

---

Abschlussbericht zum 31. Dezember 2004

# Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftigen Rückständen

---



Bayerisches Landesamt  
für Umwelt

---

## **Augsburg, 2004**

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg  
Tel.: (0821) 90 71 - 0  
Fax: (0821) 90 71 - 55 56  
eMail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Verfasser: Dr. Mallick

Stand: Abschlussbericht zum 31. Dezember 2004

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.)

Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftigen Rückständen, Augsburg, 2004

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2004

Gedruckt auf Recyclingpapier

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Arbeitsfelder mit erheblich erhöhten Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen</b>	<b>7</b>
2.1	Arbeitsfelder mit erhöhten Radon-222-Expositionen	7
2.1.1	Stand der Forschung	7
2.1.2	Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung	11
2.1.2.1	Brauereien	13
2.1.2.2	Mineralwasserhersteller	17
2.1.2.3	Molkereien	19
2.1.2.4	Weitere Arbeitsfelder mit Radon	22
2.1.2.4.1	Pilzzuchtbetriebe	22
2.1.2.4.2	Tunnelbauten	22
2.1.2.4.3	Papierherstellung	25
2.1.2.5	Fazit	25
2.2	Arbeitsfelder mit erhöhten Expositionen durch Uran und Thorium und deren Zerfallsprodukte ohne Radon	27
2.2.1	Schleifen von und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden	27
2.2.1.1	Stand der Forschung	27
2.2.1.2	Eigene Untersuchungen	31
2.2.1.3	Fazit	35
2.2.2	Handhabung und Lagerung thoriertes Gasglühstrümpfe	36
2.2.2.1	Stand der Forschung	36
2.2.2.2	Eigene Untersuchungen	38
2.2.2.3	Fazit	44
2.2.3	Weitere Arbeitsfelder	44
2.2.3.1	Verwendung von Thorium oder Uran zu chemischen-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken	44
2.2.3.2	Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen	45
2.2.3.3	Pyrochloreze	46
2.2.3.4	Schlacke aus der Verhüttung von Kupferschiefererzen	46
<b>3</b>	<b>Verwertung und Beseitigung überwachungsbedürftiger Rückstände</b>	<b>47</b>
3.1	Schlämme und Ablagerung aus der Gewinnung von Erdöl und Erdgas	49
3.2	Stäube und Schlacken aus der Verarbeitung von Rohphosphat	50
3.2.1	Chemische Industrie	51

3.2.2	Düngemittelindustrie	51
3.2.3	Waschmittelindustrie	51
3.3	Nebengestein, Schlämme, Sande, Schlacken und Stäube aus der Gesteinsverarbeitung	52
3.3.1	Stand der Forschung	52
3.3.2	Kaolin und Feldspat	55
3.3.2.1	Bestimmung der effektiven Dosis und Organdosis	58
3.3.3	Granit	59
3.3.3.1	Bayerischer Wald	60
3.3.3.2	Fichtelgebirge und Oberpfälzer Wald	60
3.3.3.3	Importiertes Gesteinsmaterial	66
3.3.3.4	Bestimmung der effektiven Dosis und Organdosis	68
3.3.4	Fluorit	71
3.3.5	Fazit	73
3.4	Stäube und Schlämme bei der Primärverhüttung in der Roheisen- und Nichteisenmetallurgie	73
3.5	Rückstände aus der Feuerfest- und Gießerei-Industrie	74
3.5.1	Zirkon	74
3.5.2	Ofenausbruch	77
3.6	Rückstände aus der Kohleverbrennung	79
3.7	Rückstände aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung	82
3.7.1	Stand der Forschung	82
3.7.2	Eigene Untersuchungen	83
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>89</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>95</b>
<b>6</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>107</b>
A	Ergebnisbericht des IGU - Institut für angewandte Isotopen-, Gas- und Umweltuntersuchungen	107
B	Fragebogen und Anschreiben an Betriebe der Anlage XI	123
B.1	Fragebogen und Messaufforderung an Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien	123
B.1.1	Fragebogen	125
B.1.2	Messaufforderung	133
B.1.3	Ablaufplan und Messprotokoll	137
B.2	Fragebogen an Betriebe, die mit thorierten Schweißelektroden arbeiten	141

C	Tabellen mit den Messergebnissen	145
C.1	Ergebnisse der Gesteinsproben	145
C.1.1	Einheimische Granite	145
C.1.2	Filterstäube	148
C.1.3	Schlämme	149
C.1.4	Importierte Granite	150
C.2	Ergebnisse der Kohlekraftwerksrückstände	155
C.3	Ergebnisse der Rückspülschlämme	157
C.3.1	Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung	157
C.3.2	Schlämme aus der Mineralwasseraufbereitung	158
C.3.3	Klärschlämme	158

#### 4 Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftigen Rückständen

# 1 Einleitung

Die Novellierung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [1] im Juli 2001 hat erstmals Vorschriften zum Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlenquellen bei Arbeiten aufgenommen.

Die Paragraphen 93 bis 96 StrlSchV regeln Arbeiten mit erhöhten Expositionen durch Uran, Thorium, Radon und deren Zerfallsprodukte. Betriebe mit Beschäftigten in Arbeitsfeldern, die in der Anlage XI, Teil A der Strahlenschutzverordnung genannt werden, mussten spätestens bis 01. August 2003 die Radonexposition abschätzen und notwendige Maßnahmen umsetzen. Zu diesen Arbeitsfeldern gehören neben untertägigen Bergwerken, Schächten, Höhlen, Besucherbergwerken, Radonheilbädern und -heilstollen, vor allem Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung. Anzeigepflicht gegenüber der zuständigen Behörde besteht bei der Überschreitung des sog. Eingreifwertes der Jahresexposition von 6 mSv ( $2 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ , gilt für Gleichgewichtsfaktor  $F = 0,4$ ). Die Betriebe müssen dann geeignete Maßnahmen ergreifen, um die Exposition zu reduzieren. Als Grenzwert für diese anzeigebedürftigen Arbeiten darf eine Jahresexposition von 20 mSv ( $6 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ , gilt für Gleichgewichtsfaktor  $F = 0,4$ ) nicht überschritten werden.

Nachdem das damalige Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) im Forschungsprojekt „Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern“ (11/97 bis 11/01) [6] die Radonexposition anhand von 500 Wasserwerken überprüft hat und im Untersuchungsvorhaben „Strahlenexposition durch natürliche Radioisotope aus gewerblichen Betrieben in Bayern“ (12/01 bis 10/04) die Ermittlung und Überwachung der Radonexposition in allen bayerischen Wasserwerken durchgeführt hat [7], liegt bei diesem Untersuchungsvorhaben unser Augenmerk auf weiteren Arbeitsfeldern mit einer eigenen Wasserversorgung. Bei diesen Arbeitsfeldern besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass es durch die Entgasung von Radon aus dem geförderten und aufbereiteten Wasser zu einer Radonexposition von Beschäftigten kommen kann. In diesem Forschungsvorhaben wollen wir diese speziellen Arbeitsfelder z.B. Molkereien, Brauereien und Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung im Hinblick auf erhöhte Radon-222-Expositionen der Beschäftigten untersuchen. Weitere Arbeitsfelder, wie Pilzzuchtbetriebe und Tunnelbauten haben wir ebenfalls näher betrachtet.

Um Auskunft über anlagenspezifische Daten und Arbeitszeiten der Beschäftigten zu erhalten, haben wir im Januar bzw. April 2003 an alle bayerischen Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien Fragebögen versandt. Nach deren Auswertung bis Mai bzw. September 2003 legten wir die Bereiche fest, an denen mit Hilfe eines ortsgebundenen Exposimeters (Kernspurdetektor) die Radonkonzentration gemessen werden sollte. Anschließend forderten wir die Betriebe auf, Messungen zur Ermittlung der Radonexposition durchzuführen. In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Fragebogenaktion und der Radonabschätzung präsentiert.

Ebenfalls untersuchten wir Arbeitsfelder mit erhöhten Expositionen durch Uran und vor allem Thorium. Zu diesen Arbeitsfeldern zählen in Bayern: Schleifen von und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden sowie Handhabung und Lagerung thoriertes Gasglühstrümpfe. Die übrigen Arbeitsfelder, die in Anlage XI, Teil B aufgeführt werden, kommen in Bayern nicht vor.

Die Paragraphen 97 bis 102 StrlSchV regeln den Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen, vor allem bei überwachungsbedürftigen Rückständen. Der zweite Teil des Forschungsvorhabens behandelt die Ermittlung und Erfassung von in Bayern vorkommenden überwachungsbedürftigen Rückständen. Seit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung 2001 [1] ist jeder Betrieb, bei dem überwachungsbedürftige Rückstände bei Arbeiten anfallen, verpflichtet, sicherzustellen, dass durch die Verwertung oder Beseitigung dieser Rückstände eine effektive Dosis von 1 Millisievert pro Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht

überschritten werden kann. Andernfalls hat der Betrieb Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung zu ergreifen.

Überwachungsbedürftig sind Rückstände gemäß der Anlage XII, Teil A der StrlSchV [1], es sei denn, es ist sichergestellt, dass bei der Verwertung oder Beseitigung dieser Rückstände die Überwachungsgrenzen in Anlage XII, Teil B und die dort genannten Beseitigungs- oder Verwertungswege eingehalten werden, damit das 1-Millisievert-Kriterium nicht überschritten wird.

Rückstände, die in der sog. Positivliste (Anlage XII, Teil A StrlSchV) aufgeführt werden oder Materialien gemäß § 102 StrlSchV [1] entstehen in verschiedensten Industriebereichen. In Bayern fallen z.B. in der Kaolin-Industrie und bei Granit-Steinbrüchen Rückstände aus der Gesteinsverarbeitung und -aufbereitung an. Zusätzlich haben wir Rückstände aus der Erdöl- und Erdgas-Gewinnung, der Verarbeitung von Rohphosphat, der Primärverhüttung in der Roheisen- und Nichteisenmetallurgie, der Feuerfest- und Gießerei-Industrie, der Kohleverbrennung und der Trinkwassergewinnung erfasst und untersucht. Dabei haben wir festgestellt, dass die Rückstände aus den ersten drei aufgeführten Industriebereichen in Bayern keine Rolle mehr spielen.

Durch diese Untersuchungen soll ein Überblick über die Rückstandssituation in Bayern gewonnen werden. Nach der Identifizierung der Rückstände eines Betriebes bezüglich der Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil B und einer Abschätzung der Körperdosen aus der Ortsdosisleistung und der Konzentration der radioaktiven Stoffe (Staub) in der Arbeitsplatzluft, dienen die Ergebnisse der Behörde als Grundlage zur Festlegung der Beseitigungs- oder Verwertungswege sowie der Kontrolle der Anzeigen, welche durch die nach § 97 Abs. 1 Satz 1 Verpflichteten abzugeben sind [1].

## 2 Arbeitsfelder mit erheblich erhöhten Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen

### 2.1 Arbeitsfelder mit erhöhten Radon-222-Expositionen

Mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) im Juli 2001 [1] wird der Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlungsquellen bei Arbeiten geregelt (§§ 93 bis 96). Mit dieser Novellierung hat Deutschland die im Mai 1996 von der Europäischen Gemeinschaft verabschiedete „Richtlinie zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung“ (96/29/Euratom) [2] in nationales Recht umgesetzt. Neben dem Schutz vor erhöhten Expositionen an Arbeitsfeldern durch Uran und Thorium (Kapitel 2.2) zählt dazu vor allem der Schutz vor erhöhten Expositionen durch das radioaktive Edelgas Radon. Betriebe deren Beschäftigte in einem der Arbeitsfelder gemäß Anlage XI, Teil A StrlSchV [1] Arbeiten ausüben, müssen eine auf den Arbeitsplatz bezogene Abschätzung der Radon-222-Exposition durchführen. Zu diesen Arbeitsfeldern zählen:

- untertägige Bergwerke, Schächte und Höhlen, einschließlich Besucherbergwerke
- Radon-Heilbäder und -Heilstollen
- Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung.

Dabei müssen an den Arbeitsplätzen in der Raumluft die für die Radonexposition in der Strahlenschutzverordnung vorgegebene Grenzwerte eingehalten werden. Der Grenzwert ist eine Jahresexposition von  $6 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ , die nicht überschritten werden darf. Bei einer Überschreitung dieses Wertes muss der betroffene Betrieb die Exposition unter allen Umständen reduzieren (§§ 94, 95 StrlSchV). Als Eingreifwert gelten  $2 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  als Jahresexposition. Unterhalb dieses Wertes genügen geeignete Maßnahmen des Arbeitsschutzes, um die Exposition der Beschäftigten zu reduzieren. Im Bereich ab  $2 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  müssen Maßnahmen zur Reduktion der Exposition angewandt und eine ständige Überwachung der Exposition des Beschäftigten durchgeführt werden.

#### 2.1.1 Stand der Forschung

Radon ist ein radioaktives Edelgas, das in Gesteinen und Böden, Wasser und Luft vorkommt. Es entsteht als Zerfallsprodukt der drei natürlichen Zerfallsreihen des Uran-238, Thorium-232 und Uran-235. Dabei sind Radon-222 aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe (Abb. 1a), Radon-220 (Thoron) aus der Thorium-Zerfallsreihe (Abb. 1b) und Radon-219 (Actinon) aus der Uran-Actinium-Zerfallsreihe (Abb. 1c) die einzigen gasförmigen Zerfallsprodukte dieser Zerfallsreihen [3], [4].

Radon-222 entsteht aus dem radioaktiven Zerfall von Radium-226 und hat eine Halbwertszeit von 3,825 Tagen. Da Radium-226 in jedem Gesteinstyp in mehr oder weniger hohen Konzentrationen vorhanden ist, gilt dies auch für Radon-222. Radon-222 ist aber ein Edelgas und deswegen sehr mobil. Es diffundiert aus den verschiedenen Gesteinsschichten in die umgebende Bodenluft und löst sich dort im Grundwasser. Mit der Bodenluft und durch die grundwasserführenden Schichten im Boden verbreitet sich Radon weiträumig im Untergrund und tritt dann über Erdspalten und Bodenporen in die Atmosphäre über. Radon gast aber auch aus Quell- und Oberflächenwässern in die umgebende Luft aus [3], [4].

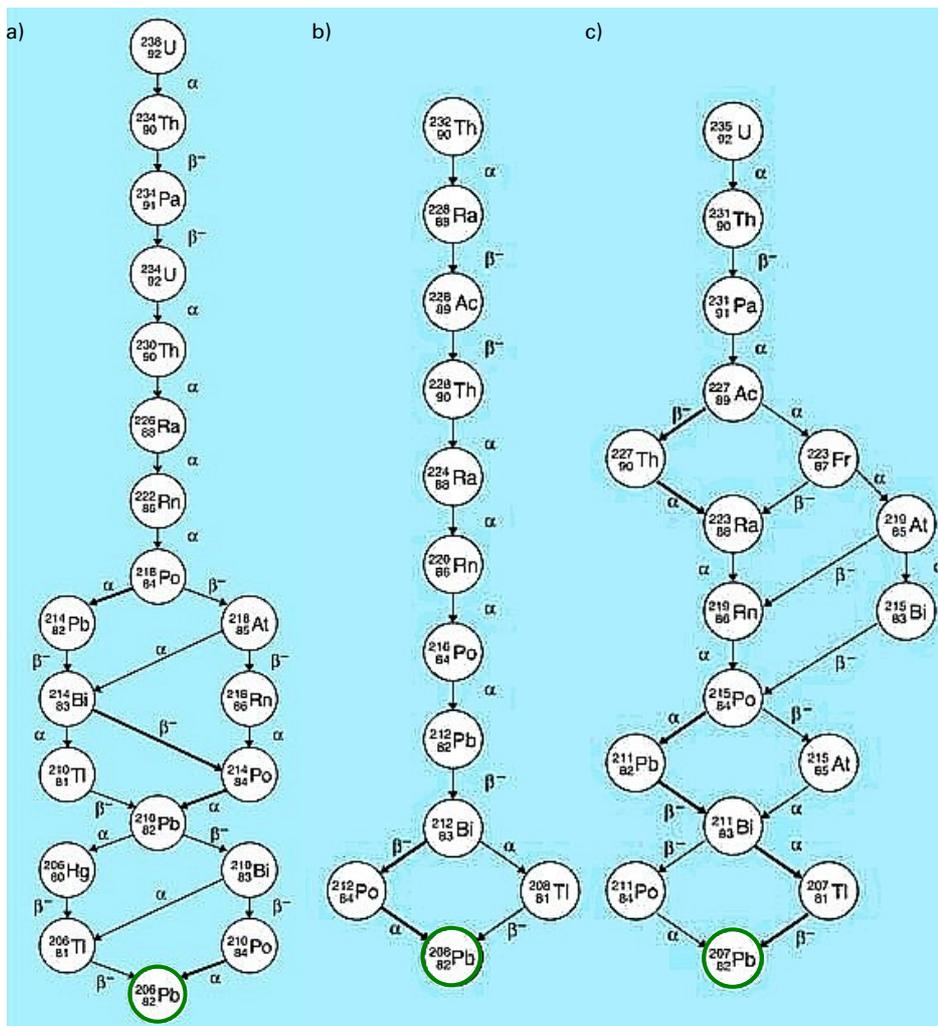


Abb. 1: Die radioaktiven Zerfallsreihen; a) Uran-Radium-Zerfallsreihe, b) die Thorium-Zerfallsreihe, c) Uran-Actinium-Zerfallsreihe; grün markiert sind die stabilen Endglieder der Zerfallsreihen [5]

Radon-222 zerfällt in seine kurzlebigen Folgeprodukte (Polonium-218, Blei-214, Wismut-214 und Polonium-214), die sich an Luftpartikel anlagern können. Diese werden vom Menschen mit der Luft eingeatmet und erreichen die tieferen Lungenregionen, wo sie abgelagert werden und erneut zerfallen. Dadurch kann es zu Schädigungen im Lungengewebe kommen, die im ungünstigsten Fall zu Lungenkrebs führen können.

Laut [3] zeigte sich, dass in Deutschland 89 % der Lungenkrebsfälle bei Männern durch Rauchen bedingt sind. Durch einen Vergleich der Dosimetrie von Radon in Bergwerken und Wohnungen ergibt sich für Westdeutschland, dass rechnerisch etwa 7 % der Lungenkrebstoten auf Radon zurückzuführen sind.

Die Höhe der Radon-Aktivitätskonzentrationen und seiner Zerfallsprodukte ist abhängig von folgenden Kriterien [3]:

- Gehalt und Verteilung der Mutternuklide (Uran-238, Thorium-232 und Uran-235) im Ausgangsmaterial,
- Transport- und Freisetzungsprozesse von Radon innerhalb der Gesteine und Böden (Emanation, Migration),
- Transport-, Dispersions- und Abscheidungsprozesse in der Atmosphäre.

Einen zusätzlichen Einfluss auf die Radonkonzentration der Luft hat die Durchlässigkeit des Ausgangsmaterials infolge von Stör-, Verwerfungs- und Bruchzonen. Entlang dieser Zonen kann Radon aus tieferen Gesteinsschichten an die Oberfläche gelangen. Dabei bildet das aus dem Gesteinsuntergrund freigesetzte Radon den Hauptteil des Radons in der Atmosphäre [3, 4].

Die Radonkonzentration in der Raumluft von Gebäuden trägt besonders zur Strahlenexposition der Bevölkerung bei [4]. Die Radonkonzentration kann sich aufgrund von nachfolgenden Ursachen anreichern [3], [4]:

- geologische und geophysikalische Bedingungen, die eine Freisetzung und den Gehalt der Bodenluft an Radon bestimmen (Radiumgehalt im Gestein, Porosität, Dichte, Feuchtigkeit und Permeabilität des Ausgangsmaterials),
- Art und Zustand der Gebäudeabdichtung gegenüber dem Untergrund (Risse, Fugen, Abwasser- und Entlüftungsrohre, Rohr- und Kabeldurchführungen),
- durch Temperatur, Druck und Windverhältnisse beeinflusste Gradienten zwischen Untergrund und Gebäudeinnerem,
- Ausgasung von Radon aus Baumaterialien (Radiumgehalt, Porosität, Beschaffenheit und Abdichtung des Baumaterials),
- Freisetzung aus radon- und/oder radiumhaltigem Trink- und Brauchwasser.

In den Rohwässern von Anlagen der Wassergewinnung und -aufbereitung ist Radon-222 ebenfalls in unterschiedlichen Konzentrationen gelöst. Dabei kann Radongas aus exponierten Wasseroberflächen (z.B. Trinkwasserbehälter, Filterbecken, Aufbereitungsanlagen u.ä.) in die Raumluft übertreten und sich in der Anlage verteilen.

Noch vor der Novelle der Strahlenschutzverordnung im Juli 2001 hat das damalige Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) in einer umfassenden Untersuchung die Radonbelastung der Beschäftigten bei etwa 550 Wasserversorgungsunternehmen in Bayern ermittelt und den Radon-gehalt in der Raumluft der Wassergewinnungsanlagen gemessen [6]. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die dort Beschäftigten zu den am höchsten strahlenexponierten Berufsgruppen zählen. Vor allem im ostbayerischen Raum, insbesondere im Fichtelgebirge, enthält das Grundwasser erhöhte Radonkonzentrationen. In diesem Gebiet sind deshalb wesentlich häufiger Personen einer erhöhten Radonexposition durch ihre Arbeiten in den Wassergewinnungsanlagen ausgesetzt als im restlichen Bayern. Die Untersuchung [6] ergab, dass dort etwa 10 % aller untersuchten Wasserwerke eine effektive Dosis von mehr als 6 mSv/a entsprechend 2 MBq·h/m<sup>3</sup> und 3 % von mehr als 20 mSv/a entsprechend 6 MBq·h/m<sup>3</sup> im Jahr erhalten. Insgesamt lag die Jahresexposition von 62 Wasserwerken über dem Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> und von 26 sogar über dem Grenzwert von 6 MBq·h/m<sup>3</sup>.

Für den Vollzug der novellierten Strahlenschutzverordnung hat das damalige Bayerische Landesamt für Umweltschutz daher Ende 2001 alle 2.600 Wasserversorgungsanlagen in Bayern aufgefordert, Radonmessungen durchzuführen und die Ergebnisse dieser Messungen dem LfU mitzuteilen. Das entsprechende Forschungsvorhaben wurde im Oktober 2004 abgeschlossen [7]. Für 43 Wasserversorgungsunternehmen (1,8 %) ergeben sich Radonexpositionen über dem Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup>. Diese sind deshalb in der ständigen Überwachung und müssen vierteljährlich die Radonexposition abschätzen. 20 Wasserversorgungsunternehmen (0,8 %) liegen sogar über dem Grenzwert von 6 MBq·h/m<sup>3</sup> und müssen Sanierungsmaßnahmen durchführen. Unterhalb des Eingreifwertes von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> liegen 87,2 %.

In Hessen [8], Nordrhein-Westfalen [9], Rheinland-Pfalz [10] und Sachsen [11] wurden ebenfalls Radonabschätzungen an Arbeitsplätzen in Wasserversorgungsanlagen durchgeführt.

Hingmann & Ehret [8] haben 2003 in hessischen Wasserwerken umfangreiche Messungen zur Abschätzung der Radonproblematik vorgenommen. Sie haben in 182 Anlagen verschiedenen Typs 236 Messungen der Radonkonzentration in Luft durchgeführt. Dabei ermittelten sie Radonkonzentrationen von 118 bis 41.200 Bq/m<sup>3</sup> in verschiedenen Anlagentypen. Durch das Öffnen der Tür während der Begehung der Hochbehälter kam es zu Einbrüchen der Radonkonzentration. Dagegen bewirkte die Rückspülung der Filter der Aufbereitungsanlage einen sprunghaften Anstieg der Radonkonzentration. Außerdem ermittelten sie die Radon-Konzentration in Rohwasser von 255 Brunnen und Quellen. Diese liegt zwischen 0,5 und 221 Bq/l. Die Radon-Konzentration in 182 Reinwasserproben liegt zwischen 0,6 und 69,8 Bq/l. Darüberhinaus schätzten sie die jährliche Radonexposition von 207 Beschäftigten ab. Die durchschnittliche Radonexposition liegt bei 0,6 MBq·h/m<sup>3</sup>. Es kam in keinem Fall zu einer Überschreitung des Eingreifwertes von 2 MBq·h/m<sup>3</sup>. Eine Überschreitung dieses Eingreifwertes ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,7 % möglich.

Das Staatliche Amt für Arbeitsschutz in Nordrhein-Westfalen hat 2004 [9] 99 Betreiber von Wasserversorgungsanlagen, darunter auch eine Brauerei, über die durchzuführende Abschätzung der Radonexposition in ihren Anlagen informiert. Von diesen haben 31 Betreiber geantwortet und eine Abschätzung vorgenommen. Die Radonkonzentration in verschiedenen Anlagenteilen liegt zwischen 10 bis 40.000 Bq/m<sup>3</sup>. Die Aufenthaltszeit der Beschäftigten an den Messorten bewegt sich zwischen 10 und 200 h/a. Von den insgesamt 99 Betreibern können bei vier Betreibern Beschäftigte eine effektive Dosis von über 2 MBq·h/m<sup>3</sup> erhalten.

Das Land Rheinland-Pfalz [10] hat Radon in 1.012 von 1.354 Wasserwerken gemessen. Es ergab sich folgende Zusammensetzung der Radonexpositionen: 76 % bis 0,34 MBq·h/m<sup>3</sup>, 22 % bis 2 MBq·h/m<sup>3</sup>, 2 % bis 6 MBq·h/m<sup>3</sup> und 0,42 % über 6 MBq·h/m<sup>3</sup>. Einige Wasserwerke mussten deshalb Sanierungsmaßnahmen ausführen.

Im Jahr 2003 ließ das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie [11] Untersuchungen an radonexponierten Arbeitsplätzen in sächsischen Wasserversorgungsunternehmen (WVU) durchführen. Unter der unrealistischen Annahme eines ganztägigen Aufenthaltes an einem Betriebspunkt innerhalb des Wasserversorgungsunternehmens haben sie Radonkonzentrationen von etwa 1 kBq/m<sup>3</sup> in der Raumluft abgeschätzt. Da die Aufenthaltsdauer i.d.R. jedoch deutlich geringer ist, liegt in den untersuchten Wasserversorgungsanlagen Sachsens keine anzeigepflichtige Exposition vor.

Desweiteren hat Sachsen 1998 [12] im Rahmen eines Forschungsvorhabens die Strahlenexposition an Arbeitsplätzen in sächsischen Brauereien, Mineralwasserherstellern und weiteren wasserverarbeitenden Betrieben ermittelt. Die Radon-Konzentrationen im Rohwasser liegen im Bereich von 1 bis 100 Bq/l. Die mittleren Radon-Konzentrationen in der Raumluft an relevanten Arbeitsplätzen liegen im Bereich von < 50 bis ca. 450 Bq/m<sup>3</sup>.

Seit August 2002 läuft im LfU eine weitere Studie mit dem Titel „Ermittlung von Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch natürliche Radioisotope und überwachungsbedürftigen Rückständen“. Neben den in Anlage XI, Teil A StrISchV [1] genannten Arbeitsfeldern sind noch weitere denkbar, bei denen Beschäftigte ebenfalls einer erhöhten Radonexposition ausgesetzt sein können. Dazu zählen

- Brauereien mit eigener Wasserversorgung und untertägigen Lagerkellern,
- Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung,
- Molkereien mit eigener Wasserversorgung,
- untertägige Pilzzuchtbetriebe,
- Tunnelbauten für Autobahnen und Schienenverkehrsmittel (Nahverkehrs- und überregionale Züge).

Im Rahmen dieses Projektes sollte z.B. die zeitliche Schwankung der Radonexposition der Beschäftigten bestimmt, die Erhebung der Exposition von Arbeitern von externen Firmen durchgeführt und der Erfolg bei Reduktionsmaßnahmen überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Studie zur Radon-Abschätzung gemäß § 93 - 96 und Anlage XI, Teil A, Nr. 3 StrlSchV [1] werden im folgenden präsentiert.

### **2.1.2 Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung**

Im Rahmen dieser Studie ermittelten wir bayernweit sämtliche Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien. Mit Hilfe einer Fragebogenaktion (Fragebogen in Anlage B.1.1) haben wir diese Betriebe gebeten, dem LfU alle Anlagenbereiche zur Wassergewinnung, -aufbereitung und -speicherung und die Arbeitszeiten der Beschäftigten in diesen Bereichen mitzuteilen.

Wir haben das Forschungsvorhaben bei den folgenden Verbänden angekündigt und den Fragebogen und das dazugehörige Anschreiben mit ihnen abgestimmt.

Bei den Verbänden der drei Getränkeherstellenden Sparten handelt es sich um:

1. Verband Deutscher Mineralbrunnen (VDM)  
Herr Dr. Dopychai  
Kennedyallee 28  
53175 Bonn
2. Landesvereinigung der Bayerischen Milchwirtschaft e.V.  
Herr Wilnhammer  
Kaiser-Ludwig-Platz 2  
80336 München
3. Bayerischer Brauerbund e.V.  
Herr Zacharias  
Oskar-von-Miller-Ring 1  
80333 München
4. Verband mittelständischer Privatbrauereien in Bayern e.V.  
Herr Dr. Gloßner, Herr Scheffold  
Thomas-Wimmer-Ring 9  
80539 München

Insgesamt haben wir an 730 Brauereien, 38 Mineralwasserhersteller und 97 Molkereien in Bayern inhaltlich vergleichbare Fragebögen verschickt.

In Tab. 1 sind die aktuellen Zahlen für Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien in Bayern aufgelistet.

Tab. 1: Aktuelle Zahlen zu Brauereien, Mineralwasserherstellern und Molkereien

ART DES UNTERNEHMENS	ANZAHL
Brauereien	
angeschrieben	730
in Betrieb	614
geschlossen	116
Mineralwasserhersteller	
angeschrieben	38
in Betrieb	37
geschlossen	1
Molkereien	
angeschrieben	97
in Betrieb	94
geschlossen	3

Im Rahmen des Untersuchungsvorhabens „Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern“ [6] erfolgte eine Einteilung Bayerns in 10 geologische Regionen, um Bereiche mit ähnlicher geologischer Struktur und damit vergleichbarem Radonpotenzial zusammenzufassen. Dieses Prinzip haben wir auch auf dieses Forschungsvorhaben angewendet und alle Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien den entsprechenden Regionen zugeteilt.

Dazu haben wir jede Brauerei, Molkerei und jeder Mineralwasserhersteller mit einer sogenannten REX.-Nr. (**R**adon-**E**xponierte Arbeitsplätze) versehen, um die Anonymität der einzelnen Betriebe zu gewährleisten. Die erste Ziffer der fünfstelligen REX.-Nr. repräsentiert die Nummer der geologischen Region. Die einzige Ausnahme stellt die Region 10 dar, die durch die ersten beiden Ziffern 19 repräsentiert wird.

In Abb. 2 ist diese Einteilung dargestellt. In Tab. 2 sind die geologischen Strukturen der einzelnen Regionen und in Tab. 3 die Anzahl der Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien in den einzelnen Regionen aufgelistet.

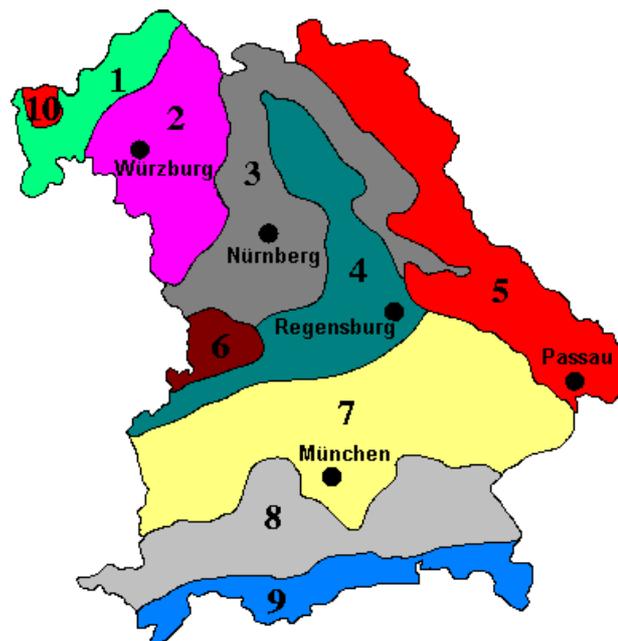


Abb. 2: Die zehn Regionen Bayerns mit ähnlicher geologischer Struktur [6]

Tab. 2: Die geologische Struktur der zehn Regionen mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern [6]

REGION	GEBIETE	GEOLOGIE
1	Spessart	Buntsandstein
2	Würzburger Main Gebiet	Muschelkalk, Unterer Keuper
3	Steigerwald	Fränkischer Keuper
4	Fränkische Alb	Malm, Dogger, Oberkreide
5	Bayerische Wälderregion	Granite, Gneise
6	Nördlinger Ries	Auswurfmassen des Ries-Meteoriten
7	Bayerisches Sedimentgebiet	Sedimentgesteine, Molassen
8	Bayerisches Voralpenland	Jungmoränen
9	Nördlicher Alpenrand	Trias, Alttertiär, Jura
10	Aschaffenburg	Granite, Gneise

Tab. 3: Anzahl der untersuchten Betriebe (ohne die geschlossenen) in den zehn Regionen mit ähnlichem Radonpotenzial

Region	Anzahl Brauereien	Anzahl Mineralwasserhersteller	Anzahl Molkereien
1	14	3	2
2	45	5	6
3	188	2	8
4	101	4	8
5	75	4	3
6	3	1	2
7	123	11	26
8	54	6	37
9	8	0	2
10	3	1	0

### 2.1.2.1 Brauereien

Von den 614 noch in Betrieb befindlichen Brauereien haben 394 keine eigene Wasserversorgung, sondern beziehen ihr Brauwasser aus dem Gemeinde- oder Stadtnetz.

Von den restlichen 220 Brauereien haben 208 Brauereien eine eigene Wasserversorgung. Davon haben 164 Brauereien die Erhebung der Radonexposition durchgeführt, bei 13 Brauereien sind die Messungen in Arbeit (Stand: Ende 2004) und zwei haben unseren Fragebogen zurückgeschickt, aber noch keine Messung veranlasst. 24 Brauereien haben eine eigene Wasserversorgung, aber keine Anlagen zur Wasseraufbereitung oder -speicherung und keine begehbaren Brunnenstuben. Zudem verwenden sie ihr Brunnenwasser ausschließlich zu Kühlzwecken in einem geschlossenen Kreislauf. Fünf Brauereien haben kein Personal, welches in den o.g. Bereichen tätig sind. Diese 29 Brauereien mussten keine Radonabschätzung durchführen. Von 12 Brauereien gab es keine Rückmeldung auf unseren Fragebogen.

In den folgenden Tab. 4, 5 und 6 werden die Ergebnisse der Fragebogenaktion dargestellt.

Tab. 4: Ergebnisse der Fragebogenaktion bei Brauereien, Stand: Ende 2004

	ANZAHL	PROZENT [%]
Anzahl der angeschriebenen Brauereien	730	100
keine eigene Wasserversorgung	394	54,0
eigene Wasserversorgung	208	28,5
Radon gemessen	164	
Messung ist in Arbeit	13	
Fragebogen zurückgeschickt, aber keine Messung veranlasst	2	
Keine Anlagen, kein Personal	29	
keine Rückmeldung auf Fragebogen	12	1,6
geschlossen	116	15,9

Tab. 5: Brauereien mit eigener Wasserversorgung

	ANZAHL	PROZENT [%]
Anzahl der Brauereien mit eigener Wasserversorgung	208	100
Wasseraufbereitung	133	63,9
offene Wasseraufbereitung	26	12,5
Wasserbehälter	161	77,4
offene Wasserbehälter	26	12,5
Gewölbe (Lagerkeller, Gärkeller o.ä.)	75	36,1
eigene Kläranlage	9	4,3

Tab. 6: Arten der Wasseraufbereitung

ART DER WASSERAUFBEREITUNG	ANZAHL
Enteisenung/Kies-, Aktivkohle- und Mehrschichtfilter	73
Enthärtung	26
UV-Bestrahlung	7
Ionenaustauscher	25
Osmose	10
Chlorierung/Dechlorierung	5

In Abb. 3 ist das Schema einer Brauerei dargestellt. In den Bereichen 2 und 4 wird das Wasser zum Kochen gebracht und somit das vorhandene Radon ausgetrieben. Im weiteren Brauprozess ist kein Radon mehr im Bier enthalten.

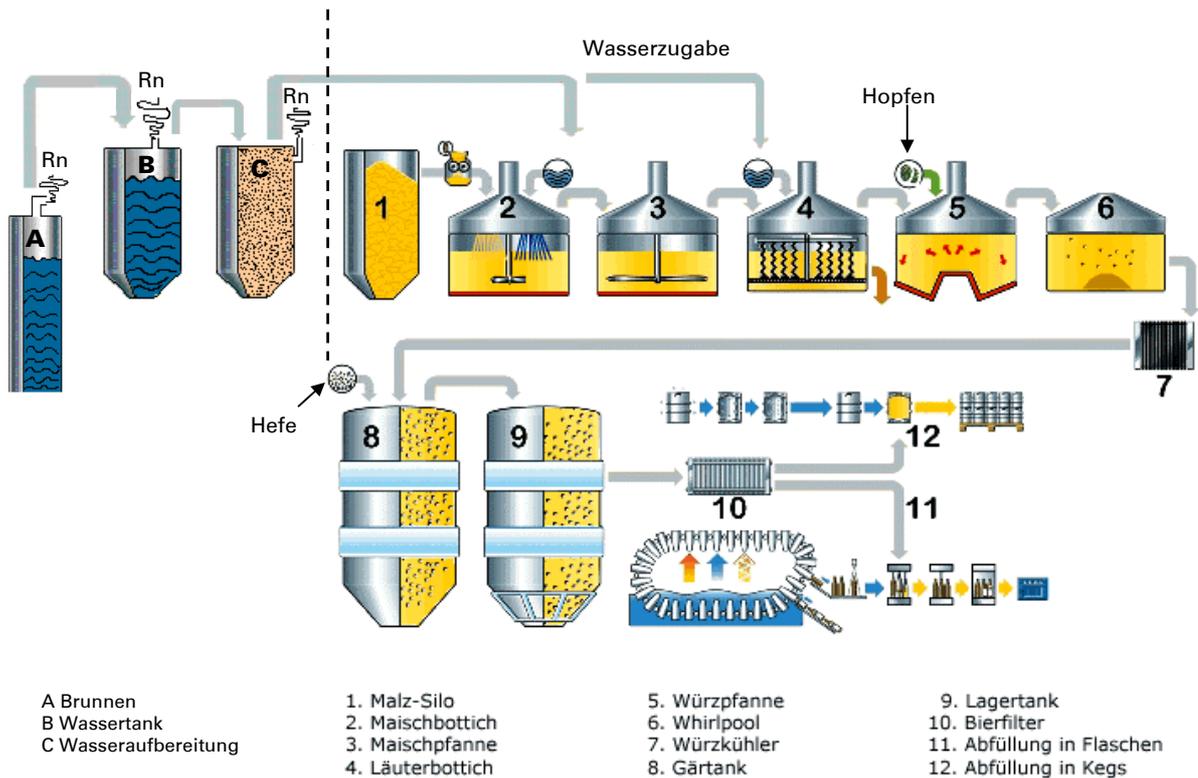


Abb. 3: Schematischer Aufbau einer Brauerei, nach [13]; links der gestrichelten Linie befinden sich die Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung, aus denen Radon (Rn) entweichen kann

Die durchgeführten Radonabschätzungen in den Brauereien führten zu folgenden Ergebnissen.

In Tab. 7 wird die Bandbreite der Radonkonzentration, Aufenthaltszeit und Radonexposition für die verschiedenen untersuchten Messorte aller Brauereien in Bayern, die sich aus den Fragebögen ergeben haben, zusammengestellt.

Tab. 7: Bandbreite der Messergebnisse der Radonabschätzung an verschiedenen Messorten aller Brauereien mit eigener Wasserversorgung in Bayern

MESSORT	RADONKONZENTRATION [Bq/m <sup>3</sup> ]	AUFENTHALTSZEIT [h/a]	RADONEXPOSITION [MBq·h/m <sup>3</sup> ]	ANZAHL DER BRAUEREIEN
Brunnenstuben	< 130 bis 12.000	0,1 bis 600	< 0,01 bis 0,31	57
Wasseraufbereitung	57 bis 58.000	1,8 bis 1.100	< 0,01 bis 0,17	84
Wassertanks	< 63 bis 23.000	1 bis 800	< 0,01 bis 0,39	63
Flaschenfüllerei	86 bis 3.400	10 bis 2.400	< 0,01 bis 1,41	107
Gewölbe*	< 59 bis 3.400	4 bis 2.000	< 0,01 bis 1,70	57

\* bei Gewölben stammt das Radon nicht aus den Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung, sondern aus dem Gewölbegestein

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Radonabschätzung (Summe aller Expositionen) der bayerischen Brauereien in den verschiedenen geologischen Regionen graphisch dargestellt. Die meisten Brauereien in allen Gebieten zeigen Radonexpositionen von < 0,3 bis 1,0 MBq·h/m<sup>3</sup>. Im Gebiet 6 befindet sich keine Brauerei mit eigener Wasserversorgung. In den Gebieten 5, 7 und 8 befinden sich drei Brauereien mit Radonexpositionen im Bereich von 1,0 bis 1,5 MBq·h/m<sup>3</sup>. In zwei Brauereien im

Gebiet 5 und 8 finden sich Radonexpositionen im Bereich von 1,5 bis 2,0 MBq·h/m<sup>3</sup>. Doch handelt es sich bei den Messorten nicht um Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung, sondern um Lager- bzw. Gärkeller (Gewölbe aus dem vorigen Jahrhundert). Das Radon stammt deshalb nicht aus dem Wasser, welches die Brauereien fördern und zum Brauen verwenden, sondern aus dem umgebenden Gestein und dem Boden.

In Tab. 8 und Abb. 5 sind zusammenfassend die Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Brauereien ohne Regionalbezug dargestellt. Die Betriebe überschreiten weder den Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> noch den Grenzwert von 6 MBq·h/m<sup>3</sup>.

82,3 % der betroffenen Brauereien liegen unter 0,3 MBq·h/m<sup>3</sup>. Nur 1,2 % liegen zwischen 1,5 bis 2,0 MBq·h/m<sup>3</sup>. Dabei handelt es sich aber, wie oben ausgeführt, um Gär- und Lagerkeller, in denen gemessen wurde.

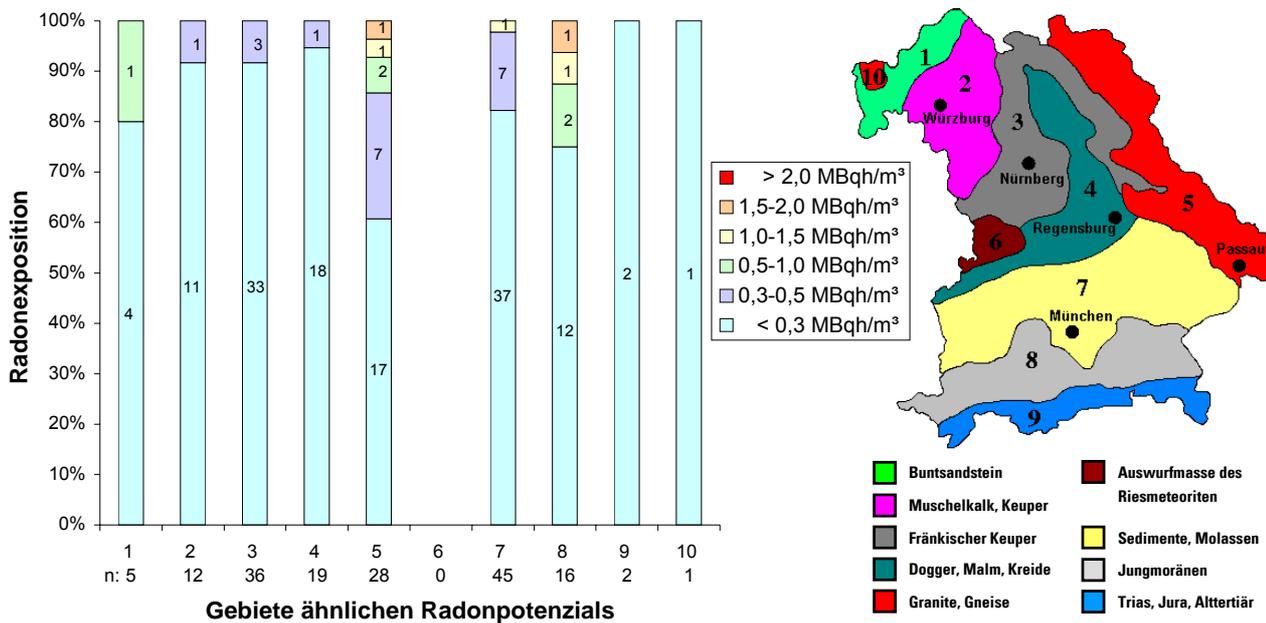


Abb. 4: Diagramm mit den Ergebnissen der Radonabschätzung in bayerischen Brauereien; n = Gesamtzahl der Brauereien in der entsprechenden Region; 1 bis 10 sind Gebiete mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern (siehe Bayernkarte rechts). Im Gebiet 6 befindet sich keine Brauerei mit eigener Wasserversorgung. 2 MBq·h/m<sup>3</sup> ist der Eingreifwert für die Radonexposition gemäß § 95 StrlSchV [1]; Zahlen in den Säulen = Anzahl der Brauereien in den einzelnen Dosisbereichen.

Tab. 8: Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Brauereien

RADONEXPOSITION	ANZAHL DER BRAUEREIEN	PROZENTSATZ DER BETROFFENEN BRAUEREIEN
	164	100
< 0,3 MBq·h/m <sup>3</sup>	135	82,3
0,3-0,5 MBq·h/m <sup>3</sup>	19	11,6
0,5-1,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	5	3,1
1,0-1,5 MBq·h/m <sup>3</sup>	3	1,8
1,5-2,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	2	1,2
> 2,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	0	0

### Radonexposition in Brauereien

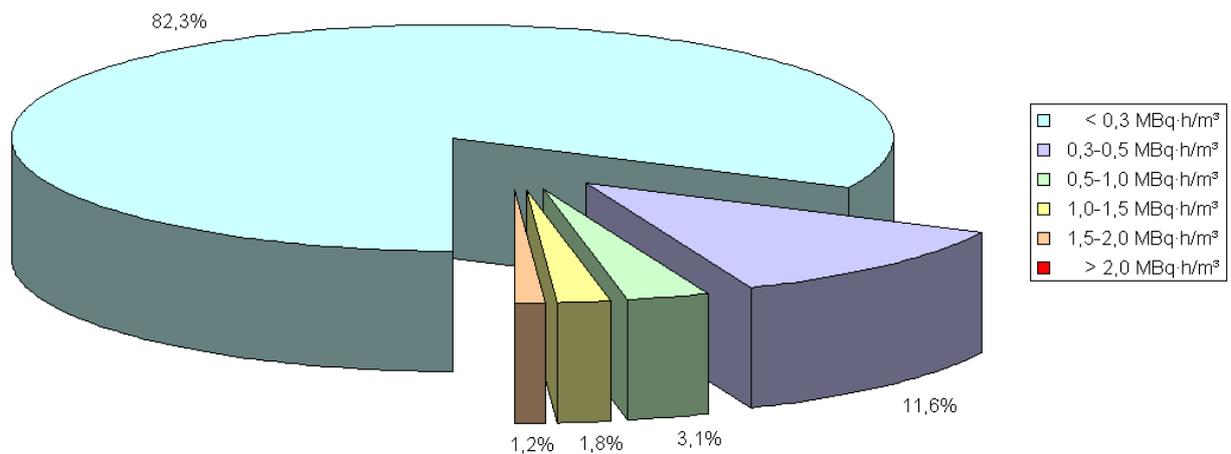


Abb. 5: Verteilung der Dosis in Brauereien; keine Brauerei mit einer Radonexposition > 2,0 MBq·h/m³

#### 2.1.2.2 Mineralwasserhersteller

Von den 37 in Betrieb befindlichen Mineralwasserherstellern (alle mit eigener Wasserversorgung) haben 32 die Erhebung der Radonexposition durchgeführt. Bei einem Mineralwasserhersteller ist die Messung in Arbeit. Zwei Mineralwasserhersteller gehören zu anderen Unternehmen bzw. bringen deren Produkte in Verkehr, einer hat keine Anlagen und einer fördert und füllt kein Mineralwasser mehr ab (in Tab. 9 zusammengefasst unter keine Anlagen).

In der folgenden Tab. 9 werden die Ergebnisse der Fragebogenaktion aufgeführt.

Tab. 9: Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung

	ANZAHL	PROZENT [%]
Anzahl der Mineralwasserhersteller	38	100
Radon gemessen	32	84,2
Wasseraufbereitung	28	
offene Wasseraufbereitung	3	
Enteisung/ Kies-, Aktivkohle- und Mehrschichtfilter	30	
Osmose	1	
Wasserbehälter	21	
offene Wasserbehälter	4	
in Arbeit	1	2,6
keine Anlagen	4	10,5
geschlossen	1	2,6

Dazu haben wir die Bandbreite der Radonkonzentration, Aufenthaltszeit und Radonexposition für die verschiedenen untersuchten Messorte, die sich bei der Fragebogenaktion als relevante radonbelastete Orte ergeben haben, in Tab. 10 zusammengestellt.

Tab. 10: Bandbreite der Messergebnisse der Radonabschätzung an verschiedenen Messorten aller Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung in Bayern

MESSORT	RADONKONZENTRATION [Bq/m³]	AUFENTHALTSZEIT [h/a]	RADONEXPOSITION [MBq·h/m³]	ANZAHL DER MINERALWASSERHERSTELLER
Brunnenstuben	77 bis 5.900	2 bis 400	< 0,01 bis 0,09	17
Wasseraufbereitung	9 bis 1.000	12 bis 1.000	< 0,01 bis 0,15	22
Wassertanks	39 bis 2.900	4 bis 700	< 0,01 bis < 0,10	9
Flaschenfüllerei	< 130 bis 200	480 bis 2.200	< 0,01 bis 0,37	22

In Abb. 6 sind die Ergebnisse der Radonabschätzung der bayerischen Mineralwasserhersteller in den verschiedenen Regionen graphisch dargestellt. Die meisten Mineralwasserhersteller haben Radonexpositionen von < 0,3 MBq·h/m³. Nur drei Mineralwasserhersteller haben Expositionen zwischen 0,5 bis 1,0 MBq·h/m³. Im Gebiet 9 befindet sich kein Mineralwasserhersteller.

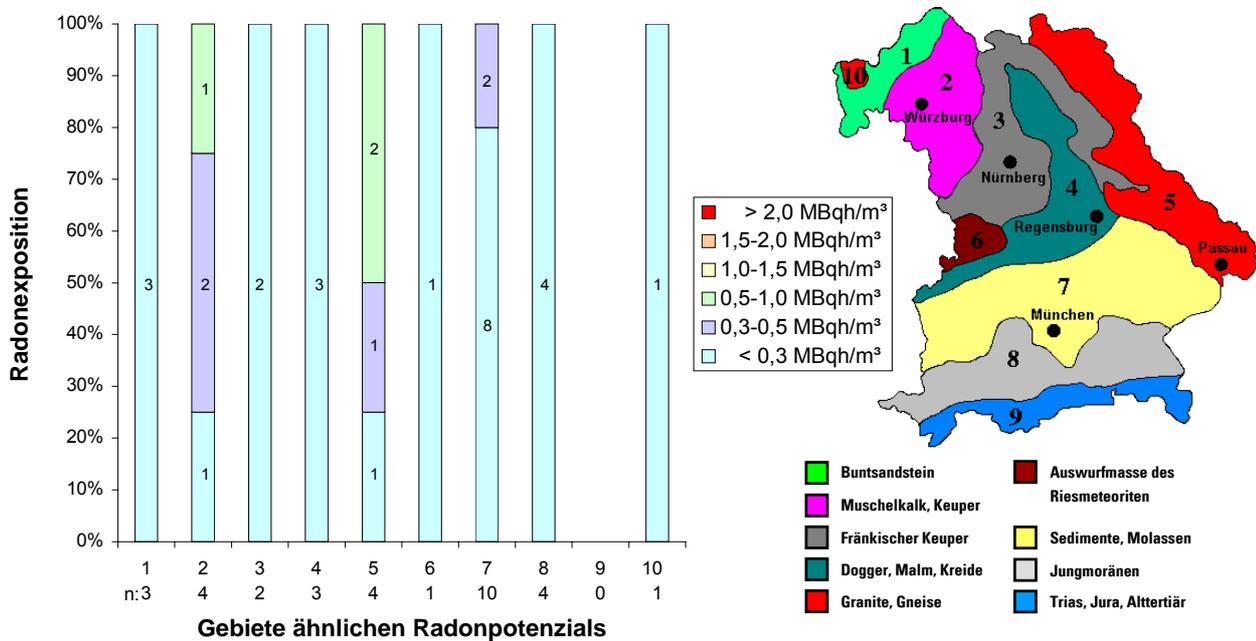


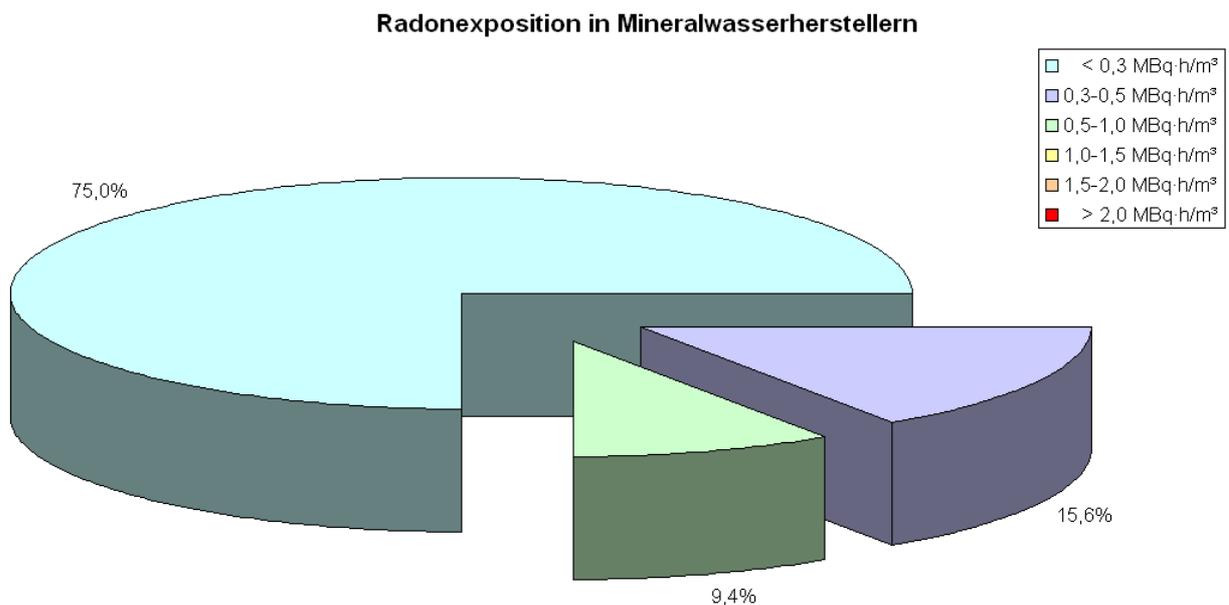
Abb. 6: Diagramm mit den Ergebnissen der Radonabschätzung in bayerischen Mineralwasserherstellern; n = Gesamtzahl der Brauereien in der entsprechenden Region; 1 bis 10 sind Gebiete mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern (siehe Bayernkarte rechts). Im Gebiet 9 befindet sich kein Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung. 2 MBq·h/m³ ist der Eingreifwert für die Radonexposition gemäß § 95 StrlSchV [1]; Zahlen in den Säulen = Anzahl der Mineralwasserhersteller in den einzelnen Dosisbereichen.

In Tab. 11 und Abb. 7 sind zusammenfassend die Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Mineralwasserherstellern ohne Regionalbezug dargestellt. Die betroffenen Betriebe überschreiten weder den Eingreifwert von 2 MBq·h/m³ noch den Grenzwert von 6 MBq·h/m³.

75 % der betroffenen Mineralwasserhersteller liegen unter 0,3 MBq·h/m³. Insgesamt liegen alle betroffenen Mineralwasserhersteller unter 1,0 MBq·h/m³.

