



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM - Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände (Teil 2)

BMU - 2007 - 695



BMU – 2007-695

**„Erfassung und radiologische Bewertung von
Hinterlassenschaften mit NORM – Materialien aus
früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der
modellhaften Untersuchung branchentypischer
Rückstände“**

TÜV-Süddeutschland
Bau und Betrieb GmbH
80684 München

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

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

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Referat RS I 2
Postfach 12 06 29
53048 Bonn

Erscheinungsjahr: 2007



Industrie Service

Forschungsvorhaben StSch 4386

**ERFASSUNG UND RADIOLOGISCHE
BEWERTUNG VON HINTERLASSENSCHAFTEN
MIT NORM-MATERIALIEN AUS FRÜHEREN
TÄTIGKEITEN UND ARBEITEN
EINSCHLIEßLICH DER MODELLHAFTEN
UNTERSUCHUNG BRANCHENTYPISCHER
RÜCKSTÄNDE**

Teil 2

Radiologische Bewertung von NORM-Rückständen

Oktober 2005

**Erstellt von der TÜV Industrie Service GmbH, TÜV SÜD Gruppe
Abteilung Umweltradioaktivität und radiologische Altlasten, München**

Matthias Niedermayer
Andreas Reichelt

☎ 089-5791-2302

✉ matthias.niedermayer@tuev-sued.de

✉ Westendstr. 199 / 80686 München



Industrie Service

Forschungsvorhaben StSch 4386

Fachbegleitung: Bundesamt für Strahlenschutz

Dieser Bericht ist vom TÜV SÜD im Auftrag des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Vorhabens StSch 4386 erstellt worden. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren. Der Eigentümer behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des Auftraggebers zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Dieser Bericht gibt die Meinung und Auffassung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des auftraggebenden Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit übereinstimmen.

Erstellt im Auftrag des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
von der TÜV Industrie Service GmbH, TÜV SÜD Gruppe
Geschäftsbereich Energie und Technologie
Hauptabteilung Strahlenschutz und Entsorgung

Zusammenfassung

Stoffe, die einen erhöhten Anteil an natürlichen Radionukliden besitzen, werden als NORM-Materialien (NORM: Abk. für *naturally occurring radioactive material*) bezeichnet. Die radiologische Bewertung von Rückständen aus dem Umgang mit diesen Stoffen hat in der Bundesrepublik Deutschland mit Inkrafttreten der Novelle der Strahlenschutzverordnung 2001 an Bedeutung gewonnen. Derartige Rückstände treten vor allem bei industriellen und bergbaulichen Prozessen zur Förderung und Verarbeitung von mineralischen Rohstoffen auf.

In der vorliegenden Studie wird untersucht, welche Arten von Rückständen bei der Gewinnung von Metallen auftreten und in welcher Art und Weise sie einer weiteren Nutzung zugeführt werden. Eine Vielzahl der bei dieser Nutzung denkbaren Expositionsszenarien wird beleuchtet und für die in diesen Szenarien betroffenen Personen das Maß der jährlichen Strahlendosis errechnet.

Teil 2

Radiologische Bewertung von NORM-Rückständen bei der Gewinnung von Metallen aus Erzen

INHALT

1.	EINLEITUNG	11
2.	RÜCKSTÄNDE (STOFFKLASSEN) UND IHRE NUTZUNGSARTEN	13
2.1	Stahl und Stahlveredler	13
2.1.1	Eisen / Stahl	13
2.1.2	Stahlveredler: Chrom	14
2.1.3	Stahlveredler: Mangan	15
2.2	Nichteisenmetalle	16
2.2.1	Aluminium	16
2.2.2	Kupfer	16
2.2.3	Blei	17
2.2.4	Kobalt	17
2.2.5	Nickel	18
2.2.6	Weitere Metalle	18
2.3	Zusammenfassung der Rückstandsklassen	19
3.	RESULTIERENDE EXPOSITIONSSZENARIOEN	21
3.1	Nutzung im Straßenbau	23
3.2	Nutzung im Wasserbau	23
3.3	Nutzung im Gleisbau	24
3.4	Nutzung als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie	24
3.5	Nutzung als Wertstoff in der Düngemittelindustrie	25
3.6	Zuführen auf eine Deponie	25
4.	AKTIVITÄTSKLASSEN	27
5.	BERECHNUNG DER STRAHLENEXPOSITION	29
5.1	Berechnungsgrundlagen	29
5.2	Altersklassen und Expositionsdauer	30

5.3	Vermischung mit Nicht-NORM-Material	31
5.4	Zusammenfassung der in die Dosisberechnung eingehenden Parameter	33
6.	ERGEBNISSE	35
6.1	Nutzung im Straßenbau	35
6.1.1	Wohnen an der Straße	35
6.1.2	Arbeiten an/auf der Straße	37
6.1.3	Bau der Straße	38
6.2	Nutzung im Wasserbau	40
6.2.1	Wohnen am Wasserlauf	40
6.2.2	Arbeiten am Wasserlauf	42
6.3	Nutzung im Gleisbau	43
6.3.1	Wohnen an der Trasse	43
6.3.2	Arbeiten auf/an der Trasse	46
6.4	Nutzung als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie	47
6.4.1	Wohnen in einem Haus, gebaut mit entsprechenden Baumaterialien	47
6.4.2	Arbeiten in einem Haus, gebaut mit entsprechenden Baumaterialien	49
6.4.3	Wohnen an einer mit entsprechenden Baumaterialien gebauten Struktur	50
6.4.4	Arbeiten an einer mit entsprechenden Baumaterialien gebauten Struktur	53
6.4.5	Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses	54
6.4.6	Arbeiten in der Baustoffindustrie	56
6.5	Nutzung als Wertstoff in der Düngemittelindustrie	57
6.5.1	Verzehr von entsprechend gedüngter Nahrung	57
6.5.2	Arbeiten in der Düngemittelindustrie	59
6.6	Zuführen von NORM-Material auf eine Deponie	60
6.6.1	Wohnen auf der Deponie	60
6.6.2	Wohnen an der Deponie	62
6.6.3	Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie	65
6.6.4	Arbeiten in der Deponie	66
7.	SZENARIO „WOHNEN AN DER DEPONIE“: BERECHNUNG DER MITTLEREN EFFEKTIVEN JAHRESDOSIS FÜR ERWACHSENE DER PERSONENGRUPPE A UNTER VERWENDUNG VON REALEN DEPONIE-MESSWERTEN	69
7.1	Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A für Aktivitätsmesswerte von Halden für Rückstände aus der Steinkohle-Gewinnung	69
7.2	Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A für Aktivitätsmesswerte von Halden für Rückstände aus der Aufbereitung von Rohphosphat	70
8.	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	72
8.1	Überprüfung der Berechnungsgrundlagen	72
8.1.1	Berechnung der Ortsdosisleistung für die Szenarien „Straßenbau“ mittels einer Monte-Carlo-Simulation	72

