bq

Exposition durch Ingestion

$$E_{ing} = AF \times 1000 \times \sum_s (t_{exp,j,s} \times u_{st} \sum_r C_{luft,r,s} \times g_{ing,r}) \quad (\text{Gl. 4})$$

$E_{ing}$	Effektive Jahresdosis durch direkte Aufnahme von NORM in mSv/a
$AF$	Aufkonzentrationsfaktor, gleich 1 gesetzt (keine Aufkonzentration)
$t_{exp,j,s}$	Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h/a
$u_{st}$	Aufnahmerate von Staub in g/h
$C_{luft,r,s}$	Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids r für den Expositionsort s in Bq/g
$g_{ing,r}$	Ingestionsdosiskoeffizient für das Radionuklid r in Sv/Bq

Die Dosiskoeffizienten der herangezogenen Radionuklide zur Abschätzung der effektiven Dosis sind [BUNDESANZEIGER, 2001] zu entnehmen.

## 3 Zirkon- und Zirkonium-Industrie

### 3.1 Einleitung

Elementares Zirkonium (Zr) ist ein Schwermetall. In der Natur kommt es vornehmlich in zwei zirkoniumhaltigen Mineralien, Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ ) und Baddeleyit ( $\text{ZrO}_2$ ) vor, deren Zirkongehalte eine Förderung von Erzvorkommen wirtschaftlich machen. Technisch hergestelltes  $\text{ZrO}_2$  wird als Zirkonia bezeichnet. Die Zuordnung zu NORM geschieht bei diesen Mineralien bzw. ihren Rückständen aufgrund der Einlagerungen von Uran- und Thoriumatomen in das Kristallgitter.

Natürlich vorkommendes Zirkonium ist ein Mischelement und besteht zu ca. 3 % aus Zr-96. Dieses ist ein sehr schwacher Beta-Strahler mit einer Halbwertszeit von  $2,4 \times 10^{19}$  Jahren. Daraus resultiert beispielsweise für elementares Zirkonium eine spezifische Beta-Aktivität von  $2 \times 10^{-7}$  Bq/g. In Zirkoniumverbindungen ist dieser Beitrag zur spezifischen Aktivität wiederum geringer. Gegenüber der in zirkoniumhaltigen Mineralien durch Fremdnuklide verursachten spezifischen Aktivitäten, welche z. B. für Baddeleyit je nach Förderregion mit 3 bis 9 Bq/g angegeben werden [SELBY, 2006], ist der Aktivitätsanteil durch Zr-96 dementsprechend vernachlässigbar.

Der Bedarf an  $\text{ZrO}_2$  kann durch die natürlichen Baddeleyitvorkommen nicht gedeckt werden. Gegenwärtig existiert weltweit nur eine kommerziell genutzte Lagerstätte, die sich im russischen Kovdor befindet [BRUNK, 2012].  $\text{ZrO}_2$  wird daher aus Zirkon hergestellt und als Zirkonia bezeichnet. Es kommen dabei zwei unterschiedliche Herstellungsvarianten zur Anwendung, das thermische und das chemische Herstellungsverfahren.

Bei der thermischen Herstellung wird Zirkon zusammen mit Koks bei 2700 °C bis 2800 °C im elektrischen Lichtbogen umgesetzt, es entsteht „Fused Zirkonia“. Die Produkte  $\text{CO}_2$  und  $\text{SiO}_2$  sind, bis auf Zirkoniumdioxid ( $\text{ZrO}_2$ ), bei diesen Temperaturen flüchtig und gehen in die Gasphase über [BRUNK, 2012]. Ebenso werden flüchtige Radionuklide, wie Pb-210 und Po-210, aber auch teilweise Ra-226 ausgetrieben.  $\text{ZrO}_2$  liegt bei diesen Temperaturen flüssig vor, ggf. werden stabilisierende Stoffe, wie Calcium- und Yttriumoxid vor dem Erstarren zugegeben. Anschließend wird das Produkt gemahlen und in Korngrößen unterteilt. Eine Abtrennung von schwerflüchtigen Nukliden, wie Uran und Thorium, unterbleibt bei dieser Herstellungsvariante.

Bei der chemischen Herstellung wird Zirkon in verschiedene lösliche Zwischenprodukte überführt. Diese werden nach Abtrennung von Verunreinigungen entweder direkt zu unlöslichem  $\text{ZrO}_2$  umgesetzt oder zu ebenfalls schwerlöslichen Verbindungen, wie ZOC ( $\text{ZrOCl}_2 \times 8 \text{H}_2\text{O}$ ), welche ebenso als Rohstoff Verwendung finden oder im Bedarfsfall durch Kalzinieren zu  $\text{ZrO}_2$  umgesetzt werden können. Entlang der Prozessstrecke scheiden sich die Verbindungen der natürlichen Radionuklide aufgrund ihrer geringeren Löslichkeit ab. Mit dieser Synthesevariante lässt sich sehr reines Zirkonia darstellen.

In Bayern findet keine Verarbeitung von zirkoniumhaltigen Erzen statt. Zirkon und Zirkonia werden in den unterschiedlichen Industriesparten als Ausgangsstoffe definierter Zusammensetzung zugekauft. Industrielle Anwendungsgebiete sind in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt [SELBY, 2006].

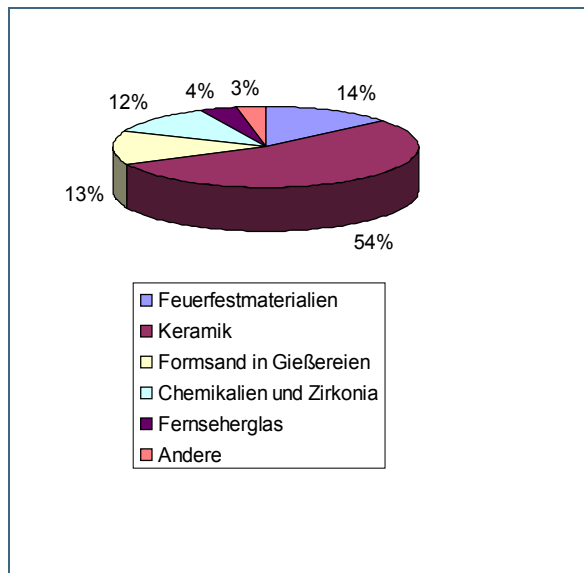


Abb. 3: Einsatzgebiete Zirkon (Selby, 2006)

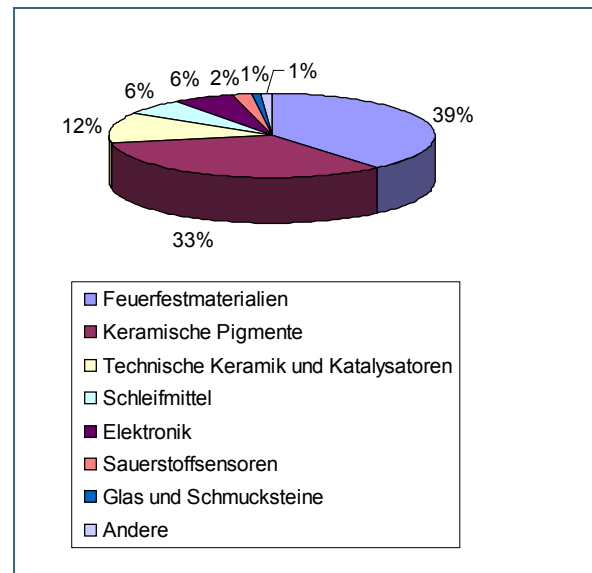


Abb. 4: Einsatzgebiete Zirkonia (Selby, 2006)

Die drei größten Einsatzgebiete für Zirkon und Zirkonia sowie von Gemischen, die eine dieser Komponenten enthalten, sind die Verwendung in Feuerfestmaterialien und Keramiken sowie als Formsande in Gießereibetrieben. Dies ergibt sich aus den charakteristischen Stoffeigenschaften dieser Materialien, wie eine sehr große Temperaturbeständigkeit, ausgezeichnete Isolationseigenschaften, bedingt durch einen sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten in Zusammenhang mit einer enormen Härte. Dies und die gute Verträglichkeit und Beständigkeit in biologischen Systemen, lassen Zirkonia darüber hinaus in der Wiederherstellungstechnik als Material für Zahnersatz und künstliche Gelenke Verwendung finden. Die Stoff- und Reinheitsanforderungen in der medizinischen Anwendung sind dabei so hoch, dass nur hochreines und von ursprünglichen Beimengungen weitestgehend getrenntes Zirkonia zum Einsatz kommt [LECHNER, 2003].

Nicht zuletzt muss bei den stetig steigenden Preisen für Zirkon und Zirkonia ebenso der Faktor der Wirtschaftlichkeit Berücksichtigung finden. Günstigere Alternativen, welche für den Einsatz in Hochtemperaturbereichen Verwendung finden, stellen beispielsweise Siliziumkarbid (gesintert, mullit- oder nitridgebunden), Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Cordierit und Feuerleichtsteine dar [HIGHTECH CERAM, 2013].

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die zirkonverwendenden Branchen getrennt dargestellt. Die versandten Fragebögen sind in Anhang I enthalten. Alle Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchungen finden sich in Anhang II.

### 3.2 Ablauf der Untersuchungen, Firmenrecherche

Im Rahmen eines 2004 abgeschlossenen Untersuchungsvorhabens am LfU wurden bereits einige Arbeitsfelder (Guss-, Feuerfest-Industrie), in denen Zirkon und Zirkonia zum Einsatz kommen, stichprobenartig untersucht [MALLICK, 2004]. Die Exposition für Mitarbeiter bei Arbeiten mit Zirkonsand oder Zirkonoxidpulver setzt sich zusammen aus einer externen Exposition, die sich hauptsächlich aus Aufenthaltszeiten in den Rohstofflagern sowie zu einem geringeren Anteil aus direkten Arbeiten mit den Materialien im Zuge der Verarbeitung ergibt, sowie der internen Exposition durch Inhalation von auffliegendem Staub beim Öffnen der Materialgebände. Die sich ergebende Dosis durch Arbeiten mit Zirkonia für einen Ofenbauer beträgt demnach  $6,3 \mu\text{Sv}$  pro Arbeitsprozess von vier Stunden. Ausbrüche aus verschiedenen Schmelzöfen, welche zuvor mit zirkonhaltigem Feuerfestmaterial ausgekleidet waren, wurden gammaspektrometrisch analysiert (max. spez. Aktivität pro Radionuklid:  $0,11 \text{ Bq/g}$ ).



Um einen möglichst umfassenden und aktuellen Überblick über die in Bayern ansässigen Betriebe der oben aufgeführten Branchen zu bekommen, wurden für das vorliegende Untersuchungsvorhaben, neben einer ausführlichen Recherche im Internet, ergänzend die Gewerbeaufsichtsämter der Regierungsbezirke in Bayern angeschrieben. Diese leiteten die Anfrage an das bayerische Sozialministerium (StMAS) weiter, von dem Informationen zu den entsprechenden Betrieben bereitgestellt wurden. Schriftliche Anfragen in Form von branchenspezifischen Erhebungsbögen (Anhang I) wurden an folgende Industriezweige geschickt:

- Glasindustrie
- Gießereien
- Hersteller von technischer Keramik
- Feuerfeststoffindustrie / Schamottehersteller
- Sandstrahlbetriebe
- Strahlmittellieferanten

Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Übersicht Betriebe der Zirkon- und Zirkonium-Industrie

	Glas-industrie	Gießereien	Techn. Keramik	Feuerfeststoffe*	Strahlbetriebe	Strahlmittellieferanten	Gesamt
Anzahl der angeschriebenen Betriebe	90	82	71	33	84	1	361
Anzahl der Betriebe, welche zirkoniumhaltige Produkte in Verwendung haben	17	24	24	5	0	1	71
Anzahl der Betriebe, welche keine zirkoniumhaltigen Produkte verwenden	56	46	30	16	42	0	190
Keine Antwort erhalten oder Betrieb existiert nicht mehr	17	12	17	12	42	0	100
Anzahl der Betriebe, die vor Ort untersucht wurden/Anzahl der dabei genommenen Proben	1/1	4/15	8/32	1/10	2/6	1/3	17/67
Anzahl Betriebe die Proben bereitgestellt haben/Anzahl aller untersuchten Materialproben	1/1	4/15	8/32	1/10	5/12	1/3	20/73

\* Eine Vielzahl von Feuerfeststoffen konnte zudem im Zuge der Zementwerkeuntersuchungen beprobt werden.

Insgesamt wurden 361 Betriebe kontaktiert, von denen 71 angaben, zirkoniumhaltiges Material (Zirkon, Zirkonia oder andere) in ihrem Betrieb in Verwendung zu haben. 21 der angeschriebenen Unternehmen waren bereits 2010 insolvent. 190 Unternehmen teilten mit, dass keine zirkoniumhaltigen Materialien in Verwendung sind. 17 Betriebe wurden vor Ort untersucht und neben Materialproben Messungen der an verschiedenen Arbeitsplätzen herrschenden Gamma-Ortsdosisleistung vorgenommen. In Summe wurden 73 Materialproben gammaspektrometrisch untersucht, von denen ausgewählte Datensätze in den jeweiligen Unterkapiteln aufgeführt sind.

### 3.3 Glasindustrie

Zirkonia wird für die Herstellung von Zirkonglas verwendet. Es handelt sich dabei um ein Quarzglas ( $\text{SiO}_2$ ) mit 0,1 bis 2,5 % Zirkonia-Anteil. Der häufiger auftretende Fall in der Glasindustrie ist jedoch die Verwendung von zirkoniumhaltigen Stoffen als Feuerfestmaterialien, mit denen Glasschmelzwannen ausgekleidet werden. Es dient unter anderem der Ummantelung von radioaktiven Abfällen (z. B. Plutonium) zur Endlagerung.

#### 3.3.1 Erhebungsdaten

Sechs Glasschmelzbetriebe, in welchen zirkoniumhaltige Feuerfestmaterialien (FFM) zum Einsatz kommen, haben den Fragebogen an das LfU übermittelt. Nur ein Betrieb hat am Untersuchungsvorhaben nicht teilgenommen. Eine Übersicht ausgewählter Daten des Erhebungsbogens (Anhang I) ist in Tab. 2 wiedergegeben.

Tab. 2: Erhebungsdaten der Glasschmelzbetriebe

Betrieb	Verbaute FFA [t]	Zirkonanteil in FFM [%]	Entsorgungsintervalle FFM [a]	Masse Entsorgung FFM [t/a]	Entsorgungsweg FFM	Aufenthaltsdauer FFM [h/a]
ZG01	106	ca. 36	8-10	ca. 10	Wiederverwertung	-
ZG02	465	33	4	100-110	Wiederverwertung/UTD*	-
ZG03	50	35	4-5	15-20	Wiederverwertung	-
ZG04	1500	15-45	10	150	Wiederverwertung	max. 100
ZG05	60	k. A	1	0,2	Deponie	37
ZG06	2000	k. A	0,25	100	Wiederverw./Deponie	250

\* UTD = Untertagedeponie

Die Massen an verbaulichem Feuerfestmaterial (FFM) reichen von 50 bis 2000 Tonnen. Der Zirkonanteil in diesen Materialien beträgt 15 bis 45 %. Die Entsorgungsintervalle von FFM liegen über einen weiten Zeitraum von 0,25 bis 10 Jahren verteilt. Die zum Teil recht großen Massen an anfallendem FFM werden jedoch zum größten Teil einer Wiederverwertung bei den Feuerfestmaterialherstellern zugeführt. Reststoffe werden auf Deponien, zum Teil untertägig, entsorgt. In den Betrieben ZG01, ZG02 und ZG03 findet ein Aufenthalt in unmittelbarer Nähe zu den FFM, konstruktionsbedingt durch eine ca. 30 bis 50 cm starke Ummauerung der Glaswannen mit zirkoniafreiem Material und der starken Wärmeabstrahlung in diesem Bereich, während des Schmelzbetriebes nicht statt. In ZG04 kommen 100 h/a durch Kontrollgänge an den Wannan in 1 bis 2 m Entfernung zu Stande, ebenso 37 h in ZG05. 250 Arbeitsstunden, entsprechend 1 h je Schicht, verbringt ein Ofenbauer des Betriebes ZG06 in unmittelbarer Nähe der zirkoniumhaltigen FFM.

#### 3.3.2 Ortsbegehung und Messungen der ODL

In Betrieb ZG06 wurde eine Ortsbegehung mit Messung der an den Wannenelementen herrschenden Gamma-Ortsdosisleistung und einer Analyse der verbauten FFM vorgenommen.

Tab. 3: Gamma-Ortsdosisleistung in Betrieb ZG06 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

Abstand a [cm]	Glasschmelzwanne 1	Glasschmelzwanne 2	Lager Feuerfeststeine
8	-*	-*	0,85
50	0,47	0,12	0,48
Hintergrund	0,17 $\mu\text{Sv/h}$		

\* Messungen an den Oberflächen der Glasschmelzwannen entfielen aufgrund der hohen Temperaturen

In 50 cm Entfernung wurde an der Glasschmelzwanne 1 und an den gelagerten Feuerfeststeinen eine ODL von ca. 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  gemessen. Lang andauernde Arbeiten unmittelbar an den Glasschmelzwannen sind aufgrund der hohen Temperaturen nicht möglich.

### 3.3.3 Gammaskpektrometrische Untersuchungen

Die Ergebnisse der gammaskpektrometrischen Analyse des gebrauchten Feuerfestmaterials aus ZG06 sind in Tab. 4 aufgeführt.

Tab. 4: Spezifische Aktivitäten in FFM aus ZG06 [Bq/g]

Probe	Nuklide								
	U-Ra-Reihe			Th-Reihe			U-Ac-Reihe		
	U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
ZG06_1	1,5	1,5	1,3	0,73	0,255	0,24	0,23	0,071	0,069

Die höchsten spezifischen Nuklidaktivitäten finden sich in der U-Ra-Reihe mit 1,5 Bq/g für die Nuklide U-238 und Th-234. In der Th-Reihe liegen spezifische Aktivitäten um 0,3 Bq/g vor. Da die Aktivitäten der Nuklide der einzelnen Zerfallsreihen für die ermittelten Werte miteinander im Gleichgewicht sind, kann dies auch für die Aktivitäten von Th-234 und Pb-210 angenommen werden.

### 3.3.4 Expositionsrechnung

Aus dem ermittelten ODL-Wert in 50 cm Entfernung zum FFM von 0,48  $\mu\text{Sv/h}$ , der jährlichen Aufenthaltszeit von 250 Stunden und den Ergebnissen der Radionuklidanalyse (Tab. 4) wurde die zu erwartende maximale Jahresexposition eines Ofenbauers bei Arbeiten mit zirkoniumhaltigem Material abgeschätzt (Tab. 5).

Tab. 5: Expositionsabschätzung ZG06

Tätigkeitsbereich	Ofenausmauerung, Lager FFM, Transport
Atemrate [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	250
Staubgehalt der Luft [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	0,001
Ingestion [g/h]	0,006
ODL [ $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ]	0,48
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [mSv/a]	0,120 / 0,011 / 0,003
<b>Effektive Dosis für einen Ofenmaurer [mSv/a]</b>	<b>0,134</b>

### 3.3.5 Zusammenfassung – Glasschmelzbetriebe

Die maximal ermittelten Aktivitäten der Nuklide des verwendeten Feuerfestmaterials liegen oberhalb von 1 Bq/g. Es fallen zum Teil erhebliche Massen an Feuerfestmaterial bei Instandsetzungsarbeiten der Glasschmelzwannen an. Ca. 80 % der Betriebe gaben für diese Materialien eine Wiederverwertung, zumeist durch den Feuerfestmaterialhersteller, an. Reststoffe werden einer Deponierung zugeführt.

Die Arbeit mit den zirkoniumhaltigen Feuerfestmaterialien nimmt ca. ein Achtel der jährlichen Arbeitszeit eines Ofenbauers bzw. Arbeiters eines Glasschmelzbetriebes in Anspruch. Direkter Kontakt oder länger andauernde Aufenthalte in unmittelbarer Umgebung zu den Wannenausmauerungen finden aufgrund der herrschenden Temperaturen nicht statt. Die errechnete Strahlenexposition beträgt 0,134 mSv/a und unterschreitet das Dosiskriterium von 1 mSv/a deutlich.

### 3.4 Gießereien

Zirkoniumhaltige Materialien dienen in Gießereien aufgrund ihrer sehr guten thermischen Stabilität ebenfalls als Feuerfestmaterialien (FFM). Diese werden genutzt, um Kessel, Gusspfannen, Schmelzwannen und Öfen auszukleiden. Des Weiteren kommen sie bei der Herstellung von Formteilen und wesentlich häufiger als Schlichte zum Einsatz. Schlichte wird im Metallgussverfahren zum Überziehen von Formteilen verwendet, um deren Hitzebeständigkeit bzw. Wärmeisolierung zu verbessern, die poröse Formteilerfläche zu glätten oder um eine bessere Trennung zwischen Form- und Gussteilen zu erreichen. Dazu werden fein gemahlene feuerfeste bis hochfeuerfeste Stoffe, wie Zirkonia, als Grundmaterial benutzt. Die Überzugsschicht isoliert die Oberfläche der Gußform und schützt vor thermischer Belastung durch die Metallschmelze [Zircon Minerals Committee, 2012]. Das Aufbringen von Schlichte erfolgt zumeist im Tauchverfahren oder durch Aufspritzen. Vereinzelt wird die Schlichte mit dem Pinsel aufgetragen.

#### 3.4.1 Erhebungsdaten

Von 13 Gießereibetrieben wurde der Erhebungsbogen (Anhang I) ausgefüllt. Ausgewählte Daten der Erhebung sind in Tab. 6 zusammengestellt.

Tab. 6: Erhebungsdaten der Gießereien

Betrieb	Verwendung Zr-Materialien (Arbeitsplatz)	Verbrauch [t/a]	Entsorgungsintervalle	Masse Entsorgung [t/a]	Entsorgungsweg	Aufenthalt an relevanten Arbeitsplätzen [h/a]
ZGi01	FFM; Schlichte	13; 5	wöchentlich	30.000 (Altsand)	Verwertung auf Deponie	73; 83
ZGi02	Schlichte	52	wöchentlich	k. A.	chemische Aufbereitung	ca. 83
ZGi03	Schlichte	0,05	z. Zeit nicht	500 (Altsand)	Regenerierung, Deponie	50
ZGi04	Schlichte	0,8	monatlich	2000 (Altsand)	Verwertung Zementindustrie	92
ZGi05	Schlichte	1	jährlich	2-3 (Filterstaub)	Regenerierung, Deponie	500
ZGi06	Schlichte	100	monatlich	k. A.	Regenerierung; Deponie	100
ZGi07	FFM (5 % Zirkon)	16	k. A.	k. A.	Deponie	23
ZGi08	Schlichte	2	monatlich	450 (Altsand)	Deponie	125
ZGi09	Schlichte	0,7	quartalsweise	0,7	Deponie	max. 500
ZGi10	Zirkonsand; Schlichte	10; k. A.	wöchentlich	1500 (Staub); 1000 (Altsand)	Regenerierung, Bergversatz	25; 500
ZGi11	FFM; Schlichte	insg. 30	wöchentlich	30	Regenerierung, Deponie	k. A.; 800
ZGi12	Legierung; Schlichte	ca. 200	-	-	Verkauf; Regenerierung	96
ZGi13	FFM; Zirkonsand	80; 0,3	wöchentlich	80	Verwertung im Straßenbau	k. A.; 1300

Die zirkoniumhaltigen Materialien finden in Gießereien überwiegend Anwendung als Schlichte. Die benötigten Massen decken dabei einen Bereich von 50 kg bis zu 100 Tonnen ab. Eine Entsorgung erfolgt zumeist als geringfügige Beimengung in Altsanden oder Staubsanden, die aus einer Regenerierung der Sande und Schlichte resultieren. Können die Materialien einer Verwertung nicht zugeführt werden, so erfolgt die Deponierung. Die Aufenthaltszeiten in der Nähe der zirkoniumhaltigen Materialien unterscheiden sich zwischen den Betrieben erheblich. Zeiten von 23 h/a bis zu 1300 h/a wurden angegeben.

### 3.4.2 Ortsbegehung und Messungen der ODL

In fünf Betrieben konnte eine Ortseinsicht durchgeführt und Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung (ODL) an verschiedenen Arbeitsplätzen vorgenommen werden. Eine Übersicht über ermittelte Werte ist in Tab. 7 gegeben.

Tab. 7: Gamma-Ortsdosisleistung in Gießereien [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

Betrieb	ZGi10		ZGi11		ZGi12		ZGi13	
Abstand a [cm]	Schlichte-becken	Lager-platz	Lager-platz	Schlichte-becken	Schlichte-fass	Schlichte-becken	Lager FF-Steine	Lager Zir-konsand
8	-	1,0	0,6	0,42	0,20	0,73	0,19	0,95
50	0,3	0,45	0,28	0,16	0,14	0,22	0,15	0,25
100	0,13	0,3	0,13	0,11	0,12	0,16	0,13	0,13
HG*	0,040		0,068		0,050		0,053	

\*HG = Hintergrund

Unmittelbar an den Oberflächen großer Mengen an zirkoniumhaltigen Materialien, z.B. im Lager oder an großen Schlichtebecken, treten ODL-Werte bis zu  $1 \mu\text{Sv/h}$  auf. In 50 cm Entfernung konnten am Lagerplatz in ZGi10 noch  $0,45 \mu\text{Sv/h}$  ermittelt werden. An den Schlichtebecken betrug die max. ODL in 50 cm Abstand noch  $0,3 \mu\text{Sv/h}$ .

### 3.4.3 Gammaskopmetrische Untersuchungen

In Tab. 8 sind die Ergebnisse zu den spezifischen Aktivitäten von 11 von insg. 15 Materialproben der Gießereien dargestellt. Die Ergebnisse der übrigen Proben, die allesamt geringere oder ähnliche spezifische Aktivitäten aufweisen, befinden sich im Anhang II.

Tab. 8: Spezifische Aktivitäten in Proben aus den Gießereien [ $\text{Bq/g}$ ]

		Nuklide								
Gießerei	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
ZGi10	Zirkonsand	6,2	6,5	5,6	6,7	1,1	1,3	1,3	0,28	0,26
	Sandstaub, Entsorgung	0,24	0,13	0,24	0,097	0,048	0,053	0,05	0,011	0,012
ZGi11	Schlichte	5,4	5,4	5,9	4,1	0,95	1,1	1,1	0,25	0,25
	FFM	1,7	2,3	1,2	2,3	0,27	0,31	0,3	0,08	0,06
	FFM-Ofenausbruch	1,6	2,6	1,3	2,7	0,24	0,29	0,28	0,08	0,06
ZGi12	Schlichte	4,9	4	5,6	2	0,83	0,95	< 1,6	0,23	0,22
	Legierung (32 % Zr)	3,70	3,43	0,82	< 0,4	0,43	0,70	0,54	0,17	0,084
	Legierung (5 % Zr)	0,51	0,40	< 0,2	< 0,3	0,023	0,064	0,054	0,023	< 0,006
ZGi13	Zirkonsand	5,72	6,03	7,02	< 7,2	0,96	1,23	1,22	0,26	0,28
	FFM	0,36	0,25	0,26	0,13	0,27	0,31	0,30	0,017	< 0,009
	FFM-Ofenausbruch	0,21	-*	0,13	-*	0,14	0,16	0,14	0,0098	< 0,005

\*Aufgrund der unbekanntenen Elementzusammensetzung der Probe konnten einige Nuklide nicht bestimmt werden.

Bei den **Zirkonsanden** und den **Schlichten** treten die größten spezifischen Aktivitäten auf. Für die U-Ra-Reihe liegen die Werte zwischen 4 und 7 Bq/g. Eine Ausnahme bildet der Pb-210-Wert der Schlichteprobe aus ZGi12, der mit ca. 2,5 Bq/g nicht mit den restlichen Nukliden der U-Ra-Reihe im Gleichgewicht steht. In der Th-Reihe liegen die Aktivitäten für die Zirkonsande und Schlichten um 1 Bq/g und in der U-Ac-Reihe allesamt zwischen 0,2 und 0,3 Bq/g.

In der **Legierungsprobe** von ZGi12, die einen Zirkoniumanteil von 32 % besitzt, wurden Aktivitäten bis zu 3,7 Bq/g für das Nuklid U-238 ermittelt. Das daraus hergestellte Legierungsprodukt mit 5 % Zr zeigt nur noch Aktivitäten unterhalb von 1 Bq/g. Zwischen den Nukliden der Legierungen fallen starke Ungleichgewichte innerhalb der einzelnen Zerfallsreihen auf. Die Werte für Ra-226, Ra-228 und Pb-210 sind gegenüber den restlichen Nukliden der jeweiligen Zerfallsreihen stark verringert. Eine Ursache könnten nuklidspezifische Umverteilungen während der Verarbeitungs- und Darstellungsprozesse, bedingt durch unterschiedliche physikalische Eigenschaften der jeweiligen Metalle bzw. ihrer Verbindungen, sein.

Bei den **Feuerfestmaterialien** bewegen sich die Aktivitäten in Betrieb ZGi11 in der U-Ra-Reihe für das gebrauchte Material maximal bei 2,6 Bq/g für Th-234. Die Werte zwischen neuem FFM und Ofenausbruch sind größtenteils identisch. Bei den gebrauchten FFM in ZGi13 liegen die Aktivitäten bei ca. 0,2 Bq/g.

Auch bei dem zur Entsorgung vorgesehenen **Sandstaub** (ZGi10) mit geringfügigen Zirkonbeimengungen, liegen die spezifischen Aktivitäten im Bereich von 0,2 Bq/g.

### 3.4.4 Expositionsrechnung

Für relevante Arbeitsplätze (z. B. Schlichtebecken, Materiallager) der vier besuchten Betriebe wurde eine Expositionsrechnung vorgenommen (Tab. 9).

Tab. 9: Expositionsabschätzung ZGi10, ZGi11, ZGi12, ZGi13

Betrieb	ZGi10		ZGi11		ZGi12		ZGi13	
	Schlichte auftragen	Lager Zirkonsand	Schlichte auftragen	Lager Schlichte	Schlichte auftragen	Schlichte auffüllen	Arbeiten Zirkonsand	FFM Lager
Atemrate [m <sup>3</sup> /h]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	500	25	800	6	20	17	50	1250
Staubgehalt [g/m <sup>3</sup> ]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ingestion [g/h]	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
ODL [μSv/h]	0,30	0,45	0,16	0,28	0,14	0,22	0,25	0,15
Effektive Dosis [mSv/a]								
- ODL	0,150	0,011	0,128	0,002	0,003	0,003	0,013	0,188
- Inhalation	0,085	0,004	0,120	0,001	0,003	0,003	0,008	0,040
- Ingestion	0,023	0,002	0,028	-	0,001	0,001	0,002	0,005
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter [mSv/a]</b>	<b>0,258</b>	<b>0,017</b>	<b>0,276</b>	<b>0,002</b>	<b>0,007</b>	<b>0,007</b>	<b>0,023</b>	<b>0,232</b>

Die höchsten ermittelten Expositionen treten sowohl durch das Arbeiten mit Schlichte als auch mit Feuerfestmaterial auf. Die Höhe der Strahlenexposition wird dabei wesentlich von der Exposition gegenüber Gammastrahlung bestimmt. Das Maximum der Jahresexposition lag bei 0,276 mSv (Betrieb ZGi11).

### 3.4.5 Zusammenfassung – Gießereien

Am vorliegenden Untersuchungsvorhaben haben sich 13 Gießereien beteiligt. In vier Gießereien konnten Messungen und Probenahmen durchgeführt werden. Insgesamt wurden 17 Materialproben während den Ortsbegehungen genommen und gammaspektrometrisch untersucht.

Bei den Zirkonsanden treten zum Teil erhöhte Nuklidaktivitäten von bis zu 7 Bq/g Ra-226 auf. Nuklide aus der Th-Zerfallsreihe zeigen geringere Aktivitäten bis maximal ca. 1,3 Bq/g Th-228 und Ra-224.

Die zirkonhaltigen Feuerfestmaterialien zeigen, abhängig von Art und Menge des beigemischten Zirkons, teilweise erhöhte Aktivitäten oberhalb von 1 Bq/g, teilweise liegen die Aktivitäten aber auch deutlich darunter.

Es fallen Altsande und Sandstäube in zum Teil großen Mengen von mehreren tausend Tonnen pro Jahr zur Entsorgung an. Die Reststoffe zeigen jedoch nur noch sehr geringe spezifische Aktivitäten von weniger als 0,2 Bq/g, da im Verarbeitungsprozess der Schlichte und der Gussande der Anteil der Zirkonsande stark verdünnt wird.

Die für die vier besuchten Betriebe durchgeführten Expositionsberechnungen ergaben effektive jährliche Dosen zwischen 0,2 und 0,3 mSv, vor allem bei Arbeiten mit Schlichte oder in den Lagerstätten der Zirkonsande. Die effektive Dosis wird dabei hauptsächlich durch die direkte Strahlung hervorgerufen. Die maximale ermittelt Jahresexposition bei Arbeiten in Gießereien von 0,276 mSv/a überschreitet das Dosiskriterium von 1 mSv/a nicht. Damit bestätigen sich die bereits in [Mallick, 2004] ermittelten Ergebnisse.

## 3.5 Keramische Industrie und Keramikhersteller

Das größte Einsatzgebiet von Zirkon liegt in der Keramikherstellung für nichtindustrielle Produkte. Zirkon wird für Glasuren (mit einem Zirkonanteil von bis zu 20 %) auf Fliesen und Sanitärwaren verwendet. Dabei wird Zirkon als Zirkonmehl oder in Form einer Schmelze (10 - 20 % Zirkonanteil) der Glasur beigemischt. Es trägt unter anderem zur Beständigkeit der weißen Farbe, der Herstellung einer wasserabweisenden Schutzschicht, zur Erhöhung der Lebensdauer sowie zur dekorativen Gestaltung der Waren bei. Zirkonschmelze kommt außerdem bei der Herstellung von Porzellan mit einem Anteil von bis zu 15 % zum Einsatz [SELBY, 2006]

Technische Keramiken sind hochspezialisierte Produkte, nicht selten sogenannte „High End Technologies“. Aufgrund der bereits beschriebenen ausgezeichneten Materialeigenschaften eignen sich Zirkon und vor allem auch Zirkonia sehr gut für den Einsatz als Brennhilfsmittel und Hochtemperaturkeramik, z. B. als Düsenansätze in Schweißgeräten und als Einfassungen in formgebenden Verfahren bei der Bearbeitung von Metallschmelzen. Aufgrund seiner Materialhärte und der Eigenschaft, scharfkantige Bruchstellen zu bilden, werden Zirkon und Zirkonia ebenso als Schleifmittel eingesetzt.

### 3.5.1 Erhebungsdaten

Von 71 angeschriebenen Unternehmen wurden 54 Rückmeldungen erhalten. 24 Betriebe gaben zwar an, dass zirkoniumhaltiges Material verwendet wird, allerdings stellte nur die Hälfte dieser Betriebe umfangreiche Daten (z.B. Verbrauch, Entsorgungsmasse, Aufenthaltszeiten) zur Verfügung. In 8 Unternehmen konnten Messungen und Probenahmen vor Ort durchgeführt werden

In Tab. 10 sind ausgewählte Daten von Herstellern von technischen Keramikprodukten, in denen Zirkon und oder Zirkonia enthalten sind, aufgeführt.

Tab. 10: Erhebungsdaten - Technische Keramiken

Betrieb	Verbrauch an ZrO <sub>2</sub> /ZrSiO <sub>4</sub> [t/a]	Entsorgungsintervalle	Masse Entsorgung [t/a]	Entsorgungsweg	Aufenthalt an relevanten Arbeitsplätzen [h/a]	Arbeitsschutz (AS: Atemschutz; HS: Handschuhe)
ZK01	k. A.	jährlich	32 (1% ZrO <sub>2</sub> )	k. A.	300	HS
ZK02	15	quartalsweise	0,4	Hausmüll	250	AS/HS
ZK03	150	monatlich	1	Gewerbeabfall	2000	AS/HS
ZK04	0,15	k. A.	0,01	Deponie	-	AS
ZK05	1,5	k. A.	k. A.	Hausmüll	-	AS/HS
ZK06	40	-*	-	-	600	AS
ZK07	150	nach Bedarf	157 (20 % ZrO <sub>2</sub> )	Entsorgung, Verwertung	52	AS/HS
ZK08					1500	AS/HS
ZK09	150	-*	-	-	1500	nein
ZK10	4,4	nach Bedarf	k. A.	Gewerbeabfall	40	AS/HS
ZK11	< 1	-*	-	-	1	AS/HS
ZK12	< 1	halbjährlich	0,015	Rückgabe Lieferant	42	AS

\*Sämtliche Verschnitte/Reste werden den Ausgangsstoffen erneut zugemischt.

Bei den eingesetzten Mengen an zirkoniumhaltigen Ausgangsstoffen werden von weniger als einer Tonne bis hin zu 150 Tonnen Jahresverbrauch angegeben. Die Entsorgung von Mengen mit weniger als einer Tonne geschieht zumeist als Gewerbe- oder Hausmüll. Größere Einheiten werden einer Verwertung in Fremdfirmen, beispielsweise Zement- oder Tonwerken, zugeführt und dienen dort als Zuschlagsstoffe zur Verbesserung der Feuerfestigenschaften. Die Angaben zu Aufenthaltszeiten an Arbeitsplätzen, wie Materiallagern oder Produktionsstätten, reichen von wenigen Stunden bis zu 2000 Arbeitsstunden. Das Tragen von persönlicher Arbeitsschutzkleidung (PSA) bei Arbeiten mit relevanten Materialien wird laut Angaben der Betriebe überwiegend praktiziert.

### 3.5.2 Ortsbegehung und Messungen der ODL

In acht Betrieben wurde eine Ortseinsicht durchgeführt und Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung an Arbeitsplätzen vorgenommen. Die ermittelten ODL-Werte sind in Tab. 11 aufgelistet.

Tab. 11: Spezifische Aktivitäten in technischen Keramiken [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

Betrieb	ZK01		ZK02		ZK03		ZK05		ZK06		ZK07		ZK08	
	Abstand [cm]	Lagerplätze ZrO <sub>2</sub>	Behälter; Produktion	Lager Zr-Korund	Silos, Mischerei	Lager ZrO <sub>2</sub>	Produkt	Lager	Produkt	Lager ZrO <sub>2</sub>	Produkt	Lager ZrO <sub>2</sub>	Aufbereitung	Lager ZrSiO <sub>4</sub>
8	0,76	0,16	0,38	0,15	0,080	0,11	0,15	0,17	1,1	0,19	1,1	0,56	0,90	0,40
50	0,40	0,12	0,19	0,13	0,073	0,073	0,10	0,10	0,35	0,06	0,47	0,38	0,56	0,40
100	0,28	0,11	0,14	0,12	0,073	0,073	0,10	0,10	0,20	0,06	0,33	0,25	0,47	0,40
HG*	0,11		0,060		0,073		0,10		0,041		0,050		0,060	

\* Hintergrund

Die ODL-Werte in einer Entfernung von 50 cm liegen zwischen 0,06 bis 0,56  $\mu\text{Sv/h}$ .

Im Betrieb ZK03 und ZK05 herrschen bereits in einer Entfernung von 50 cm zu den NORM-Stoffen die natürlichen Hintergrundwerte von 0,073  $\mu\text{Sv/h}$ , bzw. 0,10  $\mu\text{Sv/h}$ . In Betrieb ZK04 trat weder an den zirkonia-haltigen Ausgangsstoffen noch an den Produkten eine Erhöhung gegenüber der Hintergrundaktivität auf.



Am Abwiege- und Abpackplatz in Betrieb ZK08 ist durch die umschließende Anordnung der NORM-Materialien um den Arbeitsplatz eine konstante Gamma-Ortsdosisleistung von 0,4  $\mu\text{Sv/h}$  messbar.

### 3.5.3 Gammaskpektrometrische Untersuchungen

Von acht Betrieben wurden Materialproben gammaskpektrometrisch untersucht. In Tab. 12 sind die Ergebnisse ausgewählter Proben aufgelistet.

Tab. 12: Spezifische Aktivitäten in technischen Keramiken [Bq/g]

Nuklide										
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
ZK01	Zirkonsand	4,6	7	8	< 2	0,73	1,2	1,2	0,21	0,4
	Produkt	1,5	1,5	1,0	< 2	0,21	0,20	0,19	0,07	0,06
	Ausschuss	3,8	2,6	2	< 0,6	0,57	0,51	0,53	0,17	0,15
ZK02	Zr-Korund (42% ZrO <sub>2</sub> )	2,2	2,4	2,0	< 4	0,148	0,240	0,23	0,10	0,10
	Zr-Korund ummantelt	0,96	1,2	0,62	< 0,9	0,248	0,30	0,29	0,044	0,040
	Schleifscheibe	0,64	0,39	0,29	< 0,2	0,178	0,199	0,18	0,029	0,023
ZK03	ZrO <sub>2</sub> (Probe 1)	< 0,2	< 0,23	0,10	< 2	0,0098	0,011	< 0,013	< 0,007	< 0,004
ZK04	ZrO <sub>2</sub>	< 0,09	< 0,1	< 0,01	< 0,6	< 0,002	0,0017	< 0,008	< 0,004	< 0,002
ZK05	ZrO <sub>2</sub> (Probe 3)	2,8	3,0	1,7	< 7	0,22	0,30	0,22	0,13	0,15
ZK06	ZrO <sub>2</sub> (Probe 3)	6,4	6,9	2	< 1	0,378	0,71	0,73	0,29	0,25
	Produkt	1,4	1,3	0,8	< 0,2	0,171	0,17	0,15	0,063	0,047
ZK07	ZrO <sub>2</sub> (Probe 3)	3,1	3,1	2,9	2,9	0,689	0,65	0,64	0,14	0,13
	Produkt	< 3	< 0,5	< 1	< 1	< 0,08	0,070	< 0,3	< 0,1	< 0,1
ZK08	ZrSiO <sub>4</sub> (Probe 3)	4,2	4,4	3,6	3,4	0,760	0,73	0,73	0,19	0,16

Die höchsten spezifischen Aktivitäten der untersuchten Materialien traten in der U-Ra-Reihe auf. Der ermittelte Maximalwert liegt hier bei 8 Bq/g für das Nuklid Ra-226. In der Th-Reihe konnte ein Maximalwert für dieselbe Probe von 1,24 Bq/g für das Nuklid Th-228 ermittelt werden.