Tab. 11: Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Mineralwasserherstellern

RADONEXPOSITION	ANZAHL DER MINERALWASSERHERSTELLER	PROZENTSATZ DER BETROFFENEN MINERALWASSERHERSTELLER
	32	100
< 0,3 MBq·h/m <sup>3</sup>	24	75
0,3-0,5 MBq·h/m <sup>3</sup>	5	15,6
0,5-1,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	3	9,4
1,0-1,5 MBq·h/m <sup>3</sup>	0	0
1,5-2,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	0	0
> 2,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	0	0

Abb. 7: Verteilung der Dosis in Mineralwasserhersteller; kein Mineralwasserhersteller mit einer Radonexposition > 1,0 MBq·h/m<sup>3</sup>

### 2.1.2.3 Molkereien

Von den 94 in Betrieb befindlichen Molkereien haben 56 keine eigene Wasserversorgung, sondern beziehen ihr Wasser aus dem Gemeinde- oder Stadtnetz.

Von den restlichen 38 Molkereien haben 29 die Erhebung der Radonexposition durchgeführt und eine Molkerei ist gerade damit beschäftigt. Fünf Molkereien haben eine eigene Wasserversorgung, aber keine Anlagen zur Wasseraufbereitung oder -speicherung und keine begehbaren Brunnenstuben. Zwei Molkereien haben kein Personal, welches in den o.g. Bereichen tätig ist. Eine Molkerei ist keine Produktionsstätte, sondern ein Großhandelsbetrieb. Bei diesen acht Molkereien war eine Radonabschätzung nicht notwendig.

Die folgenden Tab. 12, 13 und 14 zeigen die Ergebnisse der Fragebogenaktion.

Tab. 12: Ergebnisse der Fragebogenaktion bei Molkereien

	ANZAHL	PROZENT [%]
Anzahl der angeschriebenen Molkereien	97	100
keine eigene Wasserversorgung	56	57,7
eigene Wasserversorgung	38	39,2
Radon gemessen	29	
in Arbeit	1	
keine Anlagen, kein Personal	8	
geschlossen	3	3,1

Tab. 13: Molkereien mit eigener Wasserversorgung

	ANZAHL	PROZENT [%]
Anzahl der Molkereien mit eigener Wasserversorgung	38	100
Wasseraufbereitung	14	36,8
offene Wasseraufbereitung	3	7,9
Wasserbehälter	31	81,6
offene Wasserbehälter	2	5,3

Tab. 14: Arten der Wasseraufbereitung

ART DER WASSERAUFBEREITUNG	ANZAHL
Enteisenung/ Kies-, Aktivkohle- und Mehrschichtfilter	13
Enthärtung	1
UV-Bestrahlung	4
Ionenaustauscher	1
Osmose	1
Chlorierung/Dechlorierung	6

Dazu haben wir die Bandbreite der Radonkonzentration, Aufenthaltszeit und Radonexposition für die verschiedenen untersuchten Messorte, die sich bei der Fragebogenaktion als relevante radonbelastete Orte ergeben haben, in Tab. 15 zusammengestellt.

Tab. 15: Bandbreite der Messergebnisse der Radonabschätzung an verschiedenen Messorten aller Molkereien mit eigener Wasserversorgung in Bayern

MESSORT	RADONKONZENTRATION [Bq/m <sup>3</sup> ]	AUFENTHALTSZEIT [h/a]	RADONEXPOSITION [MBq·h/m <sup>3</sup> ]	ANZAHL DER MOLKEREIEN
Brunnenstuben	< 130 bis 9.600	1 bis 150	< 0,01 bis 0,15	24
Wasseraufbereitung	< 130 bis 2.000	3 bis 312	< 0,01 bis 0,53	7
Wassertanks	< 100 bis 15.000	5 bis 600	< 0,01 bis 0,19	9
Flaschenfüllerei	< 130 bis 270	270 bis 2.400	< 0,04 bis 0,47	7
Wasserbäder	< 130 bis 160	2 bis 1.800	< 0,01 bis < 0,23	3

In Abb. 8 sind die Ergebnisse der Radonabschätzung der bayerischen Molkereien in den verschiedenen geologischen Regionen graphisch dargestellt. In den Gebieten 1, 6, 9 und 10 befinden sich keine Molkereien mit eigener Wasserversorgung.

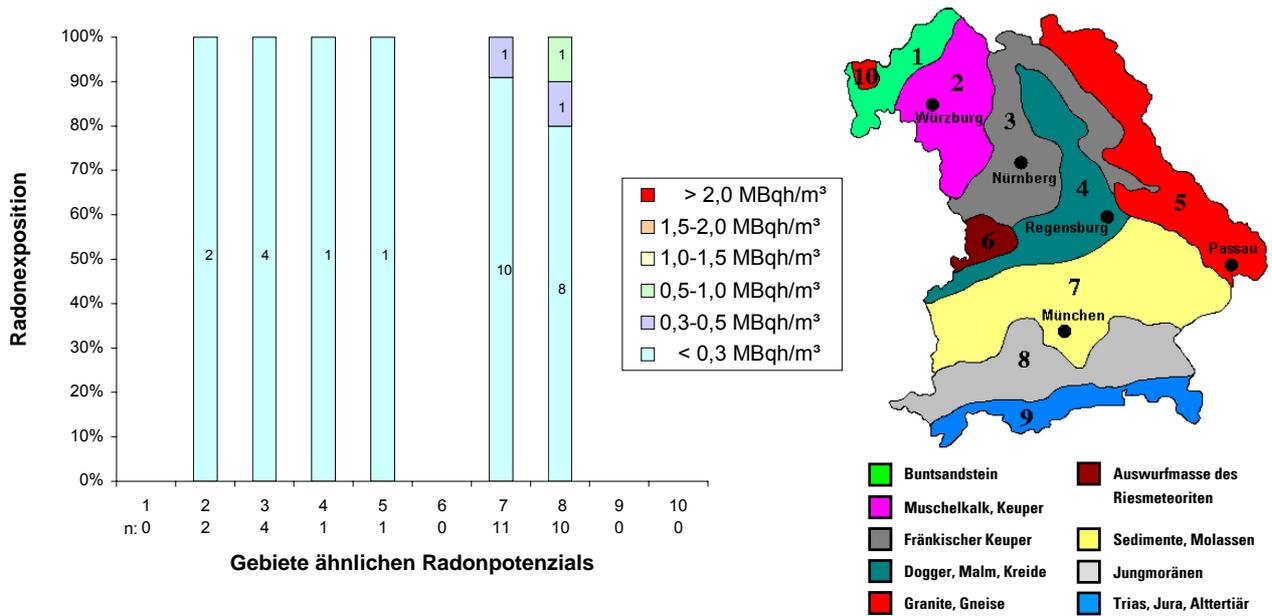


Abb. 8: Diagramm mit den Ergebnissen der Radonabschätzung in bayerischen Molkereien; n = Gesamtzahl der Brauereien in der entsprechenden Region; 1 bis 10 sind Gebiete mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern (siehe Bayernkarte rechts). In den Gebieten 1, 6, 9 und 10 befinden sich keine Molkereien mit eigener Wasserversorgung. 2 MBq·h/m³ ist der Eingreifwert für die Radonexposition gemäß § 95 StrlSchV [1]; Zahlen in den Säulen = Anzahl der Molkereien in den einzelnen Dosisbereichen.

In Tab. 16 und Abb. 9 sind zusammenfassend die Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Molkereien ohne Regionalbezug dargestellt. Die betroffenen Betriebe überschreiten weder den Eingreifwert von 2 MBq·h/m³ noch den Grenzwert von 6 MBq·h/m³. Die Tabelle bezieht sich nur auf die Molkereien, die bis November 2004 die Radonabschätzung durchgeführt haben.

Etwa 90 % der betroffenen Molkereien liegen unter 0,3 MBq·h/m³. Insgesamt liegen alle betroffenen Molkereien unter 1,0 MBq·h/m³.

Tab. 16: Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Molkereien

RADONEXPOSITION	ANZAHL DER MOLKEREIEN	PROZENTSATZ DER BETROFFENEN MOLKEREIEN
	29	100
< 0,3 MBq·h/m³	26	89,7
0,3-0,5 MBq·h/m³	2	6,9
0,5-1,0 MBq·h/m³	1	3,4
1,0-1,5 MBq·h/m³	0	0
1,5-2,0 MBq·h/m³	0	0
> 2,0 MBq·h/m³	0	0

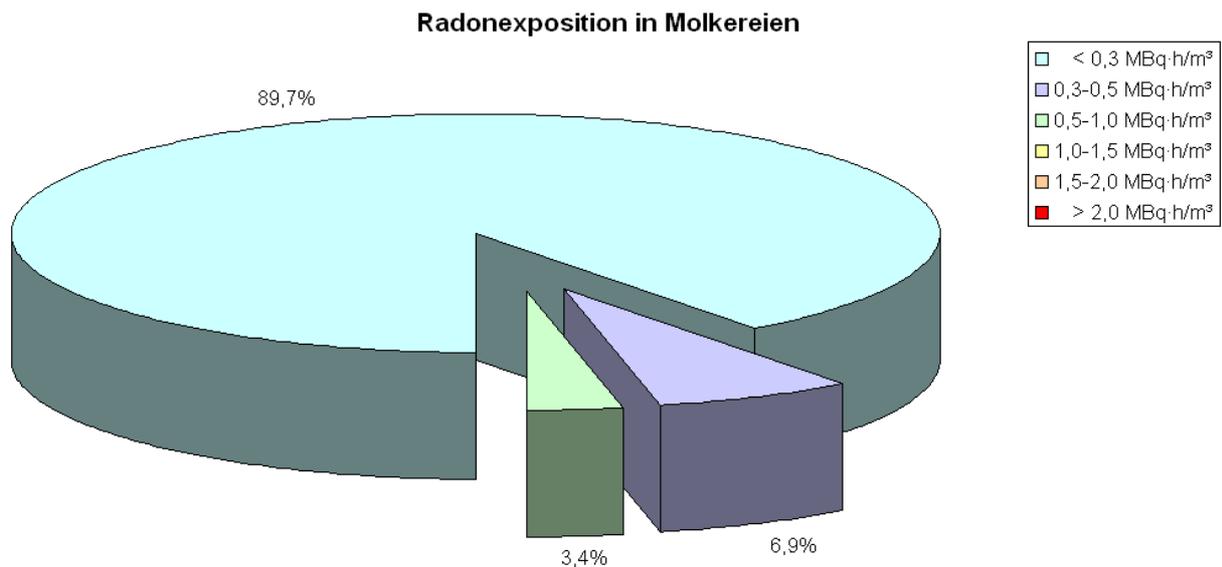


Abb. 9: Verteilung der Dosis in Molkereien; keine Molkerei mit einer Radonexposition > 1,0 MBq·h/m³

### 2.1.2.4 Weitere Arbeitsfelder mit Radon

#### 2.1.2.4.1 Pilzzuchtbetriebe

Da Pilze häufig in unterirdischen Gewölben gezüchtet werden, kann es dort zu erhöhten Radonkonzentrationen aus dem umgebenden Gestein kommen. Bei unseren Recherchen konnten wir etwa zehn „Pilzzuchtbetriebe“ ermitteln. Vier bis fünf haben oberirdische Hallen zur Zucht von Pilzen, bei mindestens fünf handelt es sich hauptsächlich um Konservenfabriken, die Pilze verpacken. Da keine Pilze in unterirdischen Gewölben gezüchtet werden, ist eine erhöhte Radonexposition für die Beschäftigten unwahrscheinlich.

#### 2.1.2.4.2 Tunnelbauten

Da Tunnelbauten durch verschiedene Gesteinsschichten mit unterschiedlicher Radioaktivität stattfinden, wollten wir auch hier eine mögliche Radonexposition für die Arbeiter näher untersuchen.

Für alle nachfolgend aufgeführten Tunnelbauten gilt, dass es sich bei den Gesteinsschichten in Oberbayern um quartäre eiszeitliche Schotter und tertiäre Süßwassermolasse (lockerer Sandstein) handelt, die nur eine geringe natürliche Radioaktivität aufweisen. Es findet deshalb nur eine geringe Entgasung von Radon aus diesen Gesteinsschichten statt.

Tunnelbauten unterschiedlicher Verwendungszwecke haben wir in Bayern nur die nachfolgenden ermitteln können.

Im Schienenverkehr baut die Bahn zur Zeit neun Tunnel auf der Neubaustrecke des ICE zwischen Ingolstadt und Nürnberg mit einer Gesamtlänge von 27 km, davon sechs im bergmännischen Vortrieb und drei in offener Bauweise (Baugruben von oben) mit Druckluft [14]. Beim bergmännischen Vortrieb verwendet die Bahn die sog. „Neue Österreichische Tunnelbauweise“ (NÖT) oder auch Spritzbeton-Bauweise, bei der über ein Gebläse in sog. Lutten (Schläuche von über 1 m Durchmesser) Frischluft direkt zum Bohrkopf hineingedrückt wird [15] (Abb. 10 und 11). Dadurch entsteht im Tunnel ein Überdruck, der die verbrauchte Luft und damit eventuell aus dem Gesteinsuntergrund angereichertes Radon hinausdrückt. Bei fertiggestellten Tunneln entsteht aufgrund von unterschiedlichen Höhen- und Druckverhältnissen auf beiden Seiten des Tunnels ein Kamineffekt mit Zugluft, wodurch die Luft im Tunnel ständig ausgetauscht und entgastes Radon nach draußen abgeführt wird.

Die Stadt München baut außerdem am Mittleren Ring Ost seit 2003 mit der Schlitzwand-Deckelbauweise (Abb. 12) den Tunnel am Effnerplatz (100 m) und der Richard-Strauss-Straße (1500 m) mit Seitentunnel Einsteinstraße (420 m). Ab 2007 beginnen die Bauarbeiten an der Garmischer Straße zum Tunnel unter dem Luise Kiesselbach Platz (1500 m) und an der Heckenstallerstraße (600 m) im Südwesten des Mittleren Rings [16].

Zudem baut die Stadt München seit einigen Jahren an folgenden U-Bahnstrecken: U1 Georg Brauchle-Ring - Olympia-Einkaufszentrum (Schlitzwand-Deckelbauweise; Abb. 12), U3 Olympia-zentrum - Olympia-Einkaufszentrum (Streckentunnel in bergmännischem Spritzbetonvortrieb; Abb. 10) und U6 Garching-Hochbrück - Garching-Forschungszentrum (größtenteils bergmännischer Spritzbetonvortrieb unter Druckluft, Rest in offener Bauweise). Im September 2004 hat der Bau der U-Bahnstrecke U3 Olympia-Einkaufszentrum - Moosach begonnen. Daneben wird ein zusätzlicher Fußgängertunnel an der U-Bahn-Haltestelle Marienplatz gebaut (Abb. 13) [17].

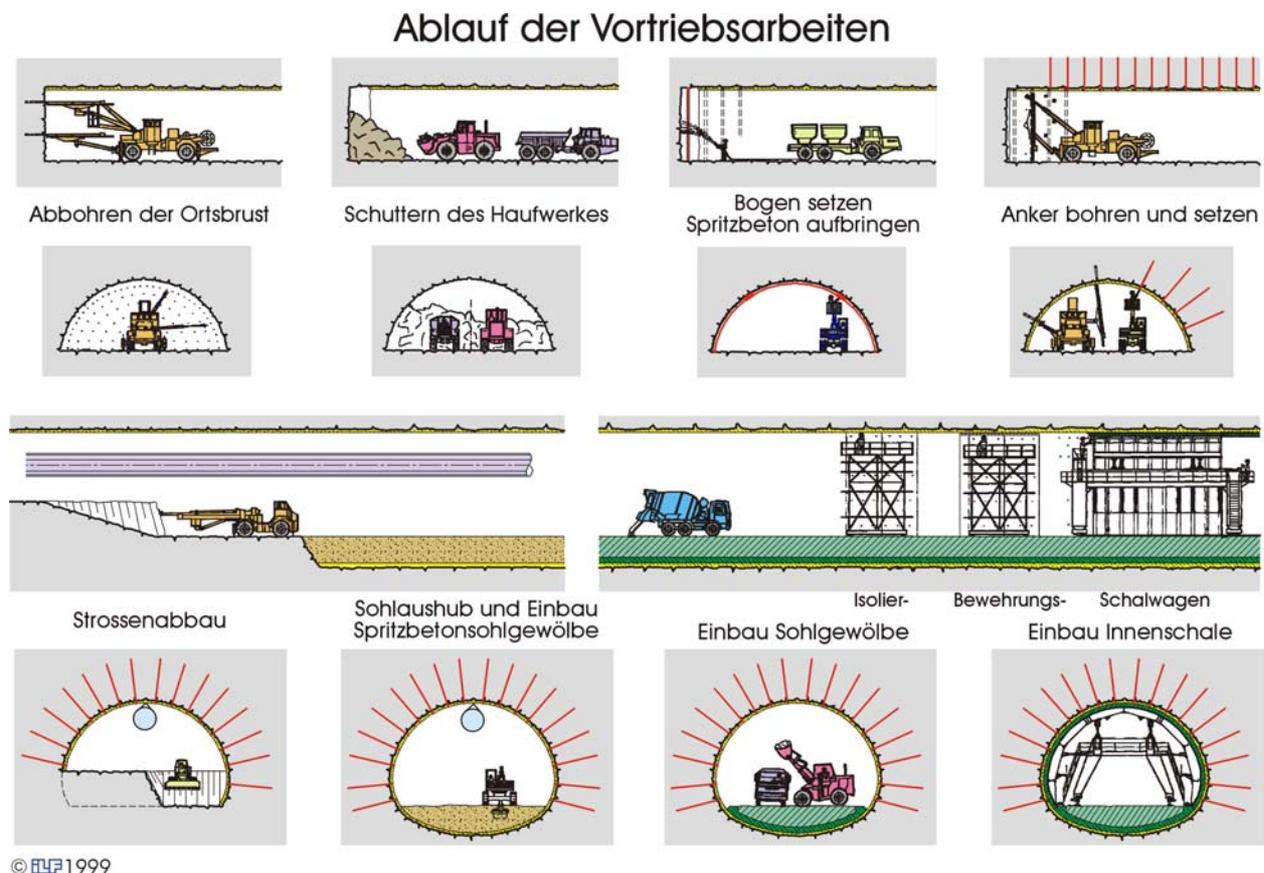
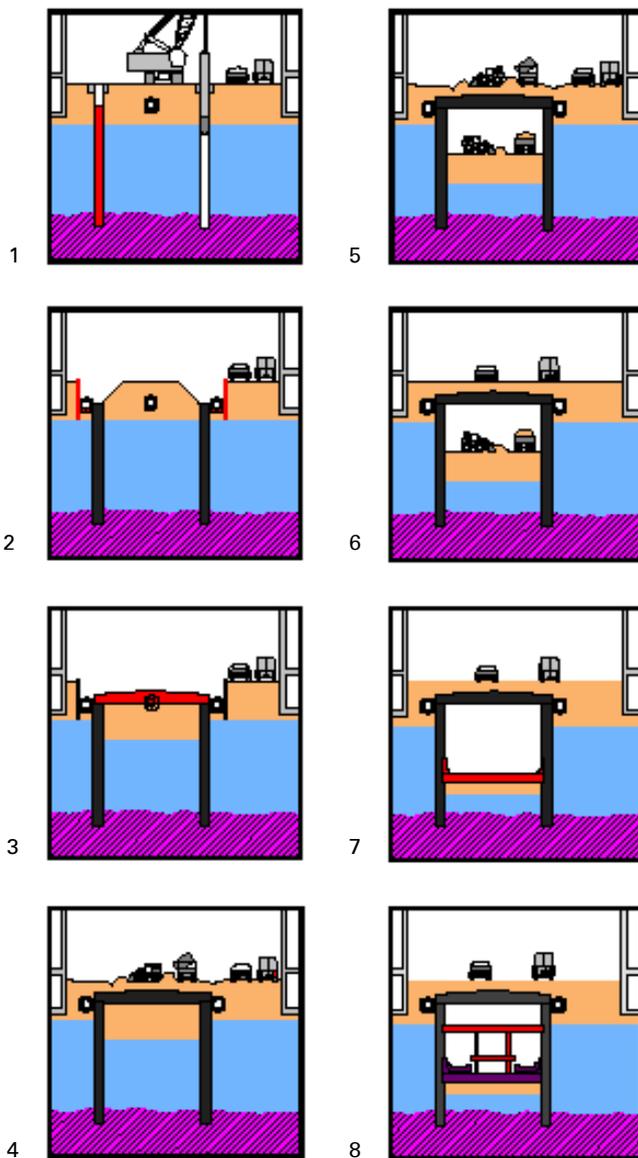


Abb. 10: Schema der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“ (NÖT) oder Spritzbeton-Bauweise; ein Gebläse drückt Frischluft in sog. Lutten (Schläuche) und damit in den Tunnel [15]



Abb. 11: Frischluftzufuhr bei der Spritzbeton-Bauweise [15]



- 1) Herstellung der Seitenwände (Schlitzwände oder Bohrpfalwände); sie reichen bis in eine wasserundurchlässige Mergelschicht
- 2) Bau zweier neuer Abwasserkanäle
- 3) Nach Abbruch des bestehenden Abwasserkanals in Straßenmitte: Betonieren des Deckels. Beginn mit dem Abpumpen des Grundwassers innerhalb der wasserdichten Umschließung
- 4) Überschütten des Deckels
- 5) Beginn mit dem Aushub unter dem Deckel
- 6) Wiederherstellung der Fahrbahnen an der Oberfläche. Gleichzeitig Fortsetzung des Aushubs unter dem Deckel
- 7) Betonieren der Sohle mit Auflagerbalken (zur Auftriebssicherung)
- 8) Restliche Einbauten (Bahnsteig, Zwischendecken, Betriebsräume usw.)

Abb. 12: Schlitzwand-Deckelbauweise [17]

Bei der Schlitzwand-Deckelbauweise kann das Radon aufgrund der offenen Bauweise (offen am Anfang und am Ende des Tunnels) direkt ins Freie entweichen. Beim bergmännischen Vortrieb wird in den Tunnelbaustellen über Ventilatoren durch Rohrleitungen Frischluft (2 Kubikmeter/min

pro Arbeiter bzw. bei Einsatz von Dieselaggregaten 4 Kubikmeter/min pro KW; Mindestgeschwindigkeit der Luft = 0,2 m/sec) eingeblasen, was zu einer Herabsetzung der Radonexposition führt. Zudem wird am Marienplatz der Boden bei minus 40 Grad Celsius vereist (Grundwasserschicht) [17], was dazu führt, dass kein Radon entgasen kann.

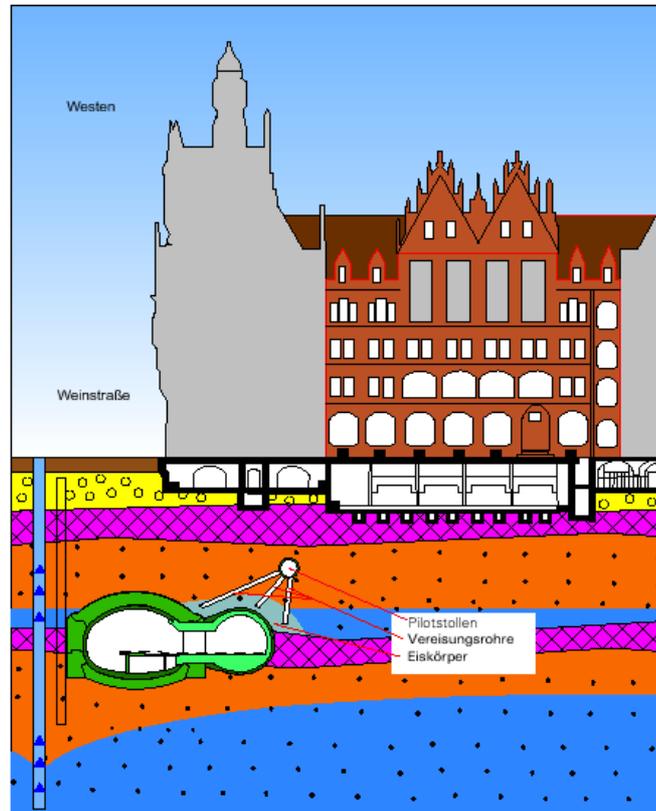


Abb. 13: Bau eines zusätzlichen Fußgängertunnels an der U-Bahn-Haltestelle Marienplatz [17]; dabei wird der Boden bei minus 40 Grad Celsius vereist.

#### 2.1.2.4.3 Papierherstellung

Bei der Papierherstellung wird unter anderem Wasser benötigt. Deshalb verwenden Papierhersteller sehr oft Eigenwasser, meistens Oberflächen- bzw. Flusswasser. Exemplarisch haben wir bei einem Papierhersteller eine Radonmessung durchgeführt. Wir haben Radon in der Raumluft nahe eines Brunnens, bei zwei Wasserbehältern, in der Holzschleiferei und beim Deculator (Entgasungssystem) gemessen. An allen Orten kann Radon aus Wasser entgasen, da dieses dort verwendet wird. Es ergaben sich Radonkonzentrationen zwischen  $67 \text{ Bq/m}^3$  (Deculator, Holzschleiferei) bis  $845 \text{ Bq/m}^3$  (Wasserbehälter). Bei einer Aufenthaltszeit von max. 15 Stunden pro Jahr an jedem Messort liegt die Radonexposition des Beschäftigten bei ca.  $0,03 \text{ MBq}\cdot\text{h/m}^3$  und unterschreitet deutlich den Eingreifwert von  $2 \text{ MBq}\cdot\text{h/m}^3$ . Da die meisten Papierhersteller Flusswasser bzw. Oberflächenwasser verwenden, welches nur sehr wenig Radon enthält, haben wir auf weitere Radonmessungen bei Papierherstellern verzichtet.

#### 2.1.2.5 Fazit

Im Vergleich zu den untersuchten Wasserversorgungsunternehmen [7], bei denen 41 Wasserwerke eine Radonexposition von mehr als  $2 \text{ MBq}\cdot\text{h/m}^3$  und 28 Wasserwerke von mehr als  $6 \text{ MBq}\cdot\text{h/m}^3$  im Jahr aufweisen, liegen alle Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien unter dem

Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup>. Trotz der z.T. sehr hohen Radonkonzentrationen in den Brunnenstuben, den Anlagen der Wasseraufbereitung und den Räumen mit Wassertanks wird der Eingreifwert dennoch nicht überschritten. Dies liegt vor allem daran, dass sich, im Gegensatz zu den Wasserwerken von Wasserversorgungsunternehmen, die Beschäftigten der Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien über das Jahr verteilt relativ wenig in den entsprechenden Anlagenbereichen aufhalten und deshalb die Radonexposition sehr niedrig bleibt.

Die sehr hohen Radonkonzentrationen in den o.g. Bereichen sind auf einige wenige Betriebe beschränkt (Tab. 17). Die meisten weisen niedrige Radonkonzentrationen, teilweise unter der Nachweisgrenze auf. Dies ist auf die größtenteils geschlossenen Systeme der entsprechenden Anlagen in den Betrieben zurückzuführen. In Tab. 17 haben wir die Radonkonzentration von 1.000 Bq/m<sup>3</sup> als Schwelle verwendet, unter der ein Beschäftigter auch bei einer Jahresarbeitszeit von 2.000 Stunden nicht den Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> überschreiten kann. Bei Radonkonzentrationen von größer 1.000 Bq/m<sup>3</sup> kann ein Beschäftigter mit einer Jahresarbeitszeit von 2.000 Stunden diesen Eingreifwert überschreiten. In den Brauereien, Mineralwasserherstellern und Molkereien ist dies aber nicht der Fall, da keiner der Beschäftigten sich 2.000 Stunden pro Jahr in den entsprechenden Bereichen aufhält.

Tab. 17: Anzahl der Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien mit Radonkonzentrationen > 1.000 Bq/m<sup>3</sup>, = 1.000 Bq/m<sup>3</sup> und < 1.000 Bq/m<sup>3</sup> an verschiedenen Messorten

MESSORT	ANZAHL								
	Brauereien			Mineralwasserhersteller			Molkereien		
	Radonkonzentration [Bq/m <sup>3</sup> ]								
	> 1.000	= 1.000	< 1.000	> 1.000	= 1.000	< 1.000	> 1.000	= 1.000	< 1.000
Brunnenstuben	19	0	38	3	0	14	11	0	13
Wasseraufbereitung	3	0	81	0	1	21	2	0	5
Wassertanks	11	0	52	3	0	6	1	0	8
Flaschenfüllerei	2	0	105	0	0	22	0	0	7
Gewölbe	6	1	50	—	—	—	—	—	—
Wasserbäder	—	—	—	—	—	—	0	0	3

Die Messungen der Radonexposition in Brauereien, Mineralwasserherstellern und Molkereien haben gezeigt, dass es in den betroffenen Betrieben zu keiner Überschreitung des Eingreifs- und des Grenzwertes der StrlSchV [1] kommt.

Der Leitfaden für die Umsetzung der Regelungen nach Teil 3 Kapitel 1 und 2 StrlSchV [47] schlägt für eine Wiederholung der Radonabschätzung einen Zeitraum von z. B. 5 Jahren vor. Aufgrund der gewonnenen Messergebnisse, die weder den Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> noch den Grenzwert von 6 MBq·h/m<sup>3</sup> überschreiten, halten wir eine Wiederholungsmessung der Radonexposition alle zehn Jahre für ausreichend. Bei Brauereien, Mineralwasserherstellern und Molkereien sind erneute Messungen nur notwendig, wenn bauliche Maßnahmen in den einzelnen Betrieben durchgeführt werden. Diese Messungen sind in eigener Verantwortung von den Betrieben durchzuführen und die Ergebnisse der zuständigen Behörde mitzuteilen (§ 95 Abs. 1 StrlSchV [1]).

Die zeitliche Schwankung der Radonexposition der Beschäftigten konnte aus den sehr niedrigen Radonexpositionen nicht bestimmt werden und ist unseres Erachtens auch nicht notwendig, da keine Überschreitung des Eingreif- und des Grenzwertes zu erwarten ist. Die Erhebung der Radonexposition von Arbeitern von externen Firmen ist nicht erforderlich, da nur bei einer Brauerei eine externe Firma die Behälterreinigung durchführt. Da diese Firma die Behälterreinigung auch bei sehr vielen Wasserversorgungsunternehmen vornimmt, wird die Radonexposition dieser Firma im

Rahmen des Projektes „Strahlenexposition durch natürliche Radioisotope aus gewerblichen Betrieben in Bayern“ abgeschätzt [7]. Eine Überprüfung des Erfolgs bei Reduktionsmaßnahmen muss nicht vorgenommen werden, da kein Betrieb solche Maßnahmen durchführen muss.

Eine Abschätzung der Radonexposition in Pilzzuchtbetrieben und Tunnelbauten erwies sich als nicht notwendig, da nur oberirdische Hallen bei der Pilzzucht verwendet werden und die angewandten Bauweisen beim Tunnelbau eine gute Frischluftzufuhr sicherstellen.

Aufgrund der geringen Aufenthaltszeit der Beschäftigten in Bereichen mit Eigenwasser ergab sich bei einem Papierhersteller für Radon keine Überschreitung des Eingreifwertes.

## **2.2 Arbeitsfelder mit erhöhten Expositionen durch Uran und Thorium und deren Zerfallsprodukte ohne Radon**

Auch Betriebe mit Beschäftigten in Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch Uran und Thorium (Anlage XI, Teil B der StrlSchV) müssen eine Abschätzung der Körperdosis gemäß § 95 StrlSchV durchführen [1]. Dabei gelten dieselben Grenzwerte für die Jahresexposition wie für Arbeitsfelder mit erhöhten Radon-222-Expositionen (Abschnitt 2.1), nämlich 6 mSv/a und 20 mSv/a. Zu diesen Arbeitsfeldern gehören:

1. Schleifen von und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden,
2. Handhabung und Lagerung thoriertes Gasglühstrümpfe,
3. Verwendung von Thorium oder Uran in der natürlichen Isotopenzusammensetzung oder in abgereicherter Form einschließlich der daraus jeweils hervorgehenden Tochternuklide, sofern vorhanden, zu chemischen-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken,
4. Handhabung, insbesondere Montage, Demontage, Bearbeiten und Untersuchen von Produkten aus thorierten Legierungen,
5. Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Pyrochlorerzen,
6. Verwendung und Verarbeitung von Schlacke aus der Verhüttung von Kupferschiefererzen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens haben wir die o.g. Arbeitsfelder näher untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen präsentieren wir in den folgenden drei Abschnitten.

### **2.2.1 Schleifen von und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden**

#### **2.2.1.1 Stand der Forschung**

Das Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG-Schweißen) ist durch den Gebrauch von Wolframelektroden, die mit Thoriumdioxid dotiert sind, gekennzeichnet (Abb. 14). Dadurch wird die Elektronenaustrittsarbeit des Wolframs reduziert (erhöhte Elektronenemission) und die Zündeigenschaften verbessert. Daneben weisen thorierte Wolframelektroden eine größere Lichtbogenstabilität, höhere Stromstabilität und eine längere Lebensdauer auf als reine Wolframelektroden [19]. Verwendung finden diese Elektroden beim Gleichstromschweißen von legierten Stählen und NE-Metallen, ebenso beim Wechselstromschweißen von Aluminium und seinen Legierungen. Aufgrund dieser Schweißereigenschaften beträgt der Anteil an thorierten Wolframelektroden beim WIG-Schweißen mehr als 80 %.

Beim WIG-Schweißen wird ein Lichtbogen zwischen der nichtschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück erzeugt. Dabei wird die Elektrode und das Schmelzbad des Werkstücks von

dem Inertgas (z.B. Argon oder Helium) umströmt, welches die Aufgabe hat, die Luft von der Schweißstelle fernzuhalten.

Bei der Benutzung thorierte Schweißeletroden stellen vor allem Elektrodenpartikel, die durch das Schweißen oder Anschleifen von Elektroden abgetrennt werden können, ein Problem dar. Diese können bei den o.g. Prozessen in die Atemzone des Menschen gelangen und durch Inhalation inkorporiert werden. Dabei lagert sich Thorium im Körper, bevorzugt in der Leber, der Milz und im Knochenmark, ab [20].



Abb. 14: Thorierte Wolframelektroden (rechts: WT20)

Für Deutschland haben Reichelt & Lehmann 1993 [21] über die Anzahl der Exponierten einen Jahresverbrauch an Elektroden von 1,6 Mio. Stück abgeschätzt. Für Bayern allein gaben sie einen Verbrauch von 200.000 Elektroden pro Jahr an.

Gemäß DIN EN 26848 [22] werden Wolframelektroden je nach Oxidzusatz (Tab. 18) unterschiedlich bezeichnet.

Tab. 18: Bezeichnung, Zusammensetzung und Kennfarbe von thorierten Wolframelektroden (WT) [22]

BEZEICHNUNG	OXIDZUSÄTZE [MASS.-%]	KENNFARBE
WT 4	0,35 bis 0,55 ThO <sub>2</sub>	blau
WT 10	0,80 bis 1,20 ThO <sub>2</sub>	gelb
WT 20	1,70 bis 2,20 ThO <sub>2</sub>	rot
WT 30	2,80 bis 3,20 ThO <sub>2</sub>	violett
WT 40	3,80 bis 4,20 ThO <sub>2</sub>	orange

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Literaturrecherche hat ergeben, dass sich einige Untersuchungen mit der Exposition durch inhaliertes Thorium beim Schweißen und Anschleifen von Elektroden beschäftigt haben.

McDowell-Boyer [23] und Reichelt & Lehmann [21] haben beide Szenarien zur Beschreibung typischer Expositionsbedingungen (Transport von Elektroden bis zum Schweißen mit Elektroden) unter denen Thorium und seine Folgeprodukte auftreten können, entwickelt. Auf der Basis von Freisetzungsraten aus der Literatur [23] oder unter Verwendung von ermittelten Aktivitätswerten

beim Schweißvorgang, der Atemluftaktivität des Schweißers und der größenbezogenen Aktivitätsverteilung von Schleifstaubaerosolen beim Elektrodenanschluss, die durch Modellversuche bestimmt wurden [21], haben sie die interne und externe Exposition und daraus die maximale Strahlungsdosis für Einzelpersonen abgeschätzt. Dabei wurden die Rauch- und Staubpartikel über Luftprobensammler auf Filtern niedergeschlagen und gammaspektrometrisch analysiert [21].

Tab. 19: Effektivdosen verschiedener Studien; AMAD = Aktivitäts-Medianwert des aerodynamischen Durchmessers eines Partikels im Rauch

AUTOR	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/g]	EFFEKTIVDOSIS [mSv/a]
Tietze et al. [19]	Bartmaterial: Thorium-232: 5,2 - 32,7 Thorium-230: 2,3 - 94,6 Thorium-228: 3,1 - 19,9 Neue Elektrode: Thorium-232: 8,8 - 185 Thorium-230: 1,1 - 19,8 Thorium-228: 5,5 - 106	Schweißen: AMAD 0,2 µm: 0,021 - 1,15 AMAD 1,0 µm: 0,011 - 0,59 Anschleifen: ohne Absaugung 0,13 (AMAD 1,0 µm) mit Absaugung 0,04 (AMAD 1,0 µm)
Reichelt & Lehmann [21]	Thorium-232 je nach Elektrodentyp: 29 - 150	je nach Expositionsszenario: 19 für WIG-Handschweißer 15 für WIG-Maschinenschweißer 20 für Hilfspersonal 7 für sonstige Personen
McDowell-Boyer [23]	—	Schweißen (1000 Stunden pro Jahr): Knochendosis: 0,009 bis 1,6 Körperdosis: 0,0007 bis 0,14
Saito & Ishida [25]	182,4 - 246,4	0,002 - 0,0032 µSv/h
Ludwig et al. [26]	Thorium-232 Aktivitätskonzentrationen : <b>Schweißen</b> : mit Absaugung: ≤ 0,17 bis 0,19 mBq/m <sup>3</sup> (Gleichstromschweißen) ≤ 0,1 bis ≤ 0,17 mBq/m <sup>3</sup> (Wechselstromschweißen) ohne Absaugung. ≤ 0,1 bis 2,6 mBq/m <sup>3</sup> (Gleichstromschweißen) 0,46 bis 90,9 mBq/m <sup>3</sup> (Wechselstromschweißen) <b>Anschleifen</b> : mit Absaugung: 0,05 mBq ohne Absaugung: 0,9 bis 15 mBq	—
LfU [27]	1,7 und 37,8 Bq Thorium <sub>nat</sub> /a	0,7 - 7,6
BGI [28]	—	Schweißen: <b>Wechselstrom</b> WT-20: 4,2 µSv/h WT-40: 8,4 µSv/h <b>Gleichstrom</b> WT-20: 0,06 µSv/h WT-40: 0,12 µSv/h Anschleifen: WT-20: 0,29 µSv/h WT-40: 0,58 µSv/h

Bei Reichelt & Lehmann [21] ergibt sich eine effektive Dosis für den realistischen Fall (Expositionsszenarien mit an durchschnittlichen Verhältnissen orientierten Expositionsdaten) von 19 mSv/a für

WIG-Handschweißer. Diese Dosis wird im wesentlichen aus dem Inhalationspfad (Schweißvorgang, Aufenthalt im Arbeitsraum, Elektrodenanschleiff) bestimmt, wobei die externe Dosis vernachlässigbar ist, und durch eine Lüftung reduziert werden kann. In Tab. 19 sind die ermittelten Effektivdosiswerte verschiedener Studien aus der Literatur zusammengefasst.

McDowell-Boyer [23] ermittelte ebenfalls den Schweißer als die am stärksten exponierte Person. Ermittelte maximale Einzeldosen für Schweißer liegen zwischen 0,2 bis 10 mSv/a (Knochendosis) bzw. 0,024 bis 0,88 mSv/a (Körperdosis). Die Arbeitszeiten betragen dabei 1200 Stunden pro Jahr (1000 Stunden Schweißen im Betrieb und 200 Stunden zu Hause). Unter realeren Bedingungen (ohne Schweißen zu Hause) liegen die Folgedosen für Knochen für einen Schweißer zwischen 0,009 bis 1,6 mSv/a und für den Gesamtkörper eines Schweißers zwischen 0,0007 und 0,14 mSv/a (Tab. 19). Die daraus abgeschätzte kollektive Gesamtfolgedosis (gesamte U.S. Bevölkerung über einen Zeitraum von 50 Jahren) für die jährliche Verteilung, den Gebrauch und die Beseitigung von 1 Mio. thorierten Elektroden beträgt zwischen 7,9 bis 64 Sv Knochendosis bzw. 0,56 bis 5,4 Sv Körperdosis.

Auch Crim & Bradley [24] haben 1995 die Atemluftkonzentration von Thorium während des Anschleifens und Schweißens mit thorierten Schweißelektroden bestimmt. Ebenfalls mit Hilfe von Luftproben- und Personensammlern wurden Proben auf Filtern gesammelt und über Neutronenaktivierungsanalyse untersucht. Es ergaben sich Thoriumkonzentrationen in der umgebenden Luft von 0,001 bis 0,3 Bq/m<sup>3</sup> beim Anschleifen. Die Personensammler lieferten beim Anschleifen Konzentrationen von < 0,01 bis 0,07 Bq/m<sup>3</sup>.

Saito & Ishida [25] haben 1992 die spezifische Aktivität von Thorium in thorierten Wolfram-Elektroden und die Äquivalentdosis dieser Elektroden bestimmt. Es ergaben sich abhängig vom Durchmesser der Elektroden spezifische Aktivitäten von 182,4 Bq/g (Ø 1,6 mm) bis 246,4 Bq/g (Ø 3,2 mm) und Dosisraten von 0,002 µSv/h (Ø 1,6 mm) bis 0,0032 µSv/h (Ø 3,2 mm).

Experimentelle Untersuchungen im Labor und an industriellen Arbeitsplätzen haben 1997 Tietze et al. [19], Ludwig et al. [26] und 1999 das Bayerische Landesamt für Umweltschutz [27] durchgeführt.

Tietze et al. [19] haben Freisetzungs- und Inhalationsraten der Isotope Thorium-232, Thorium-230 und Thorium-228 beim Einsatz von thorierten Wolframelektroden bestimmt. Sie konnten mit Hilfe der Inhalationsraten abschätzen, dass bei einer jährlichen Schweißertätigkeit von 800 h die Grenzwerte der Effektivdosis von 6 mSv/a bzw. 20 mSv/a für Thorium-232, Thorium-230 und Thorium-228 durch Inhalation nicht überschritten werden. Dabei werden die Effektivdosen stark durch das Schweißverhalten des Schweißers beeinflusst. Die ermittelten Mittelwerte für Schweißen und Anschleifen sind in Tab. 19 aufgeführt.

Ludwig et al. [26] haben Messungen zur Bestimmung der Thorium-Aktivitätskonzentration in der Atemluft von Beschäftigten in 26 Betrieben, die mit thorierten Wolframelektroden schweißen und diese anschleifen, durchgeführt. Sie ermittelten die in Tab. 19 aufgeführten Thorium-232 Aktivitätskonzentrationen. Aus diesen Werten und weiteren Parametern (Zahl der Anschlüsse pro Jahr, Jahresarbeitszeit, Atemrate) lässt sich die Jahresaktivitätszufuhr berechnen, die einen Wert von 6 Bq/a nicht überschreiten darf (Strahlenschutzverordnung 1989). Es ergab sich das beim Gleichstromschweißen auch ohne Absaugung die Aktivitätszufuhr unterhalb des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr lag. Beim Wechselstromschweißen dagegen treten ohne Absaugung in den meisten Fällen Grenzwertüberschreitungen auf. Auch hier ergab sich, dass die Höhe der Exposition im wesentlichen vom Vorhandensein einer Absaugung abhängig ist. Auch beim Anschleifen treten Grenzwertüberschreitungen auf. Diesen Grenzwert der Jahresaktivitätszufuhr von 6 Bq/a gibt es seit Inkrafttreten der novellierten Strahlenschutzverordnung am 01. August 2001 nicht mehr [1].

Über Ausscheidungsanalysen hat das Bayerischen Landesamt für Umweltschutz in einem Untersuchungsvorhaben [27] die Expositionen an Arbeitsplätzen von 30 WIG-Schweißern untersucht. Die ermittelten Aktivitätszufuhren aus den Urinanalysen liegen im Bereich zwischen 1,7 und 37,8 Bq Thorium<sub>nat</sub> pro Jahr; die daraus berechneten Werte der Effektivdosen befinden sich zwischen 0,7 und 7,6 mSv/a. Zusätzlich wurde bei zwei der fünf untersuchten Stuhlproben eine beruflich bedingte Thoriumzufuhr nachgewiesen. Zur Kontrolle hat [27] Urinproben von 17 nicht exponierten Personen analysiert und den Schweißern gegenübergestellt. Dabei stellte sich heraus, dass die Ausscheidungsraten der WIG-Schweißer im Mittel gegenüber den Werten der Kontrollgruppe erhöht sind. Beim langjährigen Schweißen kommt es zu einer Bildung von Körperdepots und es können Körperdosen zwischen 5 und 10 mSv/a erreicht werden. Somit ist eine Überschreitung der Grenzwerte für nicht strahlenexponierte Personen nicht auszuschließen.

Die Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften setzten die Ergebnisse von Ludwig et al. [26] (siehe Tab. 19) für die novellierte Strahlenschutzverordnung in ihren „Berufsgenossenschaftlichen Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit“ (BGI 746 [28]) um. Der Jahresgrenzwert von 6 mSv/a durch die Inhalation von Schweißrauch wird ihrer Meinung nach beim Gleichstromschweißen nicht überschritten. Beim Schweißen mit Wechselstrom und beim Anschleifen dagegen sind die Expositionen nicht mehr zu vernachlässigen und der Grenzwert kann überschritten werden. Führen die Beschäftigten beide Tätigkeiten (Schweißen und Anschleifen) durch, addieren sich dadurch die jeweiligen Expositionen und es kann vermehrt zu Überschreitungen dieses Grenzwertes kommen. Die Berufsgenossenschaft hat aus den Aktivitäten in der Atemluft der Schweißer Maximalwerte für die effektive Dosis berechnet. Diese sind in Tab. 19 dargestellt. Mit diesen Werten, der Jahresarbeitszeit und den im Jahr durchgeführten Anschliffen kann die geforderte jährliche Exposition von den einzelnen Betrieben selbst abgeschätzt werden.

Die o.g. Ergebnisse aus der Literatur haben gezeigt, dass z.T. deutlich eine Überschreitung des Grenzwertes für die Effektivdosis von 6 mSv/a beim Wechselstromschweißen mit und dem Anschleifen von thorierten Wolfram-Elektroden auftreten kann und deshalb Handlungsbedarf besteht. Im nachfolgenden Abschnitt präsentieren wir Arbeitsplatzmessungen und Abschätzungen der Effektivdosis, die wir in bayerischen Schweißereien und Betrieben, die mit thorierten Elektroden schweißen, durchgeführt haben.

### 2.2.1.2 Eigene Untersuchungen

Im Vorfeld zu diesen Untersuchungen ermittelten wir Verwender von thorierten Schweißelektroden. Dazu baten wir einerseits den einzigen Hersteller von thorierten Elektroden in Deutschland mit Sitz in Südbayern, andererseits Großhändler, Industrie und Handelskammern in Bayern um Adressen von Verwendern. Zusätzlich haben wir bei Gewerbeaufsichtsämtern (exemplarisch Schwaben und Oberbayern) und bei der Süddeutschen Metallberufsgenossenschaft angefragt, ob diese Aufsichten bei Verwendern von thoriumhaltigen Elektroden durchgeführt haben und uns diese nennen können.

Der einzige Hersteller von WIG-Elektroden in Deutschland hat uns mitgeteilt, dass der Trend von thorierten Elektroden hin zu thoriumfreien geht. Sie stellen für den weltweiten Markt noch mehrere Tonnen an thorierten Elektroden her und exportieren diese in 42 Länder; für Bayern produzieren sie dagegen ungefähr 1.000 Elektroden vom Typ WT 20 pro Jahr und verkaufen diese an Kleinsthändler. Dies entspricht weniger als 5 % der Gesamtproduktion. Als Alternative zu thorierten Elektroden bietet der Hersteller thoriumfreie Elektroden mit vergleichbaren Schweißereigenschaften an.

Laut der Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik sind deutschlandweit nahezu 90 % der Anwender von thorierten Elektroden abgekommen. Nur noch eine Handvoll verwendet diese Elektroden (Abb. 14) [29]. Seit der Herausgabe des Informationsblattes BGI 746 [28] hat es

wenige Anfragen von Seiten der Anwender zur Abschätzung der Exposition gegeben. Außerdem liegen der Berufsgenossenschaft keine Ergebnisse von durchgeführten Abschätzungen vor. An einer angebotenen Informationsveranstaltung zur Novelle der Strahlenschutzverordnung hatten keine WIG-Schweißer teilgenommen [29]. Ähnliche Aussagen kommen von der Norddeutschen Metallberufsgenossenschaft, die sich ebenfalls sehr intensiv mit Strahlenschutz beschäftigt hat [30].

Weder die Süddeutsche Metallberufsgenossenschaft [31], noch das Landesamt für Arbeitsschutz, Arbeitsmedizin und Sicherheitstechnik (LfAS) [32] oder der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) [33] konnte uns Auskunft über Verwender von thorierten Schweißelektroden geben. Entweder waren ihnen solche Verwender nicht bekannt, thorierte Elektroden in den Betrieben nicht relevant oder die Weitergabe von Namen und Adressen nur mit dem Einverständnis der Betriebe möglich.

Exemplarisch haben wir uns bei den Gewerbeaufsichtsämtern der Regierung von Schwaben [34] und der Regierung von Oberbayern [35], [36] nach Schweißbetrieben, die mit thorierten Schweißelektroden arbeiten, erkundigt. Da die Gewerbeaufsichtsämter Schweißereien nicht als eigenständige Betriebe in ihrer Datenbank gespeichert haben, haben wir von einer Anfrage bei den übrigen Gewerbeaufsichtsämtern in Bayern abgesehen.

Die meisten Namen und Adressen von Verwendern haben wir von Großhändlern und den Industrie und Handelskammern (IHK) erhalten. Insgesamt haben wir von diesen 108 Adressen erhalten, die entweder thorierte Schweißelektroden erworben haben oder als Schweißereien bzw. metallverarbeitender Betrieb gemeldet sind.

Diese 108 Betriebe haben wir mittels eines Erhebungsbogens (Anlage B.2) zur Verwendung von thorierten Schweißelektroden und Arbeitszeiten mit diesen Elektroden befragt. Um weitere Betriebe in dieses Forschungsvorhaben mit einzubeziehen, haben wir 10 metallverarbeitende Betriebe aus Augsburg und München (aus den Gelben Seiten) und 42 vorwiegend Tankbau-Betriebe, die schon an der Studie von 1999 [27] des LfU teilgenommen haben, angeschrieben.

Die Ergebnisse dieser Umfrage unter 160 Betrieben haben ergeben, dass die meisten keine thorierten Elektroden verwenden. 125 Betriebe haben den Erhebungsbogen beantwortet, 35 dagegen nicht. Von den 125 Betrieben verwenden 14 thorierte Elektroden. Einer dieser Betriebe hat Konkurs angemeldet und schweißt nicht mehr und fünf Betriebe verwenden max. 1 bis 3 Elektroden im Jahr. Die übrigen acht Betriebe wurden ausgewählt und benachrichtigt, dass wir über das IGU - Institut für angewandte Isotopen-, Gas- und Umweltuntersuchungen Arbeitsplatzmessungen an Schweißplätzen durchführen möchten. Zwei der acht Betriebe schweißen ca. 4 - 5 Stunden pro Tag mit thorierten Elektroden, die übrigen sechs dagegen nur max. eine Stunde pro Tag oder sogar nur eine Stunde pro Woche, je nach Bedarf.

In den zwei Betrieben, die häufig mit thoriumhaltigen Elektroden schweißen, haben wir Arbeitsplatzmessungen mit einem personengetragenen Staubsammler vom Model HFS-513A der Firma Gilian Instrument Corp. mit einem Durchfluss bis zu 5.000 ml/min und einem Probenahmekopf für einatembare Stäube vom Typ GSP mit einem Probenahmenvolumen von 3,5 l/min, mit zwei stationären Staubsammlern vom Typ Staplex (mit unterschiedlichen Filtern) und mit einem Kleinprobensammler durchgeführt (Abb. 15 und 16). In den sechs kleineren Betrieben konnten wir keine Messungen vornehmen, da zur Zeit unserer Anfrage keine Schweißarbeiten anfielen, bei denen die Schweißer mit thorierten Elektroden arbeiten mussten.



Abb. 15: Personengetragener Staubsammler



Abb. 16: Stationärer Staubsammler, Kleinprobensammler und personengetragener Probensammler im Einsatz

Der anonymisierte Ergebnisbericht des IGU ist im Anhang A beigefügt.

Gamma-spektrometrische Untersuchungen der Luftfilter aus den stationären Staubsammlern ergaben eine Atemluftkonzentration am Schweißplatz des Betriebes 3 von etwa  $2,15 \text{ mBq/m}^3$  und am Schleifplatz von  $2,73 \text{ mBq/m}^3$  für Thorium-232. Zusammen mit der Jahresarbeitszeit an diesen beiden Arbeitsplätzen und der Atemrate kann daraus die jährliche Effektivdosis des Schweißers abgeschätzt werden. Für den Schweißplatz des Beschäftigten konnte eine effektive Dosis von  $0,020 \text{ mSv/a}$  (berechnet aus der Thorium-232-Atemluftkonzentration des stationären Luftprobensammlers am Schweißplatz) und für den Schleifplatz von  $0,037 \text{ mSv/a}$  (berechnet aus der Thorium-232-Atemluftkonzentration des stationären Luftprobensammlers am Schleifplatz) bis

0,042 mSv/a (berechnet aus der spezifischen Aktivität der Radionuklide der Thorium-Zerfallsreihe des Schleifstaubs) berechnet werden (Tab. 20). Dabei beträgt die Schweißzeit 200 Stunden pro Jahr Gleichstromschweißen und es werden 30 Elektroden im Jahr angeschliffen. Wechselstromschweißen mit einer deutlich höheren Effektivdosis wird nicht angewendet. Die jährliche Gesamtdosis beträgt in dem untersuchten Betrieb bis zu 0,062 mSv/a (Tab. 20) und liegt deutlich unter dem Grenz- und Eingreifwert. Die Auswertung der Filter des personengetragenen Staubsammlers ergaben Atemluftkonzentrationen von 0,77 mBq/m<sup>3</sup> für Thorium-232 am Schweißplatz. Daraus errechnet sich eine effektive Dosis von 0,007 mSv/a am Schweißplatz (Tab. 20). Für den Schleifplatz konnte keine Atemluftkonzentration mit dem personengetragenen Luftprobensammler bestimmt werden, da das Schleifen automatisch abläuft. Die effektive Gesamtdosis von 0,062 mSv/a stellt für diesen Betrieb einen konservativen Wert dar, da mit der Atemluftkonzentration aus dem personengetragenen Staubsammler ein kleinerer und realistischerer Wert berechnet wird.

Der Betrieb 5 hatte erst kürzlich auf thorium-freie Elektroden umgestellt. Für die Beprobung verwendete der Schweißer nochmals thorierte Elektroden. Diese Probenahme kann zwar als repräsentativ für die Entnahme, Messung und Auswertung betrachtet werden, allerdings nicht als repräsentativ für weitere Dosisbetrachtungen, da keine thorierten Schweißelektroden mehr verwendet werden.

Tab. 20: Abgeschätzte effektive Dosen im Betrieb 3 und 5 aus den gemessenen spezifischen Thorium-232-Aktivitäten für den abgesaugten Schleifstaub (Absaugung), den Rauch am Schweißplatz und den Staub am Schleifplatz (mit Staplex genommene Probe); PGS = personengetragener Luftprobensammler

SAMMLER	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]	THORIUM-232-ATEMLUFT-KONZENTRATION [mBq/m <sup>3</sup> ]		EFFEKTIVE DOSIS [mSv/a]		
		Filter Schweißplatz	Filter Schleifplatz	Schweißen	Inhalation von Schleifstaub	Gesamt
<b>Betrieb 3</b>						
Staplex	4.840 ± 150	2,30	2,78	0,020	0,037 - 0,042	0,062
PGS	—	0,77	—	0,007	—	—
<b>Betrieb 5</b>						
Staplex	—	0,22	—	0,002	—	—
PGS	—	0,39	—	0,004	—	—

In Tab. 21 sind noch einmal gesondert die effektiven Dosiswerte aus den „Berufsgenossenschaftlichen Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit“ (BGI 746) [28] für die verschiedenen Schweißarten mit unterschiedlichen Elektrodentypen aufgeführt. Mit diesen Werten sind in Tab. 22 für alle acht untersuchten Betriebe die Expositionen für den betroffenen Schweißer abgeschätzt worden.