8.1.2	Vergleich des berechneten Dosisleistungsbeitrags der äußeren Gammabestrahlung mit der gemessenen Ortsdosisleistung für die untersuchten Halden des Steinkohlebergbaus	74
8.2	Vergleich mit weiteren Studien	76
9.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	78
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	78
9.2	Ausblick	80
10.	LITERATUR	81
	ANHANG: VERFAHREN ZUR BERECHNUNG DER STRAHLENEXPOSITION	84
	A 1. BERECHNUNG DER STRAHLENEXPOSITION MIT HILFE DER BERECHNUNGSGRUNDLAGE BERGBAU	84
A 1.1.	Äußere Gammabestrahlung	85
A 1.2.	Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten	86
A 1.3.	Inhalation von Staub	87
A 1.4.	Ingestion von Radionukliden über Lebensmittel	88
A 1.4.1	Die Konzentration von Radionukliden in Boden und Oberflächenwassern bei Ausbreitung über den Transport im Grundwasser	88
A 1.4.2	Die Konzentration von Radionukliden im Boden bei direktem Eintrag über Düngung mit mit NORM-Material beaufschlagten Düngemitteln	90
A 1.4.3	Berechnung der resultierenden Dosis	91
A 1.5.	Direktingestion von Boden	94
	A 2. BERECHNUNG DER STRAHLENEXPOSITION IN SONDERSITUATIONEN	95
A 2.1.	Äußere Gammabestrahlung	95
A 2.2.	Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten	96

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Modell für die Berechnung der Ortsdosisleistung, die von einer Straße herrührt, in deren Straßenbelag oder in deren Straßenunterbau NORM-Material Verwendung findet

73

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Rückstände aus der Metallgewinnung und deren Anwendung	19
Tab. 2:	Zusammenfassung einiger wichtiger in die Dosisberechnung eingehender Parameter	34
Tab. 3:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Straße“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	35
Tab. 4:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Straße“, Angaben in mSv	37
Tab. 5:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an/auf einer mit NORM-Materialien gebauten Straße“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	37
Tab. 6:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an/auf einer mit NORM-Materialien gebauten Straße“, Angaben in mSv	38
Tab. 7:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Bau einer Straße mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	39
Tab. 8:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Bau einer Straße mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv	39
Tab. 9:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	40
Tab. 10:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv	42
Tab. 11:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	42
Tab. 12:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv	43
Tab. 13:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	44
Tab. 14:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv	45

Tab. 15:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten auf/an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	46
Tab. 16:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten auf/an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv	47
Tab. 17:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	48
Tab. 18:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv	49
Tab. 19:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	49
Tab. 20:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv	50
Tab. 21:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Struktur“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	51
Tab. 22:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Struktur“, Angaben in mSv	52
Tab. 23:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einer mit NORM-Materialien gebauten Struktur“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	53
Tab. 24:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einer mit NORM-Materialien gebauten Struktur“, Angaben in mSv	54
Tab. 25:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	54
Tab. 26:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses“, Angaben in mSv	55
Tab. 27:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Baustoffindustrie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	56
Tab. 28:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Baustoffindustrie“, Angaben in mSv	57
Tab. 29:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Verzehr von mit NORM-Produkten gedüngten Nahrungsmitteln“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	57
Tab. 30:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen im Expositionsszenario „Verzehr von mit NORM-Produkten gedüngten Nahrungsmitteln“, Angaben in mSv	58

Tab. 31:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Düngemittelindustrie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	59
Tab. 32:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Düngemittelindustrie“, Angaben in mSv	60
Tab. 33:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen auf der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	60
Tab. 34:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen auf der Deponie“, Angaben in mSv	62
Tab. 35:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	63
Tab. 36:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an der Deponie“, Angaben in mSv	64
Tab. 37:	Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	65
Tab. 38:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie“, Angaben in mSv	66
Tab. 39:	Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)	67
Tab. 40:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Deponie“, Angaben in mSv	67
Tab. 41:	Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an der Deponie“ unter Verwendung realer Messwerte, Angaben in mSv	70
Tab. 42:	Vergleich der mittels Monte-Carlo-Simulation gewonnenen Ergebnisse der durch äußere Gammabestahlung erfolgte Exposition mit dem Ergebnis aus der Berechnungsgrundlage Bergbau für die Szenarien „Straßenbau“	74
Tab. 43:	Vergleich der Messwerte mit dem errechneten Wert bzgl. des Dosisbeitrags der mittleren effektiven Jahresdosis je Bq/kg	75
Tab. 44:	Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Studie mit vergleichbaren Ergebnissen aus der Studie „Ableitung von Überwachungsgrenzen für Reststoffe mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radioaktivität“ /Barthel et al., 1999/; Vergleichsgröße: Jahresdosis je spezifische Aktivität für Erwachsene (Personengruppe A) bzw. für Beschäftigte	76
Tab. 45:	Effektive Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A bzw. für Beschäftigte bei Annahme der Aktivitätsklasse 2 (0,2 – 1 Bq/g), Angaben in mSv	79

1. Einleitung

In allen in der Natur vorkommenden Stoffen lassen sich natürliche Radionuklide nachweisen. Wenn diese Stoffe durch den Menschen, beispielsweise als Rohstoffe zur Gewinnung von Grundstoffen, genutzt werden, reichern sich die natürlichen Radionuklide bei den entsprechenden technologischen Prozessen häufig in den Rückständen an. Diese werden entweder einer Weiternutzung zugeführt oder beseitigt. Unabhängig davon jedoch resultiert eine Strahlenexposition zum einen für Personen, die in Ausübung ihres Berufes diese NORM-Rückstände handhaben (im Folgenden „Beschäftigte“) zum anderen für beliebige Personen der Allgemeinbevölkerung.

Mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung 2001 wurden in Deutschland detaillierte Regelungen für den Umgang mit natürlicher Radioaktivität getroffen. Im Rahmen dieser Regelungen wurden zu berücksichtigende Industriezweige und deren Rückstände festgelegt sowie Überwachungsgrenzen für die massenbezogenen Aktivitäten der zu betrachtenden Rückstände definiert.

Diese detaillierten Regelungen sind im bundesdeutschen Strahlenschutzrecht eine Neuheit. Bis zur Einführung der novellierten Strahlenschutzverordnung war der Schutz von Beschäftigten und Bevölkerung bei natürlich vorkommender Radioaktivität nicht in diesem Umfang Gegenstand gesetzlicher Regelungen. Aus diesem Grund sind durch die Verwertung und / oder Deponierung von Rückständen aus industriellen Prozessen in der Zeit vor 2001 Strahlenexpositionen möglich, die aus heutiger Sicht als unzulässig einzuschätzen sind.

Einen bedeutenden Teil der geförderten Rohstoffe machen Erze für die Metallgewinnung aus. Im Rahmen ihrer Gewinnung treten mannigfaltige Rückstände auf. Diese werden teils deponiert, zu einem großen Teil aber auch als Wertstoffe für andere Produkte genutzt. Sie werden in der vorliegenden Arbeit betrachtet und einer radiologischen Bewertung unterzogen.

Dazu wurden zunächst typische Stoffströme zu ermittelt, d. h. welche Stoffklassen (z. B. Schlacke, Stäube,...) in welchen Mengen bei der Gewinnung eines bestimmten Metalls aus seinen Erzen auftreten. Im Weiteren wurde festgestellt, was mit den entstandenen Stoffen geschieht (z. B. Deponierung, Folgenutzung). Die im Rahmen der Metallgewinnung auftretenden Rückstände werden in Kap. 2 für die verschiedenen Metalle ermittelt und aufgelistet.

Mit diesen Kenntnissen als Grundlage können im Folgenden Expositionsszenarien entwickelt werden, die in Kap. 3 dargestellt sind.

Um nun für die einzelnen Expositionsszenarien für verschiedene Personengruppen das jeweilige ggf. vorhandene gesundheitliche Risiko evaluieren zu können, ist es erforderlich die entsprechenden effektiven Jahresdosen zu ermitteln. Da diese neben einer Vielzahl weiterer Parameter entscheidend von der spezifischen Aktivität des jeweiligen Rückstandes abhängen, werden im Folgenden Aktivitätsklassen definiert. Diese werden in Kap. 4 eingeführt.

Die Rahmenparameter, die zur Berechnung der Strahlenexposition erforderlich sind, werden in Kap. 5 beschrieben und die aus den Berechnungen resultierenden Ergebnisse in Kap. 6 detailliert dargestellt.

Der vorliegende Bericht ermöglicht somit die Abschätzung von Strahlendosen für Beschäftigte sowie für Personen der Allgemeinbevölkerung.

2. Rückstände (Stoffklassen) und ihre Nutzungsarten

Es wurde zunächst untersucht, welche Rückstände bei der Gewinnung der einzelnen Metalle anfallen und welcher Verwendung sie zugeführt werden. Diese Recherche ist nach den Metallarten gegliedert. Als wichtigstes, was sowohl die Vielfalt der Nutzung als auch die Massenströme angeht, sind zunächst Erze zur Eisen- und Stahlerzeugung aufgeführt. Im Weiteren sind die Rückstände aus den Prozessen der Erzeugung der als Legierungsmetalle für Stahl wichtigen „Stahlveredler“ Chrom und Mangan beschrieben.

Unter den Nichteisenmetallen sind aufgrund ihrer Bedeutung und der damit verbundenen Massenströme Aluminium und Kupfer beschrieben, gefolgt von allen weiteren Nichteisenmetallen mit wirtschaftlicher Bedeutung in alphabetischer Reihenfolge.

2.1 Stahl und Stahlveredler

2.1.1 Eisen / Stahl

Aufgrund des großen Bedarfs an Eisen und Stahl und der damit großen Mengen an aufzuarbeitenden Erzen und mithin auftretenden Rückstandsmengen sind die Stoffströme in der eisen- und stahlproduzierenden Industrie sehr genau ermittelt. Dies liegt nicht zuletzt an dem wirtschaftlichen Wert der Rückstände. In /Winnacker und Kuchler, 1986/ sind Anfall und Nutzung von Rückständen detailliert aufgelistet.

- 46 % der gesamten Rückstandsmenge tritt in Form von Hochofenschlacke auf. Diese wird zu 29 % als Kreislaufstoff (13 % der gesamten Rückstandsmenge), zu 64 % als Straßenbaustoff (29 % der gesamten Rückstandsmenge), zu 6,5 % als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie (3 % der gesamten Rückstandsmenge) und zu 0,5 % in der Düngemittelindustrie (0,2 % der gesamten Rückstandsmenge) verwendet.
- 28 % der gesamten Rückstandsmenge tritt in Form von Stahlwerksschlacke auf. Diese wird zu 44,9 % als Kreislaufstoff (12 % der gesamten Rückstandsmenge), zu 13,6 % im Wasserbau

(4 % der gesamten Rückstandsmenge), zu 15,1 % im Wegebau (4 % der gesamten Rückstandsmenge), zu 4,8 % im Gleisbau (1 % der gesamten Rückstandsmenge), und zu 17,6 % in der Düngemittelindustrie (4,3 % der gesamten Rückstandsmenge) verwendet. 4,6 % (1 % der gesamten Rückstandsmenge) wird einer nicht weiter spezifizierten Nutzung zugeführt und 7 % (2 % der gesamten Rückstandsmenge) deponiert.