Auffällig sind die zum Teil stark verringerten Aktivitätswerte der Nuklide Ra-226 und Pb-210, wie beispielweise in den Materialproben aus ZK06. Dies könnte durch unterschiedliche Herstellungsverfahren hervorgerufen worden sein (s. Kap. 3.1).

### 3.5.4 Expositionsabschätzung

Für acht Betriebe konnte eine Berechnung der Jahresexposition an unterschiedlichen Arbeitsplätzen erstellt werden. Im Falle des Betriebes ZK06 war die begleitende Messung über die gesamte Produktionsstrecke möglich (Tab. 13 und Tab. 14).

Tab. 13: Expositionsrechnung Hersteller technischer Keramiken Teil I

Betrieb	ZK01		ZK02		ZK03	
Tätigkeitsbereich	Trennsand auftragen	Lager Zirkonsand	Mischerei	Lager Zr-Korund	Aufbereitung	Lager ZrO <sub>2</sub>
Atemrate [m <sup>3</sup> /h]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	25	250	50	200	2000	125
Staubgehalt der Luft [g/m <sup>3</sup> ]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ingestion [g/h]	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
ODL in 50 cm Abstand [μSv/h]	0,12	0,40	0,13	0,16	0,073 (Hintergrund)	0,073 (Hintergrund)
Effektive Dosis [mSv/a]						
- ODL	0,003	0,100	0,007	0,032	0,146	0,009
- Inhalation	0,004	0,037	0,002	0,008	0,036	0,002
- Ingestion	0,001	0,007	0,001	0,004	0,032	0,002
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter [mSv/a]</b>	<b>0,008</b>	<b>0,144</b>	<b>0,010</b>	<b>0,044</b>	<b>0,214</b>	<b>0,013</b>

Tab. 14: Expositionsrechnung Hersteller technischer Keramiken Teil II

Betrieb	ZK06	ZK07		ZK08	
Tätigkeitsbereich	Komplette Prozessstrecke	Lager ZrO <sub>2</sub>	Aufbereitung	Lager ZrSiO <sub>4</sub>	Abwiegeplatz
Atemrate [m <sup>3</sup> /h]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	601	10	42	50	1500
Staubgehalt der Luft [g/m <sup>3</sup> ]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ingestion [g/h]	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
ODL in 50 cm Abstand [μSv/h]	0,059 – 0,35	0,47	0,38	0,56	0,40
Effektive Dosis [mSv/a]					
- ODL	0,074	0,005	0,016	0,028	0,600
- Inhalation	0,061	0,001	0,001	0,005	0,164
- Ingestion	0,002	< 0,001	0,001	0,002	0,039
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter [mSv/a]</b>	<b>0,137</b>	<b>0,006</b>	<b>0,018</b>	<b>0,035</b>	<b>0,803</b>

Die errechneten Jahresexpositionen liegen zwischen 0,006 und 0,803 mSv/a.

Die für Arbeiten in Betrieb ZK03 ermittelte Exposition von 0,214 mSv/a ergibt sich lediglich durch die natürliche Hintergrundstrahlung von 0,073 μSv/h in Verbindung mit langen Aufenthaltszeiten. In ZK04 lagen sämtliche, auch in unmittelbarer Entfernung zu den zirkoniumhaltigen Stoffen ermittelten ODL-Werte im Bereich des natürlichen Hintergrunds. Daher wird für ZK04 keine Expositionsrechnung durchgeführt. In ZK05 konnte in der für die Expositionsrechnung relevanten Entfernung von 50 cm lediglich die örtliche Hintergrundstrahlung (0,10 μSv/h) gemessen werden. Eine feststellbare Exposition durch Arbeiten mit den zirkoniumhaltigen Keramikmaterialien wird somit nicht verursacht. Daher wurde auch hier keine Abschätzung der Exposition durchgeführt.

Für die Expositionsrechnung bei Arbeiten im Betrieb ZK06 konnten während eines kompletten Produktionszyklus ODL-Werte an verschiedenen Arbeitsplätzen aufgenommen werden. Diese lagen zwischen 0,059 und 0,35 μSv/h und ergaben unter der Annahme, dass alle Arbeitsschritte von derselben Person durchgeführt wurden, eine Jahresexposition von 0,137 mSv.

Die höchste ermittelte Jahresexposition ergab sich in Betrieb ZK08 mit 0,803 mSv. Dort werden Rohstoffe in unmittelbarer Nähe zum Abwiegeplatz gelagert. Dadurch wird die Strahlenexposition zu 75 % durch die Gamma-ODL verursacht.

### 3.5.5 Zusammenfassung – Technische Keramiken

Im Rahmen des Untersuchungsvorhabens konnten von 12 Herstellern technischer Keramiken NORM-relevante Informationen erhalten und in acht Unternehmen Messungen der ODL und Probenahmen durchgeführt werden.

Die Ausgangsstoffe für technische Keramiken zeigen dabei teilweise erhöhte Werte, mit einer maximalen Aktivität von ca. 8 Bq/g für Ra-226 (ZK01). In den Produkten treten Aktivitäten bis ca. 1,5 Bq/g und in anfallenden Rest- und Ausschussstoffen bis knapp 5 Bq/g (ZK01) auf. Keramischer Ausschuss wird oftmals wieder zu 100 % den Ausgangsstoffen zugemischt. Anfallende Reststoffe werden deponiert oder dienen als Zuschlagstoffe in der Zementindustrie.

Ungleichgewichte zwischen den Nuklidaktivitäten innerhalb einer Zerfallsreihe, bzw. stark verringerte Aktivitäten für Ra-226 und Pb-210 wurden festgestellt. Sie könnten durch das Einwirken von hohen Temperaturen während der Aufarbeitung der Zirkon und Zirkonia enthaltenden Materialien im elektrischen Lichtbogen hervorgerufen worden sein.

Die für fünf Betriebe errechneten Expositionen liegen meist deutlich unterhalb von 1 mSv/a. Ausnahme ist ein Betrieb mit einer ungünstigen Anordnung des Arbeitsplatzes (ZK08). Hier wurde eine Exposition von ca. 0,8 mSv/a errechnet. Dem ALARA-Prinzip<sup>1</sup> sowie dem Minimierungsgebot könnte durch eine bessere räumliche Trennung von Wägeplatz und daneben gelagerten NORM-Stoffen entsprochen werden. Dies würde zu einer Verringerung der am Abpackplatz herrschenden Gamma-Ortsdosisleistung und damit zu einer Expositionsverringerng für die entsprechenden Arbeitnehmer beitragen.

In allen vor Ort untersuchten Betrieben konnte ein hohes Maß an Arbeitsschutz festgestellt werden. Von den übrigen Betrieben gaben alle bis auf einen an, bei Arbeiten mit NORM-Stoffen bzw. bei staubintensiven Arbeiten auf eine Einhaltung des Arbeitsschutzes zu achten.

## 3.6 Feuerfeststoffindustrie/Schamottehersteller

Feuerfeststoffmaterialien (FFM) finden in nahezu allen Hochtemperaturprozessen Verwendung und wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln umfangreich auf ihre spezifischen Aktivitäten und die von ihnen ausgehenden Gamma-Ortsleistungsdosen und die dadurch für die jeweiligen Ofenbauer entstehenden Expositionen untersucht. Ergänzend dazu wurde die Herstellung von Feuerfeststoffen mit zirkoniumhaltigen Materialien während einer Produktionskampagne eines Schamotteherstellers messtechnisch begleitet.

### 3.6.1 Erhebungsdaten

In dem untersuchten Betrieb findet die Herstellung von Feuerfestmaterialien auf Zirkonbasis in Abständen von etwa drei Jahren statt. Die Produktionsdauer liegt dabei bei ca. zwei Wochen. Es werden zwischen 100 bis 150 t Zirkon verarbeitet. Anfallende Reststoffe aus der Produktion werden vollständig wiederverwertet. Ofenausbruch wird etwa alle fünf Jahre in einem Umfang von max. 40 t nach vorhergehender Analyse entsorgt.

<sup>1</sup> As Low As Reasonably Achievable (ALARA)

### 3.6.2 Ortsbegehung und Messungen der ODL

Tab. 15: Ergebnisse ODL-Messungen Schamottehersteller ZF01 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

Abstand a [cm]	Rohstoff- einwaage [M 1]	Behälter Edukte [M 2]	Trocknung, Edukte [M 3]	Einfülltrichter Ofen [M 4]	Ofen, außer- halb [M 5]	Produktlager [M 6]
8	0,150	0,430	0,270	0,120	0,060	0,90
50	0,060	0,190	0,250	0,060	0,060	0,60
100	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,30
Hintergrund	0,060 $\mu\text{Sv/h}$					

An den Messpunkten M 2, M 3 und M 6 wurde in 50 cm Abstand zu den NORM-Materialien noch eine Gamma-Ortsdosisleistung oberhalb des herrschenden Hintergrundniveaus von 0,060  $\mu\text{Sv/h}$  gemessen. Relevante Aufenthaltszeiten ergeben sich für den Behälter mit den Ausgangsstoffen (M 2) mit 25 Stunden pro Produktionszyklus und am Produktlager (M 6) mit 125 Stunden pro Jahr.

### 3.6.3 Gammaskopmetrische Untersuchungen

Materialproben aus den unterschiedlichen Prozessabschnitten wurden gammaskopmetrisch untersucht. Ebenso wurden die an einer Atemschutzmaske abgeschiedenen Staubpartikel untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 16 aufgelistet.

Tab. 16: Spezifische Aktivitäten in Proben von Schamottehersteller ZF01

Probe	Nuklide								
	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
	U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
Zirkonsand ( $\text{ZrSiO}_4$ )	4,2	3,8	3,5	3,5	0,698	0,68	0,68	0,19	0,17
FFM vor Brennen (P1)	2,7	-	2,0	3,0	0,387	0,419	0,40	0,13	0,10
FFM nach Brennen	2,0	-	2,0	2,0	0,390	0,411	0,42	0,0093	0,12
FFM Produkt	2,6	-	2,0	3,0	0,386	0,429	0,38	0,12	0,12
Mahlkugeln (ca. 68 % $\text{ZrO}_2$ )	0,011	< 0,1	< 0,09	< 0,4	0,011	0,00961	< 0,01	< 0,007	< 0,004
Staubpartikel Atemmaske	< 0,6	< 0,09	< 0,09	< 0,2	< 0,02	< 0,008	< 0,08	< 0,03	< 0,03

Für das Ausgangsmaterial und die verschiedenen Zusammensetzungen des FFM während der einzelnen Schritte des Produktionsprozesses lagen die ermittelten spezifischen Aktivitäten in der U-Ra-Reihe zwischen 2 und 3 Bq/g und in der Th-Reihe bei ca. 0,4 bis 0,8 Bq/g. Die höchsten spezifischen Aktivitäten fanden sich mit ca. 4 Bq/g für U-238 bei den Mahlkörpern. Mahlkörper verbrauchen sich jedoch während des Mahlvorganges vollständig und werden nach Bedarf lediglich ergänzt. Eine Entsorgung geschieht nicht. Für die geringe Menge an Staubpartikeln an der Staubmaske lagen sämtliche Aktivitätswerte unterhalb der nuklidbedingten Nachweisgrenze.

### 3.6.4 Expositionsabschätzung

Für die Messpunkte 2 und 6 wurde eine Abschätzung der bei Arbeiten an diesen Plätzen zu erwartenden Exposition vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tab. 17 dargestellt.

Tab. 17: Expositionsrechnung Schamottehersteller

Tätigkeitsbereich	Behälter Edukte [M 2]	Produktlager [M 6]
Atemrate [m <sup>3</sup> /h]	1,2	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	25	125
Staubgehalt der Luft [g/m <sup>3</sup> ]	0,001	0,001
Ingestion [g/h]	0,006	0,006
ODL [μSv/h] in 50 cm Abstand	0,19	0,60
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [mSv/a]	0,005 / 0,003 / < 0,001	0,075 / 0,014 / 0,004
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter [mSv/a]</b>	<b>0,008</b>	<b>0,093</b>

Für den Aufenthalt an den Behältnissen für die Ausgangsstoffe ergibt sich pro Produktionsprozess eine effektive Dosis von 0,008 mSv. Im Produktlager, das ganzjährig besetzt ist, ist je Arbeiter mit einer jährlichen Strahlenexposition von 0,093 mSv pro Jahr zu rechnen.

### 3.6.5 Zusammenfassung – Schamottehersteller

Das FFM wird im untersuchten Betrieb intervallweise in Abständen von ca. drei Jahren innerhalb von wenigen Wochen hergestellt. Die ermittelten maximalen Aktivitäten in der Produktion liegen sowohl für die Ausgangsstoffe, als auch für die Produkte zwischen 2 bis 3 Bq/g. Sämtliches Ausschussmaterial wird den Ausgangsstoffen beigemischt. Zirkoniumhaltige Hilfsstoffe, wie die eingesetzten Mahlkörper, werden während des Produktionsprozesses nach und nach vollständig verbraucht und mischen sich dem Produkt bei. Das in den werkseigenen Brennöfen verwendete FFM wird alle fünf Jahre mit einer Masse von 40 Tonnen nach vorangegangener Analyse auf einer Deponie entsorgt. Die Exposition durch NORM ist mit 0,008 mSv pro Produktionszyklus sehr gering. Auch bei den ganzjährlichen Arbeiten im Produktlager wird mit 0,093 mSv/a das Dosiskriterium von 1 mSv/a deutlich unterschritten.

## 3.7 Strahlverfahrenstechnik, Strahlbetriebe

Strahlverfahrenstechnik ist der Oberbegriff für Verfahren, bei denen mit Strahlmitteln eine Bearbeitung von Oberflächen stattfindet. Der häufig noch gebräuchliche Begriff „Sandstrahlen“ leitet sich von einem der ersten Strahlmittel, einfachem Quarzsand, ab. Aufgrund der Silikosegefahr (Staublunge) ist das Strahlen mit Quarzsand bereits seit 1975 nur noch unter speziellen Sicherheitsauflagen gestattet. Mittlerweile kommt ein großes Spektrum an Strahlmitteln in diversen Korngrößen zum Einsatz, z. B.:

- Glasperlen (Kugelgeometrie und Härte führen zu einer Verfestigung der bestrahlten Oberfläche)
- Hochofenschlacke (universelles billiges Material zur Entfernung von grobem Schmutz)
- Korund (scharfkantiges, sehr effektives und universelles Strahlmittel)
- Keramikugeln (sehr teures Strahlmittel, ebenfalls Verfestigung der bestrahlten Oberfläche)
- Kunststoffgranulat (schonendes Strahlmittel; entfernt Lacke ohne die Metalloberfläche anzugreifen)
- Naturstoffe: Walnussschalen, Maiskolbenschrot (ebenfalls sehr schonende Strahlmittel)
- Salz: Soda (billiges, schonendes Strahlmittel zur Lackentfernung, aufwendige Teilereinigung nötig)
- Trockeneis (teures, sehr schonendes Verfahren, Strahlmittelreste verdampfen restlos)

Diese Strahlmittelarten werden je nach Anforderung an die gewünschte Oberflächenbearbeitung ausgewählt:

- Reinigungsstrahlen (Abtragen von werkstofffremden Schichten)
- Strahlspanen (Abtragen von werkstoffeigenen Schichten)
- Oberflächenveredelungsstrahlen (Gewünschten optischen Effekt erreichen, Haftgrund schaffen)
- Kugelstrahlen (Verfestigung des Materials, Bruchfestigkeit verbessern)

Das jeweilige Strahlmittel wird dabei mittels Druckluft beschleunigt und auf das Werkstück "geschossen". Durch Variation von Druck, Strahlmittel, Entfernung und Einfallswinkel lassen sich gezielte Oberflächenbehandlungen erreichen [STAHL-INFORMATIONEN-ZENTRUM, 2010].

Das Strahlmittel wird während dieses Prozesses teilweise verbraucht. Beim Auftreffen auf das Werkstück zerbricht es in Fragmente. Je nach Härte des verwendeten Strahlmittels und der angewandten Bearbeitungsparameter kann das Strahlmittel mehrfach eingesetzt werden. So wird in der Praxis dasselbe Strahlmittel so lange unverändert erneut zur Oberflächenbearbeitung verwendet, bis es keinen ausreichenden Materialabtrag mehr erzeugt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das gebrauchte Strahlmittel in Staub-abscheidern (Zyklonen) von den kleinsten und unwirksamen Kornfraktionen abzutrennen und die Strahlmittelmenge nach Bedarf mit unverbrauchtem Strahlmittel zu ergänzen.

Die Entsorgung der nicht wieder verwendbaren Strahlmittelreste wird von Entsorgungsbetrieben vorgenommen und richtet sich nach Art des eingesetzten Strahlmittels und dem abgetragenen Material der bearbeiteten Werkstücke. Die Zuteilung eines Abfallschlüssels erfolgt hierbei auf Grundlage einer chemischen Analyse.

In Bezug auf NORM sind die Strahlmittel Korund und zirkoniumhaltige Keramik von Interesse. Externe Untersuchungen geben die Aktivitäten in Normkorund mit 0,3 - 0,4 Bq/g für die Nuklide U-238, Th-230, Ra-226, Th-232, Ra-228 und Th-228 an. Für keramisches Strahlmittel mit einem  $ZrO_2$ -Anteil von ca. 60 %, werden Aktivitäten um 4 Bq/g für Ra-226, 2,7 Bq/g für U-238 und Th-230 und ca. 0,7 Bq/g für Ra-228 und Th-228 genannt [GELLERMANN, 2012].

### 3.7.1 Erhebungsdaten

Insgesamt wurde an 84 Betriebe, die Strahlverfahrenstechniken anbieten, ein Erhebungsbogen versandt (Anhang I). 30 Betriebe gaben schriftliche, weitere 12 Betriebe telefonische Auskünfte über eine evtl. Verwendung von NORM als Strahlmittel. Von insgesamt 42 Unternehmen gaben 13 die Verwendung von korundhaltigem Strahlmittel an, von denen 9 einen ausgefüllten Erhebungsbogen bereitstellten. Zirkoniumhaltige Strahlmittel werden von keinem Betrieb eingesetzt.

Ausgewählte Erhebungsdaten der Betriebe finden sich in Tab. 18.

Tab. 18: Erhebungsdaten Strahlmittelbetriebe

Betrieb	Strahlmittelsorten*	Masse gelagertes Material [kg]	Anzahl der Beschäftigten
ZSM01	EDK, NK	200	5
ZSM02	NK	75	1
ZSM03	EDK, NK	4000	10
ZSM04	RB	5	1
ZSM05	EK	k. A.	21
ZSM06	NK	100	3
ZSM07	Schlacke (ca. 8 % Korund)	k. A.	2
ZSM08	Schlacke (ca. 24 % Korund)	400	19
ZSM09	NK	1000	1

\* EDK: Edelkorund; NK: Normkorund; RB: Rubinsand

Fünf dieser Betriebe, ZSM01, ZSM03, ZSM05, ZSM06 und ZSM07, stellten insgesamt 12 Proben zur gamma-spektrometrischen Analyse bereit. Um eine Aussage über die Aktivitäten von zur Entsorgung vorgesehenen Reststoffen machen zu können, wurden diese nach Möglichkeit ebenfalls beprobt. Die Ergebnisse für die Einsatz- und Reststoffe sind Tab. 19 zu entnehmen.

Tab. 19: Spezifische Aktivitäten in Proben aus den Strahlmittelbetrieben [Bq/g]

Nuklide										
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
ZSM_01	Edelkorund	< 0,05	< 0,007	< 0,008	< 0,009	< 0,002	< 0,0004	< 0,008	< 0,002	< 0,003
	Normalkorund	0,20	0,18	0,17	< 0,05	0,198	0,191	0,204	0,0091	< 0,02
	Reststoffgemisch	0,53	0,40	0,3	< 0,06	0,435	0,48	0,48	0,025	0,023
ZSM_03	Edelkorund	< 0,02	< 0,004	< 0,005	< 0,006	< 0,004	0,00021	< 0,002	< 0,0007	< 0,0008
	Normalkorund	0,46	0,44	0,42	< 0,03	0,506	0,478	0,493	0,021	0,025
	Reststoffgemisch	0,16	0,16	0,16	< 0,01	0,179	0,176	0,183	0,0074	0,0094
ZSM_05	Reste Edelkorund	0,077	0,067	0,075	0,0692	0,0430	0,0416	0,0401	0,0035	0,0035
ZSM_06	Normalkorund	< 0,2	0,090	0,06	< 0,02	0,0484	0,0460	0,038	< 0,008	< 0,005
	Reste Normalkorund	< 0,07	0,037	0,03	< 0,02	0,022	0,023	0,020	< 0,003	< 0,007
ZSM_07	Edelkorund	0,089	0,068	0,072	0,0447	0,0495	0,0485	0,0466	0,0041	0,0037
	Normalkorund	0,082	0,066	0,083	< 0,006	0,0473	0,0459	0,0457	0,0038	0,0035
	Reste Normalkorund	0,066	0,054	0,054	< 0,006	0,0334	0,0322	0,0313	0,0030	0,0028

Unter den untersuchten Materialproben wurden nur für die beiden Betriebe ZSM01 und ZSM03 spezifische Aktivitäten oberhalb von 0,2 Bq/g ermittelt. Ein Maximalwert ergab sich in der U-Ra-Reihe für das Reststoffgemisch des Betriebes ZSM03 mit ca. 0,5 Bq/g für U-238.

Die untersuchten Materialproben wiesen innerhalb der Zerfallsreihen weitestgehend ein radiologisches Gleichgewicht auf. Eine Ausnahme bildete hierbei erneut das Nuklid Pb-210. Es zeigte in allen Proben von Normalkorund stark verringerte und sämtlich unterhalb der Nachweisgrenze liegende spezifische Aktivitäten.

### 3.7.2 Ortsbegehung und Messungen der ODL

In den Betrieben ZSM01 und ZSM03 wurde eine Ortsbegehung mit Messung der an Arbeitsplätzen herrschenden Gamma-Ortsdosisleistung vorgenommen.

Tab. 20: Gamma-Ortsdosisleistungswerte - Betrieb ZSM01 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

Abstand a [cm]	Korundsäcke an Strahlkabine	Palette NK im Lager	Strahlmittelabfälle in Container (6-7 t)
4	0,270	0,320	0,160
50	0,110	0,132	0,105
100	0,079	0,100	0,090
Hintergrund	0,073 $\mu\text{Sv/h}$		

Die ermittelten ODL-Werte in 50 cm Entfernung bei Betrieb ZSM01 entsprechen weniger als der doppelten Hintergrundstrahlung. Die Aufbewahrung des Strahlmittels findet sowohl im räumlich getrennten Lager als auch in unmittelbarer Nähe zu den Strahlkabinen statt. Der wöchentliche Zeitaufwand für Strahlarbeiten an den Kabinen und den Transport von Strahlmittel aus und in das Lager wurde in Summe mit 6 Stunden pro Woche angegeben. Auf die Entsorgung von Reststoffen und den damit verbundenen Aufenthalt an den Abfallcontainern entfallen 0,5 Stunden pro Woche.

Tab. 21: Gamma-Ortsdosisleistungswerte - Betrieb ZSM03 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

Abstand a [cm]	Lager NK, Strahlkabine	Lager EDK, Strahlkabine	Strahlkabine	Zyklonabscheider	Strahlmittelreste, Bigbag
4	0,210	0,150	0,068	0,080	0,300
50	0,170	0,120	-	-	0,250
100	0,150	0,099	-	-	0,200
Hintergrund	0,068 $\mu\text{Sv/h}$				

In Betrieb ZSM03 wird das Strahlmittel in der Nähe der Strahlkabinen in Regalen gelagert. Ein Aufenthalt in unmittelbarer Nähe besteht daher für ca. 50 % der Arbeitszeit.

An den Bigbags mit Strahlmittelresten ergibt sich aufgrund der großen Menge an Material ein ODL-Maximum von 0,3  $\mu\text{Sv/h}$ . Der zeitliche Aufwand zum Wechseln der Bigbags ist allerdings sehr gering und liegt bei nur 5 Minuten pro Woche.

### 3.7.3 Expositionsrechnung

Für die Betriebe ZSM01 und ZSM03 wurde eine Abschätzung der bei Arbeiten zu erwartenden jährlichen Strahlenexposition vorgenommen.

Tab. 22: Expositionsrechnung – Betrieb ZSM01 und ZSM03

Tätigkeitsbereich	Lager, Palette NK (Betrieb ZSM01)	Strahlkabine, Lager NK (Betrieb ZSM03)
Atemrate [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	1,2	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	300	1000
Staubgehalt der Luft [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	0,001	0,001
Ingestion [g/h]	0,006	0,006
ODL [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,132	0,170
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [mSv/a]	0,040 / 0,007 / 0,001	0,170 / 0,026 / 0,003
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter [mSv/a]</b>	<b>0,048</b>	<b>0,199</b>

Es errechnen sich, unter Einbezug der natürlichen Hintergrundstrahlung, eine arbeitsbedingte Exposition von 0,048 mSv/a für Betrieb ZSM01 bzw. 0,199 mSv/a für Betrieb ZSM03, wobei mehr als 80 % der Strahlenexposition aus der externen Exposition (ODL) stammt.

### 3.7.4 Zusammenfassung

Aufgrund der nur geringen Anzahl an der Untersuchung teilnehmender Betriebe können die nachfolgenden Schlussfolgerungen lediglich als ein erster Anhaltspunkt für die tatsächlich herrschende Sachlage herangezogen werden.

Die maximal ermittelten spezifischen Radionuklidaktivitäten lagen bei ca. 0,5 Bq/g. Drei von zwölf Proben liegen in einem Bereich von 0,2 - 0,5 Bq/g. Worauf der Anstieg der Aktivität in dem gebrauchten Strahlmittel in Betrieb ZSM01 zurück zu führen ist, konnte nicht eindeutig geklärt werden, evtl. ist dieser auf chargenspezifische Schwankungen zurückzuführen.

Für die wesentlich geringeren Aktivitätswerte des Pb-210 können die hohen Temperaturen und unterschiedliche Verweildauern im elektrischen Lichtbogen bei der Darstellung der Korund-Strahlarten als Ursache angenommen werden [HASSE, 2008].

Die Ergebnisse der Expositionsabschätzungen liegen mit 0,048 mSv/a und 0,199 mSv/a weit unterhalb des Dosiskriteriums von 1 mSv/a.



Im Sinne des Minimierungsgebotes sollte eine Lagerung von nicht unmittelbar zum Einsatz kommenden Strahlmittel mit relevantem NORM-Anteil getrennt von den Strahlarbeitsplätzen und anderweitigen Aufenthaltsorten erfolgen.

### 3.8 Strahlmittellieferanten

Bei Strahlmittellieferanten werden große Mengen und ein breites Spektrum an Strahlmitteln gelagert und an Sandstrahlbetriebe geliefert.

In keinem der im vorangegangenen Kapitel untersuchten Sandstrahlbetriebe kommt zirkoniumhaltiges Strahlmittel zum Einsatz. Es wurde zur Untersuchung daher ein entsprechender Strahlmittellieferant ausgewählt, welcher unter anderem auch ein zirkoniumhaltiges Strahlmittel anbietet.

#### 3.8.1 Ortsbegehung und Messungen der ODL

Es wurden Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung an Lagerplätzen für Normalkorund (M 1), Edelkorund (M 2), recycelten Korund aus Schleifscheiben mit unterschiedlichen Korngrößen (M 3 und M 4) und an zirkoniumhaltigen Keramikugeln (M 5) vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tab. 23 zusammengestellt.

Tab. 23: Gamma-Ortsdosisleistungswerte Strahlmittellieferant ZL\_01 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

Abstand a [cm]	Normalkorund (M 1)	Edelkorund (M 2)	Korund aus Schleifscheiben	Korund aus Schleifscheiben	Keramikkugeln (M 5)
4	0,447	0,070	0,130	0,110	0,680
50	0,220	0,070	0,100	0,085	0,275
100	0,140	0,070	0,088	0,080	0,190
Hintergrund	0,070 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]				

Die höchsten ODL-Werte in 50 cm Entfernung traten an den Lagerplätzen für Normalkorund und für Keramikugeln auf.

Die Lagermasse für den Korund (M1) betrug ca. 3 t und für das zirkoniumhaltige Material (M5) etwa 0,3 t. Die Aufenthaltszeiten im Lager wurden mit wenigen Minuten pro Tag angegeben. In unmittelbarer Entfernung von 50 cm von den Keramikugeln wird für etwa 5 Minuten pro Tag, entsprechend 21 Stunden pro Jahr, gearbeitet.

#### 3.8.2 Gammaskopmetrische Untersuchungen

Der Normalkorund, das Korundregenerat aus Schleifscheibenresten und das zirkoniumhaltige Strahlmittel, welches ca. 65 % Zirkon enthält, wurden gammaskopmetrisch untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 24 aufgelistet.

Tab. 24: Spezifische Aktivitäten in Probenmaterialien von Strahlmittellieferant ZL\_01 [Bq/g]

Probe	Nuklide								
	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
	U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
Normalkorund	0,33	0,35	0,34	< 0,02	0,349	0,336	0,341	0,015	0,020
Korundregenerat	0,081	0,082	0,086	0,0092	0,0405	0,0396	0,0389	0,0037	0,0048
Keramikkugeln	3,0	2,8	2,5	< 0,8	0,582	0,57	0,57	0,14	0,13

Durch den Anteil an  $\text{ZrO}_2$  von 65 % in den Keramikugeln wurden bei diesen erwartungsgemäß die größten spezifischen Aktivitäten ermittelt. Sie lagen für die Nuklide der U-Ra-Reihe bei ca. 3 Bq/g.

Der Normalkorund zeigte maximale Aktivitäten zwischen 0,3 und 0,4 Bq/g für die U-Ra- und die Th-Reihe.

Die niedrigsten Werte wurden bei dem Korundregenerat gemessen und lagen sämtlich unterhalb von 0,2 Bq/g.

Die Pb-210 Werte sind in allen drei Proben stark verringert.

### 3.8.3 Expositionsrechnung

Für Arbeiten in unmittelbarer Umgebung zu dem zirkoniumhaltigen Strahlmittel wurde eine Expositionsrechnung erstellt (Tab. 25).

Tab. 25: Expositionsrechnung Strahlmittellieferant ZL\_01

Tätigkeitsbereich	Lager Keramikkugeln
Atemrate [m <sup>3</sup> /h]	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	21
Staubgehalt der Luft [g/m <sup>3</sup> ]	0,001
Ingestion [g/h]	0,006
ODL [μSv/h]	0,275
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [mSv/a]	0,006 / 0,002 / < 0,001
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter [mSv/a]</b>	<b>0,008</b>

Bei Arbeiten mit dem zirkoniumhaltigen Strahlmittel ergibt sich im Betrieb des Strahlmittellieferanten pro Jahr eine sehr geringe effektive Dosis von 0,008 mSv.

### 3.8.4 Zusammenfassung Strahlmittellieferanten

Die untersuchten Strahlmittelproben weisen für den Normalkorund leicht erhöhte spezifische Nuklidaktivitäten von ca. 0,35 Bq/g und für das keramische Strahlmittel erhöhte Werte von knapp 3 Bq/g auf. Die ermittelten ODL-Werte liegen mit 0,220 μSv/h und 0,275 μSv/h bei etwa dem drei- bis vierfachen des natürlichen Hintergrundniveaus von 0,070 μSv/h.

Durch die sehr kurzen Aufenthaltszeiten von max. 5 Minuten pro Tag in unmittelbarer Entfernung zu den relevanten Strahlmitteln ergibt sich daraus allerdings nur eine sehr geringe effektive Dosis von 0,008 mSv/a und Arbeiter. Bei dem untersuchten Strahlmittellieferanten ergäben sich daher, auch bei einem Vielfachen der angegebenen Aufenthaltszeiten, lediglich Expositionen weit unterhalb von 1 mSv/a.

## 3.9 Zirkoniumhaltige Abfälle

In regelmäßigen Abständen werden an Portalmessanlagen von Altmetallverwertern Gamma-Ortsdosisleistungswerte oberhalb des jeweiligen natürlichen Hintergrunds gemessen. Ursache dafür sind sehr oft zirkoniumhaltige Materialien, z. B. Hochspannungsisolatoren (Abb. 5), die Feuerfestauskleidung von Tresoren (Abb. 6), abrasivbeständige Rohrbeschichtung (Abb. 7) oder spezielle Bremsbeläge.



Abb. 5: Hochspannungsisolatoren    Abb. 6: Tresor mit FF-Auskleidung    Abb. 7: Rohrbeschichtung

Für den Container mit den Hochspannungsisolatoren (Abb. 5) wurden beispielsweise zwischen den Keramikelementen ODL-Werte von 0,10 bis 0,13  $\mu\text{Sv/h}$  und außerhalb des Behältnisses um 0,064  $\mu\text{Sv/h}$  ermittelt. Für den Tresor mit Feuerfestauskleidung aus Zirkon ergaben sich innerhalb des Tresors Orts-Dosis-Leistungswerte bis ca. 2  $\mu\text{Sv/h}$ .

Derartige Funde werden bis zur Klärung der weiteren entsorgungstechnischen Vorgehensweise auf dem Betriebsgelände des Verwerters und möglichst weit entfernt von den Arbeitsplätzen des Personals gelagert. Da die sich dabei ergebenden Aufenthaltszeiten des Personals in unmittelbarer Nähe zu den NORM-Stoffen nur sehr kurz sind und Zirkon in den Materialien fest gebunden ist, ist von einer Exposition deutlich unterhalb von 1 mSv/a auszugehen.

### 3.10 Zusammenfassung – Zirkon- und Zirkonium-Industrie

Es wurden die Branchen Glasindustrie, Gießereien, Herstellung von technischer Keramik, Schamotteherstellung, Sandstrahlereien und ein Strahlmittellieferant untersucht. 261 (72 %) der angeschriebenen Unternehmen haben sich an der Untersuchung zu NORM in der Zirkon- und Zirkonium-Industrie beteiligt. 71 Betriebe (27 %) gaben die Verwendung von NORM in ihren Arbeitsprozessen an.

Insgesamt wurden von 20 Betrieben 72 Materialproben bereitgestellt und gammaspektrometrisch untersucht. In 17 dieser Betriebe wurden im Rahmen des Untersuchungsvorhabens durch das LfU Messungen der Ortsdosisleistung vorgenommen und eine Abschätzung der zu erwartenden jährlichen Strahlenexposition durch die Arbeiten mit NORM erstellt.

Damit kann für den Industriezweig der Zirkon- und Zirkonium-Industrie ein guter Überblick über die gegenwärtige NORM-Situation in Bayern erhalten werden.

#### Spezifische Aktivität

Bei 49 % der Proben lagen die spezifischen Aktivitäten unter 1 Bq/g und bei 51 % zwischen 1 und 10 Bq/g. In der Zirkon- und Zirkonium-Industrie wurden keine spezifischen Aktivitäten über 10 Bq/g ermittelt.

Eine Übersicht der in den jeweiligen Industriebranchen ermittelten maximalen Aktivitäten zeigt Tab. 26.

Tab. 26: Maxima der ermittelten spezifische Aktivitäten

Branche	U-Ra-Reihe [Bq/g]		Th-Reihe [Bq/g]		U-Ac-Reihe [Bq/g]	
	Max.	Nuklid	Max.	Nuklid	Max.	Nuklid
Glasindustrie	1,8	Th-230	0,255	Ac-228	0,071	U-235
Gießereien	7,0	Ra-226	1,3	Pb-212	0,35	Pb-211
Keramische Industrie	8	Ra-226	1,2	Ra-224	0,42	Pb-211
Feuerfeststoffindustrie	4,8	Th-234	0,85	Ra-224	0,19	U-235
Strahlverfahrenstechnik	0,514	Pa-234m	0,506	Ac-228	0,025	Th-227
Strahlmittellieferanten	3,0	U-238	0,582	Ac-228	0,14	U-235

Diese untersuchten NORM-Stoffe stellen allesamt Ausgangsmaterialien dar, die während ihrer Verarbeitung durch Zugabe anderer Komponenten eine Verdünnung und damit eine Abnahme der spezifischen Aktivität erfahren. Beispielsweise konnte für Zirkonsand festgestellt werden, dass die spezifischen Aktivitäten von Ausgangsstoff zu Produkt stark gesunken waren. Ebenso, allerdings in geringerem Ausmaß, sanken die Werte in der Feuerfestindustrie.

Der Großteil der anfallenden Reststoffe in der Zirkon- und Zirkonium-Industrie wird wiederverwendet. Außerdem erfahren anfallende Reststoffe sowie Produkte zumeist eine starke Abnahme ihrer spezifischen Aktivitäten. Bei Gießereibetrieben nahmen bspw. die Aktivitätswerte im Sandstaub von ursprünglich ca. 6 Bq/g auf ca. 0,2 Bq/g ab. In Sandstrahlbetrieben waren die Aktivitätswerte allgemein sehr niedrig oder sind für gebrauchtes Strahlmittel sämtlich unterhalb von 0,2 Bq/g gesunken. Eine Ausnahme konnte nur in einem Fall festgestellt werden. Ob es sich dabei um chargenbedingte Schwankungen oder evtl. NORM-haltige Werkstücke, welche bearbeitet wurden, gehandelt hat, konnte nicht ermittelt werden. Spezifische Aktivitäten oberhalb von 1 Bq/g ergaben sich auch in diesem Reststoffgemisch nicht. Die gebrauchten FFM in Form von Ofenausbruch zeigen gegenüber den spezifischen Aktivitäten als Ausgangsstoff nur geringe Unterschiede.

### Gamma-Ortsdosisleistungswerte

Die Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung ergaben ein breites Spektrum an Messwerten. Es wurden sowohl sehr niedrige und sich kaum von der herrschenden Hintergrundstrahlung unterscheidende Werte (ca. 0,05 bis 0,10  $\mu\text{Sv/h}$ ), als auch ODL-Werte bis zum Zehnfachen der Hintergrundstrahlung (ca. 0,60  $\mu\text{Sv/h}$ ) ermittelt. Die höchsten ODL-Werte ergaben sich im Bereich der Lager für Rohstoffe und Produkte, da hier noch Einsatzstoffe mit höheren Aktivitäten bzw. große Mengen von Produkten vorliegen.

### Strahlenexposition

Die durch Arbeiten mit NORM-Stoffen für das Personal der Zirkon- und Zirkonium-Industrie zu erwartenden jährlichen Strahlenexpositionen lagen allesamt unter dem Dosiskriterium von 1 mSv/a. Es wurden Werte zwischen 0,002 und 0,803  $\mu\text{Sv/h}$  errechnet, letztere für den Abwiegeplatz eines Herstellers von technischer Keramik.

Das Schlichteauftragen und die Lagerung von Feuerfestmaterialien in Gießereien führen mit etwa 0,25 mSv/a zu einer Strahlenexposition, die über den sonstigen für die Zirkonindustrie ermittelten Strahlenexpositionen liegt.

Die Ermittlung der Strahlenexpositionen orientierte sich an den „Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität“ [BFs, 2010]. Die zu erwartenden Expositionen beinhalten daher den Beitrag der natürlichen, durch die Hintergrundstrahlung hervorgerufenen Strahlenexposition. Die rein aus dem Arbeiten mit NORM-Stoffen resultierenden Expositionen sind folglich geringer. Eine Überschreitung des Dosiskriteriums ist demnach für die berechneten Arbeitsszenarien sehr unwahrscheinlich.

Aus den an den Lagerplätzen gemessenen verhältnismäßig hohen Gamma-Ortsdosisleistungen ergibt sich im Einklang mit dem ALARA-Prinzip die strahlenschutzfachliche Empfehlung, durch sachgerechte Anordnung oder Abschirmung in den Lagerbereichen die Exposition durch Gammastrahlung zu minimieren.

## 4 Zementherstellung, Instandhaltung von Klinkeröfen

### 4.1 Einleitung

Zur Herstellung von Zement werden Kalkstein, Ton und Mergel sowie als Zuschlagstoffe Sand und Eisenerz bei Temperaturen bis 1450 °C „gebrannt“. Beim Brennprozess wird dem carbonathaltigen Gestein Kohlenstoffdioxid entzogen:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . Dieser Kalzinierungsprozess vollzieht sich beim Kalk in einem Temperaturbereich zwischen 900 – 1450 °C. Der daraus entstehende „Klinker“ wird zermahlen und durch Beimengung von Zuschlagstoffen wie Flugasche, Hüttensand, Eisenoxid oder noch ungebranntem Kalk an die gewünschten Produkteigenschaften angepasst [SCHTERNBOSCH / BRÄUTIGAM, 2000].

Zum Erreichen der nötigen Prozesstemperaturen und um eine kontinuierliche Prozessführung zu erlangen, sind die Klinkeröfen in Zementwerken als befeuerte Drehrohrelemente konzipiert. Als Heizmaterial dienen sowohl Primärbrennstoffe wie Kohle, Öl und Gas, als auch Sekundärbrennstoffe, wie Altholz und Autoreifen, letztere sind wegen der in ihnen enthaltenen Eisenkarkasse, aus der während der Verbrennung Eisenoxid freigesetzt wird, ein bevorzugter Brennstoff. In zunehmendem Maße wird auch Abfall zur Energieerzeugung eingesetzt. Die Anforderungen an die thermische Behandlung von Abfällen sind dabei durch die Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe in der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) geregelt und beziehen technische Parameter wie die Verbrennungstemperatur und die Verweilzeiten im Feuerungsraum mit ein [BIMSCHV, 2010].

Die Ausgangsstoffe durchwandern den Klinkerofen unter ständiger Temperaturerhöhung auf eine Flammenfront zu. Die Feuerung der Drehrohröfen befindet sich somit am Ofenausgang, an dem der fertig gebrannte Klinker entnommen wird. Um einen hohen Durchsatz durch den Drehrohröfen zu erreichen und dementsprechend die Verweilzeit der zu kalzinierenden Materialien so kurz wie möglich zu halten, wird das Ausgangsmaterial einer vorherigen Trocknung bei Temperaturen zwischen 400 bis 900 °C unterzogen. Dies wird unter einer gleichzeitigen Entstaubung der Abgase, in dem Brenneröfen vorgeschalteten Zyklonabscheidern realisiert. Hierzu wird überschüssige Wärme aus dem Brennprozess verwendet und im Bedarfsfall zugeführt.