Tab. 21: Effektive Dosiswerte für verschiedene Arbeiten und Elektrodentypen nach BGI 746 [28]

ARBEITEN	MIT WT20 ELEKTRODEN	MIT WT40 ELEKTRODEN
Wechselstromschweißen	4,2 µSv/h	8,4 µSv/h
Gleichstromschweißen	0,06 µSv/h	0,12 µSv/h
Anschliff	0,29 µSv/Anschliff	0,58 µSv/Anschliff

Tab. 22: Ergebnisse der mit den effektiven Dosiswerten aus der BGI 746 [28] abgeschätzten Jahresexposition in den acht untersuchten Betrieben; GS = Gleichstromschweißen, WS = Wechselstromschweißen

BETRIEB	ARBEITSZEIT GS [h/a]	EXPOSITION GS [mSv/a]	ARBEITSZEIT WS [h/a]	EXPOSITION WS [mSv/a]	ARBEITSZEIT ANSCHLIFF [1/a]	EXPOSITION AN- SCHLIFF [mSv/a]	SUMME [mSv/a]
Betrieb 1	180	0,011	44	0,185	150	0,044	0,240
Betrieb 2	130	0,008	26	0,109	300	0,087	0,204
Betrieb 3	200	0,012	—	—	300	0,087	0,099
Betrieb 4	150	0,009	—	—	200	0,058	0,067
Betrieb 5	500	0,030	100	0,420	120	0,035	0,485
Betrieb 6	125*	0,008	26*	0,109	100	0,029	0,146
Betrieb 7	125*	0,008	26*	0,109	100	0,029	0,146
Betrieb 8	125	0,008	—	—	50	0,015	0,023

\* die Arbeitszeiten wurden geschätzt, da die Betriebe dazu keine Angaben machen konnten

Als Beispiel für ein weiteres europäisches Land gilt in der Schweiz seit 01. Januar 2004 [37], dass Anwender, die thorierte Produkte (z.B. Schweißelektroden) benutzen, eine Bewilligung des Bundesamtes für Gesundheit benötigen. Diese Bewilligungen werden nur erteilt, wenn bestimmte Auflagen erfüllt sind, wie Besuch eines mehrtägigen Kurses, Vorliegen einer ausführlichen Arbeitsanweisung, Personendosimetrie (Urinmessungen), Punktabaugungen am Arbeitsplatz mit Überwachung des Filters und Kauf eines Strahlenmessgerätes. Diese Auflagen und das Vorhandensein von thoriumfreien Produkten haben dazu geführt, dass rasch ein Wechsel zu nicht thorierten Elektroden stattgefunden hat.

### 2.2.1.3 Fazit

Die Abschätzungen mit den effektiven Dosiswerten für verschiedene Arbeiten und Elektrodentypen nach BGI 746 [28] zeigen deutlich, dass bei allen acht Betrieben die Jahresexposition von 6 mSv deutlich unterschritten wird. Damit haben alle acht Betriebe kein Problem mit der Exposition aus der Thoriumfreisetzung beim Schweißen mit (Rauch) und beim Anschliff von (Staub) thorierten Schweißelektroden. Dies ist möglicherweise auf die geringe Stundenzahl beim Wechselstromschweißen zurückzuführen und darauf, dass vier der acht Betriebe keine reinen Schweißbetriebe sind, sondern nur Werkstätten haben, die bei anfallenden Reparaturen Schweißarbeiten durchführen.

Das Ergebnis des Betriebes 3 ist mit 0,062 mSv/a mit dem berechneten Wert von 0,099 mSv/a vergleichbar und liegt ebenfalls unter dem Eingreifwert von 6 mSv/a.

Diese im Vergleich zur Studie von 2000 [27] niedrigen effektiven Dosen sind auf niedrigere Schweißzeiten und einen geringeren Verbrauch von Schweißelektroden zurückzuführen. Zudem wurde in Betrieb 3 ausschließlich mit Gleichstrom geschweißt.

Mit höheren Arbeitszeiten beim Schweißen, vor allem einem höheren Anteil an Wechselstromschweißen und einem höheren Verbrauch an Schweißelektroden könnte der Eingreifwert der Jahresexposition von 6 mSv möglicherweise überschritten werden.

## 2.2.2 Handhabung und Lagerung thoriertes Gasglühstrümpfe

### 2.2.2.1 Stand der Forschung

Gasglühstrümpfe finden Verwendung bei der Lichterzeugung durch Gas. Seit 1892 produzierte die Firma Auergesellschaft GmbH, heute MSA Auer (einziger Hersteller in Deutschland) Gasglühstrümpfe. Im Jahr 2000 wurden ca. 2 Mio. Glühstrümpfe von der Firma Auer hergestellt und davon wurden etwa 1,5 Mio. im Inland verbraucht [38]. Dabei erzeugt ein mit Thorium- und Cernitrat imprägniertes Maschengewebe aus Baumwolle oder Kunstseide durch Erhitzen in einer Gasflamme (z.B. Propan-, Butangas, ...) ein helles Licht. Vor der Inbetriebnahme wird das textile Gewebe durch Entzünden ohne Gaszufuhr abgeflammt. Thorium und Cer bewirken, dass aufgrund der thermischen Anregung von Leuchtelektronen, die eine geringere Elektronenaustrittsarbeit aufweisen, die Lichtausbeute höher wird. Die natürliche Radioaktivität von Thorium spielt bei diesem Prozess keine Rolle. Vorteile der Gasglühlampen gegenüber z.B. Batterielampen sind ihre hohe Leistung und die Möglichkeit die Lampen stufenlos durch die Variation der Gaszufuhr zu regulieren.

Im Jahr 2005 hat die Firma MSA Auer die Herstellung von Glühkörpern an eine andere Firma abgetreten, die Glühkörper nicht mehr in Deutschland, sondern in Indien produziert.

Die Fa. Brenk Systemplanung gibt in ihrem Bericht [38] als Anwender die Bahn, Wasser- und Schifffahrtsämter sowie die Straßenbeleuchtung in einzelnen Städten an. Weitere Anwendungsbereiche werden von Reichelt & Lehmann [21] genannt. Dabei handelt es sich um Gartenhaus-, Zelt-, Wohnwagen-, Berghütten-, Marktstandbeleuchtung sowie um die Beleuchtung von Bootshäusern, Jagdhütten, Baustellen, Sportplätzen, Lagerplätzen, Laderampen und beim Fischfang.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Literaturrecherche hat gezeigt, dass sich nur wenige Untersuchungen mit der Exposition durch Gasglühstrümpfe beschäftigt haben.

Mohammadi & Mehdizadeh [39] haben 1982 den Thorium-232-Gehalt und die relative Strahlungsintensität in den Gasglühstrümpfen bestimmt. Sie hatten 26 importierte Glühstrümpfe, die im Iran auf Märkten, vor allem in ländlichen Gegenden verwendet wurden, gammaspektrometrisch untersucht. Die Thorium-Aktivitäten lagen im Bereich von 0,44 bis 1,37 Bq/g bei einem Gewicht der Glühstrümpfe von etwa 1,3 bis 3,8 g (Tab. 23).

Luetzelschwab & Googins [40] haben die Summe der Radioaktivität von Thorium-232 und den Folgeprodukten während des Abbrennens von Glühstrümpfen untersucht. Die Aktivitäten wurden mittels Gamma-Spektrometrie bestimmt. Es zeigte sich, dass 30 % der Radium-Nuklide in den ersten 45 Minuten des Abbrennens und etwa die Hälfte des Blei-212 und Bismut-212 in den ersten Minuten freigesetzt wurden. Nur Thorium-232, Thorium-228 und Actinium-228 wurden während des Abbrennens nicht freigesetzt. Zwei untersuchte Glühstrümpfe wiesen eine Gesamt-Thorium-232-Aktivität von 2.405 Bq auf (Tab. 23). Von der Radioaktivität, die während des Abbrennens freigesetzt wird, geht in einem gut gelüfteten Raum eine minimale Gefahr aus. Nur von Radium-228 geht eine Langzeitgefahr aus, doch ist die Freisetzungsrates von Radium-228 in den ersten zwei Jahren nach der Herstellung gering.

Ähnlich wie beim Umgang mit thorierten Wolframelektroden haben Reichelt & Lehmann [21] Szenarien für die Beschäftigten im Glühstrümpfhandel ermittelt und daraus mögliche Strahlenexpositionen berechnet. Den wichtigste Expositionspfad beim Verteilen von thorierten Glühstrümpfen stellt die externe Bestrahlung dar, wohingegen die interne Exposition nur in Ausnahmefällen auftritt. Die ermittelten Aktivitäten und effektiven Dosen sind in Tab. 23 aufgelistet. Reichelt & Lehmann [21] nennen die Produktion, Distribution, das Auswechseln und die Beseitigung von Glühstrümpfen als weitere Bereiche, deren Strahlenexpositionen zukünftig betrachtet werden sollten.

Tab. 23: Aktivitäten und Effektivdosen verschiedener Studien beim Gebrauch und Handel mit Glühstrümpfen

AUTOR	AKTIVITÄT [Bq]	EFFEKTIVDOSIS [mSv/a]
Reichert & Lehmann [21]	Thorium-232: 500 bis 3.500	je nach Expositionsszenario: 0,08 bis 0,16 für Verkäufer 0,36 bis 3,16 für Lagerarbeiter 2,2 für Transportarbeiter 1,0 für Fahrer 0,01 bis 0,31 für Postangestellte
Mohammadi & Mehdizadeh [39]	Thorium-232: 0,44 bis 1,37 Bq/g	—
Luetzelschwab & Googins [40]	2 Glühstrümpfe: Gesamt-Thorium-232 Aktivität: 2.405	—
Lewis et al. [41]	Thorium-232: < 1.000	14 nSv/a
Schmitt-Hannig et al. [42]	Thorium-232: 500 bis 4.000	—

1992 haben Lewis et al [41] in den „Documents of the NRPB“ (National Radiological Protection Board; Strahlenschutz- und Regulierungsbehörde für Großbritannien) über einstweilige Standards berichtet, die für den Gebrauch von radioaktiven Substanzen in bestimmten Produkten entwickelt wurden, bis angemessene Alternativen ohne radioaktive Stoffe denkbar sind. Zu diesen Produkten gehörten auch Gasglühstrümpfe. Die Effektivdosen bei normalem Gebrauch liegen unterhalb der anerkannten Grenzwerte für die Bevölkerung. Die Gesamtaktivität an Thorium-232 in einem Gasglühstrumpf soll so niedrig wie möglich sein und darf 1 kBq nicht überschreiten. Die Handhabung von Glühstrümpfen hat nach bestimmten Sicherheitsvorschriften zu erfolgen. Abschätzungen von Lewis et al. [41] für den normalen Gebrauch von Glühstrümpfen mit 1 kBq Thorium-232 ergaben eine maximale Effektivdosis für Einzelpersonen von 14 nSv/a und eine maximale Äquivalentdosis für die Haut einer Einzelperson von 0,39 mSv/a. Die maximale effektive Äquivalentdosis für ein Kind durch Inhalation liegt bei 0,12 mSv/a und durch Ingestion bei 42 nSv/a. 1980 haben Messungen der Thorium-232 Aktivität an 56 Glühstrümpfen (keinen näheren Angaben) durch das NRPB [41] ergeben, dass über die Hälfte weniger als 1 kBq Thorium-232 enthielten. Weitere Messungen 1988 lieferten ein ähnliches Ergebnis.

Schmitt-Hannig et al. [42] haben 1995 in einer Studie über Verbrauchsgüter, die radioaktive Substanzen enthalten, festgestellt, dass es trotz weiter Verbreitung von Gasglühstrümpfen in Europa sehr wenig Informationen darüber gibt. Es ist nur bekannt, dass einzelne Glühstrümpfe zwischen 500 Bq bis 4 kBq Thorium-232 enthalten können.

Die Deutsche Bahn AG hat 1996 bundesweit ca. 850.000 Gasglühkörper in den Propansignallaternen verwendet, die durch eigens für Wartungsarbeiten konzipierte „Propanwartungszüge (15 Stück)“ gewechselt wurden. Dieser Verbrauch ist 2004 auf ca. 500 bis 600 Stück in ganz Deutschland und „einige wenige“ in Bayern zurückgegangen. Die Tendenz ist weiter rückläufig, da die Glühkörper in der Regel nur noch als Baustellensignalbeleuchtung eingesetzt werden. Die verwendeten Glühkörper der Fa. MSA Auer (Spezialanfertigungen für die Propansignallaternen der Deutschen Bahn AG) haben eine Gesamtaktivität von ca. 250 Bq/Stück. Zahlreiche Untersuchungen durch die Deutsche Bahn AG haben gezeigt, dass die Strahlenexposition durch Thorium bei der Handhabung der Gasglühkörper minimal ist [43].

Die Landesanstalt für Arbeitsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen [44] hat 1992 in Zusammenarbeit mit dem Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit (BIA) Strahlenschutzmessungen bei der Lagerung und Handhabung thoriumhaltiger Gasglühkörper durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten bei drei verschiedenen Betreibern städtischer Gasstraßenbeleuchtungen. Im Zuständigkeitsbereich der „Stadtwerke A“ befanden sich im Untersuchungszeitraum ca. 17.600 und in den Bereichen der „Stadtwerke B“ und „Stadtwerke C“ jeweils ca. 350 Gasstraßenlaternen.

In jeder Gaslaterne sind je nach Lampentyp 4, 6 oder 8 Gasglühkörper installiert, die im Mittel nach einem Jahr ausgetauscht werden. Dosisleistungen in der Umgebung der Glühkörper lagen bei max. 2,5  $\mu\text{Sv/h}$  direkt an der Oberfläche eines Paketes mit 1000 Glühkörpern, bei max. 1,5  $\mu\text{Sv/h}$  in 10 cm Abstand von diesem Paket und bei max. 5,0  $\mu\text{Sv/h}$  direkt an der Oberfläche eines unverpackten Glühkörpers. Die Messungen der Luftkontamination durch Freisetzung von Thorium bei der Handhabung (Wechsel) abgebrannter Gasglühkörper lieferten Thorium-228 und Thorium-232-Aktivitäten von  $\leq 1,2 \text{ Bq/m}^3$  Umgebungsluft. Kontaminationskontrollen beim Umgang mit thoriumhaltigen Gasglühkörpern an Personen sowie an Lager- und Arbeitsplätzen ergaben die höchsten Aktivitäten auf der Arbeitsbühne des Montagefahrzeuges von max. 3,7  $\text{Bq/cm}^2$ . Die Hände der Monteure zeigten Aktivitäten von max. 0,25  $\text{Bq/cm}^2$ ; nach dem Händewaschen war keine Kontamination nachweisbar. Bei einer durchgeführten Kontaminationskontrolle wurde am Arbeitskittel des Beschäftigten eine Thorium-232-Kontamination von 1,9  $\text{KBq}$  festgestellt. Ausscheidungsanalysen lieferten Thorium-232-Aktivitäten von bis zu 578  $\text{mBq}$ , Thorium-228-Aktivitäten von bis zu 152  $\text{mBq}$  und Thorium-230-Aktivitäten von bis zu 126  $\text{mBq}$ . Die Gesamtaktivität eines Glühkörpers lag bei 970  $\text{Bq}$ , die Thorium-232-Aktivität bei 141  $\text{Bq}$ .

Im Rahmen dieser Studie sollte ebenfalls die Lagerung und Handhabung von Gasglühstrümpfen bei Abnehmern untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

### 2.2.2.2 Eigene Untersuchungen

Verschiedenen Literaturstellen [21], [38] nennen als Abnehmer von Gasglühstrümpfen die Bahn, Wasser- und Schifffahrtsämter sowie die Straßenbeleuchtung in einzelnen Städten, aber auch Camping-Gaslampen.

Einsatz fanden Gasglühstrümpfe hauptsächlich in Camping-Gaslampen (Abb. 17). Anbieter von solchen Lampen und Glühstrümpfen sind die Firmen Coleman, Truma, Campinggaz, Luxor, Primus und Petromax. Alle beschreiben ihre Glühstrümpfe im Internet als thoriumfrei und nicht radioaktiv. Truma hat uns dies schriftlich auf unsere Anfrage bestätigt. Teilweise geben die Hersteller an, dass die Glühstrümpfe anstelle mit Thorium, jetzt mit Yttrium getränkt werden (z.B. Coleman und Petromax). Dies ist möglich, da die Elemente Thorium und Yttrium vergleichbare Elektronenaustrittsarbeit haben. Diese beträgt für Thorium 3,4 eV und für Yttrium 3,1 eV [45]. Die Glühstrümpfe könnten auch mit Cer oder Lanthan getränkt werden. Diese weisen eine Elektronenaustrittsarbeit von 2,9 eV bzw. 3,5 eV auf [45].

Aus Altbeständen von drei Glühstrümpf-Herstellern (Coleman, Campinggaz und Petromax) wurde im Rahmen dieser Studie die spezifische Aktivität gammaspektrometrisch ermittelt. Die Ergebnisse präsentieren wir in Tab. 26.

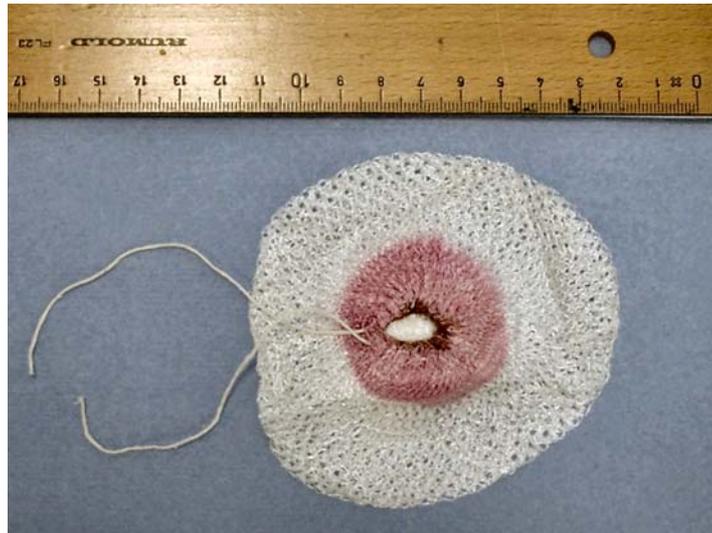


Abb. 17: Gasglühstrümpfe für Camping-Gaslampen

Im Vorfeld der Untersuchungen zu dieser Studie haben wir versucht, über den einzigen Hersteller von Glühkörpern in Deutschland, die Firma MSA Auer, Adressen von Abnehmern in Bayern zu erhalten. Da die Firma aus datenschutzrechtlichen Gründen uns nicht weiterhelfen konnte, haben wir darum gebeten, dass sie ihre bayerischen Abnehmer über ihre Pflichten gemäß Strahlenschutzverordnung [1] informieren und diese sich bei einer Abschätzung der Exposition durch Thorium an uns wenden möchten.

Ein Betreiber von städtischen Gasstraßenbeleuchtungen in Bayern hat sich auf unsere Anfrage bereit erklärt, uns Untersuchungen zur Handhabung und Lagerung von thorierten Gasglühstrümpfen durchführen zu lassen. Dieser Betreiber hat sechs Betriebsstellen, die vornehmlich zu optischen Zwecken Gaslampen mit zwei bzw. vier Glühkörpern aufgestellt haben (Abb. 18). Im Einzugsgebiet einer Betriebsstelle sind zudem in der Altstadt 40 Gaslampen mit Glühkörpern vorhanden. Die übrigen Betriebsstellen verfügen über zwei bis vier Gaslampen.



Abb. 18: Gaslampen mit zwei bzw. vier Glühkörpern

Der Betreiber verwendet Gasglühkörper der Firma MSA Auer. Dabei handelt es sich um einen thoriumhaltigen Gasglühkörper mit 80 - 95 Gew.-% Thoriumoxid. Im Sicherheitsdatenblatt [46] und auf den Verpackungen der Glühkörper wird die sichere Handhabung der Glühkörper beschrieben.

Bei unseren Untersuchungen haben wir die Dosisleistung in der Umgebung der Glühkörper (Schachtel zur Aufbewahrung), die spezifische Aktivität der verwendeten Glühkörper und über Wischtests die Oberflächenkontamination der Schachtel, am Lagerungsort und innerhalb der Glasabdeckung einer Gaslampe bestimmt.

Jeweils ein Mitarbeiter des Betreibers wechselt an den Betriebsstellen zweimal im Jahr die Gasglühkörper nach Bedarf. Ein Wechsel dauert etwa zehn Minuten pro Gaslampe (enthält vier Glühkörper). Bei der Betriebsstelle, welche die 40 Gaslampen in der Altstadt verwaltet, wechseln vier Beschäftigte die Glühkörper nach Bedarf. Dabei werden einmal im Jahr die Gaslampen abgegangen und die verbrauchten Glühkörper ausgewechselt.

Der Verwender bewahrt die Glühkörper in Schachteln zu zwanzig Stück auf. Die Betriebsstelle, welche 40 Gaslampen verwaltet, bewahrt 15 Schachteln auf. In Tab. 24 ist die Dosisleistung in der Umgebung der Glühkörper (Schachtel mit 20 Glühkörpern und Regal mit 15 Schachteln), eines unverpackten Glühkörpers und der Gaslampe dargestellt.

Tab. 24: Dosisleistung in der Umgebung einer Schachtel mit 20 Glühkörpern und 15 Schachteln mit je 20 Glühkörpern, eines unverpackten Glühkörpers und einer Gaslampe.

ABSTAND [cm]	SCHACHTEL MIT 20 GLÜHKÖRPERN [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	15 SCHACHTELN MIT JE 20 GLÜHKÖRPERN [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	UNVERPACKTER GLÜHKÖRPER [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	GASLAMPE MIT VIER GLÜHKÖRPERN [ $\mu\text{Sv/h}$ ]
Oberfläche	0,45 – 0,5	0,8	0,25 – 0,3	0,2
5	0,20	—	0,1	0,15
10	0,15	0,55	0,05-0,08	0,1
15	0,1	—	0,05	0,08
20	0,06	0,4	—	—
30	—	0,25	—	—
50	—	0,16	—	—
75	—	0,08 - 0,1	—	—
Umgebung	0,05 – 0,08	0,08	0,05	0,05 – 0,08

Einzelne Schachteln mit zwanzig Glühkörpern werden z.T. in Schränken in Büroräumen gelagert. Die Dosisleistung im Schrank mit offener Tür beträgt 0,05 - 0,06  $\mu\text{Sv/h}$  und bei geschlossener Tür 0,05  $\mu\text{Sv/h}$ . Der Schreibtisch eines Mitarbeiters, der die Glühkörper wechselt, befindet sich in diesem Büro etwa 4 m vom Schrank entfernt. Am Schreibtisch haben wir nur die Umgebungsstrahlung messen können.

Mit den von uns ermittelten Ortsdosisleistungen (Tab. 24) haben wir für die Lagerung von thorierten Gasglühstrümpfen bzw. -körpern, den innerbetrieblichen Transport und den Transport auf öffentlichen Verkehrswegen die effektive Dosis abgeschätzt:

*Expositionsszenario 1: Lagerung von Glühkörpern*

Gesamtzahl der gelagerten Glühkörper: 300 Stück = 15 Schachteln mit 20 Glühkörpern mit einer gemessenen Ortsdosisleistung von 0,1  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde bei einem Abstand zu den gelagerten Glühkörpern: > 75 cm

Aufenthaltszeit: 0,5 Stunden pro Tag bei einer Jahresarbeitszeit von 250 Tagen = 125 Stunden pro Jahr (geschätzter Höchstwert, eher weniger)

$\Rightarrow 125 \text{ Stunden pro Jahr} \times 0,1 \mu\text{Sv/h} = 12,5 \mu\text{Sv/a} = 0,0125 \text{ mSv/a}$ ,

*Expositionsszenario 2: Innerbetrieblicher Transport*

*(Transport vom Lagerungsort zur Straßenlampe)*

Gesamtzahl der gelagerten Glühkörper: 20 Stück = 1 Schachtel mit 20 Glühkörpern mit einer gemessenen Ortsdosisleistung von 0,15  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde bei einem Abstand zu den transportierten Glühkörpern: 10 cm

Aufenthaltszeit: 30 Stunden pro Jahr

$\Rightarrow 30 \text{ Stunden pro Jahr} \times 0,15 \mu\text{Sv/h} = 4,5 \mu\text{Sv/a} = 0,0045 \text{ mSv/a}$ ,

*Expositionsszenario 3: Transport auf öffentlichen Verkehrswegen*

*(Lieferung von Glühkörpern zu den übrigen Betriebsstellen)*

Gesamtzahl der gelagerten Glühkörper: 20 Stück = 1 Schachtel mit 20 Glühkörpern mit einer gemessenen Ortsdosisleistung von 0,06  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde bei einem Abstand zu den gelagerten Glühkörpern: > 75 cm

Aufenthaltszeit: 2 Stunden pro Jahr

$\Rightarrow 2 \text{ Stunden pro Jahr} \times 0,06 \mu\text{Sv/h} = 0,12 \mu\text{Sv/a} = 0,00012 \text{ mSv/a}$ .

$\Rightarrow$  Die effektive Gesamtdosis beträgt  $\sim 0,017 \text{ mSv/a}$ .

Dieser Wert liegt deutlich unter dem Eingreifwert von 6 mSv pro Jahr [1]. Selbst bei einer angenommenen Aufenthaltszeit von 2.000 Stunden in allen drei Expositionsszenarien im Jahr würde die gesamte Effektivdosis 0,62 mSv pro Jahr betragen.

Schätzt man die effektive Dosis für den von uns untersuchten Betrieb gemäß dem „Leitfaden für die Umsetzung der Regelungen nach Teil 3 Kapitel 1 und 2 StrlSchV“ [47] für verschiedene Expositionsszenarien ab, so erhält man folgendes Ergebnis:

*Expositionsszenario 1: Aufenthalt im Lagerraum mit Glühkörpern*

Gesamtzahl der gelagerten Glühkörper: 300 Stück = 15 Schachteln mit 20 Glühkörpern

Aufenthaltszeit = 125 Stunden pro Jahr

Dosis (Aufenthalt in Lagerräumen) =  $5 \cdot 10^{-4} \mu\text{Sv/h}$  (Anhang A.2 im Leitfaden [47])

$\Rightarrow 300 \text{ Glühkörper} \times 125 \text{ Stunden pro Jahr} \times 5 \cdot 10^{-4} \mu\text{Sv/h} = 18,75 \mu\text{Sv/a} = 0,01875 \text{ mSv/a}$ ,

*Expositionsszenario 2: Innerbetriebliche Transportarbeiten  
(Transport vom Lagerungsort zur Straßenlampe)*

Gesamtzahl der gelagerten Glühkörper: 300 Stück = 15 Schachteln mit 20 Glühkörpern  
 Aufenthaltszeit = 30 Stunden pro Jahr  
 Dosis (Aufenthalt in Lagerräumen) =  $2 \cdot 10^{-2}$   $\mu\text{Sv/h}$  (Anhang A.2 im Leitfaden [47])  
 $\Rightarrow 300$  Glühkörper x 30 Stunden pro Jahr x  $2 \cdot 10^{-2}$   $\mu\text{Sv/h}$  = 180  $\mu\text{Sv/a}$  = 0,18 mSv/a,

*Expositionsszenario 3: Transport auf öffentlichen Verkehrswegen  
(Lieferung von Glühkörpern zu den übrigen Betriebsstellen)*

Gesamtzahl der gelagerten Glühkörper: 20 Stück = 1 Schachtel mit 20 Glühkörpern  
 Aufenthaltszeit = 2 Stunden pro Jahr  
 Dosis (Aufenthalt in Lagerräumen) =  $3 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{Sv/h}$  (Anhang A.2 im Leitfaden [47])  
 $\Rightarrow 20$  x 2 Stunden pro Jahr x  $3 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{Sv/h}$  = 0,012  $\mu\text{Sv/a}$  = 0,000012 mSv/a

$\Rightarrow$  Die effektive Gesamtdosis beträgt 0,19 mSv/a.

Dieser Wert ist höher als der von uns abgeschätzte Wert von 0,016 mSv/a, überschreitet aber ebenfalls nicht den Eingreifwert von 6 mSv pro Jahr [1].

Um die effektive Dosis bei der Handhabung bzw. beim Wechsel von Glühkörpern abzuschätzen, haben wir mehrere Wischtests durchgeführt. Zum Einen haben wir zwei Wischtests direkt in einer Gaslampe (auf der Glasabdeckung innen und auf der Halterung der Glühkörper), zum Anderen zwei Wischtests von einer Schachtel mit 20 Glühkörpern (innen und außen) und einer vom Regal (Aufbewahrungsort der Schachtel mit 20 Glühkörpern), genommen. Die Ergebnisse der Oberflächenkontamination der beiden Wischtests aus der Gaslampe sind in der Tab. 25 aufgelistet; zusätzlich wird die spezifische Aktivität aller fünf Wischtests präsentiert. Die drei übrigen Wischtests haben keine Oberflächenkontamination ergeben.

Tab. 25: Ergebnisse der Wischtests

	GLASABDECKUNG INNEN [Bq/cm <sup>2</sup> ]	HALTERUNG GLÜHKÖRPER [Bq/cm <sup>2</sup> ]	SCHACHTEL INNEN [Bq/cm <sup>2</sup> ]	SCHACHTEL AUßEN [Bq/cm <sup>2</sup> ]	REGAL [Bq/cm <sup>2</sup> ]
$\alpha$	0,069 ± 0,0032	1,7 ± 0,017	—	—	—
$\beta$	< NWG	< NWG	—	—	—
Actinium-228	0,015 ± 0,009	0,326 ± 0,028	—	—	—
Radium-224	—	0,388 ± 0,079	—	—	—
Blei-212	0,011 ± 0,004	0,321 ± 0,018	—	0,008 ± 0,006	—
Bismut-212	—	0,350 ± 0,066	—	—	—
Thallium-208	0,004 ± 0,002	0,091 ± 0,008	—	0,004 ± 0,003	—
Thorium-234	—	—	0,065 ± 0,024	—	—
Bismut-214	—	—	—	—	0,008 ± 0,006

Der Wischtest an der Halterung des Glühkörpers liefert eine Oberflächenkontamination von 1,7 Bq/cm<sup>2</sup> und eine Freisetzung von Thorium-Radionukliden von bis zu 39 Bq während des ersten Abbrennens. Die Wischtests haben deutlich gezeigt, dass vor allem während des Abbrennens des Glühstrumpfes die Radionuklide freigesetzt werden und sich in der Gaslampe ablagern (Halterung der Glühkörper durch Russ verfärbt). Die Glasabdeckung zeigt eine geringe Kontamination, da

diese erst kurze Zeit vorher gereinigt wurde. Die Bereiche der Lagerung weisen dagegen keine Kontamination durch die Glühkörper auf.

Eine zusätzliche Exposition kommt beim Wechseln der Glühkörper hinzu. Diese war nicht messbar, da der Glühkörper innerhalb von wenigen Minuten ausgewechselt wurde. Dabei ist der stoßempfindliche Glühkörper zerfallen und die Bruchstücke können vom Beschäftigten eingeatmet werden. Dies wird aber durch das Tragen einer Atemschutzmaske vermieden. Im schlimmsten Fall kann während des Wechsels 1 % der Gesamtaktivität [41] (20 Bq; Tab. 26, Spalte 7) inkorporiert werden.

Elmer [48] hat aus Oberflächen-Kontaminationsmessungen Werte zwischen 0,25 bis 5,4 Bq/cm<sup>2</sup> erhalten. Das Ergebnis unseres Wischtests stimmt gut mit diesen Werten überein. Bei einem Glühstrumpfwechsel wird nach Elmer [48] eine Aktivität von 0,36 bis 0,72 Bq inhaliert, jedoch bei unsorgfältiger Vorgehensweise eine Aktivität von 18,1 Bq (vergleichbar mit unserer Abschätzung).

Aus einer Gesamtaktivität von 20 Bq resultiert eine effektive Dosis (Inhalation und Ingestion) von 0,0006 mSv pro Wechsel. Bei einem jährlichen Wechsel von 40 Glühkörpern in der Altstadt mit 40 Gaslampen durch einen Mitarbeiter (160 Glühkörper durch vier Mitarbeiter), beträgt die Jahresdosis dieses Mitarbeiters 0,024 mSv/a. Auch wenn 1 Mitarbeiter alle 160 Glühkörper auswechseln würde, beträgt die effektive Jahresdosis 0,096 mSv.

Es war nicht möglich die Atemluftkontamination durch die Thoriumfreisetzung beim Wechsel von Glühkörpern mittels eines personengetragenen Luftprobensammler zu bestimmen, da ein Wechsel in etwa 10 Minuten erledigt ist und nur bei Bedarf durchgeführt wird. Für eine genaue Bestimmung der inhalierten Luft sind aber mehrere Stunden Luftprobensammlung notwendig.

Alle Mitarbeiter, die Glühkörper wechseln, wurden vom Betreiber unterrichtet, dass diese Thorium enthalten. Beim Wechsel von Glühkörpern müssen Handschuhe und leichte Atemschutzmasken getragen werden. Auch müssen nach dem Wechsel die Hände gewaschen werden.

In der Tab. 26 werden die Aktivitäten pro Glühstrumpf der vom Betreiber verwendeten und anderer in Camping-Gaslampen verwendeten Glühkörper und -strümpfe vorgestellt. Da thorierte Glühstrümpfe für Camping-Gaslampen im Handel nicht mehr erhältlich sind, es werden nur noch thoriumfreie hergestellt, haben wir Altbestände (z.B. des LfU oder aus privater Hand) untersucht.

Tab. 26: Ergebnisse der gammaspektrometrischen Untersuchung von Gasglühkörpern und -strümpfen; rechts des Doppelstrichs = verwendete Glühkörper des von uns untersuchten Betreibers von Gasstraßenbeleuchtungen in Bayern ; GS = Glühstrumpf, GK = Glühkörper

	PETROMAX 1 [Bq/GS]	PETROMAX 2 [Bq/GS]	PETROMAX 3 [Bq/GS]	COLEMAN [Bq/GS]	CAMPINGGAZ [Bq/GS]	AUER NEU [Bq/GK]	AUER VER- BRAUCHT [Bq/GK]
Thorium-232	2081	1399	1410	593	713	—	—
Actinium-228	2023	1769	1822	643	797	485	109
Thorium-228	2350	1970	2187	622	869	561	169
Radium-224	2263	2004	2052	608	903	345	121
Blei-212	1822	1915	1760	622	869	318	104
Bismut-212	1668	1673	1504	580	774	319	108
Thallium-208	540	566	490	190	246	103	35
Gesamtaktivität	12747	11296	11225	3858	5171	2131	646
Masse GS bzw. GK [g]	2,4	2,4	2,3	22,4	18,4	0,6	0,05

### **2.2.2.3 Fazit**

Die durchgeführte Messung hat gezeigt, dass weder der Eingreifwert von 6 mSv/a noch der Grenzwert von 20 mSv/a bei der Handhabung und Lagerung von thoriumhaltigen Glühkörpern überschritten wird. Die Glühkörper werden entweder in einem Lagerraum, in dem sich niemand ganztägig aufhält oder in einem geschlossenen Schrank im Büro aufbewahrt. Bei der Aufbewahrung im Schrank hat sich gezeigt, dass diese Art der Lagerung bei geschlossener Tür eine Strahlenexposition von 0,0125 mSv pro Jahr für den Beschäftigten ergibt.

Beim Wechsel von maximal 40 Glühkörpern kann ein Mitarbeiter eine Effektivdosis von 0,024 mSv/a erhalten, die deutlich unter dem Eingreifwert von 6 mSv pro Jahr liegt. Würde in der Altstadt der Betriebsstelle mit 40 Gaslampen ein Mitarbeiter alle 160 Glühkörper allein auswechseln, würde dieser mit 0,096 mSv/a den Eingreifwert ebenfalls nicht überschreiten.

Weitere Abnehmer von Glühkörpern und -strümpfen konnten in Bayern nicht ermittelt werden.

Im Handel sind keine thorierten Glühstrümpfe für Camping-Gaslampen mehr erhältlich, da nur noch thoriumfreie hergestellt werden. Thorium wird dabei durch Yttrium ersetzt. Auch werden in Deutschland von der Firma MSA Auer keine thorierten Gasglühkörper für Straßenbeleuchtungen hergestellt. Die Firma Auer hat die Produktion von Gasglühkörpern an eine andere Firma abgetreten, die diese in Indien fertigen lässt.

## **2.2.3 Weitere Arbeitsfelder**

### **2.2.3.1 Verwendung von Thorium oder Uran zu chemischen-analytischen oder chemisch-präparativen Zwecken**

Uranpräparate, wie Uranylacetat werden vorwiegend im analytischen Bereich eingesetzt, so z.B. als Reagenz zur volumetrischen Bestimmung der Phosphorsäure und bei der quantitativen Natrium-Bestimmung (Kahanes Reagenz). In der Mineralogie verwendet man es zum mikrochemischen Nachweis von Natrium in Gesteinen. In der Transmissionselektronenmikroskopie benutzt man es als Kontrastmittel, um biologische Proben anzufärben. Schwere Atome wie Blei- oder Uran streuen Elektronen stärker als leichte Atome und erhöhen so den Kontrast. Uranylacetat und -nitrat werden an Forschungsinstituten und Universitäten verwendet, die sich mit den oben genannten Bereichen befassen.

Die Verwendung von Uranylacetat und -nitrat als Kontrastmittel wurde exemplarisch an einer Universität in Bayern näher untersucht. Es wurde die Personendosis beim Arbeiten mit natürlichem Uran als Kontrastmittel für die Elektronenmikroskopie abgeschätzt. Als Lösung wird Uranylacetat ( $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) verwendet. Diese Lösung ist an Uran-235 abgereichert und enthält 99,6 - 99,7 % Uran-238 und 0,3 - 0,4 % Uran-235. Die Messergebnisse sind in Tab. 27 zusammengestellt.

Tab. 27: Messergebnisse der Untersuchung der Personendosis bei der Verwendung von Uranpräparaten in einer bayerischen Universität; EM = Elektronenmikroskop

MESSORT	TÄTIGKEIT	LÖSUNG	ORTSDOSIS [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	AUFENTHALTS- DAUER [h/a]	PERSONEN- DOSIS [mSv/a]
Elektronen- mikroskopie	Abwiegen, Lösung ansetzen und Transport zum EM	Uranylacetat	2 (direkt am Behälter) 0,2 (in 40 cm Abstand) 0,3 (an den Proben)	100	0,2 0,02 0,03
Labor	Transport der Flasche, Abwiegen	Uranylnitrat	30 (am Vorratsfläschchen) 3 (an der offenen Abfallflasche) < 1 (außen am Aufbewahrungsschrank)	0,03	0,001 0,0001 <0,00003

Da der übliche Abstand der Flasche mit dem Präparat 40 cm vom Laboranten beträgt, liegt die ermittelte Personendosis unter 0,1 mSv/a. Der Eingreifwert gemäß der Strahlenschutzverordnung beträgt auch hier 6 mSv pro Jahr [1]. Dieser wird nicht überschritten.

Mit Hilfe eines Kontaminationsmessgerätes haben wir die Zerfälle pro Sekunde direkt ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 28 aufgelistet.

Tab. 28: Ergebnisse der Messung mit einem Kontaminationsmessgerät

	ELEKTRONENMIKROSKOPIE [ZERFÄLLE/s]	LABOR [ZERFÄLLE/s]
direkt am Behälter	100	—
Flasche geöffnet	2.000	—
Proben	18	—
Kacheln am Tisch	12	—
am Vorratsfläschchen	—	1.500
an der offenen Abfallflasche	—	50
außen am Aufbewahrungsschrank	—	6

Da die Aufenthaltszeiten im Kontakt mit den Uran-Lösungen sehr gering sind, ist es unwahrscheinlich, dass der Eingreifwert überschritten wird. Es konnten keine weiteren Universitäten oder Labore ermittelt werden, die Uran-Lösungen verwenden.

### 2.2.3.2 Handhabung von Produkten aus thorierten Legierungen

In Bayern werden in zwei großen Betrieben Produkte aus thorierten Legierungen hergestellt. Diese Betriebe führen eigenverantwortlich Messungen der Thorium-232-Atemluftkonzentration der Raumluft und der effektiven Dosis an den Arbeitsplätzen durch und teilen die Ergebnisse halbjährlich dem Bayerischen Landesamt für Umwelt als zuständige Behörde mit. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Jahre 2001 bis 2003 präsentieren wir in Tab. 29.

Tab. 29: Effektivdosen an Arbeitsplätzen mit thorierten Legierungen

BETRIEB	THORIUM-232 ATEM- LUFTKONZENTRATION [mBq/m <sup>3</sup> ]	ORTSDOSISLEISTUNG [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	SUMME AUS INNERER UND ÄUßERER EXPOSITION [mSv/a]
1	2 - 1.700	0,07 - 13,0	0,2 - 1,8
2	70	—	1,8 - 3,0

Bisher benötigten diese Betriebe für den Umgang mit radioaktiven Stoffen eine Genehmigung nach Strahlenschutzverordnung. Durch die Novellierung der StrlSchV ist nach § 117, Abs. 25 StrlSchV keine Genehmigung mehr notwendig [1]. Die zuständige Behörde kann nach § 96, Abs. 4 bei anzeigebedürftigen Arbeiten geeignete Schutzmaßnahmen anordnen.

### **2.2.3.3 Pyrochlorerze**

Pyrochlor  $[(Ca, Na_2)(Nb, Ta, TiO_3)_2(OH, F)]$  wird zum größten Teil in Brasilien und Kanada wegen seines Niobgehaltes abgebaut. In dem Mineral können Calcium und Natrium durch andere Erdalkali-Ionen oder Seltenerdmetalle bzw. Uran und Thorium ersetzt sein [49]. Deshalb wird es in der Liste der zu berücksichtigenden Rückstände der Anlage XII, Teil A geführt. In Bayern werden Pyrochlorerze weder gewonnen noch verarbeitet.

### **2.2.3.4 Schlacke aus der Verhüttung von Kupferschiefererzen**

Die bekannteste Gewinnung von Kupferschiefererzen in Deutschland fand im Mansfelder Land (Reviere um Mansfeld, Eisleben und Sangerhausen) bis 1969 statt [50], [51], [52]. Die in beträchtlichen Mengen anfallende Schlacke wurde zu Schlackesteinen verarbeitet, die für die Pflasterung von Straßen verwendet wurden. Diese Schlackesteine sind von sehr großer Festigkeit. Daneben setzte man die Schlacke als Zuschlagstoff in der Zementindustrie und in gemahlener Form als Schotter im Straßenbau ein. Dazu werden auch heute vorhandene Schlackehalden abgebaut. Ein Großteil der Bergbauhalden sind heute Biotope und Rückzugsgebiete für Tiere und Pflanzen.

In Bayern wurden Kupferschlackesteine im Gleisbereich von Straßenbahnen verwendet. Messungen des Landesamtes für Umweltschutz von 1997 haben spezifische Aktivitäten um 700 Bq/kg für die Radionuklide der Uran-Zerfallsreihe und um 49 Bq/kg für die Radionuklide der Thorium-Zerfallsreihe ergeben. Im Jahr 2003 hat die Verkehrsgesellschaft einer großen bayerischen Stadt 1.000 Tonnen Kupferschlackesteine im Rahmen von Baumaßnahmen auf der TASI-Deponie Oberlangheim (Oberfranken) entsorgt. Die Grenzwerte der Anlage XII, Teil C StrlSchV (Tab. 31) [1] werden bei der gemeinsamen Deponierung von 1.000 Tonnen Kupferschlackesteinen und 3.100 bis 5.000 Tonnen Siedlungsabfällen nicht überschritten.

### 3 Verwertung und Beseitigung überwachungsbedürftiger Rückstände

Die Novelle der Strahlenschutzverordnung regelt ebenfalls die zivilisatorisch bedingte Exposition durch Uran und Thorium in natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen, sog. NORM-Materialien (**N**aturally **O**ccurring **R**adioactive **M**aterial) zum Schutz der Bevölkerung neu (§§ 97 bis 102 der StrlSchV) [1].

Dabei ist jeder Betrieb, bei dem überwachungsbedürftige Rückstände bei Arbeiten anfallen, verpflichtet, sicherzustellen, dass durch die Verwertung oder Beseitigung dieser Rückstände eine effektive Dosis von 1 Millisievert pro Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung nicht überschritten werden kann. Andernfalls hat der Betrieb Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung zu ergreifen.

Überwachungsbedürftig sind Rückstände gemäß der Anlage XII, Teil A der Strahlenschutzverordnung, es sein denn, es ist sichergestellt, dass bei der Verwertung oder Beseitigung dieser Rückstände die Überwachungsgrenzen in Anlage XII, Teil B StrlSchV [1] für die dort genannten Beseitigungs- oder Verwertungswege eingehalten werden. Eine Vermischung oder Verdünnung der Rückstände mit anderen Materialien zur Einhaltung der Überwachungsgrenzen ist nicht erlaubt (§ 97, Abs. 2, Satz 2 StrlSchV [1]).

Zu den NORM-Materialien der Anlage XII zählen:

1. Schlämme und Ablagerungen aus der Gewinnung von Erdöl und Erdgas;
2. nicht aufbereitete Phosphogipse, Schlämme aus deren Aufbereitung sowie Stäube und Schlacken aus der Verarbeitung von Rohphosphat (Phosphorit);
3. a) Nebengestein, Schlämme, Sande, Schlacken und Stäube
  - aus der Gewinnung und Aufbereitung von Bauxit, Columbit, Pyrochlor, Mikrolyth, Euxenit, Kupferschiefer-, Zinn-, Seltene-Erden- und Uranerzen,
  - aus der Weiterverarbeitung von Konzentraten und Rückständen, die bei der Gewinnung und Aufbereitung dieser Erze und Mineralien anfallen, sowie
 b) den o.g. Erzen entsprechende Mineralien, die bei der Gewinnung und Aufbereitung anderer Rohstoffe anfallen;
4. Stäube und Schlämme aus der Rauchgasreinigung bei der Primärverhüttung in der Roheisen- und Nichteisenmetallurgie.

Außerdem zählen zu den Rückständen im Sinne des § 97 StrlSchV [1]:

- a. O.g. Materialien, wenn das Anfallen dieser Materialien zweckgerichtet herbeigeführt wird,
- b. Formstücke aus den o.g. Materialien sowie
- c. ausgehobener oder abgetragener Boden und Bauschutt aus dem Abbruch von Gebäuden oder sonstigen baulichen Anlagen, wenn diese Rückstände o.g. Materialien enthalten und gemäß § 101 StrlSchV nach der Beendigung von Arbeiten oder gemäß § 118 Abs. 5 StrlSchV von Grundstücken entfernt werden.

Überwachungsgrenzen für die oben aufgeführten Materialien sind in Tab. 30 aufgeführt.

Tab. 30: Überwachungsgrenzen für Rückstände nach Anlage XII, Teil A der StrlSchV [1]; als Summenformel gilt:  $C_{U238max} + C_{Th232max} \leq C$  [1]

ÜBERWACHUNGSGRENZE [Bq/g]	BEMERKUNG
$C = 1$ Bq/g	Verwertung und Beseitigung von Rückständen
$C = 0,5$ Bq/g	Deponierung im Einzugsbereich eines nutzbaren Grundwasservorkommens von mehr als 5.000 Mg/a Rückstände oder Zusatz zu Baustoffen bei der Verwertung im Hausbau von mehr als 20 % oder bei der Verwertung im Straßen-, Wege-, Landschafts- und Wasserbau, auch Sport- und Spielplätze von mehr als 50 % Rückständen
$C = 5$ Bq/g	untertägige Verwertung oder Deponierung
$C_{U238max} \leq 0,2$ Bq/g und $C_{Th232max} \leq 0,2$ Bq/g	Deponierung oder Verwertung im Straßen-, Wege- und Landschaftsbau, auch Sport- und Spielplätze im Einzugsbereich eines nutzbaren Grundwasserleiters bei Belegung einer Fläche von mehr als 1 Hektar mit Nebengestein

Ist die größte spezifische Aktivität der Radionuklide des Blei-210 fünfmal größer als die spezifische Aktivität der übrigen Radionuklide der Uran-Zerfallsreihe, gilt folgende Summenformel:

$$R \cdot C_{U238max} + C_{Th232max} \leq C$$

Der Faktor R nimmt bei der übertägigen Verwertung oder Beseitigung den Wert 0,5 an [1].

Für die untertägige Verwertung oder Beseitigung beträgt  $R = 0,3; 0,2$  oder  $0,1$  je nach dem um wie viel die spezifische Aktivität des Blei-210 größer ist (fünf- bis zehnmal; zehn- bis zwanzigmal oder mehr als zwanzigmal) als die spezifische Aktivität der übrigen Radionuklide der Uran-Zerfallsreihe.

Bei einer Entlassung von Rückständen aus der Überwachung zum Zweck einer gemeinsamen Deponierung mit anderen Rückständen und Abfällen kann davon ausgegangen werden, dass keine Überschreitung der effektiven Dosis von 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung auftritt, wenn die in Tab. 31 aufgelisteten Voraussetzungen erfüllt werden.

Tab. 31: Voraussetzungen für die Entlassung aus der Überwachung; als Summenformel gilt:

$$C^M_{U238max} + C^M_{Th232max} \leq C^M [1];$$

$C^M_{U238max}, C^M_{Th232max}$ : Mittelwerte der spezifischen Aktivitäten als Gesamtaktivität der innerhalb von 12 Monaten auf der Deponie beseitigten überwachungsbedürftigen Rückstände geteilt durch die Gesamtmasse aller innerhalb dieses Zeitraums auf der Deponie beseitigten Rückstände und Abfälle. Die spezifische Aktivität keines Radionuklids der Uran- und Thoriumnuklidketten darf 10 Bq/g bzw. bei der Deponierung auf Deponien für besonders überwachungsbedürftige Abfälle 50 Bq/g überschreiten.

ÜBERWACHUNGSGRENZE [Bq/g]	VORAUSSETZUNGEN
$C^M = 0,05$ Bq/g	Deponien mit einer Fläche von mehr als 15 Hektar
$C^M = 0,1$ Bq/g	Deponien mit einer Fläche bis zu 15 Hektar
$C^M = 1$ Bq/g	unabhängig von der Deponiefläche für Deponien, bei denen auf Grund der spezifischen Standortbedingungen Grundwasserbelastungen ausgeschlossen werden können
$C^M = 5$ Bq/g	bei untertägiger Beseitigung

Ist die spezifische Aktivität des Blei-210 in einer Rückstandscharge fünfmal größer als die spezifische Aktivität der übrigen Radionuklide der Uran-Zerfallsreihe, muss bei der Ermittlung der Gesamtaktivität nach Tab. 31 die Aktivität der Radionuklide der Uran-Zerfallsreihe mit einem Faktor  $R = 0,3$  (übertägige Beseitigung) multipliziert werden [1]. Für die untertägige Beseitigung nimmt R die unter Tab. 30 genannten Werte an.

Kann durch Arbeiten mit Materialien, die nicht in der Anlage XII, Teil A aufgeführt sind, die Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung erheblich erhöht werden, dass Maßnahmen notwendig sind, trifft die zuständige Behörde gemäß § 102 StrlSchV [1] die erforderlichen Anordnungen.

Im Rahmen dieser Studie wollten wir alle in der Anlage XII, Teil A aufgeführten Rückstände für Bayern erfassen und deren spezifische Aktivitäten abschätzen. Zudem wollten wir weitere Materialien mit natürlicher Radioaktivität nach § 102 StrlSchV [1] ermitteln und untersuchen.

Falls Überschreitungen der Überwachungsgrenzwerte auftreten, sollten möglichst kostengünstige Entsorgungswege gemäß der Strahlenschutzverordnung für die Betreiber der Betriebe ausgearbeitet werden.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

### **3.1 Schlämme und Ablagerung aus der Gewinnung von Erdöl und Erdgas**

Ablagerungen aus der Gewinnung von Erdöl und Erdgas, sog. Scales, finden sich an den Innenwänden von Fördersonden und sonstigen Rohrleitungen. Die chemischen Hauptbestandteile sind Barium-/Strontiumsulfat ( $\text{Ba/SrSO}_4$ ), Calciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Bleisulfat ( $\text{PbS}$ ) und elementares Blei ( $\text{Pb}$ ) bzw. Gemische davon. Zur Bildung von Scales muss an Barium und Sulfat gesättigtes Wasser vorhanden sein [53].

Da Radium, wie Barium und Strontium, ein Element der zweiten Hauptgruppe des Periodensystems ist, sich chemisch ähnlich wie diese verhält und in jedem Grundwasser vorhanden ist, wird bei der Scalesbildung Radium mitausgefällt. Es kommt zu einer Kompaktion der Ausfällungen und die Scales wachsen langsam in den Rohrleitungen und Tankwandungen auf. Als Kristallkeim für die Bildung von Scales dient dabei die Rauigkeit der Rohrwandungen [54].

Vornehmlich werden Radium-226, Radium-228 und Blei-210 angereichert [53]; Uran-238 und Thorium-232 werden dagegen nicht miteingebaut. Gellermann [53] nennt für deutsche Erdöl- und Erdgaslagerstätten spezifische Aktivitäten in Scales von Radium-226 bis zu 1.000 Bq/g, von Blei-210 bis zu 180 Bq/g und von Radium-228 bis zu 360 Bq/g. Höchste Aktivitäten zeigen Sulfat-Scales, karbonatische Scales dagegen deutlich niedrigere, da Radium hier nicht miteingebaut wird.

In Bayern betreiben zwei große deutsche Erdöl- und Erdgasproduzenten mehrere Erdöl- und Erdgaslagerstätten. Die Erdölfelder liegen bei Großaitingen (Landkreis Augsburg), bei Hebertshausen (Landkreis Dachau) und Holzkirchen (Landkreis Miesbach). Bei den Erdgaslagerstätten Inzenham-West, Schmidhausen und Breitbrunn/Eggstätt (Landkreis Rosenheim), Wolfersberg (Landkreis Ebersberg), Bierwang (Landkreis Mühldorf) und Eschenfelden (Landkreis Amberg-Weilheim) handelt es sich ausschließlich um Erdgasspeicher [56]. Der Anteil Bayerns an der gesamten bisherigen deutschen Förderung beträgt beim Erdgas ca. 2,7 % und beim Erdöl ca. 2,1 % [55].

Die derzeit größte und zugleich ergiebigste bayerische Erdöllagerstätte ist das „Feld Aitingen“. Sie wurde 1976 entdeckt und es wurden bis zum Jahr 2000 ca. 1.000.000 t Rohöl gefördert. Schätzungen gehen davon aus, dass die Lagerstätte mit Stichtag 01. Januar 2001 noch Reserven von 468.000 t Rohöl enthält; dies reicht bei der derzeitigen Jahresförderung von rund 28.000 t Rohöl bis maximal 2016 aus [55], [57].

Eher gering ist im Gegensatz zu Aitingen die Förderung der Lagerstätten „Darching-Holzkirchen“ und „Hebertshausen“. Die Lagerstätte Hebertshausen wurde 1982 entdeckt und brachte bisher eine Gesamtfördermenge von rund 110.000 t Rohöl. Die Jahresproduktion lag im Jahr 2001 bei knapp 4.000 t Rohöl. Die Bohrung der Lagerstätte Darching-Holzkirchen wurde 1969 durchgeführt

und es wurden seitdem insgesamt rund 113.000 t Rohöl gefördert. Die Jahresproduktion lag im Jahr 2001 bei 4.400 t [55], [57].

Der einzigen derzeit im Betrieb befindlichen Erdgaslagerstätte Südbayerns „Inzenham-West“ wird eine weitere Förderdauer von ca. 25 Jahren prognostiziert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Lagerstätte - wie auch einige andere ausgeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten Südbayerns - als natürlicher Erdgasspeicher genutzt wird. Hierbei werden die gleichmäßigen Erdgaslieferungen ausländischer Quellen (Russland, Niederlande) in verbrauchsarmen Zeiten (Sommer) in die ehemaligen Lagerstätten eingespeichert um bei höheren Verbrauchsbedarf (Winter) Spitzenlasten abzudecken [55], [57].

Anfragen bei den beiden Betreibern dieser Lagerstätten haben ergeben, dass in den bayerischen Lagerstätten kaum bis keine Scales der o.g. Art anfallen. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Wässer in der Bayerischen Molasse eine geringe Salinität (etwa 25 g/l) aufweisen. Die Norddeutschen Wässer dagegen weisen Salzgehalte von 300 g/l auf mit Sulfatgehalten von > 1.000 mg/l und einen Barium- und Strontiumgehalt von 150 bzw. 1.500 mg/l. In den bayerischen Wässern dagegen ist Barium bzw. Strontium (etwa 1 - 2 mg/l) und auch Sulfat (etwa 10 - 20 mg/l) nur sehr gering vorhanden. Deshalb ist es nahezu ausgeschlossen, dass sich Scales in den Rohrleitungen der bayerischen Erdöllagerstätten bilden. In diesen Rohrleitungen sammelt sich hauptsächlich Gebirgsmaterial (Sandkörner) im Abscheider, welches bei den Bohrungen mitausgetragen wird [54].