- 6 % der gesamten Rückstandsmenge tritt in Form von feuerfestem Ausbruch auf. Dieser wird zu 61 % als Kreislaufstoff (4 % der gesamten Rückstandsmenge) verwendet, 39 % (2 % der gesamten Rückstandsmenge) werden deponiert.
- 6 % der gesamten Rückstandsmenge tritt in Form von Zunder auf. Dieser wird zu 79 % als Kreislaufstoff (5 % der gesamten Rückstandsmenge) verwendet, 21 % (1 % der gesamten Rückstandsmenge) werden deponiert.
- 7 % der gesamten Rückstandsmenge treten in Form von Stäuben auf. Diese werden zu 87 % als Kreislaufstoff (6 % der gesamten Rückstandsmenge) verwendet, 13 % (1 % der gesamten Rückstandsmenge) werden deponiert.
- 4 % der gesamten Rückstandsmenge treten in Form von Schlämmen auf. Diese werden zu 55 % als Kreislaufstoff (2 % der gesamten Rückstandsmenge) verwendet, 45 % (1 % der gesamten Rückstandsmenge) werden deponiert.
- 3 % der gesamten Rückstandsmenge werden als „sonstige Rückstände“ bezeichnet, die zu 55 % (2 % der gesamten Rückstandsmenge) einer nicht weiter spezifizierten Nutzung zugeführt und zu 39 % (1 % der gesamten Rückstandsmenge) deponiert werden.

2.1.2 Stahlveredler: Chrom

Chrom findet überwiegend (74 %) in Form von Ferrochrom Anwendung /Winnacker und Küchler, 1986/. Zur Erzeugung von Ferrochrom wird Chromerz metallurgisch aufbereitet, d. h. es wird zunächst in Elektroreduktionsöfen eine Kohlenstoffreduktion von Chromerz und Quarz herbeigeführt, wobei Silicochrom entsteht, und im Weiteren reines Ferrochrom aus einer Schmelze von Chromerz, Kalk und Silicochrom extrahiert. Bei diesen beiden Arbeitsschritten entstehen als

Nebenprodukte Schlacken, die laut /Winnacker und Küchler, 1986/ entweder als Schotter und zum Auffüllen von Senken verwendet oder deponiert werden.

Für die Erzeugung von Chrommetall führt /Winnacker und Küchler, 1986/ Schlacken als Rückstand auf, die bei Herstellung von Feuerfestmaterialien Verwendung finden. Für diesen Pfad konnten allerdings keine Mengenangaben recherchiert werden. Zudem ist er als ein Pfad geringerer Bedeutung einzustufen, da die überwiegende Menge an Chromerz der Herstellung von Ferrochrom dient. Aus diesem Grund wird er im Weiteren nicht berücksichtigt.

Bei der Erzeugung von Ferrochrom suraffiné, einer Ferrochromart mit sehr niederem Kohlenstoffanteil (0,02 – 0,05 %), entsteht sog. Zerfalls- oder Rieselschlacke, die zur Verbesserung von Böden verwendet werden kann /Winnacker und Küchler, 1986/.

Schließlich entstehen Stäube, die ausschließlich deponiert werden.

Da der Anteil der Stäube und der Rieselschlacke an der Gesamtückstandsmenge nicht recherchiert werden konnte, wird im Folgenden angenommen, dass der überwiegende Teil der Rückstände in Form von Schlacken anfällt.

2.1.3 Stahlveredler: Mangan

Auch Manganerze werden überwiegend zur Erzeugung von Ferromangan gefördert und aufbereitet (90 – 95 %) /Winnacker und Küchler, 1986/. Bei dem dazu notwendigen Prozess handelt es sich um einen Hochofenprozess, bei dem neben Ferromangan auch Schlacken und – aus den Abgasreinigungsanlagen – in geringen Mengen Gichtstäube und Schlämme anfallen. Während die letzteren als Kreislaufstoffe dem Hochofenprozess wieder zugeführt werden können, dienen die Schlacken entweder zum Auffüllen von Senken oder finden in der Düngemittelherstellung Verwendung /Winnacker und Küchler, 1986/. Zudem können sie auch metallurgischen Prozessen zum Erschmelzen von Roheisen wieder zugeführt werden.

Im Folgenden wird angenommen, dass der überwiegende Teil der Rückstände in Form von Schlacken anfällt.

2.2 Nichteisenmetalle

2.2.1 Aluminium

Aluminium wird über den sog. *Bayer-Prozess* aus Bauxit gewonnen. Dabei wird das Bauxit mit Natronlauge aufgeschlossen und Al_2O_3 abgetrennt. Die Ausbeute, die dabei erzielt wird, liegt bei 50 %. Zurück bleibt der aufgrund seiner intensiven Farbe so genannte Rotschlamm.

Die gewonnene Tonerde, das Al_2O_3 , dient nun als Grundlage für die weitere Verarbeitung: 60 % davon werden zu Aluminiumhydroxid und 40 % zu Aluminium weiterverarbeitet. Das dabei angewandte Verfahren beruht auf dem Prinzip der Elektrolyse, wobei als Elektrolyt eine Mischung aus Al_2O_3 und Kryolith (Na_3AlF_6) dient.

Als Rückstände treten in diesem Prozess Rotschlamm und Ofenausbruch auf. Im Rotschlamm sammeln sich sämtliche mineralische, in Natronlauge unlösliche Bestandteile des Bauxits. Er stellt somit den Hauptanteil der NORM-Rückstände bei der Gewinnung von Aluminium dar.

In der Vergangenheit wurden viele Anwendungsmöglichkeiten für die Rückstände aus der Aluminiumproduktion gesucht. So findet man Hinweise auf die Nutzung von Rotschlamm im Straßenbau, als Mittel zur Bodenverbesserung, als Katalysator bei der Kohleverflüssigung oder als Schlackenbildner bei der Stahlgewinnung /Winnacker und Küchler, 1986/. Aus technischen und qualitativen Gründen konnte sich aber keine der Anwendungen durchsetzen, so dass sowohl der Ofenausbruch als auch der anfallende Rotschlamm heute vollständig deponiert werden.