Um eine temperaturbedingte Beschädigung der Anlagenteile zu vermeiden und um den Wärmeverlust gering zu halten, sind sowohl der Drehrohröfen als auch vorgeschaltete Trocknungseinrichtungen mit Feuerfestmaterialien ausgekleidet. Je nach herrschendem Temperaturbereich und mechanischer Beanspruchung des Prozessabschnittes kommen dabei unterschiedliche Materialien zum Einsatz. Sowohl Tonerde und gebranntes Magnesia als auch zirkoniahaltige Materialien finden Verwendung. Von der Bauart kommen sowohl Ausmauerungen mit Schamottesteinen, Spritz-Feuerfest-Auskleidungen als auch eine Kombination beider Varianten zum Einsatz. Je nach Material der Auskleidung können dabei im Falle von Tonerden oder zirkoniahaltigen Feuerfestmaterialien erhöhte Gehalte an natürlich vorkommenden Radionukliden auftreten. In Abb. 8 ist die Innenansicht eines Drehrohröfens mit zum Teil noch intakter Ausmauerung dargestellt. Der metallische Außenmantel des Ofens hebt sich dabei an der Ausbruchkante dunkel gegenüber der gräulichen Auskleidung ab. Ausgebrochenes Schamottmaterial zeigt Abb. 9.



Abb. 8: Innenansicht Drehrohröfen



Abb. 9: Ausgebrochenes Schamottematerial

## 4.2 Erhebungsdaten

An sechs in Bayern ansässige Zementhersteller wurde ein Erhebungsbogen versandt (Anhang I). Ein Unternehmen hat sich nicht an der Datenerhebung beteiligt. Ausgewählte Daten der fünf teilnehmenden Betriebe finden sich in Tab. 27.

Tab. 27: Erhebungsdaten - Zementhersteller

Betrieb	Anzahl Öfen	Ofendimension L / B [m]; V [m <sup>3</sup> ]	Wartungsintervall [Monate]	Schamottematerial/ Wartung* [t]
A	1	90 / 5,5; 2114	6-12	ca. 180
B	1	50 / 4; 628	6-12	ca. 400
C	1	84 / 5,2; 1784	12	k. A.
D	1	- / -; 1689	6-12	k. A.
E	2	70 / 4,7; 1214	6	ca. 150

\* Es handelt sich um stichpunktartige Massenangaben einzelner Instandsetzungsmaßnahmen.

Die Wartungsintervalle der Drehrohröfen bzw. der Austausch von Feuerfestmaterialien (FFM) liegen zwischen 6 bis 12 Monaten und finden vornehmlich während der Wintermonate statt, wenn die Zementnachfrage am geringsten ist. Die FFM werden zum Teil durch die jeweiligen Hersteller wiederverwendet oder deponiert.

In nahezu allen Betrieben wird ein einzelner Ofen zum Kalzinieren betrieben. Die Volumina der Öfen unterscheiden sich dabei beachtlich. Die Angaben zur Masse des während eines Wartungsintervalls ausgetauschten Feuerfestmaterials beziehen sich zumeist nicht auf einen kompletten Tausch des Feuerfestmaterials. Im Falle von Betrieb A fallen 180 t Schamottematerial bei einer Erneuerung der ersten 35 m der Drehrohrföfen ausmauerung an, so dass sich für den Fall eines kompletten Wechsels der Ausmauerung auf der gesamten Ofenlänge von 90 m ca. 540 t Schamottematerial ergeben würden. In Betrieb B sind dagegen die aufgelisteten 400 t Material im Zuge einer umfassenden Grunderneuerung angefallen. Um den Bedarf eines Zementherstellers an Feuerfestmaterial einschätzen zu können, kann als Anhaltspunkt die Menge an gebranntem Klinker als Orientierungswert dienen. Dabei kann angenommen werden, dass für eine Million Tonnen Klinker ca. 400 Tonnen Feuerfestmaterial anfallen.

Keiner der Betriebe setzt in seinen Öfen stark zirkoniumhaltiges Feuerfestmaterial ein. Lediglich bei zwei Unternehmen wird der Spritz-Feuerfestmasse Zirkon ( $ZrSiO_4$ ) im unteren Prozentbereich von 1-2 % zu Stabilisierungszwecken beigemischt. Die übrigen Unternehmen verzichten gänzlich auf Zirkon in

der Feuerfestmasse. Dies ist auf den hohen Preis dieses Zuschlagstoffes zurück zu führen. Informationen von Schamotteherstellern bestätigen diesen stark rückläufigen Trend. Als Ersatzstoff dient Siliziumcarbid. Zirkoniahaltige Produkte wie Feuerfestzement werden darüber hinaus in keinem der Betriebe hergestellt.

#### 4.2.1 Ortsbegehung und Messungen der ODL

In den Betrieben A und B konnte während der Wartungsarbeiten an den Drehrohröfen eine Ortsbegehung durchgeführt werden. In beiden Fällen war dadurch die Begehung der Drehrohröfen möglich. Die Ergebnisse der Gamma-Ortsdosisleistungsmessungen an verschiedenen Arbeitsplätzen sowie an teilweise unterschiedlich großen Mengen an FFM sind in Tab. 28 und Tab. 29 aufgelistet.

Tab. 28: Gamma-Ortsdosisleistung bei Zementhersteller A

Messort	Lagerort FFM-Paletten (3 bis 5 t)			Ofenausgang
Feuerfestmaterial	I	II	III	I
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Anteil [%]	80 – 85	47 – 51	50	80 – 85
SiO <sub>2</sub> – Anteil [%]	10 – 12	37 – 41	37	10 – 12
ODL in 4 cm [μSv/h]	0,280	0,250	0,170	0,420
ODL in 50 cm [μSv/h]	0,200	0,108	0,159	0,300
ODL in 100 cm [μSv/h]	0,116	0,098	0,130	0,290
Hintergrund	0,050 μSv/h			

Die Feuerfestmaterialien I, II, III standen zum Einbau in den Brennofen bereit und wurden zu Gebinden von mehreren Tonnen auf dem Werkshof gelagert. Der Hauptbestandteil in allen drei FFM ist Tonerde (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Das gebrauchte FFM am Ofenausgang war zum Zeitpunkt der Ortseinsicht bereits durch das FFM I ersetzt worden. Das FFM I konnte somit nicht nur gelagert auf Paletten, sondern ebenfalls im eingemauerten Zustand im Ofeninneren auf die von ihm ausgehende ODL untersucht werden. Dabei befand sich eine wesentlich größere Masse an FFM I bereits im eingebauten Zustand als auf dem Werkshof.

Die höchste Gamma-Ortsdosisleistung konnte an Feuerfestmaterial I innerhalb des Ofens mit 0,420 μSv/h ermittelt werden. Abweichende ODL-Werte bei ansonsten identischem Material können aus den bereits erwähnten unterschiedlich großen Materialmengen oder durch natürliche Schwankungen der Radionuklidgehalte resultieren.

Tab. 29: Gamma-Ortsdosisleistung bei Zementhersteller B

Messort	Bereich der Flammenfront	Ofenausgang
Feuerfestmaterial	Magnesia (MgO <sub>2</sub> )	Tonerde (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
ODL in 4 cm [μSv/h]	0,150	0,254
ODL in 50 cm [μSv/h]	0,130	0,147
ODL in 100 cm [μSv/h]	0,090	0,100
Hintergrund	0,070 μSv/h	

In Betrieb B zeigten sich ofenausgangsseitig die höchsten ODL-Werte. Es handelte sich dabei um Spritzfeuerfestmaterial aus Tonerde, an dessen Oberfläche Gamma-Ortsdosisleistungswerte von 0,254 μSv/h herrschten. In 50 cm Abstand beträgt die ODL noch etwa das Doppelte des Hintergrundwertes von 0,070 μSv/h.

#### 4.2.2 Feuerfestmaterialien

Die ermittelten spezifischen Nuklidaktivitäten in den verwendeten Feuerfestmaterialien der besichtigten Betriebe geben Tab. 30 und Tab. 31 wieder. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass der zu brennende Klinker von den Vorratssilos nacheinander Zyklonstufe 2 und dann Zyklonstufe 1 passiert und



von dort aus in den Drehrohrofen gelangt. In diesem bewegt sich das Material auf die in der Ofenmitte herrschende Flammenfront zu und verlässt nach dem Brennen den Drehrohrofen am Ofenausgang.

Tab. 30: Spezifische Aktivitäten in Feuerfestmaterialien von Zementhersteller A [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
A	FFM Zyklonstufe 1	< 0,2	0,048	< 0,1	0,32	0,0721	0,070	0,065	< 0,008	< 0,01
	FFM Zyklonstufe 2	< 0,1	< 0,02	< 0,02	0,68	0,011	0,018	0,019	< 0,006	< 0,008
	FFM Ende Zyklonstrecke Ofeneingang	< 0,1	0,068	0,09	0,15	0,0943	0,099	0,087	< 0,006	0,0048
	Schamottesteine Ofenmitte	< 0,07	< 0,01	< 0,02	< 0,01	0,0011	< 0,001	< 0,008	< 0,003	< 0,003
	Schamottesteine Ofenausgang	< 1	< 0,01	< 0,3	< 0,01	0,281	0,29	0,32	< 0,05	< 0,02

Bei Probenmaterialien aus dem Zyklonbereich handelt es sich um Spritz-Feuerfestmaterial. Bei den Schamottesteinen handelt es sich um quaderförmiges Feuerfestmaterial, das für die Messungen nicht weiter zerkleinert wurde. Die großen Nachweisgrenzen resultieren aus der für die Gammaspktrometrie teilweise ungünstigen Geometrie.

Gegenüber den restlichen Nukliden der U-Ra-Reihe treten in den Proben aus den Zyklonstufen deutlich erhöhte Pb-210-Werte von bis zu 0,68 Bq/g auf. Diese nehmen vom Eintrittspunkt in den Drehrohrofen über die beiden Zyklonstufen entgegen der Prozessstrecke hin zu (0,15 / 0,32 / 0,68 Bq/g). Am Ofeneingang wird eine zusätzliche Befuerung mit Altreifen betrieben, die eine Trocknung des Klinkers innerhalb der Zykzone bewirken soll. Unmittelbar nach dem Flambereich herrschen Temperaturen um 900 °C. Am Ende der Zyklonstrecke, wo Material aus den Silos eingebracht wird, besitzen die Feuerungsgase noch 400 °C.

An der Schamotteausmauerung am Ofenausgang treten für die Nuklide der Th-Reihe Aktivitäten von ca. 0,3 Bq/g auf.

Tab. 31: Spezifische Aktivitäten in Feuerfestmaterialien von Zementhersteller B [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
B	FFM Bereich der Flammenfront	< 0,03	0,014	< 0,03	0,204	0,0147	0,0147	0,014	< 0,002	< 0,003
	FFM Spritzauskleidung Ofenausgang	0,73	0,45	0,74	0,086	0,243	0,25	0,24	0,034	0,037

Die untersuchten Feuerfestmaterialien von Betrieb B bestehen aus gebranntem Magnesia und/oder Gemischen verschiedener Tonerdemineralien und Siliciumdioxid. Sie enthalten keine Beimengungen von zirkoniumhaltigen Materialien.

Das Feuerfestmaterial im Bereich der Flammenfront zeigt lediglich für das Nuklid Pb-210 eine leicht erhöhte Aktivität von 0,2 Bq/g.

Für die Spritzauskleidung am Ofenausgang finden sich in der U-Ra-Reihe ebenfalls leicht erhöhte spezifische Aktivitäten von ca. 0,8 Bq/g und in der Th-Reihe von ca. 0,25 Bq/g. Eine Ausnahme bildet in dieser Probe ein gegenüber den restlichen Nukliden der U-Ra-Reihe wesentlich verringerter Pb-210-Wert von 0,086 Bq/g.

### 4.2.3 Expositionsberechnung

Die Dauer der Wartungsarbeiten beträgt pro Instandsetzung ca. 7 bis 14 Tage. Für die Berechnung der Strahlenexposition wird eine Entfernung der Beschäftigten von 50 cm zu den FFM angenommen. In die konservative Berechnung gehen die höchsten bei dieser Entfernung ermittelten Gamma-Ortsdosisleistungen (ohne Abzug der natürlichen Hintergrundstrahlung) sowie die höchsten erhaltenen Aktivitätswerte der Feuerfestmaterialien ein. Für die Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten im Betrieb des Zementherstellers A ergibt sich auf diese Weise pro Arbeiter und Wartungsintervall eine effektive Dosis von 0,031 mSv (Tab. 32). Für den Zementhersteller B wurde pro Arbeiter und Wartungsintervall eine effektive Dosis von 0,014 mSv (Tab. 32) ermittelt.

Tab. 32: Expositionsabschätzung – Betriebe A und B

Tätigkeitsbereich	Klinkerofen, Betrieb A	Klinkerofen, Betrieb B
Atemrate [m <sup>3</sup> /h]	1,2	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	80	80
Staubgehalt der Luft [g/m <sup>3</sup> ]	0,001	0,001
Ingestion [g/h]	0,006	0,006
ODL [μSv/h]	0,30	0,15
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [mSv/a]	0,024 / 0,008 / 0,001	0,012 / 0,003 / 0
<b>Effektive Dosis pro Wartungsintervall und Arbeiter [mSv]</b>	<b>0,033</b>	<b>0,015</b>

### 4.3 Zusammenfassung – Zementherstellung, Instandhaltung von Klinkeröfen

Die untersuchten Feuerfestmaterialien wiesen vereinzelt leicht erhöhte spezifische Aktivitäten größer 0,2 Bq/g auf. Aktivitäten oberhalb von 1 Bq/g konnten nicht ermittelt werden.

Bei Zementhersteller A wurden die höchsten Gamma-Ortsdosisleistungswerte in 50 cm Abstand an der Schamotteausmauerung am Ofenausgang mit 0,30 μSv/h ermittelt. An den Lagerorten für FFM desselben Unternehmens lagen die ODL-Werte zwischen 0,10 bis 0,20 μSv/h. In Betrieb B wurden innerhalb des Ofens maximale ODL-Werte von ca. 0,15 μSv/h bestimmt.

Die ermittelten Expositionen bei Wartungsarbeiten liegen mit 0,033 mSv/a (Betrieb A) und 0,015 mSv/a (Betrieb B) weit unterhalb des Dosiskriteriums von 1 mSv/a. Auch bei mehreren Wartungsintervallen pro Jahr tritt damit keine Überschreitung des Dosiskriteriums von 1 mSv/a auf.

In einem Betrieb (Betrieb A) konnte gegenüber den restlichen Nukliden der U-Ra-Reihe ein deutlich erhöhter Pb-210-Wert ermittelt werden. Der Ursprungsort könnte dabei in den zu kalzinierenden Materialien als auch in den eingesetzten fossilen Brennstoffen liegen.

## 5 Wartung von Heizkesseln in Kohlekraftwerken

### 5.1 Einleitung

Bei der Verbrennung von Kohle fallen primär Schlacke und Asche als feste Rückstände an. In Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) wird zudem Gips durch Umsetzung der Schwefeloxide mit gebranntem Kalk generiert. Ein exemplarisches Beispiel für die Massenflüsse innerhalb eines Kohlekraftwerks gibt Abb. 10.

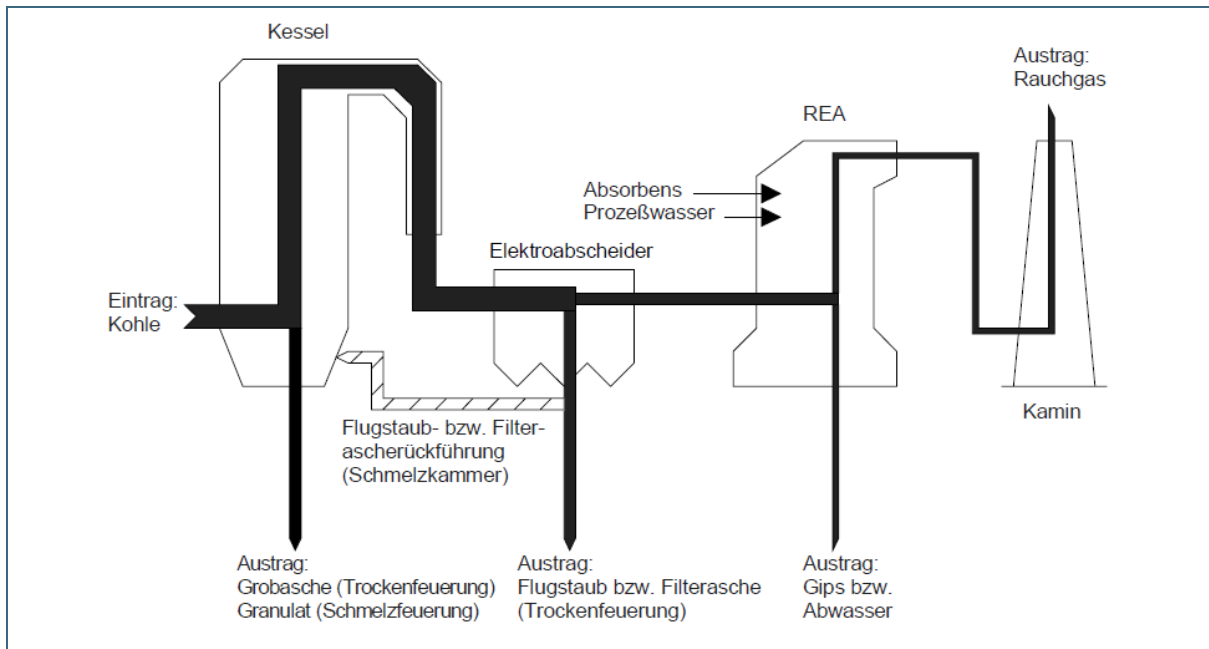


Abb. 10: Schematische Darstellung des Massenflusses durch ein Kohlekraftwerk [O. RENTZ, 2002]

In die Wände des Kessels sind Rohre zur Wärmeaufnahme integriert. Für eine möglichst effiziente Nutzung der Verbrennungsenergie schließen sich dem Kessel mehrere Wärmetauscher, wie Überhitzer und Vorwärmer, an. In diesen sind die wasserführenden Rohre für einen besseren Wärmeaustausch nicht auf einer Fläche, sondern innerhalb des Raumes verlegt. Die Verbrennungsgase umströmen die Rohre auf diese Weise komplett.

Zur Verbrennung der Kohle werden unterschiedliche Feuerungsarten angewandt. Diese beeinflussen die Massenströme innerhalb des Kraftwerks entscheidend [MAYR, 2009].

Bei der Rostfeuerung durchläuft die Kohle auf einem metallischen Förderband den Heizkessel (Abb. 11). Die Schichtdicke beträgt einige Dezimeter. Die Verbrennung findet dabei auf dem Förderband unter kontinuierlicher Fortbewegung statt. Nach Verbrauch aller brennbaren Bestandteile werden die resultierende Schlacke und grobe Asche am Ende des Kessels abgeführt.

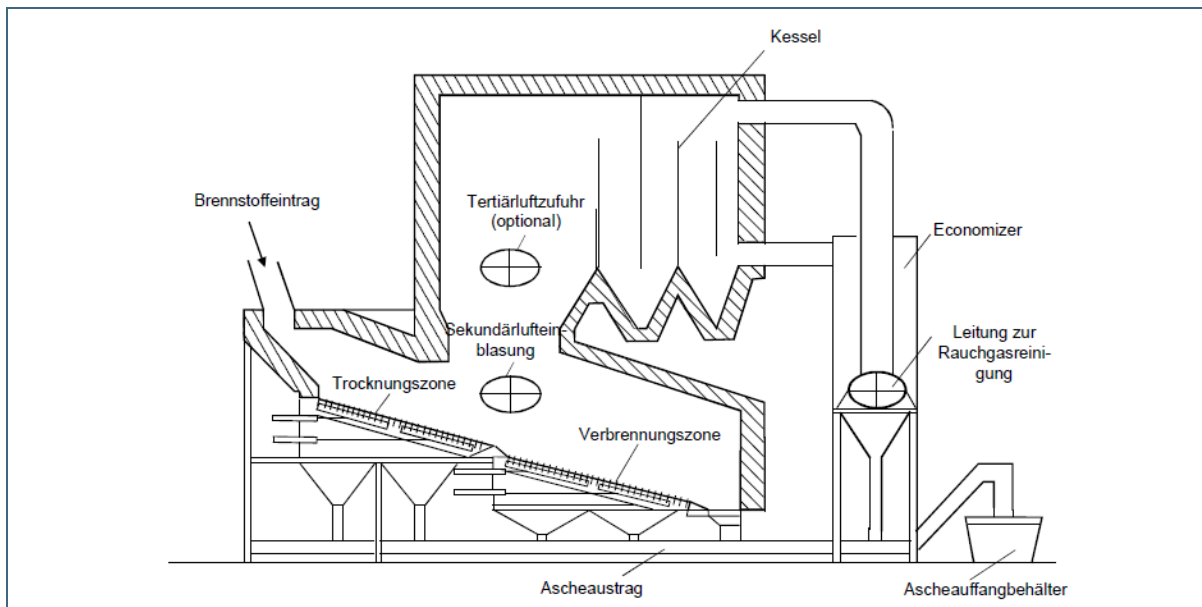


Abb. 11: Rostfeuerung [O. Rentz, 2002]

Bei der Staubfeuerung wird die Kohle dagegen vor der Verbrennung gemahlen und pneumatisch in den Kessel eingeblasen. Diese Art der Brennstoffzufuhr wird daher auch als Einblasfeuerung bezeichnet (Abb. 12). Die Verbrennung der Kohle erfolgt innerhalb eines relativ großen Volumens des Heizkessels, die Brennstoffdichte ist dort dementsprechend wesentlich kleiner als bei der Rostfeuerung. Das vorherige Zerkleinern und die starke Verwirbelung des Brennstoffes resultiert in wesentlich kleineren Partikelgrößen der Verbrennungsrückstände. Das entstehende Abgasaaerosol unterscheidet sich daher in Zusammensetzung und Menge der Staubfracht stark von dem der Rostfeuerung.

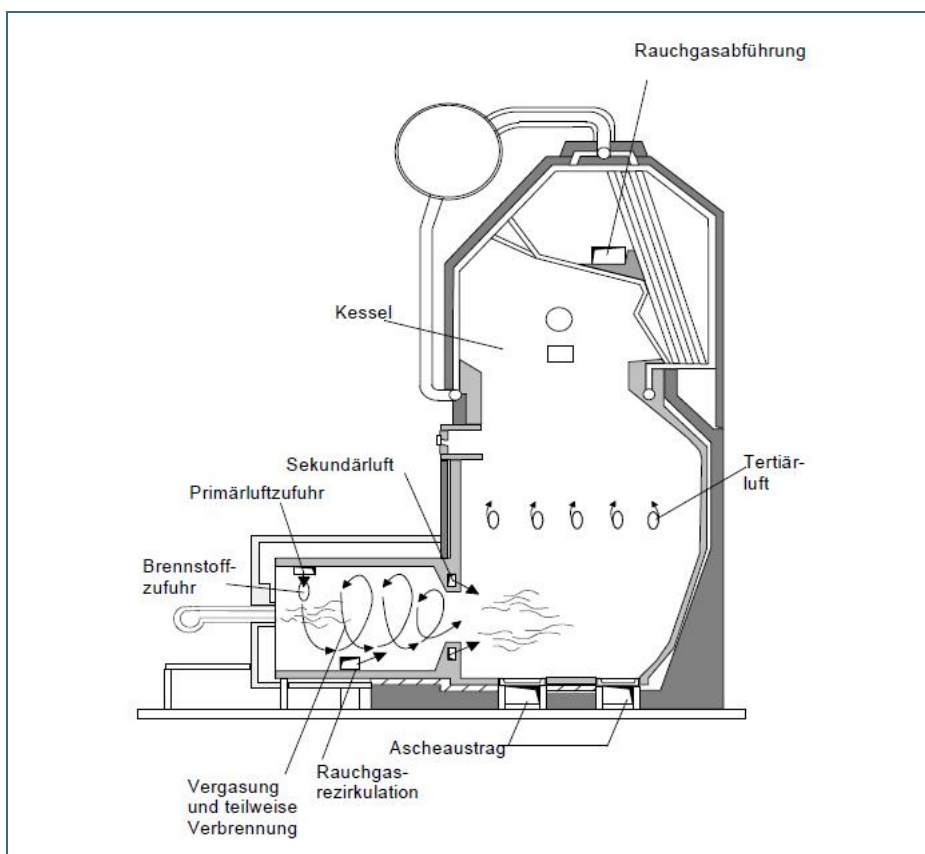


Abb. 12:  
Einblasfeuerung  
[WOLFF, 2004]

## 5.2 NORM in der Kohleverbrennung

Der Gehalt an natürlich vorkommenden Radionukliden in Kohle ist, aufgrund der vielzähligen weltweiten Abbaugelände, über einen großen Wertebereich verteilt. Es gibt Angaben zu Gesamtaktivitäten von  $< 0,01$  Bq/g bis  $> 10$  Bq/g [IAEA, 2003]. Die höchsten Werte für nuklid-spezifische Aktivitäten werden mit bis zu 0,5 Bq/g für U-238 und 0,3 Bq/g für Th-230 angegeben [UNSCEAR, 1988].

Durch die Verfeuerung findet eine Aufkonzentration aller nicht brennbaren und schwerflüchtigen Stoffe und somit der entsprechenden Radionuklide in den Verbrennungsrückständen statt. Der Faktor für die Zunahme der spezifischen Aktivitäten, bzw. der Radionuklidgehalte in Flugasche wird mit 2-25 angegeben [GELLERMANN, 2007].

Der Asche- und Schlackengehalt der Verbrennungsrückstände ist dabei stark von der Art und Menge der eingesetzten Kohle (Braun-/Steinkohle), der Förderregion (Geologie) und der Abbau- sowie Aufbereitungsart durch verbleibendes Bodenmaterial abhängig [KIRCHARTZ, 1995]. Zudem werden in Kraftwerken während einer Feuerungsperiode Gemische an Kohlen verschiedener Herkunftsgebiete eingesetzt, deren Mischungsverhältnis und Menge stark variieren können. Die radionuklid-spezifische Zusammensetzung der Ablagerungen im Feuerungs- und Rauchgasbereich lässt sich daher nur schwer einzelnen Kohlesorten zuordnen. Sie liefert vielmehr einen Einblick in den Stoffkreislauf von NORM bei der Verbrennung von Kohle.

Im Jahre 1981 wies die Strahlenschutzkommission auf die leichte Flüchtigkeit von Pb-210 und Po-210 und ebenso auf eine Anreicherung dieser Nuklide in Flugaschen hin [STRAHLENSCHUTZKOMMISSION, 1981; GELLERMANN, 2007]. Bei Temperaturen ab etwa 1400 °C werden aus Materialien flüchtige Nuklide, wie Pb-210 und Po-210 ausgetrieben und reichern sich in Flugaschen und Filterstäuben an. Die Gehalte in Schlacke und grober Kesselasche sind dementsprechend geringer.

Innerhalb der Heizkessel und entlang der Rauchgasstrecke bilden bzw. lagern sich während des Betriebes Rückstände an. Diese können fest anhaftend sein oder sich als loser Staub in Nischen und an Zugangsluken und deren Schamotteeinsätzen sammeln.

## 5.3 Untersuchte Kraftwerke

In Heizkraftwerken wird neben Kohle eine Vielzahl von Brennstoffen zur Feuerung eingesetzt. Außer Kohle werden Müll, Holzreste, Erdgas und Öl verbrannt. Im Jahre 2004 wurde in Bayern noch in sieben Kraftwerken Kohle als Brennstoff eingesetzt [MALLICK, 2004]. Bereits 2005 stellte eines dieser Heizkraftwerke die Kohlefeuerung ein. In den folgenden Jahren wurde in zwei weiteren Betrieben der Brennstoff Kohle durch die Energieträger Abfall und Gas ersetzt. Von den verbliebenen vier Kraftwerken haben sich alle an dem Untersuchungsvorhaben beteiligt und den Erhebungsbogen (Anhang I) ausgefüllt.

Ausgewählte Informationen zu eingesetzten Brennstoffen, dem Verbrauch an Kohle, der Anzahl im Betrieb befindlicher Kohlekessel und der Dauer der Wartungsarbeiten innerhalb der Kessel und des sich anschließenden Rauchgastraktes finden sich in Tab. 33.

Tab. 33: Erhebungsdaten - Kohlekraftwerke

Kraftwerk	Brennstoffe	Herkunftsländer der Kohle	Verbrauch Kohle [t/a]	Kohlekessel (Gesamtanzahl)	Wartungsintervalle pro Jahr	Wartungsarbeiten/Kessel [d/a]
K1	- Steinkohle - Heizöl - Erdgas	Deutschland, Polen, Tschechien, Kolumbien	32.000	1 (6)	1	ca.15
K2	- Steinkohle - Abfall - Heizöl - Erdgas	Deutschland, Kolumbien	36.000	2 (7)	1	3 bis 4
K3	- Steinkohle - Abfall - Erdgas	Südafrika, Russland, USA	800.000	1 (12)	1	7 bis 28
K4	Steinkohle Petrolkok Heizöl Klärschlamm	Polen Russland USA Kolumbien	800.000	1	1	7 bis 14

Neben Steinkohle werden in allen untersuchten Kraftwerken auch Heizöl oder Erdgas als Energieträger eingesetzt. Die Abbauregionen der Steinkohle reichen dabei von Deutschland bzw. Europa bis Afrika und Amerika. Der jährliche Verbrauch an Steinkohle ist bei den Kraftwerken K1 und K2 mit 32.000 bzw. 36.000 Tonnen im Jahr nahezu identisch, wohingegen er in Kraftwerk K3 und K4 mit 800.000 Tonnen pro Jahr mehr als das Zwanzigfache beträgt.

Kraftwerk K1, K3 und K4 werden mit Einblasfeuerung, Kraftwerk K2 mit Rostfeuerung betrieben. Es werden zumeist nur wenige der vorhandenen Kessel mit Kohle betrieben.

Für Beschäftigte der Kraftwerke beträgt die Aufenthaltsdauer innerhalb der Kessel, jeweils abhängig von der Kesselgröße und dem Umfang der Arbeiten, von nur wenigen Arbeitstagen bis hin zu mehreren Wochen im Jahr. Eine Begehung der Kessel kann durch Reinigungs- und oder Wartungsarbeiten und anschließende technische Abnahmen nötig sein. Da Reinigungsarbeiten teilweise durch das Einspritzen von Wasser unter Hochdruck vorgenommen werden, erfordern diese nicht in jedem Fall eine direkte Begehung des Kessels.

Für das Untersuchungsvorhaben wurden Proben von Kohle, Schlacke, Flugasche und dem Produkt aus der Rauchgasentschwefelung gammaspektrometrisch auf ihren Radionuklidgehalt hin untersucht. Des Weiteren wurde bei den Kraftwerken K1, K2 und K3 eine Ortseinsicht durchgeführt. Dabei wurden Proben der Verbrennungsrückstände und Ablagerungen innerhalb der Kessel genommen sowie Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung durchgeführt. Ebenso wurde mit einem Kontamaten auf mögliche Alpha- bzw. Betastrahler getestet.

Das Kraftwerk K4 wurde bereits zu einem früheren Zeitpunkt durch das LfU untersucht [MALLICK, 2004]. Die daraus vorliegenden Ergebnisse entsprechen denen der untersuchten Kraftwerke K1, K2 und K3. Eine erneute Untersuchung von K 4 wurde daher nicht vorgenommen.

## 5.4 Kraftwerk K1

### 5.4.1 Betriebscharakteristika

In Kraftwerk K1 wird die Einblasfeuerung angewandt (s. Abb. 12). Der Kessel verjüngt sich nach unten und aus der Verbrennungszone herabfallende Schlacke gelangt in ein Wasserbad. Die Kesselreinigung erfolgt mittels unter Hochdruck an den Zugangsluken eingespritzten Wassers. Abgespülte Rückstände sammeln sich im Nassschlackebecken am Boden des Kessels und werden, wie auch die wä-

rend des Verbrennungsprozesses anfallende Schlacke, abgeführt. Eine Begehung des Kessels ist somit nur bei Inspektions- und sicherheitsrelevanten Kesselabnahmen nötig. Für eine direkte Begehung und eine großflächige Vermessung der Kesselwände muss ein Gerüst innerhalb des Kessels installiert werden.

#### 5.4.2 Ortsbegehung und Messungen vor Ort

Zum Zeitpunkt der Ortseinsicht war im Kessel kein Gerüst montiert. Die Probenahme und sämtliche Messungen wurden daher an Zugangsluken zum Feuerungs- und Überhitzerbereich vorgenommen.

Es wurden sowohl Feststoffproben als auch Wischtestproben genommen. Die Beprobung fand an zwei Zugangsluken zum Kessel statt. Diese Luken befinden sich in Höhe des Feuerungsbereiches neben der Einblasvorrichtung, Probe „Kesselstaub Feuerungsbereich“ und im oberen Bereich in der Überhitzerzone, Probe „heller und dunkler Kesselstaub“ (Abb. 13).



Abb. 13:  
Zugangsluke Feuerungs-  
bereich

Sowohl Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung, als auch die mit einem Kontamaten ermittelten Alpha- und Beta-Aktivitäten an den Oberflächen im Zugangsbereich des Kohlekessels und den nachgeschalteten Wärmetauschern (Überhitzerbereich) ergaben keine erhöhten Messwerte. Die maximal gemessene Ortsdosisleistung von 0,130  $\mu\text{Sv/h}$  wurde in 4 cm Entfernung zu den herausnehmbaren Schamottesteinen der Zugangsluke zum Feuerungsbereich (Abb. 13) ermittelt, bei einem Hintergrundwert in unmittelbarer Nähe zum Kohlekessel von 0,040  $\mu\text{Sv/h}$ .

#### 5.4.3 Einsatzstoffe

Kraftwerk K1 bezieht seine Steinkohle aus Deutschland, Tschechien, Polen und aus Kolumbien. Die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchung dieser Kohlesorten finden sich in Tab. 34.

Tab. 34: Spezifische Aktivitäten in Kohlesorten aus Kraftwerk K1 [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Herkunft der Steinkohle	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K1	Deutschland	< 0,09	0,015	< 0,03	0,018	0,012	0,0120	0,01	< 0,004	< 0,006
	Polen	0,031	0,023	0,025	0,0247	0,00664	0,00680	0,0059	0,0014	0,0012
	Tschechien	< 0,03	0,005	< 0,006	0,0074	0,0041	0,0041	0,0044	< 0,001	< 0,002
	Kolumbien	< 0,07	< 0,008	< 0,01	< 0,007	< 0,002	0,0013	< 0,006	< 0,003	< 0,004

#### 5.4.4 Außerhalb des Kessel anfallende Verbrennungsrückstände

Die Analyseergebnisse der während des Heizbetriebes anfallenden Verbrennungsrückstände (Asche und Schlacke) sowie des aus der Entschwefelung gewonnenen REA-Produktes sind in Tab. 35 aufgeführt.

Tab. 35: Spezifische Aktivitäten in Verbrennungsrückständen aus Kraftwerk K1 [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K1	Nassschlacke	0,17	0,15	0,12	0,044	0,0591	0,0592	0,062	0,0077	0,0055
	Flugasche	0,22	0,19	0,18	0,220	0,0850	0,0859	0,095	0,010	0,011
	REA-Produkt	< 0,03	< 0,006	< 0,01	< 0,01	0,0013	0,00095	< 0,003	< 0,001	< 0,002

Die mit der Verbrennung einhergehende Konzentration der Radionuklide in den Verbrennungsrückständen führt in der Nassschlacke zu einem Maximalwert von 0,17 Bq/g für Uran-238 und in der Flugasche von 0,22 Bq/g für die Nuklide Uran-238 und Pb-210.

Im Produkt aus der Rauchgasentschwefelung wurden lediglich sehr geringe Aktivitätswerte ermittelt.

#### 5.4.5 Innerhalb des Kessel anfallende Verbrennungsrückstände

Es wurden drei staubförmige Proben von Verbrennungsrückständen innerhalb des Kessels in Kraftwerk K1 genommen. Diese Kesselstaubproben wurden an Zugangsluken zu den jeweiligen Feuerungsbereichen entnommen. Es handelte sich dabei um loses Material, welches sich zwischen der Kesselaußenwand und der zum Schutz der Luken eingesetzten Schamottesteine angesammelt hatte, siehe auch Abb. 13. Die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchung finden sich in Tab. 36.

Tab. 36: Spezifische Aktivitäten in Kesselstäuben aus Kraftwerk K1 [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Probenahmebereich	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K1	Feuerungszone	0,30	0,24	0,24	0,13	0,103	0,11	0,11	0,014	0,013
	Überhitzer, dunkler Staubfraktion	0,19	0,13	0,1	0,097	0,0656	0,068	0,067	0,0087	0,0071
	Überhitzer, helle Staubfraktion	0,32	0,26	0,21	0,141	0,126	0,125	0,116	0,015	0,013

In den Kesselstaubproben aus dem Feuerungsbereich und in der hellen Fraktion aus dem Überhitzerbereich wurden mit Werten um ca. 0,30 Bq/g für U-238 die höchsten Aktivitätswerte unter allen Proben des Kraftwerks A gemessen. In der dunklen Fraktion des Kesselstaubs wurde ein Maximalwert von 0,19 Bq/g für U-238 gemessen.

Wischproben an Zugangsluken zum Kohlekessel und an im Überhitzerbereich befindlichen Wärmetauscherrohren ergaben allesamt Aktivitätswerte unterhalb der jeweiligen nuklidspezifischen Nachweisgrenzen.

#### 5.4.6 Verbrennung von Kohle und Radionuklidgleichgewichte

In den Verbrennungsrückständen findet sich bei den spezifischen Aktivitäten innerhalb der U-Ra-Reihe ein Ungleichgewicht. Die Nassschlacke und die Kesselstäube weisen deutlich geringere Aktivitäten für das Nuklid Pb-210 auf. Diese Verbrennungsrückstände sind den hohen Temperaturen innerhalb des Kessels am längsten ausgesetzt. Entsprechend hat das vergleichsweise leichtflüchtige Blei Zeit, um aus den Materialien zu entweichen. Diese Beobachtung deckt sich mit [GELLERMANN, 2007].

#### 5.4.7 Expositionsrechnung

Zur Abschätzung der bei Wartungsarbeiten auftretenden Exposition können lediglich Daten aus den Zugangsbereichen des Kessels herangezogen werden (s. o.). Für eine konservative Abschätzung wird mit den jeweils ermittelten Maximalwerten gerechnet. Als Berechnungsgrundlage dienen somit die längste für die Wartung angegebene Dauer von 15 Arbeitstagen, entsprechend 120 Stunden, die Akti-



vitätswerte des hellen Kesselstaubs sowie die in 4 cm zu den Schamottesteinen gemessene und ersatzweise herangezogene Gamma-Ortsdosisleistung von 0,130  $\mu\text{Sv/h}$ . Mit diesen sehr konservativen Annahmen errechnet sich je Wartungsintervall und Arbeiter eine Exposition von 0,018 mSv (Tab. 37).

Tab. 37: Expositionsabschätzung Kraftwerk K1

Tätigkeitsbereich	Wartungsarbeiten Kohlekessel
Atemrate [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	1,2
Aufenthaltsdauer [ $\text{h/a}$ ]	120
Staubgehalt der Luft [ $\text{g/m}^3$ ]	0,001
Ingestion [ $\text{g/h}$ ]	0,006
ODL [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,13
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [ $\text{mSv/a}$ ]	0,016 / 0,002 / 0
<b>Effektive Dosis pro Wartungsintervall und Arbeiter [<math>\text{mSv}</math>]</b>	<b>0,018</b>

## 5.5 Kraftwerk K2

### 5.5.1 Betriebscharakteristika

In Kraftwerk K2 wird eine Rostfeuerung betrieben (s. Abb. 11). An der Zugangsseite ist der Kessel doppelwandig ausgelegt. Der schachtförmige Hohlraum dient als Kohlebunker. Die Kohlezugabe wird über Klappen dosiert und erfolgt als loses Schüttgut direkt auf den Feuerrost.

Nachdem die Kohle im Kessel verbrannt wurde, tritt das entstandene Rauchgas mit einer Temperatur zwischen 900 und 950  $^{\circ}\text{C}$  in den Überhitzerbereich ein und gibt einen Teil seiner Wärme an die mit Wasserdampf gefüllten Schlangenrohre ab.

Nach Passieren des Überhitzerbereiches erfährt das Rauchgas in einer Senke eine Umlenkung um 180 $^{\circ}$  und tritt mit einer Temperatur von 200 bis 250  $^{\circ}\text{C}$  in den Vorwärmerbereich ein. Dabei bilden die Bereiche des Überhitzers und des Vorwärmers von der Form her ein U, an dessen Tiefpunkt ein Großteil der Aerosolpartikel zurückbleibt.

Eine umfassende Entfernung von anhaftenden Rückständen wird in Kraftwerk K2 durch Sandstrahlen der Kesselwände erreicht. Die kurzen Wirkungsradien des Sandstrahlverfahrens machen dabei eine direkte Begehung des Kessels nötig. Die Rostfeuerung erlaubt dabei, zumindest im Feuerungsbereich, eine Kesselbegehung ohne die Installation eines Gerüsts.

### 5.5.2 Ortsbegehung und Messungen vor Ort

Der Zugang in den Kohlekessel ist über eine schmale Luke unterhalb der Kohleaufgabe möglich. Die Begehung von Überhitzer- und Vorwärmerbereich konnte über separate Luken vorgenommen werden. In allen untersuchten Bereichen wurden Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung und der Alpha- und Beta-Strahlung vorgenommen.

Eine vereinfachte Ansicht des Kessels sowie eine Zuordnung der untersuchten Messpunkte gibt Abb. 14.