Eine weitere Möglichkeit, dass Schlämme oder Ablagerungen in Rohrleitungen anfallen, ist bei Erdölpipelines gegeben. In Bayern gibt es ein großes Unternehmen, welches Erdöl von Italien über die Alpen nach Süddeutschland über Pipelines transportiert. Auf unsere Anfrage hat uns dieses Unternehmen mitgeteilt, dass keine Schlämme, sondern Wachsablagerungen (Paraffine) anfallen, bei denen es sich um abgesetztes und stabilisiertes Rohöl handelt. Die Salze ( $Ba/SrSO_4$ ) sind schon bei der Förderung des Öls ausgefallen. Diese Wachsablagerungen beeinträchtigen den Wirkungsgrad der Pipeline und werden mit Hilfe eines sog. Molches entfernt. Anschließend wird dieser Rückstand wieder aufgelöst und dem Rohöl zugegeben [58].

### 3.2 Stäube und Schlacken aus der Verarbeitung von Rohphosphat

In Bayern findet sich keine Industrie mehr die Rohphosphat verarbeitet. Hauptabnehmer von Rohphosphat war früher die Chemische Industrie, Düngemittel- und Waschmittelhersteller.

Rohphosphat oder Phosphorit wird hauptsächlich in Ländern, wie Tunesien, Marokko, Algerien, Russland, aber auch in den USA und im Nahen Osten abgebaut und in diesen Ländern zu elementarem Phosphor oder Phosphorsäure umgewandelt. Dabei werden von den weltweit jährlich geförderten etwa 100 Millionen Tonnen an Rohphosphat etwa 90 % zur Herstellung von Phosphordüngemitteln, aber auch in der chemischen Industrie verwendet. Phosphorite sind dichte, oft erdig lockere Mineralgemenge, die in mächtigen Gesteinslagen vorkommen können. Hauptbestandteil ist ein Karbonat-Fluor-Apatit ( $Ca_5[(F,OH,CO_3)/(PO_4)_3]$ ). Man nimmt an, dass nur ein geringer Teil der Phosphorsäure anorganischer Herkunft ist, vielmehr der größere Teil organischen Ursprungs ist und z.B. aus der Zersetzung phosphorhaltiger tierischer Hartteile stammt [59].

Um nähere Auskunft über den Verbrauch von Rohphosphat in diesen Industriezweigen zu erhalten, haben wir Anfragen an den Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) – Landesverband Bayern, an den Industrieverband Agrar e.V. (IVA) und an den Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V. (IKW) gerichtet.

### 3.2.1 Chemische Industrie

In der chemischen Industrie wird Rohphosphat hauptsächlich zur Herstellung von Phosphorsäure zusammen mit Schwefelsäure, Salzsäure oder Salpetersäure verwendet. Phosphorsäure dient anschließend als Ausgangsstoff zur Herstellung phosphathaltiger Düngemittel. Der Verband der Chemischen Industrie e.V. – Landesverband Bayern, hat uns mitgeteilt, dass es in Bayern keinen Phosphorsäurehersteller gibt [60].

### 3.2.2 Düngemittelindustrie

In der Düngemittelindustrie wird, laut dem Industrieverband Agrar e.V. [61], nur noch wasserlösliches Phosphat zur Düngemittelproduktion verwendet. Früher haben deutsche Düngemittelhersteller Rohphosphat verwendet, doch wegen zu hohen Umweltbelastungen und zu hohen Kosten wieder aufgegeben. Heute wird Rohphosphat aus Russland, Frankreich, USA, Nordafrika, Südafrika und den Niederlanden geliefert. In Bayern wird zur Düngemittelherstellung kein Rohphosphat mehr verarbeitet. Auch die Rolle von Rohphosphat als Phosphatdünger hat stark abgenommen (Verwendung von nicht aufbereitetem Rohphosphat im Ökolandbau). Der Nachteil von Rohphosphat ist, dass das Phosphat auf diese Weise von den Pflanzen schwer aufgenommen werden kann und damit am wenigsten pflanzenwirksam ist.

Die Radioaktivität in den Düngemitteln rührt hauptsächlich vom Rohphosphat her und ist abhängig vom Herkunftsland und ob es anorganischen (magmatisch; geringere Aktivitätskonzentration an Uran) oder organischen (höhere Aktivitätskonzentration an Uran, da Uran durch organischen Kohlenstoff aus Meerwasser ausfällt) Ursprungs ist [21]. Zusätzlich kommt es noch zu einer Verdünnung der Radioaktivität durch weitere Komponenten, die bei der Düngemittelherstellung dazugegeben werden [61].

### 3.2.3 Waschmittelindustrie

Der Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V. [62] teilte uns mit, dass in der Waschmittelindustrie Rohphosphat keine Rolle mehr spielt, da bei pulverförmigen Waschmitteln kein Phosphat, sondern Zeolithe (komplexe Alumino-Silikate) verwendet werden. Nur noch bei der Herstellung von Maschinengeschirrspülmitteln werden Phosphate benutzt. Dabei wird das Rohphosphat zum elementaren Phosphor und dann wieder in sehr reine Salze umgewandelt. In der Waschmittelindustrie gibt es eine Übereinkunft mit dem Umweltbundesamt max. 5.000 t Phosphor zur Herstellung von Waschmittel zu verwenden. 90 % der Waschmittelproduktion in Deutschland liegt in den Händen von vier Unternehmen, die alle keine Produktionsstätten in Bayern haben.

### 3.3 Nebengestein, Schlämme, Sande, Schlacken und Stäube aus der Gesteinsverarbeitung

In Bayern werden keine der in der novellierten Strahlenschutzverordnung aufgelisteten Minerale, wie Bauxit, Columbit, Pyrochlor, Mikrolyth, Euxenit, Kupferschiefer-, Zinn-, Seltene-Erden- und Uranerze, gewonnen und verarbeitet. Deshalb beschränkt sich dieser Abschnitt auf den Abbau und die Verarbeitung von Gesteinen und Mineralen, wie Granit, Feldspat und Kaolin.

#### 3.3.1 Stand der Forschung

Über die natürliche Radioaktivität von Rückständen aus der Gesteinsaufbereitung und -verarbeitung sind keine Daten in der Literatur zu finden. Hauptsächlich finden sich allgemeine Daten über die Aktivität der wichtigsten Isotope, wie Uran-238, Thorium-232, Radium-226 und Kalium-40 in den verschiedenen Gesteinstypen [63]. In Tab. 32 ist die natürliche Radioaktivität von häufig auftretenden Materialien aufgelistet.

Granite weisen die höchste natürliche Radioaktivität in Gesteinen auf. Deshalb beschränkt sich diese Studie auf die Untersuchung von Rückständen aus der Granitaufbereitung und -verarbeitung aus dem ostbayerischen Raum (Bayerischer Wald, Fichtelgebirge und Oberpfälzer Wald). Daneben zeigen ebenfalls Feldspat und Kaolin eine hohe natürliche Radioaktivität (Tab. 32) und wurden mit in diese Untersuchung aufgenommen. Alle anderen Materialien haben niedrigere spezifische Aktivitäten als die drei untersuchten. Es gilt deshalb: unterschreiten die Rückstände aus der Auf- und Verarbeitung dieser Gesteine und Minerale die Überwachungsgrenzen der Strahlenschutzverordnung, dann tun dies auch die Rückstände aus den übrigen Materialien.

Tab. 32: Natürliche Radioaktivität von häufig auftretenden Materialien [63]

MATERIAL	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT NATÜRLICHER RADIONUKLIDE [Bq/kg]		
	Kalium-40	Radium-226	Thorium-232
Granit	600 - 4.000	30 - 500	17 - 310
Basalt	190 - 380	6 - 36	9 - 37
Gneis	830 - 1.500	50 - 160	22 - 50
Schiefer	500 - 1.000	30 - 70	40 - 70
Sandstein	< 40 - 1.100	13 - 70	15 - 70
Marmor	< 40 - 240	4 - 41	2 - 100
Feldspat	2.000 - 4.000	40 - 100	70 - 200
Kaolin	200 - 1.000	30 - 200	70 - 200
Ton/Lehm	300 - 2.000	< 20 - 90	18 - 200
Monazitsand	< 40 - 70	30 - 1.000	50 - 3.000
Beton	50 - 1.300	7 - 92	4 - 71
Zement	110 - 500	23 - 330	11 - 37
Schlacke	300 - 1.000	20 - 700	20 - 200
Phosphorit	< 40 - 300	300 - 1.000	< 4 - 160
Düngemittel	< 40 - 8.000	< 20 - 1.000	< 20 - 30

Kaolin besteht aus verschiedenen Tonerdesilikaten, die aus der Verwitterung von Feldspat entstehen. Kaolinit und Montmorillonit sind dabei die wichtigsten Bestandteile. In Bayern gibt es gegenwärtig zwei Gruben, die Kaolin im großen Maßstab abbauen. Verwendung findet Kaolin in der Papierindustrie (2/3 der weltweiten Kaolinproduktion), in der Keramikindustrie und die im Kaolin enthaltenen Feldspäte als Flussmittel für die Glasindustrie.

Reichelt et al. [64] haben 1994 spezifische Aktivitäten für die Bestandteile von Kaolin (Tab. 33) angegeben.

Tab. 33: Spezifische Aktivitäten für verschiedene Bestandteile von Kaolin [64]

MATERIAL	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]		
	Uran-Reihe	Thorium-Reihe	Kalium-40
Kaolinit	18 - 37	24 - 77	0 - 460
Montmorillonit	25 - 62	57 - 97	0 - 185
Kaolin-Sand	44 - 46	87 - 91	1.336 - 1.501

Feldspat wird in Bayern nur noch an einem Standort in großem Maße abgebaut. Feldspäte sind die häufigsten Minerale der Erdkruste (ca. 60 % aller Minerale). Sie sind Hauptbestandteil fast aller magmatischer (z.B. Granit, Basalt) und vieler metamorpher (z.B. Gneis) Gesteine. In Bayern betrug 1992 die Rohförderung an Feldspat aus Feldspatgruben 27.805 Mg und aus Kaolingruben 166.151 Mg [64]. Bayern führt ca. 4.500 Mg aus und ca. 7.200 Mg aus dem Ausland ein [64]. Feldspat findet vor allem Anwendung in der Feinkeramik und als Flussmittel für baukeramische Massen [64]. Typische spezifische Aktivitäten sind in Tab. 32 aufgeführt. Reichelt et al. [64] geben für die Ortsdosisleistung einen Wert von 0,43  $\mu\text{Sv/h}$  in einer Feldspatgrube im nordostbayerischen Grundgebirge an. Die externe Strahlenexposition (effektive Dosis) im Feldspat-Bergbau geben sie mit 0,9 mSv/a an.

Granite stellen den Hauptbestandteil des festen Gesteinsuntergrundes der Erde und die am weitesten verbreitete Gruppe an magmatischen Gesteinen dar. Granite bestehen aus den drei Hauptkomponenten Feldspat, Quarz und Glimmer. Die bedeutendsten Granitvorkommen in Bayern befinden sich im Bayerischen Wald, Oberpfälzer Wald und im Fichtelgebirge. Granite werden als Mauer-, Pflaster- und Bordsteine, Treppenstufen, Fenster- und Türrahmen, Bodenplatten, Sockel- und Fassadenverkleidungen, Grabsteine, für die Bildhauerei, Schriftplatten und zur Schotter- und Splittproduktion verwendet [64]. In Tab. 34 sind spezifische Aktivitäten verschiedener Autoren für Granite aus Bayern und Deutschland aufgeführt.

Äußere Strahlenexpositionen nennen Lehmann [63] und Reichelt et al. [64]. Reichelt et al. [64] geben für Granitsteinbrüche aus dem Fichtelgebirge Ortsdosisleistungen von 0,15  $\mu\text{Sv/h}$  (G2-Granit), 0,34  $\mu\text{Sv/h}$  (G3-Granit) und 0,40  $\mu\text{Sv/h}$  (G4-Granit) an. Die entsprechenden Effektivdosen bei einer angenommenen Aufenthaltszeit von 8.760 h (entspricht einem Jahr) liegen bei 1,3 mSv/a (G2), 3,0 mSv/a (G3) und 3,5 mSv/a (G4). Zusätzlich werden in [64] für bayerische Granite Ortsdosisleistungen zwischen 0,11 und 0,20  $\mu\text{Sv/h}$  genannt. Mit den Bezeichnungen G1 bis G4 (siehe auch Tab. 34) werden Granite unterschiedlichen Alters im Fichtelgebirge charakterisiert. Das Alter nimmt dabei vom G1- zum G4-Granit ab.

Tab. 34: Spezifische Aktivitäten verschiedener Granite aus Bayern und Deutschland [64], [65], [66], [67]

PROBE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]		
	Uran-Reihe	Thorium-Reihe	Kalium-40
Granite des Fichtelgebirges			
Porphyrganit	74	138	—
G2: Randgranit	111	85	—
G3: Kerngranit	185	49	—
G4: Zinngranit	210	28	—
Granit mit Uranglimmer (Opf. Wald)	185 - 278	—	—
Granit (Opf. Wald)	111 - 222	—	—
Granit, Deutschland	96	81	1.221
Granit, Deutschland	100	80	1.299
Haldenmaterial von Granitsteinbrüchen	26 - 97	—	—
Fichtelgebirgsgranite			
Weißstädter Granit (G1)	102 ± 25	274 ± 57	—
Reut-Granit (G1 R)	152 ± 25	226 ± 24	—
Selber Granit (G1 S)	152 ± 76	97 ± 97	—
Randgranit (G2)	152 ± 51	170 ± 105	—
Kerngranit (G3)	254 ± 102	97 ± 32	—
Zinngranit (G4)	432 ± 355	57 ± 32	—
Kösseine-Kerngranit (G3K)	76 ± 25	153 ± 16	—
von Zinngranit überprägter Randgranit (G2/4)	355 + 381/-254	105 ± 24	—
Granit des Oberpfälzer Waldes	—	981 ± 85	—

Kemski et al. [68] haben Dosisleistungen in 1 m über dem Erdboden für verschiedene Granitareale in Ostbayern berechnet. In Tab. 35 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt.

Tab. 35: Berechnete Dosisleistungen in 1 m über dem Erdboden für verschiedene Granitareale in Ostbayern [68]

ORT	DOSISLEISTUNG $\mu\text{Sv/h}$		
	Kalium	Thorium	Uran
Fichtelgebirge	0,13 - 0,28	0,09 - 0,13	0 - 0,09
Nördliche Oberpfalz	0,14 - 0,28	0,10 - 0,14	0 - 0,10
Oberviechtacher Granit	0,09 - 0,16	0,04 - 0,09	0 - 0,04
Neunburger Granit	0,25 - 0,33	0,05 - 0,25	0 - 0,05
Granite des Passauer Waldes	0,16 - 0,23	0,04 - 0,16	0 - 0,04

Die berechneten Dosisleistungen im ostbayerischen Gebiet schwanken zwischen 0,004 und 0,5  $\mu\text{Sv/h}$  mit einem Median von 0,11  $\mu\text{Sv/h}$ . Die Dosisleistungen der Metamorphite und Sedimente des Vorlandes liegen dagegen unter 0,1  $\mu\text{Sv/h}$ , die der Magmatite bei knapp 0,2  $\mu\text{Sv/h}$  [68]. Für verschiedene Gesteinstypen sind in Tab. 36 die Dosisleistungen aufgeführt.

Tab. 36: Berechnete Dosisleistungen in 1 m über dem Erdboden für verschiedener Gesteinstypen [68]

	DOSISLEISTUNG $\mu\text{Sv/h}$		
	Kalium	Thorium	Uran
Sedimente	0,08 - 0,10	0,03 - 0,08	0 - 0,03
Magmatite	0,13 - 0,19	0,05 - 0,13	0 - 0,05
Metamorphite	0,06 - 0,10	0,02 - 0,06	0 - 0,02

Im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens ermittelten wir zunächst Betriebsstätten, in denen Rückstände aus der Kaolin- und Granitindustrie anfallen. Seit Beginn des Projektes haben wir 25 gesteinsverarbeitende Betriebe beprobt. Dabei haben wir neben Graniten (22), Feldspat (1) und Kaolin (2), vor allem Staub- und Schlammproben genommen. Wie schon weiter oben aufgeführt, finden sich die bedeutendsten Granitvorkommen in Bayern im Bayerischen Wald, Oberpfälzer Wald und im Fichtelgebirge. Mit Hilfe des Mitgliederverzeichnisses des „Bayerischen Industrieverbandes Steine und Erden e.V.“ und der Gelben Seiten, konnten wir die Adressen der größten bayerischen Steinbrüche und Granitwerke ermitteln. Diese schrieben wir im November 2002 bzw. im Januar 2003 an und baten sie mit Verweis auf die novellierte Strahlenschutzverordnung [1], einer Probenahme seitens des Landesamtes für Umwelt zuzustimmen.

Insgesamt haben wir 14 gesteinsverarbeitende Betriebe im Bayerischen Wald, sechs im Fichtelgebirge und fünf in der Oberpfalz beprobt. Wir haben auch Proben aus den drei Gruben genommen, aus denen in Bayern Kaolin und Feldspat abgebaut wird.

Aus den gemessenen spezifischen Aktivitäten für die Filterstäube konnten wir zusammen mit der Atemrate, der Staubkonzentration und den für die jeweiligen Radionuklide entsprechenden Dosiskoeffizienten [69], die Effektivdosis bzw. Organdosis (Knochenoberfläche bzw. ET (**E**xtrathoracic) Luftwege) berechnen. Die effektive Jahresdosis haben wir nach den Berechnungsgrundlagen Bergbau [70] bestimmt. Zur Berechnung der Dosiswerte haben wir die als Grenzwerte definierten (sog. MAK-Werte = **M**aximale **A**rbeitsplatz**k**onzentration) [71] sowie selbst ermittelte Staubkonzentrationen herangezogen. In einem weiteren Schritt verwendeten wir die von der Steinbruch-Berufsgenossenschaft ermittelten Staubkonzentrationen zur Bestimmung der Effektivdosis bzw. Organdosis. Dazu mussten wir zunächst eine schriftliche Einverständniserklärung der einzelnen Betriebe einholen, diese Staubkonzentrationen verwenden zu dürfen. Sechs Betriebe aus der Granitverarbeitung haben sich damit einverstanden erklärt und die Ergebnisse präsentieren wir im Abschnitt 3.3.3.4.

Die im Bayerischen Wald beprobten Betriebe verwenden fast ausschließlich Material aus eigenen Steinbrüchen. Bei einem Betrieb haben wir neben den heimischen Graniten auch importiertes Material beprobt. Im Fichtelgebirge dagegen haben nur zwei Betriebe eigene Steinbrüche und die übrigen vier verarbeiten aus dem Ausland eingeführtes Material. In der Oberpfalz haben wir Proben von vier Unternehmen mit eigenen Steinbrüchen und von einem mit ausländischem Material genommen. Dabei handelt es sich um die beiden Kaolingruben, um die Feldspatgrube und bei dem vierten Betrieb um einen Granitsteinbruch. Die spezifischen Aktivitäten der importierten Gesteine betrachten wir gesondert von den heimischen Graniten.

In den nachfolgenden beiden Abschnitten, präsentieren wir die Ergebnisse dieser Beprobungen.

### 3.3.2 Kaolin und Feldspat

Die untersuchten zwei Kaolin-Gruben und die Feldspatgrube befinden sich in der Oberpfalz. Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Filterstäube, Schlämme, aber auch um Sande und teilweise um das gewonnene Produkt. Bei der Kaolingewinnung fallen etwa 2.000 bis 3.000 t Staub

pro Jahr, etwa 1.000 bis 3.000 t Schlamm pro Jahr mit 40 - 50 % Feststoffgehalt und 200.000 bis 300.000 t Abraum pro Jahr an. Beim Feldspatabbau fallen ca. 70 t Staub pro Jahr und ca. 20.000 t Abraum pro Jahr an, der zu Schotter verarbeitet wird.

In den Laboren des Landesamtes für Umwelt haben wir die Aktivitäten der Proben gamma-spektrometrisch ermittelt. Die Ergebnisse der drei untersuchten Gruben sind in den folgenden Tab. 37 a) und b) dargestellt. Um die Anonymität der beiden Kaolingruben besser wahren zu können, haben wir die Ergebnisse der untersuchten Proben beider Kaolingruben gemittelt. Die untersuchten Betriebe bezeichnen wir im Folgendem mit a, b und c.

Tab. 37: Spezifische Aktivitäten der untersuchten Rückstandsproben der Kaolin- und Feldspatgruben

a) Kaolingruben (Betriebe a und b): über beide Betriebe gemittelte Werte ( $\pm$  Standardabweichung) für Feldspat-Filterstaub, Schlamm und Abraum

PROBE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]						
	Feldspat-Filterstaub	Schlamm (trocken)	Abraum	Quarz-Filterstaub	Quarzsand	Kaolinsand	Feldspat-Sand
Uran-Reihe							
Thorium-234	99 $\pm$ 28	64 $\pm$ 25	—	—	17 $\pm$ 11	—	—
Protactinium-234	143 $\pm$ 108	54 $\pm$ 35	—	—	—	—	—
Radium-226	244 $\pm$ 41	113 $\pm$ 14	18 $\pm$ 15	36 $\pm$ 13	29 $\pm$ 9	86 $\pm$ 15	20 $\pm$ 8
Blei-214	183 $\pm$ 18	66 $\pm$ 8	20 $\pm$ 2	23 $\pm$ 2	14 $\pm$ 1	49 $\pm$ 4	11 $\pm$ 1
Bismut-214	167 $\pm$ 16	59 $\pm$ 7	19 $\pm$ 2	21 $\pm$ 2	17 $\pm$ 3	43 $\pm$ 3	10 $\pm$ 1
Blei-210	147 $\pm$ 99	—	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe							
Actinium-228	456 $\pm$ 108	127 $\pm$ 30	31 $\pm$ 1	60 $\pm$ 4	25 $\pm$ 3	61 $\pm$ 5	16 $\pm$ 2
Radium-224	430 $\pm$ 80	132 $\pm$ 34	33 $\pm$ 3	49 $\pm$ 15	22 $\pm$ 6	61 $\pm$ 16	21 $\pm$ 7
Blei-212	449 $\pm$ 127	125 $\pm$ 32	30 $\pm$ 2	56 $\pm$ 4	25 $\pm$ 2	64 $\pm$ 5	16 $\pm$ 1
Bismut-212	482 $\pm$ 154	163 $\pm$ 42	39 $\pm$ 8	64 $\pm$ 9	32 $\pm$ 6	66 $\pm$ 9	18 $\pm$ 4
Thallium-208	416 $\pm$ 120	118 $\pm$ 31	28 $\pm$ 2	52 $\pm$ 4	23 $\pm$ 2	57 $\pm$ 4	15 $\pm$ 2
Weitere							
Kalium-40	1.522 $\pm$ 1008	656 $\pm$ 163	529 $\pm$ 208	949 $\pm$ 61	336 $\pm$ 23	399 $\pm$ 28	19 $\pm$ 4

## b) Feldspatgrube (Betrieb c)

PROBE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]				
	Feldspat-Filterstaub	Feldspat-Produkt	Gestein grau	Gestein braun	Porzellanscherbe
Uran-Reihe					
Thorium-234	393 ± 62	129 ± 34	127 ± 51	68 ± 30	79 ± 22
Protactinium-234	492 ± 137	224 ± 85	81 ± 80	—	—
Radium-226	475 ± 139	153 ± 74	108 ± 97	113 ± 18	190 ± 20
Blei-214	451 ± 28	153 ± 10	119 ± 9	51 ± 4	107 ± 7
Bismut-214	395 ± 25	137 ± 9	101 ± 7	47 ± 3	99 ± 7
Blei-210	372 ± 149	—	—	—	86 ± 40
Thorium-Reihe					
Actinium-228	26 ± 5	10 ± 5	65 ± 6	59 ± 5	109 ± 8
Radium-224	—	—	70 ± 43	50 ± 17	101 ± 24
Blei-212	27 ± 3	7 ± 1	72 ± 12	64 ± 5	109 ± 8
Bismut-212	—	—	71 ± 12	77 ± 11	127 ± 14
Thallium-208	23 ± 4	5 ± 2	63 ± 5	58 ± 4	104 ± 7
Weitere					
Kalium-40	1.260 ± 85	1.220 ± 80	2.040 ± 150	710 ± 50	755 ± 50

Deutlich ist zu erkennen, dass vor allem die feldspathaltigen Rückstände höhere spezifische Aktivitäten aufweisen als die quarzhaltigen. Bei den Betrieben a und b zeigt der Mittelwert des feldspathaltigen Filterstaubs spezifische Aktivitäten um die 150 Bq/kg für die Nuklide der Uran-Reihe und bis zu 450 Bq/kg für die Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe. Der trockene Schlamm ergab für beide Betriebe spezifische Aktivitäten von 70 Bq/kg für die Uran-Reihe und von 130 Bq/kg für die Thorium-Reihe. Dies ist auf den Anteil an Feldspat im Schlamm zurückzuführen. Die restlichen Proben liefern spezifische Aktivitäten deutlich unter 100 Bq/kg. Dabei handelt es sich beim Kaolinsand, Quarzsand und feldspathaltigen Sand nicht um Rückstände, sondern um Produkte.

Betrieb c zeigt wiederum im Filterstaub spezifische Aktivitäten um 400 Bq/kg für die Nuklide der Uran-Zerfallsreihe, im Feldspat-Produkt dagegen nur 150 Bq/kg. Dies deutet auf eine Anreicherung der Nuklide der Uran-Reihe im Filterstaub hin. Das Ausgangsgestein (grau) und die Porzellanscherben (hergestellt aus dem Feldspat-Produkt) weisen spezifische Aktivitäten um 100 Bq/kg für die Uran-Reihe auf. Bis auf die Porzellanscherben ergaben alle Proben Werte für die Nuklide der Thorium-Reihe unter 100 Bq/kg. Die Porzellanscherben sind nicht als Rückstand gemäß StrlSchV einzustufen.

Von allen untersuchten Proben zeigen alle feldspathaltigen Rückstände ebenfalls hohe spezifische Aktivitäten für das Kalium-40, was auf den Kalium-Anteil in den Feldspäten (chem. Formel  $KAlSi_3O_8$ ) zurückzuführen ist.

Für eine Verwertung oder Beseitigung der Rückstände gemäß Strahlenschutzverordnung [1] gelten die in Anlage XII, Teil B StrlSchV (Tab. 30, S. 47) genannten Überwachungsgrenzwerte. Die feldspathaltigen Rückstände überschreiten den Überwachungsgrenzwert von 200 Bq/kg (feldspathaltige Rückstände aller drei Betriebe). Eine Ablagerung dieser Rückstände auf dem Gelände der Betriebe ist nur dann weiterhin möglich, wenn gewährleistet werden kann, dass im Einzugsbereich eines nutzbaren Grundwasservorkommens bei der Deponierung oder Verwertung keine Fläche von mehr als 1 Hektar mit Nebengestein belegt wird. Die übrigen Rückstände unterschreiten alle in Anlage XII, Teil B StrlSchV aufgeführten Überwachungsgrenzwerte und gelten somit nicht als Rückstände im Sinne der §§ 97 bis 102 StrlSchV [1]. Das oben beschriebene wird in der Abb. 19 noch einmal verdeutlicht.

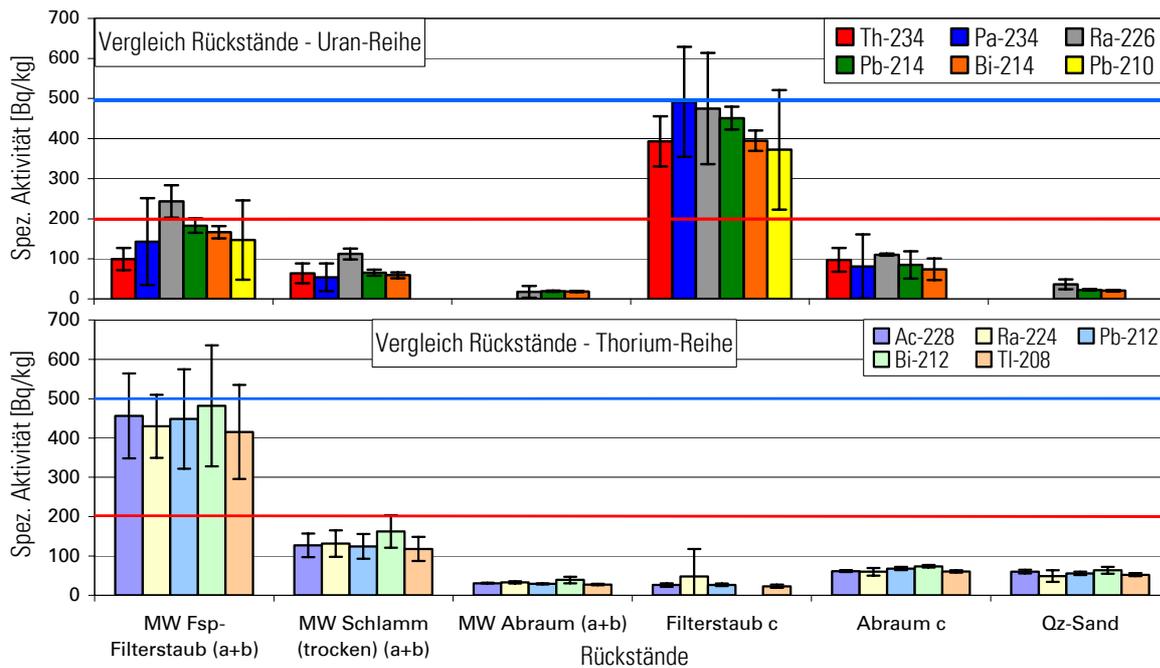


Abb. 19: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Rückstände der Kaolingruben (Betriebe a und b) und der Feldspatgrube (Betrieb c); rote und blaue Linien: Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B der StrlSchV [1]; Qz: Quarz, Fsp: Feldspat; MW = Mittelwert

### 3.3.2.1 Bestimmung der effektiven Dosis und Organdosis

Mit den spezifischen Aktivitäten der Feldspat-Filterstäube, der Atemrate, der Staubkonzentration und den Dosiskoeffizienten für unterschiedliche Organe und des gesamten Körpers (effektiv) [69], berechneten wir die effektive Dosis und einzelne Organdosen an den Arbeitsplätzen. Dabei haben wir eine Atemrate von  $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$  und eine Arbeitszeit von 2.000 Stunden pro Kalenderjahr verwendet. Die effektive Jahresdosis haben wir nach den Berechnungsgrundlagen Bergbau [70] bestimmt.

Für die Bestimmung der Staubkonzentration haben wir in Betrieb c ein Staubsammler aufgestellt und etwa 1 Stunde die freiwerdende Staubkonzentration gemessen. Es ergab sich eine Staubkonzentration von  $6,48 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Ansonsten verwendeten wir die als Grenzwerte definierten Staubkonzentrationen (sog. MAK-Werte = **M**aximale **A**rbeitsplatz**k**onzentration) von  $3$  und  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$  zur Berechnung der Dosiswerte [71]. In Tab. 38, 39 und 40 präsentieren wir die berechneten Werte für die effektive Dosis und für zwei Organdosen der untersuchten drei Betriebe. Als effektive Dosis wird die Summe der gewichteten Organdosen in verschiedenen Geweben und Organen des Körpers durch äußere oder innere Strahlenexposition bezeichnet (§ 3 StrlSchV [1]).

Die Grenzwerte für die Organdosis liegen bei  $300 \text{ mSv}/\text{a}$  (Knochenoberfläche),  $150 \text{ mSv}/\text{a}$  (Lunge) und  $20 \text{ mSv}/\text{a}$  (Effektivdosis) (§ 55 und 95 Abs. 4 StrlSchV [1]) für beruflich strahlenexponierte Personen. Da aber gemäß § 95 als effektive Dosis ein Eingreifwert von  $6 \text{ mSv}/\text{a}$  an Arbeitsplätzen gilt, haben wir die Organdosisgrenzwerte auch auf diese  $6 \text{ mSv}/\text{a}$  bezogen. Deshalb ergeben sich Organdosisgrenzwerte von  $90 \text{ mSv}/\text{a}$  (Knochenoberfläche) und  $45 \text{ mSv}/\text{a}$  (Lunge).

Für eine Grenzwertbetrachtung dürfen die Effektivdosis den Grenzwert von  $6 \text{ mSv}/\text{a}$  an Arbeitsplätzen und  $1 \text{ mSv}/\text{a}$  für Einzelpersonen der Bevölkerung und die Organdosen ein Zehntel des Organdosisgrenzwertes ( $9 \text{ mSv}/\text{a}$  für die Knochenoberfläche bzw.  $4,5 \text{ mSv}/\text{a}$  für die Lunge) nicht überschreiten.

Tab. 38: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die Kaolingruben (Betriebe a und b) und für die Feldspatgrube (Betrieb c); Staubkonzentration = 6,48 mg/m<sup>3</sup> (gemessen in Betrieb c); MW = Mittelwert Feldspat-Filterstaub der Kaolingruben (Betriebe a und b); ET = extrathoracic (engl.)

BETRIEB	ORGANDOSIS [mSv/a]		EFFEKTIVE JAHRESDOSIS [mSv]	
	Knochenoberfläche	ET Luftwege	innere	äußere
MW a und b	0,24	0,10	0,17	0,23
c	0,51	0,10	0,04	0,20

Tab. 39: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die Kaolingruben (Betriebe a und b) und für die Feldspatgrube (Betrieb c); Staubkonzentration = 10 mg/m<sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den einatembaren Staubanteil (E); seit 01. April 2004 [71]); MW = Mittelwert Feldspat-Filterstaub der Kaolingruben (Betriebe a und b); ET = extrathoracic (engl.)

BETRIEB	ORGANDOSIS [mSv/a]		EFFEKTIVE JAHRESDOSIS [mSv]	
	Knochenoberfläche	ET Luftwege	innere	äußere
MW a und b	0,31	0,16	0,25	0,23
c	0,66	0,16	0,06	0,20

Tab. 40: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die Kaolingruben (Betriebe a und b) und für die Feldspatgrube (Betrieb c); Staubkonzentration = 3 mg/m<sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den alveolengängigen Staubanteil (A) [71]); MW = Mittelwert Feldspat-Filterstaub der Kaolingruben (Betriebe a und b); ET = extrathoracic (engl.)

BETRIEB	ORGANDOSIS [mSv/a]		EFFEKTIVE JAHRESDOSIS [mSv]	
	Knochenoberfläche	ET Luftwege	innere	äußere
MW a und b	0,17	0,05	0,08	0,23
c	0,36	0,05	0,02	0,20

Die effektiven Dosen liegen bei allen drei Betrieben unterhalb der 6 mSv/a bzw. 1 mSv/a (Summe aus innerer und äußerer Dosis). Die Organdosiswerte liegen unterhalb der o.g. Grenzwerte und überschreiten auch nicht ein Zehntel des Organdosisgrenzwertes. Da die effektiven Dosen den Grenzwert von 1 mSv/a nicht überschreiten, sind keine weiteren Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung von den untersuchten Betrieben vorzunehmen.

### 3.3.3 Granit

Die untersuchten granitverarbeitenden Betriebe haben wir in den Raum Bayerischer Wald und in den Raum Oberpfälzer Wald/Fichtelgebirge eingeteilt und betrachten diese gesondert. Zunächst möchten wir die spezifischen Aktivitäten des Ausgangsmaterials und der Rückstände einheimischer Granite vorgestellt. Gesondert werden dann die importierten Granite betrachtet. Um die Betriebe zu anonymisieren, haben wir diese im weiteren Verlauf mit den großen Buchstaben A bis V gekennzeichnet.

Es ist schwer Aussagen über Rückstandsmengen zu erhalten, da diese von den Betrieben oft nicht erfasst werden. Die einzigen erhältlichen Zahlen für Schlamm belaufen sich auf 3 bis 450.000 t/a und Staub auf etwa 5 t/a. Meistens wird der Staub als Produktbestandteil zum gebrochenen Sand dazugegeben. Abraum beträgt je nach Größe des Steinbruchs etwa 1.800 bis 40.000 t/a.

### 3.3.3.1 Bayerischer Wald

Insgesamt nahmen wir Proben von 14 gesteinsverarbeitenden Betrieben (Betriebe B bis O) im Bayerischen Wald, die fast ausschließlich Material aus eigenen Steinbrüchen verwenden. Neben Rückständen wie Filterstäuben und Schlämmen, haben wir in den granitverarbeitenden Betrieben auch das Ausgangsgestein beprobt und analysiert. Da es sich hierbei um sehr viele Proben handelt, wird in Tab. 41 nur die Bandbreite der spezifischen Aktivitäten der einzelnen Nuklide (Minimal- und Maximalwert) für die verschiedenen Proben angegeben. Eine ausführliche Zusammenstellung der spezifischen Aktivitäten aller analysierten Proben findet sich im Anhang C.

Tab. 41: Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten des Ausgangsmaterials, von Filterstäuben, von Schlämmen und von Abraum aus dem Bayerischen Wald; n = Anzahl der Proben

NUKLIDE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]			
	Gestein n = 22	Filterstaub n = 14	Schlamm n = 8	Abraum n = 2
Uran-Reihe				
Thorium-234	33 - 360	30 - 110	40 - 90	40 - 80
Radium-226	50 - 290	30 - 120	40 - 120	40 - 90
Blei-214	30 - 290	30 - 110	40 - 120	30 - 90
Bismut-214	30 - 260	30 - 110	40 - 120	30 - 80
Blei-210	50 - 80	—	—	—
Thorium-Reihe				
Actinium-228	40 - 280	40 - 110	40 - 70	50 - 90
Radium-224	40 - 280	—	—	—
Blei-212	40 - 300	40 - 120	50 - 70	50 - 100
Bismut-212	40 - 310	40 - 130	50 - 80	60 - 100
Thallium-208	20 - 100	10 - 40	20	20 - 30
Weitere				
Uran-235	3 - 20	2 - 6	3 - 5	2 - 5
Kalium-40	600 - 1.800	900 - 1.400	800 - 1.100	130 - 990

Die Granite selbst zeigen eine deutliche Bandbreite in den spezifischen Aktivitäten der einzelnen Nuklide. Die Filterstäube weisen im Großen und Ganzen ähnliche oder niedrigere Aktivitäten als die Ausgangsgesteine auf. Da es sich um das gleiche Material handelt ist dies verständlich. Bei der Abreicherung in den spezifischen Aktivitäten kann es sich um eine Mittelung des Ausgangsgesteins handeln. Bei den untersuchten Gesteinsproben handelt es sich um Bruchstücke von etwa 15 x 15 cm<sup>2</sup> und es ist wahrscheinlich, dass Uran und Thorium im Granit nicht homogen verteilt ist. Die Schlämme liegen mit den spezifischen Aktivitäten ebenfalls im Bereich der Filterstäube, sind aber in den Thorium-Aktivitäten etwas erniedrigt. Dies ist möglicherweise auf einen Verdünnungseffekt durch das Wasser, welches beim Sägen der Gesteine verwendet wird, zurückzuführen. Der untersuchte Abraum hat teilweise deutlich niedrigere spezifische Aktivitäten als die Ausgangsgesteine, da es sich hierbei um eine Mischung aus Filterstäuben, Schlämmen und Erdreich handelt. Dennoch weisen weder die Filterstäube noch die Schlämme eine Überschreitung der Überwachungsgrenzen für Rückstände gemäß der Anlage XII, Teil B StrlSchV [1] auf. Die Granite selbst fallen nicht unter die Überwachungsgrenzwerte der Anlage XII, Teil B StrlSchV [1].

### 3.3.3.2 Fichtelgebirge und Oberpfälzer Wald

Im Fichtelgebirge beproben wir sechs gesteinsverarbeitende Betriebe (P, Q, S, T, U und V), dabei handelt es sich um zwei Betriebe mit eigenen Steinbrüchen (P und Q mit je zwei verschiedenen

Granitsorten) und vier Granitwerke, die fast ausschließlich importiertes Material verarbeiten (S bis V, wobei S auch zwei bayerische Granitsorten verarbeitet). Diese vier Granitwerke werden im Abschnitt 3.4.3.3 gesondert betrachtet.

Im Oberpfälzer Wald konnten wir nur einen Betrieb mit eigenem Steinbruch (A) und ein Granitwerk (R) untersuchen. Das Granitwerk importiert Gestein aus dem Ausland und hat keinen eigenen Steinbruch. Es verarbeitet auch zwei bayerische Granite aus dem Fichtelgebirge (Proben R1 und R2 stehen in Abb. 20 bis 23 bei FG = Fichtelgebirge). In Tab. 42 ist die Bandbreite der spezifischen Aktivitäten (Minimal-, Maximal- und Absolutwerte) der untersuchten Gesteins- und Rückstandsproben aus dem Fichtelgebirge und dem Oberpfälzer Wald zusammengefasst (nur aus bayerischen Graniten, Rückstände aus importierten Graniten siehe Abschnitt 3.4.3.3). Die spezifischen Aktivitäten der einzelnen Proben sind ausführlich im Anhang C dargestellt.

Tab. 42: Minimal-, Maximal- und Absolutwerte der spezifischen Aktivitäten des Ausgangsmaterials, von Filterstäuben und von Schlämmen aus dem Fichtelgebirge und dem Oberpfälzer Wald; n = Anzahl der Proben

NUKLIDE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]					
	Fichtelgebirge			Oberpfälzer Wald		
	Gestein n = 8	Filterstaub n = 6	Schlamm n = 1	Gestein n = 1	Filterstaub n = 1	Schlamm n = 1
Uran-Reihe						
Thorium-234	30 - 370	30 - 150	336 ± 31	220 ± 72	143 ± 28	67 ± 26
Radium-226	60 - 550	40 - 110	547 ± 132	463 ± 41	133 ± 68	93 ± 53
Blei-214	40 - 610	60 - 190	556 ± 33	181 ± 11	149 ± 9	107 ± 7
Bismut-214	40 - 530	60 - 180	513 ± 32	156 ± 10	138 ± 9	94 ± 6
Blei-210	330	150	338 ± 20	—	93 ± 43	—
Thorium-Reihe						
Actinium-228	1 - 120	60 - 80	52 ± 5	78 ± 6	71 ± 6	38 ± 3
Radium-224	20 - 110	40 - 70	66 ± 9	51 ± 37	72 ± 29	36 ± 12
Blei-212	1 - 130	70 - 80	55 ± 4	94 ± 7	70 ± 5	36 ± 3
Bismut-212	40 - 140	70 - 100	60 ± 12	90 ± 11	76 ± 12	38 ± 8
Thallium-208	1 - 60	20 - 30	19 ± 2	28 ± 2	22 ± 2	11 ± 1
Weitere						
Uran-235	10 - 30	4 - 15	29 ± 7	—	12 ± 4	6 ± 3
Kalium-40	50 - 2.100	1.130 - 1.280	880 ± 57	1.440 ± 90	1.210 ± 80	668 ± 45

Es zeigt sich, dass die Nuklide der Uran-Zerfallsreihe deutlich höhere spezifische Aktivitäten aufweisen als die Nuklide der Proben aus dem Bayerischen Wald. Für die Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe dagegen haben wir niedrigere spezifische Aktivitäten ermittelt. Von den Rückständen ergaben die Filterstaubproben vergleichbare Aktivitäten mit denen aus dem Bayerischen Wald. Die Schlammprobe aus dem Fichtelgebirge liegt mit den spezifischen Aktivitäten der Nukliden der Thorium-Zerfallsreihe im Bereich der Werte der Schlammproben aus dem Bayerischen Wald, die Aktivitätswerte der Nuklide der Uran-Zerfallsreihe sind dagegen um einen Faktor 10 höher verglichen mit den Proben aus dem Bayerischen Wald. Auch hier haben die Filterstäube und Schlämme ähnliche bzw. leicht erniedrigte spezifische Aktivitäten im Vergleich zu den Ausgangsgesteinen.

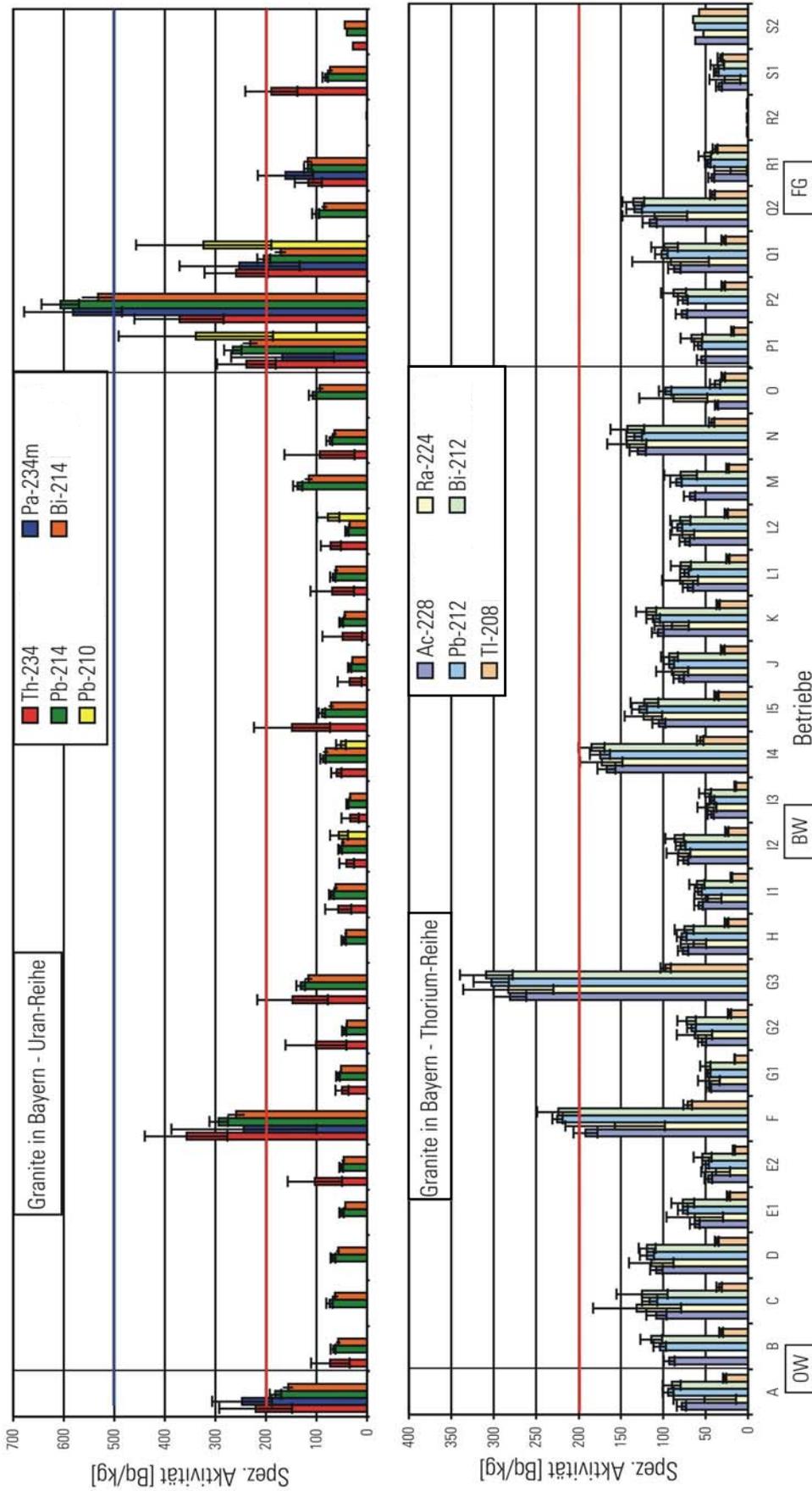


Abb. 20: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Gesteinsproben aus Bayern; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; mit Zahlen sind Proben eines Betriebes bezeichnet

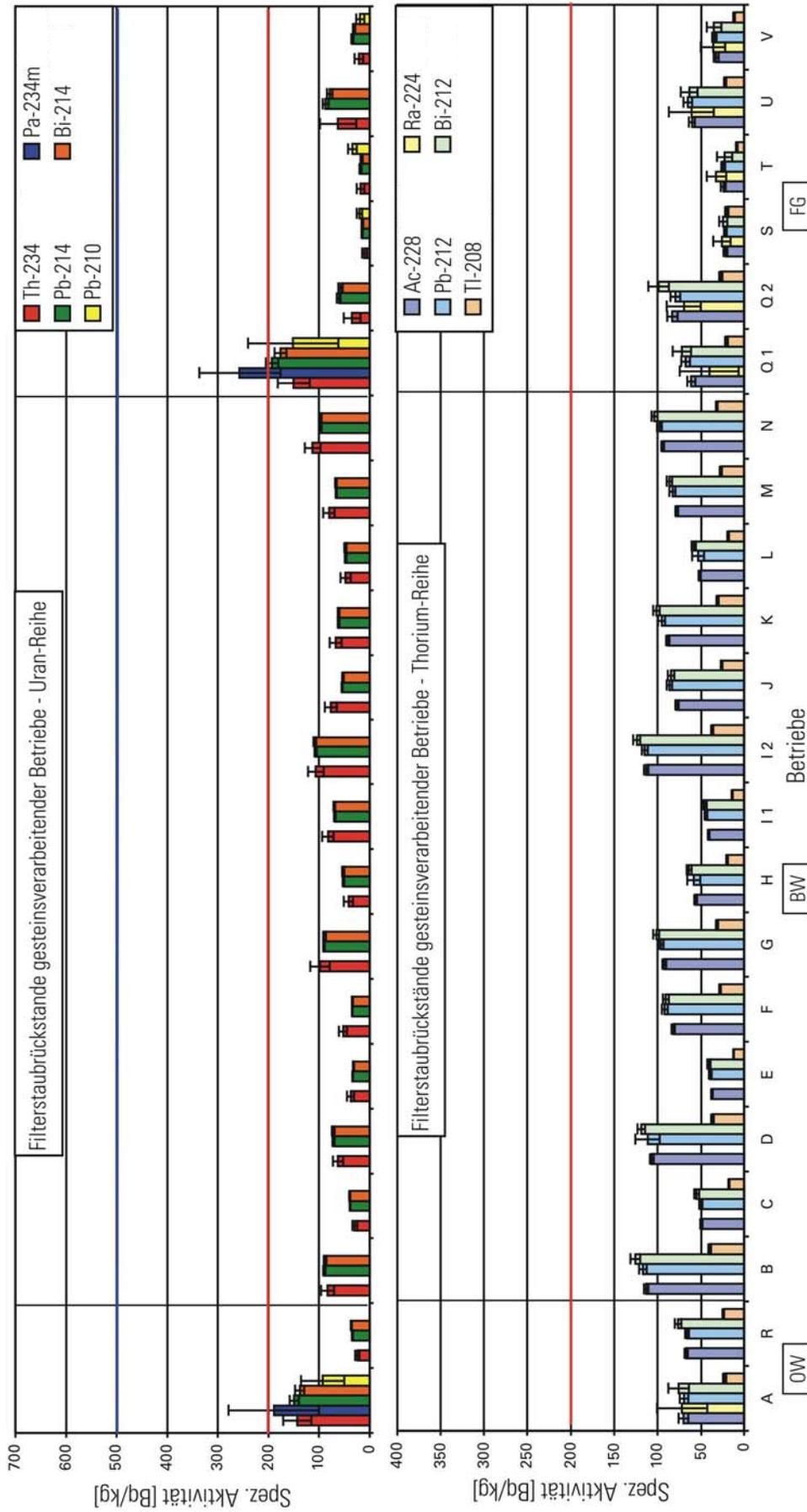


Abb. 21: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Filterstaubreückstände aus Bayern; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; I 1, I 2 und Q 1 und Q 2 = Filterstäube aus zwei unterschiedlichen Steinbrüchen desselben Betriebes

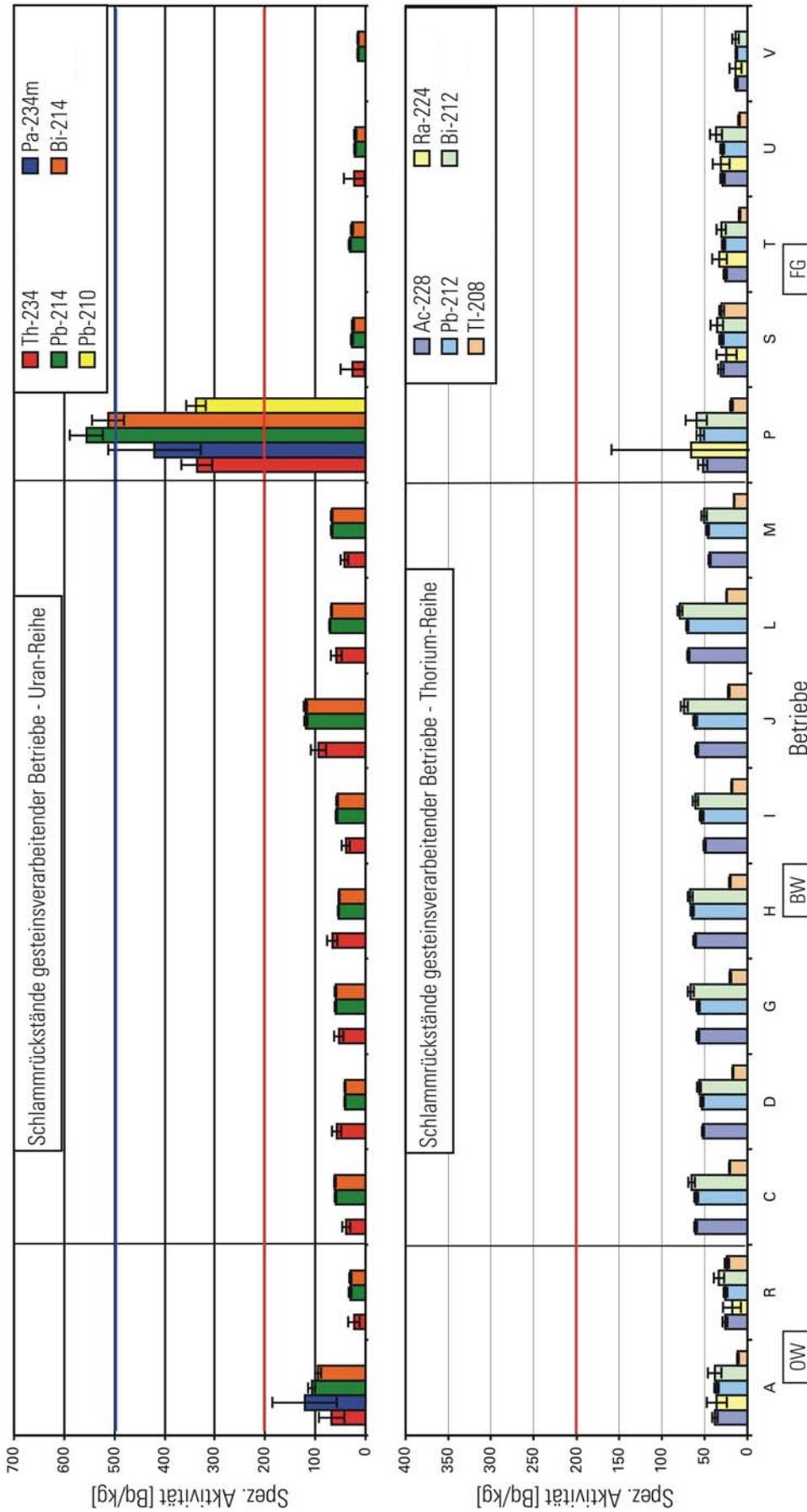


Abb. 22: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Schlammrückstände aus Bayern; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StriSchV [1]

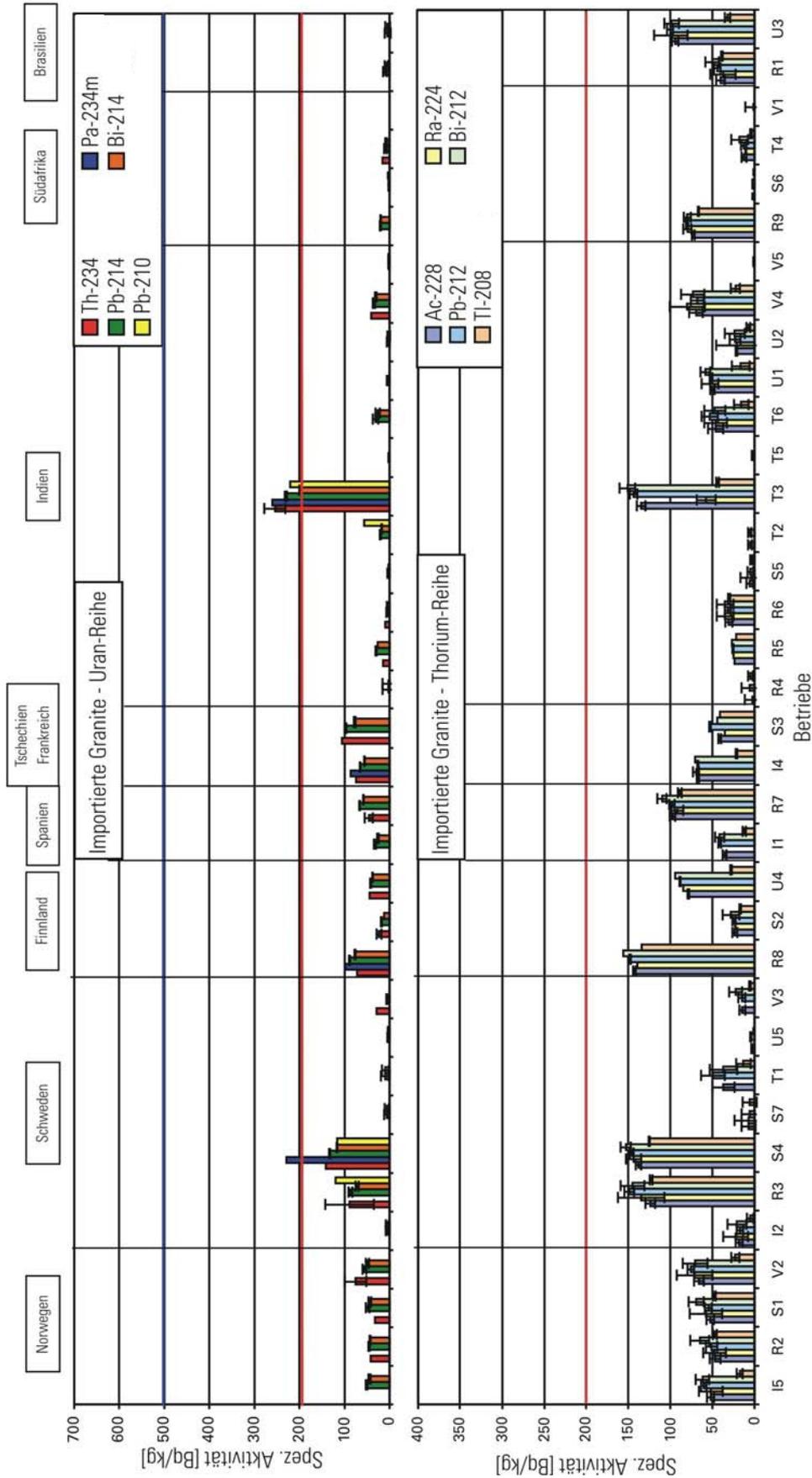


Abb. 23: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide des importierten Gesteinsmaterials; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; mit Zahlen sind Proben eines Betriebes bezeichnet

Die Abb. 20, 21 und 22 verdeutlichen das auf den Seiten 59 und 60 beschriebene anhand von Diagrammen der spezifischen Aktivitäten der untersuchten Gesteine und Rückstandsproben aus den verschiedenen Gebieten. Deutlich ist zu erkennen, dass sich die spezifischen Aktivitäten der einzelnen Nuklide der Uran- bzw. der Thorium-Zerfallsreihe im radioaktiven Gleichgewicht befinden. Nur Thallium-208 befindet sich weder in den Ausgangsgesteinen noch in den Rückständen im radioaktiven Gleichgewicht mit den übrigen Nukliden der Thorium-Reihe. Außerdem sind in die Abbildungen die Überwachungsgrenzen von 200 bzw. 500 Bq/kg eingetragen. Von den Ausgangsgesteinen überschreiten einige Proben sowohl in der Uran- als auch in der Thorium-Reihe den Grenzwert von 200 Bq/kg, eine Probe des Betriebes P überschreitet sogar den Grenzwert von 500 Bq/kg. Da es sich aber hierbei um die Produkte und nicht um Rückstände handelt sind diese Überschreitungen unerheblich. Von den Filterstäuben und Schlämmen überschreiten nur zwei Proben (Betriebe Q (Filterstaub) und P (Schlamm)) den Grenzwert von 200 Bq/kg. Beide Betriebe befinden sich im Fichtelgebirge. Eine Ablagerung dieser Rückstände auf dem Gelände der Betriebe ist nur dann möglich, wenn gewährleistet werden kann, dass im Einzugsgebiet eines nutzbaren Grundwasservorkommens bei der Deponierung keine Fläche von mehr als 1 Hektar mit Nebengestein, sprich Rückständen, belegt wird.