2.2.2 Kupfer

Kupfer wird nach klassischen metallurgischen Verfahren aus den Erzen gewonnen: in einem ersten Prozess werden die Kupfererze zu „Kupferstein“ geröstet, d.h. die Erze, die als sulfidische Verbindungen vorliegen, werden in einem Ofen erhitzt, wobei der Schwefel mit dem Sauerstoff der Luft reagiert und austritt. In einem zweiten Hochofenprozess wird aus dem Kupferstein reines Kupfer gewonnen. Bei beiden Prozessen entstehen als Rückstände Schlacken, Schlämme, Krätze

und Filterstäube /DKI, 1995/. Quantitativ ist jedoch nur Schlacke als Rückstand von Bedeutung /Bruch et al., 1995/.

Es wird somit im Weiteren angenommen, dass der überwiegende Teil der Rückstände in Form von Schlacken anfällt.

2.2.3 Blei

Bleierze liegen wie Kupfererze überwiegend als sulfidische Verbindungen vor. Auch sie werden in einem zweifachen Schritt verarbeitet: Im Röstvorgang werden Sulfidverbindungen in Sulfatverbindungen überführt, die sich dann im zweiten Schritt zu Blei, Schwefeldioxid und Sauerstoff reduzieren lassen. In beiden Prozessschritten fallen als Rückstände Schlacken, Flugstaub, Stein und Speise an /Winnacker und Kuchler, 1986/. Die Schlacken finden Verwendung als Deponieabdeckung, als Schotter sowie als Sekundärrohstoff in der Zinkgewinnung; der Flugstaub kann als Kreislaufstoff wieder in den Reduktionsprozess einfließen und der Stein findet Anwendung in der Kupferverhüttung. Lediglich die Speise muss zu 100 % entsorgt werden, da die Edelmetallgewinnung aus ihr zwar technisch möglich, aber unwirtschaftlich ist /Winnacker und Kuchler, 1986/.

Quantitativ ist als Rückstand nur die Schlacke von Bedeutung.

2.2.4 Kobalt

Kobalt wird heute zu 75 % aus Schlacken der Nickel- und Kupfergewinnung erzeugt. Die restlichen 25 % werden aus Kobalterzen in drei schmelzmetallurgischen Prozessschritten gewonnen. Als Rückstände fallen dabei Schlacken, goldhaltige Aschen, Zementate, Nickelkonzentrat und Kobaltkathoden an /Winnacker und Kuchler, 1986/. Da der Anteil der einzelnen Rückstandsgruppen an der Gesamtrückstandsmenge nicht recherchiert werden konnte, wird im Folgenden angenommen, dass der überwiegende Teil der Rückstände in Form von Schlacken anfällt.

2.2.5 Nickel

Für die Erzeugung von Nickel sind zwei verschiedene Herstellungsverfahren zu betrachten /Winnacker und Küchler, 1986/:

1. Das konventionelle Verfahren, bei dem Röstprozess und Reduktion getrennt voneinander vorgenommen werden und
2. das Röstreduktionsverfahren.

Bei fast allen Prozessschritten fallen als Rückstände Schlacken, Aschen, Stäube, Filtrerrückstände und Schlämme an. In der Bundesrepublik Deutschland findet seit 1945 keine Nickelverhüttung mehr statt; der Nickelbedarf wird über die Einfuhr des Nickelmetalls gedeckt. Auf eine quantitative Erfassung wurde aus diesen Gründen hier verzichtet.

2.2.6 Weitere Metalle

Über weitere Metalle wie z. B. Molybdän, Zink, Zinn, Niob und Tantal, Titan, Wolfram, Zirkonium und Hafnium konnten weder qualitativ noch quantitativ Rückstandsmengen oder ggf. deren Anwendung recherchiert werden. Dies liegt zum Teil daran, dass diese Metalle in der Bundesrepublik Deutschland nicht bzw. nicht mehr gewonnen werden, sondern der Bedarf an diesen Metallen durch den Import der Metalle selbst gedeckt wird. Zum Teil liegt es aber auch daran, dass nur sehr wenige Firmen diese Metalle produzieren und entsprechende Aussagen unter das Geschäftsgeheimnis fallen. Für sie muss angenommen werden, dass die Rückstände zu 100 % einer Deponie zugeführt werden.

2.3 Zusammenfassung der Rückstandsklassen

Die Ergebnisse der in den Kap. 2.1 und 2.2 geführten Recherche sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Rückstände aus der Metallgewinnung und deren Anwendung

Rückstände	Anteil an der gesamten Rückstandsmenge	Anwendung
Eisen- und Stahlgewinnung		
Hochofenschlacke	46 %	Nutzung als Kreislaufstoff Nutzung im Straßenbau Nutzung als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie Nutzung in der Düngemittelindustrie
Stahlwerksschlacke	28 %	Nutzung als Kreislaufstoff Nutzung im Wasserbau Nutzung im Wegebau Nutzung im Gleisbau Nutzung in der Düngemittelindustrie Deponie
Feuerfester Ausbruch	6 %	Nutzung als Kreislaufstoff Deponie
Zunder	6 %	Nutzung als Kreislaufstoff Deponie
Stäube	7 %	Nutzung als Kreislaufstoff Deponie
Schlämme	4 %	Nutzung als Kreislaufstoff Deponie
Sonstige Rückstände	3 %	Nutzung (nicht näher spezifiziert) Deponie

Chromgewinnung		
Schlacken	> 90 %	Schotter Auffüllen von Senken Deponie
Schlacken für die Feuerfestindustrie	gering	Herstellung von Feuerfestmaterialien
Zerfalls- oder Rieselschlacken	gering	Verbesserung der Böden
Stäube	gering	Deponie
Mangangewinnung		
Schlacken	> 95 %	Auffüllen von Senken Metallurgie (Erschmelzen von Roheisen) Düngemittel
Gichtstaub / Schlämme	gering	Nutzung als Kreislaufstoff
Aluminiumgewinnung		
Rotschlamm	10 %	Deponie
Ofenausbruch	90 %	Deponie
Kupfergewinnung		
Schlacken	> 90 %	
Filterstäube	gering	
Schlämme	gering	
Krätze	gering	
Bleigewinnung		
Schlacken	> 90 %	Deponie / Deponieabdeckung
Flugstaub	gering	Nutzung als Kreislaufstoff
Stein	gering	Nutzung in der Kupferverhüttung
Speise	gering	Entsorgung
Kobaltgewinnung		
Schlacken	> 90 % (geschätzt)	k. A.
Goldhaltige Aschen	gering	k. A.
Zementate	gering	k. A.