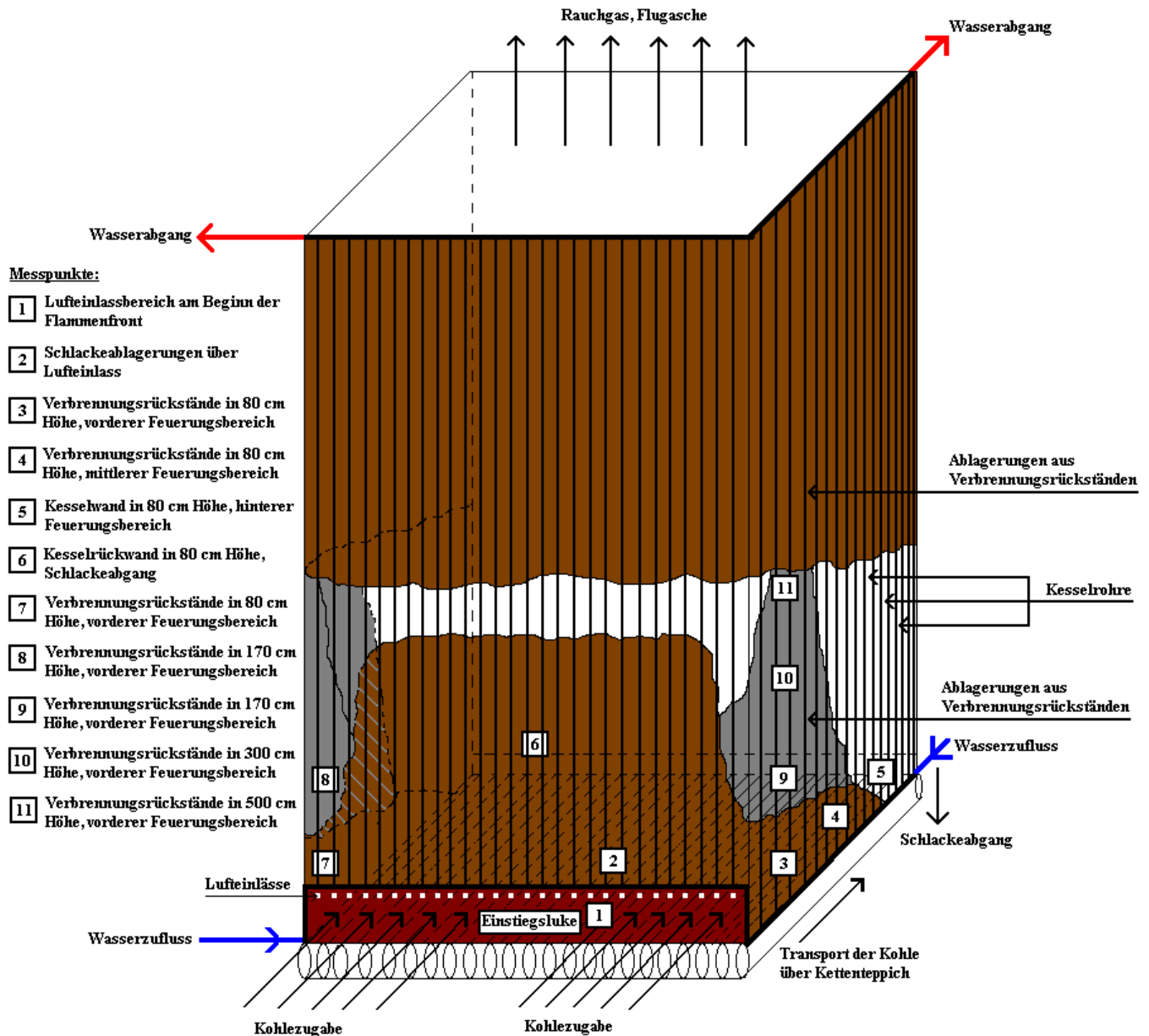


Abb. 14: Schematische Darstellung Kohleheizkessel Kraftwerk B

Bis zu einer Höhe von 7 Metern konnten Untersuchungen im Kessel vorgenommen werden.

Im Inneren des Kessels fallen zu beiden Seiten im unteren Bereich dunkle und bis zu mehreren Dezimetern starke Verkrustungen auf. Diese nehmen, entlang der Wegstrecke der Kohle, zum hinteren Bereich des Kessel ab. Die Kesselwand oberhalb der Einstiegslocher ist bis in eine Höhe von ca. fünf Metern mit derartigen bräunlichen Rückständen überzogen. Nach einer Aussparung von etwa zwei Metern und ab einer Höhe von etwa sechs bis sieben Metern zieht sich solch ein brauner Rückstands-saum rund um die gesamte Kesselwandung.

Die grünlich markierten Bereiche (Abb. 14) sind lediglich von einem dünnen grünlich-schwarzen und sehr fest anhaftenden Belag bedeckt. Die Ablagerungen sind detailliert in Abb. 15 und Abb. 16 zu sehen.



Abb. 15: Kessel - Seitenwand



Abb. 16: Kessel - Wand Einstiegsseite

Der Kessel wurde an den Wänden, in unterschiedlichen Höhen, auf die Gamma-Ortsdosisleistung und auf Alpha- und Beta-Strahlung hin untersucht, die als gemittelte Werte in IPS (Impulse pro Sekunde) angegeben werden.

Die Ergebnisse der in Abb. 14 markierten Messpunkte sind in Tab. 38 aufgelistet.

Tab. 38: Ergebnisse der ODL- und Kontamatmessungen im Kohlekessel von Kraftwerk B (ausgelassene Messwerte entsprechen ca. dem natürlichen Hintergrundwert).

Messpunkte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ODL in 4 cm [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,090	0,113	0,226	0,186	0,075	0,089	0,220	0,90	0,95	-	-
ODL in 50 cm [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,075	0,100	0,176	0,134	-	-	0,165	-	-	-	-
ODL in 100 cm [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,066	0,078	0,128	0,105	-	-	0,116	-	-	-	-
$\alpha$ [IPS]	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,4	0,0	0,0
$\beta$ , $\gamma$ [IPS]	86	26	48	33	33	25	47	164	179	105	80
Hintergrund	0,065 $\mu\text{Sv/h}$ bzw. 10 IPS ( $\beta$ , $\gamma$ )										

Für die Gamma-Ortsdosisleistung zeigten sich an den Messpunkten 3 und 7 zwei Maxima von 0,226  $\mu\text{Sv/h}$  und 0,220  $\mu\text{Sv/h}$ . An diesen Stellen war die Dicke der bräunlichen Ablagerungen am größten.

Bei der Messung der Summe aus Gamma- und Beta-Strahlung zeigten die beiden Seitenwände des Kohlekessels an den Messpunkten 8 und 9 im Bereich der grauen Ablagerungen mit 164 IPS bzw. 179 IPS die maximal ermittelten Intensitäten. Oberhalb dieser Messpunkte nimmt die Summe aus Gamma- und Beta-Aktivität allmählich ab (Messpunkte 10 und 11).

Alpha-Strahlung konnte nicht oder nur in sehr geringen Mengen ermittelt werden.

Die Messung der reinen Gamma-Ortsdosisleistung brachte an den Messpunkten 8, 9, 10 und 11 Werte zwischen 0,065 und 0,095  $\mu\text{Sv/h}$ .



Abb. 17:  
Überhitzerbereich

Innerhalb des Überhitzers hatten sich ebenfalls Ablagerungen durch den Verbrennungsprozess gebildet (Abb. 17). Ebenso wie im Heizkessel fanden sich dort zwei Arten von Rückständen. Der dem Kessel zugewandte Teil wies am dortigen Rohrpaket bräunlich schlackeartige Aufwachsungen auf. Gegenüberliegend fand sich dagegen ein gräulich metallischer Belag an den Wärmetauscherrohren. Vor Ort ermittelte Gamma-Ortsdosisleistungswerte und die Ergebnisse der Kontamatmessungen sind in Tab. 39 aufgelistet.

Tab. 39: Ergebnisse der ODL- und Kontamatmessungen im Überhitzerbereich von Kraftwerk B (ausgelassene Messwerte entsprechen ca. dem natürlichen Hintergrundwert).

Messort	Rohre mit bräunlichen Ablagerungen	Rohre mit gräulichem Belag
ODL in 4 cm [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,103	0,061
ODL in 50 cm [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,096	-
ODL in 100 cm [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	0,057	-
$\alpha$ [IPS]	1,4	2,0
$\beta, \gamma$ [IPS]	35	20
Hintergrund	0,055 $\mu\text{Sv/h}$ bzw. 10 IPS ( $\beta, \gamma$ )	

Die Rohre mit schlackeartigen Rückständen wiesen in unmittelbarer Nähe eine Gamma-Ortsdosisleistung von 0,103  $\mu\text{Sv/h}$  auf. In 50 cm Entfernung konnten noch 0,096  $\mu\text{Sv/h}$  gemessen werden. Bei einem Meter Abstand lagen die Werte bereits innerhalb der Hintergrundstrahlung von ca. 0,055  $\mu\text{Sv/h}$ . An den Rohren mit gräulichem Belag lagen die ODL-Werte allesamt im Bereich der Hintergrundstrahlung.

Die Werte für Alpha-Strahlung wurden mit 1,4 IPS an den Ablagerungen und mit 2,0 IPS an den gräulichen Belägen ermittelt.

Die maximal detektierte Summe aus Gamma- und Beta-Strahlung lag bei 35 IPS und wurde an den bräunlichen Ablagerungen gemessen.

Im Vorwärmerbereich waren keine bräunlichen Rückstände, vergleichbar mit denen in Kessel und Überhitzer, vorhanden (Abb. 18).

Die Gamma-Ortsdosisleistung innerhalb des Vorwärmers lag lediglich im Bereich des Hintergrundes von 0,055  $\mu\text{Sv/h}$  und nahm weder an den Rohrelementen noch an den Wänden zu. Die schwarzen und gräulichen Verfärbungen an Wänden und Rohren zeigten ebenfalls keine messbare Alpha-Aktivität. Die Summe aus Beta- und Gammastrahlung konnte maximal mit 23 IPS bestimmt werden.



Abb. 18:  
Vorwärmerbereich

### 5.5.3 Einsatzstoffe

In Kraftwerk K2 wird ebenfalls europäische und südamerikanische Kohle verfeuert. Die Förderstätten liegen dabei in Deutschland und Kolumbien. Die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchung zu diesen beiden Kohlesorten finden sich in Tab. 40.

Tab. 40: Spezifische Aktivitäten in Steinkohlesorten aus Kraftwerk K2 [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Herkunft der Steinkohle	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K2	Deutschland	< 0,09	< 0,01	< 0,03	0,013	0,012	0,012	0,0087	< 0,004	< 0,006
	Kolumbien	< 0,05	< 0,006	< 0,008	< 0,004	< 0,002	0,00076	< 0,009	< 0,002	< 0,003

### 5.5.4 Verbrennungsrückstände

Die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchung von Asche- und Schlackeproben sowie des REA-Produktes (Gips) und der bei der Rostfeuerung anfallenden Verbrennungsrückstände finden sich in Tab. 41.

Tab. 41: Spezifische Aktivitäten in Verbrennungsrückständen aus Kraftwerk K2 [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K2	Schlacke	0,088	0,10	0,14	< 0,01	0,0971	0,0933	0,0891	0,0041	0,0063
	Flugasche	0,32	0,22	0,23	0,13	0,181	0,172	0,17	0,015	0,012
	REA-Produkt (Gips)	< 0,1	0,022	< 0,05	0,065	0,0096	0,0100	< 0,02	< 0,005	< 0,008

In der Schlacke ergibt sich mit 0,14 Bq/g ein Maximalwert für Ra-226 und in der Flugasche mit 0,32 Bq/g für U-238. Die Aktivitäten des REA-Produktes entsprechen in etwa den Aktivitäten der eingesetzten deutschen Steinkohle, mit Ausnahme von Pb-210 mit einem Aktivitätsmaximum von 0,065 Bq/g.

Auffallend ist, dass in der Schlackeprobe die Pb-210-Aktivität gegenüber den anderen Nukliden in dieser Zerfallsreihe stark verringert ist. Sie befindet sich unterhalb der Nachweisgrenze von 0,01 Bq/g.

Der Pb-210-Wert im REA-Produkt ist gegenüber den anderen Nukliden der Uran-Radium-Zerfallsreihe ca. um das 3-fache erhöht.

In der Flugasche liegt der Pb-210-Wert mit einer Aktivität von 0,13 Bq/g wiederum bei etwa der Hälfte der übrigen Radionuklide der Uran-Radium-Zerfallsreihe.

### 5.5.5 Kessel- und Überhitzerrückstände

Die Beprobung des Kessels an Messpunkt 3 wurde in ca. 1,3 m Höhe vorgenommen. Die zweite Beprobung fand ca. 50 cm oberhalb von Messpunkt 3 in 2 m Höhe, am Übergang von bräunlich schlackeartigem zu gräulich metallischem Rückstandsmaterial, statt.

Die Ergebnisse der Gammaskopimetrie der Kesselrückstände finden sich in Tab. 42.

Tab. 42: Spezifische Aktivitäten in Kesselrückständen aus Kraftwerk K2

Betrieb		Nuklide								
		U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K2	Messpunkt 3	0,42	0,31	0,37	< 0,06	0,236	0,233	0,23	0,019	0,017
	50 cm oberhalb von Messpunkt 3	0,41	0,28	0,36	0,25	0,198	0,20	0,19	0,019	0,019

Das an Messpunkt 3 gewonnene Material weist in der Uran-Radium-Zerfallsreihe ein Aktivitätsmaximum von 0,42 Bq/g für U-238 auf. In der Thorium-Zerfallsreihe liegt der höchste ermittelte Wert bei 0,24 Bq/g für das Radionuklid Ra-228.

Für Pb-210 liegt an dieser Stelle der ermittelte Wert unterhalb der Nachweisgrenze von < 0,06 Bq/g.

Die 50 cm oberhalb von Messpunkt 3 vorgenommene Beprobung lieferte identische Aktivitätswerte zu Messpunkt 3. Eine Ausnahme bildet Pb-210, das an Messpunkt 3 nachgewiesen werden konnte. Seine Aktivität an diesem Punkt betrug 0,25 Bq/g.

An den gräulichen Kesseloberflächen (Abb. 14) mit erhöhten Kontamantwerten (Tab. 38) wurde eine Beprobung mittels Wischtests vorgenommen. Die erhaltenen Ergebnisse der gammaskopimetrischen Analysen sind in Tab. 43 enthalten.

Tab. 43: Spezifische Aktivitäten in Wischtestproben aus dem Kohlekessel in Kraftwerk K2 [Bq/cm<sup>2</sup>]

Betrieb		Nuklide								
		U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K2	Messpunkt 8	< 0,4	< 0,04	< 0,07	0,14	< 0,02	< 0,004	< 0,07	< 0,02	< 0,03
	Messpunkt 9	< 0,5	< 0,05	< 0,08	0,097	< 0,02	< 0,009	< 0,09	< 0,02	< 0,03
	Messpunkt 10	< 0,4	< 0,04	< 0,07	0,13	< 0,02	< 0,004	< 0,05	< 0,02	< 0,03
	Messpunkt 11	< 0,5	< 0,05	< 0,08	0,14	< 0,02	< 0,009	< 0,09	< 0,02	< 0,03

Die Ergebnisse der Wischtestanalysen an einzelnen Messpunkten im Kohlekessel ergeben, dass die Pb-210-Werte gegenüber den restlichen Radionukliden, deren Intensitäten fast gänzlich unterhalb der Nachweisgrenze liegen, deutlich erhöht sind. Bei 0,14 Bq/cm<sup>2</sup> liegt das ermittelte Intensitätsmaximum und wurde an den Messpunkten 8 und 11 ermittelt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Überhitzerbereich für eine Materialprobe der bräunlichen Ablagerungen und die eines Wischtests an den Rohren mit gräulichem Belag sind in Tab. 44 dargestellt.

Tab. 44: Spezifische Aktivitäten in Rückständen aus dem Überhitzerbereich von Kraftwerk K2

		Nuklide								
Betrieb	Probe Überhitzer	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K2	Ablagerung, bräunlich [Bq/g]	0,40	0,16	0,24	0,17	0,166	0,18	0,17	0,018	0,013
	Belag, gräulich [Bq/cm <sup>2</sup> ]	< 0,4	< 0,04	< 0,07	0,065	< 0,02	0,0067	< 0,08	< 0,02	< 0,03

Der Maximalwert in der Uran-Radium-Zerfallsreihe liegt bei 0,40 Bq/g für U-238 und in der Thorium-Zerfallsreihe bei 0,18 Bq/g für Th-228. Die Aktivitäten des bräunlichen Rückstands liegen damit leicht unterhalb der Proben, welche aus dem Kessel entnommen werden konnten.

Die Wischtестanalyse lieferte lediglich für zwei Nuklide Aktivitäten oberhalb der Nachweisgrenzen. Die Werte liegen bei 0,065 Bq/cm<sup>2</sup> für Pb-210 und 0,0067 Bq/cm<sup>2</sup> für Pb-212.

Die bei der Säuberung des Heizkessels und der Entfernung von Verbrennungsrückständen im Rauchgasbereich beim Sandstrahlen anfallenden Rückstände bilden ein Gemisch aus Strahlmittel- und Verbrennungsrückständen. Die Ergebnisse für zwei Proben aus diesen Materialien sind in Tab. 45 aufgeführt.

Tab. 45: Spezifische Aktivitäten in Reststoffen aus der Heizkesselreinigung von Kraftwerk K2 [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K2	1	0,28	0,18	0,28	0,21	0,169	0,17	0,16	0,013	0,012
	2	< 0,2	0,15	0,28	0,39	0,143	0,15	0,14	< 0,01	0,0098

In der Probe 1 wurde in der Uran-Radium-Zerfallsreihe für die Nuklide Ra-226 und U-238 jeweils ein maximaler Aktivitätswert von 0,28 Bq/g ermittelt. Der Pb-210-Wert lag bei 0,21 Bq/g. In der Thorium-Zerfallsreihe ergab sich jeweils für Ra-228 und Th-228 ein Maximum von 0,17 Bq/g.

Für Probe 2 wurde in der Uran-Radium-Zerfallsreihe ein Aktivitätsmaximum für Pb-210 von 0,39 Bq/g bestimmt. In der Thorium-Zerfallsreihe lag das Maximum bei 0,15 Bq/g für Th-228.

### 5.5.6 Verbrennung von Kohle und Radionuklidgleichgewichte

In der Asche, der Schlacke und den Kessel- und Überhitzerrückständen konnte erwartungsgemäß eine Anreicherung der schwerflüchtigen Radionuklide nachgewiesen werden. Die Abreicherung des Nuklids Pb-210 in der Schlacke und in Kesselrückständen aus der unmittelbaren Feuerungszone trat ebenfalls ein. Entgegen der Beobachtungen in [GELLERMANN, 2012] konnte allerdings keine Erhöhung von Pb-210 in der Flugasche beobachtet werden. Stattdessen wies das Produkt aus der Rauchgasentschwefelung deutlich erhöhte Pb-210-Aktivitäten gegenüber den restlichen Nukliden der Uran-Radium-Zerfallsreihe auf. Pb-210 scheidet sich demnach erst nach Entfernung der Flugasche aus dem Rauchgas ab. Dies könnte durch die betriebseigene Abgasführung zu erklären sein. Ebenso würde die nachgewiesene Anreicherung von Pb-210 an den kühleren Bereichen des Heizkessels dafür eine Erklärung liefern.

Ein Vergleich zwischen den Wischtestergebnissen aus dem Kessel- und dem Überhitzerbereich ergab innerhalb des Kessels ca. doppelt so hohe Aktivitätswerte für Pb-210.

Die Rückstände aus der Kesselreinigung liefern im Hinblick auf eine Anreicherung von Pb-210 keine eindeutige Aussage.

Insgesamt sind die spezifischen Aktivitäten in den verschiedenen eingesetzten Kohlearten sehr gering. Rein rechnerisch ergibt sich für die Schlacke eine Nuklidanreicherung um ca. das 10- bis 40-fache, bezogen auf die eingesetzte Kohle. Für die Flugasche liegt dieser Wert theoretisch bei dem 20- bis 85-fachen. Diese weiten Intervallgrenzen ergeben sich aus dem unbekanntem Mischungsverhältnis der Kohlen. Möglicherweise können auch Schwankungen der natürlichen Radionuklidgehalte der Brennstoffe Einfluss haben.

### 5.5.7 Expositionsrechnung

Für Wartungsarbeiten in Kraftwerk K2 wurde eine Berechnung der zu erwartenden Exposition je Arbeitsintervall über einen Zeitraum von 32 Stunden vorgenommen. Das Ergebnis ist in Tab. 46 dargestellt.

Tab. 46: Expositionsabschätzung Kraftwerk K2

Tätigkeitsbereich	Wartungsarbeiten Kohlekessel
Atemrate [m <sup>3</sup> /h]	1,2
Aufenthaltsdauer [h/a]	32
Staubgehalt der Luft [g/m <sup>3</sup> ]	0,001
Ingestion [g/h]	0,006
ODL [μSv/h]	0,176
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [mSv/a]	0,006 / 0,001 / 0
<b>Effektive Dosis pro Wartungsintervall und Arbeiter [mSv]</b>	<b>0,007</b>

Aus diesen Parametern ergibt sich je Wartungsintervall eine Strahlenexposition von 0,007 mSv. Dieser Wert unterschreitet das Dosiskriterium von 1 mSv/a deutlich.

## 5.6 Kraftwerk K3

### 5.6.1 Betriebscharakteristika

In Kraftwerk K3 wird, ebenso wie in Kraftwerk K1, eine Einblasfeuerung betrieben. Die Ausmaße des Heizkessels sind jedoch, entsprechend dem höheren Kohledurchsatz von 800.000 Tonnen pro Jahr, wesentlich größer.

Die Einblasbrenner sind über mehrere Ebenen im Heizkessel angeordnet und befinden sich an zwei gegenüberliegenden Wänden. Die gesamte Kesseloberfläche ist mit Rohren zur Wärmegewinnung bedeckt.

Eine spezielle Reinigung des Kessels erfolgt im Zuge der jährlichen Wartungsarbeiten, bei denen die Schichtstärke der Prozesswasser führenden Rohre kontrolliert wird, nicht. Für die Vermessung der Rohrsterken müssen die Oberflächen allerdings zuvor durch Schleifen von allen anhaftenden Rückständen befreit werden.

### 5.6.2 Ortsbegehung und Messungen vor Ort

Im Zuge der Ortsbegehung konnten die Bereiche um die Einblasvorrichtungen für den Kohlestaub an einer der Kesselwände untersucht werden.

Die Messung der reinen Gamma-Ortsdosisleistung ergab an keinem Messpunkt Werte über 0,100 μSv/h, bei einer Hintergrundstrahlung um 0,042 μSv/h.

Eine erhöhte Aktivität wurde bei der Summe aus Gamma- und Beta-Strahlung an allen Messpunkten in unterschiedlicher Ausprägung festgestellt (Tab. 47). Der Hintergrundwert lag bei 10 IPS.

Alpha-Strahlung konnte nur an Messpunkt 1 mit maximal 1 IPS detektiert werden.



Tab. 47: Ergebnisse Summe Gamma- und Beta-Strahlung Kraftwerk K3

Abstand [cm]	Messp.1 [IPS]	Messp.2 [IPS]	Messp.3 [IPS]	Messp.4 [IPS]	Messp.5 [IPS]	Messp.6 [IPS]	Messp.7 [IPS]	Messp.8 [IPS]
1	255	50	422	19	30	177	22	555
50	85	-	122	-	-	55	-	310
100	25	-	39	-	-	21	-	161

An den Messpunkten 3 und 8 zeigten sich mit 422 IPS und 555 IPS die höchsten Impulsraten. Beide Werte wurden an gegenüberliegenden Stellen desselben Brenners gemessen. Den nächstgrößten Wert lieferte Messpunkt 1 mit 255 IPS. Dieser liegt auf der halben Wegstrecke horizontal zwischen zwei Einblasvorrichtungen unterhalb der Brennerebene, auf der sich Messpunkt 3 und 8 befinden. Oberhalb davon befindet sich Messpunkt 6, an dem unmittelbar an der Kesselwand noch 177 IPS auftraten. Die restlichen Messpunkte zeigen wesentlich geringere Impulsraten.

### 5.6.3 Einsatzstoffe

In Kraftwerk K3 wird zum einen ein Gemisch (Blend) aus amerikanischer und russischer Kohle verfeuert und zum anderen sortenreine südafrikanische Steinkohle. Die dazugehörigen Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchung sind in Tab. 48 aufgelistet.

Tab. 48: Spezifische Aktivitäten in Kohlesorten aus Kraftwerk K3 [Bq/g]

Nuklide										
Betrieb	Herkunft der Steinkohle	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K3	USA / Russland	< 0,03	0,012	< 0,02	0,010	0,00748	0,00683	0,0053	< 0,001	< 0,002
	Südafrika	< 0,05	0,030	0,021	0,0307	0,0348	0,0335	0,031	< 0,002	0,0012

Die Kohlesorten, welche zum Teil bereits aus Gemischen verschiedener Herkunftsländer bestehen, weisen in der Uran-Radium-Zerfallsreihe beide ein Aktivitätsmaximum für Pb-210 auf.

In der Th-Reihe wurde für beide Kohlesorten für Ra-228 ein Aktivitätsmaximum ermittelt. Damit liegen in der südafrikanischen Kohle die Aktivitäten der Th-Reihe über denen der U-Ra-Reihe.

### 5.6.4 Verbrennungsrückstände

Die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Analyse der in Kraftwerk K3 anfallenden Verbrennungsrückstände und des Produktes aus der Rauchgasentschwefelung finden sich in Tab. 49.

Tab. 49: Spezifische Aktivitäten in Verbrennungsrückständen aus Kraftwerk K3 [Bq/g]

Nuklide										
Betrieb	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K3	Schlacke	0,21	0,12	0,1	0,060	0,157	0,16	0,15	0,0097	0,011
	Flugasche	0,26	0,17	0,18	0,212	0,214	0,217	0,202	0,012	0,010
	REA-Produkt (Gips)	< 0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,001	< 0,001	< 0,01	< 0,003	< 0,004

In der Schlacke ergibt sich mit 0,21 Bq/g ein Maximalwert für U-238, in der Flugasche ebenfalls für das Radionuklid U-238 mit 0,26 Bq/g. Die Aktivitäten des REA-Produktes liegen fast gänzlich unterhalb der Nachweisgrenzen.

In der Schlacke ist die Aktivität von Pb-210 um etwa die Hälfte gegenüber den restlichen Nukliden verringert, in der Flugasche jedoch kaum erhöht.

### 5.6.5 Kesselrückstände

In Tab. 50 sind die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchungen von Ablagerungen und in Tab. 51 von Wischtestanalysen des Heizkessels aufgeführt. Das Probenmaterial der Messpunkte 1, 3 und 8 bildete dabei einen festen Belag an der Kesselwand. Für die Probe von Messpunkt 1 wurde außerdem die spezifische Aktivität des Alpha-Strahlers Po-210 bestimmt. Weiterhin wurde eine Probe des im Kessel befindlichen losen Staubs entnommen.

Tab. 50: Spezifische Aktivitäten in Kesselrückständen aus Kraftwerk K3 [Bq/g]

		Nuklide								
Betrieb	Probenahmeort Kesselrückstände	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K3	Messpunkt 1	< 1	< 0,2	< 0,3	156	0,14	0,14	0,15	< 0,05	< 0,07
	Messpunkt 3	< 1	< 0,2	< 0,2	36	0,11	0,12	< 0,1	< 0,06	< 0,08
	Messpunkt 8	< 7	< 0,9	< 1	168	< 0,2	< 0,1	< 1	< 0,3	< 0,5
	Staub, lose	< 0,2	0,12	0,14	0,195	0,115	0,113	0,12	< 0,007	< 0,02

Die Rückstände der Messpunkte 1, 3 und 8 weisen mit bis zu 168 Bq/g stark erhöhte Werte für Pb-210 auf. In der Probe an Messpunkt 1 konnte zudem ebenfalls eine stark erhöhte Aktivität für Po-210 von 138 Bq/g ermittelt werden. Die restlichen Nuklide wiesen keine relevanten Aktivitäten auf. Der lose Staub zeigt nur für Pb-210 eine Aktivität von ca. 0,2 Bq/g und ist gegenüber den restlichen Nukliden nur leicht erhöht.

Tab. 51: Spezifische Aktivitäten in Wischtestproben aus Kraftwerk K3 [Bq/cm<sup>2</sup>]

		Nuklide								
Betrieb	Probenahmeort Wischtest	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
		U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
K3	Messpunkt 1	< 0,5	< 0,05	< 0,08	0,35	< 0,02	< 0,009	< 0,09	< 0,02	< 0,03
	Messpunkt 3	< 0,5	< 0,04	< 0,08	< 0,05	< 0,02	< 0,005	< 0,08	< 0,02	< 0,03
	Messpunkt 8	< 0,5	< 0,05	< 0,08	0,042	< 0,02	< 0,008	< 0,09	< 0,02	< 0,03

Die Wischtestproben zeigen nur für die Messpunkte 1 und 8 für Pb-210 Aktivitäten oberhalb der Nachweisgrenze, alle übrigen Werte liegen darunter.

### 5.6.6 Verbrennung von Kohle und Radionuklidgleichgewichte

Die Aktivitätswerte von Nukliden in der Th- und der U-Ac-Reihe stehen annähernd miteinander im Gleichgewicht. In der U-Ra-Reihe bildet der Wert für Pb-210 in der Schlacke eine Ausnahme und ist erwartungsgemäß verringert. Er liegt ca. bei der halben Aktivität der restlichen Nuklide der U-Ra-Reihe.

Auffällig sind die innerhalb des Kessels ermittelten hohen Werte für die Summe aus Beta- und Gammastrahlung und die stark erhöhten Pb-210- und Po-210-Werte in abgelagertem Material an den Kesselwänden. Die Beta- und Gammastrahlung ist auf Pb-210 zurück zu führen. Zusammen mit den niedrigen Pb-210-Aktivitätswerten in der Schlacke konnte somit auch in Kraftwerk K3 die Migration dieses Radionuklids bei Verbrennungsprozessen nachgewiesen werden.

Die geringen und zum Teil nicht nachweisbaren Aktivitäten für Pb-210 auf den Wischtests zeigen, dass das Rückstandsmaterial fest an die Kesselwände gebunden ist. Eine Inkorporation ist daher nur bei mechanischen Bearbeitungen, wie dem Abschleifen der Oberflächen oder dem Ausbau der Wärmetauscherrohre, möglich.

### 5.6.7 Expositionsberechnung

Im Kohlekessel von Kraftwerk K3 wurde keine stark erhöhte Gamma-Ortsdosisleistung ermittelt. Ein Vorhandensein von Beta-Strahlung ist durch erhöhte Impulsraten des Kontamaten jedoch festgestellt worden. Diese wurden durch die hohe Aktivität von Pb-210 in den Ablagerungen innerhalb des Kessels hervorgerufen. Die Energie der Gammalinie von Pb-210 liegt mit ca. 46 keV allerdings sehr niedrig, so dass der Beitrag von Pb-210 zur Gamma-Ortsdosisleistung außerhalb des Erfassungsbereiches des mobilen Messgeräts liegt. Eine Expositionsberechnung wie bei den vorherigen Kohlekraftwerken kann daher nicht durchgeführt werden. Stattdessen wird eine Worst-Case-Expositionsabschätzung für Inhalation und Ingestion dieser Radionuklide bei Arbeiten im Kessel vorgenommen (Tab. 52). Es wurde eine erhöhte Atemrate und ein Staubgehalt entsprechend dem höchsten zulässigen Arbeitsplatzgrenzwert nach Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) von  $10 \text{ mg/m}^3$  angesetzt [Bundesministerium des Inneren, 2013]. Des Weiteren wurde eine Arbeitsdauer entsprechend einer Schichtlänge von 10 Stunden angesetzt, eine ODL von  $100 \text{ nSv/h}$  angenommen und die höchsten spezifischen Aktivitäten der Radionuklide Pb-210 und Po-210 für die Berechnung herangezogen.

Tab. 52: Expositionsberechnung Kraftwerk K3

Tätigkeitsbereich	Wartungsarbeiten Kohlekessel
Atemrate [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	1,2
Aufenthaltsdauer pro Schicht [h]	10
Staubgehalt der Luft [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	0,01
Ingestion [ $\text{g}/\text{h}$ ]	0,006
ODL [ $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ]	0,1
Effektive Dosis ODL / Inh. / Ing. [ $\text{mSv}/\text{a}$ ]	0,001 / 0,075 / 0,017
<b>Effektive Dosis pro Schicht und Arbeiter [<math>\text{mSv}</math>]</b>	<b>0,093</b>

Die daraus folgende Exposition beträgt  $0,093 \text{ mSv}$  pro Schicht und Arbeiter. Für eine Wartung sind zehn Arbeitstage veranschlagt. Daraus ergäbe sich eine Exposition von  $0,93 \text{ mSv}$  pro Wartung und Arbeiter.

## 5.7 Zusammenfassung – Wartung von Heizkesseln in Kohlekraftwerken

In den Kohleproben finden sich in der U-Ra-Reihe maximale spezifische Aktivitäten zwischen  $0,02$  bis  $0,03 \text{ Bq/g}$  für die Nuklide Ra-226 und Pb-210. Sämtliche ermittelte Werte der Th- und der U-Ac-Reihe weisen geringere Aktivitäten auf.

Die maximal ermittelten Aktivitäten in allen losen Verbrennungsrückständen wie Flugaschen, Schlacken und Kesselstäuben liegen im Bereich von  $0,2$  bis  $0,5 \text{ Bq/g}$ . In der Mehrzahl der Fälle liegen die Aktivitäten unterhalb von  $0,2 \text{ Bq/g}$ .

Um bei staubintensiven Arbeiten mit diesen Rückständen eine Inkorporation weitestgehend zu vermeiden, ist bereits von Seiten der Kraftwerksbetreiber das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) vorgeschrieben.

Ein Vergleich der Radionuklidaktivitäten der eingesetzten Steinkohlen mit den Verbrennungsrückständen Schlacke und Asche zeigt Anreicherungsfaktoren, die denen in der Literatur genannten Werten von 2 bis 25 entsprechen [Puch, 1997].

Die Begehung der Kessel war nur in zwei der drei untersuchten Kraftwerke möglich. Dabei wurde das Nuklid Pb-210 in unterschiedlich starker Konzentration an den Kesseloberflächen vorgefunden. Eine verstärkte Akkumulation des Radionuklids Pb-210 trat dabei an den gekühlten Bereichen der Innenwände auf. Im Falle des Kraftwerks K3 konnten dabei zum Teil stark erhöhte Aktivitätswerte in den Ablagerungen für Pb-210 mit bis zu  $168 \text{ Bq/g}$  und in derselben Probe für Po-210 mit  $138 \text{ Bq/g}$  nachgewiesen werden. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Betriebscharakteristika wie Feuerungsart, Brennraumvolumen und Brennstoffmenge zurückführen. In Kraftwerk K3 zeigen die ermittelten Aktivitätswerte, dass sich die Nuklide Pb-210 und Po-210 weitestgehend im radioaktiven Gleichgewicht mit

einander befinden. Eine eindeutige Aussage, ob das an den Kesselwänden vorhandene Po-210 aus der verfeuerten Kohle oder als Zerfallsprodukt aus bereits abgeschiedenem Pb-210 stammt, lässt sich nicht treffen.

Die erhöhten spezifischen Aktivitäten von Pb-210 und Po-210 in den brennernen Ablagerungen könnten durch die Redoxeigenschaften von Blei und Polonium verursacht werden. Blei- und Poloniumverbindungen bzw. deren Oxide können durch Kohlenstoff bei entsprechenden Temperaturen zu elementaren Metallen reduziert werden [HOLLEMANN / WIBERG, 1995]. Es wäre daher im reduzierenden Bereich der Brennerflamme die Entstehung von elementarem Metall bzw. im Falle von Blei eines Aerosols aus flüssigem Metall möglich, welches sich unmittelbar nach dem Reduktionsschritt an kühlen Bereichen der Kesseloberflächen niederschlägt.

Die Berechnung der Expositionen ergab in Kraftwerk K1 und in Kraftwerk K2 für jeweils einen Wartungs- bzw. Reinigungsintervall nur sehr geringe und weit unterhalb des Dosiskriteriums von 1 mSv/a liegende Expositionen.

Die Expositionsberechnung für Kraftwerk K3 ergab für eine Schichtlänge von 10 Stunden einen Wert von 0,093 mSv. Das Dosiskriterium von 1 mSv/a wäre daher bereits nahezu nach zehn Arbeitstagen erreicht. Da sich dieser Expositionswert überwiegend durch Ingestion und Inhalation von Pb-210 und Po-210 ergibt, ist eine Expositionsverringerung durch das Ergreifen entsprechender persönlicher Schutzmaßnahmen, wie das Tragen einer Atemschutzmaske, mit geringem Aufwand erreichbar. Bei größerem Materialabtrag im Inneren der Kessel empfiehlt sich zusätzlich der Gebrauch von Einmal-schutzanzügen.

## 6 Zinn-, Blei-, Kupferschmelzen

### 6.1 Einleitung

Zinn-, Blei-, und Kupferschmelzen werden erzeugt durch:

- eine Primärgewinnung dieser Metalle aus den entsprechenden Erzen,
- eine Sekundärgewinnung aus Altmetallen,
- eine Verflüssigung dieser Metalle bei Herstellungsprozessen.

Eine Primärgewinnung von Zinn sowie die Förderung von Zinnerzen findet deutschlandweit nicht mehr statt. Der einzige deutsche Standort der Kupferverhüttung befindet sich in Hamburg. Blei wird, zumindest in Bayern, ebenfalls nicht aus Erzen gewonnen. Sekundärgewinnungsprozesse dieser Metalle finden in Bayern nur in Bezug auf Blei statt [GELLERMANN, 2007]. Bei der Primärverhüttung dieser Erze entstehende NORM-haltige Schlacken, Schlämme und Stäube fallen somit nicht in Bayern an.

Schmelzen dieser Metalle treten daher fast ausschließlich in metallverarbeitenden Industriebereichen, wie z. B. in Kabelwerken oder Gießereien auf. In Schmelzbetrieben besteht die Möglichkeit, dass sich aus den verflüssigten Metallen durch Verdampfen von Radionukliden diese in Filtermaterialien und anderweitigen Staubabscheidevorrichtungen ansammeln. Betrachtet man die Schmelzpunkte von Blei (327 °C), Zinn (505 °C) und Kupfer (1084 °C) und vergleicht diese mit den Siedepunkten der Elemente aus den natürlichen Zerfallsreihen, so kommt lediglich Polonium mit einem Siedepunkt von 962 °C als leicht flüchtiges Radionuklid in Frage. Durch chemische Reaktionen der Schmelzen mit Luftsauerstoff, eventuellen Zusätzen oder Verunreinigungen bildet sich sogenannte Krätze, auch Schlacke genannt. Es bilden sich zwei Phasen aus, wobei die Schlacke auf dem flüssigen Metall schwimmt. Diese Verunreinigung wird vor weiteren Verarbeitungsprozessen von der Metallschmelze getrennt. Abhängig von dem elektrochemischen Potenzial der in der Schmelze enthaltenen Metalle können diese unterschiedlich stabile Verbindungen mit Sauerstoff eingehen. Je positiver das Standardpotential eines Metalls ist, desto weniger neigt es zur Korrosion. Die Metalle Kupfer, Zinn und Blei weisen im Verhältnis zu beispielsweise Uran und Radium wesentlich positivere Standardpotentiale auf und sind daher gegenüber Oxidationsreaktionen weniger anfällig. In wie weit sich eine Abscheidung von Radionukliden bei erneutem Einschmelzen von Metallen in die Schlacken vollzieht, könnte im Rahmen des Untersuchungsvorhabens ermittelt werden.

Beim Schmelzprozess werden Feuerfestmaterialien eingesetzt. Diese sollten ebenfalls im Rahmen des Untersuchungsvorhabens untersucht werden.

### 6.2 Erhebungsdaten

Insgesamt wurden elf Betriebe (ZBK 01 bis ZBK 11), in denen wenigstens eines der Metalle Kupfer, Zinn oder Blei zu Verarbeitungszwecken eingeschmolzen wird, um eine Teilnahme am Untersuchungsvorhaben und um die Beantwortung eines Erhebungsbogens (Anhang I) gebeten. Keiner der kontaktierten Betriebe hat den Erhebungsbogen beantwortet oder Proben zur gammaspektrometrischen Analyse bereitgestellt. Eine telefonische Nachfrage ergab einige wenige Informationen (Tab. 53).

Tab. 53: Angaben der Zinn-, Blei-, Kupferschmelzbetriebe

<b>Betrieb</b>	<b>Betriebsangaben</b>
ZBK 01	Es werden keine Metallschmelzen am Standort eingesetzt.
ZBK 02	Blei wird in kleinstmengen auf 400 °C erwärmt und zu Rohren gepresst. Eine Abgasreinigung findet nicht statt
ZBK 03	keine Angaben
ZBK 04	keine Angaben
ZBK 05	keine Angaben
ZBK 06	keine Angaben
ZBK 07	keine Angaben
ZBK 08	keine Angaben
ZBK 09	Eine Blei-Antimon-Legierung wird vergossen. Eine Abgasreinigung findet nicht statt.
ZBK 10	Es werden kleinstmengen an Metallen aufgeschmolzen. Eine Abgasreinigung findet nicht statt. FFM auf Zirkonbasis ist nicht verbaut.
ZBK 11	keine Angaben

Bei den Betrieben, ZBK 02, ZBK 09 und ZBK 10, werden lediglich kleinstmengen an Metallen, vornehmlich Blei aufgeschmolzen. Aufgrund der dadurch nur sehr begrenzt entstehenden Immissionen an die Umwelt bestehen keine Auflagen für eine Abgasreinigung. Ebenso fallen keine relevanten Schlackemengen während des Schmelzvorganges an.

Von den übrigen Betrieben wurden keine Angaben gemacht.

## 7 Grundwasserfilteranlagen – Natürliche Radionuklide in Filtermaterialien aus der Trinkwasseraufbereitung

### 7.1 Einleitung

Wasser vermag in geringem Umfang natürliche Radionuklide aus den umgebenden Gesteinsschichten zu lösen. Auf dem Weg vom Grund- zum Trinkwasser können sich diese in bei der Wasseraufbereitung dabei anfallenden Rückständen anreichern. Mehrere Untersuchungsvorhaben zu natürlicher Radioaktivität in bayerischen Wasserversorgungsunternehmen (WVU) wurden bereits durchgeführt. Zunächst lag der Schwerpunkt der Untersuchungen in dem Vorkommen von Radon in der Raumluft bayerischer Wasserwerke [TRAUTMANNSEIMER, 2002; KÖRNER / BUCHANZOW, 2004]. In den darauffolgenden Jahren schlossen sich umfangreiche Studien zu Rückspülschlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung an [MALLICK, 2004; MALLICK, 2006; VORNEHM, 2008]. Die Untersuchung von Filtermaterialien in ausgewählten bayerischen WVU soll nun die Kenntnisse über das Vorkommen von natürlichen Radionukliden in Wasserwerken erweitern.