### 3.3.3.3 Importiertes Gesteinsmaterial

Sowohl im Bayerischen Wald, dem Oberpfälzer Wald als auch besonders im Fichtelgebirge werden Granite und anderes Gesteinsmaterial aus dem Ausland importiert und verarbeitet. In den Tab. 43 a), b) und c) ist die Bandbreite der spezifischen Aktivitäten (Minimal-, Maximal- und Absolutwerte) der untersuchten Gesteinsproben und der Rückstände aus den verschiedenen Granitwerken im ostbayerischen Raum zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass die meisten untersuchten Proben (sowohl Gesteinsproben, als auch Filterstäube und Schlämme) im Mittel spezifische Aktivitäten unter 100 Bq/kg aufweisen (siehe auch Abb. 23).

In den Abb. 21 und 22 für die Filterstäube und die Schlämme sind zusätzlich die Rückstände von Granitwerken, die fast ausschließlich importiertes Material verarbeiten, miteingezeichnet. Die Betriebe mit den Ziffern I, R, S, T, U und V importieren Gesteinsblöcke aus dem Ausland und verarbeiten diese in den Betrieben (Anfallen von Filterstäuben und Schlämmen). Der Betrieb R befindet sich im Oberpfälzer Wald, der Betrieb I im Bayerischen Wald und die Betriebe S, T, U und V im Fichtelgebirge. Die Granite werden vornehmlich aus Skandinavien (Schweden, Norwegen und Finnland), Brasilien, Indien und Südafrika, aber auch Spanien, Frankreich und Tschechien importiert. Die Ausgangsgesteine überschreiten bis auf zwei Proben nicht die Überwachungsgrenze von 200 Bq/kg. Die spezifischen Aktivitäten der Nuklide der Rückstände importierter Gesteine liegen teilweise deutlich unterhalb denen der heimischen Granite und spiegeln eine Mischung aus den Aktivitäten der Ausgangsgesteine wider. Die spezifischen Aktivitäten der importierten Gesteine sind in der Abb. 23 dargestellt. Dabei sind die Gesteine nach europäischen und nicht-europäischen Importländern sortiert.

Tab. 43: Minimal-, Maximal- und Absolutwerte der spezifischen Aktivitäten von importiertem Gesteinsmaterial; n = Anzahl der Proben

a)

NUKLIDE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]					
	Norwegen n = 4	Schweden n = 7	Finnland n = 3	Spanien n = 2	Tschechien n = 1	Frankreich n = 1
Uran-Reihe						
Thorium-234	30 - 80	30 - 140	20 - 70	50	75 ± 24	106 ± 31
Radium-226	80 - 110	9 - 100	30 - 100	60 - 110	63 ± 37	195 ± 20
Blei-214	50 - 60	4 - 130	20 - 90	30 - 70	65 ± 4	98 ± 6
Bismut-214	40 - 50	3 - 120	10 - 80	30 - 60	56 ± 4	77 ± 5
Blei-210	—	120	—	—	—	—
Thorium-Reihe						
Actinium-228	50 - 70	2 - 140	20 - 140	40 - 100	67 ± 5	41 ± 4
Radium-224	50 - 70	7 - 140	20 - 140	90	69 ± 15	35 ± 20
Blei-212	50 - 80	4 - 150	20 - 150	40 - 100	67 ± 4	53 ± 4
Bismut-212	60 - 70	1 - 150	30 - 160	40 - 110	70 ± 8	44 ± 9
Thallium-208	20 - 50	5 - 130	20 - 130	10 - 90	21 ± 1	41 ± 3
Weitere						
Uran-235	—	10	—	—	5 ± 2	—
Kalium-40	800 - 1.200	300 - 1.300	900 - 1.300	560 - 1.300	763 ± 50	899 ± 58

b)

NUKLIDE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]		
	Indien n = 12	Südafrika n = 4	Brasilien n = 2
Uran-Reihe			
Thorium-234	9 - 260	20	—
Radium-226	5 - 240	10 - 40	1
Blei-214	2 - 230	3 - 20	4 - 10
Bismut-214	2 - 200	2 - 20	4 - 7
Blei-210	60 - 220	4	—
Thorium-Reihe			
Actinium-228	3 - 140	2 - 70	40 - 90
Radium-224	4 - 80	10 - 80	40 - 100
Blei-212	1 - 140	1 - 80	40 - 100
Bismut-212	30 - 150	20 - 80	50 - 100
Thallium-208	2 - 40	1 - 70	30 - 40
Weitere			
Uran-235	3 - 20	—	—
Kalium-40	300 - 1.700	50 - 1.400	800 - 1.300

## c) Rückstände importierter Granite in ostbayerischen Granitwerken

NUKLIDE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]					
	Filterstaub			Schlamm		
	Bayerischer Wald n = 1	Oberpfälzer Wald n = 1	Fichtelgebirge n = 4	Bayerischer Wald n = 1	Oberpfälzer Wald n = 1	Fichtelgebirge n = 4
Uran-Reihe						
Thorium-234	83 ± 11	24 ± 5	10 - 60	39 ± 8	23 ± 11	20 - 30
Radium-226	62 ± 5	36 ± 8	2 - 200	49 ± 12	62 ± 11	4 - 50
Blei-214	69 ± 1	35 ± 1	20 - 90	58 ± 2	31 ± 2	20 - 30
Bismut-214	70 ± 2	36 ± 1	10 - 80	56 ± 2	30 ± 2	20 - 30
Blei-210	—	—	20 - 30	—	—	—
Thorium-Reihe						
Actinium-228	41 ± 1	67 ± 2	20 - 60	50 ± 1	26 ± 3	10 - 30
Radium-224	—	—	30 - 60	—	18 ± 11	10 - 30
Blei-212	44 ± 2	66 ± 2	20 - 70	53 ± 2	26 ± 2	10 - 30
Bismut-212	45 ± 2	77 ± 4	20 - 60	61 ± 3	33 ± 6	10 - 40
Thallium-208	14 ± 1	24 ± 1	8 - 20	18 ± 1	24 ± 2	10 - 30
Weitere						
Uran-235	4,3 ± 0,2	—	—	4 ± 1	—	—
Kalium-40	999 ± 49	730 ± 21	600 - 900	660 ± 20	478 ± 32	300 - 600

**3.3.3.4 Bestimmung der effektiven Dosis und Organdosis**

Auch hier konnten wir mit den spezifischen Aktivitäten der Filterstäube, der Atemrate, der Staubkonzentration und den Dosiskoeffizienten für unterschiedliche Organe und des gesamten Körpers (effektiv) [69] die effektive Dosis und einzelne Organdosen berechnen. Dabei haben wir eine Atemrate von 1,2 m<sup>3</sup>/h und eine Arbeitszeit von 2.000 Stunden pro Kalenderjahr verwendet. Die effektive Jahresdosis haben wir auch bei den Graniten nach den Berechnungsgrundlagen Bergbau [70] bestimmt.

Als Staubkonzentration haben wir die in einem Granitwerk gemessene Staubkonzentration (6,69 mg/m<sup>3</sup>) bzw. die als Grenzwerte definierten Staubkonzentrationen (sog. MAK-Werte = **M**aximale **A**rbeitsplatzkonzentration) von 3 und 10 mg/m<sup>3</sup> zur Berechnung der Dosiswerte herangezogen [71].

In Tab. 44 präsentieren wir die berechneten Werte für die effektive und Organdosis der untersuchten Betriebe bei einer Staubkonzentration von 6,69 und 10 mg/m<sup>3</sup>. Bei der weiteren verwendeten Staubkonzentration handelt es sich um den allgemeinen Staubgrenzwert für den alveolengängigen Staubanteil (A) = 3 mg/m<sup>3</sup> [71]. Diese Konzentration ist deutlich kleiner als die gemessene Staubkonzentration von 6,69 mg/m<sup>3</sup>. Deshalb sind auch die inneren effektiven Dosen kleiner als die in Tab. 44 angegebenen.

Die Grenzwerte für die Organdosis sind dieselben, wie die, die im Abschnitt 3.3.2.1 vorgestellt wurden. Bei der Grenzwertbetrachtung liegen die effektiven Dosen (Summe aus innerer und äußerer Dosis) bei allen untersuchten Betrieben unterhalb 6 mSv/a an Arbeitsplätzen bzw. 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung. Die Organdosiswerte liegen unterhalb der genannten Grenzwerte und überschreiten auch nicht ein Zehntel des Organdosisgrenzwertes.

Tab. 44: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die untersuchten Betriebe; Staubkonzentration = 6,69 mg/m<sup>3</sup> (gemessen) bzw. 10 mg/m<sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den einatembaren Staubanteil (E); seit 01. April 2004 [71]); I 1, 2 und Q 1, 2: Filterstäube stammen von demselben Betrieb, nur von einem anderen Bruch; bei den Betrieben O und P fallen keine Filterstäube an; ET = extrathoracic (engl.)

BETRIEB	ORGANDOSIS [mSv/a]		INNERE EFFEKTIVE JAHRESDOSES [mSv]	ORGANDOSIS [mSv/a]		INNERE EFFEKTIVE JAHRESDOSES [mSv]	ORTSDOSIS-LEISTUNG [μSv/h]
	Knochenoberfläche	ET Luftwege		Knochenoberfläche	ET Luftwege		
	Staubkonzentration = 6,69 mg/m <sup>3</sup>			Staubkonzentration = 10 mg/m <sup>3</sup>			
A	0,15	0,04	0,03	0,18	0,06	0,05	0,2 - 0,3
B	0,06	0,02	0,05	0,06	0,04	0,07	0,1 - 0,2
C	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,1 - 0,15
D	0,05	0,02	0,04	0,05	0,03	0,06	0,08 - 0,12
E	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,08 - 0,15
F	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,05	0,08 - 0,12
G	0,05	0,02	0,04	0,06	0,03	0,06	0,08 - 0,1
H	0,13	0,11	0,02	0,13	0,12	0,03	0,1 - 0,15
I 1	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,03	0,1 - 0,15
I 2	0,07	0,03	0,05	0,08	0,04	0,07	—
J	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,05	0,03 - 0,1
K	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,05	0,08 - 0,12
L	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,1 - 0,2
M	0,04	0,02	0,03	0,05	0,03	0,05	0,1 - 0,15
N	0,06	0,02	0,04	0,07	0,04	0,06	0,1 - 0,15
Q 1	0,19	0,03	0,03	0,25	0,05	0,05	0,2 - 0,3
Q 2	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,05	0,2 - 0,3
R	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,04	0,1 - 0,12
S	0,02	0,004	0,01	0,03	0,01	0,01	0,05
T	0,04	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02	0,07 - 0,1
U	0,07	0,04	0,03	0,09	0,07	0,04	0,1 - 0,15
V	0,04	0,02	0,01	0,05	0,03	0,02	0,2 - 0,3

In einem weiteren Schritt verwendeten wir die von der Steinbruch-Berufsgenossenschaft ermittelten Staubkonzentrationen zur Bestimmung der Effektivdosis bzw. Organdosis. Dazu haben wir zunächst eine schriftliche Einverständniserklärung der einzelnen Betriebe eingeholt, diese Staubkonzentrationen verwenden zu dürfen. Sechs Betriebe aus der Granitverarbeitung haben sich damit einverstanden erklärt. Die Ergebnisse sind in der Tab. 45 aufgelistet.

Tab. 45: Berechnete Körperdosis und Organdosis für sechs Betriebe; Staubkonzentration aus aktuellen Staubuntersuchungen der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft in diesen Betrieben; für die Betriebe mit den grau hinterlegten Zellen gibt es keine Staubkonzentration für die einatembare Fraktion; ET = extrathoracic (engl.)

BETRIEB	ORGANDOSIS [mSv/a]		INNERE EFFEKTIVE JAHRESDOSES [mSv]	ORGANDOSIS [mSv/a]		INNERE EFFEKTIVE JAHRESDOSES [mSv]	ORTSDOSISLEISTUNG [ $\mu$ Sv/h]
	Knochenoberfläche	ET Luftwege		Knochenoberfläche	ET Luftwege		
D	Staubkonzentration = 0,57 mg/m <sup>3</sup> alveolengängiger Feinstaub						0,08 - 0,12
	0,04	0,002	0,004				
G	Staubkonzentration = 0,44 mg/m <sup>3</sup> alveolengängiger Feinstaub			Staubkonzentration = 1,96 mg/m <sup>3</sup> einatembare Fraktion			0,08 - 0,1
	0,04	0,002	0,004	0,04	0,007	0,012	
H	Staubkonzentration = 0,3 mg/m <sup>3</sup> alveolengängiger Feinstaub						0,1 - 0,15
	0,02	0,001	0,002				
I a	Staubkonzentration = 1,18 mg/m <sup>3</sup> alveolengängiger Feinstaub						0,1 - 0,15
	0,03	0,003	0,004				
I b	Staubkonzentration = 0,94 mg/m <sup>3</sup> alveolengängiger Feinstaub						—
	0,05	0,004	0,008				
J	Staubkonzentration = 9,75 mg/m <sup>3</sup> alveolengängiger Feinstaub						0,03 - 0,1
	0,04	0,02	0,04				
T	Staubkonzentration = 0,18 mg/m <sup>3</sup> alveolengängiger Feinstaub			Staubkonzentration = 0,25 mg/m <sup>3</sup> einatembare Fraktion			0,07 - 0,1
	0,016	0,0004	0,0007	0,017	0,0005	0,0008	

Auch mit den von der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft ermittelten Staubkonzentrationen für sechs Betriebe überschreiten die effektiven Dosen bei allen untersuchten Betrieben nicht den Richtwert von 1 mSv/a. Die Organdosiswerte liegen ebenfalls unterhalb der genannten Grenzwerte und überschreiten auch nicht ein Zehntel des Organdosisgrenzwertes. Auch hier unterschreitet die Summe aus der inneren und äußeren (ODL) effektiven Jahresdosis (Körperdosis) den in der Strahlenschutzverordnung [1] geforderten Richtwert von 1 mSv/a.

Die ermittelten Körperdosen sind teilweise noch geringer als berechnet, da sich bei den meisten gesteinsverarbeitenden Betrieben die Bereiche, bei denen der Filterstaub anfällt, in offenen Schuppen befinden und immer eine Absaugung an den Schleifgeräten vorhanden ist. Zudem ist die Arbeitszeit von 2.000 h/a etwas überschätzt, da in den Steinbrüchen üblicherweise nur von April bis Oktober/November gearbeitet wird.

Die Ortsdosisleistung (ODL) der Umgebung beträgt in den drei untersuchten Gebieten zwischen 0,1 und 0,2  $\mu$ Sv/h. In den Steinbrüchen der untersuchten Betriebe ist die ODL im Bayerischen Wald mit 0,08 - 0,15  $\mu$ Sv/h niedriger als im Oberpfälzer Wald und dem Fichtelgebirge mit 0,2 - 0,3  $\mu$ Sv/h (im Fichtelgebirge teilweise bis 0,5  $\mu$ Sv/h; dies ist aber abhängig von der Tiefe im Steinbruch). Reichelt et al. [64] gibt für das Fichtelgebirge Ortsdosisleistungen von 0,15 bis 0,34  $\mu$ Sv/h an, die sehr gut mit den in dieser Studie für das Fichtelgebirge ermittelten übereinstimmen. Auch Kemski et al. [68] haben für den ostbayerischen Raum Dosisleistungen im Mittel von 0,25  $\mu$ Sv/h berechnet. Für Magmatite erhalten Kemski et al. [68] Dosisleistungen von 0,2  $\mu$ Sv/h.

### 3.3.4 Fluorit

In Bayern befindet sich nördlich von Regensburg das sog. Nabburg-Wölsendorfer Flussspatrevier, in dem verschiedene Unternehmen Fluorit oder Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ) abgebaut haben. Zudem hat man um Wölsendorf Uranerze, wie Pechblende ( $\text{UO}_2$ ), Brannerit ( $(\text{U,Ca,Y,Ce})(\text{Ti,Fe})_2\text{O}_6$ ) und Coffinit ( $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ ) gefunden, die für erhöhte Radioaktivitätswerte verantwortlich waren. Die erhöhte Radioaktivität verfärbt den Flussspat dunkelviolett [72]. Die Grube Hermine war die letzte Grube im Flussspatrevier, die 1987 den Betrieb eingestellt hat. Vom Flussspatbergbau sind noch einige Halde zwischen Nabburg und Wölsendorf übriggeblieben.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens haben wir Spülsande aus der Verarbeitung von Fluorit von einer Halde in der Nähe von Wölsendorf näher untersucht. Diese Halde ist bereits rekultiviert, stark mit Bäumen und Büschen bewachsen und als Naturschutzgebiet ausgezeichnet (Abb. 24). Von Zeit zu Zeit holen Anwohner etwas Spülsand und verwenden diesen als Baustoff. Messungen dieser Spülsande haben spezifische Aktivitäten von bis zu 10.000 Bq/kg für Radium-226 ergeben. In Tab. 46 sind die Ergebnisse aller drei aus unterschiedlichen Höhen genommenen Proben aufgelistet (Abb. 25).



Abb. 24: Rekultivierte Halde mit Spülsanden aus der Fluoritaufbereitung

Die spezifischen Aktivitäten belegen deutlich den schon vor Ort mit dem Ortsdosisleistungsmessgerät und dem Kontamat gefundenen Trend, dass die unterste Probe die geringsten spezifischen Aktivitäten aufweist und die mittlere Probe die höchsten spezifischen Aktivitäten. Die oberste Probe liegt zwischen den beiden anderen. Der Trend ist dadurch zu erklären, dass die unteren Sande (nahe der Haldeunterkante) aus der Aufbereitung der obersten abgebauten Fluoritschichten stammen, die zudem wenig uranhaltige Minerale enthielten. Die mittlere Probe stammt von der Haldeoberkante und aus den am tiefsten abgebauten Fluoritschichten. Mit der Tiefe haben zusätzlich die uranhaltigen Minerale zugenommen. Die oberste Probe stammt aus einem Kamm aus Spülsanden, der wahrscheinlich zwischenzeitlich zur Ummantelung der Halde aufgeschüttet wurde und sich über der Haldeoberkante befindet. Anders können die spezifischen Aktivitäten, die zwischen den Proben der Haldeunterkante und -oberkante liegen, nicht erklärt werden.



Abb. 25: Probenahmeorte (weiße Punkte) der Spülsande

Tab. 46: Spezifische Aktivitäten von drei untersuchten Spülsand-Proben von einer rekultivierten Halde bei Wölsendorf; ODL = Ortsdosisleistung

NUKLID	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]		
	Spülsand		
	2 m Höhe	4 m Höhe	8 m Höhe
Uran-Zerfallsreihe			
Thorium-234	95,9 ± 65,3	265 ± 162	629 ± 245
Protactinium-234m	321 ± 145	762 ± 458	2.630 ± 404
Thorium-230	—	3.680 ± 1.600	—
Radium-226	579 ± 218	10.300 ± 804	1.690 ± 560
Blei-214	545 ± 47	9.500 ± 592	1.380 ± 96
Bismut-214	487 ± 24	8.480 ± 422	1.180 ± 93
Blei-210	—	2.040 ± 545	—
Thorium-Zerfallsreihe			
Actinium-228	18,7 ± 5,4	—	9,2 ± 5,3
Blei-212	14,9 ± 3,0	16,5 ± 7,8	10,5 ± 3,4
Thallium-208	5,98 ± 1,43	—	3,6 ± 1,4
Weitere			
Kalium-40	469 ± 39	421 ± 63	257 ± 38
Uran-235	19,6 ± 10,7	67,9 ± 38,4	96,5 ± 32,4
ODL	0,4 µSv/h	2 µSv/h	0,9 µSv/h
Kontamat	30 Zerfälle/s	150 Zerfälle/s	60-80 Zerfälle/s

Für eine Verwertung der Spülsande als Baustoff liegen die spezifischen Aktivitäten der untersuchten Proben deutlich über dem Überwachungsgrenzwert von 500 Bq/kg, der in der Strahlenschutzverordnung in der Anlage XII, Teil B, Nr. 2 (Tab. 30) [1] angegeben ist.

Untersuchungen der GSF 1986 [73] und 1987 [74] haben spezifische Aktivitäten von 200 bis 2.600 Bq/kg für Uran-238 und von 550 bis 20.000 Bq/kg für Radium-226 für Flotationsrückstände (feinkörniger Sand) der Grube Maria ergeben und sind mit unseren Ergebnissen vergleichbar. Bei diesen Flotationsrückständen handelt es sich aller Wahrscheinlichkeit nach um dieselben Sande der Halde, die von uns untersucht wurden. Die GSF gibt Ortsdosisleistungen von 0,4 bis 2,0 µSv/h

in einer Höhe von 1 m über dem Boden an. Unsere Messungen ergaben vergleichbare Werte (0,4 bis 2,0  $\mu\text{Sv/h}$  in etwa 1 m Höhe über dem Boden).

### 3.3.5 Fazit

Mit diesen Messungen konnten wir zeigen, dass bei der Verwertung oder Beseitigung von Rückständen gesteinsverarbeitender Betriebe die Grenzwerte von 1.000 Bq/kg bzw. 500 Bq/kg für überwachungsbedürftige Rückstände der Strahlenschutzverordnung [1] (bis auf den Filterstaub des kaolinabbauenden Betriebes b und den Schlammrückstand P aus dem Fichtelgebirge) nicht überschritten werden. Bis auf drei Filterstaubproben (Mittelwert kaolinabbauende Betriebe a und b (Feldspatfilterstaub), Betrieb c und granitverarbeitender Betrieb Qa) und eine Schlammprobe (granitverarbeitender Betrieb P) aus dem Fichtelgebirge unterschreiten die untersuchten Rückstände den Grenzwert von 200 Bq/kg bei der Verwertung und Beseitigung im Einzugsgebiet eines nutzbaren Grundwasserleiters. Damit wird gewährleistet, dass die effektive Dosis von 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung (§ 97 StrlSchV [1]) nicht überschritten wird.

Die ermittelten Körperdosen (Summe aus innerer und äußerer (ODL) effektiven Jahresdosis) an den Arbeitsplätzen, an denen die Rückstände anfallen, unterschreiten ebenfalls den Grenzwert von 1 mSv/a. Eine Überwachung der Rückstände aus den verschiedenen gesteinsverarbeitenden Betrieben ist nicht erforderlich, wenn bei der Beseitigung dieser gewährleistet werden kann, dass die Rückstände nicht im Einzugsgebiet eines nutzbaren Grundwasserleiters abgelagert werden. Eine Überwachung der Arbeitsplätze ist nicht notwendig, da die Körperdosen deutlich niedriger ausfallen als in den Tab. 44 und 45 angegeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Arbeitsplätze größtenteils in offenen Schuppen mit einer Absaugung an den Schleifgeräten befinden und die Arbeitszeit weniger als 2.000 h/a beträgt.

Die Ergebnisse der Rückstandsuntersuchungen haben wir den untersuchten Betrieben mitgeteilt und diese über notwendige Maßnahmen informiert.

## 3.4 Stäube und Schlämme bei der Primärverhüttung in der Roheisen- und Nichteisenmetallurgie

Im Jahr 2002 hat das einzige Stahlwerk in Bayern, welches Eisenerz zur Stahlgewinnung aufschmolz, geschlossen. Damit fallen in Bayern keine Stäube und Schlämme direkt aus Arbeiten zur Stahlgewinnung an. Übriggeblieben ist neben den Gebäuden des Stahlwerkes, auch eine Halde. Auf dieser Halde wurden ca. 10,8 Mio. Tonnen der unterschiedlichsten Materialstoffe, die in 18 Klassen untergliedert sind, deponiert. Das Deponieareal umfasst insgesamt eine Fläche von 21 ha [75]. Da es sich bei der Halde aber um eine Altlast und nicht um überwachungsbedürftige Rückstände gemäß Strahlenschutzverordnung handelt, besteht im Moment kein Handlungsbedarf hinsichtlich möglicher Grenzwertüberschreitungen der spezifischen Aktivitäten in den Haldenmaterialien. Bei den 18 Materialstoffen handelt es sich um Altgranulat oder Hochofenschlacke (neun verschiedene Hüttensande), um Hüttenschutt (eine Stoffklasse), um Stahlwerksschlacke (zwei Schlackearten), um Hochofenstückschlacke (drei Stoffklassen), um Gichtstaub und -schlämme (zwei Stoffklassen) und um Auffüllungen bzw. Umlagerungen (eine Stoffklasse).

Da es keine Primärverhüttung in Bayern mehr gibt, haben wir uns der Sekundärverhüttung in Bayern zugewandt. In Bayern gibt es mindestens drei Werke, die entweder Stahl, Aluminium oder Kupfer aus Schrott wiedereinschmelzen. Da der Schrott keine natürliche Radioaktivität aufweist, kommt diese bei der Sekundärverhüttung aus Strahlungsquellen, die mit dem Schrott entsorgt werden. Solch ein Ereignis tritt aber relativ selten ein und wird dem LfU oft aufgrund von Dosismessungen an den Eingängen zu den Werken angezeigt. Deshalb haben wir nur bei einem Werk

wegen einer Probenahme von Rückständen angefragt. Frau Dr.-Ing. Schulz-Klemp von der Abteilung Umwelttechnik des Stahlinstitut VDEh [76] hat uns mitgeteilt, dass bereits Untersuchungen zur Radioaktivität von anfallenden Rückständen durchgeführt wurden und keine weiteren erforderlich sind. Die Ergebnisse der o.g. Untersuchung hat uns Frau Dr.-Ing Schulz-Klemp zur Verfügung gestellt und diese präsentieren wir zusammen mit Literaturdaten [77] in der Tab. 47.

Tab. 47: Ergebnisse von Untersuchungen zu Schlacke und Stäuben aus der Stahlerzeugung und Literaturwerte [77]; es handelt sich um Mittelwerte von mehreren Messungen

PROBE	RADIUM-226 [Bq/kg]	THORIUM-232 [Bq/kg]	URAN-238 [Bq/kg]	BLEI-210 [Bq/kg]	KALIUM-40 [Bq/kg]
<b>Schlacke</b>					
Elektroofenschlacke	7,4 ± 0,6	4,0 ± 0,4	7,6 ± 3,2	≤ 3	7,2 ± 0,8
Hochofenschlacke	129,9	62,3	—	—	167,2
<b>Filterstaub</b>					
Probe 1	12,2 ± 1,6	16,8 ± 2,3	14,9 ± 1,8	16,1 ± 3,1	336 ± 33
Probe 2	17	10	—	108	927.000
<b>Schlamm</b>					
Hochofenschlamm	32	16,5	—	3.320	—

Deutlich ist zu sehen, dass bis auf die spezifische Aktivität von Blei-210 des Hochofenschlammes alle Rückstände die Überwachungsgrenzwerte aus der Anlage XII, Teil B Strahlenschutzverordnung deutlich unterschreiten.

Im Abschnitt 3.6 „Rückstände aus der Kohleverbrennung“ präsentieren wir weitere Schlacken und Filterstäube aus Kraftwerken.

### 3.5 Rückstände aus der Feuerfest- und Gießerei-Industrie

In der Anlage XII, Teil A Abs. b) StrSchV [1] werden als überwachungsbedürftige Rückstände Formstücke aus den auf Seite 47 aufgeführten Materialien genannt. Hauptbestandteil solcher Formstücke ist sehr oft Zirkon bzw. Zirkonoxid als Formsand. Dieser wird nicht explizit in Anlage XII, Teil A StrSchV [1] genannt, kann aber Spuren der radioaktiven Isotope Uran-235, Uran-238 und Thorium-232 (von 10 ppm bis zu 5 Gewichtsprozent) enthalten [78]. Wir haben in verschiedenen Unternehmen in Bayern angefragt, ob diese Zirkonsand oder Zirkon als Formsand in Gießereien oder zur Herstellung von keramischen Teilen verwenden. Einige Betriebe haben wir um Proben des Zirkons, eines Produktes oder um Ofenausbruch als Feuerfestmaterial gebeten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in den nächsten Teilabschnitten vorgestellt.

#### 3.5.1 Zirkon

Zirkon ( $ZrSiO_4$ ) ist fast allgegenwärtig in der Erdkruste. Es entsteht als frühes Kristallisationsprodukt primär in magmatischen Gesteinen wie Granit und alkalireichen Gesteinen wie Pegmatit oder Syenit. In metamorphen Gesteinen wie Gneis wird Zirkon in Form von neu- oder umkristallisierten Körnern gebildet. In Sedimentgesteinen findet man detritische Zirkone, das sind durch Erosion transportierte und abgelagerte Körner. Zirkonsand besteht überwiegend aus dem Mineral Zirkon oder Baddeleyit ( $ZrO_2$ ). Zirkon ist das wichtigste Zirkonium- und Hafniumerz. Zirkon enthält häufig Verunreinigungen und Einschlüsse verschiedener Elemente. Die theoretische Oxidzusammensetzung von Zirkon ist 67,1 %  $ZrO_2$  und 32,9 %  $SiO_2$ . Nach Rösler [78] kann die Kristallstruktur von

Zirkon in Extremfällen bis zu 30 % Hafniumoxid ( $\text{HfO}_2$ ), 12 % Thoriumoxid ( $\text{ThO}_2$ ) oder 1,5 % Uranoxid ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) enthalten. Zirkoniumoxid ( $\text{ZrO}_2$ ) hat einen Schmelzpunkt von etwa 3.000 °C und wird zur Herstellung von Schmelzriegeln und feuerfesten Werkstoffen verwendet. Das Element Zirkon selbst findet u. a. in Kernreaktoren Verwendung. Wichtigste Lagerstätten sind Schwermineralseifen, in denen Zirkon gelegentlich in einzelnen Lagen gesteinsbildend auftritt. Zirkonreiche Seifenlagerstätten werden in Indien, den USA, Westaustralien, Sri Lanka oder Südafrika abgebaut [79].

Bisherige Untersuchungen von Reichelt et al. [21] haben sich mit der Strahlenexposition beim Umgang mit Zirkonsanden in Gießereien befasst. Dabei wird Zirkonsand als Formsand für Gussformen, vor allem im Stahlguss verwendet. Nachdem das Werkstück gegossen wurde, werden die Gussformen gemahlen und wiederverwendet. Neben Zirkonsand verwenden Gießereien vor allem Quarzsand und Chromitsand als Formsand. Quarzsand wird dabei am häufigsten benutzt und Zirkonsand am seltensten. Spezifische Aktivitäten der Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe lagen zwischen 640 bis 720 Bq/kg und der Nuklide der Uran-Zerfallsreihe um die 2.480 Bq/kg im Zirkonsand. Reichelt et al. [21] haben für eine Gießerei eine mittlere effektive Dosis aus externer Bestrahlung von 0,08 mSv pro Jahr und Person ermittelt. Für die interne Strahlenexposition wurde eine effektive Dosis von 0,46 mSv/a errechnet.

Das Landesamt für Umweltschutz hat 1998 [80] in einem bayerischen Eisenwerk den Einsatz von Schlichte (Gemisch aus seltenen Erden (u. a. Zirkonsilikat), Isopropylalkohol und Wasser als Sperrschicht zwischen Formsand und Metall) strahlenschutztechnisch überprüft. Die externe Strahlenexposition liegt mit 0,1  $\mu\text{Sv/a}$  im Bereich der natürlichen Umgebungsstrahlung. Die gammaspektrometrische Untersuchung der Schlichte hat für die Nuklide der Uran-Zerfallsreihe spezifische Aktivitäten von 2.000 bis 3.000 Bq/kg und für die Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe von 400 bis 500 Bq/kg ergeben.

Brenk Systemplanung [38] nennt für Zirkon und Zirkonsand spezifische Aktivitäten im Bereich von 2.500 bis 5.000 Bq/kg für die Nuklide der Uran-Zerfallsreihe und von 500 bis 700 Bq/kg für die Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe. Zudem werden etwa 95 % der Gießereialsande wiederverwertet.

Nach Auskunft des Vereins Deutscher Gießereifachleute e.V. [81] und des Verbands der Deutschen Feuerfestindustrie e.V. [82] gibt es in Deutschland etwa 700 Gießereien und es werden etwa 1.000 bis 2.000 Tonnen Zirkonsand pro Jahr gegenüber ca. 2 Mio. Tonnen Quarzsand pro Jahr und 27.000 Tonnen Chromitsand pro Jahr verwendet. Zirkonoxid ist sehr teuer: 1 Tonne kostet etwa 500 Euro, Quarzsand dagegen etwa 30 - 40 Euro. Dennoch wird Zirkonsand benutzt, wenn eine hohe Genauigkeit des Werkstückes notwendig ist und keine großen Nachbesserungen möglich sind. Dies ist vor allem beim Stahlguss bei Temperaturen > 1.500 °C der Fall. Neben Zirkonsand wird bei hohen Temperaturen auch Chromitsand verwendet. Quarzsand wird vornehmlich in Eisengießereien bei Temperaturen um 1.300 °C verwendet. Quarz hat eine nachteilige Eigenschaft: bei hohen Temperaturen kommt es zu einer Umwandlung in der Kristallstruktur von Quarz und damit zu einer Längendehnung. Dies führt dazu, dass das Werkstück ebenfalls seine Form ändert, was durch Schleifen wieder behoben werden kann.

In Bayern sind uns bisher vier Betriebe bekannt, die uns auf unsere Anfrage hin Zirkonoxid und Produkte aus diesem zur Verfügung gestellt haben, um die spezifische Aktivität zu bestimmen. Außerdem hat ein Betrieb uns Schleifschlamm, wie er nach dem Schleifen und Polieren der Keramikprodukte anfällt zugeschickt. Laut den Zirkonoxid-Lieferanten dieses Betriebes liegt die spezifische Aktivität des verwendeten Zirkonoxid unter 4.000 Bq/kg. Die Ergebnisse sind in Tab. 48 dargestellt.

Das untersuchte Zirkonoxid zeigt mit der Literatur [21] und [38] vergleichbare spezifische Aktivitäten der Radionuklide. Ebenfalls weist die Keramikplatte hohe spezifische Aktivitäten auf. Da es sich aber bei den Proben nicht um Rückstände gemäß Strahlenschutzverordnung handelt, sondern um

Produkte zur Herstellung von (Feuerfest-)Keramiken, gelten für diese nicht die Überwachungsgrenzwerte der Anlage XII, Teil B StrISchV [1].

Die im Vergleich zum Zirkonoxid niedrigen spezifischen Aktivitäten der Uran-Radionuklide im Schleifschlamm sind darauf zurückzuführen, dass auch Keramiken ohne Zirkonoxid abgeschliffen werden und es so zu einer Vermischung der verschiedenen Schlämme kommt. Außerdem wird nur < 10 % Zirkonoxid in den Produkten verwendet. Es fallen weniger als 100 t Schleifschlamm pro Jahr an und diese werden als Sondermüll entsorgt.

Tab. 48: Ergebnisse von Zirkon und Zirkonprodukten der vier bisher bekannten Betriebe, rot markiert: Radionuklide im Gammasktrum überlagert; Proben ZrO<sub>2</sub> a und b sind von zwei verschiedenen Unternehmen; Schleifschlamm a, b und c sind von verschiedenen Unternehmen

NUKLID	ZrO <sub>2</sub> a [Bq/kg]	ZrO <sub>2</sub> b [Bq/kg]	KERAMIKPLATTE [Bq/kg]	SCHLEIF- SCHLAMM a [Bq/kg]	SCHLEIF- SCHLAMM b [Bq/kg]	SCHLEIF- SCHLAMM c [Bq/kg]
URAN-ZERFALLSREIHE						
Thorium-234	9.830 ± 3.530	7.400 ± 2.890	6.680 ± 2.370	357 ± 129	—	331 ± 116
Protactinium-234m	4.630 ± 450	4.540 ± 550	5.920 ± 570	1.090 ± 171	—	467 ± 89
Thorium-230	9.030 ± 5.650	—	8.250 ± 3.780	549 ± 262	—	489 ± 111
Radium-226	4.080 ± 760	8.300 ± 1.280	6.820 ± 1.050	—	8,96 ± 7,26	569 ± 145
Blei-214	2.150 ± 160	5.080 ± 420	6.310 ± 500	93,0 ± 9,0	1,3 ± 0,7	463 ± 63
Bismut-214	1.600 ± 90	3.980 ± 190	5.500 ± 280	80,3 ± 5,5	1,1 ± 0,8	430 ± 31
Blei-210	—	—	—	—	—	52,4 ± 23,2
THORIUM-ZERFALLSREIHE						
Actinium-228	411 ± 29	477 ± 51	626 ± 52	38,0 ± 6,3	—	124 ± 11
Radium-224	—	—	—	91,1 ± 33,6	—	—
Blei-212	694 ± 64	797 ± 100	876 ± 76	116 ± 13	1,4 ± 0,6	110 ± 12
Bismut-212	504 ± 47	619 ± 44	878 ± 72	117 ± 15	—	116 ± 13
Thallium-208	157 ± 9	197 ± 9	263 ± 14	34,3 ± 2,5	0,9 ± 0,3	34,8 ± 2,6
WEITERE						
Kalium-40	23 ± 17	—	—	16,3 ± 7,9	—	—
Uran-235	518 ± 56	256 ± 69	286 ± 57	42,0 ± 12,6	—	30,8 ± 7,1

Messungen der Ortsdosisleistung (ODL) am Lagerort des Zirkonoxides des Betriebes a (Zirkon a) ergaben Werte zwischen 0,26 bis 0,28 µSv/h direkt an der Oberfläche des 25 kg Sackes. In einem Abstand von 10 cm betrug die ODL noch 0,15 µSv/h und in 50 cm Abstand nur noch 0,08 µSv/h, was der Hintergrundstrahlung entspricht.

Bei der Lagerung hält sich ein Lagerarbeiter weniger als eine Stunde pro Jahr in der Nähe der Zirkonoxidsäcke auf. Während der Lagerung beträgt die effektive Dosis dieses Lagerarbeiters daher weniger als 0,26 - 0,28 µSv/a, zumal er sich meist in einem Abstand von 1 m von den Zirkonoxidsäcken aufhält. Der Transport des Zirkonoxides (1 Mitarbeiter) zum Ofen beträgt etwa 1 h pro Ofen. Alle 3 Jahre wird ein Ofen mit Zirkonoxid gefahren. Das Mischen des Zirkonoxides mit den anderen Komponenten wird von 3 bis 5 Mitarbeitern bewerkstelligt und die Arbeitszeit beträgt max. 3 h pro Ofen. Im Zeitraum der Verwendung des Zirkonoxides haben die Mitarbeiter max. 4 h (1 h Transport und 3 h Mischen) unmittelbaren Kontakt mit dem Zirkonoxid. Daraus berechnet sich eine externe effektive Dosis von 1,0 bis 1,1 µSv pro Ofen.

Eine interne Dosis durch Inhalation von Stäuben tritt nur beim Öffnen der Zirkonoxidsäcke (Zirkon a) an der Mischeranlage dieses Betriebes auf. Unter Annahme der MAK-Werte (3 mg/m<sup>3</sup> für alveolengängigen Staub und 10 mg/m<sup>3</sup> für einatembaren Staub) als Staubkonzentration und der Ar-

beitszeit von 3 h pro Ofen wurde die interne Dosis berechnet. Es ergaben sich Werte von 5,2  $\mu\text{Sv}$  pro Ofen bei einer Staubkonzentration von 10  $\text{mg}/\text{m}^3$  und 1,7  $\mu\text{Sv}$  pro Ofen bei 3  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

Die effektive Körperdosis (Summe aus externer und interner Dosis) für die Handhabung von Zirkonoxid berechnet sich damit auf max. 6,3  $\mu\text{Sv}$  pro Ofen.

### 3.5.2 Ofenausbruch

Zwar werden Ofenausbrüche und andere Feuerfestprodukte nicht in der Liste der zu überwachenden Rückstände (Anlage XII, Teil A StrlSchV [1]) aufgeführt. Da aber bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien teilweise Zirkonsand verwendet wird, der wie im vorherigen Abschnitt beschrieben Uranoxid und Thoriumoxid in die Kristallstruktur einbauen kann, haben wir Ofenausbruch als Rückstand näher untersucht.

Feuerfestmaterialien, wie Ofenauskleidungen, werden in verschiedenen Industriezweigen eingesetzt, wie Sekundärverhüttungsbetriebe und Gießereien, die Stahl-, Aluminium-, Blei-, Zinn- und Kupferlegierungen einschmelzen, Müllverbrennungsanlagen und Kohlekraftwerke [38]. Brenk Systemplanung [38] geben für Feuerfestmaterialien auf Bauxit-Basis (Gemenge von Tonerdemineralen wie Aluminiumoxiden und Aluminiumhydroxiden;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -Komplex) spezifische Aktivitäten von 100 bis 500  $\text{Bq}/\text{kg}$  für die Nuklide der Uran-Zerfallsreihe und der Thorium-Zerfallsreihe an. Feuerfestmaterialien auf der Basis von Zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ ) oder Baddeleyit ( $\text{ZrO}_2$ ) weisen spezifische Aktivitäten von 1.000 bis 10.000  $\text{Bq}/\text{kg}$  für die Nuklide der Uran-Zerfallsreihe und 500 bis 1.000  $\text{Bq}/\text{kg}$  für die Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe auf. Dabei sind etwa 10 % der Feuerfestbauteile Material auf Bauxit-Basis und nur ca. 1 % auf der Basis Zirkon/Baddeleyit [38]. Der Ofenausbruch wird nach dem Abbruch von Öfen i.a. auf eine Deponie verbracht oder wiederverwertet [38], was die von uns untersuchten Betriebe bestätigt haben.

Zwei uns bisher bekannte Betriebe die Feuerfestmaterialien als Ofenauskleidungen bei der Herstellung von Gussformen bzw. zum Einschmelzen von Metallen verwenden, haben uns Ofenausbruchproben zur Verfügung gestellt. Diese von uns untersuchten Ofenausbruchproben bestehen hauptsächlich auf Bauxit-Basis ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Zudem haben wir einen Feuerfestzement (pulverförmig) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der folgenden Tab. 49 aufgelistet.

Die beiden Proben Ofenausbruch B1 und B2 stammen aus demselben Unternehmen. Keine der untersuchten Proben überschreiten die Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil B der StrlSchV [1].

Tab. 49: Ergebnisse von Feuerfestbauteilen; rot markiert: Radium-226 im Gammaskpektrum von Uran-235 überlagert

NUKLID	FEUERFESTZEMENT [Bq/kg]	OFENAUSBRUCH A [Bq/kg]	OFENAUSBRUCH B1 [Bq/kg]	OFENAUSBRUCH B2 [Bq/kg]
Uran-Zerfallsreihe				
Thorium-234	39,6 ± 17,7	34,9 ± 13,7	17,0 ± 9,9	—
Protactinium-234m	—	88,2 ± 32,8	—	—
Radium-226	111 ± 20,5	87,0 ± 40,3	33,3 ± 7,7	40,1 ± 12,3
Blei-214	63,3 ± 4,0	89,3 ± 5,7	9,3 ± 1,2	9,4 ± 1,4
Bismut-214	58,1 ± 3,7	83,0 ± 6,1	8,3 ± 1,1	7,7 ± 1,1
Blei-210	35,0 ± 9,1	24,6 ± 6,8	—	—
Thorium-Zerfallsreihe				
Actinium-228	73,6 ± 6,4	91,6 ± 7,6	11,8 ± 1,8	11,6 ± 2,1
Radium-224	77,5 ± 2,6	—	15,3 ± 8,4	—
Blei-212	77,2 ± 7,1	85,2 ± 9,2	11,9 ± 1,4	11,6 ± 1,2
Bismut-212	83,4 ± 11,3	99,6 ± 8,7	13,3 ± 4,9	11,3 ± 2,8
Thallium-208	24,9 ± 1,6	30,0 ± 2,2	4,2 ± 0,5	3,8 ± 0,6
Weitere				
Kalium-40	441 ± 25,1	65,9 ± 5,7	59,1 ± 5,4	75,9 ± 9,1
Uran-235	—	3,5 ± 2,3	—	—

### 3.6 Rückstände aus der Kohleverbrennung

Neben den Rückständen, die in der Anlage XII, Teil A Strahlenschutzverordnung [1] aufgeführt sind, wurden auch Rückstände untersucht, die nicht in dieser sog. Positivliste genannt werden.

In dieser Studie haben wir zusätzlich Rückstände aus der Verbrennung von Kohle in bayerischen Kohlekraftwerken untersucht. Diese sind nicht in der Anlage XII, Teil A StrlSchV aufgelistet, dennoch kann die zuständige Behörde nach § 102 StrlSchV Anordnungen, wie Schutzmaßnahmen, Entsorgungswege o.ä. treffen, wenn bei Arbeiten mit Materialien, die nicht Rückstände im Sinne der Anlage XII, Teil A sind, die Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung erheblich erhöht wird [1].

Die natürliche Radioaktivität in der Kohle ist regional unterschiedlich. Dies hängt vor allem von der Geologie (Kaolinhorizonte) und den organischen Anteilen (Pflanzenreste) ab. Da aber immer Mischungen von Kohlen aus verschiedenen Lagerstätten verbrannt werden, geht die für ein Gebiet typische natürliche Radioaktivität in dem Gesamtaufkommen unter. Bei der Kohleverbrennung gehen die meisten Radionuklide in die Asche, wobei der Gehalt an natürlichen Radionukliden in Flugasche den in Kohle um einen Faktor 2 bis 25 übersteigt [83].

In einem Gespräch hat uns ein Mitarbeiter der VGB Powertech e.V. [84] mitgeteilt, dass deutsche Kraftwerke 2003 58 Mio. Tonnen Steinkohle und 167 Mio. Tonnen Braunkohle verbrannt haben. Die anfallenden Rückständen bezeichnet die VGB als Nebenprodukte, da alle komplett wiederverwertet werden. REA-Gipse gehen in die Bauindustrie (Gipsbauplatten), Flugaschen werden als Zuschlagstoff bei der Zement- und Betonherstellung und Nassaschen als Abdichtungen bei Depo-nien eingesetzt.

Eine Verwendung von Schlacke aus der Verkokung von Kohle geschah in Form von Fehlbodenschüttungen. Bei Fehlböden handelt es sich um Schalungen zwischen Holzbalken in Obergeschossen, in die verschiedene Schüttmaterialien zur Schalldämmung eingebracht wurden. Unsere Messungen ergaben für verschiedene Fehlbodenproben spezifische Aktivitäten der Urannuklide von 300 bis 1.200 Bq/kg und der Thoriumnuklide von 30 Bq/kg. Ortsdosisleistungen in 1 m Abstand über den Fehlbodenschüttungen liegen zwischen 0,15 bis 0,3 µSv/h. Es können keine Angaben zu Rückstandsmengen gemacht werden.

In Tab. 50 werden Literaturwerte der Nebenprodukte von der VGB Powertech e.V. [83], von Brenk Systemplanung [38] und von Reichelt et al. [21] aufgelistet.

Tab. 50: Literaturwerte für Nebenprodukte aus der Kohleverbrennung

PROBE	RADIUM-226 [Bq/kg]	THORIUM-232 [Bq/kg]	KALIUM-40 [Bq/kg]
Reichelt et al. [21]			
Schlacke Deutschland	150	37	666
Flugasche Deutschland	211	130	703
REA-Gips-Haldenmaterial	4 - 22	—	< 26
Brenk Systemplanung [38] (Gesamtaktivität)			
Flugasche	957 - 1947	727 - 1150	—
Grobasche	286	260	—
REA-Gips	19 - < 24	6	—
VGB Powertech e.V. [83]			
Flugasche	186	110	785
Kesselasche/Schlacke Kohle	146	100	794
Müllverbrennungsschlacke	89	60	435

In Bayern verbrennen sieben Kraftwerke Kohle, wobei bei einem der Kohlekessel nur im Winter für 10 Tage eingeschaltet wird.

Wir haben alle diese Kraftwerke angeschrieben und um die Möglichkeit einer Probenahme gebeten. Als Rückstände fallen Flugasche (Filterstaub), Nassasche (Schlacke) und REA-Gips (Rückstand aus Rauchgasentschwefelungsanlagen) an. Insgesamt liegen die anfallenden Flugaschemengen je nach Kohlemenge (300 bis 820.000 t/a) zwischen 14 bis 58.100 t/a, die Schlackemengen zwischen 300 bis 8.660 t/a und die Menge an Gips zwischen 16.000 und 32.000 t/a.

Wir haben in den Bereichen, an denen die Rückstände anfallen, die Ortsdosisleistung gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen präsentieren wir in Tab. 51.

Tab. 51: Bandbreite der spezifischen Aktivitäten der untersuchten Nebenprodukte aus der Kohleverbrennung

NUKLID	FLUGASCHE [Bq/kg]	NASSASCHE/SCHLACKE [Bq/kg]	REA-GIPS [Bq/kg]	MÜLLVERBRENNUNGS- SCHLACKE [Bq/kg]
Uran-Zerfallsreihe				
Thorium-234	32 - 184	30 - 123	77	21
Protactinium-234m	118 - 331	83 - 231	131	—
Radium-226	75 - 243	53 - 258	19	38
Blei-214	43 - 297	38 - 186	8 - 50	23
Bismut-214	39 - 263	35 - 164	7 - 43	22
Blei-210	55 - 158	—	6 - 346	—
Gesamtaktivität	244 - 1.327	181 - 898	6 - 647	104
Thorium-Zerfallsreihe				
Actinium-228	24 - 147	24 - 110	9	19
Radium-224	22 - 131	23 - 107	22	20
Blei-212	24 - 154	27 - 128	0,6 - 12	17
Bismut-212	26 - 163	29 - 127	15	19
Thallium-208	12 - 48	9 - 40	0,4 - 3	6
Gesamtaktivität	108 - 619	112 - 504	1 - 61	81
Weitere				
Uran-235	5 - 22	3 - 7	6	—
Kalium-40	58 - 976	105 - 732	3 - 80	258

Die Ergebnisse der Nebenprodukte aus der Kohleverbrennung sind mit den Literaturwerten vergleichbar. Auch die Gesamtaktivitäten für die Uran- und die Thoriumzerfallsreihe liegen im Bereich der Gesamtaktivitäten der Brenk Systemplanung [38]. Alle untersuchten Proben unterschreiten die Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil B Strahlenschutzverordnung [1].

Für die Strahlenexposition bei der Handhabung von Flugaschen in den Kraftwerken geben Becker et al. [85] eine effektive Dosis zwischen 2 und 14 mSv pro Jahr an. Dabei hat [85] mit einer Staubkonzentration von 6 mg/m<sup>3</sup> die Dosis berechnet.

Unsere Untersuchungen haben in den Bereichen, in denen die Nebenprodukte anfallen, Werte von 0,02 - 0,08 µSv/h für die externe Strahlenexposition ergeben.

Wie in den Abschnitten 3.3.2.1 und 3.3.3.4 haben wir mit den spezifischen Aktivitäten der Filterstäube, der Atemrate, der Staubkonzentration und den Dosiskoeffizienten für unterschiedliche Organe und des gesamten Körpers (effektiv) [69] die effektive Dosis und einzelne Organdosen berechnet. Es wurde mit einer Atemrate von 1,2 m<sup>3</sup>/h und 2.000 Stunden Arbeitszeit pro Kalenderjahr gerechnet. Als Staubkonzentration wurden die als Grenzwerte definierten Konzentrationen von 3 und 10 mg/m<sup>3</sup> zur Berechnung der Dosiswerte herangezogen (sog. MAK-Werte = **M**aximale **A**r-

beitsplatzkonzentration) [71]. Auch die effektive Jahresdosis in den Kohlekraftwerken haben wir nach den Berechnungsgrundlagen Bergbau [70] bestimmt. In Tab. 52 präsentieren wir die berechneten Werte für die Körper- und Organdosis der untersuchten Kohlekraftwerke.

Die mittlere jährliche effektive Gesamtdosis an den Orten, an denen die Flugstäube anfallen, beträgt 0,13 mSv (Summe aus innerer und äußerer Dosis).

Tab. 52: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die untersuchten Kohlekraftwerke; Staubkonzentration = 3 mg/m<sup>3</sup> (alveolengängiger Staubgrenzwert) bzw. 10 mg/m<sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den einatembaren Staubanteil (E); seit 01. April 2004 [71]); a, b und c stehen für verschiedene staubförmige Proben; ET = extrathoracic (engl.)