Nickelkonzentrat	gering	k. A.
Kobaltekathoden	gering	k. A.

Eine vergleichende Zusammenfassung der untersuchten Technologien und der daraus resultierenden Rückstandsströme und ihrer Anwendung zeigt Schlacke als die beherrschende Rückstandsklasse. Als Anwendungsbereiche ergeben sich:

- die Anwendung von Rückständen im Straßenbau
- die Anwendung von Rückständen im Wasserbau
- die Anwendung von Rückständen im Gleisbau
- die Anwendung von Zuschlagsstoff in der Bauindustrie
- die Anwendung von Wertstoff in der Düngemittelindustrie

Zudem werden Rückstände, die keiner Anwendung mehr zugeführt werden können, auf Deponien verbracht.

3. Resultierende Expositionsszenarien

Aus der Übersicht der Anwendungsbereiche, die sich aus Kap. 2.3 ergeben, können folgende Expositionsszenarien angenommen werden:

A) Anwendung von Rückständen im Straßenbau

- Wohnen an der Straße
- Arbeiten auf/an der Straße
- Bau der Straße

B) Anwendung von Rückständen im Wasserbau

- Wohnen am Wasserlauf
- Arbeiten auf/an dem Wasserlauf

C) Anwendung von Rückständen im Gleisbau

- Wohnen an der Trasse
- Arbeiten auf/an der Trasse

D) Anwendung von Zuschlagsstoff in der Bauindustrie

- Wohnen in einem Haus, gebaut aus entsprechendem Baumaterial
- Arbeiten in einem Haus, gebaut aus entsprechendem Baumaterial
- Wohnen an einer Struktur (z. B. Lärmschutzwand), gebaut aus entsprechendem Baumaterial
- Arbeiten an einer Struktur (z. B. Lärmschutzwand), gebaut aus entsprechendem Baumaterial
- Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses
- Arbeiten in der Baustoffindustrie

E) Anwendung von Wertstoff in der Düngemittelindustrie

- Verzehr von entsprechend gedüngten Lebensmitteln
- Arbeiten in der Düngemittelindustrie

Bei Deponierung der Rückstände sind folgende Expositionsszenarien zu betrachten:

- Wohnen auf der Deponie
- Wohnen an der Deponie

-
- Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie
 - Arbeiten auf der Deponie

3.1 Nutzung im Straßenbau

Im Fall der Nutzung von NORM-Materialien im Straßenbau ist ein zu betrachtendes Expositionsszenario das Wohnen an einer entsprechenden Straße. Dabei zu berücksichtigen sind die Expositionspfade der äußeren Gammabestrahlung und der Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten.

Ein weiteres Expositionsszenario stellen Arbeiten an der Straße dar. Die dabei zu berücksichtigenden Expositionspfade sind ebenfalls die äußere Bestrahlung und die Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten.

Ein drittes Expositionsszenario schließlich ist der Bau der Straße. Hier ist zusätzlich zur äußeren Gammabestrahlung und der Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten die Inhalation von Staub und die Direktingestion von Boden¹ zu berücksichtigen.

3.2 Nutzung im Wasserbau

Im Fall der Nutzung von NORM-Materialien im Wasserbau sind zwei Expositionsszenarien vorstellbar: das Wohnen am Wasserlauf sowie Arbeiten auf bzw. an dem Wasserlauf.

Im ersten Fall sind als Expositionspfade äußere Bestrahlung, Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten und Ingestion zu betrachten, im zweiten Fall lediglich Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten.

¹ Unter „Direktingestion von Boden“ ist die direkte Aufnahme von Bodenmaterial über Ingestion zu verstehen. Eine solche ist möglich, wenn beispielsweise Bodenmaterial, das an den Händen anhaftet, durch das Abwischen von Schweiß ins Gesicht und von da in den Rachen gelangt.

Die Arbeiten beim Wasserbau selbst sind mit denen im Straßenbau vergleichbar und daher in Kap. 3.1 bereits betrachtet.

3.3 Nutzung im Gleisbau

Die Situation bei der Nutzung des Gleisbaus ist ähnlich der des Wasserbaus. Auch hier gilt es zwei Fälle zu betrachten: das Wohnen an der Trasse und das Arbeiten an bzw. auf der Trasse.

In beiden Fällen sind als Expositionspfade äußere Bestrahlung, Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten und Inhalation von Staub zu berücksichtigen. Im Expositionsszenario „Wohnen“ gilt es zusätzlich den Expositionspfad Ingestion, im Expositionsszenario „Arbeiten“ den Expositionspfad Direktingestion zu berücksichtigen.

3.4 Nutzung als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie

Bei Nutzung von NORM-Materialien als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie sind folgende Expositionsszenarien denkbar:

- Wohnen in einem Haus, gebaut mit entsprechenden Baumaterialien,
- Arbeiten in einem Haus, gebaut mit entsprechenden Baumaterialien,
- Wohnen an einer mit entsprechenden Baumaterialien gebauten Struktur²,
- Arbeiten an einer mit entsprechenden Baumaterialien gebauten Struktur,
- Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses,
- Arbeiten in der Baustoffindustrie.