### 7.2 Arten der Trinkwasseraufbereitung

Filtermaterialien kommen bei der Enteisung, Entmanganung sowie bei der Entsäuerung in der Trinkwasseraufbereitung zum Einsatz. Für die ersten beiden Aufbereitungsarten, welche häufig kombiniert erfolgen, wird das Rohwasser in einem ersten Schritt im sogenannten Oxidator mit einem Oxidationsmittel versetzt. Dies ist im einfachsten und am häufigsten genutzten Fall Luftsauerstoff. Je nach Beschaffenheit des geförderten Wassers kommen aber auch Kaliumpermanganat oder Ozon zum Einsatz. Durch den Zusatz der Oxidationsmittel werden die löslichen  $\text{Fe}^{2+}$ - und  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen in schwerlösliche  $\text{Fe}^{3+}$ - und  $\text{Mn}^{4+}$ -Ionenverbindungen überführt und in Form von Oxiden und Hydroxiden ausgefällt [Wilhelm, 2008]. Ein gängiges Ablaufschema der Enteisung und Entmanganung ist in Abb. 19 dargestellt.

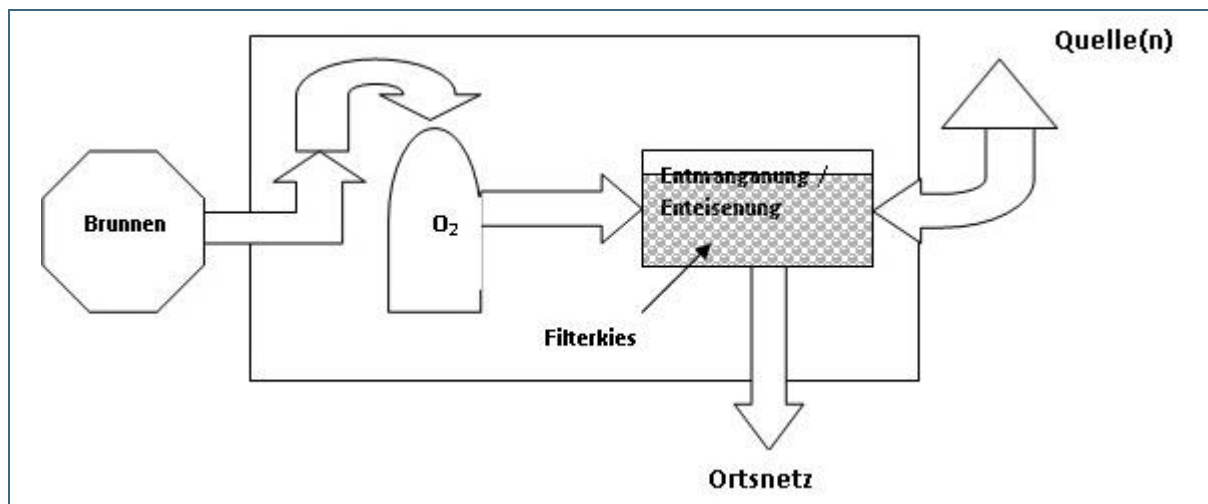


Abb. 19: Schematische Darstellung der möglichen Trinkwasseraufbereitung durch Enteisung und Entmanganung

Im darauf folgenden Schritt wird das Wasser über Tanks oder Becken mit Filtermaterialien geleitet, durch die suspendierte Eisen- und Manganverbindungen aus dem Wasser zurückgehalten werden (Abb. 20 und Abb. 21). Die Filter werden, um einer Verstopfung vorzubeugen, je nach Aufkommen von Rückständen in regelmäßigen Abständen rückgespült. Ausgefällene Eisenoxide und teilweise auch Manganoxide werden bei der Rückspülung überwiegend vom Filter entfernt und befinden sich im anfallenden Rückspülschlamm. Eine Ausnahme bildet entstandenes Manganoxid, das durch Ausbildung einer zusammenhängenden Braunsteinschicht auf dem Filtermaterial zurückgehalten wird (Abb. 22).

Vorwiegend bei der Entmanganung kommt es zur Mitfällung von Radium [Rühle, 1996]. Ra-226 und Ra-228 lagern sich in das Kristallgitter des Braunsteins ( $MnO_2$ ) ein und es kommt zu einer vermehrten Anreicherung von Radiumisotopen auf dem Filtermaterial. In Abhängigkeit der Standzeiten der Filter können sich auf diesem Wege an der Oberfläche bzw. in den obersten Schichten der Filtermaterialien hohe Konzentrationen an Radionukliden, v. a. Radium, ergeben.

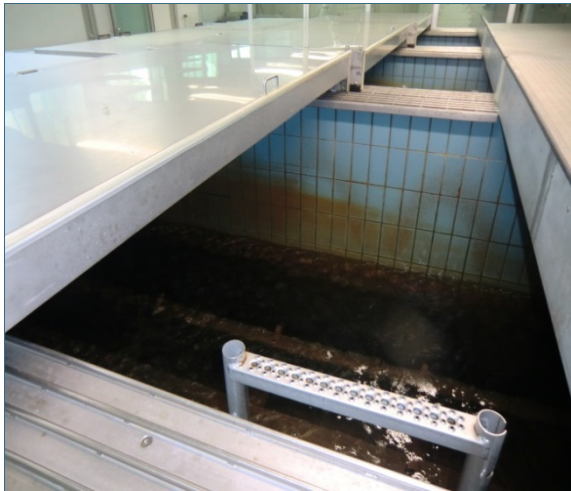


Abb. 20: begeh- und schließbare Filterbecken



Abb. 21: geschlossene Filtertanks



Abb. 22: gebrauchtes Filtermaterial mit Braunsteinanhaftungen



Abb. 23: Schaltpult zur Prozessregulierung, z. B. zur Rückspülung

Eine detaillierte Beschreibung zu den Lösungseigenschaften der einzelnen Radionuklide im wässrigen Milieu findet sich in den Berichten von MALLICK und Vornehm [MALLICK, 2006; VORNEHM, 2008].

### 7.3 Praktische Durchführung und Untersuchungsumfang

In Bayern gibt es ca. 2500 Wasserversorgungsunternehmen, von denen 703 WVU das geförderte Wasser einer Aufbereitung unterziehen [MALLICK, 2006]. An 367 WVU, bei denen im Rahmen vorausgegangener Projekte Rückspülschlämme untersucht worden waren, wurde ein Erhebungsbogen „Filtermaterial“ gesandt (Anhang I). Darin wurde u. a. um Informationen zur Aufbereitungsart, zum jährlichen Wasserdurchsatz, zur Standzeit und zur Masse des eingesetzten Filtermaterials und den Entsorgungswegen für die Filtermaterialien gebeten.



Eine begrenzte Anzahl von WVU wurde zusätzlich um Proben von Filtermaterial gebeten, vornehmlich all jene, bei denen bereits in den Rückspülschlämmen stark erhöhte Radionuklidaktivitäten ermittelt worden waren. Diese Auswahl wurde durch weitere WVU aus ganz Bayern ergänzt. Insgesamt wurden 61 Filtermaterialproben aus 40 WVU untersucht.

Bei 11 WVU wurden im Rahmen einer Ortsbegehung neben der Probenahme von Filtermaterialien auch Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung an den Filtern durchgeführt. Diese Werte wurden zur Berechnung der jährlich maximal zu erwartenden Exposition bei Arbeiten in geringer Entfernung zu den Filtermaterialien herangezogen.

Eine Entnahme von Filtermaterial konnte zumeist nur während Wartungsarbeiten erfolgen, da es sich bei den Filtern vorwiegend um geschlossene Systeme handelt, bei denen während des Aufbereitungsprozesses eine Entnahme von Filtermaterial nicht möglich ist. Zu dieser prozesstechnischen Einschränkung für eine Beprobung des Filtermaterials kommen noch hygienische Aspekte hinzu, da beim Öffnen der Filter Gefahr läuft, mit schädlichen Bakterien kontaminiert zu werden.

## 7.4 Geologie und Georegion

In den vorangegangenen Untersuchungsvorhaben des LfU zu Rückspülschlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung wurden die Wasseraufbereitungsrückstände verschiedenen „Georegionen“ zugeordnet. Ihnen liegt eine Karte von Hauptgrundwasserleitern des ehemaligen Bayer. Landesamtes für Wasserwirtschaft zugrunde (BayLfW) von 1994 zugrunde [VORNEHM, 2008]. Die für die Zuordnung notwendigen Informationen entstammen dem Bodeninformationssystem Bayern (BIS), dem zumeist die geologischen Einheiten der durch die Trinkwasserbohrung erschlossenen Grundwasserstockwerke zu entnehmen sind.

Die Georegionen in Bayern, die im Wesentlichen den obersten zur Trinkwassergewinnung genutzten Hauptgrundwasserleiter wiedergeben, sind in Abb. 24 dargestellt. Für die Beschreibung der Georegionen und ihrer hydrogeologischen Eigenschaften wird auf [VORNEHM, 2008] verwiesen.

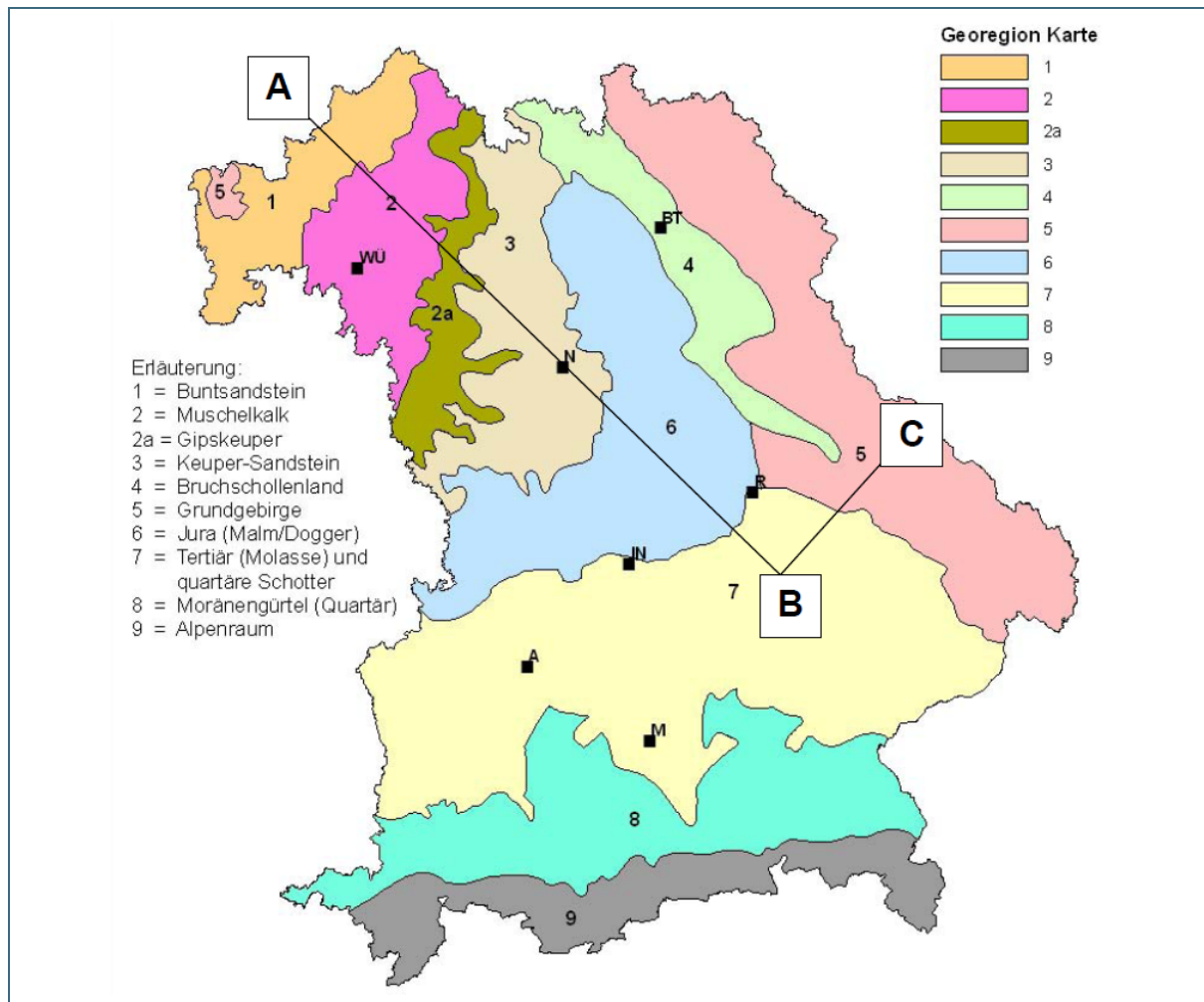


Abb. 24: Georegionen in Bayern [VORNEHM, 2008]

Das Profil durch das Deckgebirge in Abb. 25 veranschaulicht die Überlagerung der verschiedenen, den Georegionen zugrunde liegenden geologischen Einheiten. Die Georegion des geförderten Grundwassers wird dementsprechend entscheidend von der Brunnentiefe bestimmt. Werden sehr tief liegende Grundwasserleiter genutzt, so kann es zu Unterschieden in den Georegionen von höheren und tieferen Grundwasserleitern kommen.

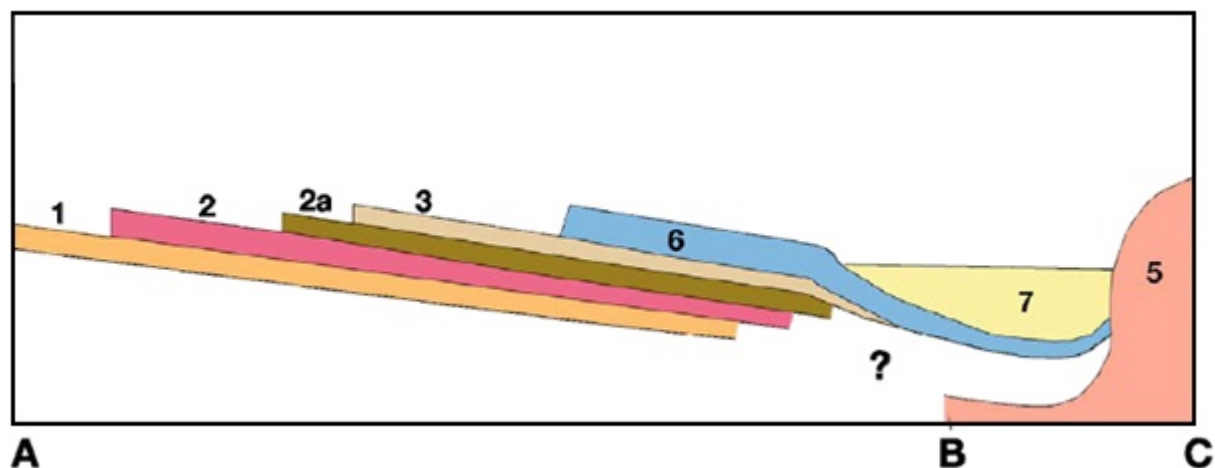


Abb. 25: Exemplarisches Profil durch das Deckgebirge der Schnitte A-B und B-C aus Abb. 24 [VORNEHM, 2008]

Um die Georegionen der Wasserwerksstandorte, bzw. der oberen Grundwasserleiter, mit den Georegionen des geförderten Grundwassers zu vergleichen, wurden diese tabellarisch gegenübergestellt (Tab. 54).

Tab. 54: Vergleich zwischen Georegion des Wasserwerkstandortes (Geo-WW) und Georegion des geförderten Grundwassers (Geo-H<sub>2</sub>O)

Betrieb	2078	2080/1	2080/2	2080/3	2097/1	2097/2	2097/3	2119/1	2119/2	2135
Geo-WW	2	2	2	2	2	2	2	2a	2a	2
Geo-H <sub>2</sub> O	2	1	1	1	2	2	2	7	7	2;7
Betrieb	3022/1	3022/2	3024/1	3024/2	3024/3	3028	3029	3073	3156	3168
Geo-WW	6	6	6	6	6	6	6	4	3	4
Geo-H <sub>2</sub> O	3	3	3;6	3	6	3	3;6	3	3	1
Betrieb	3184	3195/1	3195/2	3196	3217	3261	3274/1	3274/2	3281	3311
Geo-WW	3	2a	2a	3	3	3	3	3	6	6
Geo-H <sub>2</sub> O	3;6	2a/3	3	3	3	2a/3	3	3	3	3;6
Betrieb	3315	3340/1	3340/2	3345	4001/1	4001/2	4001/3	4031	4157	5051/1
Geo-WW	6	3	3	6	7	7	7	7	6	5
Geo-H <sub>2</sub> O	3	3;7	3;7	6	6	6;7	6	6	3;6	5
Betrieb	5051/2	5051/3	5051/4	5055/1	5055/2	5226/1	5226/2	5248/1	5248/2	5248/3
Geo-WW	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Geo-H <sub>2</sub> O	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6
Betrieb	5266	5306	5323	5334	5410/1	5410/2	5414	5425	7164	7331
Geo-WW	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7
Geo-H <sub>2</sub> O	6	5	5	5	5	5	5	5	7	7
Betrieb	8366									
Geo-WW	8									
Geo-H <sub>2</sub> O	8									

Für 21 der insgesamt 61 untersuchten Filtermaterialien folgt aus diesem Vergleich, dass das geförderte Grundwasser nicht aus dem obersten Grundwasserleiter des jeweiligen Wasserwerksstandortes stammt. Bei 11 weiteren Filtermaterialproben wurden zwei Georegionen angegeben, aus denen das Grundwasser gefördert wird. Die Förderstrecke der Brunnen befindet sich entsprechend in zwei unterschiedlichen geologischen Einheiten. Bei den übrigen 29 Wasserwerken stimmen die Georegionen überein.

## 7.5 Spezifische Aktivitäten der Filtermaterialproben

Sämtliche Filtermaterialproben wurden gammaspektrometrisch untersucht. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Trockenmasse, mit ursprünglichen Wassergehalten von etwa 10 bis 65 %. Durch die Auswahl der zu beprobenden Filtermaterialien, die zum größten Teil aus WVU stammen, in denen bereits erhöhte Aktivitäten in den Rückspülschlämmen ermittelt worden waren, repräsentieren die vorliegenden Untersuchungsergebnisse keine normal verteilte Grundgesamtheit für sämtliche bayerischen WVU. Eine statistische Auswertung ist daher nicht sinnvoll. Tab. 55 zeigt deshalb nur die erhaltenen Minimal- und Maximalwerte sowie die Anzahl der über der Nachweisgrenze liegenden Messwerte.

Tab. 55: Radionuklidkonzentrationen der gammaspektrometrisch untersuchten Filtermaterialien [Bq/g]

	Nuklid	Min. [Bq/g]	Max. [Bq/g]	Anzahl > NWG
U-Ra-Reihe	U-238	0,003	0,09	2
	Th-234	0,003	1,3	8
	Th-230	< NWG		0
	Ra-226	0,012	42,1	24
	Pb-210	0,005	2,03	27
Th-Reihe	Ra-228	0,0004	12,7	39
	Th-228	0,0004	10,8	40
	Ra-224	0,001	11,3	33
U-Ac-Reihe	U-235	0,0001	0,004	2
	Pa-231	< NWG		0
	Th-227	0,0005	0,008	8
	Ra-223	0,0008	0,007	4

Die höchste spezifische Aktivität wurde für das Nuklid Ra-226 in der U-Ra-Reihe mit 42,1 Bq/g ermittelt.

Die nächst höchsten spezifischen Aktivitäten traten für die Nuklide Ra-228 (12,7 Bq/g), Th-228 (10,8 Bq/g) und Ra-224 (11,3 Bq/g) in der Th-Reihe auf.

In der U-Ac-Reihe konnten keine relevanten Aktivitäten ermittelt werden.

Die größten ermittelten spezifischen Aktivitäten ergaben sich für einige Nuklide, z.B. Ra-226 und Ra-228 und diese sind in der Mehrzahl der Filtermaterialproben wiederzufinden. Daher werden im Weiteren nur diese Nuklide betrachtet. Alle Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchungen finden sich in Anhang II.

In Abb. 26 und Abb. 27 sind die Aktivitäten dieser ausgewählten Nuklide, Ra-226 und Pb-210 in der Uran-Radium- und Ra-228 (Ac-228), Ra-224 und Pb-212 (Th-228) in der Thorium-Zerfallsreihe, jeweils in Bezug auf die Georegionen der geförderten Wassers, dargestellt.

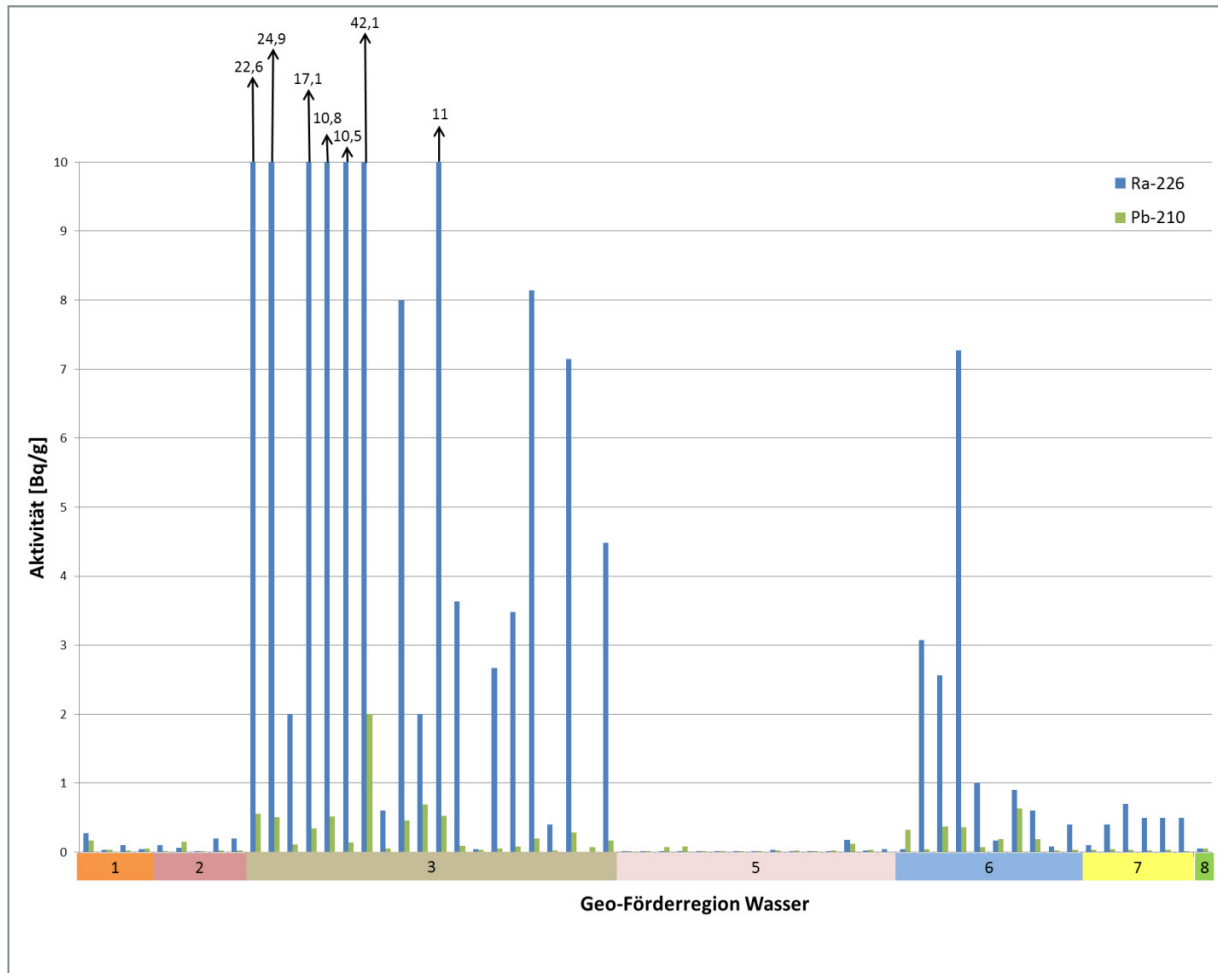


Abb. 26: Aktivität von Ra-226 und Pb-210 (U-Ra-Zerfallsreihe) in Filtermaterial

Die höchsten Aktivitäten von Ra-226 sind dabei in Georegion 3 (Keuper-Sandstein) festzustellen (Abb. 28). Daneben sind auch in Georegion 6 (Malm/Dogger) erhöhte Aktivitäten bis max. 7 Bq/g festzustellen. In den übrigen Georegionen wurden nur geringe Aktivitäten < 1 Bq/g ermittelt.

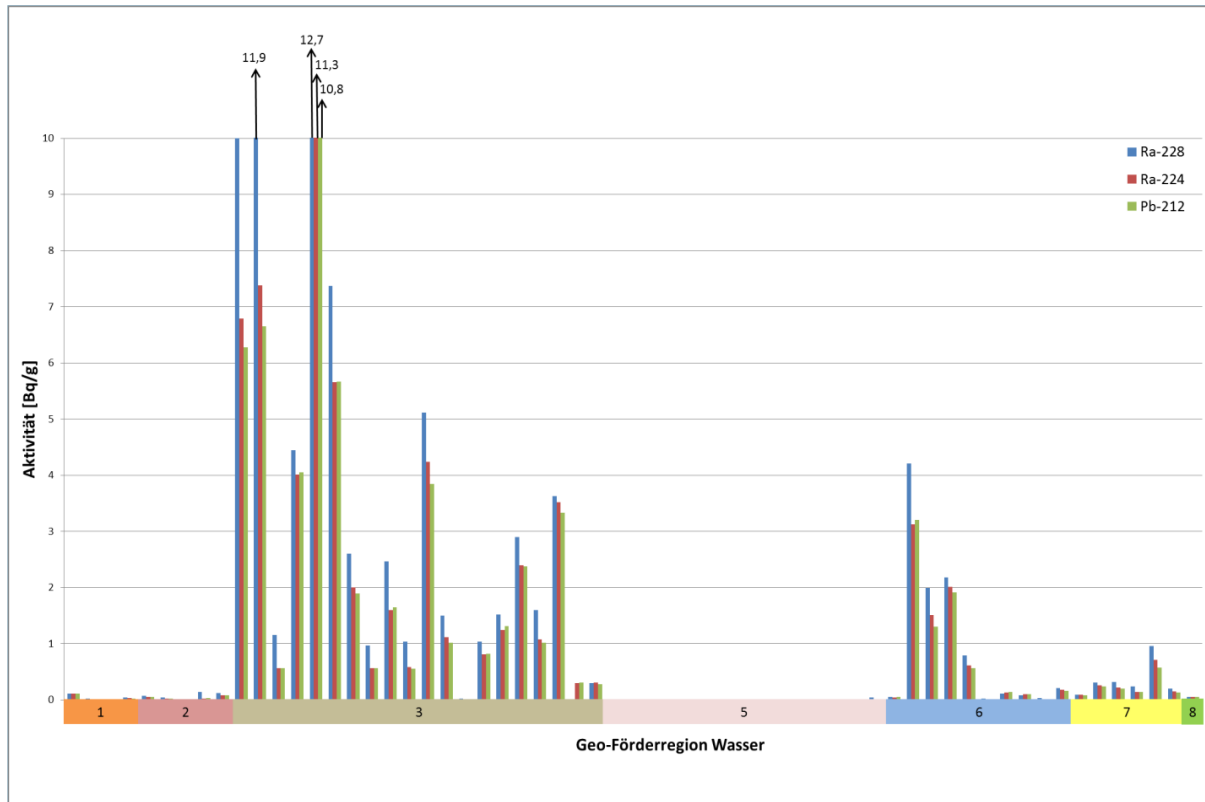


Abb. 27: Aktivität von Ra-228, Ra-224 und Pb-212 (Th-Zerfallsreihe) in Filtermaterial

Die Aktivitäten der Th-Reihe fallen insgesamt geringer aus als in der U-Ra-Reihe. Die höchsten Aktivitäten finden sich wiederum in Georegion 3 (Keuper-Sandstein) und Georegion 6 (Malm/Dogger). In den übrigen Georegionen liegen die Aktivitäten unter 1 Bq/g.

### 7.6 Einfluss von Aufbereitungsart, Filterstandzeit und jährlicher Durchflussmenge auf die Radionuklidanreicherung

In Tab. 56 sind für alle Filtermaterialproben, deren Summe der höchsten Aktivitäten der U-Ra- und der Th-Reihe 1 Bq/g überschreiten, die jeweilige Wasseraufbereitungsart, die Standzeit des Filtermaterials und die jährliche Durchflussmenge aufgelistet. Eine Liste zu sämtlichen untersuchten Filtermaterialproben ist in Anhang II hinterlegt.

Tab. 56: Einflussfaktoren für eine verstärkte Anreicherung von Radiumisotopen an Filtermaterialien (Fe: Enteisenung, Mn: Entmanganung, Es: Entsäuerung, As: Entarsenung)

Betrieb	$\sum$ (Ra-226, Ra 228), [Bq/g]	Georegion des geförderten Wassers	Aufbereitungsart	Jahr der Inbetriebnahme des FM	Durchfluss je Filter [m <sup>3</sup> /a]
3073	44,7	3	Fe/Mn	1963	83.000
3022/2	36,8	3	Fe/Mn/As/Es	1984	225.000
3028	33,5	3	Fe/Mn	1998	150.000
3022/1	32,6	3	Fe/Mn/As/Es	1970	225.000
3024/2	21,6	3	Fe/Mn	1990	3.900
3029	17,9	3	Fe/Mn/As/Es	1985	77.000
3195/2	16,1	3	Fe/Mn	1995	600.000
3274/2	11	3	Fe/Mn	1983	500.000
3311	10,8	3	Fe/Mn	1978	210.000
3184	10,5	3;6	Fe/Mn	k. A.	k. A.

Fortsetzung Tab. 56

Betrieb	$\Sigma$ (Ra-226, Ra 228), [Bq/g]	Georegion des geförderten Wassers	Aufbereitungsart	Jahr der Inbetriebnahme des FM	Durchfluss je Filter [m <sup>3</sup> /a]
4001/2	9,5	6;7	Fe/Mn	1981	276.000
3345	7,3	3	Fe/Mn	1985	348.000
4157	5,2	3;6	Fe	1963	62.000
3196	5,1	3	Fe/Mn	2001	1.750.000
3274/1	5	3	Fe/Mn	1975	800.000
4001/1	4,6	6	Fe/Mn	1981	283.000
3261	3,7	2a;3	Fe/Mn	1970	382.000
3024/1	3,2	3;6	Fe/Mn	2004	1.000
3195/1	3	2a;3	Fe/Mn	2007	700.000
4001/3	2,2	6	Fe/Mn	k. A.	k. A.
3315	2,2	3	Fe/Mn	2010	52.000
3281	2	3	Fe/Mn	1994	3.500.000
3156	1,6	3	Fe/Mn/Es	k. A.	k. A.
7164	1,5	7	Mn	1988	250.000

k. A. = keine Angaben

Als Einflussfaktor für erhöhte Gehalte an Radionukliden ergibt sich neben der Georegion die Wasseraufbereitungsart der Enteisung und Entmanganung. Bei sämtlichen Filtermaterialproben in Tab. 56 wurde entweder die Enteisung oder die Entmanganung, zumeist beide Aufbereitungsarten, angewandt.

Die Standzeit des Filtermaterials zeigt insofern einen Einfluss auf den Radiumgehalt, als dass die höchsten ermittelten Aktivitäten vornehmlich in Materialien auftreten, die seit mehreren Dekaden in Gebrauch sind. Die Standzeit des Filtermaterials kann daher zur Abschätzung für eventuelle zukünftige Überschreitungen von Aktivitätsgrenzwerten herangezogen werden. Wird binnen kurzer Betriebszeiten ein proportional übermäßiger Anstieg der Aktivitäten in den Filtermaterialien registriert, so ist damit zu rechnen, dass eine weitere Anreicherung mit NORM stattfinden wird. Ein Beispiel hierfür liefert Wasserwerk 3315, in dem das erst seit zwei Jahren in Gebrauch befindliche Filtermaterial bereits für Ra-226 eine Aktivität von 1,2 Bq/g und für Ra-228 von 0,99 Bq/g aufweist.

Dieses Beispiel zeigt ebenfalls, dass eine hohe Durchflussmenge nicht zwangsläufig mit einer hohen Radionuklidkonzentration einhergehen muss. Bei einer relativ geringen Durchflussmenge von 52.000 m<sup>3</sup>/a hatte die Summe der Radiumgehalte im Filtermaterial des WVU 3315 bereits nach zwei Jahren 1 Bq/g überschritten. Eine der geringsten Durchflussmengen besteht für das Filtermaterial im WVU 3024/2 mit jährlich lediglich 3.900 m<sup>3</sup>. Die Summe der größten spezifischen Aktivitäten der U-Ra- und der Th-Reihe liegt dort bei 21,6 Bq/g.

Damit lassen sich drei Einflussfaktoren auf die für natürliche Radionuklidaktivitäten in Filtermaterialien festhalten:

- die Georegion der Wasserförderung – hier ist vor allem Georegion 3 Sandstein-Keuper hervorzuheben,
- die aufgrund der Wasserchemie erforderliche Aufbereitungsart – die Entmanganung und die Enteisung
- die Standzeit der Filtermaterialien

## 7.7 Korrelation der spezifischen Aktivitäten von Radiumisotopen in Filtermaterialien und Rückspülschlämmen

Die bei der Enteisenung und Entmanganung anfallenden Rückspülschlämme zeigen gegenüber den Filtermaterialien in nahezu allen Fällen höhere Aktivitäten für die Nuklide Ra-226 und Ra-228 (Abb. 28).

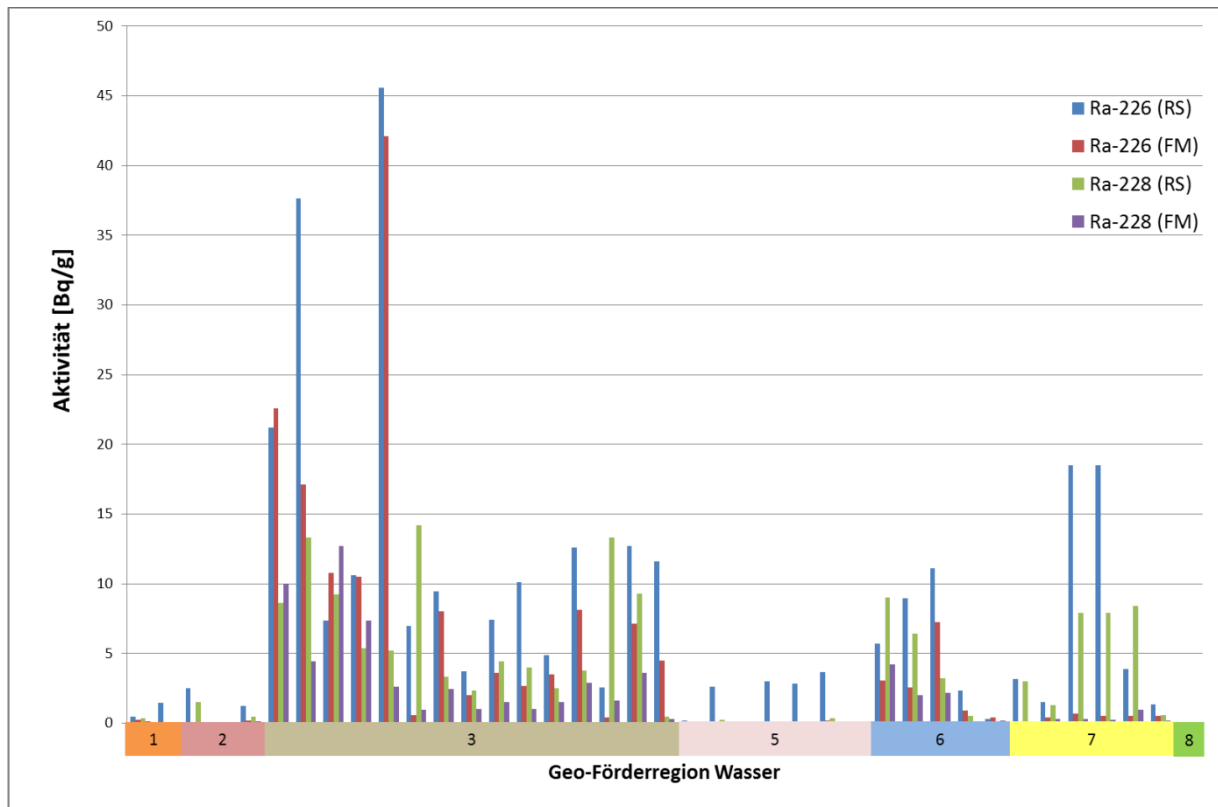


Abb. 28: Vergleich der Ra-226- und Ra-228-Gehalte in Rückspülschlämmen (RS) und Filtermaterialien (FM)

Abb. 28 zeigt, dass bei erhöhten Radiumaktivitäten in Rückspülschlämmen diese auch für die eingesetzten Filtermaterialien zu erwarten sind. Für die Enteisenung und Entmanganung kann daher für die Ra-226- und Ra-228-Gehalte eine Korrelation zwischen Rückspülschlämmen und Filtermaterialien vermutet werden.

Stellt man die in den Filtermaterialien und in den Rückspülschlämmen für die Nuklide Ra-226 und Ra-228 ermittelten spezifischen Aktivitäten gegeneinander dar, so ergeben sich Abb. 29 und Abb. 30.



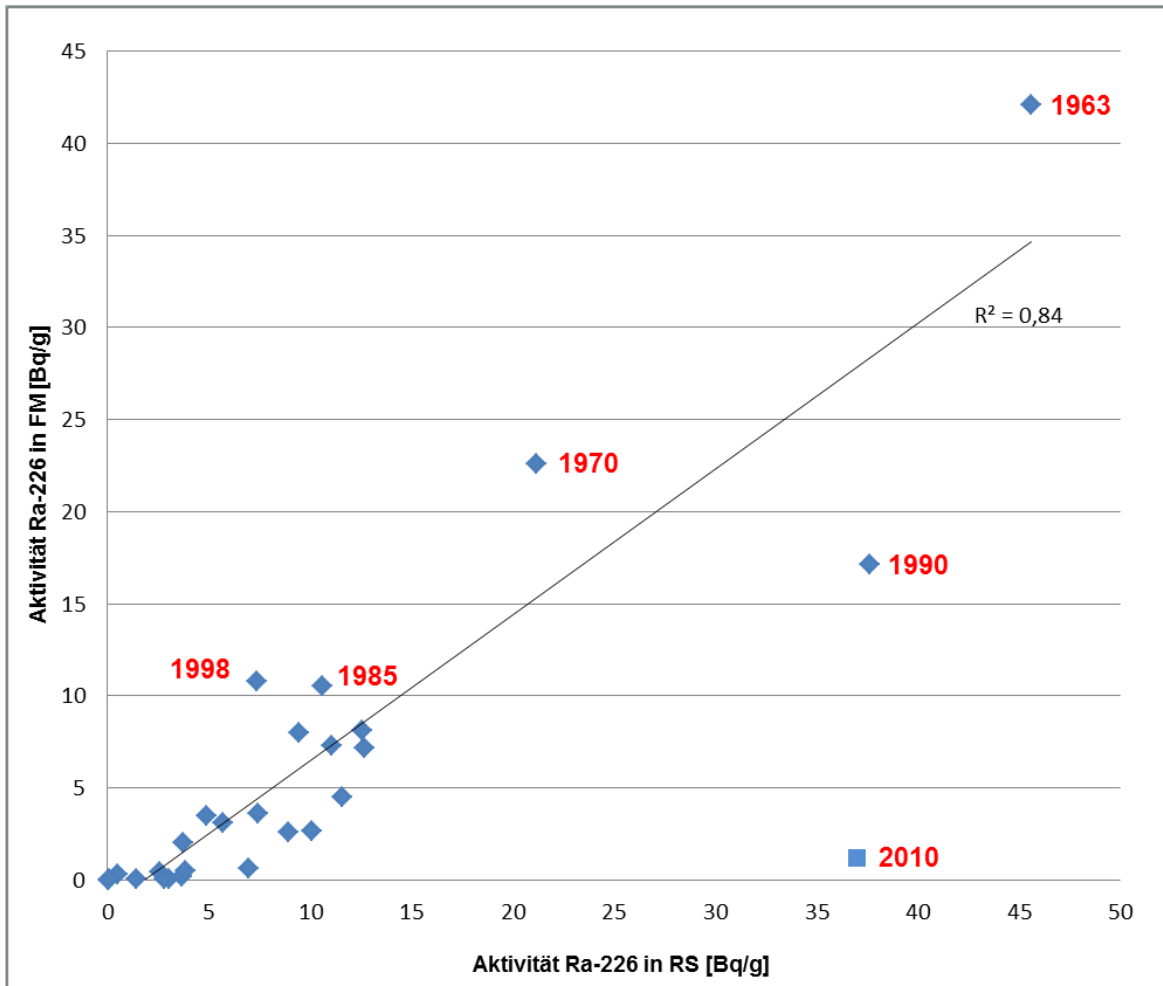


Abb. 29: Korrelation der Aktivitäten von Ra-226 in Filtermaterialien (FM) und Rückspülschlämmen (RS)

Zusätzlich sind für einige Datenpunkte die Jahreszahlen der Inbetriebnahme des Filtermaterials angegeben. Die auf den ersten Eindruck weit gestreuten Datenpunkte relativieren sich bei Betrachtung der Standzeiten. Das erst seit Kurzem (2010) im Gebrauch befindliche Filtermaterial des WVU 3315 weist eine geringe Aktivität von Ra-226 auf, wohingegen diese im Rückspülschlamm über 35 Bq/g liegt. Bereinigt man den Datensatz um diesen Punkt, so ergibt sich eine gute Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,84$ . Daraus folgt, dass bei einer hohen spezifischen Aktivität von Ra-226 im Rückspülschlamm und einer langen Standzeit des Filtermaterials mit einer entsprechend hohen Akkumulation von Ra-226 auf diesem Material ausgegangen werden kann.

Für das Radionuklid Ra-228 gilt diese Schlussfolgerung jedoch nicht gleichermaßen. Wie Abb. 30 zeigt, liegt auch bei Berücksichtigung der jeweiligen Standzeiten der Filtermaterialien keine Korrelation der Aktivitäten von Ra-228 in Rückspülschlämmen und Filtermaterialien vor.