KRAFT- WERKE	ORGANDOSIS [mSv/a]		INNERE EFFEKTIVE JAHRESDO- SIS [mSv]	ORGANDOSIS [mSv/a]		INNERE EFFEKTIVE JAHRESDO- SIS [mSv]	ORTSDOSIS- LEISTUNG [µSv/h]
	Knochen- oberfläche	ET Luftwege		Knochen- oberfläche	ET Luftwege		
	Staubkonzentration = 3 mg/m <sup>3</sup>			Staubkonzentration = 10 mg/m <sup>3</sup>			
1a	0,15	0,002	0,005	0,36	0,006	0,015	—
1b	0,11	0,02	0,03	0,13	0,07	0,08	—
1c	0,16	0,03	0,03	0,27	0,10	0,08	—
2a	0,002	0,00002	0,0001	0,006	0,00005	0,0002	0,03 - 0,05
2b	0,15	0,02	0,03	0,27	0,07	0,09	0,03 - 0,05
3a	0,10	0,03	0,03	0,13	0,09	0,08	0,02 - 0,07
3b	0,006	0,002	0,0004	0,009	0,006	0,001	0,02 - 0,07
4	0,08	0,02	0,02	0,11	0,08	0,07	0,03 - 0,08
5	0,06	0,02	0,02	0,08	0,05	0,05	0,03 - 0,06
6	0,07	0,02	0,02	0,10	0,07	0,06	—
7a	0,05	0,002	0,006	0,10	0,006	0,02	—
7b	0,03	0,01	0,006	0,04	0,03	0,02	—
7c	0,05	0,01	0,006	0,09	0,03	0,02	—
7d	0,04	0,01	0,005	0,06	0,03	0,02	—

Unter der Annahme, dass auch für die Kraftwerke 1, 6 und 7 vergleichbare Ortsdosisleistungen gelten, wie für die übrigen Kraftwerke, unterschreiten alle Arbeitsfelder den Eingreifwert von 6 mSv pro Jahr und den Grenzwert von 20 mSv pro Jahr wie in § 95 StrlSchV [1] angegeben. Die untersuchten Arbeitsfelder, an denen die Rückstände anfallen, sind aber nicht in der Anlage XI, Teil B aufgeführt [1]. Auch die jährliche Effektivdosis von 1 mSv pro Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung wird deutlich unterschritten [1].

Bei der Berechnung haben wir eine Aufenthaltszeit von 2.000 Stunden im Jahr angenommen. Doch handelt es sich bei den gemessenen Bereichen um keine ständigen Arbeitsplätze, so dass die berechneten Jahresdosen deutlich überschätzt sind (konservative Berechnung).

## 3.7 Rückstände aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung

### 3.7.1 Stand der Forschung

Durch die Anwendung verschiedener Aufbereitungsmethoden bei der Trinkwassergewinnung, werden neben den üblichen zu entfernenden Elementen, wie Eisen und Mangan, auch natürliche Radionuklide, wie Uran und Radium entfernt. Dadurch erzeugen die Wasserversorgungsunternehmen Abfälle, die diese Radionuklide angereichert enthalten.

Die Novellierung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) vom August 2001 [1] sieht eine Überwachung einiger Rückstände bei der Beseitigung oder Verwertung vor (Anlage XII, Teil A StrlSchV). Die Anlage XII, Teil A StrlSchV führt Schlämme aus Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung nicht explizit auf. Dennoch ist in § 102 StrlSchV festgelegt, dass auch bei erheblich erhöhten Expositionen durch Materialien, die nicht in Anlage XII, Teil A enthalten sind, die zuständigen Behörden Strahlenschutzmaßnahmen anordnen können [1].

Gemäß der „Zweiten Verordnung zur Änderung der Mineral- und Tafelwasser-Verordnung“ vom 03. März 2003 [86] dürfen in Mineralwässern mit dem Hinweis auf Eignung für Säuglingsernährung die Aktivitätskonzentrationen von Radium-226 den Wert von 125 mBq/l und von Radium-228 den Wert von 20 mBq/l nicht überschreiten. Für Mineralwässer ohne diesen Hinweis gelten diese Werte nicht. Falls bei einem Mineralwasser - unabhängig vom Werbehinweis Säuglingsernährung - eine Enteisung/Entmanganung durchgeführt wird, können sich die Radium-, aber auch Uran- und Thorium-Aktivitäten in den Rückspülschlämmen und Filterrückständen aus der Wasseraufbereitung erhöhen und diese Schlämme ebenfalls als überwachungsbedürftige Rückstände gemäß § 102 der StrlSchV [1] gelten. Dann darf bei der Verwertung oder Beseitigung solcher Rückstände für Einzelpersonen der Bevölkerung der Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv/a nicht überschritten werden. Außerdem können solche Rückstände aus der Überwachung entlassen werden, wenn diese gemäß Anlage XII, Teil B spezifische Aktivitäten unter 200 Bq/kg aller Radionuklide der Uran- und Thoriumzerfallsreihe aufweisen.

Bei verschiedenen Aufbereitungsverfahren fallen Schlämme als Rückstände an. Zur Aufbereitung von Trinkwasser werden Anlagen zur Enteisung, Entmanganung und Entarsenung verwendet. Aber es sind auch Anlagen zur Kalkenthärtung, Ionenaustauscher, Umkehrosmose oder Aktivkohle in Betrieb. Allein in Bayern betreiben von ca. 2.600 Wasserversorgungsunternehmen 331 Wasserwerke Aufbereitungsanlagen zur Enteisung/Entmanganung und 48 zur Entarsenung des Wassers. Neben Eisen und Mangan, werden dabei auch Uran und vor allem Radium mitentfernt.

Eine Studie von Brinck et al. [87] hat gezeigt, dass zwischen 11 % und 53 % Radium durch Enteisung/Entmanganung aus dem Wasser entfernt werden. Durch Kalkenthärtung kann bis zu 95 % Radium aus dem Wasser entfernt werden. Dies ist mit der niedrigen Löslichkeit von  $\text{RaCO}_3$  und  $\text{RaSO}_4$  zu erklären [87].

Uran wird bis zu 90 % aus dem Wasser durch Kalkenthärtung entfernt. Dies kann durch Zugabe von Magnesiumkarbonat bis auf 99 % gesteigert werden. Durch stark basische Anionenaustauscher werden mehr als 99 % des Urans zurückgehalten. Auch Aktivkohle erwies sich zur Reduzierung des Uragehaltes als sehr wirkungsvoll [88]. Wobei auch hier, wie bei der Kalkenthärtung, der pH-Wert des Wassers eine starke Rolle spielt. Bei der Kalkenthärtung ist der höchste Entfernungswirkungsgrad bei pH-Werten zwischen 10,6 und 11,5 zu finden, bei Aktivkohle dagegen wird ein Wirkungsgrad von 95 % bei einem pH-Wert unter 6,4 erzielt.

Eine erste Untersuchung einer Aktivkohleprobe, die ein Mineralwassererzeuger zur Wasseraufbereitung einsetzt, hat ergeben, dass ca. 1,4 Bq Uran-238 pro Gramm Aktivkohle zurückgehalten werden. Dabei enthält das Grundwasser etwa 60 µg Uran pro Liter Wasser.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern“ [6] (11/97 bis 11/01) hat das LfU 18 Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung untersucht. Es zeigte sich, dass vor allem die Schlämme aus der Enteisung spezifische Aktivitäten zwischen 300 bis 6.300 Bq/kg für Radium-226 und zwischen 300 bis 8.400 Bq/kg für Radium-228 aufweisen. Die Schlämme aus der Kalkenthärtung dagegen weisen spezifische Aktivitäten zwischen  $< 10$  und 200 Bq/kg für Radium-226 und Radium-228 auf. Die spezifischen Aktivitäten von Uran-238 hat das LfU [6] bei den untersuchten Schlämmen nicht ermittelt.

Der Richtwert von 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung kann eventuell überschritten werden, wenn diese Schlämme in der Landwirtschaft als Düngemittel verwendet werden [6]. Einige Brauereien und Mineralwassererzeuger haben eine eigene Kläranlage und verwenden den Schlamm in der Landwirtschaft. Da dabei aber ein Verdünnungseffekt durch weitere anfallende Abwässer auftreten kann, ist es sinnvoll Klärschlammproben auf die natürlichen Radioisotope zu untersuchen. Teilweise entsorgen die Wasserversorgungsunternehmen auch die Schlämme.

### 3.7.2 Eigene Untersuchungen

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens haben wir zehn weitere Schlämme aus der Wasseraufbereitung von Wasserversorgungsunternehmen und sieben Schlämme von Mineralwassererzeugern untersucht. Die Auswahl der Wasserversorgungsunternehmen erfolgte mit Hilfe einer Bayernkarte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LfW), die natürlichen Uranwerte im Grund- und Trinkwasser enthielt [90]. Anhand dieser Karte können für Bayern verschiedene Gebiete mit erhöhten Uranwerten definiert werden. Dabei liegen die Uranwerte im Wasser zwischen 5 bis 100  $\mu\text{g/l}$  (Abb. 26). Da das LfW die Gehalte anderer Radionuklide nicht bestimmt hat, können wir keine Aussagen über Radium im Wasser machen.

Die untersuchten Rückspülschlämme stammen aus den farblich umrandeten Gebieten in Abb. 26. Das Fichtelgebirge und der übrige ostbayerische Raum gehört nicht zu den Gebieten mit erhöhten Uranwerten im Wasser. Dennoch haben wir diese Schlammproben untersucht, da aufgrund der Geologie mit erhöhten Radionuklidaktivitäten zu rechnen ist. Im ostbayerischen Raum finden sich hauptsächlich Gesteine granitischen Ursprungs, welche erhöhte Uran- und Radiumgehalte enthalten (Tab. 32, Abschnitt 3.3.1). Das ESWE-Institut für Wasserforschung und Wassertechnologie GmbH [89] führt den ostbayerischen Raum als Gebiet mit erhöhten Radionuklidgehalten im Wasser an.

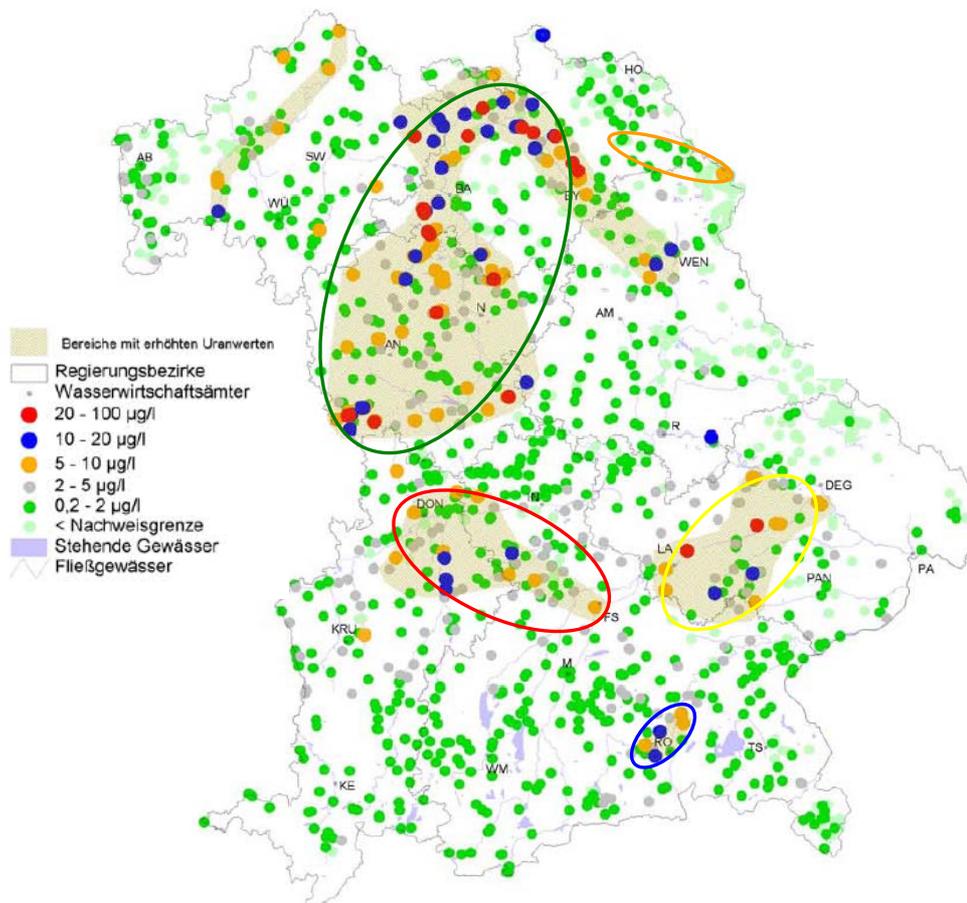


Abb. 26: Bayernkarte mit den natürlichen Uranwerten im Grund- und Trinkwasser [90]; farbige Ellipsen markieren die Gebiete, aus denen die Proben stammen.

Die gammaspektrometrischen Untersuchungen (Tab. 53) der Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung lieferten spezifische Aktivitäten von 80 bis 32.500 Bq/kg für Radium-226, von 30 bis 9.300 Bq/kg für Radium-228 und 310 bis 1.300 Bq/kg für Uran-238. Für die Schlämme aus der Mineralwasseraufbereitung (Tab. 53) ergaben sich spezifische Aktivitäten von 50 bis 6.500 Bq/kg für Radium-226 und von 70 bis 2.300 Bq/kg für Radium-228.

Bei den untersuchten Proben aus Trinkwasseraufbereitungsanlagen handelt es sich hauptsächlich um Rückspülschlämme aus Enteisenungs-/Entmanganungsanlagen, bei drei Wasserversorgungsunternehmen um Schlämme aus Entsäuerungsanlagen. Bei der Entsäuerung (REx.-Nr. 5405, 5408 und 5414; rot markiert in Tab. 53) kommt es in den Schlämmen in der Regel zu keiner nennenswerten Anreicherung von Radium.

Von den untersuchten Mineralwassererzeugern liegt einer in der Nähe des Fichtelgebirges (REx.-Nr. 50002). Die Radiumgehalte sind hier deutlich erhöht, da es sich bei der Aufbereitungsanlage um eine Enteisenung bzw. Entmanganung handelt. Die übrigen Mineralwassererzeuger liegen in Gebieten mit keinen nennenswerten Urangelhalten im Grund- und Trinkwasser, dennoch zeigen diese z.T. erhöhte Radiumgehalte in den Schlämmen.

Tab. 53: Ermittelte spezifische Aktivitäten von Radionukliden in Schlämmen aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung; für die Bezeichnung der Wasserversorgungsunternehmen und Mineralbrunnen werden die bei der Radonabschätzung eingeführten REx.-Nummern verwendet; TS = Trockensubstanz; rot = untersuchte Entsäuerungsanlagen

REx.-Nr.	Uran-238 [Bq/kg TS]	Radium-226 [Bq/kg TS]	Radium-228 [Bq/kg TS]
Wasserversorgungsunternehmen			
3028	1.270	7.380	9.250
3183	-	32.500	3.950
3240	310	930	800
5405	-	80	30
5408	-	300	50
5414	-	140	60
6013	-	1.910	2.780
7308	-	920	360
7310	-	1.390	420
7311	-	1.100	610
7336	-	2.120	845
8217	-	232	240
Mineralwassererzeuger			
40002	-	920	680
50002	-	6.200	1.700
50003	-	-	85
70001	-	4.280	2.300
70005	-	380	340
70007	-	1.450	750
70011	-	50	71
80002	-	300	120

Um zu ermitteln, ob neben Radium-226 auch Uran-238 bei der Wasseraufbereitung mit ausgefallen ist, haben wir bei dem Rückspülschlamm mit der REx.-Nr. 3183 aus einer Enteisungs-/ Entmanganungsanlage mittels Alpha-Spektrometrie die spezifische Aktivität von Uran-234, Uran-235 und Uran-238 ermittelt. Die Ergebnisse stellen wir in Tab. 54 vor. Es zeigt sich deutlich, dass erst ab Radium-226 bzw. Radium-228 die Zerfallsprodukte im Rückspülschlamm zu finden sind. Die Mutternuklide von Radium haben sich deutlich weniger angereichert. Das Roh- und Reinwasser dieses Wasserversorgungsunternehmens weist Werte von etwa 30 µg Uran pro l Wasser auf.

Die beiden Proben 3028 und 3240 lieferten mit Hilfe der Gamma-Spektrometrie ein ähnliches Ergebnis (Tab. 53).

Tab. 54: Spezifische Aktivität eines untersuchten Rückspülschlammes aus der Enteisungs-/Entmanganungsanlage eines Wasserversorgungsunternehmens; blau = über Alpha-Spektrometrie bestimmt, restliche Werte über Gamma-Spektrometrie; Uran-234 wird von nicht abgetrenntem Radium-226 überlagert

NUKLIDE	SPEZIFISCHE AKTIVITÄT [Bq/kg]
	Rückspülschlamm
Uran-Reihe	
Uran-238	475 ± 66
Thorium-234	437 ± 240
Uran-234	815 ± 63
Thorium-230	24 ± 11
Radium-226	32.500 ± 2.890
Blei-214	9.150 ± 490
Bismut-214	7.820 ± 411
Blei-210	3.290 ± 533
Thorium-Reihe	
Thorium-232	13 ± 8
Actinium-228	3.950 ± 425
Radium-224	5.120 ± 2.050
Blei-212	3.020 ± 322
Bismut-212	2.910 ± 245
Thallium-208	851 ± 47
Weitere	
Uran-235	29 ± 7

Um festzustellen, ob sich Uran im Klärschlamm anreichert, untersuchten wir eine Klärschlammprobe des betroffenen Klärwerkes. Es konnten jedoch keine erhöhten spezifischen Aktivitäten der Radionuklide ermittelt werden (Kläranlage 4, Anhang C.3.3).

Die ersten Untersuchungen haben gezeigt, dass zum Einen die Schlämme mit erhöhten Radionuklidgehalten gut übereinstimmen mit den Gebieten mit erhöhten Uranwerten im Grund- und Trinkwasser. Dennoch gibt es zum Anderen immer wieder Schlämme mit erhöhten Nuklidgehalten aus Gebieten ohne erhöhte Uranwerte im Wasser.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Rückspülschlämme (Tab. 53) sowohl der Wasserversorgungsunternehmen als auch der Mineralwasserhersteller zeigen deutlich Überschreitungen der Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B der StrlSchV [1] für überwachungsbedürftige Rückstände. Teilweise wird der Grenzwert von 1 Bq/g für die Verwertung oder Beseitigung von Rückständen deutlich überschritten. Nach § 102 StrlSchV sollten die Rückspülschlämme gemäß Anlage XII, Teil B und C StrlSchV [1] entsorgt werden. Da aber im Jahr keine 2.000 Tonnen an Schlämmen bei den Wasserwerken und Mineralwasserherstellern anfallen (§ 100 StrlSchV), sondern zwischen wenigen m<sup>3</sup> bis ca. 400 Tonnen, besteht keine Mitteilungspflicht des Verwenders bei der zuständigen Behörde.

Von uns werden Rückstände aus der Wasseraufbereitung, nach § 102 Strahlenschutzverordnung, also für Materialien, die nicht in Anlage XII, Teil A genannt sind, und nach den entsprechenden Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil C und § 98 StrlSchV zur gemeinsamen Deponierung mit anderen Abfällen und Rückständen und dem 1 mSv/a-Richtwert für Einzelpersonen der Bevölkerung freigegeben [1].

Die Mineralwasserhersteller leiten ihre Rückspülschlämme direkt in die Kanalisation. Deshalb haben wir die Klärschlämme der drei Gemeinden (Kläranlage 1 bis 3, Anhang C.3.3), in denen sich

die Mineralwasserhersteller befinden, untersucht. Die spezifischen Aktivitäten der Uran- und Thorium-Zerfallsreihe aller drei Klärschlämme liegen unter den in der StrlSchV angegebenen Überwachungsgrenzen. Nur die spezifische Aktivität von Blei-210 liegt knapp über dem Grenzwert von 200 Bq/kg.

Wenn Blei-210 aber um das fünffache höher ist als die Aktivität der übrigen Radionuklide in einer Probe, muss die Aktivität von Blei-210 mit einem Faktor R, der je nach Entsorgungsweg zwischen 0,1 und 0,5 (Übertage) liegt, multipliziert werden und erniedrigt dadurch die spezifischen Aktivitäten für die Bestimmung der entsprechenden Überwachungsgrenzen. In unserem Fall wird die höchste spezifische Aktivität des Radionuklids Blei-210 der Uranzerfallsreihe unter die Überwachungsgrenze von 200 Bq/kg erniedrigt und die spezifischen Aktivitäten der untersuchten Klärschlammproben überschreiten die Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil B und C StrlSchV nicht mehr.



## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Studie sollte in allen bayerischen Brauereien, Mineralwasserherstellern und Molkereien mit eigener Wasserversorgung sowie Pilzzuchtbetrieben und Tunnelbauten die Radonexposition gemäß §§ 93 bis 96 StrlSchV [1] ermittelt werden. Dazu haben wir die Daten von 730 Brauereien, 38 Mineralwassererzeugern und 97 Molkereien mit Hilfe eines Fragebogens erfasst. Die Betriebe mit eigener Wasserversorgung forderten wir im Mai 2003 auf, Radonmessungen in den anlagenspezifischen Bereichen, wie Brunnenstuben, Wasserreserven, Wasseraufbereitung und Füllerei, durchzuführen.

Von den angeschriebenen **Brauereien** haben sich 718 gemeldet. 394 Brauereien haben keine eigene Wasserversorgung. Von den 208 Brauereien mit eigener Wasserversorgung haben 164 die Radonerhebung durchgeführt, bei 13 Brauereien sind die Messungen in Arbeit, zwei haben unseren Fragebogen zurückgeschickt, aber noch keine Messung veranlasst und 29 haben keine entsprechenden Anlagen. 116 Brauereien sind nicht mehr in Betrieb. Die Messergebnisse bis November 2004 ergeben Radonexpositionen von maximal 1,7 MBq·h/m<sup>3</sup>. Dieser Wert liegt unterhalb des Eingreifwertes von 2 MBq·h/m<sup>3</sup>. Diesen Maximalwert haben wir nicht in Bereichen der Wasserversorgung ermittelt, sondern in einem benutzten Gewölbe. Bereiche, wie Gewölbe oder Kellerräume in Betrieben mit eigener Wasserversorgung werden aber nicht in der Anlage XI, Teil A StrlSchV [1] aufgeführt. In Bereichen der Wasserversorgung liegt die Radonexposition zwischen < 0,3 bis maximal 1,4 MBq·h/m<sup>3</sup>. Alle 164 Brauereien, die Radon gemessen haben unterschreiten den Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> [1].

Von den 38 **Mineralwasserherstellern** haben sich 37 gemeldet. Die Radonerhebung haben bis jetzt 32 Mineralwasserhersteller durchgeführt. Bei einem Mineralwasserhersteller ist zur Zeit die Messung in Arbeit, vier haben keine entsprechenden Anlagen und einer ist nicht mehr in Betrieb. Die Ergebnisse liefern eine maximale Radonexposition von 0,4 MBq·h/m<sup>3</sup>. Alle untersuchten Mineralwasserhersteller unterschreiten den Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> [1].

Von den angeschriebenen 97 **Molkereien** haben sich alle gemeldet. 56 Molkereien haben keine eigene Wasserversorgung und drei sind geschlossen. Von den 38 Molkereien mit eigener Wasserversorgung haben 28 die Radonerhebung durchgeführt, bei zwei sind die Messungen noch nicht beendet und acht haben keine entsprechenden Anlagen. Die maximale Radonexposition in Molkereien beträgt 0,53 MBq·h/m<sup>3</sup>. Auch bei den Molkereien unterschreiten alle den Eingreifwert von 2 MBq·h/m<sup>3</sup>.

Zu Beginn der Studie war geplant, die Abschätzung der Radonexposition alle zehn Jahre in den Betrieben durchzuführen. Da die Bestimmung der Radonexposition in Brauereien, Mineralwasserherstellern und Molkereien jedoch ergeben hat, dass alle Betriebe unterhalb des Eingreifwertes von 2 MBq·h/m<sup>3</sup> liegen und zudem die anlagenspezifischen Bereiche dieser Betriebe alle zum Größtenteil aus geschlossenen Systemen bestehen, erscheint es nicht notwendig, diese Betriebe weiterhin zu Messungen aufzufordern, solange sich nichts gravierendes im baulichen Bestand der Anlage ändert.

Die Abschätzung der Radonexposition in **Pilzzuchtbetrieben** konnte vernachlässigt werden, da nur zehn Betriebe in Bayern ermittelt wurden, von denen es sich zur Hälfte um Konservenfabriken handelt. Außerdem verwenden die Pilzzuchtbetriebe alle oberirdische Hallen und keine unterirdischen Gewölbe.

**Tunnelbauten** konnten in Bayern mehrere ermittelt werden (U-Bahnbau und Bau von Tunneln am Mittleren Ring in München, ICE-Neubaustrecke zwischen Ingolstadt und Nürnberg). Aufgrund der Bauweise dieser Tunnel (ständige Frischluftzufuhr oder offene Bauweise) kann hier eine erhöh-

te Radonexposition ausgeschlossen werden. Der Bau der Tunnel der ICE-Neubaustrecke ist zudem schon abgeschlossen.

Für den untersuchten **Papierhersteller** konnten wir Radonkonzentrationen von 67 bis 845 Bq/m<sup>3</sup> ermitteln. Mit einer jährlichen Aufenthaltszeit von max. 15 Stunden ergibt sich für den Beschäftigten eine Radonexposition von ca. 0,03 MBq·h/m<sup>3</sup>.

Die Literaturrecherche zu Arbeitsfeldern mit erhöhten Expositionen durch Uran und Thorium hat ergeben, dass für das **Schleifen von und Wechselstromschweißen mit thorierten Schweißelektroden** durchaus eine Überschreitung der Effektivdosis von 6 mSv/a stattfinden kann [21], [27]. Aus Messungen der spezifischen Aktivität von Schleifstäuben und Staubproben aus der Atemluft der Schweißer [21] und von Ausscheidungsproben [27] haben sich Effektivdosen von 7 bis 20 mSv/a [21] bzw. bis zu 7,6 mSv/a ergeben [27].

Die Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften hat dieses Thema bereits erkannt und in Ihrem Informationsblatt 1997 festgestellt [28], dass beim Schweißen mit Wechselstrom die Expositionen nicht mehr zu vernachlässigen sind und der Grenzwert überschritten werden kann. Beim Anschleifen ist die Exposition ebenfalls nicht zu vernachlässigen und es kann zu einer Überschreitung des Jahresgrenzwerts von 6 mSv kommen. Gemäß § 95 Abs. 2 StrlSchV sind die Betreiber dieser Betriebsstätten verpflichtet, Abschätzungen sowie Meldungen der Jahresexposition durchzuführen. Gegebenenfalls sind Maßnahmen zur Dosisreduzierung gemäß § 94 StrlSchV [1] zu treffen.

Im Rahmen dieser Studie haben wir Betriebe ermittelt, die mit thorierten Schweißelektroden arbeiten. Wir konnten acht Betriebe ermitteln, die thorierte Schweißelektroden benutzen. Sechs Betriebe konnten wir ausschließen, da diese nur nach Bedarf oder kurzzeitig (maximal eine Stunde pro Woche) mit thorierten Elektroden schweißen. Bei den übrigen zwei Betrieben haben wir mittels stationären und personengetragenen Staubsammlern Proben der Radionuklide in den Schweißrauchen und Schleifstäuben genommen. Unsere Messungen haben eine Gesamtjahresdosis von 0,062 mSv bei einer Schweißzeit von 200 h/a Gleichstromschweißen und einem Anschleifen von 30 Elektroden pro Jahr ergeben. Unser Wert stimmt gut mit der Dosis von 0,099 mSv pro Jahr überein, der sich mit Effektivdosiswerten der BGI 746 [28] berechnen lässt.

Für alle acht Betriebe konnte mit Effektivdosiswerten der BGI 746 [28] die Jahresdosis berechnet werden, da mittels Fragebögen die Schweißzeiten in diesen Betrieben ermittelt wurden. Für diese Betriebe ergab sich eine Gesamtjahresdosis von 0,07 bis 0,49 mSv.

Weiterhin sollten Verwender von **thorierten Glühstrümpfen** in Bayern erfasst werden. In der Literatur werden Thorium-232-Aktivitäten von bis zu 4.000 Bq/Glühstrumpf angegeben. Eigene Messungen haben Aktivitäten von bis zu 2.400 Bq/Glühstrumpf ergeben. Diese Aktivitäten wurden in älteren Glühstrümpfen von Campinggaslampen bestimmt. Gebräuchliche Campinggaslampen verwenden nur noch thorium-freie Glühstrümpfe. Die Glühkörper in den Straßenlampen haben Aktivitäten von bis zu 450 Bq/Glühkörper. In Bayern ist uns bisher ein Anwender von thorierten Glühkörpern in Gaslampen der Straßenbeleuchtung bekannt.

Ein Wischtest hat eine Oberflächenkontamination an der Halterung des Glühkörpers von 1,7 Bq/cm<sup>2</sup> und eine Freisetzung von 39 Bq Thorium-Radionukliden während des ersten Abbrennens ergeben. Die Hauptgefahr der Inhalation besteht beim Wechsel dieser Glühkörper (Gesamtaktivität bis zu 2.000 Bq/Glühkörper), da diese nach dem Abbrennen sehr brüchig sind und leicht zerfallen. Im schlimmsten Fall kann während des Wechsels 1 % der Gesamtaktivität inhaliert werden. Daraus resultiert eine effektive Dosis von 0,0006 mSv pro Wechsel. Bei einem Wechsel von 40 Glühkörpern im Jahr durch einen Mitarbeiter in der Altstadt der Betriebsstelle des untersuchten Betriebes mit 40 Gaslampen, erhält dieser Mitarbeiter eine effektive Dosis von 0,024 mSv/a.

Die Verwendung von **Thorium zur Herstellung von Legierungen** wird in Bayern von 2 Betrieben durchgeführt. Diese Betriebe führen eigenverantwortlich Messungen der Thorium-232-Atemluftkonzentration der Raumluft und der effektiven Dosis an den Arbeitsplätzen durch und teilen die Ergebnisse halbjährlich dem Bayerischen Landesamt für Umwelt als zuständiger Behörde mit. Es wurden im Zeitraum von 2001 bis 2003 effektive Dosen zwischen 1 bis 3 mSv/a ermittelt.

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass alle von uns untersuchten Betriebe, die mit thorierten Schweißelektroden arbeiten, thorierte Gasglühkörper verwenden und thorierte Legierungen herstellen, Effektivdosen unterhalb von 6 mSv pro Jahr aufweisen.

Ein weiterer Bestandteil dieser Studie war die Erfassung von **überwachungsbedürftigen Rückständen** gemäß §§ 97 bis 102 und Anlage XII StrlSchV [1] in Bayern.

Spezifische Aktivitäten von **Filterstaubproben aus der Kaolin- und Feldspat-Industrie** liegen teilweise über dem Grenzwert von 200 Bq/kg. Vor allem feldspathaltiger Staub zeigt diese Überschreitung; quarzhaltiger Staub dagegen nicht. Die spezifischen Aktivitäten der Schlämme liegen unterhalb dieses Grenzwertes. Die Filterstäube werden zusammen mit den Schlämmen wieder in den Gruben oder auf Halden auf dem Betriebsgelände abgelagert.

Es hat sich gezeigt, dass die spezifischen Aktivitäten der **Granite** aus dem Bayerischen Wald mit Werten um 100 Bq/kg deutlich niedriger sind als die der Granite aus dem Fichtelgebirge oder dem Oberpfälzer Wald mit 200 bis 400 Bq/kg, teilweise bis 500 Bq/kg. Im Vergleich dazu zeigen die Rückstände wie **Filterstäube und Schlämme** im Bayerischen Wald und Oberpfälzer Wald etwas höhere Werte als im Fichtelgebirge. Dennoch liegen die spezifischen Aktivitäten dieser Rückstände etwas unterhalb von 100 Bq/kg und unterschreiten deutlich die Überwachungsgrenze von 200 Bq/kg. Diese Ergebnisse gelten auch für Rückstände, die von importierten Graniten stammen. Die spezifischen Aktivitäten (Nuklide der Uran-Zerfallsreihe) der importierten Granite selbst liegen größtenteils auch um 100 Bq/kg, bis auf zwei Ausnahmen aus Schweden und Indien.

Bei Überschreitungen des Grenzwertes von 200 Bq/kg der Rückstände aus der gesteinsverarbeitenden Industrie muss in Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden (Wasserwirtschaftsämter) gewährleistet werden, dass sich die Halde/Deponie nicht im Einzugsgebiet eines nutzbaren Grundwasserleiters befindet bzw. es muss sich um eine Deponie mit Basisabdichtung handeln. Wenn dies gewährleistet werden kann, gelten als Überwachungsgrenzen die Werte von 500 Bq/kg und von 1.000 Bq/kg bzw. die Voraussetzungen in Anlage XII, Teil C StrlSchV für die Entlassung aus der Überwachung bei gemeinsamer Deponierung mit anderen Rückständen und Abfällen. Keine der untersuchten Rückstandsproben überschreitet diese Grenzwerte. Zudem besteht bei Rückstandsmengen von 2.000 Tonnen jährlich Meldepflicht bei der zuständigen Behörde (§ 100 StrlSchV).

Wir haben alle Betriebe von den Messergebnissen in Form von Kurzberichten in Kenntnis gesetzt und über mögliche Maßnahmen zur Beseitigung der Rückstände informiert.

Die mit diesen spezifischen Aktivitäten berechneten Körper- bzw. Organdosen liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte von 1 mSv/a für Einzelpersonen der Bevölkerung und für die Organdosen unterhalb eines Zehntels des Organdosisgrenzwertes.

Im Raum des Wölsendorfer-Flussspatreviers ermittelten wir eine rekultivierte Halde mit Spülsanden aus der **Fluoritverarbeitung**. Diese Spülsande werden von der Bevölkerung als Baustoff verwendet. Messungen der spezifischen Aktivitäten ergaben Werte von 600 bis 10.000 Bq/kg für die einzelnen Radionuklide. Bei der Verwendung als Baustoff gilt für Rückstände nach Anlage XII, Teil A und § 102 StrlSchV ein Überwachungsgrenzwert von 500 Bq/kg gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV. Dieser wird bei den spezifischen Aktivitäten der Spülsande teilweise deutlich überschritten.

**Rückstände aus der Gewinnung von Erdöl und Erdgas**, sog. Scales (Ablagerungen in den Erdöl- und Erdgasleitungen), kommen in Bayern nicht vor, da das Wasser in der Bayerischen Molasse sehr geringe Salzgehalte aufweist. Der Salzgehalt, vor allem der Gehalt an Strontium- und Bariumsulfat, sind ausschlaggebend für das Mitausfällen von Radium in diesen Ablagerungen.

Die Erfassung von **Rückständen aus der Feuerfestindustrie**, wie Zirkonoxid und Ofenausbruch hat ergeben, dass vor allem der Ofenausbruch deutlich unter den Überwachungsgrenzwerten der Anlage XII, Teil B StrlSchV liegt. Schleifschlämme, die Zirkonoxid enthalten lieferten spezifische Aktivitäten zwischen 100 bis 500 Bq/kg. Unsere Messungen von Zirkonoxid haben spezifische Aktivitäten für die Radionuklide aus der Uran-Zerfallsreihe zwischen 4.000 und 10.000 Bq/kg ergeben. Diese Werte stimmen mit Literaturwerten überein [21], [38]. Die effektive Körperdosis für die Handhabung von Zirkonoxid hat sich in einem untersuchten Betrieb zu max. 6,3  $\mu$ Sv pro Verwendung berechnet.

Rückstände aus der Kohleverbrennung stellen ebenfalls kein Problem dar, da unsere Messungen **spezifische Aktivitäten der Radionuklide** beider Zerfallsreihen zwischen < 50 bis 200 Bq/kg ergeben haben, die sehr gut mit den Literaturwerten übereinstimmen [21], [38], [83]. Die effektive Körperdosis in Kohlekraftwerken liegt mit max. 0,2 mSv/a deutlich unter dem Überwachungsgrenzwert von 6 mSv/a.

Die Untersuchungen von **Schlämmen aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung** lieferten spezifische Aktivitäten von < 100 bis 33.000 Bq/kg für Radium-226. Diese unterschiedlichen Werte sind vor allem auf die Art der Wasseraufbereitung zurückzuführen. Besonders Anlagen zur Enteisung/Entmanganung lieferten hohe Radium-Aktivitäten in den Rückspülschlämmen. Schlämme aus Entsäuerungsanlagen dagegen haben sehr wenig Radium-226. Schlämme aus der Enteisung/Entmanganung zeigen trotz hoher Urangehalte im Wasser, relativ wenig Uran-238 und Uran-234 in den Rückspülschlämmen. Wie es sich mit Uran in Schlämmen aus der Entsäuerung verhält, muss erst noch geklärt werden. Es wäre sinnvoll alle Schlämme auf Uran-238 zu untersuchen, z.B. mit der Alpha-Spektrometrie. Da es sich bei den untersuchten Schlämmen weitestgehend um Rückstände aus der Wasseraufbereitung mit Anlagen zur Enteisung/Entmanganung handelt, sollte versucht werden, einen Zusammenhang von Uran und Radium mit dem Eisen- bzw. Mangangehalt im Schlamm zu ermitteln. Laut Literatur [87] wird Radium zusammen mit Mangan in Form von Fasern aus dem Wasser entfernt.

Diese ersten Untersuchungen von Schlämmen aus der Trinkwasseraufbereitung haben gezeigt, dass zum Einen die Schlämme mit erhöhten Radionuklidgehalten gut mit Gebieten mit erhöhten Uranwerten im Grund- und Trinkwasser in Bayern übereinstimmen. Dennoch gibt es zum Anderen immer wieder Schlämme mit erhöhten Nuklidgehalten aus Gebieten ohne erhöhte Uranwerte im Wasser. Es besteht demnach verstärkt Forschungsbedarf in Gebieten mit niedrigen Uranwerten im Wasser, aber mit erhöhten Nuklidgehalten aufgrund der Geologie. Es ist wahrscheinlich, dass sich im Fichtelgebirge, Oberpfälzer und Bayerischen Wald Uran schwerer aus Gesteinen granitischen Ursprungs löst als aus Sedimentgesteinen, die in Franken auftreten. Dies könnte der Grund sein, warum in Gebieten mit Sedimentgesteinen mehr Uran im Wasser zu finden ist als in Gebieten mit Granit und Gneis. Dennoch finden sich trotz geringer Uranwerte im Wasser im Schlamm eines Mineralwasserherstellers aus dem Fichtelgebirge erhöhte Radionuklidgehalte. Es wäre daher sinnvoll weitere Schlämme aus Wasserversorgungsunternehmen aus dem ostbayerischen Raum näher zu untersuchen.

Es sollten weiterhin verschiedene Trinkwasseraufbereitungsanlagen hinsichtlich der Radionuklid-entfernung aus dem Wasser und der Anreicherung der Radionuklide in Rückspülschlämmen oder anderen Materialien, wie Ionenaustauscher, Aktivkohle oder ähnlichen Materialien miteinander verglichen werden. Dazu werden Messungen von Wasserproben und Ionenaustauschermaterial in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) durchgeführt. Das LfW entwi-

ckelt im Rahmen eines Forschungsvorhabens eine Methode zur gezielten Entfernung von Uran aus Trinkwasser. Dabei wird es zu einer Anreicherung von Uran im verwendeten Ionenaustauscher kommen, welcher nach der Beladung entsorgt werden muss.

In Bayern entlässt das LfU Rückstände mit natürlicher Radioaktivität nach § 98 StrlSchV [1] aus der Überwachung zur gemeinsamen Deponierung mit anderen nicht radioaktiven Rückständen oder Abfällen. Diese Rückstände können aber nur aus der Überwachung entlassen werden, wenn der Richtwert von 1 mSv pro Jahr für Einzelpersonen der Bevölkerung oder die Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil C StrlSchV [1] nicht überschritten werden.

Rückstände aus der Gesteinsaufbereitung werden üblicherweise in Halden oder in Gruben auf dem Betriebsgelände abgelagert, wenn Grundwasserbelastungen ausgeschlossen werden können, oder werden als Zuschlagstoff bei der Herstellung von Zement oder Beton verwendet.

Die Rückstände aus der Kohleverbrennung stellen im eigentlichen Sinn keine Rückstände dar, sondern sind sog. Nebenprodukte und werden zu 100 % wiederverwertet, z.B. Flugaschen als Zuschlagstoff bei der Zement- und Betonherstellung, Schlacken als Abdichtungen bei Deponien und REA-Gipse in der Bauindustrie als Gipsbauplatten.

Falls eine Freigabe der Rückstände wegen spezifischen Aktivitäten über 50.000 Bq/kg (Anlage XII, Teil C Abs. 1 Satz 4 [1]) nicht möglich ist, können diese bei der Landessammelstelle für radioaktive Abfälle der GRB in Mitterteich und München/Neuherberg abgegeben werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass die im Rahmen dieses Projektes untersuchten NORM-Rückstände (bis auf die Schlämme aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung) die Überwachungsgrenzen der Strahlenschutzverordnung einhalten und dass deren Entsorgung in Bayern die effektive Jahresdosis von 1 mSv für Einzelpersonen der Bevölkerung unterschreiten. Allein die Schlämme aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung überschreiten z.T. sehr deutlich die Überwachungsgrenzen nach Anlage XII Teil B StrlSchV, aber eine Entlassung aus der Überwachung ist nach § 98 StrlSchV bei gemeinsamer Deponierung mit anderen Rückständen und Abfällen dennoch möglich. Im Großen und Ganzen besteht hier aber noch weiterer Untersuchungsbedarf.

Neben den in der Positivliste der Strahlenschutzverordnung (Anlage XII, Teil A [1]) aufgeführten überwachungsbedürftigen Rückstände haben wir in Bayern noch weitere Materialien mit natürlicher Radioaktivität gefunden und untersucht. Es hat sich aber gezeigt, dass diese Materialien bis auf die Schlämme aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung, die Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil B [1] nicht überschreiten und damit nicht in die Positivliste aufgenommen werden müssen. Rückstände, die in dieser Liste genannt werden und welche die Überwachungsgrenzen möglicherweise überschreiten könnten, kommen dagegen in Bayern nicht vor.



## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001, in: Bundesgesetzblatt, Teil I Nr. 38, 1713-1848, 2001.
- [2] Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Dok. XI-3539/96-DE, 1996.
- [3] Wichmann H. E., Kreienbrock L., Kreuzrer M., Gerken M., Dingerkus G., Wellmann J. & Keller G.: Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (West), Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1998-503, 1998.
- [4] Kemski J., Klingel R. & Siehl A.: Das geogene Radon-Potential, in: Siehl A. (Hrsg.): Umweltra dioaktivität, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 1996.
- [5] <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/d/decaybasinnatural.htm>, Stand September 2004.
- [6] Trautmannsheimer, M.: Abschlussbericht des Forschungsvorhabens Radonexponierte Arbeitsplätze in Wasserwerken in Bayern vom 01. Mai 2002, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002.
- [7] Körner, S.: Abschlussbericht des Forschungsvorhabens Strahlenexposition durch natürliche Radioisotope aus gewerblichen Betrieben in Bayern vom 31. Oktober 2004, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2004.
- [8] Hingmann, H. & Ehret, V.: Abschlussbericht des Projektes Radon in hessischen Wasserwerken, Fachhochschule Giessen Friedberg, Fachbereich MNI, Fachgruppe Strahlenschutz, Dezember 2003.
- [9] [http://www.arbeitsschutz.nrw.de/staefa/siegen/publications/Abschlussberichte\\_Programmarbeit/A\\_Radon2003.html](http://www.arbeitsschutz.nrw.de/staefa/siegen/publications/Abschlussberichte_Programmarbeit/A_Radon2003.html), Stand November 2004.
- [10] Radon in Wasserwerken und an Arbeitsplätzen, 17. November 2004, Kursunterlagen des Forschungszentrums Karlsruhe GmbH, Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt.
- [11] [http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/strahlen\\_8968.html](http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/strahlen_8968.html), Stand November 2004.
- [12] [http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/UFO\\_FoRep.pdf](http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/documents/UFO_FoRep.pdf), Stand November 2004.
- [13] <http://www.andechs.de/brauerei/fuehrung/index.html>, Stand September 2004.
- [14] [http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/bahnwelt/bauprojekte/ausbau\\_\\_neubau/vs\\_\\_ausbau\\_\\_neubau.html](http://www.db.de/site/bahn/de/unternehmen/bahnwelt/bauprojekte/ausbau__neubau/vs__ausbau__neubau.html), Stand September 2004.
- [15] Persönliche Mitteilung Herr Honerkamp/DB ProjektBau GmbH, Pressesprecher Niederlassung Süd (G.GKG 1), Oktober 2004.
- [16] [http://www.muenchen-baut.de/p\\_04.htm](http://www.muenchen-baut.de/p_04.htm), Stand September 2004.
- [17] Persönliche Mitteilung Herr Gieshoidt/Baureferat U-Bahnbau der Stadt München, September 2004.
- [18] <http://www.mvv-muenchen.de/de/home/dermvv/unternehmen/zukunftsplanung/u-bahnplanung/index.html>, Stand September 2004.

- [19] Tietze A., Witkowski N., Biehl R. & Pilwat G.: Wolframelektroden mit Thoriumdioxid - Strahlenexposition durch Inhalation von Radionukliden beim Schweißen und Anschleifen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 767, 1997.
- [20] Dalheimer A. & Henrichs K. (Hrsg.): Thorium, Probleme der Inkorporationsüberwachung - Anwendung, Messung, Interpretation -, Seminar in Kloster Scheyern/Bayern am 12. und 13. Oktober 1992, BfS-ISH-161/93, 1993.
- [21] Reichelt A. & Lehmann K.-H.: Antropogene Stoffe und Produkte mit natürlichen Radionukliden, Teil 2: Untersuchungen zur Strahlenexposition beim beruflichen Umgang, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1993.
- [22] DIN EN 26848: Wolframelektroden für Wolfram-Schutzgasschweißen und für Plasmaschneiden und -schweißen, Beuth-Verlag, Berlin, 1991.
- [23] McDowell-Boyer L. M.: Estimated radiation doses from thorium and daughters contained in thoriated welding electrodes, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Standards Development, Division of Engineering Standards, DOE 40-543-75, NRC FIN No. B0114-8, 1979.
- [24] Crim E. M. & Bradley T. D.: Measurements of air concentrations of thorium during grinding and welding operations using thoriated tungsten electrodes, Health Physics 68, S. 719 - 722, 1995.
- [25] Saito H. & Ishida Y.: Radioactivity measurement of tungsten rods containing thorium, Welding International 6 (4), S. 257 - 262, 1992.
- [26] Ludwig T., Schwaß G., Seitz H., Siekmann H. & Spiegel-Ciobanu V.: Freisetzung radioaktiver Stoffe beim WIG-Schweißen mit thoriumhaltigen Elektroden, Die BG, Januar 1997.
- [27] Sternad Th., Kratzel U. & Hellmann H.: Abschlußbericht des Forschungsvorhabens „Innere Strahlenexposition beim berufsbedingten Umgang mit thoriumhaltigen Materialien“, Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, 1999.
- [28] BGI 746: Umgang mit thoriumoxidhaltigen Wolframelektroden beim Wolfram-Inertgas-schweißen (WIG), Berufsgenossenschaftliche Information für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, Fachausschuss „Metall und Oberflächenbehandlung“ der BGZ, 2002.
- [29] Persönliche Mitteilung Herr Ludwig, Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik, August 2003.
- [30] Persönliche Mitteilung Frau Spiegel-Ciobanu, Norddeutsche Metallberufsgenossenschaft, August 2003.
- [31] Persönliche Mitteilung Herr Dr. Rose, Süddeutsche Metallberufsgenossenschaft, Dezember 2003 und Januar 2004.
- [32] Persönliche Mitteilung Herr Müller, Bayerisches Landesamt für Arbeitsschutz, Arbeitsmedizin und Sicherheitstechnik, Januar 2004.
- [33] Persönliche Mitteilung Herr Lott, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Januar 2004.
- [34] Persönliche Mitteilung Herr Bersch, Gewerbeaufsichtsamt Augsburg, Januar 2004.
- [35] Persönliche Mitteilung Herr Tait, Gewerbeaufsichtsamt München-Stadt, Januar 2004.
- [36] Persönliche Mitteilung Herr Heigl, Gewerbeaufsichtsamt München-Land, Januar 2004.
- [37] [http://www.bag.admin.ch/strahlen/actualite/actu/lastnews/d/lastnews\\_6.php](http://www.bag.admin.ch/strahlen/actualite/actu/lastnews/d/lastnews_6.php), Stand September 2004.

- [38] Brenk Systemplanung: Eingrenzung und Bewertung der von den vorgesehenen NORM-Regelungen der Novelle StrlSchV betroffenen Bereiche, erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BS-Bearb. Nr. 9410/2, 2000.
- [39] Mohammadi H. & Mehdizadeh S.: Re-identification of  $^{232}\text{Th}$  Content and Relative Radioactivity Measurements in a Number of Imported Gas Mantles, Health Physics Vol. 44, No. 6, S. 649 - 653, 1983.
- [40] Luetzelschwab J. W. & Googins S. W.: Radioactivity released from burning gas lantern mantles, Health Physics Vol. 46, No. 4, S. 873 - 881, 1984.
- [41] Lewis J., Wheatley J. S. & Wrixon A. D.: Radiological protection standards for thoriated gas mantles, in: Documents of the NRPB: Board Statement on Approval of Consumer Goods Containing Radioactive Substances, Volume 3, No. 2, 1992.
- [42] Schmitt-Hannig A., Drenkard S. & Wheatley J.: Study on consumer products containing radioactive substances in the EU Member States, Radiation Protection 68, European Commission, Abschlußbericht des Instituts für Strahlenhygiene des Bundesamtes für Strahlenschutz, 1995.
- [43] Persönliche Mitteilung Herr Richter, Deutsche Bahn AG, März 2004.
- [44] Bramenkamp P.-R.: Strahlenschutzuntersuchungen beim Umgang mit thoriumhaltigen Gasglühkörpern, Landesanstalt für Arbeitsschutz des Landes NRW, 1992.
- [45] Lide D. R. (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry & Physics – A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data, 71st Edition, CRC Press Inc., 1990-1991.
- [46] EG-Sicherheitsdatenblatt MSA Auer Gasglühkörper gemäß EG-Richtlinie 2001/58/EG, D0500003, überarbeitet am: 12.03.2004.
- [47] Überwachung von Strahlenexpositionen bei Arbeiten, Entwurf des „Leitfaden für die Umsetzung der Regelungen nach Teil 3 Kapitel 1 und 2 StrlSchV“, Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt, 2004.
- [48] Elmer E.: Strahlenexpositionen beim Gebrauch von Camping-Gaslampen, 18. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Lübeck-Travemünde, 1985.
- [49] <http://www.wissenschaft-online.de/artikel/615277>, Stand September 2004.
- [50] Mederer J., Zörkendörfer E. & Stummeyer J.: Die Schwermetallmobilität kristalliner und glasierter NE-Metallschlacken im Vergleich mit basischen und ultrabasischen Natursteinen, in: Schlacken in der Metallurgie, Heft 83 der Schriftenreihe der GDMB, S. 203 - 236, 1999.
- [51] Marquardt R.; Schreck P.; Jahn S.: Migrationspfade von Schwermetallen deponierter Flugstäube (Theisenschlamm) aus Haldenkörpern der Rohhütte Helbra, Mansfelder Revier. Ber. Dtsch. Mineral. Ges., Beih. z. Eur. J. Mineral 8: 181, Stuttgart 1996.
- [52] [http://www.harz-saale.de/Impressionen/Mansfelder\\_Land/mansfelder\\_land.html](http://www.harz-saale.de/Impressionen/Mansfelder_Land/mansfelder_land.html), Stand September 2004.
- [53] Gellermann, R.: Abfälle mit natürlicher Radioaktivität – Teil 1: Bewertung und Überwachung von Materialien und Rückständen, Müll und Abfall, S. 138-143, 2003.
- [54] Persönliche Mitteilung Herr Münch/RWE DEA, Februar 2004
- [55] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie: Rohstoffe in Bayern – Situation, Prognosen, Programm, Referat Bergwesen, mineralische Rohstoffe und Bergaufsicht, 2002.
- [56] Sedlacek, R.: Untertage-Erdgasspeicherung in Deutschland, ERDÖL ERDGAS KOHLE 119. Jg. 2003, Heft 11.
- [57] <http://www.mineralienfreunde.de/Oberbayern/erdoel.html>, Stand September 2004

- [58] Persönliche Mitteilung Herr Vatter/TAL - Deutsche Transalpine Ölleitung GmbH, Februar 2004.
- [59] <http://www.wissenschaft-online.de/artikel/615527>, Stand September 2004.
- [60] Persönliche Mitteilung Herr Dr. Geller/VCI - Verband der Chemischen Industrie e.V., Landesverband Bayern, Juni 2004.
- [61] Persönliche Mitteilung Herr Dr. Pradt/IVA - Industrieverband Agrar e.V., Juli 2004.
- [62] Persönliche Mitteilung Herr Dr. Olschewski/IKW - Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V., Juli 2004.
- [63] Lehmann R.: Strahlenbelastung durch natürliche Radionuklide in Baumaterialien, fossilen Brennstoffen und Düngemitteln, in: Siehl A. (Hrsg.): Umweltradioaktivität, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 1996.
- [64] Reichelt A., Röhler J. & Lehmann K.-H.: Anthropogene Stoffe und Produkte mit natürlichen Radionukliden, Teil 1a: Strahlungseigenschaften von Roh- und Reststoffen - Literaturrecherche -, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1994.
- [65] Richter P. & Stettner G.: Geochemische und Petrographische Untersuchung der Fichtelgebirgsgranite, *Geologica Bavarica* 78, Bayerisches Geologisches Landesamt, 144 S., München 1979.
- [66] Zur Geologie und Geochemie des Oberpfälzer Waldes (NE-Bayern - Metabasite-Apophysen und Randzone des Falkenberger Granitplutons-Goldvererzung, *Geologica Bavarica* 95, Bayerisches Geologisches Landesamt, 95 S., München 1990.
- [67] Ergebnisse petrographischer und geochemischer Untersuchungen im Bayerischen Wald, *Geologica Bavarica* 96, Bayerisches Geologisches Landesamt, 96 S., München 1991.
- [68] Kemski J., Klingel R. & Siehl A.: Die terrestrische Strahlung durch natürlich radioaktive Elemente, in: Siehl A. (Hrsg.): Umweltradioaktivität, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 1996.
- [69] Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition, Band 1 und 2, in: Bundesanzeiger vom 23. Juli 2001, Jahrgang 53, Nr. 160a, 2001.
- [70] Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau), Richtlinienvorschlag der Strahlenschutzkommission, verabschiedet auf der 155. Sitzung der SSK am 02./03.07.1998.
- [71] Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 900 - Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz „Luftgrenzwerte“, Ausgabe: Oktober 2000, zuletzt geändert am 29. April 2003, BarBfI Nr. 6/2003 S.90, 2003.
- [72] Schmid H. & Vidal H. (Hrsg.): Lagerstätten in Bayern – Erze, Industriemineralien, Salze und Brennstoffe, *Geologica Bavarica* 77, Bayerisches Geologisches Landesamt, 160 S., München 1978.
- [73] Bericht über Messungen der allgemeinen Umweltradioaktivität im Raum Schwandorf 1986, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH - Abteilung für Technischen Strahlenschutz, GSF-Bericht 3/88, erstellt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, Juni 1987.
- [74] Bericht über Messungen der allgemeinen Umweltradioaktivität im Raum Schwandorf 1987, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH - Abteilung für Technischen Strahlenschutz, GSF-Bericht 22/88, erstellt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, Mai 1988.
- [75] Persönliche Mitteilung Herr Drexler/Bayerisches Landesamt für Umwelt, Juli 2004.