² Bauliche Strukturen werden beispielsweise zum Zweck des Lärmschutzes entlang belasteter Straßen errichtet. Den entsprechenden im Folgenden betrachteten Szenarien wird eine betonierte Lärmschutzwand zugrunde gelegt.

Im Fall der ersten vier Szenarien sind die Expositionspfade äußere Gammastrahlung und Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten berücksichtigt, im fünften kommt zusätzlich noch die Inhalation von Staub sowie die Direktingestion dazu.

3.5 Nutzung als Wertstoff in der Düngemittelindustrie

Werden NORM-Materialien in der Düngemittelindustrie eingesetzt, so sind als Expositionsszenarien der Verzehr entsprechend gedüngter Lebensmittel und die Arbeit in der Düngemittelindustrie selbst denkbar.

Im ersten Fall ist allein die Ingestion als Expositionspfad zu berücksichtigen, im zweiten Fall sind äußere Bestrahlung, Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten sowie die Inhalation von Staub und Direktingestion ins Kalkül zu ziehen.

3.6 Zuführen auf eine Deponie

Wenn keine Weiterverwendung von NORM-Materialien stattfindet, sondern diese einer Deponie zugeführt werden, sind folgende Expositionsszenarien denkbar:

- Wohnen auf der Deponie
- Wohnen an der Deponie
- Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie
- Arbeiten in der Deponie

Im ersten Fall sind als Expositionspfade äußere Bestrahlung, Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten, die Inhalation von Staub, Ingestion sowie Direktingestion zu berücksichtigen.



Im Szenario „Wohnen an der Deponie“ muss nur äußere Bestrahlung, Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten und Ingestion berücksichtigt werden. In den Fällen „Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie“ und „Arbeiten in der Deponie“ sind äußere Bestrahlung, Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten sowie die Inhalation von Staub und Direktingestion zu betrachten.

4. Aktivitätsklassen

Zur Berechnung der effektiven Jahresdosen werden Aktivitätsklassen definiert, in welchen die Radionuklide in der sie tragenden Materie vorliegen. Bei Sichtung der Literaturwerte zu den in Rückständen auftretenden spezifischen Aktivitäten sowie bei Untersuchung der real in der Vergangenheit auf der Fläche der heutigen BRD aufgetretenen Massenströme (vgl. Teil 1 der vorliegenden Studie) zeigte sich, dass insbesondere bei den quantitativ dominanten Stoffströmen in Folge der Aufbereitung von Stahl und Eisen aus Erzen sowie von Aluminiumprodukten aus Bauxit in der Regel spezifische Aktivitäten von 1 Bq/g nicht überschritten werden. Aus diesem Grund richten sich die hier verwendeten Aktivitätsklassen nach den relativen Maßen von „gering“, „mittel“, „hoch“ und „sehr hoch“ sowie an den in der Strahlenschutzverordnung festgeschriebenen Grenzmarken von 0,2 Bq/g als Abgrenzung zur natürlich auftretenden spezifischen Aktivität und 0,2 Bq/g als Abgrenzung zu einer Aktivität, die ggf. erhöhte gesundheitliche Risiken nach sich ziehen könnte. Sie sind wie folgt definiert:

Aktivitätsklasse 1 „gering“	Aktivitätsklasse 2 „mittel“	Aktivitätsklasse 3 „hoch“
< 0,2 Bq/g	0,2 – 1 Bq/g	> 1 Bq/g

Zur Berechnung der für die einzelnen Aktivitätsklassen typischen Jahresdosen wird für die Aktivitätsklasse 1 der Wert von 0,2 Bq/g herangezogen. Der damit berechnete Dosiswert stellt eine obere Grenze für die Jahresdosis im Fall einer Weiternutzung bzw. Beseitigung von Rückständen mit einer spezifischen Aktivität der Aktivitätsklasse 1 dar.

Für Rückstände mit einer spezifischen Aktivität der Aktivitätsklasse 2 wird als repräsentativer Wert 0,5 Bq/g herangezogen.

Zudem ist in einzelnen Fällen, die aber gemäß Teil 1 der vorliegenden Studie nicht zu quantitativ bedeutsamen Massenströmen führten, in kleinerem Umfang mit Rückständen der Aktivitätsklasse 3 zu rechnen /Gellermann et al., 2003/. Zur Berechnung der daraus resultierenden Jahresdosen wird als repräsentativer Wert 2,5 Bq/g herangezogen.

Bei den oben genannten Werten handelt es sich um die Gesamtaktivität aus der Uran-Radium- und der Thorium-Reihe. Aufgrund von technologischen Prozessen kann es aber zur An- oder Abreicherung von Elementen der einen oder anderen Reihe kommen. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Berechnung der für die einzelnen Aktivitätsklassen typischen Jahresdosen getrennt für die einzelnen Reihen vorgenommen, die jedoch ihrerseits als im radiologischen Gleichgewicht befindlich angenommen werden. Für die repräsentativen Werte der spezifischen Aktivität zur Berechnung wird daher jeweils die Hälfte der oben genannten Werte verwendet. Somit wird zur Berechnung der Jahresdosen aus der Uran-Radium- bzw. aus der Thorium-Reihe jeweils

- für die Aktivitätsklasse 1 ein Wert von 0,10 Bq/g
- für die Aktivitätsklasse 2 ein Wert von 0,25 Bq/g
- für die Aktivitätsklasse 3 ein Wert von 1,25 Bq/g

eingesetzt.

5. Berechnung der Strahlenexposition

5.1 Berechnungsgrundlagen

Um eine möglichst allgemeine Grundlage zur Errechnung von Jahresdosen bei definierten Expositionsszenarien zu erhalten, sind Dosiskoeffizienten zu bestimmen. Diese sind in der vorliegenden Arbeit als die Quotienten aus der effektiven Jahresdosis und der massenbezogenen Aktivität des im jeweiligen Expositionsszenario betrachteten NORM-Stoffes zu verstehen, so dass aus ihrer Kenntnis und der in jedem Einzelfall zu bestimmenden massenbezogenen Aktivität ein Dosiswert für die effektive Jahresdosis ermittelt werden kann. Dabei ist für die Uran-Reihen und die Thorium-Reihe getrennt zu verfahren. Bei den hier vorliegenden Berechnungen werden die Reihen als im radioaktiven Gleichgewicht befindlich angenommen.