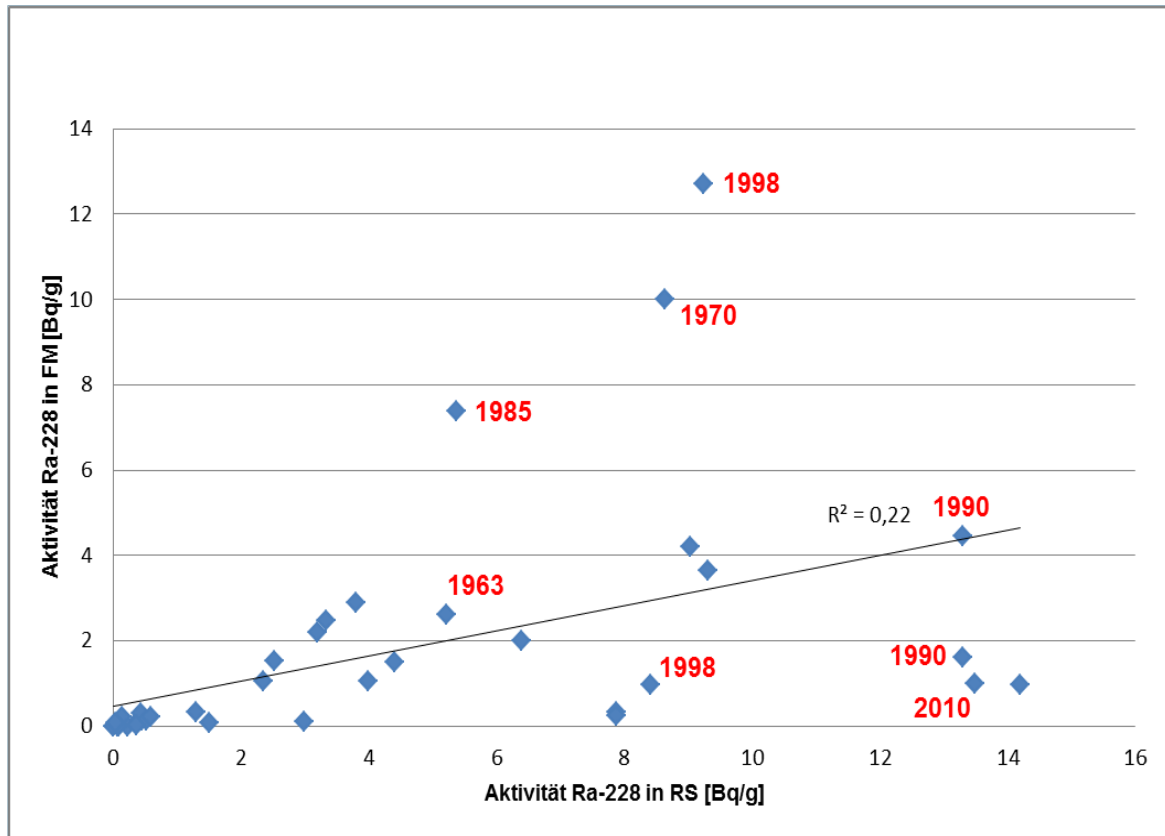


Abb. 30: Korrelation der Aktivitäten von Ra-228 in Filtermaterialien (FM) und in Rückspülschlämmen (RS)

### 7.8 Expositionsrechnungen für Arbeiten an Wasserfiltrationsanlagen

In elf Wasserwerken wurden Messungen der Gamma-Ortsdosisleistung (ODL) an relevanten Arbeitsplätzen durchgeführt. Eine Strahlenexposition durch das Filtermaterial ist bei Spül- und Wartungsarbeiten an den Filtern sowie beim Arbeiten an Schaltpulten oder bei Schreibarbeiten an Büroplätzen, insofern diese unmittelbar an die Filteranlagen angrenzen, möglich.

Eine Zusammenstellung der ermittelten ODL-Werte und der Dauer der jeweiligen Arbeiten sowie die Ergebnisse der Expositionsrechnungen finden sich in Tab. 57 und Tab. 58.

Tab. 57: Expositionsabschätzung für Arbeiten in Wasserwerken - Teil I

	Einheit	3022	3024		3028		3029	3196
Tätigkeitsbereich*		1	1	2	1	2	1	1
Expositionszeit	[h/a]	300	50	84	2	104	50	25
Hintergrundstrahlung	[µSv/h]	0,07	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,05
ODL (8cm)	[µSv/h]	1,70	1,50	-	0,56	-	2,01	0,30
ODL (50cm)	[µSv/h]	1,23	0,80	0,17	0,29	0,16	1,46	0,26
ODL (100cm)	[µSv/h]	0,80	0,56	-	0,25	-	1,08	-
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter</b>	[mSv/a]	0,480	0,050	0,033	0,001	0,064	0,085	0,008

\* Tätigkeitsbereiche: 1. Spül- und Wartungsarbeiten an Filtern, 2. Schaltpult- und Büroarbeiten

Tab. 58: Expositionsabschätzung für Arbeiten in Wasserwerken - Teil II

	Einheit	3274/2	3311	3315	3345		4001/1	5248	
Tätigkeitsbereich*		1	1	1	1	1	1	**	2
Expositionszeit	[h/a]	107	144	250	25	50	91	-	17
Hintergrundstrahlung	[µSv/h]	0,07	0,04	0,050	0,050	0,050	0,050	0,150	0,150
ODL (8cm)	[µSv/h]	0,42	3,2	0,134	0,68	0,28	0,30	0,77	-
ODL (50cm)	[µSv/h]	0,35	2,1	0,110	0,53	0,25	0,25	0,37	0,150
ODL (100cm)	[µSv/h]	0,25	1,4	0,098	0,42	-	-	0,25	-
<b>Effektive Dosis pro Arbeiter</b>	[mSv/a]	0,050	0,325	0,032	0,016	0,019	0,030	-	0,003

\* Tätigkeitsbereiche: 1. Spül- und Wartungsarbeiten an Filtern, 2. Schalthpult- und Büroarbeiten. \*\* Stillgelegter Wasserwerksteil mit alten Filtern.

Für die Berechnungen wurden als Expositionszeiten die maximalen Aufenthaltszeiten für alle anfallenden Arbeiten in unmittelbarer Nähe zu den Filtern und die ermittelte maximale ODL in 50 cm Entfernung veranschlagt. Ebenso wurden Ingestion und Inhalation auf Grundlage der Aktivitätswerte der Filtermaterialproben mit in die Expositionsrechnung einbezogen, auch wenn bei feuchtem Filtermaterial und zumeist geschlossenen Filtern ein Übergang von Partikeln in die Raumluft nahezu ausgeschlossen werden kann.

Die Ergebnisse der Expositionsrechnungen stellen somit eine Art „Worst-Case“ dar. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die reale Exposition in keinem Fall unterschätzt wird. Im Ergebnis lagen die größten Werte für die maximal zu erwartende jährliche Strahlenexposition mit 0,48 mSv/a und 0,325 mSv/a weit unterhalb des Dosiskriteriums von 1 mSv/a.

## 7.9 Mineralwasserhersteller und Brauereien

Bei den untersuchten Mineralwasserherstellern und Brauereien findet in der Mehrzahl der Unternehmen eine vergleichbare Grundwasserfiltration und Aufbereitung wie bei den kommunalen Wasserversorgungsunternehmen (WVU) statt. In einigen Fällen bedarf das Wasser jedoch keinerlei Aufbereitung, teilweise werden lediglich Schwebstoffe entfernt.

### 7.9.1 Erhebungsdaten

An 70 bayerische Mineralwasserhersteller und Brauereien wurde mit der Bitte um Teilnahme am Untersuchungsvorhaben ein Erhebungsbogen versandt (Anhang I). 24 Unternehmen haben Informationen übermittelt (Tab. 59).

Tab. 59: Erhebungsdaten - Mineralwasserherstellern und Brauereien

Betrieb	Aufbereitungsart	Georegion oberer Leiter	Georegion gefördertes Wasser	Fördermenge [m <sup>3</sup> /a]	Fallen Rückspülschlämme an?	Absetzbecken vorhanden?	Masse Schlamm [t/a]	Entsorgung Schlamm	Standzeiten der Filter [a]	Entsorgung FM
30001	Fe	6	3	235.000	ja	nein	-	-	3-5	Fachfirma
30147	Fe/Mn	6	3	40.100	ja	nein	-	Kanalisation	10	-
30197	U	6	3	30.000	nein	nein	-	-	-	-
30237	U	3	3	5.000	nein	nein	-	-	3	Fachfirma
40001	Fe	7	7	38.200	ja	nein	-	Kanalisation	-	-
40002	Fe	7	6	129.667	ja	nein	-	Kanalisation	-	-
40045	Fe	7	6	121.000	ja	nein	-	Kanalisation	-	-
40123	Filtration	4	3	40.000	ja	nein	-	Kanalisation	-	-
50059	Fe	5	5	-	ja	nein	-	Kanalisation	10	-
50111	Filtration	5	5	-	nein	nein	-	-	1	-

Fortsetzung Tab. 59

Betrieb	Aufbereitungsart	Georegion oberer Leiter	Georegion gefördertes Wasser	Fördermenge [m <sup>3</sup> /a]	Fallen Rückspülschlämme an?	Absetzbecken vorhanden?	Masse Schlamm [t/a]	Entsorgung Schlamm	Standzeiten der Filter [a]	Entsorgung FM
70002	nein	7	7	-	nein	nein	-	-	-	-
70004	Filtration	7	7	27.000	ja	nein	-	Kanalisation	25	-
70030	Fe	7	7	7.498	ja	nein	-	Kanalisation	-	-
70046	keine	7	7	92.000	nein	nein	-	-	-	-
70061	Fe	7	7	58.266	ja	nein	-	-	-	-
70067	Fe	7	7	160.000	ja	nein	-	Kanalisation	10	BD*
70076	Fe/S	7	7	200.000	ja	ja	-	Fachfirma	-	-
70078	Fe	7	7	45.273	ja	nein	-	Kanalisation	-	-
70090	Filtration	8	8	54.000	ja	nein	-	-	20	BD*
70123	Fe/S	7	7	87.209	ja	nein	-	Kanalisation	-	-
70142	Filtration	7	7	23.564	ja	nein	-	Kanalisation	15	-
70186	Fe	7	7	258.000	ja	ja	9,8	Deponie	20	-
80002	Fe	8	8	908.000	ja	ja	8	Fachfirma	1-5	-
	keine	8	8	37.000	nein	nein	-	-	-	-
80003	keine	8	8	86.000	nein	nein	-	-	-	-
80006	keine	8	8	47.426	nein	nein	-	-	-	-

Fe: Enteisenung; Mn: Entmanganung; U: Uranentfernung; S: Entschwefelung; \* Bauschuttdeponie

Gut die Hälfte der Betriebe unterzieht das Wasser einer Enteisenung. In zwei Unternehmen wird eine Uranentfernung vorgenommen (Aktivkohlefilter, Ionentauscherharze). Die übrigen Grundwässer werden lediglich von Schwebstoffen gereinigt oder bedürfen keinerlei Behandlung und können direkt dem Produktionsprozess zugeführt werden.

In Tab. 59 sind für jeden Betrieb die Georegion der jeweiligen obersten Grundwasserleiter und die der Fördertiefe des Wassers entsprechenden Georegionen aufgeführt (vgl. Abb. 24 und Abb. 25). In der Mehrzahl unterscheiden sich die Georegion des obersten Grundwasserleiters und die Georegion der tatsächlichen Grundwasserförderung.

Die Fördermengen an Grundwasser reichen im Jahr von ca. 5.000 m<sup>3</sup> bis 900.000 m<sup>3</sup> und liegen damit in der Größenordnung der Wasserversorgungsunternehmen.

In etwa zwei Drittel der Betriebe fallen Rückspülschlämme an, von denen lediglich drei in Absetzbecken gesammelt werden. In der Mehrzahl der Betriebe werden die Rückspülschlämme direkt in die Kanalisation abgegeben.

Für die Filtermaterialien (überwiegend Kiesbettfilter) wurden mit wenigen Jahren bis zu 25 Jahren sehr unterschiedliche Standzeiten angegeben. Überwiegend ist das ursprünglich installierte Material noch in Gebrauch. Bei der Uranentfernung sind die Wechselintervalle der Filtermaterialien allerdings wesentlich kürzer, da Ionentauscherharze zur Uranentfernung ihre Sättigungsgrenze nach wenigen Jahren erreichen.

## 7.9.2 Spezifische Aktivitäten der Filtermaterialproben

Sämtliche Betriebe wurden um die Einsendung von Filtermaterialproben (FM) zur gammastrahlungsmessenden Untersuchung gebeten. Bei den Filtrationsanlagen handelt es sich jedoch, entsprechend zu den Anlagen in der Wasserversorgung, zumeist um geschlossene Systeme. Ein direkter Kontakt mit den Filtermaterialien wird aus hygienischen Gründen vermieden und findet praktisch nur zu Wartungs- bzw. Tauschzwecken des Materials statt.

Es wurden nach Möglichkeit auch Rückspülschlammproben (RS) gammaspektrometrisch untersucht, um auf diese Weise auf eine mögliche Anreicherung der Filtermaterialien mit Radionukliden rückschließen zu können. Da ein Großteil der Mineralwasserhersteller und Brauereien ihre Spülwässer jedoch direkt in die Kanalisation leitet und keinerlei Rückhaltung der festen Bestandteile stattfindet, waren Rückspülschlämme ebenfalls nur sehr eingeschränkt beprobbar.

Insgesamt konnten von acht Betrieben vierzehn Proben gammaspektrometrisch untersucht werden (Tab. 60). Eine umfassende Zusammenstellung der ermittelten spezifischen Aktivitäten ist in Anhang II enthalten.

Tab. 60: Spezifische Aktivitäten in FM und RS der Mineralwasserhersteller und Brauereien

		Nuklide									
Betrieb	Aufbereitungsart	Probe	U-Ra-Reihe				Th-Reihe			U-Ac-Reihe	
			U-238	Th-234	Ra-226	Pb-210	Ra-228	Th-228	Ra-224	U-235	Th-227
30147	Fe/Mn	FM 1	< 0,4	< 0,05	1,23	< 0,06	0,41	0,27	0,28	< 0,02	< 0,02
		FM 2	< 0,7	< 0,1	23,0	1,23	9,13	6,44	-	< 0,4	< 0,06
30197	U	FM 1	0,075	0,061	0,030	0,036	0,049	0,042	0,042	0,0034	< 0,005
		FM 2	1,65	1,47	< 0,05	0,062	0,0088	0,0077	< 0,01	0,076	< 0,008
		RS	4,57	4,0	< 0,2	0,15	0,017	0,0084	< 0,05	0,21	< 0,03
70030	Fe	RS	< 1	< 0,1	< 0,9	0,79	0,36	0,14	0,15	< 0,05	< 0,09
70067	Fe/S	RS	< 0,4	< 0,07	< 0,3	< 0,1	0,14	0,035	< 0,05	< 0,02	< 0,02
70090	Filtration	FM 1	< 0,05	< 0,01	0,10	< 0,01	0,062	0,027	0,028	< 0,003	< 0,004
		FM 2	< 0,05	< 0,01	0,11	0,010	0,064	0,034	0,037	< 0,003	< 0,004
70142	Filtration	FM 1	< 0,3	< 0,05	1,26	0,048	0,49	0,35	0,41	< 0,02	< 0,03
		FM 2	< 0,1	< 0,02	0,82	0,034	0,38	0,25	0,31	< 0,1	< 0,01
		FM 3	< 0,4	< 0,07	1,35	< 0,07	0,57	0,46	0,45	< 0,02	< 0,03
70186	Fe	RS	< 0,3	< 0,4	0,78	< 0,04	0,61	0,11	0,13	< 0,02	< 0,009
80002	Fe	FM	< 0,03	0,0077	< 0,02	0,0098	0,014	0,010	0,011	< 0,002	< 0,003

Die höchsten Aktivitäten wurden in einem Filtermaterial aus der Georegion 3 ermittelt, mit einem Maximalwert von 23 Bq/g für Ra-226 und 9,1 Bq/g für Th-228. Erhöhte Aktivitäten in Filtermaterialien konnten auch in Georegion 7 (maximal 1,4 Bq/g Ra-226) und in Georegion 8 (maximal ca. 0,8 Bq/g für Ra-226) gemessen werden.

In dem Betrieb, in dem eine Uranentfernung betrieben wird, zeigen die Filtermaterialproben eine maximale U-238-Aktivität von ca. 1,7 Bq/g und der zugehörige Rückspülschlamm von etwa 4,6 Bq/g.

In drei Unternehmen (Georegion 7 und 8) liegen bei allen Rückspülschlämmen und Filtermaterialien die Radionuklidaktivitäten unter 0,2 Bq/g.

## 7.10 Zusammenfassung

Bei Filtermaterialien in Wasserversorgungsunternehmen, bei Mineralwasserherstellern und Brauereien wurden zum Teil stark erhöhte Radionuklidaktivitäten gemessen. Eine lange Standzeit, die Wasseraufbereitungsart und die Georegion des geförderten Grundwassers traten dabei als entscheidende Faktoren hervor.

Erhöhte Radionuklidkonzentrationen in Filtermaterialien finden sich nur bei der Enteisung und Entmanganung. Wird hingegen eine Entsäuerung bzw. eine Aufhärtung des Wassers mit Kalk vorgenommen, so finden sich weder in Filtermaterialien noch in Rückspülschlämmen erhöhte Radiumaktivitäten. Die Untersuchung der Filtermaterialien aus der Entsäuerung erbrachte für sämtliche gemessenen Radionuklide spezifische Aktivitäten weit unterhalb von 0,2 Bq/g.

Für eine Bewertung der Messergebnisse in Anlehnung an Anlage XII Teil B StrlSchV wurden exemplarisch für jede Filtermaterialprobe die jeweils höchste spezifische Aktivität aus der Uran-Radium- und der Thorium-Reihe addiert. Die Summen mit einer Aktivität über 1 Bq/g sind in Abb. 31 dargestellt.

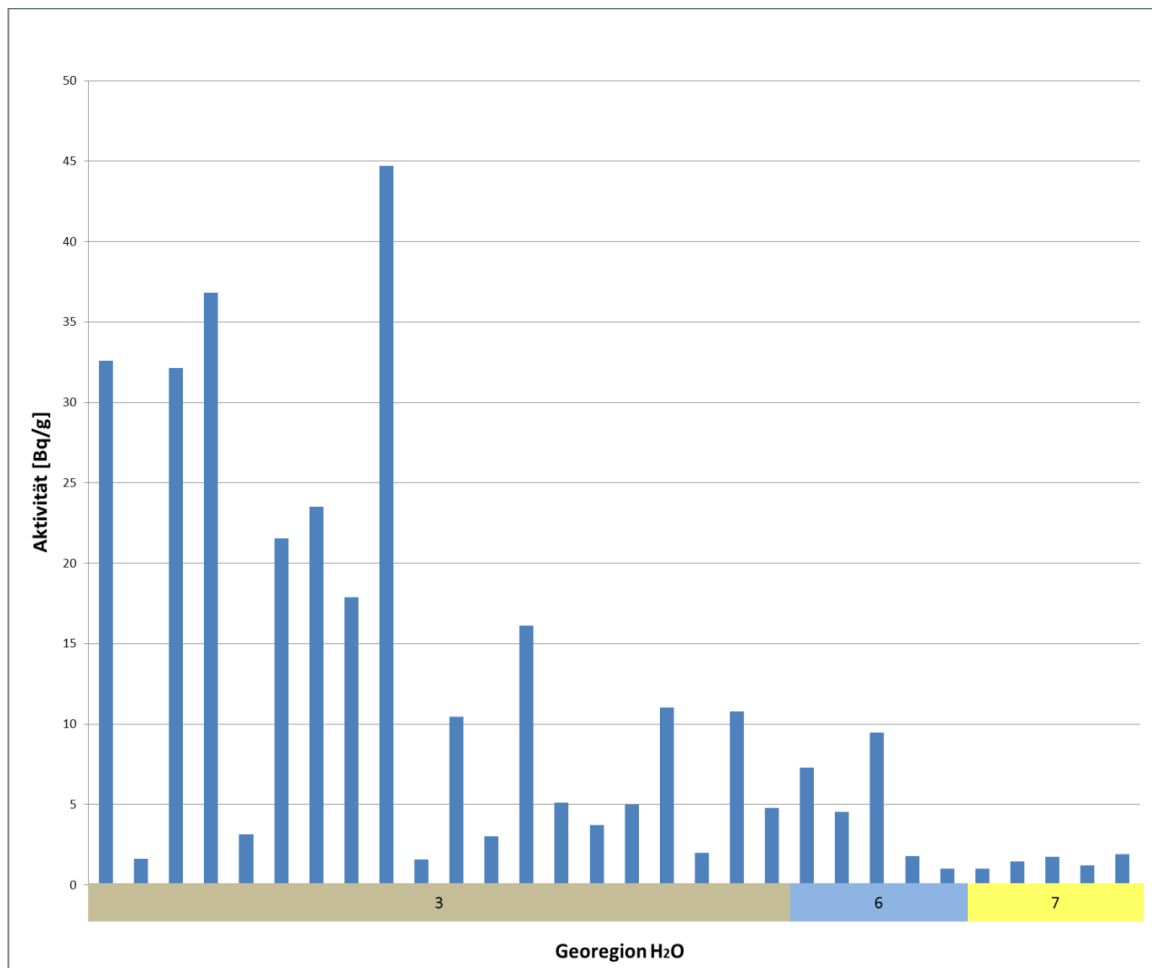


Abb. 31: Summen der maximalen spezifischen Aktivitäten der U-Ra- sowie der Th-Reihe >1 Bq/g in FM.

Sämtliche Summen über 1Bq/g setzen sich aus den spezifischen Aktivitäten der Radionuklide Ra-226 und Ra-228 zusammen. Insgesamt trat dieser Fall in 30 der 71 untersuchten Filtermaterialproben bzw. in 21 Betrieben auf.

Zur Beurteilung einer möglichen radiologischen Relevanz für die ermittelten Strahlenexpositionen durch die Filtermaterialien wurde in Anlehnung an § 97 StrlSchV eine effektive Dosis von 1 Millisievert pro Kalenderjahr herangezogen. Sämtliche berechneten Expositionswerte unterschreiten dieses Dosiskriterium deutlich. Damit besteht bei den zugrunde gelegten Aufenthaltszeiten für Arbeiten an den Filtern bei den untersuchten Betrieben derzeit aus Sicht des Strahlenschutzes kein Handlungsbedarf.

Zur Entsorgung von gebrauchtem Filtermaterial (Entsorgungsweg, Menge, Häufigkeit) wurden kaum Angaben gemacht. Dies ist nicht zuletzt auf die langen Standzeiten der Kiese zurückzuführen.

## 8 Zusammenfassende Bewertung der NORM-Situation in Bayern

Im vorliegenden Untersuchungsvorhaben „Untersuchung von natürlich radioaktiven Materialien (NORM)“ sollten die in der EU-Richtlinie 2013/59/Euratom genannten Industriezweige, in denen natürlich vorkommende radioaktive Materialien eingesetzt werden, für Bayern erhoben sowie im Hinblick auf die vorkommenden Materialien und die daraus resultierende Exposition der Beschäftigten untersucht werden.

In Bayern sind von den 16 genannten Industriezweigen folgende Industriezweige vertreten und nicht bereits in der StrSchV geregelt: Zirkon- und Zirkonium-Industrie; Zementherstellung, Instandhaltung von Klinkeröfen; Kohlekraftwerke, Wartung von Heizkesseln; Zinn-/Blei-/Kupferschmelze und Grundwasserfilteranlagen.

Recherchen lieferten die in Frage kommenden Betriebe. Zur ersten Einschätzung der NORM-Situation wurde diesen Betrieben ein Erhebungsbogen zugesandt. Ergab sich daraus, dass Arbeiten mit NORM-haltigen Materialien stattfinden, so wurde um die Übersendung von Probenmaterial zur gamma-spektrometrischen Analyse gebeten. Ergaben die Analyseergebnisse erhöhte Aktivitäten von NORM, so wurde um eine Ortsinsicht mit Messung der herrschenden Gamma-Ortsdosisleistung an den entsprechenden Arbeitsplätzen gebeten. Aus diesen Daten wurde die zu erwartende jährliche Exposition an den entsprechenden Arbeitsplätzen berechnet. Da die Teilnahme am Untersuchungsvorhaben auf freiwilliger Basis beruhte, konnten einige Industriezweige z. T. nur stichprobenartig untersucht werden.

Insgesamt haben sich 492 Betriebe an dem Untersuchungsvorhaben beteiligt. Es wurden 198 Proben einer gamma-spektrometrischen Analyse unterzogen. In 33 Unternehmen wurden zudem vor Ort Messungen der an den jeweiligen Arbeitsplätzen herrschenden Gamma-Ortsdosisleistung vorgenommen und eine Expositionsrechnung durchgeführt.

Die ermittelten spezifischen Aktivitäten fallen in Bezug auf Höhe und die jeweils vorherrschenden Nuklide je nach Industrieprozess sehr unterschiedlich aus. Dabei lässt sich unterscheiden, ob bereits erhöhte Radionuklidgehalte in den eingesetzten Ausgangsstoffen vorlagen, z. B. in der Zirkon- und Zirkonium-Industrie, oder während des industriellen Prozesses eine Anreicherung mit NORM in einem eingesetzten Material oder an einem Produktionsort stattgefunden hat, z. B. bei der Kohleverfeuerung oder der Trinkwasseraufbereitung.

In der Zirkon- und Zirkonium-Industrie lagen die höchsten spezifischen Aktivitäten zwischen 4 und 7 Bq/g und traten für die Nuklide der U-Ra-Reihe auf. Diese NORM-Stoffe dienen zum einen als Ausgangsstoffe zur Erzeugung eines speziellen Produktes, z. B. der Herstellung von technischer Keramik, wobei in der Regel keine Reststoffe anfallen. Die spezifische Aktivität des Produktes ist gegenüber den Ausgangsstoffen in der Regel vermindert. Zum anderen werden die NORM-Stoffe als Hilfssubstanzen in einen technischen Prozess eingebunden, z. B. bei der Verwendung als Schlichte. Dabei wird durch ständiges Wiederverwenden und eine prozessbedingte Vermischung mit aktivitätsarmen Stoffen eine starke Abnahme der spezifischen Aktivitäten erreicht. Die verbleibenden Aktivitäten bewegen sich unterhalb von 0,2 Bq/g.

Feuerfestmaterialien gehen in der Regel zu Aufarbeitungszwecken zurück an den jeweiligen Schamottehersteller. Bei den Strahlmittelbetrieben zum Einsatz kommende NORM-Stoffe bzw. sich daraus ergebende Rückstände wiesen nur geringe spezifische Aktivitäten bis maximal 0,5 Bq/g auf.

Bei der Instandhaltung von Klinkeröfen in der Zementindustrie konnten in den Feuerfestmaterialien vereinzelt etwas erhöhte spezifische Aktivitäten ermittelt werden. Zirkoniumhaltiges Material zur Stabilisierung wird dem Feuerfestmaterial nur in einzelnen Fällen und dann lediglich im unteren Prozentbereich zugegeben. Eine Wiederverwertung des Feuerfestmaterials durch den Hersteller wird, auch aus

kostentechnischen Gründen, in der Regel praktiziert. Eine Akkumulation des leicht flüchtigen Nuklids Pb-210 an kühlen Stellen im Rauchgastrakt konnte beobachtet werden. Die Aktivitäten lagen jedoch in allen Fällen unterhalb von 1 Bq/g.

Bei der Verbrennung von Kohle konnte eine Anreicherung von Pb-210 in den Kesselablagerungen beobachtet werden. Sie zeigt sich an Oberflächen der Kohlekessel und lag in einem Einzelfall bei über 150 Bq/g. Eine einmalige Untersuchung auf Po-210 in dieser stark aktiven Probe ergab ebenfalls eine stark erhöhte spezifische Aktivität für dieses Nuklid. Eine generelle Aussage ist aufgrund der geringen Datenmenge in Hinblick auf Anreicherungsgrade an Kesseloberflächen allerdings nicht möglich. Bei staubintensiven Arbeiten ist in den vorliegenden Fällen eine hinreichende Vermeidung der Inhalation und Inkorporation von NORM-Stoffen bereits durch das Tragen von persönlicher Schutzkleidung (z. B. Staubmaske, Handschuhe) zu erreichen. Dies wird in allen Betrieben bereits durch den Arbeitgeber gefordert.

Zinn-, Blei- und Kupferschmelzbetrieben sind in Bayern kaum vorhanden und es werden überwiegend Kleinstmengen verarbeitet. Insgesamt war deren Beteiligung am Untersuchungsvorhaben gering und es wurden von den Betrieben nur sehr wenige Informationen über ihre gegenwärtige NORM-Situation bereitgestellt.

Die in der Trinkwasseraufbereitung zum Einsatz kommenden Filtermaterialien reichern vornehmlich Radiumnuklide an. Zum Teil wurden spezifische Aktivitäten von mehr als 10 Bq/g ermittelt. Derart stark erhöhte Aktivitäten traten ausnahmslos für Grundwässer auf, die aus der geologischen Formation des Keuper-Sandsteins gefördert werden. Weitere Einflussfaktoren sind die Wasseraufbereitungsart (Enteisung und Entmanganung) und die Standzeit der Filtermaterialien. Eine Korrelation der spezifischen Aktivitäten in Filtermaterialien und Rückspülschlämmen wurde für das Nuklid Ra-226 festgestellt.

In sämtlichen untersuchten Betrieben und Industriezweigen lagen die für Arbeiten mit NORM-Stoffen ermittelten Strahlenexpositionen unterhalb von 1 mSv/a. In nahezu allen Fällen befanden sie sich sogar weit unterhalb dieses Dosiskriteriums. Eine Annäherung an das Dosiskriterium ergab sich lediglich, wenn die betriebsinternen Lagerorte von NORM und die Dauerarbeitsplätze im Unternehmen nicht ausreichend voneinander getrennt sind. Eine Reduktion der Exposition im Sinne des Minimierungsgebotes kann in diesen Fällen durch eine räumliche Trennung von NORM und Dauerarbeitsplatz erlangt werden.

Das vorliegende Untersuchungsvorhaben zur NORM-Situation in bayerischen Betrieben hat ergeben, dass zwar spezifische Aktivitäten über 1 Bq/g und vereinzelt auch über 10 Bq/g vorliegen, aber dennoch erhöhte Expositionen (> 1mSv/a) bei Arbeiten mit NORM nicht zu erwarten sind. Bei der Umsetzung der Richtlinie 2013/59/Euratom in nationales Recht sollten daher für den praktischen Vollzug Regelungen getroffen werden, die einen den niedrigen Expositionen angemessenen Aufwand bedingen.



## Literaturverzeichnis

- B.P.S. Engineering GmbH: *Die drei natürlichen Zerfallsreihen* (unveröffentlicht), Zwickau.
- Bundesimmissionsschutzverordnung (2010): Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *gesetze-im-internet.de*, [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv\\_1\\_2010/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_1_2010/gesamt.pdf), (Abgerufen am 05. September 2013).
- Brunk, F. (2012): *Feuerfeste Zirkon-Erzeugnisse*, [www.pd-refractories.com](http://www.pd-refractories.com): [http://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/RD\\_zr\\_brunk.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/RD_zr_brunk.pdf?__blob=publicationFile&v=4), (Abgerufen am 02. September 2013).
- Bundesamt für Strahlenschutz (2010): *Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau)*, In: DORIS - Digitales Online Repositorium und Informations-System, [https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-20100329966/3/BfS\\_2010\\_SW\\_07\\_10\\_Bergbau.pdf](https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-20100329966/3/BfS_2010_SW_07_10_Bergbau.pdf), (Abgerufen 31.03.2104).
- Bundesamt für Strahlenschutz (2012): *Grenzwerte und Dosisbegriffe im Strahlenschutz*, <http://www.bfs.de/de/ion/wirkungen/grenzwerte.html>, (Abgerufen am 30. August 2012).
- Bundesamt für Strahlenschutz (2012): *Strahlenexposition der Bevölkerung durch natürliche und künstliche Quellen*, <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=2459>, (Abgerufen am 30. August 2012).
- Bundesanzeiger (2001): *Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition*, In: *Bundesanzeiger* Beilage 160 a und b vom 28.08.2001.
- Bundesministerium des Inneren (2013): *Gemeinsames Ministerialblatt*, <http://www.gmbl-online.de/ausgaben.html#issue-2013-17>, (Abgerufen am 09. September 2013).
- Deges, E. T. (1977): *Uranium anomaly in Black Sea sediments*, In: *Nature*, 269, S. 566-569.
- Europäische Kommission (2014): *Richtlinie 2013/59/Euratom*, In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 17.01.2014, Brüssel
- Europäische Kommission (2012): Proposal for a Council Directive laying down basic safety standards for protection against the danger arising from exposure to ionising radiation, [http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation\\_protection/doc/2012\\_com\\_242.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/2012_com_242.pdf), (Abgerufen am 18. September 2013).
- Gatzweiler, R. (1996): *Lagerstätten- und produktionsbedingte Umweltauswirkungen des Uranerzbergbaus*, In: *Umweltradioaktivität*, S. 97-114, Ernst & Sohn, Bonn.
- Gellermann, R. (2007): *Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs (Bericht I)*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn.
- Haidasan, P. P. (2011). *Implications of the Revised International Basic Safety Standards on Natural Sources*, IAEA - International Atomic Energy Agency, Hasselt( Belgien).
- Hasse, S. (2008): *Giesserei Lexikon*, 19. Auflage, SCHIELE & SCHÖN, Berlin.
- Herman, J. (1980): *The mobility of Th in natural waters at low temperatures*, In: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, S. 1753-1766.

- Hightech Ceram (2012): *www.hightech-ceram.de*, (Abgerufen 2012).
- Hollemann & Wiberg (1995): *Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 101. Auflage*, Walter de Gruyter & Co., Berlin.
- IAEA (2003): *Extend of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) an Technological Options for Mitigation*, In: *Technical Reports Series*, No. 419, Wien.
- J. I. Kim, (1992): *Chemical Interaction of Actinide IONS with Groundwater Colloids in Gorleben Aquifer Systems*, In: *Radiochim. Acta*, 57/58, S. 147 ff.
- Kirchartz, B. (1995): *Abscheidung von Spurenelementen beim Klinkerbrennprozeß*, In: *Verfahrenstechnik der Zementherstellung*, S. 570-573, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- Körner, S. & Buchanzow, A. (2004): *Strahlenexposition durch natürliche Radioisotope aus gewerblichen Betrieben in Bayern*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg.
- Lechner, J. (2003): *Zirkonoxid*, In: *GZM-Praxis und Wissenschaft*, 8.Jg, S. 22-25.
- Mallick, R. (2004): *Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftigen Rückständen*, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- Mallick, R. (2006): *Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und von überwachungsbedürftigen Rückständen - Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung, Teil 1*, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- Mann, H. / Fyfe, W. S. (1985): *Uranium uptake by algae: experimental and natural environments*, In: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22(12), S. 1899-1903.
- Mayr, F. (2009): *Kesselbetriebstechnik*, RESCH, Gräfelfing.
- Merkel, B. / Sperling, B. (1998): *Hydrogeochemische Stoffsysteme Teil II*, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- Puch, K.-H. G. (1997). *Radioactivity of combustion residues from coal fired power stations*. In: *Proc. Int. Symp. on Radiological Problems with Natural Radioactivity in the Non-nuclear Industry*, Amsterdam (Niederlande).
- Regitz, M. / Falbe, J. (1992): *Römpp Chemielexikon*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Rentz, O. / Gültling, K. / Karl, U. (2002): *Erarbeitung der Grundlagen für das BVT-Merkblatt Großfeuerungsanlagen im Rahmen des Informationsaustausches nach Art. 16(2) IVU-Richtlinie*, Umweltbundesamt, Berlin.
- Rühle, H. (1996): *Radioaktivität in verschiedenen Wasservorkommen*, In: *Umweltradioaktivität*, S. 157-178.
- Safety Health and Environment Dep. Iluka Inc. (2003): *Sicherheitsdatenblatt Zirkonsandprodukte*, In: *Iluka Resources Inc., USA*.
- Schlitt, V. (2008): *Uran in der Trinkwasseraufbereitung*, Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe.
- Schternbosch, M. / Bräutigam, K. R. (2000): *Herstellung von Zementklinker, Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen*, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe.

- Selby, J. H. (2006): *The industrial uses of zircon and zirconi, and the radiological consequences of these uses*, Zircon Minerals Committee, Richards Bay 3900, South Africa.
- Siehl, A. (1996): *Umweltradioaktivität*, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.
- Stahl-Informations-Zentrum (2010): *Strahlen von Stahl, Merkblatt 212*, Düsseldorf.
- Strahlenschutzkommission (1981): *Zum Vergleich der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kohlekraftwerken und aus Kernkraftwerken*, *Bundesanzeiger Nr. 150*, S. 1-8.
- StrlSchV (2011): *Strahlenschutzverordnung unter Berücksichtigung der Änderungen durch die Novellierung 2011*, BGBl I, S. 212, 24.02.2012, Köln.
- Trautmannsheimer, M. (2002): *Abschlussbericht zu "Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern"*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg.
- UNSCEAR (1988): *Report to the General Assembly, with annexes*, New York.
- Vornehm, C. (2008): *Natürliche Radionuklide in Rückständen aus der Trinkwasseraufbereitung, Teil II*, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- Wedepohl K. H. (1978): *Handbook of Geochemistry*, Vol. II/2, Springer, Berlin-Heidelberg-New York.
- Wilhelm, S. (2008): *Wasseraufbereitung, Chemie und chemische Verfahrenstechnik*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York.
- Wolff, F. (2004): *Biomasse in Baden-Württemberg - ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz als Energieträger*, Universitätsverlag, Karlsruhe.
- Zircon Minerals Committee (2012): *www.zmcweb.org*, (abgerufen am 2012).

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht Betriebe der Zirkon- und Zirkonium-Industrie	15
Tab. 2: Erhebungsdaten der Glasschmelzbetriebe	16
Tab. 3: Gamma-Ortsdosisleistung in Betrieb ZG06 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	16
Tab. 4: Spezifische Aktivitäten in FFM aus ZG06 [Bq/g]	17
Tab. 5: Expositionsabschätzung ZG06	17
Tab. 6: Erhebungsdaten der Gießereien	18
Tab. 7: Gamma-Ortsdosisleistung in Gießereien [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	19
Tab. 8: Spezifische Aktivitäten in Proben aus den Gießereien [Bq/g]	19
Tab. 9: Expositionsabschätzung ZGi10, ZGi11, ZGi12, ZGi13	20
Tab. 10: Erhebungsdaten - Technische Keramiken	22
Tab. 11: Spezifische Aktivitäten in technischen Keramiken [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	22
Tab. 12: Spezifische Aktivitäten in technischen Keramiken [Bq/g]	23
Tab. 13: Expositionsberechnung Hersteller technischer Keramiken Teil I	24
Tab. 14: Expositionsberechnung Hersteller technischer Keramiken Teil II	24
Tab. 15: Ergebnisse ODL-Messungen Schamottehersteller ZF01 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	26
Tab. 16: Spezifische Aktivitäten in Proben von Schamottehersteller ZF01	26
Tab. 17: Expositionsberechnung Schamottehersteller	27
Tab. 18: Erhebungsdaten Strahlmittelbetriebe	28
Tab. 19: Spezifische Aktivitäten in Proben aus den Strahlmittelbetrieben [Bq/g]	29
Tab. 20: Gamma-Ortsdosisleistungswerte - Betrieb ZSM01 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	29
Tab. 21: Gamma-Ortsdosisleistungswerte - Betrieb ZSM03 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	30
Tab. 22: Expositionsberechnung – Betrieb ZSM01 und ZSM03	30
Tab. 23: Gamma-Ortsdosisleistungswerte Strahlmittellieferant ZL_01 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	31
Tab. 24: Spezifische Aktivitäten in Probenmaterialien von Strahlmittellieferant ZL_01 [Bq/g]	31
Tab. 25: Expositionsberechnung Strahlmittellieferant ZL_01	32
Tab. 26: Maxima der ermittelten spezifische Aktivitäten	34
Tab. 27: Erhebungsdaten - Zementhersteller	37
Tab. 28: Gamma-Ortsdosisleistung bei Zementhersteller A	38
Tab. 29: Gamma-Ortsdosisleistung bei Zementhersteller B	38
Tab. 30: Spezifische Aktivitäten in Feuerfestmaterialien von Zementhersteller A [Bq/g]	39

---

Tab. 31: Spezifische Aktivitäten in Feuerfestmaterialien von Zementhersteller B [Bq/g]	39
Tab. 32: Expositionsabschätzung – Betriebe A und B	40
Tab. 33: Erhebungsdaten - Kohlekraftwerke	44
Tab. 34: Spezifische Aktivitäten in Kohlesorten aus Kraftwerk K1 [Bq/g]	45
Tab. 35: Spezifische Aktivitäten in Verbrennungsrückständen aus Kraftwerk K1 [Bq/g]	46
Tab. 36: Spezifische Aktivitäten in Kesselstäuben aus Kraftwerk K1 [Bq/g]	46
Tab. 37: Expositionsabschätzung Kraftwerk K1	47
Tab. 38: Ergebnisse der ODL- und Kontamatmessungen im Kohlekessel von Kraftwerk B (ausgelassene Messwerte entsprechen ca. dem natürlichen Hintergrundwert).	49
Tab. 39: Ergebnisse der ODL- und Kontamatmessungen im Überhitzerbereich von Kraftwerk B (ausgelassene Messwerte entsprechen ca. dem natürlichen Hintergrundwert).	50
Tab. 40: Spezifische Aktivitäten in Steinkohlesorten aus Kraftwerk K2 [Bq/g]	51
Tab. 41: Spezifische Aktivitäten in Verbrennungsrückständen aus Kraftwerk K2 [Bq/g]	51
Tab. 42: Spezifische Aktivitäten in Kesselrückständen aus Kraftwerk K2	52
Tab. 43: Spezifische Aktivitäten in Wischtestproben aus dem Kohlekessel in Kraftwerk K2 [Bq/cm <sup>2</sup> ]	52
Tab. 44: Spezifische Aktivitäten in Rückständen aus dem Überhitzerbereich von Kraftwerk K2	53
Tab. 45: Spezifische Aktivitäten in Reststoffen aus der Heizkesselreinigung von Kraftwerk K2 [Bq/g]	53
Tab. 46: Expositionsabschätzung Kraftwerk K2	54
Tab. 47: Ergebnisse Summe Gamma- und Beta-Strahlung Kraftwerk K3	55
Tab. 48: Spezifische Aktivitäten in Kohlesorten aus Kraftwerk K3 [Bq/g]	55
Tab. 49: Spezifische Aktivitäten in Verbrennungsrückständen aus Kraftwerk K3 [Bq/g]	55
Tab. 50: Spezifische Aktivitäten in Kesselrückständen aus Kraftwerk K3 [Bq/g]	56
Tab. 51: Spezifische Aktivitäten in Wischtestproben aus Kraftwerk K3 [Bq/cm <sup>2</sup> ]	56
Tab. 52: Expositionsberechnung Kraftwerk K3	57
Tab. 53: Angaben der Zinn-, Blei-, Kupferschmelzbetriebe	60
Tab. 54: Vergleich zwischen Georegion des Wasserwerkstandortes (Geo-WW) und Georegion des geförderten Grundwassers (Geo-H <sub>2</sub> O)	65
Tab. 55: Radionuklidkonzentrationen der gammaspektrometrisch untersuchten Filtermaterialien [Bq/g]	66
Tab. 56: Einflussfaktoren für eine verstärkte Anreicherung von Radiumisotopen an Filtermaterialien (Fe: Enteisung, Mn: Entmanganung, Es: Entsäuerung, As: Entarsenung)	68
Tab. 57: Expositionsabschätzung für Arbeiten in Wasserwerken - Teil I	72

Tab. 58: Expositionsabschätzung für Arbeiten in Wasserwerken - Teil II	73
Tab. 59: Erhebungsdaten - Mineralwasserherstellern und Brauereien	73
Tab. 60: Spezifische Aktivitäten in FM und RS der Mineralwasserhersteller und Brauereien	75

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Die drei natürlichen Zerfallsreihen [B.P.S. Engineering GmbH]	7
Abb. 2:	Durchschnittliche Jahresdosis pro Person in Deutschland [Bundesamt für Strahlenschutz, 2012]	9
Abb. 3:	Einsatzgebiete Zirkon (Selby, 2006)	14
Abb. 4:	Einsatzgebiete Zirkonia (Selby, 2006)	14
Abb. 5:	Hochspannungsisolatoren	33
Abb. 6:	Tresor mit FF-Auskleidung	33
Abb. 7:	Rohrbeschichtung	33
Abb. 8:	Innenansicht Drehrohrofen	37
Abb. 9:	Ausgebrochenes Schamotte material	37
Abb. 10:	Schematische Darstellung des Massenflusses durch ein Kohlekraftwerk [O. RENTZ, 2002]	41
Abb. 11:	Rostfeuerung [O. Rentz, 2002]	42
Abb. 12:	Einblasfeuerung [WOLFF, 2004]	42
Abb. 13:	Zugangsluke Feuerungsbereich	45
Abb. 14:	Schematische Darstellung Kohleheizkessel Kraftwerk B	48
Abb. 15:	Kessel - Seitenwand	49
Abb. 16:	Kessel - Wand Einstiegsseite	49
Abb. 17:	Überhitzerbereich	50
Abb. 18:	Vorwärmerbereich	51
Abb. 19:	Schematische Darstellung der möglichen Trinkwasseraufbereitung durch Enteisung und Entmanganung	61
Abb. 20:	begeh- und schließbare Filterbecken	62
Abb. 21:	geschlossene Filtertanks	62
Abb. 22:	gebrauchtes Filtermaterial mit Braunsteinanhaftungen	62
Abb. 23:	Schaltpult zur Prozessregulierung, z. B. zur Rückspülung	62
Abb. 24:	Georegionen in Bayern [VORNEHM, 2008]	64
Abb. 25:	Exemplarisches Profil durch das Deckgebirge der Schnitte A-B und B-C aus Abb. 24 [VORNEHM, 2008]	64
Abb. 26:	Aktivität von Ra-226 und Pb-210 (U-Ra-Zerfallsreihe) in Filtermaterial	67
Abb. 27:	Aktivität von Ra-228, Ra-224 und Pb-212 (Th-Zerfallsreihe) in Filtermaterial	68
Abb. 28:	Vergleich der Ra-226- und Ra-228-Gehalte in Rückspülschlämmen (RS) und Filtermaterialien (FM)	70

- Abb. 29: Korrelation der Aktivitäten von Ra-226 in Filtermaterialien (FM) und Rückspülschlämmen (RS) 71
- Abb. 30: Korrelation der Aktivitäten von Ra-228 in Filtermaterialien (FM) und in Rückspülschlämmen (RS) 72
- Abb. 31: Summen der maximalen spezifischen Aktivitäten der U-Ra- sowie der Th-Reihe >1 Bq/g in FM. 76



## Anhang I: Erhebungsbögen / Messprotokoll

### Erhebungsbogen Glasindustrie

#### Teil I - Allgemeiner Teil

1. Name und Anschrift des Betriebes

Zuständiger Ansprechpartner: .....