- [76] Persönliche Mitteilung Frau Dr.-Ing. Schulz-Klemp/Stahlinstitut VDEh, Februar 2004.
- [77] Schulz-Klemp V.: Radioactivity and Steel, Vortrag im Stahlzentrum, 2001.
- [78] H.J. Rösler: Lehrbuch der Mineralogie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 5. Auflage, ISBN 3-342-00288-3, 1991.
- [79] Falbe J. & Regitz M.: Römpf Lexikon Chemie, Band 6 : T-Z, 10. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1999.
- [80] Sternad Th., Hellmann H. & Koch Th.: Untersuchungen zur Strahlenexposition durch natürliche Nuklide in einem Gießereibetrieb, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Tätigkeitsbericht 1999, S. 115-119, 1999.
- [81] Persönliche Mitteilung Herr Dr. Wolff/ Verein Deutscher Gießereifachleute e.V., April 2004.
- [82] Persönliche Mitteilung Herr Müller/Didier-Werke AG und Verband der Deutschen Feuerfestindustrie e.V., Juli und Oktober 2004.
- [83] Puch K.-H., Keller G. & vom Berg W.: Radioactivity of combustion residues from coal fired power stations, Vortrag 1997, 1997.
- [84] Persönliche Mitteilung Herr Puch/VGB Powertech e.V., November 2003.
- [85] Becker D. E. & Reichelt A.: Anthropogene Stoffe und Produkte mit natürlichen Radionukliden – Teil1 - Überblick über die wichtigsten Expositionspfade, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1991.
- [86] Zweite Verordnung zur Änderung der Mineral- und Tafelwasser-Verordnung vom 03. März 2003, in: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2003 Teil I, Nr. 10, ausgegeben zu Bonn am 19. März 2003.
- [87] Brink W. L., Schliekelman R. J., Bennett D. L., Bell Ch. R. & Markwood I.M.: Radium-Removal Efficiencies In Water-Treatment Processes, J. Amer. Water Works Assoc. 70, 1 , S. 31 - 35, 1978.
- [88] Haberer K.: Entfernung von Radionukliden bei der Trinkwasseraufbereitung, in: DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 62, Eschborn 1989.
- [89] <http://www.uni-mainz.de/~eswe/bim.html>, Stand September 2004.
- [90] Lindenthal, W.: Natürliche Uranwerte im Grund- und Trinkwasser Bayerns, hausinternes Poster des ehemaligen Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Referat 92, 2004



## 6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Die radioaktiven Zerfallsreihen; a) Uran-Radium-Zerfallsreihe, b) die Thorium-Zerfallsreihe, c) Uran-Actinium-Zerfallsreihe; grün markiert sind die stabilen Endglieder der Zerfallsreihen [5]	8
Abb. 2:	Die zehn Regionen Bayerns mit ähnlicher geologischer Struktur [6]	12
Abb. 3:	Schematischer Aufbau einer Brauerei, nach [13]; links der gestrichelten Linie befinden sich die Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung, aus denen Radon (Rn) entweichen kann	15
Abb. 4:	Diagramm mit den Ergebnissen der Radonabschätzung in bayerischen Brauereien; n = Gesamtzahl der Brauereien in der entsprechenden Region; 1 bis 10 sind Gebiete mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern (siehe Bayernkarte rechts). Im Gebiet 6 befindet sich keine Brauerei mit eigener Wasserversorgung. 2 MBq·h/m <sup>3</sup> ist der Eingreifwert für die Radonexposition gemäß § 95 StrlSchV [1]; Zahlen in den Säulen = Anzahl der Brauereien in den einzelnen Dosisbereichen.	16
Abb. 5:	Verteilung der Dosis in Brauereien; keine Brauerei mit einer Radonexposition > 2,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	17
Abb. 6:	Diagramm mit den Ergebnissen der Radonabschätzung in bayerischen Mineralwasserherstellern; n = Gesamtzahl der Brauereien in der entsprechenden Region; 1 bis 10 sind Gebiete mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern (siehe Bayernkarte rechts). Im Gebiet 9 befindet sich kein Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung. 2 MBq·h/m <sup>3</sup> ist der Eingreifwert für die Radonexposition gemäß § 95 StrlSchV [1]; Zahlen in den Säulen = Anzahl der Mineralwasserhersteller in den einzelnen Dosisbereichen.	18
Abb. 7:	Verteilung der Dosis in Mineralwasserhersteller; kein Mineralwasserhersteller mit einer Radonexposition > 1,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	19
Abb. 8:	Diagramm mit den Ergebnissen der Radonabschätzung in bayerischen Molkereien; n = Gesamtzahl der Brauereien in der entsprechenden Region; 1 bis 10 sind Gebiete mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern (siehe Bayernkarte rechts). In den Gebieten 1, 6, 9 und 10 befinden sich keine Molkereien mit eigener Wasserversorgung. 2 MBq·h/m <sup>3</sup> ist der Eingreifwert für die Radonexposition gemäß § 95 StrlSchV [1]; Zahlen in den Säulen = Anzahl der Molkereien in den einzelnen Dosisbereichen.	21
Abb. 9:	Verteilung der Dosis in Molkereien; keine Molkerei mit einer Radonexposition > 1,0 MBq·h/m <sup>3</sup>	22
Abb. 10:	Schema der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“ (NÖT) oder Spritzbeton-Bauweise; ein Gebläse drückt Frischluft in sog. Lutten (Schläuche) und damit in den Tunnel [15]	23
Abb. 11:	Frischlufzufuhr bei der Spritzbeton-Bauweise [15]	24
Abb. 12:	Schlitzwand-Deckelbauweise [17]	24
Abb. 13:	Bau eines zusätzlichen Fußgängertunnels an der U-Bahn-Haltestelle Marienplatz [17]; dabei wird der Boden bei minus 40 Grad Celsius vereist.	25
Abb. 14:	Thorierte Wolframelektroden (rechts: WT20)	28
Abb. 15:	Personengetragener Staubsammler	33
Abb. 16:	Stationärer Staubsammler, Kleinprobensammler und personengetragener Probensammler im Einsatz	33
Abb. 17:	Gasglühstrümpfe für Camping-Gaslampen	39
Abb. 18:	Gaslampen mit zwei bzw. vier Glühkörpern	39

- Abb. 19: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Rückstände der Kaolingruben (Betriebe a und b) und der Feldspatgrube (Betrieb c); rote und blaue Linien: Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B der StrlSchV [1]; Qz: Quarz, Fsp: Feldspat; MW = Mittelwert 58
- Abb. 20: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Gesteinsproben aus Bayern; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; mit Zahlen sind Proben eines Betriebes bezeichnet 62
- Abb. 21: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Filterstaubrückstände aus Bayern; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; Ia, b und Qa, b = Filterstäube aus zwei unterschiedlichen Steinbrüchen desselben Betriebes 63
- Abb. 22: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide der untersuchten Schlammrückstände aus Bayern; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV [1] 64
- Abb. 23: Spezifische Aktivitäten der Uran- und Thorium-Nuklide des importierten Gesteinsmaterials; OW = Oberpfälzer Wald, BW = Bayerischer Wald und FG = Fichtelgebirge; rote und blaue Linien = Überwachungsgrenzwerte gemäß Anlage XII, Teil B StrlSchV [1]; mit Zahlen sind Proben eines Betriebes bezeichnet 65
- Abb. 24: Rekultivierte Halde mit Spülsanden aus der Fluoritaufbereitung 71
- Abb. 25: Probenahmeorte (weiße Punkte) der Spülsande 72
- Abb. 26: Bayernkarte mit den natürlichen Uranwerten im Grund- und Trinkwasser [LfW, 2004]; gelbe Flächen = Bereiche mit erhöhten Uranwerten, Punkte: türkis = < Nachweisgrenze, grün = 0,2 - 2 µg/l, grau = 2 - 5 µg/l, gelb = 5 - 10 µg/l, blau = 10 - 20 µg/l und rot = 20 - 100 µg/l; farbige Ellipsen markieren die Gebiete, aus denen die Proben stammen. 84

## 7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Aktuelle Zahlen zu Brauereien, Mineralwasserherstellern und Molkereien	12
Tab. 2:	Die geologische Struktur der zehn Regionen mit ähnlichem Radonpotenzial in Bayern [6]	13
Tab. 3:	Anzahl der untersuchten Betriebe (ohne die geschlossenen) in den zehn Regionen mit ähnlichem Radonpotenzial	13
Tab. 4:	Ergebnisse der Fragebogenaktion bei Brauereien, Stand: Ende 2004	14
Tab. 5:	Brauereien mit eigener Wasserversorgung	14
Tab. 6:	Arten der Wasseraufbereitung	14
Tab. 7:	Bandbreite der Messergebnisse der Radonabschätzung an verschiedenen Messorten aller Brauereien mit eigener Wasserversorgung in Bayern	15
Tab. 8:	Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Brauereien	16
Tab. 9:	Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung	17
Tab. 10:	Bandbreite der Messergebnisse der Radonabschätzung an verschiedenen Messorten aller Mineralwasserhersteller mit eigener Wasserversorgung in Bayern	18
Tab. 11:	Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Mineralwasserherstellern	19
Tab. 12:	Ergebnisse der Fragebogenaktion bei Molkereien	20
Tab. 13:	Molkereien mit eigener Wasserversorgung	20
Tab. 14:	Arten der Wasseraufbereitung	20
Tab. 15:	Bandbreite der Messergebnisse der Radonabschätzung an verschiedenen Messorten aller Molkereien mit eigener Wasserversorgung in Bayern	20
Tab. 16:	Ergebnisse der Radonabschätzung in bayerischen Molkereien	21
Tab. 17:	Anzahl der Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien mit Radonkonzentrationen $> 1000 \text{ Bq/m}^3$ , $= 1000 \text{ Bq/m}^3$ und $< 1000 \text{ Bq/m}^3$ an verschiedenen Messorten	26
Tab. 18:	Bezeichnung, Zusammensetzung und Kennfarbe von thorierten Wolframelektroden (WT) [22]	28
Tab. 19:	Effektivdosen verschiedener Studien; AMAD = Aktivitäts-Medianwert des aerodynamischen Durchmessers eines Partikels im Rauch	29
Tab. 20:	Abgeschätzte effektive Dosen im Betrieb 3 und 5 aus den gemessenen spezifischen Thorium-232-Aktivitäten für den abgesaugten Schleifstaub (Absaugung), den Rauch am Schweißplatz und den Staub am Schleifplatz (mit Staplex genommene Probe); PGS = personengetragener Luftprobensammler	34
Tab. 21:	Effektive Dosiswerte für verschiedene Arbeiten und Elektrodentypen nach BGI 746 [28]	34
Tab. 22:	Ergebnisse der mit den effektiven Dosiswerten aus der BGI 746 [28] abgeschätzten Jahresexposition in den acht untersuchten Betrieben; GS = Gleichstromschweißen, WS = Wechselstromschweißen	35
Tab. 23:	Aktivitäten und Effektivdosen verschiedener Studien beim Gebrauch und Handel mit Glühstrümpfen	37
Tab. 24:	Dosisleistung in der Umgebung einer Schachtel mit 20 Glühkörpern und 15 Schachteln mit je 20 Glühkörpern, eines unverpackten Glühkörpers und einer Gaslampe.	40
Tab. 25:	Ergebnisse der Wischtests	42
Tab. 26:	Ergebnisse der gamma-spektrometrischen Untersuchung von Gasglühkörpern und -strümpfen; rechts des Doppelstrichs = verwendete Glühkörper des von uns untersuchten Betreibers von Gasstraßenbeleuchtungen in Bayern ; GS = Glühstrumpf, GK = Glühkörper	43
Tab. 27:	Messergebnisse der Untersuchung der Personendosis bei der Verwendung von Uranpräparaten in einer bayerischen Universität; EM = Elektronenmikroskop	45

Tab. 28: Ergebnisse der Messung mit einem Kontaminationsmessgerät	45
Tab. 29: Effektivdosen an Arbeitsplätzen mit thorierten Legierungen	45
Tab. 30: Überwachungsgrenzen für Rückstände nach Anlage XII, Teil A der StrlSchV [1]; als Summenformel gilt: $C_{U238max} + C_{Th232max} \leq C$ [1]	48
Tab. 31: Voraussetzungen für die Entlassung aus der Überwachung; als Summenformel gilt: $C^M_{U238max} + C^M_{Th232max} \leq C^M$ [1]; $C^M_{U238max}$ , $C^M_{Th232max}$ : Mittelwerte der spezifischen Aktivitäten als Gesamtaktivität der innerhalb von 12 Monaten auf der Deponie beseitigten überwachungsbedürftigen Rückstände geteilt durch die Gesamtmasse aller innerhalb dieses Zeitraums auf der Deponie beseitigten Rückstände und Abfälle. Die spezifische Aktivität keines Radionuklids der Uran- und Thoriumnuklidketten darf 10 Bq/g bzw. bei der Deponierung auf Deponien für besonders überwachungsbedürftige Abfälle 50 Bq/g überschreiten.	48
Tab. 32: Natürliche Radioaktivität von häufig auftretenden Materialien [63]	52
Tab. 33: Spezifische Aktivitäten für verschiedene Bestandteile von Kaolin [64]	53
Tab. 34: Spezifische Aktivitäten verschiedener Granite aus Bayern und Deutschland [64], [65], [66], [67]	54
Tab. 35: Berechnete Dosisleistungen in 1 m über dem Erdboden für verschiedene Granitareale in Ostbayern [68]	54
Tab. 36: Berechnete Dosisleistungen in 1 m über dem Erdboden für verschiedener Gesteinstypen [68]	55
Tab. 37: Spezifische Aktivitäten der untersuchten Rückstandsproben der Kaolin- und Feldspatgruben	56
Tab. 38: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die Kaolingruben (Betriebe a und b) und für die Feldspatgrube (Betrieb c); Staubkonzentration = 6,48 mg/m <sup>3</sup> (gemessen in Betrieb c); MW = Mittelwert Feldspat-Filterstaub der Kaolingruben (Betriebe a und b); ET = extrathoracic (engl.)	59
Tab. 39: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die Kaolingruben (Betriebe a und b) und für die Feldspatgrube (Betrieb c); Staubkonzentration = 10 mg/m <sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den einatembaren Staubanteil (E); seit 01. April 2004 [71]); MW = Mittelwert Feldspat-Filterstaub der Kaolingruben (Betriebe a und b); ET = extrathoracic (engl.)	59
Tab. 40: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die Kaolingruben (Betriebe a und b) und für die Feldspatgrube (Betrieb c); Staubkonzentration = 3 mg/m <sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den alveolengängigen Staubanteil (A) [71]); MW = Mittelwert Feldspat-Filterstaub der Kaolingruben (Betriebe a und b); ET = extrathoracic (engl.)	59
Tab. 41: Minimal- und Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten des Ausgangsmaterials, von Filterstäuben, von Schlämmen und von Abraum aus dem Bayerischen Wald; n = Anzahl der Proben	60
Tab. 42: Minimal-, Maximal- und Absolutwerte der spezifischen Aktivitäten des Ausgangsmaterials, von Filterstäuben und von Schlämmen aus dem Fichtelgebirge und dem Oberpfälzer Wald; n = Anzahl der Proben	61
Tab. 43: Minimal-, Maximal- und Absolutwerte der spezifischen Aktivitäten von importiertem Gesteinsmaterial; n = Anzahl der Proben	67
Tab. 44: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die untersuchten Betriebe; Staubkonzentration = 6,69 mg/m <sup>3</sup> (gemessen) bzw. 10 mg/m <sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den einatembaren Staubanteil (E); seit 01. April 2004 [71]); I 1, 2 und Q 1, 2: Filterstäube stammen von demselben Betrieb, nur von einem anderen Bruch; bei den Betrieben O und P fallen keine Filterstäube an; ET = extrathoracic (engl.)	69

Tab. 45: Berechnete Körperdosis und Organdosis für sechs Betriebe; Staubkonzentration aus aktuellen Staub-untersuchungen der Steinbruchs-Berufsgenossenschaft in diesen Betrieben; für die Betriebe mit den grau hinterlegten Zellen gibt es keine Staubkonzentration für die einatembare Fraktion; ET = extrathoracic (engl.)	70
Tab. 46: Spezifische Aktivitäten von drei untersuchten Spülsand-Proben von einer rekultivierten Halde bei Wölsendorf; ODL = Ortsdosisleistung	72
Tab. 47: Ergebnisse von Untersuchungen zu Schlacke und Stäuben aus der Stahlerzeugung und Literaturwerte [77]; es handelt sich um Mittelwerte von mehreren Messungen	74
Tab. 48: Ergebnisse von Zirkon und Zirkonprodukten der vier bisher bekannten Betriebe, rot markiert: Radionuklide im Gammaskpektrum überlagert; Proben ZrO <sub>2</sub> a und b sind von zwei verschiedenen Unternehmen; Schleifschlamm a, b und c sind von verschiedenen Unternehmen	76
Tab. 49: Ergebnisse von Feuerfestbauteilen; rot markiert: Radium-226 im Gammaskpektrum von Uran-235 überlagert	78
Tab. 50: Literaturwerte für Nebenprodukte aus der Kohleverbrennung	79
Tab. 51: Bandbreite der spezifischen Aktivitäten der untersuchten Nebenprodukte aus der Kohleverbrennung	80
Tab. 52: Berechnete Körperdosis und Organdosis für die untersuchten Kohlekraftwerke; Staubkonzentration = 3 mg/m <sup>3</sup> (alveolengängiger Staubgrenzwert) bzw. 10 mg/m <sup>3</sup> (allgemeiner Staubgrenzwert für den einatembaren Staubanteil (E); seit 01. April 2004 [71]); a, b und c stehen für verschiedene staubförmige Proben; ET = extrathoracic (engl.)	81
Tab. 53: Ermittelte spezifische Aktivitäten von Radionukliden in Schlämmen aus der Trink- und Mineralwasseraufbereitung; für die Bezeichnung der Wasserversorgungsunternehmen und Mineralbrunnen werden die bei der Radonabschätzung eingeführten REx.-Nummern verwendet; TS = Trockensubstanz; rot = untersuchte Entsäuerungsanlagen	85
Tab. 54: Spezifische Aktivität eines untersuchten Rückspülschlammes aus der Enteisungs-/Entmanganungs- anlage eines Wasserversorgungsunternehmens; blau = über Alpha-Spektrometrie bestimmt, rest-liche Werte über Gamma-Spektrometrie; Uran-234 wird von nicht abgetrenntem Radium-226 überlagert	86



## **8 Anhang**

### **A Ergebnisbericht des IGU - Institut für angewandte Isotopen-, Gas- und Umweltuntersuchungen**



Bericht

zur

Arbeitsplatzüberwachung  
**beim Schweißen  
mit  
Thoriumelektroden**

im Auftrag des

**Bayerischen Landesamts  
für Umweltschutz**

**Dr. J. Salvamoser**

Dez. 2004

**IGU**

---

**Institut für angewandte Isotopen-, Gas- und Umweltuntersuchungen  
Wörthseestr. 34 a, 82237 Wörthsee, Tel. 08143 8583, Fax 08143 94363**



## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung .....	2
2. Erhebung der Anwender thorierter Elektroden .....	2
3. Elektrodenmaterial.....	3
4. Messmethodik.....	3
4.1 Probensammlung.....	3
Geräte.....	3
Staplex Aerosolsammler .....	3
Personen getragener Aerosolsammler (PGS).....	4
Kleinvolumen Aerosolsammler (KPS) .....	4
4.2 Radioaktivitätsbestimmung.....	4
5. Beprobungen und Messergebnisse .....	4
5.1 Betrieb 3 (anonymisiert).....	4
5.1.1 Wischprüfungen .....	5
5.1.2 Materialproben .....	5
5.1.3 Staplex Sammler.....	6
5.1.4 Personengebundener Sammler .....	7
5.1.5 Kleinvolumen Probensammler .....	7
5.2 Betrieb 5 (anonymisiert).....	8
5.2.1 Wischprüfungen .....	8
5.2.2 Materialproben .....	8
5.2.3. Staplex Sammler.....	9
5.2.4 Personengebundener Sammler .....	10
6. Vergleich der Probenentnahme .....	10
6.1. Vergleich Probenentnahme Thorium .....	10
6.2. Vergleich Probenentnahme Schwermetalle .....	11

## 1. Zusammenfassung

Es sollten Messungen zur Arbeitsplatzüberwachung nach § 95 (Anlage XI Teil B) StrlSchV durchgeführt werden. Dazu wurden bei einigen Firmen vor Ort beim Schweiß- und Schleifbetrieb Luftprobenmessungen zur Abschätzung einer auf den Arbeitsplatz bezogenen Dosis durchgeführt. Ergänzend wurden Wischprüfungen und Materialproben entnommen, sowie Messungen mit einem Kontaminationsmonitor durchgeführt. Die Messungen der Wisch- und Materialproben erfolgten über Gammaskpektrometrie.

## 2. Erhebung der Anwender thoriierter Elektroden

Die Auswahl der Firmen die mit thorierten Elektroden schweißen, wurde vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz durchgeführt. Nach einer langen schwierigen Recherche blieben für die engere Auswahl 8 Firmen übrig. Anhand eines vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz erstellten Erhebungsbogen wurden Kriterien für eine Präferenzliste der in Frage kommenden Firmen erstellt. Die Beprobung der Firmen sollte in absteigender Folge der Schweißintensität, der Verwendungshäufigkeit thoriierter Elektroden, Arbeitszeit beim Schweißen erfolgen.

Nachfolgende Firmen standen nach der Rücksendung des Erhebungsbogens zur Auswahl (anonymisiert):

Betrieb 1  
Betrieb 2  
Betrieb 3  
Betrieb 4  
Betrieb 5  
Betrieb 6  
Betrieb 7  
Betrieb 8

Nach Angaben auf dem Erhebungsbogen verwenden diese Firmen thoriumhaltige Schweißelektroden, allerdings mit zum Teil sehr unterschiedlichen Anwendungszeiten und Anwendungsintensitäten.

Die Zahl der Firmen die thorierte Elektroden verwenden ist zwischenzeitlich sehr stark zurückgegangen. In den meisten Fällen werden heute nur noch alternative Elektroden als Ersatz für die thoriumhaltigen Elektroden verwendet. Nur noch in Einzelfällen wird der Vorteil längerer Standzeiten der thorierten Elektroden gegen über anderen als vorteilhaft bewertet, insbesondere bei Montagearbeiten wird in einem Fall der Vorteil der Verwendung thoriierter Elektroden hervorgehoben.

Entsprechend dieser Tendenz des sehr starken Rückgangs der Verwendung thoriierter Elektroden waren für die Untersuchung entgegen der ursprünglichen Erwartung, wie in den Erhebungsbögen angegeben, auch unter den ausgewählten Firmen kaum Betriebe mit einem für Messungen geeignetem Umgang mit thorierten Elektroden zu finden.

Ein Teil der Firmen hat seit Ausfüllen des Erhebungsbogens auf thoriumfreie Elektroden umgestellt. Einige Betriebe haben den Schweißbetrieb deutlich reduziert, sodass kein sinnvolle Probenentnahme gewährleistet war, ein Firma hatte Insolvenz angemeldet und den Schweißbetrieb inzwischen komplett eingestellt. Bei einer weiteren Firma stellte sich vor der Probenentnahme heraus, dass hier erst kürzlich auf thoriumfreie Elektroden umgestellt wurde. Freundlicherweise wurden dann für die Dauer der Probenentnahme einige Werkstücke mit thorierten Elektroden geschweißt, sodass wenigstens die geplante Probenentnahme durchgeführt werden konnte. Diese Entnahme kann zwar als repräsentativ für Entnahme, Messung und Auswertung betrachtet werden allerdings nicht als repräsentativ für weitere Dosisbetrachtungen. Aufgrund dieser Tatsachen blieb für die Untersuchung lediglich eine Firma übrig.

An dieser Stelle möchten wir allen beteiligten Firmen für ihre Mithilfe und Bereitschaft zur Zusammenarbeit danken.

### 3. Elektrodenmaterial

Beim Schweißen mit thorierten Elektroden werden unterschiedliche Elektroden verwendet. Nachfolgende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Elektroden und deren Th Gehalt

Elektrode [g]	1	1	1	1	1
Typ	WT 4	WT 10	WT 20	WT 30	WT 40
ThO <sub>2</sub> Gehalt [%]	0,35-0,55	0,8-1,2	1,8-2,2	2,8-3,2	3,8-4,2
mittl. Gehalt [%]	0,4%	1%	2%	3%	4%
ThO <sub>2</sub> Gehalt [g]	0,004	0,01	0,02	0,03	0,04
Th-232 [g]	0,0035	0,0088	0,0176	0,026	0,035
Th-232[Bq]	13,65	34,32	68,64	101,4	136,5

Massen und Aktivitätsgehalte von Thorium bezogen auf 1 g Elektrodenmaterial für unterschiedliche Elektrodentypen

### 4. Messmethodik

#### 4.1 Probensammlung

##### Geräte

##### Staplex Aerosolsammler

Für die Aerosolsammlung wurden Staplex Aerosol Sammler mit Durchflüssen von ca. 1 m<sup>3</sup>/min verwendet

Sammler 1: Durchfluss 1 m<sup>3</sup>/min, Volumenmessung über Schwebekörper Durchflussanzeige

Sammler 2: Durchfluss 1,5 m<sup>3</sup>/min, Volumenmessung über Gasuhr

Verwendete Filter:

Filter für Gammastrahlung und ICP-MS Messung:

Glasfaser Rundfilter, Ø 200 mm, Schleicher und Schüll, No 370111

Filter für Alphaspektrometrie:

Celluloseacetat Membranfilter, Ø 23 mm, 5 µ, Schleicher und Schüll, Typ AE 98

Bei den Celluloseacetat Membranfiltern wurde ein Glasfaserfilter als Stützfilter dahintergeschaltet, dadurch wurde auch der Durchfluss reduziert und es konnte das Rückhaltevermögen des Celluloseacetatfilters geprüft werden.

### Personen getragener Aerosolsammler (PGS)

Durchfluss 4 – 4,5 l/min, Volumenmessung über Schwebekörper Durchflussanzeige

Verwendete Filter: Glasfaser Rundfilter Ø 36 mm

### Kleinvolumen Aerosolsammler (KPS)

Durchfluss 2,3 m<sup>3</sup>/h, Volumenmessung über Schwebekörper Durchflussanzeige

Verwendete Filter: Glasfaser Rundfilter, Ø 47 mm

## **4.2 Radioaktivitätsbestimmung**

Die Glasfaserfilter wurden gammaspektrometrisch über die Bestimmung der Tochter-nuklide von Th-232 und Th-228 ausgewertet.

Ergänzend erfolgte an den Glasfaserfiltern (Staplex, PGS, KPS) eine Thoriumbestimmung (Bestimmung von Th-232) über ICP MS.

Die erforderlichen Nachweisgrenzen sollten im Bereich einiger mBq/m<sup>3</sup> liegen. Entsprechend der gewählten Messmethode wurde die Luftsammlung ausgelegt.

Die Messung der Wischproben erfolgte über Gammaskpektrometrie und LSC.

## **5. Beprobungen und Messergebnisse:**

### **5.1 Betrieb 3 (anonymisiert)**

Schweiß und Schleifarbeiten werden hier im selben Raum durchgeführt. Die Raumgröße liegt bei ca. 10 x 14 x 3,5 m. Es ist eine Schweißfachkraft tätig, die Arbeiten in der Werkstatt und auf Montage durchführt. Die Schweißarbeiten werden im Wesentlichen für Reparaturarbeiten an Druckkesseln und Leitungssystemen durchgeführt. Schweißzeiten und Intensitäten richten sich demnach nach anfallenden Reparatur und Wartungsarbeiten und sind damit nicht kontinuierlich. Die verwendete Schleifmaschine verfügt über eine eigene Absaugung. Das Schleifen wird nicht per Hand durchgeführt, sondern läuft automatisch ab.

Es wurden jeweils Beprobungen mit einem Staplex-Sammler für Gammaskpektrometrie, ICP MS und alpha Spektrometrie am Schweißplatz und neben der Schleifmaschine durchgeführt. Bei der Aerosolsammlung (Staplex Sammler) am Schweißplatz lag die Entfernung zum Schweißer bei ca. 50 cm. Während der Entnahme wurden in der Werkstatt auch Schleif- und Flexarbeiten durchgeführt, die zu einer allgemeinen Erhöhung des Staubanteils führten.

Messungen mit einem Szintomaten und einem Kontaminationsmonitor (gasgespült und Xenon) in der Halle im Bereich Schweißstisch, Absaugung Schleifmaschine und Boden ergaben keinen Messeffekt über dem Untergrund. Verschiedene Wischprüfungen ergaben keinen Messeffekt über der Nachweisgrenze. Für die Umrechnung in Aktivitäten wurde für Th-232 ein Wert vom 3,9 mBq/µg verwendet.

Ergänzend wurden bei den Glasfaserfilter Proben zusätzlich einige Metalle bestimmt.

Die Absolutgehalte an Thorium zeigen für die Proben vom Schweißplatz und Schleifplatz keine wesentlichen Unterschiede. Das Verhältnis der Metalle zueinander bei Normierung auf Eisen zeigt deutlich höheren Th Anteil beim Schleifen gegenüber der Probe vom Schweißplatz.

## 5.1.1 Wischprüfungen

	Ac-228 Bq/cm <sup>2</sup>	Tl-208 Bq/cm <sup>2</sup>	G-α Bq/cm <sup>2</sup>	G-β Bq/cm <sup>2</sup>
Schraubstock Schweißstisch	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
Schleifmaschine Schweißstisch	< 0,05	< 0,05	0,04	0,02
Schraubstock Werkbank Wand	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
Schraubstock Schweißstisch Mitte	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
Staubsauger außen	< 0,05	< 0,05	0,02	< 0,01
Boden bei Staubsauger				

## 5.1.2 Materialproben

## Schweißelektrode Typ WT4

Die Elektrode trug keine Farbmarkierung die den Typ kennzeichnet, nach der Messung handelt es sich um den Typ WT4

	Bq/g
Ac-228	14,5 ± 0,5
Th-228	16,9 ± 4
Ra-224	11,1 ± 0,7
Pb-212	10,5 ± 0,4
Bi-212	14,0 ± 1,0
Tl-208	13,9 ± 0,5
Th-234	< 0,2
Pb-214	< 0,04
Bi-214	< 0,043
U-235	< 0,1
K-40	1,2 ± 0,3

## Schleifstaub aus Absaugung

	Bq/g
Ac-228	3,3 ± 0,45
Th-228	4,5 ± 0,08
Ra-224	4,19 ± 0,1
Pb-212	4,05 ± 0,07
Bi-212	4,84 ± 0,15
Tl-208	4,1 ± 0,05
Th-234	0,79 ± 0,8
Pb-214	0,73 ± 0,03
Bi-214	0,73 ± 0,02
U-235	0,046 ± 0,012
K-40	0,021 ± 0,005

### 5.1.3 Staplex Sammler

Glasfaserfilter:

Schweißplatz: Luftmenge 60 m<sup>3</sup>

Gammaskpektrometrie

Metall (Me)	aus ICP MS		Ac-228	Tl-208	Verhältnis Me/Fe
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{mBq}/\text{m}^3$	Gamma $\text{mBq}/\text{m}^3$	Gamma $\text{mBq}/\text{m}^3$	
Th	0,54	2,12	2,30	2,04	0,004
Cd	0,51				0,004
Cr	1,34				0,010
Ni	2,24				0,017
Mo	1,11				0,008
Fe	134				1
Co	0,48				0,004
Mn	13,3				0,099

Schleifplatz: Luftmenge 80 m<sup>3</sup>

Gammaskpektrometrie

Metall (Me)	ICP MS		Ac-228	Tl-208	Verhältnis Me/Fe
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{mBq}/\text{m}^3$	Gamma $\text{mBq}/\text{m}^3$	Gamma $\text{mBq}/\text{m}^3$	
Th	0,74	2,90	2,78	2,5	0,020
Cd	0,40				0,011
Cr	0,69				0,019
Ni	1,45				0,039
Mo	0,86				0,023
Fe	37				1
Co	0,41				0,011
Mn	1,8				0,049

### 5.1.4 Personengebundener Sammler

Personengetragen: Luftmenge 800 l

Metall (Me)	ICP MS		Verhältnis Me/Fe
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{mBq}/\text{m}^3$	
Th	0,2	0,77	0,001
Cd			0,000
Cr	157		0,548
Ni	273		0,952
Mo	147		0,511
Fe	287		1,000
Co	0,4		0,001
Mn	15,3		0,053

### 5.1.5 Kleinvolumen Probensammler

#### Filter 1

Kleinvolumensammler: Luftmenge 2,04 m<sup>3</sup>

	ICP MS µg/m <sup>3</sup>	ICP MS mBq/m <sup>3</sup>	
Th	0,74	2,9	
Metall (Me)	ICP MS µg/m <sup>3</sup>	ICP MS mBq/m <sup>3</sup>	Verhältnis Me/Fe
Th	0,74	2,9	0,001
Cd			0,000
Cr	12,70		0,013
Ni	10,59		0,011
Mo	8,19		0,008
Fe	988,73		1,000
Co	0,20		0,0002
Mn	379,90		0,384

#### Filter 2

Kleinvolumensammler: Luftmenge 4,33 m<sup>3</sup>

	ICP MS µg/m <sup>3</sup>	ICP MS mBq/m <sup>3</sup>
Th	0,26	1,0

## 5.2 Betrieb 5 (anonymisiert)

Schweiß und Schleifarbeiten werden hier in unterschiedlichen Werkshallen durchgeführt. Die Raumgröße liegt bei ca. 10 x 14 x 3,5 m. Zum Zeitpunkt der Entnahme war in der Halle die zur Beprobung vorgesehen war eine Schweißfachkraft tätig. Es werden fast ausschließlich Arbeiten in der Fertigung und an Neukonstruktionen durchgeführt. Schweißzeiten und Intensitäten sind weitgehend kontinuierlich, allerdings an wechselnden Standorten und Geräten innerhalb der Firma. Die verwendete Schleifmaschine verfügt über keine eigene Absaugung. Das Schleifen wird per Hand durchgeführt.

Beim Betrieb 5 wurde erst kürzlich auf Th-freie Elektroden umgestellt. Für die Beprobung wurden nochmals thorierte Elektroden verwendet. Der Elektrodentyp der verwendet wurde ist nicht bekannt.

Da die Beprobung für weitere Dosisbetrachtungen in diesem Fall nicht mehr relevant war, wurde nur jeweils eine Beprobungen mit einem Staplex-Sammler für Gamma Spektrometrie, ICP MS und Alpha Spektrometrie durchgeführt, sowie eine Entnahme mit dem Personen getragenen Sammler (PGS). Ergänzend wurden Wischproben entnommen und Messungen mit einem Kontaminationsmonitor durchgeführt.

Die Wischproben ergaben keine erkennbaren Kontaminationen. Mit dem Kontaminationsmonitor wurde im Eingangsbereich eine Erhöhung (etwa doppelter Nulleffekt) fest-

gestellt, was auf die Verwendung granithaltiger Zuschläge zum Asphalt zurückzuführen war (siehe 5.2.2.)

### 5.2.1 Wischprüfungen

	Ac-228 Bq/cm <sup>2</sup>	Tl-208 Bq/cm <sup>2</sup>	G-α Bq/cm <sup>2</sup>	G-β Bq/cm <sup>2</sup>
Schleifmaschine Umfeld	< 0,05	< 0,05	0,02	< 0,01
Schleifmaschine	< 0,05	< 0,05	0,04	0,015
Boden Schleifmasch. Ständer	< 0,05	< 0,05	0,025	< 0,01
Werkbank neben Schweißstisch	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
Arbeitsplatz	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01

### 5.2.2 Materialproben

Staub im Eingangsbereich (hoher Eisenanteil)

	Bq/g
Ac-228	0,07 ± 0,02
Th-228	< 0,03
Ra-224	< 0,05
Pb-212	0,09 ± 0,01
Bi-212	0,1 ± 0,05
Tl-208	0,12 ± 0,02
Th-234	< 0,2
Pb-214	< 0,04
Bi-214	< 0,043
U-235	< 0,1
K-40	0,1 ± 0,1
Cs-137	0,02 ± 0,005

### 5.2.3. Staplex Sammler

Glasfaserfilter:

Schweißplatz: Luftmenge 60 m<sup>3</sup>

Gammaskpektrometrie

Metall (Me)	aus ICP MS µg/m <sup>3</sup>	aus ICP MS mBq/m <sup>3</sup>	Ac-228 Gamma mBq/m <sup>3</sup>	Tl-208 Gamma mBq/m <sup>3</sup>
Th	0,06	0,22	< 1	< 1

Metall (Me)	ICP MS µg/m <sup>3</sup>	ICP MS mBq/m <sup>3</sup>	Verhältnis Me/Fe
Th	0,056	0,22	0,0017
Cd			0,0000
Cr	1,303		0,0409
Ni	0,387		0,0121
Mo	0,150		0,0047
Fe	31,833		1,0000
Co	0,010		0,0003
Mn	0,913		0,0287

## 5.2.4 Personengebundener Sammler

Personengetragen: Luftmenge 800 l

	ICP MS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ICP MS $\text{mBq}/\text{m}^3$	
Th	0,1	0,39	
Metall (Me)	ICP MS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ICP MS $\text{mBq}/\text{m}^3$	Verhältnis Me/Fe
Th	0,10	0,39	0,0032
Cd			0,0000
Cr	36,88		1,1800
Ni	4,88		0,1560
Mo	5,00		0,1600
Fe	31,25		1,0000
Co	0,04		0,0012
Mn	3,13		0,1000

## 6. Vergleich der Probenentnahme

### 6.1. Vergleich Probenentnahme Thorium

	Staplex $\text{mBq}/\text{m}^3$	KPS $\text{mBq}/\text{m}^3$	PGS $\text{mBq}/\text{m}^3$
Betrieb 3	2,1	2,9; 1,0	0,77
Betrieb 5	0,22		0,39

Der Vergleich der unterschiedlichen Entnahmegерäte zeigt kein einheitliches Bild. Entnahmen mit einem Staplex Aerosolsammler und dem verwendeten Klein-Volumen Proben-sammler zeigen vergleichbare Ergebnisse. Der Vergleich Staplex Aerosolsammler und Personengetragener Sammler (PGS) lässt keine Überbewertung des einen oder anderen Systems zu. Möglicherweise sind die Unterschiede in den Entnahmebedingungen zu suchen. Beim Betrieb 3 war die Staplex Entnahme sehr nahe dem Schweißplatz positioniert (ca. 80 – 100 cm) und wurde während der Entnahme nicht versetzt. In diesem Fall war der Schweißplatz statisch und das Werkstück wurde falls notwendig bewegt.

Aufgrund der Größe des Werkstücks konnte beim Betrieb 5 der Staplex Aerosolsammler nicht so nahe am Schweißplatz positioniert werden. Im Gegensatz dazu war hier das Werkstück statisch und die Schweißarbeiten „mobil“, der Schweißer bewegte sich am Werkstück, sodass die Entfernung zum Sammler im Bereich von 120 – 200 cm variierte. Der Sammler wurde deshalb während des Betriebs zweimal umgesetzt.

Aufgrund der Rahmenbedingungen wie Schweißplatz, Entnahmeabstand und Hallengröße werden die Entnahmen beim Betrieb 3 als repräsentativer für den Vergleich Staplex und PGS angesehen. Dies heißt, dass durch die Verwendung eines Staplex Sammlers (Großvolumen-Aerosolsammler) oder auch eines Klein-Volumen Proben-sammler eine etwas höhere spezifische Aktivität pro  $\text{m}^3$  Luft gegenüber dem Personen-

getragener Sammler erreicht wird, was dann bei einer Dosisbetrachtung zu einer konservativeren Abschätzung führt. Für mögliche weitere oder ähnliche Untersuchungen sind Entnahmen mit einem Staplex Sammler oder einem vergleichbaren Großvolumen-Aerosolsammler aus unserer Sicht ausreichend. Zudem sind die Entnahmebedingungen sehr einfach und die höhere Entnahmemenge für weitergehende Untersuchungen von Vorteil.

### 6.2. Vergleich Probenentnahme Schwermetalle

Parallel zu den Untersuchungen über Th wurden eine Reihe von Schwermetallen auf den Filtern untersucht um Vergleiche zu Th zu ermöglichen. Die Schwermetalle Fe, Cr, Ni, Mo, Co, Cd, Mn wurden über ICP Ms bestimmt. Die Schwermetallgehalte sind in Abb. 1 eingezeichnet (L= Betrieb 3, W= Betrieb 5). Die Sammlung erfolgte auf Staplex-Sammlern (schweißen L,W und schleifen L) sowie dem personen-getragenen Sammler (PGS L,W) und dem Kleinvolumensammler (KPS L).

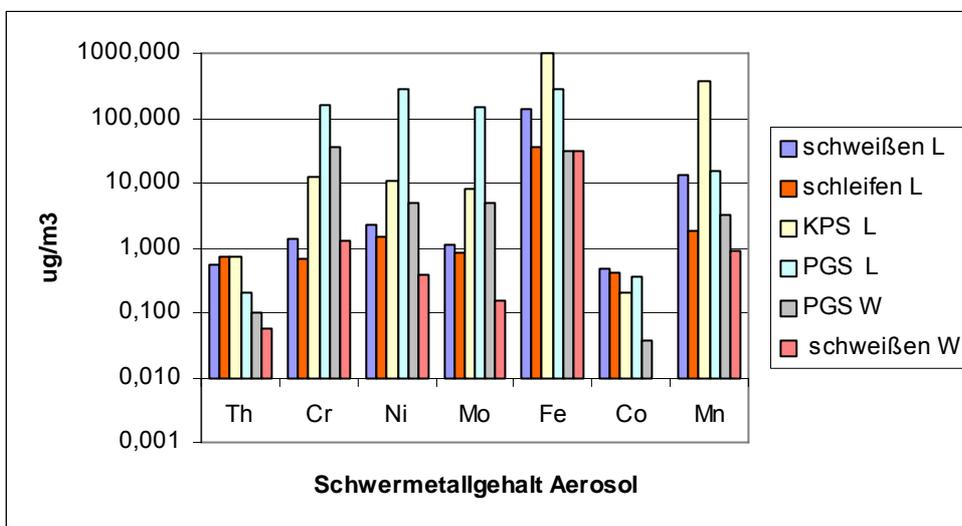


Abb. 1a: Log Darstellung der Schwermetallgehalte auf Aerosolfiltern beim Schweißen und Schleifen mit unterschiedlichen Sammlern.

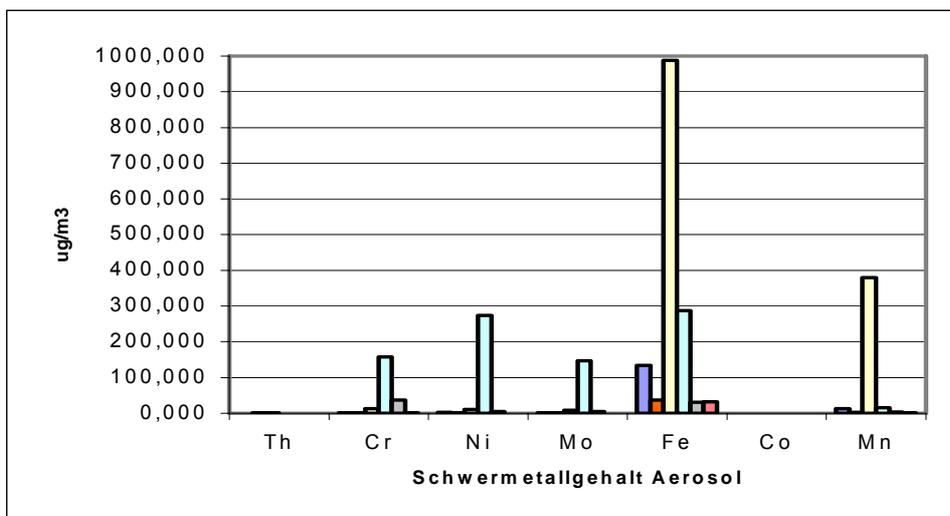


Abb. 1b: Lin Darstellung der Schwermetallgehalte auf Aerosolfiltern

Abb. 1b zeigt deutlich die Überhöhung von Fe und Mn bei dem Klein Probensammler. Dies dürfte von Schleif- und Flex Arbeiten herrühren die parallel zu den Schweißarbeiten durchgeführt wurden. Möglicherweise wurden dabei auch andere Materialien bearbeitet als beim Schweißen. Fe und Mn wurden deshalb für die Weiteren Vergleiche nicht berücksichtigt. Die Normierung auf Fe zeigt die deutlich erhöhten Anteile an Cr, Ni, und Mo beim Personengetragenen-Sammler gegenüber der Sammlung mit einem Staplex-Sammler oder dem Klein Probensammler. Dies dürfte auf die erhöhte Freisetzung dieser Metalle am Ort des Schweißens und eine relativ schnelle Deposition mit zunehmendem Abstand zurückzuführen sein. Die Sammlung mit Staplex-Sammler und Kleinprobensammler die in etwas größerem Abstand stattfand, ergibt für Cr, Ni, und Mo vergleichbare Gehalte. Für Thorium zeigt sich, dass eine etwa gleiche bis geringere Sammlung auf den Personengetragenen Sammler gegenüber den beiden anderen Sammlern erreicht wird. Bei vergleichbarer Freisetzung wie für Cr, Ni, und Mo würde dies eine verminderte Deposition von Th mit zunehmendem Abstand bedeuten, was nicht erklärt werden kann.

Die Verhältnisse von Cr/Th, Ni/Th und Mo/Th ergeben für L und unterschiedliche Sammlung vergleichbare Größen, für W jedoch deutliche Unterschiede gegenüber L, da vermutlich andere Materialien geschweißt wurden. Ein „Leitmetall“ (z.B. Cr, Ni, oder Mo) anstelle von Thorium zu bestimmen erscheint deshalb nicht sinnvoll. Zum Problem der Probensammlung käme noch die Materialabhängigkeit.

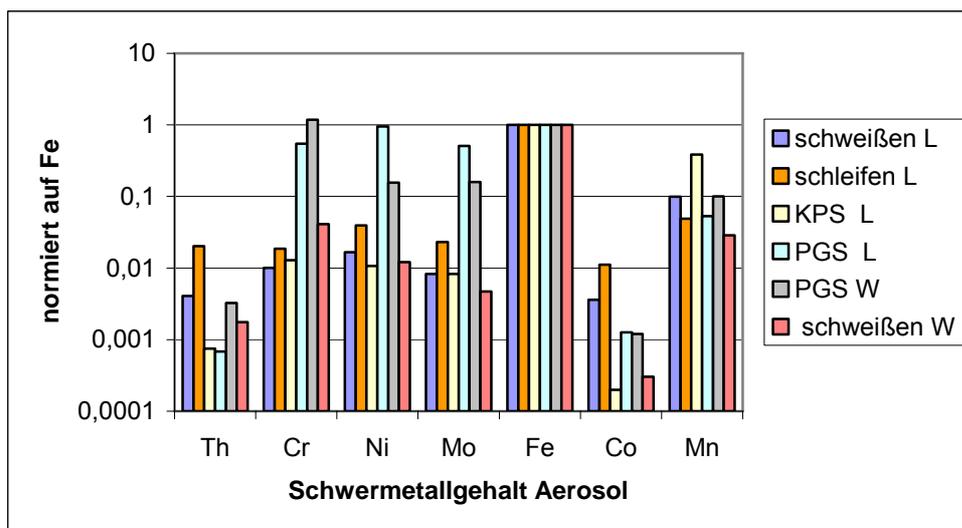


Abb. 2: Schwermetallgehalte auf Aerosolfiltern normiert auf den Eisengehalt

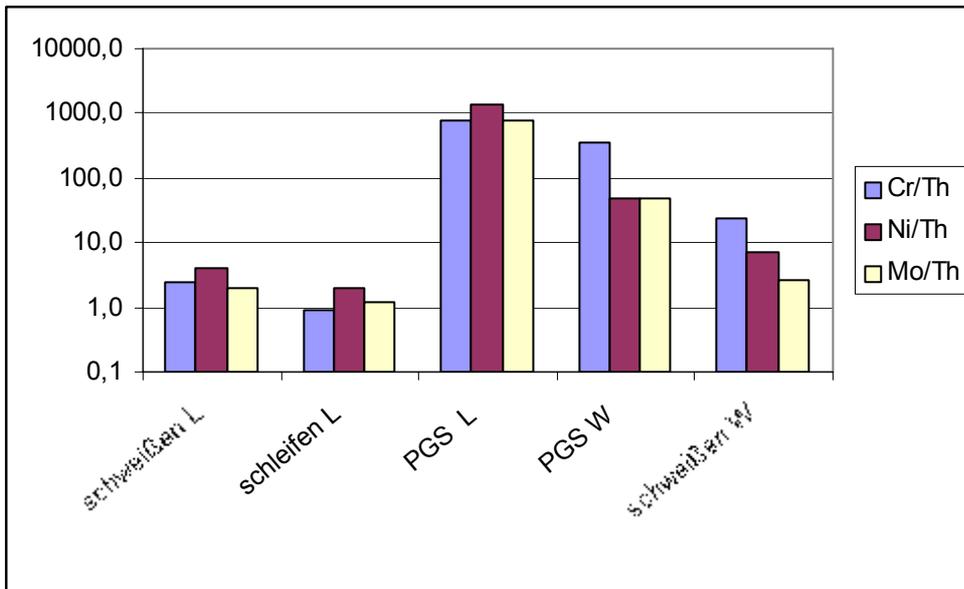


Abb. 3: Verhältnis im Aerosol von Cr, Ni, Mo zu Th

## **B Fragebogen und Anschreiben an Betriebe der Anlage XI**

### **B.1 Fragebogen und Messaufforderung an Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien**

Die Brauereien, Mineralwasserhersteller und Molkereien erhielten vergleichbare Fragebögen, Messaufforderungen, Ablaufpläne und Messprotokolle (Abschnitte B.1.1 bis B.1.3).



## B.1.1 Fragebogen

Bayerisches Landesamt  
für Umweltschutz



*Rückantwort*

An das  
Bayerische Landesamt für Umweltschutz  
z.H. Dr. R. Mallick

86177 Augsburg

### Fragebogen

Name der Molkerei	:
Adresse	:
Verantwortlicher Leiter	:
Telefonnummer Leiter	:
Ansprechpartner	:
Telefonnummer Ansprechp.	:

1. Haben Sie eine eigene Wasserversorgung (Brunnen, Quelle)?

ja

nein

wenn nein, woher (Gemeinde, Stadt) erhalten Sie Ihr Wasser?

.....

Die Beantwortung der folgenden Fragen entfällt, wenn keine eigene Wasserversorgung vorhanden ist.

**Um Beantwortung wird gebeten, wenn eine eigene Wasserversorgung vorhanden ist!**

2. Anzahl der Brunnen? (Bitte angeben: Tiefe, Fördermenge und ob der Brunnen/Brunnenstube begehbar ist)

.....

.....

.....



# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



8. Haben Sie in den verschiedenen Bereichen der Molkerei eine geschlossene Entlüftung ins Freie (Rohrsystem, Absaugrohre, Ventilatoren) oder gibt es Bereiche mit Entlüftung, Druckausgleich in den Raum (über Ventile, Filter)?

Geschlossene Entlüftung ins Freie

Entlüftung in den Raum (Ventile)

Bitte angeben, in welchen Bereichen der Molkerei die Entlüftung in den Raum geht?

BEREICH	ENTLÜFTUNG IN DEN RAUM

9. Gibt es in Ihrer Molkerei weitere Arbeitsplätze, die mit offenen Wasserflächen (in Form von Becken z.B. in der Produktion) in Berührung kommen? Bitte beschreiben Sie kurz den Arbeitsplatz:

.....

.....

.....

10. Gibt es unterirdische Gewölbe älterer Bauart, in denen Ihre Produkte gelagert werden?

ja  nein

Bitte geben Sie die Bezeichnung des Gewölbes und die mittlere Aufenthaltszeit pro Jahr der Beschäftigten in diesen Gewölben an (wenn vorhanden):

NR.	BEZEICHNUNG DES GEWÖLBES	MITTLERE AUFENTHALTSZEIT PRO JAHR
1		
2		
3		
4		
5		

# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



11. Gibt es in der Abfüllanlage Bereiche (z.B. Waschmaschine für Flaschen, Gläser oder Füller), bei denen Wasser ausströmen oder Luft/Dampf in den Raum entweichen kann?

ja

nein

wenn ja, wo? .....

12. Aus welchen Teilbereichen besteht die Abfüllanlage? Bitte angeben, wenn vorhanden:

BEREICHE DER ABFÜLLANLAGE

13. Wie viele Beschäftigte arbeiten in Bereichen der Wasserförderung, -speicherung oder -aufbereitung (Wasserbehälter, -aufbereitungsanlagen, aus denen Luft in den Raum entweichen kann)? Bitte angeben.

NR.	BEZEICHNUNG DES BEREICHS	ANZAHL DER BESCHÄFTIGTEN
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



14. Welche Tätigkeiten werden in den o.g. Bereichen und von wem werden sie ausgeführt? Bitte die durchschnittliche Aufenthaltszeit angeben.

NR.	TÄTIGKEIT	NAME DES BESCHÄFTIGTEN	AUFENTHALT (STUNDEN PRO JAHR)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

15. Haben Sie eine eigene Kläranlage zur Aufbereitung des anfallenden Abwassers?

ja

nein

16. Was passiert mit dem anfallenden Klärschlamm?

.....  
 .....

17. Weitere Daten zu den einzelnen oben aufgeführten Bereichen:

### Wasserbehälter (wenn vorhanden)

Name oder Bezeichnung der/des Wasserbehälter(s): .....

.....

Volumen der/des Wasserbehälter(s): ..... Kubikmeter

Wasserabgabe der/des Wasserbehälter(s): ..... Kubikmeter im Jahr

Welche Lüftung (im Raum) ist vorhanden?

Keine

Schlitze, Fenster

Ventilator

Sonstige .....

# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



## Behälterreinigung:

Wie oft werden die/der Wasserbehälter gereinigt? jährlich   
alle ..... Jahre

Wie lange dauert die Reinigung? ..... Stunden

Wie viele Personen sind bei der Reinigung beschäftigt? ..... Personen

Wird die Reinigung von einer externen Firma durchgeführt? ja  nein

wenn ja, bitte die Adresse der externen Firma angeben:

.....  
.....  
.....

## Wasseraufbereitung (wenn vorhanden)

Name oder Bezeichnung der Aufbereitungsanlage: .....

Sind offene Filter vorhanden? ja  nein

Durchfluss durch die Filter: ..... Liter pro Sekunde

Welche Lüftung (im Raum) ist vorhanden? Keine

Schlitze, Fenster

Ventilator

Sonstige .....

# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



## Reinigung der Aufbereitungsanlage:

Rückspülung ja  nein

Wie oft wird gereinigt? wöchentlich

jährlich

alle ..... Jahre

Wie lange dauert die Reinigung? ..... Stunden

Wie viele Personen sind bei der Reinigung beschäftigt? ..... Personen

Wie oft werden die Filter ausgetauscht (wenn vorhanden)? alle ..... Monate

Wird die Reinigung von einer externen Firma durchgeführt? ja  nein

wenn ja, bitte die Adresse der externen Firma angeben:

.....  
.....

Fallen bei der Reinigung oder Rückspülung der Aufbereitungsanlage Rückstände an (z.B. in Form von Schlämmen aus der Enteisung oder Entmanganung des Rohwassers)

ja  nein

Besteht die Möglichkeit zu einer Probenahme dieser Rückstände

ja  nein

Was passiert mit den gebrauchten Filtern oder dem gebrauchten Filterkies (wenn vorhanden)?

.....  
.....

# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



## Abfüllanlage (wenn vorhanden)

Wie viele Abfüllanlagen gibt es? ..... Anlagen  
Durchsatz: ..... Flaschen/Gläser pro Stunde  
Welche Produkte werden abgefüllt? .....

### Reinigung der Abfüllanlagen:

Wie oft werden die Abfüllanlagen gereinigt?      täglich        
   nach jedem Gebrauch        
   alle ..... Monate        
Wie lange dauert die Reinigung? ..... Stunden  
Wie viele Personen sind bei der Reinigung beschäftigt? ..... Personen  
Wird die Reinigung von einer externen Firma durchgeführt?      ja            nein     

wenn ja, bitte die Adresse der externen Firma angeben:  
.....  
.....  
.....

18. Werden noch weitere Arbeiten von externen Firmen durchgeführt (z.B. Überwachung der Elektrik in Bereichen der Wasserförderung, -speicherung und -aufbereitung)?

ja            nein     

wenn ja, bitte die Adresse und den Aufgabenbereich der externen Firma angeben:  
.....  
.....

## B.1.2 Messaufforderung

Der rot markierte Teil wurde in die Messaufforderung an Betriebe, die den Fragebogen nicht beantwortet haben, eingefügt und der blau markierte Satz in die Messaufforderung an Betriebe, die den Fragebogen beantwortet haben.

# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



LFU Bayerisches Landesamt für Umweltschutz · 86177 Augsburg

Datum

Aktenzeichen Aktenzeichen // REx.-Nr.

Ihr Schreiben vom

Ihr Zeichen

Bearbeitung

Dr. R. Mallick

Telefon 0821/9071-5340, Fax 0821/9071-5554

ronzon.mallick@lfu.bayern.de

### Erhebung der Radonexposition von Beschäftigten gemäß § 95 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Anlagen: Zwei Formularvorlagen,  
Ablaufplan mit Liste von Auswertungsstellen,  
Auszug aus der Strahlenschutzverordnung

Sehr geehrte Damen und Herren,

wir haben Ihnen im April 2003 einen Fragebogen mit der Bitte um Beantwortung einiger Fragen zur Ermittlung der Betriebsabläufe Ihrer Wasserversorgung, -speicherung und -aufbereitung und Anfang September 2003 ein Erinnerungsschreiben dazu zugeschickt. Da Sie den Fragebogen nicht beantwortet haben, konnten wir leider nicht ermitteln, ob Ihr Unternehmen eine eigene Wasserversorgung hat oder nicht. Sie werden deshalb aufgefordert, Radonmessungen durchzuführen!