Tel. Nr. : .....

@mail : .....

2. Anzahl der Beschäftigten: .....

3. Hauptproduktionszweige:

#### Teil II - Spezieller Teil

1. Befinden sich in Ihrem Betrieb zirkonhaltige Bauelemente? Wenn ja, welche und wie viele?
2. Beschreiben Sie an dieser Stelle bitte kurz die Aufenthaltszeiten pro Bauelement (wie lange hält sich ein Arbeiter pro Schicht / hochgerechnet pro Jahr in der Nähe des Elements auf)?
3. Auf welchem Entsorgungsweg werden diese Bauelemente entsorgt?
4. Ist das Tragen von Schutzkleidung (Atenschutz/Handschuhe/...) beim Umgang mit den Bauelementen bzw. deren Entsorgung obligatorisch? Wenn ja, welche?
5. Welche Mengen werden durchschnittlich im Jahr entsorgt?
6. In welchen Intervallen findet eine Entsorgung statt?
7. Gab es bei der Entsorgung schon Auffälligkeiten in Bezug auf Radioaktivität?
8. Wurden in Ihrem Betrieb schon einmal Untersuchungen zur Radioaktivität bestimmter Materialien durchgeführt? Wenn ja, von wem? Würden Sie uns die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Durchsicht zur Verfügung stellen?
9. Gibt es bereits Informationen für Ihre Mitarbeiter bezüglich natürlicher Radioaktivität und etwaiger Schutzmaßnahmen?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

## Erhebungsbogen Gießereien

### Teil I - Allgemeiner Teil

1. Name und Anschrift des Betriebes

Zuständiger Ansprechpartner : .....

Tel. Nr. : .....

@mail : .....

Anzahl der Beschäftigten : .....

2. Hauptproduktionszweige :

### Teil II - Spezieller Teil

3. Befinden sich in Ihrem Betrieb zirkonhaltige Bauelemente? Wenn ja, welche und wie viele?

4. Beschreiben Sie an dieser Stelle bitte kurz die Aufenthaltszeiten pro Bauelement (wie lange hält sich ein Arbeiter pro Schicht / hochgerechnet pro Jahr in der Nähe des Elements auf)?

5. Wie sieht es mit der Entsorgung der o. g. Bauelemente aus? In welchen Mengen, in welchen Intervallen und auf welchem Entsorgungsweg werden diese entsorgt?

6. Wird in Ihrem Betrieb zirkonhaltige Schlichte verwendet? Wenn ja, wie hoch ist der durchschnittliche Jahresverbrauch?

7. Von wem bekommen Sie die zirkonhaltige Schlichte geliefert? Wie erfolgt die Anlieferung?

8. Gab es schon mal außergewöhnliche Zwischenfälle im Zusammenhang mit dieser Schlichte?

9. Wie viel wird maximal eingelagert (zu einem bestimmten Zeitpunkt)?

10. Wie viele Mitarbeiter halten sich in der Nähe dieser Lagerstätten auf? Für wie lange?

11. Wie oft kommen zirkonhaltige Schichten bei Ihnen zum Einsatz? Wofür werden sie im Speziellen verwendet?

12. In welcher Form wird die Schlichte verarbeitet / aufgetragen - besteht direkter Kontakt?

13. Ist das Tragen von Schutzkleidung (Atemschutz/Handschuhe/...) beim Umgang mit zirkonhaltigen Materialien obligatorisch? Wenn ja, welche?

14. Wie lange dauert der Arbeitsprozess bei dem der Mitarbeiter mit der zirkonhaltigen Schlichte umgeht?

15. Was passiert mit dem Sandgemisch / der Schlichte nachdem fertig gegossen wurde?

16. Wie erfolgt die endgültige Entsorgung?

17. Welche Menge fallen durchschnittlich im Jahr an?

18. In welchen Intervallen findet eine Entsorgung statt?

19. Gab es bei der Entsorgung schon Auffälligkeiten in Bezug auf Radioaktivität?

20. Wurden in Ihrem Betrieb schon einmal Untersuchungen zur Radioaktivität bestimmter Materialien durchgeführt? Wenn ja, von wem? Würden Sie uns die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Durchsicht zur Verfügung stellen?

21. Liegen Messungen der Staubbelastungen (gem. Bedingungen des Arbeitsschutzes) vor?  
Wenn ja, von wem? Würden Sie uns die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Durchsicht zur Verfügung stellen?
22. Gibt es bereits Informationen für Ihre Mitarbeiter bezüglich natürlicher Radioaktivität und etwaiger Schutzmaßnahmen?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

## Erhebungsbogen - Technische Keramik

### Teil I - Allgemeiner Teil

1. Name und Anschrift des Betriebes

Zuständiger Ansprechpartner : .....

Tel. Nr. : .....

@mail : .....

Anzahl der Beschäftigten : .....

2. Hauptproduktionszweige :

### Teil II - Spezieller Teil

3. Befinden sich in Ihrem Betrieb zirkonhaltige Bauelemente? Wenn ja, welche und wie viele?
4. Beschreiben Sie an dieser Stelle bitte kurz die Aufenthaltszeiten pro Bauelement (wie lange hält sich ein Arbeiter pro Schicht / hochgerechnet pro Jahr in der Nähe des Elements auf)?
5. Wie sieht es mit der Entsorgung der o. g. Bauelemente aus? In welchen Mengen, in welchen Intervallen und auf welchem Entsorgungsweg werden diese entsorgt?
6. Werden in Ihrem Betrieb zirkoniumhaltige Materialien verwendet? Wenn ja, welche und wie hoch ist der durchschnittliche Jahresverbrauch?
7. Von wem bekommen Sie diese Materialien geliefert? Wie erfolgt die Anlieferung?
8. Gab es schon außergewöhnliche Zwischenfälle im Zusammenhang mit diesen Stoffen /Produkten?
9. Wie viel wird maximal eingelagert (zu einem bestimmten Zeitpunkt)?
10. Wie viele Mitarbeiter halten sich in der Nähe dieser Lagerstätten auf? Für wie lange?
11. Wie oft kommen zirkoniumhaltige Glasuren bei Ihnen zum Einsatz? Wofür werden sie im Speziellen verwendet?
12. In welcher Form wird die Glasur verarbeitet / aufgetragen - besteht direkter Kontakt?
13. Ist das Tragen von Schutzkleidung (Atenschutz/Handschuhe/...) beim Umgang mit zirkoniumhaltigen Materialien obligatorisch? Wenn ja, welche?
14. Wie lange dauert der Arbeitsprozess, bei dem der Mitarbeiter mit der zirkoniumhaltigen Glasur / Materialien umgeht?
15. Was passiert mit übergelaufenen Resten, Abfällen, leeren Behältern etc. nachdem fertig gegossen wurde?
16. Wie erfolgt die endgültige Entsorgung?
17. Welche Menge fallen durchschnittlich im Jahr an?
18. In welchen Intervallen findet eine Entsorgung statt?
19. Gab es bei der Entsorgung schon Auffälligkeiten in Bezug auf Radioaktivität?

20. Wurden in Ihrem Betrieb schon einmal Untersuchungen zur Radioaktivität bestimmter Materialien durchgeführt? Wenn ja, von wem? Würden Sie uns die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Durchsicht zur Verfügung stellen?
21. Liegen Messungen der Staubbelastung (gem. Bedingungen des Arbeitsschutzes) vor? Wenn ja, von wem? Würden Sie uns die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Durchsicht zur Verfügung stellen?
22. Gibt es bereits Informationen für Ihre Mitarbeiter bezüglich natürlicher Radioaktivität und etwaiger Schutzmaßnahmen?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

## Erhebungsbogen Schleif- und Sandstrahlmittelbetriebe

### Teil I - Allgemeiner Teil

Name und Anschrift des Betriebes .....

Zuständiger Ansprechpartner : .....

Tel. Nr. : .....

E-mail : .....

Anzahl der Beschäftigten : .....

### Teil II - Spezieller Teil

- 1) Kommen in Ihrem Betrieb korund- oder zirkoniumhaltige Strahl- oder Schleifmittel zum Einsatz?  
 ja     nein
  
- 2) Sandstrahlmittel: um welche Korundarten handelt es sich dabei (z. B. Normalkorund, Mischkorund, Edelkorund, evtl. andere)?
  
- 3) Welche Mengen der einzelnen Strahlmittel sind ständig in Ihrem Betrieb gelagert?
- 4) Von welchem Zulieferer beziehen Sie Ihre Strahl- bzw. Schleifmittel?
- 5) Welches Unternehmen beauftragen Sie mit der Entsorgung der beim Strahlen- bzw. Schleifen anfallenden Reststoffe?
- 6) Schleifscheiben: beinhalten Ihre Schleifmittel Zirkonkorund?  
 ja     nein
  
- 7) Ist das Tragen von Schutzkleidung (Atemschutz/Handschuhe/...) beim Umgang bzw. der Entsorgung von Schleifmitteln obligatorisch? Wenn ja, welche?
- 8) Wurden in Ihrem Betrieb bereits radiologische Untersuchungen an den Sandstrahl- und Schleifmitteln durchgeführt?  
 ja     nein
  
- 9) Würden Sie uns ggf. die Analysedaten bereitstellen?  
 ja     nein
  
- 10) Gibt es bereits Informationen für Sie und Ihre Mitarbeiter bezüglich natürlicher Radioaktivität und etwaiger Schutzmaßnahmen?  
 ja     nein
  
- 11) Möchten Sie gerne mehr zu diesem Thema erfahren?  
 ja     nein

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

## Erhebungsbogen „Zementhersteller“

### Teil I - Allgemeiner Teil

Name und Anschrift des Betriebes

Zuständiger Ansprechpartner : .....

Tel. Nr. : .....

@mail : .....

Anzahl der Beschäftigten : .....

### Teil II - Spezieller Teil

1. Anzahl und Größe der Klinkeröfen (Volumen in m<sup>3</sup>):
2. Wartungsintervall der einzelnen Klinkeröfen: durchschnittlich
3. Nächste Wartung geplant für den Zeitraum:
4. Wurden bei der Wartung Ablagerungen in Rohren oder Anlagenteilen festgestellt?  
 ja     nein
5. Wird in Ihrem Betrieb Feuerfestzement hergestellt?  
 ja     nein
6. Welche Zuschlagstoffe werden Ihrem Zement zugesetzt (z. B. Flugasche, Schlacke, anderer)?
7. Wie viele Massen-% machen die Zuschlagstoffe von dem fertigen Produkt aus?
8. Wurden in Ihrem Betrieb bereits radiologische Untersuchungen an den Ausgangsstoffen, Zuschlagstoffen, den Klinkeröfen, anderen Anlagenteilen oder bei der Wartung anfallenden Materialien durchgeführt?  
 ja     nein
9. Würden Sie uns ggf. die Analyseergebnisse bereitstellen?  
 ja     nein

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Auf Ansinnen der Zementhersteller, vertreten durch den Verein Deutscher Zementwerke, unterblieb eine Beantwortung der Fragen 6 und 7.

## **Erhebungsbogen zu NORM-Stoffen (Naturally Occurring Radioactive Material) in Kraftwerken und deren Massenströmen**

1. Geben Sie bitte die in Ihrem Werk eingesetzten Brennstoffe und deren Massenumsätze in Tonnen pro Jahr an.
2. Welche Art von Kohle wird in Ihrem Werk eingesetzt?
3. Woher beziehen Sie die Kohle (Herkunftsland):
4. Wie ist die Zusammensetzung dieser Kohle, z. B. Kohlenstoff- und Aschegehalt sowie Brennwert? (bitte ggf. Labordaten anfügen)
5. Wie viele Tonnen Asche fallen in Ihrem Betrieb jährlich an?
6. Mit welchem(n) Verfahren werden die entstehenden Verbrennungsprodukte gereinigt? (z. B. Entstaubungsart, Gaswäscher, REA-Gipsgewinnung, weitere)
7. Welchen Reinigungsgrad besitzen Ihre Anlagen bzw. welchen Aschegehalt weisen die von Ihnen entlassenen Abgase auf?
8. Wo findet die anfallende Asche weitere Verwendung?
9. Wird anfallende Asche deponiert? Wenn ja, wo und in welchen Mengen?
10. Würden Sie dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) zu Untersuchungszwecken eine Probe (Kohle, Asche, Gips) zur Verfügung stellen?
11. Wie viele Heizkessel betreiben Sie in Ihrem Werk? Wie groß ist deren Volumen?
12. In welchen Intervallen werden die von Ihnen betriebenen Heizkessel gewartet? Wie viel Zeit wird dafür benötigt bzw. wie lange halten sich die Arbeiter zu diesem Zweck im Inneren des Kessels auf ?
13. Haben in Ihrem Werk bereits strahlentechnische Messungen stattgefunden bzw. wären Sie mit einer Ortsbegehung durch das LfU einverstanden?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!



## Erhebungsbogen zu Zinn-, Blei-, Kupferschmelzbetrieben

1. Welche Metalle werden in Ihrem Betrieb gewonnen (z. B. Zinn, Blei, Kupfer, Eisen, andere)?
2. Dienen zur Metallgewinnung Roherz oder metallische Recyclingmaterialien?
3. Welche Temperaturen werden dabei in den jeweiligen Schmelzen erreicht?
4. Mit welchen Medien werden die hohen Temperaturen erreicht?
5. Wie viele Tonnen der jeweiligen Metalle werden jährlich in Ihrem Betrieb gewonnen?
6. Wie viele Tonnen Schlacke fallen dabei pro Metall und Jahr an?
7. Welche Arten der Abgasreinigung werden in Ihrem Betrieb eingesetzt?
8. Wie viele Tonnen an Filterstaub fallen dabei pro Metall und Jahr an?
9. Werden andere, nichtmetallische Stoffe in Ihrem Betrieb auf Temperaturen > 1000 °C erhitzt (z. B. beim Sintern und Brennen von Keramiken)?
10. Wie viele Tonnen an nichtmetallischen Stoffen, welche Temperaturen > 1000 °C ausgesetzt sind, werden in Ihrem Betrieb jährlich erzeugt?
11. Welche Feuerfestmaterialien werden in Ihrem Betrieb eingesetzt (z. B. Tonerde, Magnesia, Zirkonia, weitere)?
12. Wie viele Tonnen dieser Feuerfestmaterialien fallen durchschnittlich pro Jahr im Zuge von Wartungsarbeiten an?
13. Haben in Ihrem Betrieb schon radiologische Untersuchungen der eingesetzten und der gewonnenen Stoffe stattgefunden und würden Sie die Ergebnisse dieser Untersuchungen dem Bayerischen Landesamt für Umwelt zur Verfügung stellen?
14. Würden Sie dem LfU Materialproben der anfallenden Schlacke und der Stäube zu Untersuchungszwecken zur Verfügung stellen?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

## Erhebungsbogen „Filterkies aus Wasserwerken“

### Teil I - Allgemeiner Teil

1. Name und Anschrift des Wasserversorgungsunternehmens  
Zuständiger Ansprechpartner : .....
- Tel. Nr. : .....
- @mail : .....
2. Anzahl der Beschäftigten : .....
3. Anzahl der versorgten Haushalte: .....

### Teil II - Spezieller Teil

4. Bezeichnung des/der Wasserwerke(s) aus welchem die Filterkiesprobe(n) entnommen wurde(n)
5. Schätzen Sie an dieser Stelle bitte kurz die Aufenthaltszeiten des zuständigen Wasserwartes im Bereich des/r betreffenden Filter(s) (wie lange [in Std.] hält sich er/sie sich pro Woche/ in der Nähe [bis in 1 m Abstand] auf) - [bei mehreren Filtern bitte die Summe angeben]?
6. Wurde das Filterkiesmaterial schon einmal in Ihrem WVU ausgetauscht? Wenn ja, wann war das? Auf welchem Entsorgungsweg wurde der Filterkies entsorgt? Um welche Mengen hat es sich gehandelt?
7. Fallen regelmäßig kleinere Mengen an Filterkiesmaterial an, welche entsorgt werden müssen? Wenn ja, wann war das? Auf welchem Entsorgungsweg wurde der Filterkies entsorgt? Um welche Mengen hat es sich gehandelt?
8. In welchen Intervallen findet eine Entsorgung statt?
9. Gab es bei der Entsorgung schon Auffälligkeiten in Bezug auf Radioaktivität?
10. Wie hoch ist die Durchflussmenge durch die jeweiligen Filter / Jahr? Wie lange befindet sich der aktuelle Filterkies schon in der Anlage?...
11. Wie viel Filterkiesmaterial (Menge in kg) befindet sich ca. in Ihren/m Filter(n)?
12. Beschreiben Sie bitte kurz die primäre Funktion des/der Filter aus welchem die Materialprobe stammt: Enteisung, Entmanganung, Entsäuerung oder eine andere?
13. Ist das Tragen von Schutzkleidung (Atemschutz/Handschuhe/...) beim Umgang mit dem Filterkiesmaterial oder mit Rückspülschlämmen obligatorisch? Wenn ja, welche?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

## Erhebungsbogen Mineralwasserhersteller

### Teil I - Allgemeiner Teil

Name und Anschrift des Mineralwasserherstellers

Zuständiger Ansprechpartner : .....

Tel. Nr. : .....

@mail : .....

Anzahl der Beschäftigten : .....

### Teil II - Spezieller Teil

1) Anzahl und Bezeichnung der Gewinnungsgebiete

2) Anzahl und Bezeichnung der Quellen:

Quelle 1: .....

max. geförderte Wassermenge.....l/Std. geförderte Wassermenge pro Jahr: .....

Quelle 2: .....

max. geförderte Wassermenge.....l/Std. geförderte Wassermenge pro Jahr: .....

Quelle 3: .....

max. geförderte Wassermenge.....l/Std. geförderte Wassermenge pro Jahr: .....

3) Anzahl und Bezeichnung der Brunnen:

Brunnen 1: .....

max. gef. Wassermenge.....l/Std. gef. Wassermenge / a: .....l Bohrtiefe: .....m

Brunnen 2: .....

max. gef. Wassermenge.....l/Std. gef. Wassermenge / a: .....l Bohrtiefe: .....m

Brunnen 3: .....

max. gef. Wassermenge.....l/Std. gef. Wassermenge / a: .....l Bohrtiefe: .....m

4) Werden verschiedene Wässer gemischt?  ja  nein

5) Aus welcher geologischen Formation wird gefördert?

6) Welcher Typ von Mineralwasser wird in Ihrer Anlage abgefüllt?

Chlorid-Wasser  Sulfat-Wasser  Hydrogencarbonat-Wasser  sonstiges

7) Findet eine Wasseraufbereitung statt? Wenn ja, mit welchen Aufbereitungsschritten? Sollte es mehrere verschiedene Aufbereitungsanlagen geben führen sie diese bitte einzeln an und ordnen diese den o. g. Quellen bzw. Brunnen zu.

- 8) Wie hoch ist der durchschnittliche Wasserdurchsatz durch die Aufbereitungsanlage(n)?  
Anlage 1: ..... l/s bzw. ....m<sup>3</sup>/Tag  
Anlage 2: ..... l/s bzw. ....m<sup>3</sup>/Tag  
Anlage 3: ..... l/s bzw. ....m<sup>3</sup>/Tag
- 9) In welchen Zeitintervallen werden die Aufbereitungsanlagen gewartet?  
Durchschnittlich alle .....Jahre
- 10) Wie lange sind die durchschnittlichen Standzeiten der Filter?.....Jahre
- 11) Bei welchem der Aufbereitungsschritte fallen Rückstände (z. B. Rückspülschlämme, Filterkiese, ...) an? Wenn ja, in welchen Mengen (Angaben in m<sup>3</sup> oder t pro Entsorgung)?
- 12) Gibt es Absetzbecken? Wenn ja, wie viele und in welcher Größe?
- 13) Wie und wo werden die Aufbereitungsrückstände entsorgt?
- 14) Bitte nennen Sie uns den Namen der beauftragten Entsorgungsfirma:
- 15) In welchem zeitlichen Abstand werden anfallende Rückstände entsorgt?  
Rückspülschlämme: .....  
Filterkies: .....  
andere: .....
- 16) Bei einer Entsorgung auf einer Deponie – auf welcher Deponie werden sie entsorgt?
- 17) Bei einer Entsorgung über die Kanalisation – in welches Klärwerk läuft das Abwasser?
- 18) Wird über einen Vorfluter entsorgt? Wenn ja, in welches Gewässer fließt dieser ab?
- 19) Wie oft findet ein Austausch von Rohren und anderen Anlagenteilen, die direkt mit dem Mineralwasser in Berührung kommen, statt? Durchschnittlich alle .....Jahre.
- 20) Wurden bei einem Austausch Ablagerungen in Rohren oder Anlagenteilen festgestellt?  
 ja       nein
- 21) Würden Sie uns eine Analyse des Rohwassers zur Verfügung stellen (besonders von Interesse sind Sauerstoffgehalt, Eisen- bzw. Mangankonzentrationen, Konzentrationen von Uran oder anderen Radionukliden wie z. B. Radium, pH-Wert)?     ja       nein

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

# Messprotokoll

## Teil I - Allgemeiner Teil

1. Name und Anschrift des Betriebes
2. Während der Messungen vor Ort waren folgende Mitarbeiter des Betriebes anwesend:
3. Datum: .....
4. Durchgeführt wurden die Messungen von folgenden Mitarbeitern des LfU:

## Teil II - Spezieller Teil

### Messungen der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ (Direktstrahlung)

Abstand a [cm]	Messort 1 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Messort 2 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Messort 3 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Messort 4 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Messort 5 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Messort 6 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]
1						
50						
100						
200						

Messort 1 : .....

Messort 2 : .....

Messort 3 : .....

Messort 4 : .....

Messort 5 : .....

Messort 6 : .....

### Messung der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ und Abschätzung der Aufenthaltsdauer an relevanten Arbeitsplätzen

Messort	Ortsdosisleistung [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Aufenthaltsdauer [Std./ Tag]	Aufenthaltsdauer [Std./ Monat]

Hintergrundstrahlung: .....  $\mu\text{Sv/h}$   
 Verwendetes Messgerät: .....

### Probennahme zur gammaspektrometrischen Analyse

**Probe 1:**

Probenbezeichnung:.....  
Entnahmeort:.....  
Entnahmezeitpunkt:.....  
Menge:.....  
Zustand der Probe:.....

**Probe 2:**

Probenbezeichnung:.....  
Entnahmeort:.....  
Entnahmezeitpunkt:.....  
Menge:.....  
Zustand der Probe:.....

**Probe 3:**

Probenbezeichnung:.....  
Entnahmeort:.....  
Entnahmezeitpunkt:.....  
Menge:.....  
Zustand der Probe:.....

**Fakultativ: Messungen der Oberflächenkontamination (Dokumentation nur bei Auffälligkeiten)**

Messort 1: .....	Zerfallsrate:.....lps	Wischtest gemacht: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Messort 2: .....	Zerfallsrate:.....lps	Wischtest gemacht: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Messort 3: .....	Zerfallsrate:.....lps	Wischtest gemacht: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Die Auswertungsergebnisse werden dem Betrieb im Rahmen des radiologischen Berichtes zugestellt.

**Folgende Punkte wurden besprochen bzw. nachstehende weitere Vorgehensweise vereinbart:**

## Anhang II: Gesamtübersicht der ermittelten Radionuklidaktivitäten

Spezifische Aktivitäten in Proben aus der Zirkon- und Zirkonium Industrie – Teil I

Probe	ZG06/1	ZGi10/1	ZGi10/2	ZGi11/1	ZGi11/2	ZGi11/3	ZGi12/1	ZGi12/2	ZGi12/3	ZGi13/1	ZGi13/2	ZGi13/3	ZGi13/4	ZGi13/5	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]														
U-Ra-Reihe	Th-234	1,5	6,5	0,13	5,4	2,3	2,6	4	0,4	3	< 0	< 0	< 0,05	6,0	0,25
	Pa-234m	1,52	4,7	0,20	4,2	0,99	0,9	4,1	0,38	2,2	0,21	< 0,07	< 0,4	4,7	0,26
	Th-230	1,8	< 5	0,15	6,7	2,3	2,5	< 4	< 0,6	< 3	< 0	< 0	< 0,3	< 7	< 0,4
	Ra-226	1,3	5,6	0,24	5,9	1,2	1,3	5,6	< 0,2	0,8	0,13	< 0,09	< 0,05	7,0	0,26
	Pb-214	1,3	5,1	0,24	4,9	1,1	1,11	4,4	0,093	0,53	0,156	0,0857	< 0,008	5,11	0,26
	Bi-214	1,2	4,6	0,21	4,2	0,96	0,94	3,8	0,08	0,43	0,138	0,0758	< 0,009	4,07	0,23
	Pb-210	0,73	6,7	0,097	4,1	2,3	2,7	2	< 0,3	< 0,4	< 0	< 0	< 0,09	< 7	0,13
	U-238 ber.	1,5	6,2	0,24	5,5	1,7	1,6	4,9	0,51	3,7	0,21	< 0,1	< 0,2	5,7	< 0,4
Th-Reihe	Ac-228	0,255	1,1	0,048	0,95	0,27	0,24	0,83	0,023	0,43	0,142	0,0791	< 0,01	0,96	0,253
	Ra-224	0,23	1,3	0,05	1,1	0,3	0,28	< 2	0,05	0,54	0,14	0,078	< 0,04	1,22	0,24
	Pb-212	0,24	1,3	0,053	1,1	0,31	0,29	0,95	0,064	0,7	0,16	0,0810	< 0,005	1,23	0,26
	Bi-212	0,24	1,0	0,053	0,92	0,28	0,24	0,81	0,053	0,54	0,142	0,0768	< 0,04	0,911	0,25
	Tl-208	0,081	0,36	0,017	0,32	0,09	0,081	0,27	0,02	0,19	0,0479	0,0261	< 0,004	0,315	0,080
U-Ac-R.	U-235	0,071	0,28	0,011	0,25	0,08	0,08	0,23	0,023	0,17	0,0098	< 0,006	< 0,01	0,26	< 0,02
	Th-227	0,069	0,26	0,012	0,25	0,06	0,06	0,22	< 0,006	0,08	< 0,005	< 0,003	< 0,01	0,28	0,014
	Ra-223	0,063	0,25	< 2	0,17	0,04	0,05	0,19	< 0,02	0,04	< 0,01	< 0,01	< 0,05	0,17	< 0,04
	Pb-211	0,052	0,35	0,025	0,34	0,09	0,07	0,31	< 0,02	0,08	< 0,02	< 0,01	< 0,05	0,353	< 0,04

Die Zahl nach dem '<' entspricht der Nachweisgrenze.

ZG06/1	Gebrauchtes Feuerfestmaterial (FFM)
ZGi10/1	Zirkonsand
ZGi10/2	Restegemisch Sandstaub
ZGi11/1	Schlichte
ZGi11/2	Feuerfestmaterial
ZGi11/3	Gebrauchtes Feuerfestmaterial
ZGi12/1	Schlichte

ZGi12/2	Legierung, 5 % Zr
ZGi12/3	Legierung, 32 % Zr
ZGi13/1	FFM, Probe 1
ZGi13/2	FFM, Probe 2
ZGi13/3	Staub, Atemschutzmaske
ZGi13/4	Zirkonsand
ZGi13/5	FFM, Probe 5

Spezifische Aktivitäten in Proben aus der Zirkon- und Zirkonium-Industrie – Teil II

Probe	ZGi13/6	ZK01/1	ZK01/2	ZK01/3	ZK02/1	ZK02/2	ZK02/3	ZK03/1	ZK03/2	ZK03/3	ZK04/1	ZK05/1	ZK05/2	ZK05/3	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]														
U-Ra-Reihe	Th-234	-	1,5	7	2,6	2,4	1,2	0,39	< 0,23	< 0,06	< 0,47	< 0,1	< 0,5	< 0,09	3,0
	Pa-234m	< 0,1	1,6	5,1	3,1	1,6	0,64	0,46	< 0,089	< 0,04	0,17	< 0,04	< 0,08	< 0,1	2,5
	Th-230	-	< 2	< 6	< 3	< 4	< 2	< 0,4	< 2	< 0,6	< 4	< 0,7	< 4	< 0,4	< 6
	Ra-226	< 0,1	1,0	8	2	2,0	0,62	0,29	0,10	0,027	0,34	< 0,01	< 0,8	< 0,03	1,7
	Pb-214	0,0525	0,9	5,1	2,0	1,49	0,586	0,419	0,0324	0,0154	0,242	0,007	0,527	< 0,003	1,17
	Bi-214	0,045	0,75	4,2	1,7	1,20	1,20	0,382	0,0255	0,0122	0,197	0,006	0,467	< 0,003	0,892
	Pb-210	-	< 2	< 2	< 0,6	< 4	< 0,9	< 0,2	< 2	< 0,4	< 4	< 0,6	< 4	< 0,4	< 7
	U-238 ber.	< 0,1	1,5	4,6	3,8	2,2	0,96	0,64	< 0,2	< 0,1	< 0,5	< 0,09	< 0,4	< 0,1	2,8
Th-Reihe	Ac-228	0,059	0,21	0,73	0,57	0,148	0,248	0,178	0,0098	0,0021	0,0438	< 0,002	0,119	< 0,004	0,22
	Ra-224	0,067	0,19	1,2	0,53	0,23	0,29	0,18	< 0,013	< 0,01	0,18	< 0,008	0,15	< 0,01	0,29
	Pb-212	0,069	0,20	1,2	0,51	0,240	0,30	0,199	0,011	0,0031	0,19	0,0017	0,135	< 0,002	0,30
	Bi-212	0,058	0,17	0,96	0,52	0,189	0,256	0,182	0,0093	< 0,005	0,139	< 0,005	0,124	< 0,01	0,216
	Tl-208	0,020	0,059	0,33	0,16	0,0648	0,0880	0,0649	0,0026	0,00084	0,0474	< 0,0005	0,0376	< 0,001	0,0728
U-Ac-R.	U-235	< 0,005	0,07	0,21	0,17	0,10	0,044	0,029	< 0,007	< 0,005	< 0,02	< 0,004	< 0,02	< 0,005	0,13
	Th-227	< 0,005	0,06	0,4	0,15	0,10	0,040	0,023	< 0,004	< 0,003	0,026	< 0,002	0,055	< 0,005	0,15
	Ra-223	< 0,02	< 0,04	0,31	< 0,2	0,073	0,027	< 0,014	< 0,01	< 0,008	0,023	< 0,006	0,036	< 0,02	0,096
	Pb-211	< 0,02	0,08	0,42	< 0,3	0,13	0,062	0,045	< 0,009	< 0,008	0,022	< 0,006	0,067	< 0,02	0,14

Die Zahl nach dem '<' entspricht der Nachweisgrenze.

ZGi13/6	Ofenausbruch
ZK01/1	Keramikscheibe, Produkt
ZK01/2	Zirkonoxid
ZK01/3	Keramikausschuss
ZK02/1	Zirkonkorund, Edukt
ZK02/2	Zirkonkorund, ummantelt
ZK02/3	Schleifscheibe, Produkt

ZK03/1	Zirkonoxid
ZK03/2	Zirkonoxid
ZK03/3	Zirkonoxid
ZK04/1	Zirkonpulver
ZK05/1	Edukt, 96 % ZrO <sub>2</sub>
ZK05/2	Edukt, 94 % ZrO <sub>2</sub>
ZK05/3	Fused Zirkonia



## Spezifische Aktivitäten in Proben aus der Zirkon- und Zirkonium-Industrie – Teil III

Probe	ZK05/4	ZK05/5	ZK05/6	ZK05/7	ZK06/1	ZK06/2	ZK06/3	ZK06/4	ZK06/5	ZK07/1	ZK07/2	ZK07/3	ZK07/4	ZK07/5	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]														
U-Ra-Reihe	Th-234	< 0,01	3,2	< 0,2	< 0,03	4,2	3,3	6,9	3,3	1,3	< 0,2	2,9	3,1	0,43	< 0,5
	Pa-234m	< 0,03	2,7	< 0,3	< 0,1	4,80	3,41	6,05	3,31	1,49	< 0,2	2,88	3,13	0,50	< 3
	Th-230	< 0,1	< 6	< 1	< 0,2	-	-	-	< 3	0,8	< 2	2,6	2,6	< 2	< 6
	Ra-226	< 0,006	1,3	< 0,3	< 0,03	3,0	2,5	2	2,3	0,8	< 0,8	2,3	2,9	0,35	< 1
	Pb-214	0,0014	0,905	0,285	0,0250	2,6	2,3	2,4	2,0	0,75	0,73	2,2	2,9	0,37	0,512
	Bi-214	< 0,0009	0,736	0,207	0,0202	2,5	2,1	2,2	1,9	0,69	0,70	2,0	2,7	0,34	0,44
	Pb-210	< 0,05	< 6	< 1	< 0,1	< 0,8	< 1	< 1	< 0,7	< 0,2	< 0,3	< 0,6	2,9	< 0,3	< 1
	U-238 ber.	< 0,03	3,0	< 0,3	< 0,08	4,5	3,4	6,4	3,3	1,4	< 0,3	2,8	3,1	< 0,3	< 3
Th-Reihe	Ac-228	0,0021	0,15	0,020	0,028	0,50	0,603	0,378	0,442	0,171	0,138	0,564	0,689	0,0965	< 0,08
	Ra-224	< 0,004	0,46	< 0,05	0,025	0,46	0,56	0,73	0,38	0,15	0,14	0,54	0,64	0,072	< 0,3
	Pb-212	0,0016	0,46	0,029	0,031	0,46	0,52	0,71	0,38	0,17	0,14	0,53	0,65	0,081	0,070
	Bi-212	< 0,004	0,385	< 0,04	0,030	0,47	0,55	0,74	0,41	0,18	0,14	0,53	0,68	0,087	< 0,3
	Tl-208	0,00071	0,128	0,0074	0,00955	0,16	0,17	0,23	0,13	0,057	0,047	0,17	0,22	0,029	0,025
U-Ac-R.	U-235	< 0,001	0,14	< 0,02	< 0,004	0,21	0,16	0,29	0,15	0,063	< 0,02	0,13	0,14	< 0,02	< 0,1
	Th-227	< 0,001	0,22	0,046	< 0,004	0,13	0,098	0,25	0,10	0,047	0,015	0,10	0,13	0,020	< 0,1
	Ra-223	< 0,005	0,176	< 0,05	< 0,01	0,10	0,094	0,23	0,088	0,042	< 0,03	0,075	0,10	< 0,03	< 0,4
	Pb-211	< 0,005	0,21	< 0,06	< 0,01	0,094	< 0,07	0,21	0,057	0,036	< 0,03	0,076	0,087	< 0,02	< 0,4

Die Zahl nach dem '&lt;' entspricht der Nachweisgrenze.

ZK05/4	Filterstaub
ZK05/5	Edukt, 94 % ZrO <sub>2</sub>
ZK05/6	Produkt
ZK05/7	Glasurpulver
ZK06/1	ZrO <sub>2</sub>
ZK06/2	ZrO <sub>2</sub>
ZK06/3	ZrO <sub>2</sub>

ZK06/4	ZrO <sub>2</sub>
ZK06/5	Keramikprodukt
ZK07/1	ZrO <sub>2</sub>
ZK07/2	ZrO <sub>2</sub>
ZK07/3	ZrO <sub>2</sub>
ZK07/4	ZrO <sub>2</sub> -Zwischenprodukt
ZK07/5	Produkt

Spezifische Aktivitäten in Proben aus der Zirkon- und Zirkonium-Industrie – Teil IV

Probe	ZK08/1	ZK08/2	ZK08/3	ZK08/4	ZK08/5	ZF01/1	ZF01/2	ZF01/3	ZF01/4	ZF01/5	ZF01/6	ZF01/7	ZF01/8	ZF01/9	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]														
U-Ra-Reihe	Th-234	2,0	3,7	4,4	< 0,4	4,3	-*	-*	-*	-*	< 0,09	3,8	-*	-*	< 0,1
	Pa-234m	2,23	3,04	3,68	< 0,05	4,39	2,14	2,05	2,09	2,27	< 0,5	3,69	2,16	2,38	< 0,05
	Th-230	< 2	< 4	3,3	< 3	5,0	2,4	-*	2,8	2,8	< 0,9	3,5	-*	-*	-*
	Ra-226	0,9	3,3	3,6	< 0,02	2	2,0	1,9	2,0	2,0	< 0,09	3,5	2,1	2,1	< 0,09
	Pb-214	1,00	3,2	3,6	< 0,001	2,0	2,09	1,89	2,29	2,26	< 0,01	3,6	2,15	2,29	0,0725
	Bi-214	0,91	3,0	3,4	< 0,001	1,9	1,90	1,74	2,09	2,02	< 0,01	3,3	1,94	2,11	0,0675
	Pb-210	< 0,8	3,9	3,4	< 1	< 1	3,0	3,0	2,0	3,0	< 0,2	3,5	2,0	2,0	< 0,4
	U-238 ber.	2,3	3,1	4,2	< 0,2	4,5	2,7	2,5	2,0	2,6	< 0,6	4,2	2,6	1,9	< 0,2
Th-Reihe	Ac-228	0,180	0,758	0,760	< 0,002	0,430	0,387	0,384	0,390	0,386	< 0,02	0,698	0,416	0,407	0,011
	Ra-224	0,34	0,73	0,73	< 0,01	0,57	0,40	0,35	0,42	0,38	< 0,08	0,68	0,46	0,42	< 0,01
	Pb-212	0,34	0,71	0,73	< 0,001	0,59	0,419	0,368	0,411	0,429	< 0,008	0,68	0,435	0,402	0,00961
	Bi-212	0,34	0,73	0,72	< 0,006	0,58	0,395	0,355	0,418	0,379	< 0,06	0,70	0,377	0,411	0,014
	Tl-208	0,11	0,24	0,24	< 0,0005	0,19	0,137	0,117	0,126	0,134	< 0,005	0,22	0,140	0,131	0,0032
U-Ac-R.	U-235	0,10	0,14	0,19	< 0,01	0,21	0,13	0,12	0,093	0,12	< 0,03	0,19	0,12	0,088	< 0,007
	Th-227	0,10	0,12	0,16	< 0,005	0,23	0,10	0,098	0,12	0,12	< 0,03	0,17	0,095	0,11	< 0,004
	Ra-223	0,085	0,10	0,11	< 0,01	0,19	0,073	0,067	0,096	0,089	< 0,09	0,15	0,074	0,090	< 0,01
	Pb-211	0,083	0,08	0,19	< 0,01	0,20	0,069	0,061	0,065	0,081	< 0,1	0,091	< 0,06	0,100	< 0,01

Die Zahl nach dem '<' entspricht der Nachweisgrenze.