**Handelt es sich bei Ihnen um ein Unternehmen ohne eigene Wasserversorgung (Brunnen, Quellen), so müssen Sie keine Messungen ausführen. Bitte teilen Sie uns schriftlich mit, wenn Sie keine eigene Wasserversorgung haben und woher (Gemeinde, Stadtwerke) Sie das Wasser beziehen.**

**Haben Sie eine eigene Wasserversorgung, so sind Sie gemäß StrlSchV Anlage XI, Teil A verpflichtet, Radonmessungen durchzuführen. Dazu finden Sie weiter unten im Text und im Anhang Informationen und einen Ablaufplan wie diese zu erledigen sind. Bitte lesen Sie sich dieses Schreiben sorgfältig durch!**

Datum

Betreff Erhebung der Radonexposition von Beschäftigten gemäß § 95 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Bayerisches Landesamt  
für Umweltschutz



Seite 2

[wir möchten uns bei Ihnen für Ihre Mitarbeit bei der Beantwortung des Fragebogens bedanken.](#)

Da am 1. August 2001 die Novelle der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) in Kraft getreten ist, sind bestimmte Betriebe mit Beschäftigten in Arbeitsfeldern, die in Anlage XI, Teil A der StrlSchV aufgelistet sind, verpflichtet die jährliche Radon-222 Exposition ihrer Mitarbeiter zu erheben und geeignete Maßnahmen zu treffen, um die Strahlenexposition möglichst gering zu halten (einen Auszug aus der StrlSchV mit den für diese Arbeitsfelder relevanten Paragraphen §§ 93-96 und § 117 erhalten Sie als Anlage).

Zu diesen Arbeitsfeldern gehören:

1. untertägige Bergwerke, Schächte und Höhlen, einschließlich Besucherbergwerke
2. Radon-Heilbäder und -Heilstollen

### **3. Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung**

Für den Vollzug des § 95 (Titel: Natürlich vorkommende radioaktive Stoffe an Arbeitsplätzen) der StrlSchV ist in Bayern das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) in Augsburg zuständig.

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz ist nicht verpflichtet Sie auf die neuen Pflichten der novellierten StrlSchV aufmerksam zu machen. Mit den von uns verfassten Schreiben, möchten wir als Vollzugsbehörde der StrlSchV Ihnen eine Hilfestellung geben, Ihre neuen Pflichten wahrzunehmen.

Bitte lesen Sie sich dieses Schreiben sorgfältig durch, damit die erforderlichen Messungen in angemessener Zeit durchgeführt werden.

Radon ist ein radioaktives Gas, das in Gesteinen und Böden, Wasser und Luft vorkommt. Es ist das schwerste Edelgas und sehr mobil. Es diffundiert aus dem Gesteinsuntergrund in die umgebende Bodenluft und löst sich im Grundwasser. Mit der Bodenluft und durch die grundwasserführenden Schichten im Boden verbreitet sich Radon weiträumig im Untergrund und tritt dann über Erdspalten und Bodenporen in die Atmosphäre über. Radon gasst aber auch aus Quell- und Oberflächenwässern in die umgebende Luft aus. Radon wird vom Menschen mit der Luft eingeatmet und erreicht die tieferen Lungenregionen. Dort kann es zu Schäden im Lungengewebe kommen. Vornehmliches Ziel ist es deshalb die Strahlenexposition durch Radon so gering wie möglich zu halten.

Die Strahlenexposition durch Radon hängt von vielen Faktoren ab. Die wichtigsten sind zum einen die Radonkonzentration im Rohwasser, die wiederum von den geologischen Gegebenheiten und den Grundwasserleitern abhängt. Zum Anderen die Beschaffenheit der Anlagen der Wassergewinnung (begehbare Brunnenstuben) und -aufbereitung (geschlossene oder offene Systeme) und damit wie viel Radon aus dem Wasser in die Raumluft ausgasen kann. Radongas kann aus allen offenen Wasseroberflächen (z.B. Trinkwasserbehältern, Filterbecken, Aufbereitungsanlagen und Produktionsbecken) in die Raumluft übertreten und sich in der Anlage verteilen. Außerdem hängt die Radonexposition von der Aufenthaltszeit der Beschäftigten in den verschiedenen Bereichen der Wasserversorgung ab.

Grundsätzlich sollte folgende Messmethode zur Ermittlung der jährlichen Radonexposition der Beschäftigten angewandt werden: Mit sogenannten ortsgebundenen Exposimetern, die über einen Zeitraum von etwa 2 Wochen aufgestellt werden, kann die Radonkonzentration in der Raumluft an vom LfU bestimmten Orten gemessen werden. Ortsgebundene Exposimeter bestehen aus etwa 5 cm großen Dosen mit ei-

Datum

Betreff Erhebung der Radonexposition von Beschäftigten gemäß § 95 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Bayerisches Landesamt  
für Umweltschutz



Seite 3

nem Gewicht von ungefähr 20 g. Diese Systeme können von verschiedenen Auswertungsstellen (Liste liegt dem Schreiben bei; andere Auswertungsstellen sind dem LfU nicht bekannt) bezogen werden und müssen nach der Benutzung zur Auswertung auch wieder dorthin zurückgesandt werden.

Es wurde folgende Vorgehensweise bei der Ermittlung der jährlichen Radonexposition der Beschäftigten ausgearbeitet (siehe auch Ablaufplan in der Anlage):

1. Alle Beschäftigten des Unternehmens, die in den Arbeitsfeldern im Sinne der Anlage XI, Teil A der StrlSchV tätig sind, müssen ermittelt werden.
2. Von einer Messstelle müssen sogenannte ortsgebundene Exposimeter bezogen werden (Preise je Exposimeter zwischen **14 und 16 € mit Auswertung, zzgl. MwSt.**). Das ortsgebundene Exposimeter muss über einen Zeitraum von 2 Wochen in den verschiedenen Bereichen der Wassergewinnungs- und -aufbereitungsanlagen ausgelegt werden. Dazu gehören alle Bereiche mit offenen Wasserflächen, z.B. Wasserbehälter (auch geschlossene Tanks mit Filtern oder Ventilen, die in den Raum entlüften; aber keine Flächen, die bei der Reinigung mit Wasser abgespritzt werden) und Aufbereitungsanlagen (z.B. Kiesfilterbecken, Enteisung u.ä.), Brunnenstuben und begehbare Brunnenschächte, Quellschächte, wenn vorhanden, aber auch die Flaschenwaschmaschine, wenn dort Roh- oder Reinwasser verwendet wird. Zusätzlich muss an offenen, mit Wasser gefüllten Becken in Bereichen der Produktion (z.B. zur Kühlung der Produkte) gemessen werden. Die Aufenthaltszeiten der Beschäftigten in diesen Bereichen müssen dokumentiert werden. Aus dem Messwert der Raumluftkonzentration und der für diese Arbeiten abgeschätzten Aufenthaltszeit kann die Exposition berechnet werden. Bitte tragen Sie die Aufenthaltszeiten und die Messwerte zusammen mit der Bezeichnung des Bereichs der Messung in das beigegefügte Messprotokoll ein.
3. Bei einer Jahresexposition oberhalb des Grenzwertes von  $6 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  ( $20 \text{ mSv/a}$ ) muss die Exposition unter allen Umständen reduziert werden (§§ 94, 95 StrlSchV). Im Bereich von 2 bis  $6 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  müssen Maßnahmen mit vertretbaren Mitteln zur Reduktion der Exposition angewandt werden. Falls aber Reduzierungsmaßnahmen unwirksam waren oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand durchzuführen wären, muss eine ständige Überwachung der Exposition des Beschäftigten bei der zuständigen Behörde beantragt werden. Bei einer Jahresexposition unter  $2 \text{ MBq}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  ( $6 \text{ mSv/a}$ ) genügen geeignete Maßnahmen des Arbeitsschutzes, um die Exposition der Beschäftigten möglichst gering zu halten. In diesem Fall sind augenblicklich keine weiteren Radon-Messungen notwendig. Bei wesentlichen Änderungen der Bausubstanz, der Lüftungseinrichtungen und von Betriebsabläufen, spätestens aber nach **10 Jahren**, muss dennoch erneut die Radonexposition der Beschäftigten erhoben werden.
4. Nach Reduktionsmaßnahmen müssen erneut Messungen durchgeführt werden.
5. **Wir machen Sie darauf aufmerksam, dass die in der Strahlenschutzverordnung angegebene Frist bis zum 01. August 2003 bereits abgelaufen ist und fordern Sie deshalb auf, möglichst bald die Messungen durchzuführen und die Resultate aus der Ermittlung der Exposition der Beschäftigten und gegebenenfalls über die Durchführung von Maßnahmen zur Reduktion der Expositionen dem LfU mitzuteilen. Dafür sollen beiliegende Formblättervordrucke verwendet werden.** Bitte geben Sie bei der Korrespondenz mit dem LfU immer Ihre REX.-Nr. an! Ihre REX.-Nr. finden Sie im Feld „Unser Zeichen“ auf der ersten Seite dieses Schreibens.

**Datum**

**Betreff** Erhebung der Radonexposition von Beschäftigten gemäß § 95 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Bayerisches Landesamt  
für Umweltschutz



Seite 4

Falls weitere Messungen notwendig sein sollten, würden Sie nach Auswertung der ortsgebundenen Expositionen von uns in einem weiteren Schreiben benachrichtigt werden.

Personal von Fremdfirmen muss auf eine mögliche Radonexposition bei Arbeiten in den Anlagen hingewiesen werden. Außerdem müssen nach § 95, Abs. (1) vorliegende Abschätzungen für die Expositionen an diesen Arbeitsplätzen den Fremdfirmen zur Verfügung gestellt werden.

Mitteilungen an die zuständige Behörde müssen richtig, vollständig und rechtzeitig erfolgen. Bei Nichteinhaltung kann nach § 116 StrlSchV eine Ordnungswidrigkeit vorliegen.

Bei weiteren Fragen wenden Sie sich bitte an eine Auswertungsstelle oder an das LfU (Dr. Mallick, Tel.: 0821/9071-5340).

i.A.

Hübel  
Ltd. Regierungsdirektor

### B.1.3 Ablaufplan und Messprotokoll

## Ablaufplan zur Erhebung der Radonexposition

- Ermittlung der Beschäftigten, die in den Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung (wie Wasserbehälter- und Aufbereitungsgebäude, Brunnenstuben und begehbare Brunnen- und Quellschächte), der Produktion (mit wassergefüllte Produktionsbecken) und der Abfüllung (Glas, Tetrapack etc.) arbeiten. Angabe der Aufenthaltszeiten jedes Beschäftigten in diesen Bereichen
- Ermittlung des Bedarfs von ortsgebundenen Exposimetern. In jedem Raum mit einem Wasserbehälter (Brunnenwasser) und in jedem Raum mit einer Aufbereitungsanlage (Aufbereitung des Brunnenwassers), jedem begehbaren Brunnen- und Quellschacht und in jeder Brunnenstube sowie in jedem Raum mit einem wassergefüllten Produktionsbecken (wenn vorhanden) und in der Füllerei (wenn Brunnenwasser verwendet wird) sollte ein Exposimeter aufgestellt werden.
- Bestellung der Exposimeter bei einer Messstelle (siehe Rückseite). Preise je Exposimeter zwischen 14 und 16 € mit Auswertung, zzgl. MwSt.
- Nach Erhalt der Exposimeter sofortige Durchführung der Messungen (2 Wochen). Alles Wissenswerte zur Durchführung der Messungen wird auf einem Informationsblatt mit den bestellten Exposimetern mitgeliefert.
- Nach der Messung (Zeitraum von 2 Wochen) Exposimeter sofort an die Messstelle zurücksenden (am gleichen Tag).
- Nach Erhalt der Resultate der Messungen Mitteilung der Messwerte an die zuständige Behörde (Landesamt für Umweltschutz/Augsburg) mit Hilfe der beiliegenden Formblätternvordrucke.

## Liste der Auswertungsstellen

GSF – Auswertungsstelle  
Radon-Messdienst  
Ingolstädter Landstraße 1  
85761 Oberschleißheim

Tel.: 089/3187-2220 und 089/3187-2784 (Herr Dr. Haninger)

---

Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung (LPS)  
des Landes Mecklenburg-Vorpommern  
Innovationspark Wuhlheide – Haus 41  
Köpenicker Straße 325  
12555 Berlin

Tel.: 030/6576-3101 oder 030/6576-3104

---

ALTRAC Radon-Messtechnik  
Dorothea Viehmann Straße 28  
12524 Berlin

Tel.: 030/67989737 (Herr Dr. Guhr)

---

Materialprüfamt (MPA) NRW  
Marsbruchstraße 186  
44287 Dortmund

Tel.: 0231/4502-531 (Frau Henke) und  
0231/4502-550 (Frau Dr. Rox) und  
0231/4502-517 (Herr Dr. Busch)

---

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Messstelle für Festkörperdosimetrie  
Postfach 36 40  
76021 Karlsruhe

Tel.: 07247/822644

# Bayerisches Landesamt für Umweltschutz



REx.-Nr.

## Erhebung der Radonexposition

Name des Unternehmens:
Adresse:
Verantwortlicher Leiter:
Telefonnummer Leiter:
Ansprechpartner:
Telefonnummer Ansprechpartner
Anzahl der Beschäftigten im Sinne der Anlage XI, Teil A der StrlSchV:

## Liste der Beschäftigten

Name des Beschäftigten	Jahresaufenthaltszeit [Stunden]	Arbeitsbereich*	Beschreibung der Tätigkeit

\* Arbeitsbereich: Wasserbehälter- und Aufbereitungsgebäude, Brunnenstuben, begehbare Brunnen- und Quellschächte, Produktionsbecken, Abfüllanlage (wenn vorhanden)

Name der mit den Radonmessungen beauftragten Messstelle:

**Rex.-Nr.**

## Messprotokoll der ortsgelassenen Exposimeter

Name des Beschäftigten:

**Messung der Radonkonzentration und Berechnung der daraus resultierenden Exposition des Beschäftigten** (dieses Protokoll bitte für jeden Beschäftigten kopieren und ausfüllen)

	Anlage/Bezeichnung des Messortes	Expositionszeitraum (Anfangs-/Enddatum)	Radonkonzentration [Bq/m <sup>3</sup> ]	Jahresaufenthaltszeit [Stunden]	Radonexposition [MBq*h/m <sup>3</sup> ]
1. Messort					
2. Messort					
3. Messort					
4. Messort					
5. Messort					

In diese Tabelle werden alle Messungen der Raumluftkonzentrationen mit ortsgelassenen Exposimetern eingetragen. Die Radonexposition [MBq\*h/m<sup>3</sup>] berechnet sich aus dem Produkt Radonkonzentration [Bq/m<sup>3</sup>] mal der Jahresaufenthaltszeit [Stunden] an dem Messort geteilt durch 1 Million. Anmerkung: 1 MBq\*h/m<sup>3</sup> = 1 Million Bq\*h/m<sup>3</sup> (M bedeutet Mega = Million)

Rechenbeispiel:

Radonkonzentration: 10.000 Bq/m<sup>3</sup>

Jahresaufenthaltszeit an dem Messort (z.B. Aufbereitungsanlage): 20 h

Radonexposition: 10.000 \* 20 / 1.000.000 = 0,2 [MBq\*h/m<sup>3</sup>]

## B.2 Fragebogen an Betriebe, die mit thorierten Schweißelektroden arbeiten

Bayerisches Landesamt  
für Umweltschutz



Rückantwort

An das  
Bayerische Landesamt für Umweltschutz  
z.H. Herrn Dr. Mallick

86177 Augsburg

### Erhebungsbogen

Name des Betriebes :  
Adresse :  
Verantwortlicher Leiter :  
Telefonnummer Leiter :  
Ansprechpartner :  
Telefonnummer Ansprechp. :

1. Verwenden Sie für Schweißarbeiten thorierte Schweißelektroden (WT10, WT20, WT30 oder WT40)?

ja

nein

Die Beantwortung der folgenden Fragen entfällt, wenn Sie die erste Frage mit „nein“ beantwortet haben.

**Um Beantwortung der folgenden Fragen wird gebeten, wenn Sie die erste Frage mit „ja“ beantwortet haben.**

2. Sind bei Ihnen ausschließlich Handschweißer oder auch Maschinenschweißer beschäftigt ?

Handschweißer

Maschinenschweißer

beides

Seite 2 von 3

3. Hat der Schweißer einen stationären oder einen mobilen Schweißarbeitsplatz (Montage)?

- stationärer Schweißarbeitsplatz
- mobiler Schweißarbeitsplatz

4. Seit wie viel Jahren arbeiten die Schweißer bei Ihnen?

Beschäftigungsdauer als Schweißer in Jahren .....

5. War die unter Punkt 2 genannte Beschäftigungsdauer ununterbrochen als Schweißer oder gab es länger andauernde Unterbrechungen?

- ununterbrochen
- länger andauernde Unterbrechungen

6. Geben Sie bitte die Schweißintensität pro Arbeitswoche in Tagen und die Schweißintensität pro Tag in Stunden an?

Schweißintensität pro Arbeitswoche .....

Schweißintensität pro Tag .....

7. Wie oft werden bei Ihnen thorierte Elektroden verwendet?

- ausschließlich
- häufig
- sporadisch
- selten

8. Welchen Elektrodentyp verwenden Sie bevorzugt?

- WT10
- WT20
- WT30
- WT40

9. Schweißen Sie hauptsächlich mit Gleichstrom oder Wechselstrom?

- ausschließlich Gleichstrom
- ausschließlich Wechselstrom
- vorwiegend Gleichstrom
- vorwiegend Wechselstrom
- Verhältnis von Gleichstrom zu Wechselstrom .....

Seite 3 von 3

10. Bitte geben Sie die Arbeitszeiten in Stunden pro Jahr an, mit denen Ihr Schweißer mit Gleichstrom bzw. mit Wechselstrom schweißt.

Schweißen mit Gleichstrom [Stunden pro Jahr] .....

Schweißen mit Wechselstrom [Stunden pro Jahr] .....

11. Schweißen Sie mit oder ohne eine Absaugung?

Schweißen mit Absaugung

Schweißen ohne Absaugung

12. Werden die Elektroden vom Schweißer oder von einem weiteren Mitarbeiter angeschliffen?

Schweißer

weiterer Mitarbeiter

13. Wie oft werden Elektroden pro Tag angeschliffen (bitte Anzahl der Elektroden und Anschliffe pro Tag angeben)?

.....

14. Werden die Elektroden mit oder ohne Absaugung angeschliffen?

Schleifen mit Absaugung

Schleifen ohne Absaugung

15. Wie hoch ist der Verbrauch an thorierten Elektroden pro Schweißer und Jahr?

.....

16. Haben Sie schon eine Abschätzung der Strahlenexposition beim Schweißen und Anschleifen von thorierten Wolfram-Elektroden gemäß Strahlenschutzverordnung von 2001 durchgeführt?

ja

nein

wenn ja, würden Sie uns bitte die Ergebnisse dieser Abschätzung mitteilen (Kopie der durchgeführten Messungen).



## C Tabellen mit den Messergebnissen

### C.1 Ergebnisse der Gesteinsproben

#### C.1.1 Einheimische Granite

##### a) Betriebe A bis G

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]							
	A	B	C	D	E1	E2	F	G1
Uran-Reihe								
Thorium-234	220 ± 72	73 ± 38	—	—	—	103 ± 54	358 ± 82	49 ± 13
Protactinium-234m	247 ± 59	—	—	—	—	—	244 ± 144	—
Radium-226	463 ± 41	139 ± 20	156 ± 43	124 ± 21	—	89 ± 19	289 ± 139	47 ± 29
Blei-214	181 ± 11	67 ± 5	74 ± 7	67 ± 5	50 ± 4	51 ± 4	293 ± 18	57 ± 4
Bismut-214	156 ± 10	57 ± 4	64 ± 6	57 ± 4	43 ± 2	47 ± 4	259 ± 17	51 ± 3
Blei-210	—	—	—	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe								
Actinium-228	78 ± 6	93 ± 7	108 ± 12	108 ± 7	63 ± 6	47 ± 5	192 ± 14	46 ± 3
Radium-224	51 ± 37	—	131 ± 52	114 ± 26	63 ± 33	38 ± 17	157 ± 59	46 ± 13
Blei-212	94 ± 7	104 ± 7	116 ± 9	119 ± 8	77 ± 6	50 ± 4	225 ± 6	47 ± 3
Bismut-212	90 ± 11	114 ± 13	125 ± 30	119 ± 10	77 ± 14	54 ± 11	224 ± 25	50 ± 6
Thallium-208	28 ± 2	316 ± 2	34 ± 3	37 ± 3	23 ± 2	17 ± 2	71 ± 5	16 ± 1
Weitere								
Kalium-40	1.440 ± 90	1.130 ± 73	1.470 ± 110	1.300 ± 83	1.340 ± 87	1.490 ± 97	1.720 ± 110	696 ± 50

##### b) Betriebe G bis I

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]							
	G2	G3	H	I1	I2	I3	I4	I5
Uran-Reihe								
Thorium-234	101 ± 60	147 ± 70	—	57 ± 26	40 ± 14	33 ± 17	60 ± 10	148 ± 75
Protactinium-234m	—	—	—	—	—	—	—	—
Radium-226	99 ± 23	241 ± 40	93 ± 20	59 ± 56	108 ± 16	62 ± 9	69 ± 41	195 ± 28
Blei-214	45 ± 4	131 ± 9	46 ± 4	71 ± 5	53 ± 4	39 ± 3	87 ± 5	89 ± 6
Bismut-214	40 ± 3	116 ± 8	42 ± 3	62 ± 4	48 ± 4	34 ± 2	81 ± 5	71 ± 5
Blei-210	—	—	—	—	55 ± 18	—	52 ± 10	—
Thorium-Reihe								
Actinium-228	54 ± 5	281 ± 19	77 ± 6	58 ± 5	76 ± 6	44 ± 3	167 ± 11	105 ± 8
Radium-224	63 ± 21	283 ± 53	64 ± 15	47 ± 16	82 ± 14	48 ± 11	173 ± 25	123 ± 22
Blei-212	67 ± 5	303 ± 21	78 ± 6	59 ± 4	79 ± 6	43 ± 3	175 ± 12	128 ± 9
Bismut-212	72 ± 11	309 ± 31	75 ± 11	60 ± 9	87 ± 11	51 ± 7	185 ± 16	122 ± 16
Thallium-208	22 ± 2	97 ± 6	25 ± 2	19 ± 1	25 ± 2	15 ± 1	57 ± 4	37 ± 3
Weitere								
Kalium-40	639 ± 40	1.750 ± 120	996 ± 70	1.650 ± 110	972 ± 60	676 ± 44	1.050 ± 66	1.400 ± 92

c) Betriebe J bis O

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]						
	J	K	L1	L2	M	N	O
Uran-Reihe							
Thorium-234	35 ± 24	49 ± 39	69 ± 43	71 ± 20	—	94 ± 69	—
Protactinium-234m	—	—	—	—	—	—	—
Radium-226	75 ± 16	104 ± 17	130 ± 18	112 ± 20	274 ± 40	164 ± 31	205 ± 37
Blei-214	34 ± 3	51 ± 4	68 ± 5	40 ± 3	137 ± 9	74 ± 6	107 ± 7
Bismut-214	29 ± 2	44 ± 3	61 ± 4	35 ± 3	115 ± 8	65 ± 5	93 ± 7
Blei-210	—	—	—	77 ± 22	—	—	—
Thorium-Reihe							
Actinium-228	81 ± 6	106 ± 7	71 ± 6	74 ± 6	69 ± 7	130 ± 10	37 ± 2
Radium-224	89 ± 19	90 ± 20	80 ± 21	77 ± 14	—	143 ± 24	88 ± 40
Blei-212	93 ± 6	112 ± 8	75 ± 5	84 ± 6	85 ± 7	134 ± 9	98 ± 7
Bismut-212	93 ± 10	120 ± 12	79 ± 12	80 ± 12	80 ± 19	142 ± 20	39 ± 6
Thallium-208	30 ± 2	35 ± 2	24 ± 2	26 ± 2	24 ± 2	43 ± 3	29 ± 2
Weitere							
Kalium-40	925 ± 60	1.390 ± 90	1.500 ± 100	1.410 ± 90	1.630 ± 110	1.540 ± 100	1.230 ± 81

d) Betrieb P bis S

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]							
	P1	P2	Q1	Q2	R1	R2	S1	S2
Uran-Reihe								
Thorium-234	238 ± 58	372 ± 89	259 ± 62	—	116 ± 27	—	189 ± 51	28 ± 12
Protactinium-234m	167 ± 101	582 ± 97	252 ± 119	—	161 ± 55	—	—	—
Radium-226	223 ± 106	549 ± 118	131 ± 123	188 ± 33	79 ± 49	—	199 ± 21	59 ± 9
Blei-214	265 ± 17	607 ± 37	204 ± 13	101 ± 7	117 ± 7	—	83 ± 6	40 ± 3
Bismut-214	231 ± 15	532 ± 33	171 ± 11	85 ± 6	117 ± 9	0,7 ± 0,4	73 ± 6	44 ± 4
Blei-210	339 ± 153	—	323 ± 134	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe								
Actinium-228	55 ± 5	78 ± 7	87 ± 7	116 ± 8	43 ± 3	0,8 ± 0,5	34 ± 4	62 ± 4
Radium-224	—	—	91 ± 45	110 ± 38	20 ± 19	—	27 ± 18	53 ± 8
Blei-212	59 ± 5	77 ± 6	102 ± 7	134 ± 9	47 ± 3	1,2 ± 0,3	38 ± 3	63 ± 4
Bismut-212	66 ± 13	88 ± 15	98 ± 16	135 ± 13	51 ± 7	—	36 ± 8	65 ± 8
Thallium-208	18 ± 2	29 ± 2	29 ± 3	42 ± 3	39 ± 3	0,9 ± 0,5	33 ± 3	58 ± 4
Weitere								
Kalium-40	1.230 ± 80	1.410 ± 91	1.610 ± 110	2.070 ± 130	792 ± 51	46 ± 3	1.560 ± 100	940 ± 60

## e) Liste mit einheimischen Graniten

Probe	Gesteinsbezeichnung
A	Flossenbürger Granit
B	Granit
C	Steininger Granit
D	Herrenholz Granit
E1	Diorit
E2	Granit
F	Granit
G1	Tittlinger Granit
G2	Anthrazit Granit
G3	Bayerwald Rose
H	Tittlinger Granit
I1	Rinchnacher Granit
I2	Granit
I3	Nammering gelb
I4	Hötzelsberger Granit
I5	Mettner Bayerwald gelb
J	Fürstensteiner Granit
K	Tittlinger Feinkorn
L1	Tittlinger Grobkorn
L2	Schotter Gramlit
M	Berbinger Granit
N	Hauzenberg II Granit
O	Hauzenberg II Bauzing
P1	Fichtelgebirge feinkörniger Granit
P2	Fichtelgebirge grobkörniger Granit
Q1	Granit Waldstein
Q2	Granit Kösseine
R1	Oberfranken hell (Waldstein)
R2	Oberfranken dunkel
S1	Fichtelgebirge Bibersberg
S2	Fichtelgebirge Kösseine

### C.1.2 Filterstäube

#### a) Betriebe A bis G

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]						
	A	B	C	D	E	F	G
Uran-Reihe							
Thorium-234	143 ± 28	83 ± 13	30 ± 5	63 ± 10	38 ± 7	53 ± 8	98 ± 19
Protactinium-234m	189 ± 89	—	—	—	—	—	—
Radium-226	133 ± 68	93 ± 14	32 ± 5	82 ± 17	33 ± 8	36 ± 4	88 ± 14
Blei-214	149 ± 9	90 ± 2	39 ± 1	71 ± 2	34 ± 1	35 ± 1	90 ± 2
Bismut-214	138 ± 9	88 ± 2	39 ± 1	72 ± 3	32 ± 1	34 ± 1	89 ± 2
Blei-210	93 ± 43	—	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe							
Actinium-228	71 ± 6	113 ± 2	50 ± 1	107 ± 2	38 ± 1	82 ± 2	92 ± 2
Radium-224	72 ± 29	—	—	—	—	—	—
Blei-212	70 ± 5	117 ± 4	51 ± 2	112 ± 14	40 ± 2	92 ± 4	96 ± 3
Bismut-212	76 ± 12	126 ± 6	55 ± 3	119 ± 5	41 ± 2	91 ± 4	102 ± 4
Thallium-208	22 ± 2	40 ± 1	18 ± 1	37 ± 2	12 ± 1	28 ± 1	31 ± 1
Weitere							
Kalium-40	1.210 ± 80	1.410 ± 41	1.097 ± 32	1.116 ± 44	880 ± 32	1.000 ± 49	1.064 ± 42

#### b) Betriebe H bis M

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]						
	H	I 1	I 2	J	K	L	M
Uran-Reihe							
Thorium-234	42 ± 9	83 ± 11	106 ± 15	77 ± 11	67 ± 12	48 ± 10	80 ± 11
Protactinium-234m	—	—	—	—	—	—	—
Radium-226	46 ± 16	62 ± 5	115 ± 8	61 ± 7	59 ± 11	41 ± 11	73 ± 7
Blei-214	52 ± 2	69 ± 1	107 ± 2	54 ± 1	61 ± 1	48 ± 2	66 ± 1
Bismut-214	52 ± 2	70 ± 2	108 ± 3	53 ± 2	62 ± 2	48 ± 2	67 ± 2
Blei-210	—	—	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe							
Actinium-228	56 ± 1	41 ± 1	113 ± 2	78 ± 2	89 ± 2	51 ± 1	78 ± 2
Radium-224	—	—	—	—	—	—	—
Blei-212	59 ± 7	44 ± 2	115 ± 3	87 ± 3	95 ± 4	54 ± 7	83 ± 4
Bismut-212	64 ± 3	45 ± 2	124 ± 4	85 ± 4	101 ± 4	58 ± 3	87 ± 3
Thallium-208	20 ± 1	14 ± 1	37 ± 1	26 ± 1	31 ± 1	18 ± 1	27 ± 1
Weitere							
Kalium-40	998 ± 40	999 ± 49	1.254 ± 50	1.113 ± 55	1.378 ± 49	998 ± 40	1.437 ± 51

## c) Betriebe N bis V

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]							
	N	Q 1	Q 2	R	S	T	U	V
Uran-Reihe								
Thorium-234	113 ± 15	150 ± 32	35 ± 17	24 ± 5	10 ± 5	18 ± 7	63 ± 36	21 ± 9
Protactinium-234m	—	257 ± 81	—	—	—	—	—	—
Radium-226	99 ± 7	114 ± 73	—	36 ± 8	2 ± 0,5	37 ± 11	167 ± 19	60 ± 11
Blei-214	97 ± 2	193 ± 12	61 ± 4	35 ± 1	15 ± 1	18 ± 2	87 ± 6	34 ± 3
Bismut-214	97 ± 2	176 ± 11	58 ± 4	36 ± 1	14 ± 1	16 ± 2	79 ± 6	31 ± 2
Blei-210	—	151 ± 89	—	—	21 ± 5	35 ± 9	—	19 ± 8
Thorium-Reihe								
Actinium-228	94 ± 2	62 ± 5	83 ± 6	67 ± 2	21 ± 2	24 ± 3	61 ± 4	32 ± 3
Radium-224	—	40 ± 34	70 ± 20	—	26 ± 10	32 ± 11	61 ± 26	36 ± 14
Blei-212	98 ± 3	68 ± 5	80 ± 6	66 ± 2	21 ± 2	24 ± 2	65 ± 5	35 ± 3
Bismut-212	104 ± 4	72 ± 11	99 ± 12	77 ± 4	24 ± 5	22 ± 9	64 ± 10	35 ± 9
Thallium-208	32 ± 1	20 ± 2	27 ± 2	24 ± 1	20 ± 2	8 ± 1	22 ± 1	11 ± 1
Weitere								
Kalium-40	1.144 ± 48	1.130 ± 74	1.280 ± 83	730 ± 21	623	861 ± 57	874 ± 58	787 ± 51

## C.1.3 Schlämme

## a) Betriebe A bis L

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]							
	A	C	D	G	H	I	J	L
Uran-Reihe								
Thorium-234	67 ± 26	38 ± 8	58 ± 10	53 ± 10	66 ± 10	39 ± 8	94 ± 15	58 ± 11
Protactinium-234m	121 ± 64	—	—	—	—	—	—	—
Radium-226	93 ± 53	59 ± 12	41 ± 10	49 ± 11	49 ± 9	49 ± 12	115 ± 15	62 ± 12
Blei-214	107 ± 7	60 ± 2	41 ± 1	60 ± 2	54 ± 1	58 ± 2	118 ± 3	71 ± 1
Bismut-214	94 ± 6	61 ± 2	41 ± 10	59 ± 2	53 ± 1	56 ± 2	120 ± 3	68 ± 1
Blei-210	—	—	—	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe								
Actinium-228	38 ± 3	60 ± 2	52 ± 1	58 ± 2	62 ± 1	50 ± 1	59 ± 2	69 ± 1
Radium-224	36 ± 12	—	—	—	—	—	—	—
Blei-212	36 ± 3	60 ± 2	53 ± 2	58 ± 2	64 ± 2	53 ± 2	61 ± 2	70 ± 1
Bismut-212	38 ± 8	65 ± 4	57 ± 2	66 ± 3	67 ± 3	61 ± 3	74 ± 4	79 ± 3
Thallium-208	11 ± 1	21 ± 1	17 ± 1	20 ± 1	21 ± 1	18 ± 1	22 ± 1	24 ± 0,4
Weitere								
Kalium-40	668 ± 45	985 ± 29	992 ± 42	798 ± 23	870 ± 34	660 ± 20	988 ± 29	1.135 ± 24

b) Betriebe M bis V

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]						
	M	P	R	S	T	U	V
Uran-Reihe							
Thorium-234	42 ± 8	336 ± 31	23 ± 11	26 ± 24	—	23 ± 20	—
Protactinium-234m	—	421 ± 92	—	—	—	—	—
Radium-226	64 ± 11	547 ± 132	62 ± 11	4 ± 1	52 ± 11	36 ± 9	25 ± 6
Blei-214	67 ± 2	556 ± 33	31 ± 2	27 ± 2	31 ± 2	21 ± 2	15 ± 1
Bismut-214	67 ± 2	513 ± 32	30 ± 2	25 ± 2	27 ± 2	21 ± 2	15 ± 1
Blei-210	—	338 ± 20	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe							
Actinium-228	44 ± 1	52 ± 5	26 ± 3	31 ± 3	26 ± 2	29 ± 3	13 ± 2
Radium-224	—	—	18 ± 11	24 ± 12	33 ± 8	31 ± 10	14 ± 7
Blei-212	46 ± 2	55 ± 4	26 ± 2	30 ± 2	28 ± 2	29 ± 2	13 ± 1
Bismut-212	51 ± 3	60 ± 12	33 ± 6	36 ± 7	30 ± 5	37 ± 7	14 ± 4
Thallium-208	16 ± 1	19 ± 2	24 ± 2	30 ± 3	9 ± 1	10 ± 1	—
Weitere							
Kalium-40	880 ± 26	880 ± 57	478 ± 32	588 ± 40	484 ± 10	443 ± 30	250 ± 7

C.1.4 Importierte Granite

a) Indien - Teil 1

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]								
	R4	R5	R6	S5	T2	T3	T5	T6	U1
Uran-Reihe									
Thorium-234	—	14 ± 12	9 ± 9	—	—	255 ± 46	—	—	—
Protactinium-234m	—	—	—	—	—	260 ± 69	—	—	—
Radium-226	—	55 ± 9	5 ± 5	—	39 ± 12	238 ± 80	—	67 ± 16	16 ± 4
Blei-214	2 ± 1	30 ± 2	4 ± 1	3 ± 1	21 ± 2	231 ± 14	2 ± 1	31 ± 3	48 ± 1
Bismut-214	2 ± 1	27 ± 2	4 ± 1	3 ± 1	18 ± 2	198 ± 13	—	26 ± 2	—
Blei-210	—	—	—	—	57 ± ?	221 ± 157	—	—	—
Thorium-Reihe									
Actinium-228	3 ± 1	24 ± 2	3 ± 3	5 ± 1	5 ± 2	135 ± 9	—	46 ± 4	50 ± 4
Radium-224	—	25 ± 10	35 ± 7	4 ± 4	—	57 ± 41	—	46 ± 10	53 ± 13
Blei-212	6 ± 1	26 ± 2	32 ± 3	5 ± 1	6 ± 1	144 ± 10	3 ± 1	53 ± 4	51 ± 4
Bismut-212	—	27 ± 5	35 ± 7	—	—	151 ± 15	—	47 ± 10	58 ± 10
Thallium-208	5 ± 1	22 ± 2	30 ± 2	4 ± 1	—	44 ± 3	—	16 ± 1	16 ± 1
Weitere									
Kalium-40	377 ± 26	435 ± 29	572 ± 41	564 ± 37	268 ± 20	1.170 ± 75	968 ± 63	1.660 ± 110	883 ± 58

## Indien - Teil 2

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]		
	U2	V4	V5
Uran-Reihe			
Thorium-234	—	41 ± 23	—
Protactinium-234m	—	—	—
Radium-226	—	18 ± 28	—
Blei-214	3 ± 1	35 ± 2	2 ± 1
Bismut-214	2 ± 1	31 ± 2	2 ± 1
Blei-210	—	—	—
Thorium-Reihe			
Actinium-228	22 ± 2	69 ± 5	—
Radium-224	21 ± 8	80 ± 11	—
Blei-212	23 ± 2	68 ± 5	1 ± 0,5
Bismut-212	24 ± 6	73 ± 9	—
Thallium-208	7 ± 1	23 ± 2	—
Weitere			
Kalium-40	496 ± 33	1.140 ± 10	646 ± 43

## b) Schweden, Finnland und Norwegen - Teil 1

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]									
	I2	R3	S4	S7	T1	U5	V3	R8	S2	
	Schweden							Finnland		
Uran-Reihe										
Thorium-234	—	89 ± 17	142 ± 27	—	—	—	29 ± 6	72 ± 20	24 ± 21	
Protactinium-234m	—	—	229 ± 80	—	—	—	—	98 ± 40	—	
Radium-226	9 ± 1	11 ± 1	106 ± 58	12 ± 5	17 ± 7	9 ± 8	—	98 ± 41	33 ± 8	
Blei-214	6 ± 1	87 ± 6	133 ± 9	7 ± 1	10 ± 1	4 ± 1	6 ± 1	88 ± 5	18 ± 2	
Bismut-214	5 ± 1	72 ± 5	117 ± 8	6 ± 1	9 ± 1	3 ± 1	—	77 ± 5	12 ± 3	
Blei-210	—	120 ± 21	116 ± 63	—	—	—	—	—	—	
Thorium-Reihe										
Actinium-228	18 ± 3	124 ± 8	138 ± 13	7 ± 1	37 ± 4	2 ± 2	14 ± 3	143 ± 9	23 ± 3	
Radium-224	22 ± 10	135 ± 17	144 ± 33	7 ± 5	—	—	—	139 ± 13	23 ± 10	
Blei-212	17 ± 2	149 ± 9	146 ± 14	6 ± 1	49 ± 4	4 ± 1	15 ± 2	148 ± 10	24 ± 2	
Bismut-212	21 ± 6	145 ± 5	153 ± 16	—	37 ± 8	1 ± ?	22 ± 10	156 ± 12	28 ± 6	
Thallium-208	5 ± 1	123 ± 8	125 ± 9	6 ± 1	13 ± 1	—	5 ± 1	134 ± 9	17 ± 10	
Weitere										
Kalium-40	973 ± 70	877 ± 56	1.110 ± 80	264 ± 19	1.270 ± 80	758 ± 50	1.100 ± 70	893 ± 57	1.120 ± 69	

Schweden, Finnland und Norwegen - Teil 2

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]				
	U4	I5	R2	S1	V2
	Finnland	Norwegen			
Uran-Reihe					
Thorium-234	44 ± 33	—	42 ± 24	33 ± 26	76 ± 54
Protactinium-234m	—	—	—	—	—
Radium-226	89 ± 18	80 ± 16	77 ± 16	85 ± 12	108 ± 23
Blei-214	42 ± 4	51 ± 4	46 ± 4	48 ± 3	56 ± 4
Bismut-214	37 ± 3	44 ± 3	43 ± 4	44 ± 3	49 ± 4
Blei-210	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe					
Actinium-228	78 ± 1	52 ± 4	47 ± 6	52 ± 4	66 ± 6
Radium-224	84 ± 2	52 ± 20	47 ± 21	58 ± 15	71 ± 27
Blei-212	88 ± 6	60 ± 4	51 ± 4	55 ± 4	76 ± 6
Bismut-212	94 ± 12	62 ± 9	65 ± 15	69 ± 11	70 ± 14
Thallium-208	28 ± 2	18 ± 1	47 ± 5	48 ± 4	23 ± 2
Weitere					
Kalium-40	1.310 ± 90	1.220 ± 80	1.010 ± 69	809 ± 53	1.020 ± 70

c) Brasilien und Südafrika

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]					
	R1	U3	R9	S6	T4	V1
	Brasilien		Südafrika			
Uran-Reihe						
Thorium-234	—	—	—	—	16 ± 15	—
Protactinium-234m	—	—	—	—	—	—
Radium-226	0,8 ± 0,6	—	40 ± 14	—	10 ± 6	—
Blei-214	10 ± 2	4 ± 1	20 ± 2	3 ± 1	9 ± 1	—
Bismut-214	7 ± 3	4 ± 1	20 ± 2	2 ± 1	8 ± 1	—
Blei-210	—	—	—	4 ± 3	—	—
Thorium-Reihe						
Actinium-228	40 ± 4	94 ± 7	73 ± 8	2 ± 2	13 ± 2	—
Radium-224	37 ± 14	99 ± 14	80 ± 21	—	11 ± 5	—
Blei-212	44 ± 3	100 ± 7	80 ± 8	1 ± 0,4	13 ± 1	1 ± 0,9
Bismut-212	50 ± 8	98 ± 11	80 ± 14	—	18 ± 4	—
Thallium-208	38 ± 3	32 ± 2	66 ± 5	1 ± 0,6	4 ± 0,5	—
Weitere						
Kalium-40	843 ± 56	1.290 ± 80	1.410 ± 101	51 ± 6	228 ± 16	75 ± 7

## d) Spanien, Tschechien und Frankreich

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]			
	I1	R7	I4	S3
	Spanien		Tschechien	Frankreich
Uran-Reihe				
Thorium-234	—	46 ± 24	75 ± 24	106 ± 31
Protactinium-234m	—	—	87 ± 48	—
Radium-226	56 ± 20	108 ± 21	63 ± 37	195 ± 20
Blei-214	32 ± 3	67 ± 5	65 ± 4	98 ± 6
Bismut-214	26 ± 2	58 ± 4	56 ± 4	77 ± 52
Blei-210	—	—	—	—
Thorium-Reihe				
Actinium-228	35 ± 3	97 ± 10	67 ± 5	41 ± 4
Radium-224	—	92 ± 3	69 ± 15	35 ± 20
Blei-212	41 ± 3	98 ± 9	67 ± 4	53 ± 4
Bismut-212	41 ± 10	110 ± 14	70 ± 8	44 ± 9
Thallium-208	12 ± 1	89 ± 7	21 ± 1	41 ± 3
Weitere				
Kalium-40	558 ± 38	1.270 ± 24	763 ± 50	899 ± 58

e) Liste mit importierten Graniten

Probe	Herkunftsland	Gesteinsbezeichnung
R4	Indien	k.A.
R5		k.A.
R6		k.A.
S5		Orion
T2		Viskont White
T3		Paradiso
T5		Orion
T6		Red Blue
U1		Orion
U2		Paradiso
V4		Kashmir White
V5		Orion
I2	Schweden	Meerfels
R3		k.A.
S4		Vanga
S7		Schwedisch Schwarz
T1		Halandia
U5		Bararp
V3		Meerfels
R8	Finland	k.A.
S2		Aurura
U4		Baltic Teak
I5	Norwegen	Marina Pearl
R2		k.A.
S1		Labrador
V2		Labrador
R1	Brasilien	k.A.
U3		Verde Candeias
R9	Südafrika	k.A.
S6		Impala
T4		Diamantschwarz
V1		Impala
I1	Spanien	Negro Grapesa
R7		k.A.
I4	Tschechien	Rübezahl
S3	Frankreich	k.A.

**C.2 Ergebnisse der Kohlekraftwerksrückstände**

Probe	Spezifische Aktivität [Bg/kg]				
	Kraftwerk 1				
	Entschwefelung	Schlacke Kohle	Flugasche Kohle 1	Flugasche Kohle 2	Müllschlacke
Uran-Reihe					
Thorium-234	77 ± 32	110 ± 20	162 ± 33	184 ± 44	21 ± 19
Protactinium-234m	131 ± 60	231 ± 108	316 ± 99	331 ± 110	—
Radium-226	—	207 ± 104	136 ± 125	243 ± 114	38 ± 10
Blei-214	50 ± 4	186 ± 10	297 ± 15	241 ± 13	23 ± 2
Bismut-214	43 ± 3	164 ± 9	263 ± 13	211 ± 10	22 ± 2
Blei-210	346 ± 117	—	—	117 ± 73	—
Thorium-Reihe					
Actinium-228	9 ± 3	110 ± 9	133 ± 10	112 ± 10	19 ± 2
Radium-224	22 ± 22	99 ± 49	86 ± 66	131 ± 72	20 ± 11
Blei-212	12 ± 2	128 ± 14	147 ± 16	122 ± 17	17 ± 3
Bismut-212	15 ± 9	127 ± 17	154 ± 17	129 ± 20	19 ± 5
Thallium-208	3 ± 1	40 ± 2	44 ± 2	40 ± 3	6 ± 1
Weitere					
Uran-235	6 ± 4	7 ± 5	22 ± 6	11 ± 7	—
Kalium-40	80 ± 12	732 ± 38	486 ± 30	279 ± 24	258 ± 14

Probe	Spezifische Aktivität [Bg/kg]						
	Kraftwerk 2		Kraftwerk 3			Kraftwerk 4	
	REA-Gips	Flugasche	Nassasche	Flugasche	Entschwefelung	Flugstaub	Schlacke
Uran-Reihe							
Thorium-234	—	128 ± 23	30 ± 14	101 ± 50	—	184 ± 63	44 ± 34
Protactinium-234m	—	173 ± 42	—	189 ± 118	—	—	—
Radium-226	—	160 ± 44	78 ± 14	201 ± 113	19 ± 8	171 ± 136	135 ± 21
Blei-214	—	187 ± 8	38 ± 3	203 ± 11	8 ± 1	166 ± 11	76 ± 5
Bismut-214	—	166 ± 7	35 ± 2	179 ± 9	7 ± 1	146 ± 9	69 ± 5
Blei-210	6 ± 4	158 ± 108	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe							
Actinium-228	—	147 ± 13	24 ± 3	125 ± 11	—	118 ± 11	60 ± 5
Radium-224	—	107 ± 43	23 ± 15	131 ± 60	—	125 ± 64	60 ± 23
Blei-212	1 ± 0,5	54 ± 17	27 ± 4	136 ± 18	1 ± 0,7	133 ± 19	72 ± 6
Bismut-212	—	163 ± 11	29 ± 6	132 ± 19	—	144 ± 28	74 ± 13
Thallium-208	0,5 ± 0,4	48 ± 2	9 ± 1	41 ± 3	—	42 ± 3	22 ± 2
Weitere							
Uran-235	—	10 ± 2	—	11 ± 6	—	10 ± 8	8 ± 1
Kalium-40	3 ± 2	561 ± 35	201 ± 15	976 ± 58	4 ± 4	679 ± 52	457 ± 27

Probe	Spezifische Aktivität [Bg/kg]					
	Kraftwerk 5			Kraftwerk 6		
	Schlacke	Flugasche	Schlacke/Kessel 3	Brennkammerasche	Kohleflugasche	Gipsprobe
Uran-Reihe						
Thorium-234	102 ± 29	123 ± 32	123 ± 48	40 ± 17	81 ± 32	—
Protactinium-234m	147 ± 80	118 ± 86	106 ± 57	—	86 ± 58	—
Radium-226	258 ± 30	107 ± 90	238 ± 29	53 ± 51	160 ± 62	—
Blei-214	164 ± 9	138 ± 8	141 ± 9	61 ± 4	145 ± 7	—
Bismut-214	150 ± 7	123 ± 7	132 ± 11	54 ± 3	131 ± 7	—
Blei-210	—	—	—	—	—	—
Thorium-Reihe						
Actinium-228	106 ± 8	73 ± 7	80 ± 7	45 ± 4	98 ± 8	—
Radium-224	107 ± 52	99 ± 37	87 ± 51	81 ± 20	68 ± 27	—
Blei-212	111 ± 15	81 ± 9	80 ± 13	50 ± 6	97 ± 7	0,6 ± 0,5
Bismut-212	122 ± 15	88 ± 14	91 ± 12	55 ± 8	102 ± 12	—
Thallium-208	35 ± 2	26 ± 2	27 ± 3	16 ± 1	32 ± 2	0,4 ± 0,2
Weitere						
Uran-235	—	8 ± 5	—	3 ± 3	6 ± 4	—
Kalium-40	205 ± 17	58 ± 10	105 ± 11	272 ± 18	412 ± 24	8 ± 3

Probe	Spezifische Aktivität [Bg/kg]							
	Kraftwerk 7							
	Schlacke 19.12.03	Filterstaub 19.12.03	Schlacke 20.12.03	Filterstaub 20.12.03	Schlacke 02.01.04	Filterstaub-1 03.01.04	Schlacke 03.01.04	Filterstaub-2 03.01.04
Uran-Reihe								
Thorium-234	70 ± 19	44 ± 14	73 ± 33	23 ± 17	60 ± 11	23 ± 7	50 ± 25	38 ± 14
Protactinium-234m	86 ± 54	—	134 ± 63	—	61 ± 47	—	51 ± 45	—
Radium-226	187 ± 21	—	—	83 ± 15	78 ± 62	76 ± 14	—	67 ± 12
Blei-214	104 ± 6	56 ± 3	107 ± 7	41 ± 2	107 ± 6	38 ± 2	75 ± 4	37 ± 3
Bismut-214	96 ± 5	51 ± 3	98 ± 8	37 ± 2	97 ± 5	33 ± 2	71 ± 4	34 ± 2
Blei-210	—	81 ± 27	—	—	—	56 ± 8	—	27 ± 25
Thorium-Reihe								
Actinium-228	63 ± 5	31 ± 3	63 ± 6	23 ± 3	63 ± 5	20 ± 3	48 ± 4	21 ± 3
Radium-224	54 ± 32	24 ± 19	60 ± 38	24 ± 14	97 ± 31	19 ± 13	52 ± 19	22 ± 15
Blei-212	64 ± 9	30 ± 4	63 ± 10	24 ± 3	71 ± 8	22 ± 2	48 ± 4	21 ± 3
Bismut-212	75 ± 12	35 ± 8	72 ± 10	27 ± 5	67 ± 10	20 ± 6	46 ± 9	21 ± 7
Thallium-208	21 ± 1	11 ± 1	20 ± 2	8 ± 1	22 ± 2	19 ± 3	16 ± 1	8 ± 1
Weitere								
Uran-235	—	5 ± 3	8 ± 4	—	6 ± 4	—	6 ± 3	—
Kalium-40	184 ± 15	211 ± 15	188 ± 12	253 ± 16	168 ± 13	116 ± 10	130 ± 10	241 ± 17

### C.3 Ergebnisse der Rückspülschlämme

#### C.3.1 Schlämme aus der Trinkwasseraufbereitung

Probe	Spezifische Aktivität [Bg/kg]					
REx.-Nr.	3028	3240	8217	7311	7336	3183
Uran-Reihe						
Thorium-234	266 ± 81	225 ± 37	61 ± 16	—	—	437 ± 240
Protactinium-234m	1.270 ± 548	—	—	—	—	—
Radium-226	7.380 ± 617	930 ± 97	232 ± 40	1.070 ± 96	2.180 ± 257	32.500 ± 2.890
Blei-214	6.360 ± 321	539 ± 29	140 ± 9	852 ± 60	1.250 ± 64	9.150 ± 490
Bismut-214	5.520 ± 383	475 ± 41	120 ± 10	742 ± 51	1.040 ± 53	7.820 ± 411
Blei-210	222 ± 80	—	18 ± 13	—	—	3.290 ± 533
Thorium-Reihe						
Actinium-228	9.250 ± 775	801 ± 82	241 ± 22	591 ± 60	833 ± 92	3.950 ± 425
Radium-224	4.990 ± 1.830	308 ± 148	164 ± 61	271 ± 154	326 ± 32	5.120 ± 2.050
Blei-212	4.610 ± 638	303 ± 37	156 ± 22	199 ± 13	425 ± 54	3.020 ± 322
Bismut-212	4.800 ± 334	386 ± 60	161 ± 24	214 ± 42	479 ± 70	2.910 ± 245
Thallium-208	1.380 ± 98	93 ± 9	49 ± 4	55 ± 5	121 ± 9	851 ± 47
Weitere						
Kalium-40	—	—	562 ± 34	—	—	—

Probe	Spezifische Aktivität [Bg/kg]					
REx.-Nr.	7310	6013	7308	5414	5408	5405
Uran-Reihe						
Thorium-234	—	—	—	—	25 ± 24	—
Protactinium-234m	1.540 ± 162	1.980 ± 196	905 ± 78	129 ± 17	283 ± 34	89 ± 15
Radium-226	1.300 ± 81	1.730 ± 85	740 ± 38	100 ± 6	220 ± 13	52 ± 3
Blei-214	1.100 ± 82	1.450 ± 72	649 ± 32	91 ± 5	184 ± 9	45 ± 3
Bismut-214	205 ± 52	—	—	193 ± 43	—	220 ± 37
Thorium-Reihe						
Actinium-228	430 ± 51	2.770 ± 295	357 ± 37	58 ± 6	47 ± 5	26 ± 3
Radium-224	465 ± 258	1.020 ± 340	179 ± 126	—	—	—
Blei-212	556 ± 40	869 ± 74	186 ± 14	9 ± 1	28 ± 4	3 ± 1
Bismut-212	499 ± 83	1.180 ± 138	198 ± 31	21 ± 7	34 ± 8	—
Thallium-208	164 ± 13	252 ± 14	16 ± 19	4 ± 0,7	7 ± 0,9	2 ± 0,5
Weitere						
Kalium-40	—	290 ± 72	61 ± 22	21 ± 6	64 ± 9	—

### C.3.2 Schlämme aus der Mineralwasseraufbereitung

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]								
	REx.-Nr.	40002	50002	50003	70001	70005	70007	70011	80002
Uran-Reihe									
Thorium-234	—	—	—	—	—	—	—	—	47 ± 43
Protactinium-234m	918 ± 93	6.190 ± 643	—	4.280 ± 358	384 ± 242	1.450 ± 217	50 ± 14	298 ± 53	
Radium-226	144 ± 13	5.410 ± 235	—	3.940 ± 171	172 ± 15	219 ± 30	34 ± 3	207 ± 13	
Blei-214	118 ± 12	4.520 ± 192	—	3.260 ± 142	129 ± 14	192 ± 31	30 ± 3	186 ± 14	
Bismut-214	—	—	—	—	—	—	—	—	
Thorium-Reihe									
Actinium-228	684 ± 91	1.660 ± 170	85 ± 41	2.300 ± 238	338 ± 56	753 ± 130	71 ± 8	118 ± 16	
Radium-224	121 ± 60	—	—	872 ± 672	—	—	64 ± 18	139 ± 68	
Blei-212	133 ± 16	357 ± 45	—	645 ± 56	59 ± 7	34 ± 17	62 ± 7	129 ± 15	
Bismut-212	206 ± 24	568 ± 78	—	661 ± 164	88 ± 42	—	67 ± 12	144 ± 32	
Thallium-208	40 ± 5	105 ± 8	—	—	16 ± 5	—	20 ± 2	41 ± 4	
Weitere									
Uran-235	—	380 ± 40	—	—	27 ± 14	—	—	—	
Kalium-40	—	—	—	947 ± 147	129 ± 38	—	369 ± 23	27 ± 22	

### C.3.3 Klärschlämme

Probe	Spezifische Aktivität [Bq/kg]			
	Kläranlage 1	Kläranlage 2	Kläranlage 3	Kläranlage 4
Uran-Reihe				
Thorium-234	25 ± 18	37 ± 9	59 ± 31	61 ± 23
Radium-226	39 ± 30	—	165 ± 64	342 ± 65
Blei-214	8 ± 6	10 ± 5	31 ± 8	66 ± 8
Bismut-214	—	9 ± 5	26 ± 7	53 ± 6
Blei-210	186 ± 28	202 ± 30	349 ± 35	248 ± 33
Thorium-Reihe				
Actinium-228	22 ± 9	18 ± 4	52 ± 12	110 ± 13
Radium-224	—	—	—	66 ± 50
Blei-212	19 ± 5	12 ± 4	42 ± 9	27 ± 5
Bismut-212	—	—	—	30 ± 17
Thallium-208	5 ± 2	4 ± 1	—	10 ± 2
Weitere				
Kalium-40	287 ± 37	332 ± 38	267 ± 42	434 ± 35