ZK08/1	ZrSiO <sub>4</sub>
ZK08/2	ZrSiO <sub>4</sub>
ZK08/3	ZrSiO <sub>4</sub>
ZK08/4	ZrO <sub>2</sub>
ZK08/5	ZrO <sub>2</sub>
ZF01/1	FFM vor Brennprozess Probe 1
ZF01/2	FFM vor Brennprozess Probe 2

ZF01/3	FFM nach Brennprozess
ZF01/4	FFM fertiges Produkt
ZF01/5	Staubpartikel Atemmaske
ZF01/6	ZrSiO <sub>4</sub>
ZF01/7	FFM Pellets
ZF01/8	FFM Pulver
ZF01/9	Mahlkugeln (ca. 68 % ZrO <sub>2</sub> )

\*Wert konnte aus messtechnischen Gründen nicht ermittelt werden.

## Spezifische Aktivitäten in Proben aus der Zirkon- und Zirkonium-Industrie – Teil V

Probe	ZF01/10	ZSM01/1	ZSM01/2	ZSM01/3	ZSM03/1	ZSM03/2	ZSM03/3	ZSM05/1	ZSM06/1	ZSM06/2	ZSM07/1	ZSM07/2	ZSM07/3	ZL01/1	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]														
U-Ra-Reihe	Th-234	4,8	< 0,007	0,18	0,40	< 0,004	0,44	0,16	0,067	0,090	0,037	0,068	0,066	0,054	0,35
	Pa-234m	3,3	< 0,05	0,15	0,40	< 0,008	0,514	0,183	0,078	0,12	< 0,04	0,073	0,079	0,065	0,353
	Th-230	-	< 0,07	< 0,5	< 0,6	< 0,03	< 0,7	< 0,2	< 0,1	< 0,2	< 0,2	< 0,1	< 0,3	< 0,3	0,44
	Ra-226	3,1	< 0,008	0,17	0,3	< 0,005	0,42	0,16	0,075	0,06	0,03	0,072	0,083	0,054	0,34
	Pb-214	3,3	< 0,001	0,165	0,38	0,00059	0,413	0,143	0,0734	0,0839	0,034	0,0801	0,0804	0,0589	0,325
	Bi-214	3	< 0,0007	0,149	0,33	0,00057	0,371	0,128	0,0664	0,0765	0,031	0,0733	0,0735	0,0533	0,293
	Pb-210	< 0,7	< 0,009	< 0,05	< 0,06	< 0,006	< 0,03	< 0,01	0,0692	< 0,02	< 0,02	0,0447	< 0,006	< 0,006	< 0,02
	U-238 ber.	3,9	< 0,05	0,20	0,53	< 0,02	0,46	0,16	0,077	< 0,2	< 0,07	0,089	0,082	0,066	0,33
Th-Reihe	Ac-228	0,79	< 0,002	0,198	0,435	< 0,0004	0,506	0,179	0,0430	0,0484	0,022	0,0495	0,0473	0,0334	0,349
	Ra-224	0,85	< 0,008	0,204	0,48	< 0,002	0,493	0,183	0,0401	0,038	0,020	0,0466	0,0457	0,0313	0,341
	Pb-212	0,82	< 0,0004	0,191	0,48	0,00021	0,478	0,176	0,0416	0,0460	0,023	0,0485	0,0459	0,0322	0,336
	Bi-212	0,76	< 0,006	0,180	0,43	< 0,001	0,457	0,175	0,0407	0,043	0,020	0,0489	0,0452	0,0330	0,330
	Tl-208	0,26	< 0,0004	0,0610	0,14	< 0	0,149	0,0550	0,0132	0,0135	0,0072	0,0156	0,0147	0,00995	0,105
U-Ac-R.	U-235	0,18	< 0,002	0,0091	0,025	< 0,0007	0,021	0,0074	0,0035	< 0,008	< 0,003	0,0041	0,0038	0,0030	0,015
	Th-227	0,16	< 0,003	< 0,02	0,023	< 0,0008	0,025	0,0094	0,0035	< 0,005	< 0,007	0,0037	0,0035	0,0028	0,020
	Ra-223	0,10	< 0,008	< 0,03	< 0,05	< 0,002	0,017	0,010	< 0,006	< 0,02	< 0,01	< 0,008	< 0,003	< 0,005	0,012
	Pb-211	0,12	< 0,009	< 0,03	< 0,03	< 0,002	< 0,02	< 0,01	< 0,004	< 0,02	< 0,01	< 0,009	< 0,003	< 0,003	< 0,01

Die Zahl nach dem '&lt;' entspricht der Nachweisgrenze.

ZF01/10	Mahlperlen (ca. 68 % ZrO <sub>2</sub> )
ZSM01/1	Edelkorund
ZSM01/2	Normalkorund
ZSM01/3	Reststoffgemisch
ZSM03/1	Edelkorund
ZSM3/2	Normalkorund
ZSM3/3	Reststoffgemisch

ZSM5/1	Edelkorund Reststoffe
ZSM6/1	Normalkorund
ZSM6/2	Normalkorund Reststoffe
ZSM7/1	Edelkorund
ZSM7/2	Normalkorund
ZSM7/3	Normalkorund Reststoffe
ZL01/1	Normalkorund

Spezifische Aktivitäten in Proben aus: - der Zirkon- und Zirkonium-Industrie – Teil VI, - der Zementherstellung, - den Kohlekraftwerken Teil I

Probe	ZL01/2	ZL01/3	A/1	A/2	A/3	A/4	A/5	B/1	B/2	K1/1	K1/2	K1/3	K1/4	K1/5	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]														
U-Ra-Reihe	Th-234	0,082	2,8	0,048	< 0,02	0,068	< 0,01	< 0,2	0,014	0,45	< 0,008	0,005	0,015	0,023	0,15
	Pa-234m	0,096	2,50	< 0,1	< 0,1	0,11	< 0,04	< 0,3	< 0,05	0,72	< 0,05	< 0,02	< 0,06	0,026	0,16
	Th-230	< 0,08	2	< 0,3	< 0,2	< 0,3	< 0,09	< 2	< 0,08	0,5	< 0,07	< 0,05	< 0,1	< 0,06	< 0,3
	Ra-226	0,086	2,5	< 0,1	< 0,02	0,09	< 0,02	< 0,3	< 0,03	0,74	< 0,01	< 0,006	< 0,03	0,025	0,12
	Pb-214	0,0768	2,8	0,058	0,012	0,089	0,010	0,17	0,0158	0,68	0,0020	0,0054	0,0161	0,0263	0,124
	Bi-214	0,0687	2,5	0,050	0,011	0,082	0,0092	0,18	0,0136	0,61	0,0020	0,0045	0,0152	0,0240	0,118
	Pb-210	0,0092	< 0,8	0,32	0,68	0,15	< 0,01	< 0,2	0,204	0,086	< 0,007	0,0074	0,018	0,0247	0,044
	U-238 ber.	0,081	3,0	< 0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,07	< 1	< 0,03	0,73	< 0,07	< 0,03	< 0,09	0,031	0,17
Th-Reihe	Ac-228	0,0405	0,582	0,0721	0,011	0,0943	0,0011	0,281	0,0147	0,243	< 0,002	0,0041	0,012	0,00664	0,0591
	Ra-224	0,0389	0,57	0,065	0,019	0,087	< 0,008	0,32	0,014	0,24	< 0,006	0,0044	0,01	0,0059	0,062
	Pb-212	0,0396	0,57	0,070	0,018	0,099	< 0,001	0,29	0,0147	0,25	0,0013	0,0041	0,0120	0,00680	0,0592
	Bi-212	0,0400	0,56	0,066	0,016	0,095	< 0,005	0,27	0,017	0,23	< 0,005	0,0054	0,0096	0,0080	0,056
	Tl-208	0,0121	0,19	0,022	0,0051	0,031	< 0,0004	0,10	0,00481	0,077	< 0,0005	0,0013	0,0035	0,00229	0,0196
U-Ac-R.	U-235	0,0037	0,14	< 0,008	< 0,006	< 0,006	< 0,003	< 0,05	< 0,002	0,034	< 0,003	< 0,001	< 0,004	0,0014	0,0077
	Th-227	0,0048	0,13	< 0,01	< 0,008	0,0048	< 0,003	< 0,02	< 0,003	0,037	< 0,004	< 0,002	< 0,006	0,0012	0,0055
	Ra-223	< 0,003	0,11	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,008	< 0,1	< 0,006	0,031	< 0,009	< 0,004	< 0,01	< 0,004	< 0,03
	Pb-211	< 0,007	0,06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,008	< 0,1	< 0,006	0,029	< 0,01	< 0,004	< 0,01	< 0,005	< 0,03

Die Zahl nach dem '<' entspricht der Nachweisgrenze.

ZL01/2	Korundregenerat
ZL01/3	Keramikkugeln (ca. 65 % ZrO <sub>2</sub> )
A/1	FFM Zyklonstufe 1
A/2	FFM Zyklonstufe 2
A/3	FFM Ende Zyklonstrecke Ofeneingang
A/4	Schamottesteine Ofenmitte
A/5	Schamottesteine Ofenausgang

B/1	Flammenfrontbereich
B/2	Spritzauskleidung Ofenausgang
K1/1	Steinkohle (Kolumbien)
K1/2	Steinkohle (Tschechien)
K1/3	Steinkohle (Deutschland)
K1/4	Steinkohle (Polen)
K1/5	Nassschlacke Kessel (getrocknet)

## Spezifische Aktivitäten in Proben aus den Kohlekraftwerken Teil II

Probe	K1/6	K1/7	K1/8	K1/9	K1/10	K1/15	K2/1	K2/2	K2/3	K2/4	K2/5	K2/6	K2/7	K2/8	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]														
U-Ra-Reihe	Th-234	0,19	< 0,006	0,24	0,13	0,26	0,15	< 0,01	< 0,006	0,10	0,22	0,022	0,31	0,28	0,16
	Pa-234m	0,19	< 0,02	0,25	0,15	0,30	0,14	< 0,06	< 0,06	0,12	0,23	< 0,1	0,34	0,33	0,28
	Th-230	< 0,3	< 0,06	0,26	0,18	0,31	< 0,2	< 0,1	< 0,06	0,1	< 0,4	< 0,1	< 0,4	0,2	< 0,3
	Ra-226	0,18	< 0,01	0,24	0,1	0,21	< 0,2	< 0,03	< 0,008	0,14	0,23	< 0,05	0,37	0,36	0,24
	Pb-214	0,198	0,0051	0,24	0,13	0,231	0,138	0,014	0,0026	0,115	0,255	0,020	0,371	0,35	0,28
	Bi-214	0,186	0,0045	0,21	0,11	0,211	0,129	0,012	0,0028	0,107	0,240	0,018	0,342	0,30	0,25
	Pb-210	0,220	< 0,01	0,13	0,097	0,141	0,174	0,013	< 0,004	< 0,01	0,13	0,065	< 0,06	0,25	0,17
	U-238 ber.	0,22	< 0,03	0,30	0,19	0,32	< 0,2	< 0,09	< 0,05	0,088	0,32	< 0,1	0,42	0,41	0,40
Th-Reihe	Ac-228	0,0850	0,0013	0,103	0,0656	0,126	0,0739	0,012	< 0,002	0,0971	0,181	0,0096	0,236	0,198	0,166
	Ra-224	0,095	< 0,003	0,11	0,067	0,116	0,070	0,0087	< 0,009	0,0891	0,17	< 0,02	0,23	0,19	0,17
	Pb-212	0,0859	0,00095	0,11	0,068	0,125	0,0712	0,012	0,00076	0,0933	0,172	0,0100	0,233	0,20	0,18
	Bi-212	0,090	< 0,002	0,11	0,065	0,122	0,071	0,012	< 0,007	0,0919	0,165	< 0,009	0,222	0,20	0,16
	Tl-208	0,0277	0,00028	0,034	0,022	0,0395	0,0231	0,0040	< 0,0005	0,0294	0,0577	0,0030	0,0724	0,061	0,054
U-Ac-R.	U-235	0,010	< 0,001	0,014	0,0087	0,015	< 0,008	< 0,004	< 0,002	0,0041	0,015	< 0,005	0,019	0,019	0,018
	Th-227	0,011	< 0,002	0,013	0,0071	0,013	0,0067	< 0,006	< 0,003	0,0063	0,012	< 0,008	0,017	0,019	0,013
	Ra-223	< 0,02	< 0,004	0,011	< 0,01	0,01	< 0,03	< 0,01	< 0,009	0,0059	< 0,04	< 0,02	< 0,04	< 0,02	< 0,03
	Pb-211	< 0,03	< 0,004	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,008	< 0,04	< 0,02	< 0,04	< 0,04	< 0,03

Die Zahl nach dem '&lt;' entspricht der Nachweisgrenze.

K1/6	Flugstaub Kessel
K1/7	REA-Produkt, Gips
K1/8	Staub, Kesselluke Feuerungsbereich
K1/9	Staub dunkel, Überhitzer
K1/10	Staub hell, Überhitzer
K1/15	Rückstand Reinigung
K2/1	Steinkohle (Deutschland)

K2/2	Steinkohle (Kolumbien)
K2/3	Schlacke
K2/4	Flugasche
K2/5	REA-Produkt, Gips
K2/6	Messpunkt 3, Ablagerung Kessel Seitenwand in 1,3 m
K2/7	Ablagerung Kessel Seitenwand in 2 m
K2/8	bräunliche Ablagerungen an Rohren, Überhitzer

Spezifische Aktivitäten in Proben aus den Kohlekraftwerken Teil III: Wischtestanalysen

Probe	K1/11	K1/12	K1/13	K1/14	K2/9	K2/10	K2/11	K2/12	K2/13	K2/14	K3/10	K3/11	K3/12	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/cm <sup>2</sup> ]													
U-Ra-Reihe	Th-234	< 0,04	< 0,05	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,05	< 0,04	< 0,05	< 0,04	< 0,04	< 0,05
	Pa-234m	< 0,6	< 0,5	< 0,6	< 0,5	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,5	< 0,7	< 0,5	< 0,6	< 0,6	< 0,5
	Th-230	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
	Ra-226	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,09	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,08	< 0,07	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08
	Pb-214	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,009	0,0080	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Bi-214	< 0,01	< 0,009	< 0,01	< 0,009	< 0,01	< 0,01	< 0,007	< 0,01	0,0097	< 0,009	< 0,01	< 0,01	< 0,009
	Pb-210	< 0,04	< 0,04	< 0,05	< 0,04	0,065	< 0,05	0,14	0,097	0,13	0,14	0,35	< 0,05	0,042
	U-238 ber.	< 0,4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,5	< 0,4	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Th-Reihe	Ac-228	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	Ra-224	< 0,08	< 0,09	< 0,07	< 0,09	< 0,08	< 0,08	< 0,07	< 0,09	< 0,05	< 0,09	< 0,08	< 0,08	< 0,09
	Pb-212	< 0,007	< 0,009	< 0,007	< 0,009	0,0067	< 0,007	< 0,004	< 0,009	< 0,004	< 0,009	< 0,007	< 0,005	< 0,008
	Bi-212	< 0,07	< 0,06	< 0,07	< 0,06	< 0,07	< 0,07	< 0,08	< 0,06	< 0,07	< 0,06	< 0,06	< 0,07	< 0,06
	Tl-208	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
U-Ac-R.	U-235	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	Th-227	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
	Ra-223	< 0,09	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,09	< 0,09	< 0,08	< 0,08	< 0,09	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08
	Pb-211	< 0,09	< 0,08	< 0,09	< 0,08	< 0,1	< 0,1	< 0,09	< 0,08	< 0,09	< 0,08	< 0,09	< 0,09	< 0,08

Die Zahl nach dem '<' entspricht der Nachweisgrenze.

K1/11	Luke Kessel, Feuerungsbereich
K1/12	Kessel, Überhitzerrohre
K1/13	Geländer außerhalb Überhitzer
K1/14	Kessel, oberer Bereich Überhitzerrohre
K2/09	Überhitzer, Rohre, grauer Belag
K2/10	Schlangenvorwärmer 1, Rohre,
K2/11	Messpunkt 8: Kessel, Seitenwand 2 m Höhe, Probe 1

K2/12	Messpunkt 9: Kessel, Seitenwand 2 m Höhe, Probe 2
K2/13	Messpunkt 10: Kessel, Seitenwand 4 m Höhe
K2/14	Messpunkt 11: Kessel, Seitenwand 7 m Höhe
K3/10	Messpunkt 1
K3/11	Messpunkt 3
K3/12	Messpunkt 8

## Spezifische Aktivitäten in Proben aus den Kohlekraftwerken Teil IV

Probe	K2_16	K2_17	K3_1	K3_2	K3_3	K3_4	K3_5	K3_6	K3_7	K3_8	K3_9	
Nuklid	Spezifische Aktivität [Bq/g]											
U-Ra-Reihe	Th-234	0,18	0,15	0,030	0,012	0,17	0,12	< 0,01	0,12	< 0,2	< 0,2	< 0,9
	Pa-234m	0,21	0,20	0,034	< 0,03	0,22	0,17	< 0,04	< 0,1	< 0,7	< 1	< 7
	Th-230	< 0,4	< 0,3	< 0,08	< 0,04	< 0,4	< 0,2	< 0,1	< 0,2	< 2	< 2	< 8
	Ra-226	0,28	0,28	0,021	< 0,02	0,18	0,1	< 0,01	0,14	< 0,3	< 0,2	< 1
	Pb-214	0,28	0,23	0,0271	0,00864	0,185	0,14	0,0014	0,120	0,15	0,12	< 0,1
	Bi-214	0,25	0,21	0,0245	0,00802	0,172	0,13	0,0015	0,114	0,14	0,10	< 0,1
	Pb-210	0,21	0,39	0,0307	0,010	0,212	0,060	< 0,02	0,195	156	36	168
	U-238 ber.	0,28	< 0,2	< 0,05	< 0,03	0,26	0,21	< 0,06	< 0,2	< 1	< 1	< 7
Th-Reihe	Ac-228	0,169	0,143	0,0348	0,00748	0,214	0,157	< 0,001	0,115	0,14	0,11	< 0,2
	Ra-224	0,16	0,14	0,031	0,0053	0,202	0,15	< 0,01	0,12	0,15	< 0,1	< 1
	Pb-212	0,17	0,15	0,0335	0,00683	0,217	0,16	< 0,001	0,113	0,14	0,12	< 0,1
	Bi-212	0,16	0,13	0,0328	0,0075	0,212	0,16	< 0,005	0,11	0,14	< 0,09	< 0,9
	Tl-208	0,055	0,045	0,0110	0,00227	0,0720	0,053	< 0,0004	0,0382	0,042	0,038	< 0,08
U-Ac-R.	U-235	0,013	< 0,01	< 0,002	< 0,001	0,012	0,0097	< 0,003	< 0,007	< 0,05	< 0,06	< 0,3
	Th-227	0,012	0,0098	0,0012	< 0,002	0,010	0,011	< 0,004	< 0,02	< 0,07	< 0,08	< 0,5
	Ra-223	< 0,03	< 0,03	< 0,006	< 0,004	< 0,03	< 0,03	< 0,008	< 0,03	< 0,1	< 0,2	< 1
	Pb-211	< 0,03	< 0,02	< 0,004	< 0,004	< 0,02	< 0,03	< 0,008	< 0,03	< 0,1	< 0,2	< 1

Die Zahl nach dem '&lt;' entspricht der Nachweisgrenze.

K2_16	Reststoffe Kesselreinigung Probe 1
K2_17	Reststoffe Kesselreinigung Probe 2
K3_1	Steinkohle (Südafrika)
K3_2	Steinkohlegemisch (USA/Russland)
K3_3	Flugasche
K3_4	Schlacke, Brennkammer
K3_5	REA-Produkt, Gips

K3_6	loser Kesselstaub
K3_7	Messpunkt 1 (Ablagerungen Kesselwand)
K3_8	Messpunkt 3 (Ablagerungen Kesselwand)
K3_9	Messpunkt 8 (Ablagerungen Kesselwand)

Spezifische Aktivitäten in Filtermaterialien der WVU Teil I

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/g]																
	Uran-Radium-Reihe								Thorium-Reihe					Uran-Actinium-Reihe			
	Th-234	Pa-234m	Th-230	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-238	Ac-228	Ra-224	Pb-212	Bi-212	Tl-208	U-235	Th-227	Ra-223	Pb-211
2078	0,0079	< 0,02	< 0,06	< 0,1	0,0239	0,0213	0,013	< 0,03	0,0755	0,0573	0,0542	0,0561	0,0171	< 0,001	< 0,001	< 0,003	< 0,004
2080/1	0,21	0,22	< 0,2	0,27	0,206	0,193	0,173	0,20	0,112	0,11	0,111	0,113	0,0364	0,0091	< 0,009	< 0,02	< 0,02
2080/2	0,0086	< 0,02	< 0,06	< 0,03	0,0144	0,0133	0,0300	< 0,03	0,0197	0,016	0,0165	0,017	0,00499	< 0,001	< 0,002	< 0,004	< 0,004
2080/3	0,060	0,064	< 0,2	< 0,1	0,0528	0,0505	0,024	< 0,08	0,0524	0,041	0,042	0,043	0,0132	< 0,004	< 0,007	< 0,01	< 0,01
2097/1	0,0086	< 0,04	< 0,08	< 0,06	0,0301	0,0283	0,147	< 0,05	0,0416	0,021	0,0217	0,021	0,00709	< 0,002	< 0,004	< 0,008	< 0,009
2097/2	0,0085	< 0,02	< 0,09	0,008	0,00851	0,00813	0,017	< 0,02	0,0126	0,013	0,0125	0,013	0,00393	< 0,001	< 0,003	< 0,004	< 0,004
2097/3	< 0,01	< 0,05	< 0,1	< 0,2	0,110	0,102	< 0,02	< 0,08	0,142	0,027	0,0297	0,031	0,00955	< 0,004	< 0,005	< 0,01	< 0,007
2119/1	< 0,02	< 0,05	< 0,2	< 0,1	0,0223	0,0202	< 0,03	< 0,1	0,00974	0,097	0,0801	0,0761	0,0252	< 0,005	< 0,004	< 0,01	< 0,01
2119/2	< 0,04	< 0,07	< 0,4	< 0,4	0,0598	0,0571	< 0,04	< 0,2	0,312	0,262	0,236	0,22	0,077	< 0,008	< 0,008	< 0,02	< 0,02
2135	< 0,02	< 0,05	< 0,2	< 0,2	0,0639	0,0622	0,024	< 0,1	0,118	0,088	0,0831	0,0865	0,0292	< 0,005	< 0,004	< 0,01	< 0,01
3022/1	< 0,1	< 0,3	< 1	22,6	2,79	2,62	0,55	< 0,8	10	6,79	6,28	6,09	2,05	< 0,04	< 0,03	< 0,08	< 0,08
3022/2	< 0,1	< 0,5	< 2	24,9	3,29	3,06	0,51	< 1	11,9	7,38	6,65	6,73	2,21	< 0,05	< 0,05	< 0,1	< 0,1
3024/1	< 0,05	< 0,1	< 0,5	< 2	0,521	0,483	0,11	< 0,2	1,16	0,57	0,562	0,553	0,18	< 0,01	< 0,009	< 0,03	< 0,03
3024/2	< 0,06	< 0,2	< 0,9	17,1	5,9	5,65	0,347	< 0,4	4,45	4,01	4,05	4,06	1,36	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05
3024/3	< 0,01	< 0,04	< 0,1	< 0,04	0,0192	0,0181	0,321	< 0,07	0,0539	0,048	0,0517	0,051	0,0174	< 0,003	< 0,003	< 0,008	< 0,01
3028	1,3	1,1	< 2	10,8	3,37	2,97	0,52	< 2	12,7	11,3	10,8	9,89	3,26	< 0,08	< 0,03	< 0,09	< 0,1
3029	< 0,7	0,25	< 4	10,5	4,89	4,75	0,14	< 0,4	7,37	5,66	5,67	5,8	1,89	< 0,02	< 0,02	< 0,05	< 0,06
3073	< 0,191	< 0,357	-	42,1	9,6	8,8	2	0,11	2,6	2	1,9	1,8	0,6	< 0,005	< 0,023	< 0,069	< 0,077
3156	< 0,04	< 0,1	< 0,4	< 0,6	0,0799	0,0716	< 0,05	< 0,2	0,968	0,567	0,567	0,53	0,182	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,03
3168	< 0,015	< 0,038	-	0,042	0,017	0,015	< 0,049	0,0435	0,041	< 0,031	0,025	0,023	0,008	< 0,002	< 0,002	< 0,006	< 0,006
3184	< 0,1	< 0,9	< 1	< 8	5,56	5,28	0,46	< 1	2,47	1,6	1,65	1,72	0,547	< 0,05	< 0,06	< 0,1	< 0,2
3195/1	< 0,06	< 0,3	< 0,6	< 2	0,292	0,289	0,685	< 0,4	1,04	0,581	0,558	0,611	0,197	< 0,02	< 0,05	< 0,08	< 0,08
3195/2	< 0,1	< 0,7	< 1	< 11	1,49	1,43	0,528	< 1	5,12	4,24	3,85	3,89	1,33	< 0,06	< 0,1	< 0,2	< 0,2
3196	< 0,05	< 0,1	< 0,5	3,63	0,45	0,412	0,094	< 0,3	1,5	1,12	1,02	0,979	0,333	< 0,01	< 0,02	< 0,04	< 0,04
3217	0,011	0,01	0,04	0,04	0,013	0,011	0,033	0,02	0,023	0,019	0,018	0,019	0,0060	0,001	0,001	0,002	0,002
3261	< 0,02	< 0,07	< 0,3	2,67	1,07	0,992	0,056	< 0,1	1,04	0,816	0,823	0,818	0,262	< 0,006	< 0,006	< 0,01	< 0,02
3274/1	< 0,02	< 0,1	< 0,3	3,48	0,26	0,231	0,08	< 0,1	1,52	1,25	1,31	1,12	0,362	< 0,006	< 0,005	< 0,01	< 0,02

Die Zahl nach dem '<' entspricht der Nachweisgrenze.



## Spezifische Aktivitäten in Filtermaterialien der WVU Teil II

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/g]																
	Uran-Radium-Reihe						Thorium-Reihe					Uran-Actinium-Reihe					
	Th-234	Pa-234m	Th-230	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-238	Ac-228	Ra-224	Pb-212	Bi-212	Tl-208	U-235	Th-227	Ra-223	Pb-211
3274/2	< 0,03	< 0,2	< 0,4	8,14	1,56	1,44	0,202	< 0,2	2,9	2,4	2,38	2,36	0,75	< 0,009	< 0,008	< 0,02	< 0,02
3281	< 0,02	0,13	< 0,2	< 0,4	0,0539	0,0498	< 0,02	< 0,1	1,6	1,08	1,02	1,01	0,319	< 0,005	< 0,004	< 0,01	< 0,01
3311	< 0,05	< 0,2	< 0,5	7,15	1,15	1,11	0,281	< 0,3	3,63	3,52	3,33	3,58	1,13	< 0,01	< 0,1	< 0,03	< 0,03
3315/1	< 0,02	< 0,04	< 0,2	< 0,8	0,258	0,237	< 0,02	< 0,1	0,621	0,157	0,153	0,14	0,0480	< 0,005	< 0,008	< 0,02	< 0,01
3315/2	< 0,06	< 0,1	< 0,6	< 1	0,42	0,37	< 0,07	< 0,4	0,991	0,30	0,31	0,27	0,094	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,04
3340/1	< 0,01	< 0,03	< 0,1	< 0,7	0,135	0,125	0,031	< 0,06	0,32	0,218	0,206	0,205	0,0649	< 0,003	< 0,002	< 0,006	< 0,008
3340/2	< 0,01	< 0,04	< 0,1	< 0,5	0,138	0,134	0,019	< 0,07	0,236	0,142	0,143	0,147	0,0484	< 0,003	< 0,003	< 0,008	< 0,01
3345	< 0,05	< 0,2	< 0,7	3,07	1,18	1,13	< 0,04	< 0,3	4,21	3,13	3,21	3,27	1,08	< 0,01	< 0,03	< 0,03	< 0,03
4001/1	< 0,03	< 0,2	< 0,4	2,56	0,307	0,28	0,369	< 0,1	1,99	1,51	1,3	1,28	0,416	< 0,007	< 0,006	< 0,02	< 0,02
4001/2	< 0,04	< 0,2	< 0,5	7,27	1,51	1,46	0,358	< 0,3	2,18	2,01	1,92	1,98	0,657	< 0,01	< 0,01	< 0,03	< 0,04
4001/3	< 0,04	< 0,08	< 0,5	< 1	0,161	0,149	< 0,07	< 0,2	0,789	0,62	0,565	0,556	0,183	< 0,01	< 0,009	< 0,02	< 0,03
4031	-	-	-	0,173	-	-	0,187	-	0,025	-	-	-	-	-	-	-	-
4157	< 0,01	< 0,04	< 0,1	4,48	0,283	0,25	0,173	< 0,07	0,302	0,314	0,28	0,275	0,0892	< 0,003	< 0,003	< 0,007	< 0,009
5051/1	< 0,007	< 0,05	< 0,09	< 0,009	0,0037	0,0034	< 0,01	< 0,06	< 0,002	< 0,006	0,00086	< 0,006	< 0,0004	< 0,003	< 0,003	< 0,009	< 0,009
5051/2	< 0,01	< 0,05	< 0,09	< 0,009	0,0039	0,0045	< 0,01	< 0,06	< 0,002	< 0,006	0,00073	< 0,006	0,00033	< 0,003	< 0,003	< 0,009	< 0,009
5051/3	< 0,04	< 0,06	< 0,3	< 0,01	0,0035	0,0032	< 0,07	< 0,1	< 0,002	< 0,01	< 0,001	< 0,007	< 0,0006	< 0,005	< 0,004	< 0,01	< 0,01
5051/4	< 0,04	< 0,06	< 0,3	< 0,01	0,0023	0,0023	< 0,08	< 0,1	< 0,002	< 0,01	< 0,001	< 0,007	< 0,0005	< 0,005	< 0,004	< 0,01	< 0,01
5055/1	0,0031	< 0,008	< 0,02	< 0,006	0,00506	0,00431	0,011	< 0,01	0,00038	< 0,001	0,00056	< 0,0009	0,00023	< 0,0006	0,00052	< 0,001	< 0,001
5055/2	0,0025	< 0,007	< 0,01	< 0,006	0,00271	0,0027	0,0047	< 0,01	0,005	< 0,001	0,00043	< 0,0008	0,00013	< 0,0004	0,0014	< 0,001	0,0014
5226/1	0,0079	< 0,01	< 0,03	0,006	0,00726	0,00674	0,013	< 0,02	0,0015	< 0,002	0,00042	< 0,002	0,00013	< 0,0007	< 0,0004	< 0,002	< 0,003
5226/2	0,0087	< 0,01	< 0,07	< 0,01	0,00597	0,00550	< 0,01	< 0,03	0,0014	< 0,003	0,00040	< 0,002	0,00017	< 0,001	< 0,001	< 0,003	< 0,003
5248/1	< 0,04	< 0,09	< 0,4	< 0,9	0,0623	0,0590	0,628	< 0,2	0,114	0,136	0,142	0,139	0,0472	< 0,009	< 0,02	< 0,02	< 0,02
5248/2	< 0,05	< 0,09	< 0,4	< 0,6	0,0435	0,0388	0,19	< 0,2	0,0857	0,10	0,102	0,103	0,0336	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,02
5248/3	< 0,01	< 0,06	< 0,2	< 0,08	0,022	0,0187	0,027	< 0,1	0,0305	0,016	0,0172	0,016	0,00575	< 0,005	< 0,006	< 0,01	< 0,01
5266	< 0,01	< 0,04	< 0,2	< 0,4	0,0843	0,0767	0,037	< 0,08	0,209	0,183	0,159	0,160	0,0511	< 0,004	< 0,008	< 0,01	< 0,01
5306	< 0,006	< 0,01	< 0,04	0,0349	0,00884	0,00857	< 0,02	< 0,03	0,0018	< 0,002	0,0011	< 0,002	0,00039	< 0,001	0,0047	0,0072	0,0051
5323	0,004	-	-	0,012	-	-	0,023	0,00435	0,001-	-	-	-	-	0,0002	-	-	-

Die Zahl nach dem '&lt;' entspricht der Nachweisgrenze.

Spezifische Aktivitäten in Filtermaterialien der WVU Teil III

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/g]																
	Uran-Radium-Reihe								Thorium-Reihe					Uran-Actinium-Reihe			
	Th-234	Pa-234m	Th-230	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-238	Ac-228	Ra-224	Pb-212	Bi-212	Tl-208	U-235	Th-227	Ra-223	Pb-211
5334	0,011	< 0,011	-	0,012	0,006	0,004	< 0,009	0,0435	0,001	< 0,002	0,001	< 0,001	0,001	< 0,002	0,008	0,002	0,004
5410/1	< 0,007	< 0,023	-	< 0,004	0,001	0,001	< 0,023	0,0217	< 0,001	< 0,003	0,001	< 0,003	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,003	< 0,004
5410/2	0,088	-	-	0,179	-	-	0,125	0094	0,007	-	-	-	-	0,004	-	-	-
5414	0,01	0,016	< 0,04	< 0,02	0,0072	0,0066	0,038	< 0,02	0,0012	< 0,002	0,00122	< 0,002	0,00034	< 0,0008	0,00063	< 0,002	< 0,002
5424	-	-	-	0,0468	-	-	-	0,00217	0,044	-	-	-	-	0,0001	-	-	-
7164	< 0,04	< 0,08	< 0,4	< 0,5	0,0959	0,0869	< 0,03	< 0,2	0,963	0,711	0,58	0,56	0,182	< 0,008	< 0,007	< 0,02	< 0,02
7331	< 0,05	< 0,02	< 0,1	< 0,5	0,134	0,122	0,015	< 0,06	0,198	0,153	0,137	0,135	0,0435	< 0,003	< 0,005	< 0,008	< 0,004
8366	0,060	0,062	< 0,07	0,050	0,0497	0,0450	0,0550	0,053	0,0583	0,0544	0,0582	0,0564	0,0183	0,0025	0,0036	< 0,004	< 0,005

Die Zahl nach dem '<' entspricht der Nachweisgrenze.

Spezifische Aktivitäten in Filtermaterialien und Rückstandsproben der Mineralwasserhersteller und Brauereien

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/g]																
	Uran-Radium-Reihe								Thorium-Reihe					Uran-Actinium-Reihe			
	Th-234	Pa-234m	Th-230	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-238	Ac-228	Ra-224	Pb-212	Bi-212	Tl-208	U-235	Th-227	Ra-223	Pb-211
30147/1	< 0,05	< 0,1	< 0,5	< 1	0,76	0,68	< 0,06	< 0,4	0,405	0,28	0,27	0,25	0,085	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,03
30147/2	< 0,1	< 0,2	< 1	23,0	9,56	9,24	1,23	< 0,7	9,13	< 0	6,44	6,91	2,14	< 0,03	< 0,06	< 0,09	< 0,07
30197/1	0,061	0,069	< 0,1	0,030	0,0258	0,0238	0,0362	0,075	0,0486	0,0417	0,0424	0,0424	0,0138	0,0034	< 0,004	< 0,006	< 0,007
30197/2	1,5	1,76	< 0,2	< 0,05	0,019	0,018	0,062	1,7	0,0088	< 0,01	0,0077	< 0,009	0,0025	0,076	< 0,007	< 0,02	< 0,02
30197/3	4,0	4,7	< 0,5	< 0,1	0,042	0,038	0,15	4,6	0,017	< 0,04	0,0084	< 0,03	0,0038	0,21	< 0,02	< 0,05	< 0,05
70030	< 0,1	< 1	< 1	< 0,9	0,12	0,099	0,79	< 1	0,36	0,15	0,14	< 0,1	0,044	< 0,05	< 0,08	< 0,2	< 0,2
70067	< 0,07	< 0,4	< 0,7	< 0,3	0,039	0,033	< 0,1	< 0,4	0,14	< 0,05	0,035	< 0,06	0,011	< 0,02	< 0,02	< 0,06	< 0,07
70090/1	< 0,009	< 0,03	< 0,1	< 0,1	0,0555	0,0517	< 0,009	< 0,05	0,0619	0,028	0,0271	0,028	0,00877	< 0,002	< 0,003	< 0,007	< 0,007
70090/2	< 0,009	< 0,03	< 0,1	< 0,1	0,0474	0,0436	0,010	< 0,05	0,0643	0,0371	0,0341	0,031	0,0106	< 0,002	< 0,004	< 0,007	< 0,007
70142/1	< 0,04	< 0,1	< 0,4	< 1	0,11	0,10	0,048	< 0,3	0,485	0,41	0,35	0,32	0,11	< 0,01	< 0,02	< 0,03	< 0,03
70142/2	< 0,02	< 0,04	< 0,2	< 0,8	0,0829	0,0746	0,034	< 0,1	0,376	0,312	0,246	0,241	0,0767	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01
70142/3	< 0,07	< 0,2	< 0,7	< 1	0,534	0,496	< 0,07	< 0,4	0,566	0,452	0,460	0,454	0,151	< 0,02	< 0,03	< 0,05	< 0,05
70186	< 0,03	< 0,2	< 0,3	< 0,8	0,073	0,064	< 0,03	< 0,3	0,613	0,13	0,11	0,10	0,034	< 0,01	< 0,008	< 0,05	< 0,04
80002	0,0077	< 0,03	< 0,05	< 0,02	0,00823	0,00740	0,0098	< 0,03	0,0141	0,011	0,0104	0,010	0,00345	< 0,001	< 0,002	< 0,004	< 0,004

## Anhang III: Ergänzendes Tabellenmaterial zu Kapitel 7: Grundwasserfilteranlagen

Gesamtübersicht der Einflussfaktoren für eine verstärkte Anreicherung von Radiumisotopen an Filtermaterialien  
(Fe: Enteisenung, Mn: Entmanganung, Es: Entsäuerung, As: Entarsenung)

Probe	$\Sigma$ (Ra-226,Ra228), [Bq/g]	Georegion des geförderten Wassers	Aufbereitungsart	Jahr der Inbetriebnahme des FM	Durchfluss je Filter [m <sup>3</sup> /a]
3073	44,7	3	Fe/Mn	1963	83.000
3022/2	36,8	3	Fe/Mn/As/Es	1984	225.000
3028	33,5	3	Fe/Mn	1998	150.000
3022/1	32,6	3	Fe/Mn/As/Es	1970	225.000
3024/2	21,6	3	Fe/Mn	1990	3.900
3029	17,9	3	Fe/Mn/As/Es	1985	77.000
3195/2	16,1	3	Fe/Mn	1995	600.000
3274/2	11	3	Fe/Mn	1983	500.000
3311	10,8	3	Fe/Mn	1978	210.000
3184	10,5	3;6	Fe/Mn	k. A.	k. A.
4001/2	9,5	6;7	Fe/Mn	1981	276.000
3345	7,3	3	Fe/Mn	1985	348.000
4157	5,2	3;6	Fe	1963	62.000
3196	5,1	3	Fe/Mn	2001	1.750.000
3274/1	5	3	Fe/Mn	1975	800.000
4001/1	4,6	6	Fe/Mn	1981	283.000
3261	3,7	2a;3	Fe/Mn	1970	382.000
3024/1	3,2	3;6	Fe/Mn	2004	1.000
3195/1	3	2a;3	Fe/Mn	2007	700.000
4001/3	2,2		Fe/Mn	k. A.	k. A.
3315	2,2	3	Fe/Mn	2010	52.000
3281	2	3	Fe/Mn	1994	3.500.000
3156	1,6	3	Fe/Mn/Es	k. A.	k. A.
7164	1,5	7	Mn	1988	250.000
3340/1	0,98	3;7	Fe/Mn	1997	2.000.000
5248/1	0,84	6	Fe/Mn	1969-2005	630.000
7331	0,67	7	Fe/Mn	1992	250.000
3340/2	0,64	3;7	Fe/Mn	1997	2.000.000
2119/2	0,61	7	Fe/Mn	1965	240.000
5266	0,54	6	Fe/Mn	2001	223.000
5248/2	0,51	6	Fe/Mn	1969-2005	630.000
2080/1	0,38	1	As	1995	400.000
2097/3	0,26	2	Fe/Mn	2012	27.500
2135	0,26	2;7	Fe/Mn	2001	15.000
4031	0,23	6	Fe/Mn	k. A.	k. A.
5410/2	0,19	5	Es	2009	2638
2078	0,18	2	Fe/Mn	2009	1.150.000
2119/1	0,13	7	Fe/Mn	1963	150.000
2080/3	0,11	1	Filtration	1998	40.000
8366	0,11	8	Filtration	2003	470.000
5425	0,091	5	Fe/Mn	k. A.	k. A.
3168	0,083	1	Es	k. A.	k. A.

Gesamtübersicht der Einflussfaktoren für eine verstärkte Anreicherung von Radiumisotopen an Filtermaterialien  
(Fe: Enteisung, Mn: Entmanganung, Es: Entsäuerung, As: Entarsenung)

Probe	$\Sigma$ (Ra-226,Ra228), [Bq/g]	Georegion des ge- förderten Wassers	Aufbereitungsart	Jahr der Inbetrieb- nahme des FM	Durchfluss je Filter [m <sup>3</sup> /a]
2097/1	0,066	2	Ozonung	2007	250.000
3217	0,063	3	Fe/Mn	2000/2001	68.000
5306	0,037	5	Es	k. A.	60.000
2080/2	0,034	1	Fe/Mn	1998	600.000
2097/2	0,021	2	Es	1997	250.000
5323	0,013	5	Es	k. A.	k. A.
5334	0,013	5	Es	k. A.	107.000
5226/1	0,0075	5	Es	k. A.	100.000
5248/3	< 0,1	6	Fe/Mn	2005	630.000
3024/3	< 0,09	6	Fe/Mn	k. A.	k. A.
5051/1	< 0,09	5	Es	2011	35.000
5414	< 0,02	5	Es	k. A.	k. A.
5051/2	< 0,01	5	Es	2011	30.000
5051/3	< 0,01	5	Es	2011	30.000
5051/4	< 0,01	5	Es	2011	40.000
5226/2	< 0,01	5	Es	k. A.	100.000
5055/2	< 0,007	5	Es	2008	220.750
5055/1	< 0,006	5	Es	1984	220.750
5410/1	< 0,005	5	Es	2009	75.500