Für jedes Expositionsszenario setzt sich die gesamte Strahlenexposition aus einer Reihe von verschiedenen Einzelkomponenten zusammen. Welche bei den hier untersuchten Expositionsszenarien ins Kalkül zu ziehen sind, wurde bereits in Kap. 3 dargestellt. Als Grundlage für die Berechnung der Einzelkomponenten dient weitgehend die „Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität“, die sog. „Berechnungsgrundlage Bergbau“, in Form der 1999 von der SSK herausgegebenen Empfehlung /SSK, 1999/. Diese wurde in Zusammenarbeit des Bundesumweltministeriums (BMU) und des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) zur Abschätzung von Strahlendosen, denen Personen der Allgemeinbevölkerung durch den ehemaligen Uranbergbau in Sachsen und Thüringen ausgesetzt sein können, erarbeitet. Für Expositionsszenarien, die durch die Berechnungsgrundlage Bergbau nicht erfasst werden können, werden Berechnungsverfahren angewandt, die der Studie „Ableitung von Überwachungsgrenzen für Reststoffe mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radioaktivität“ /Barthel et al., 1999/ entnommen sind.

5.2 Altersklassen und Expositionsdauer

Allgemein werden, sofern in den Expositionsszenarien nicht ausschließlich Beschäftigte zu betrachten sind, die Berechnungen nach der Vorgabe der Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2001/ getrennt für sechs verschiedene Altersklassen durchgeführt: jünger als 1 Jahr, 1 – 2 Jahre, 3 – 7 Jahre, 8 – 12 Jahre, 13 – 17 Jahre und älter als 17 Jahre. Für Personen älter als 17 Jahre werden die Berechnungen zudem, sofern dies vor dem Hintergrund des jeweils betrachteten Expositionsszenarios sinnvoll ist, getrennt für Personen durchgeführt, die überwiegend zu Hause tätig sind („Gruppe A“), bzw. die berufstätig und somit auch außer Haus sind („Gruppe B“). Für alle wird eine jährliche Aufenthaltszeit in der Wohnung *im Haus* von 7000 Stunden angenommen, für Personen der Gruppe A zusätzlich eine Aufenthaltszeit von 1000 Stunden jährlich *außer Haus*, jedoch in der unmittelbaren Umgebung der Wohnung, d. h. in einer Garten- oder Hofsituation.

Als Beschäftigte werden solche Personen bezeichnet, die aufgrund ihrer beruflichen Tätigkeit durch NORM-Materialien exponiert sind. Sie werden als Personen älter als 17 Jahre angenommen; eine weitere Altersunterscheidung wird bei ihnen nicht getroffen.

Für Beschäftigte wird eine Arbeits- und daher Expositionszeit von 2000 Stunden jährlich angesetzt. Abweichend davon wird eine kürzere Expositionszeit von nur 200 Stunden im Jahr in dem Szenario „Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses“ angesetzt, da nicht anzunehmen ist, dass ein Arbeiter im Abrissgewerbe ausschließlich mit NORM-Materialien gebaute Häuser abreißt. Zudem werden speziell für den Expositionspfad „Inhalation von Staub“ in den Szenarien „Arbeiten in der Baustoffindustrie“, „Arbeiten in der Düngemittelindustrie“ und „Arbeit in der Deponie“ eine verkürzte Expositionszeit von 50 Stunden im Jahr, allerdings unter Verwendung einer erheblich erhöhten Schwebstaubkonzentration von 10 mg/m^3 („allgemeiner Staubgrenzwert“, vgl. /TRGS 900, 2000/), angenommen, da stark Staub entwickelnde Arbeitsphasen nur einen Teil der Gesamttätigkeit ausmachen. Der Wert von 50 Stunden im Jahr wurde im Rahmen der „Fortentwicklung des radiologischen Modells für die Berechnung von Freigabewerten für die Freigabe zur Beseitigung“ /Thierfeldt und Wörten, 2004/ für das Szenario „Arbeit in der Deponie“ entwickelt und hier generisch zusätzlich auf die beiden weiteren Szenarien übertragen.

Die Formalismen für die Berechnung der Dosiskoeffizienten sind im Detail im Anhang dargestellt.

5.3 Vermischung mit Nicht-NORM-Material

Generell kann bei jeder Weiterverwendung und Deponierung von Rückständen aus NORM-Materialien eine Vermischung mit Nicht-NORM-Material angenommen werden. Dabei sind alle Vermischungsgrade des NORM-Materials mit Nicht-NORM-Materialien von 0 % bis 100 % denkbar. Da es sich bei den hier zu betrachtenden Rückständen aber überwiegend um Schlacken handelt (vgl. Kap. 2) und diese im Straßen-, Wasser- und Gleisbau als sehr hartes und verwitterungsresistentes Material eine Rolle spielen und somit bevorzugt Verwendung finden, wird bei Betrachtung der betreffenden Expositionsszenarien aus Konservativitätsgründen keine Vermischung mit Nicht-NORM-Material unterstellt.

Eine Ausnahme bildet das Szenario „Bau einer Straße“: Für den Beschäftigten im Straßenbau ist zu unterstellen, dass er nicht ausschließlich mit NORM-Material zu tun hat. Der Vergleich der im Teil 1 getroffenen Abschätzung der gesamten Rückstandsmenge aus der Eisen- und Stahlgewinnung, die entsprechend den in Kap. 2 zitierten Verhältnissen nur zu einem Teil in den Straßenbau eingehen, mit der mittleren jährlichen Bauleistung der Jahre 1999 bis 2004 von ca. 5000 km (/Bundestag, 1999/, /Bundestag, 2000/, /Bundestag, 2001/, /Bundestag, 2002/, /Bundestag, 2003/ und /Bundestag, 2004/) erlaubt die Abschätzung eines NORM-Anteils im Straßenbaumaterial von deutlich weniger als 1% (für den betrachteten Zeitraum ca. 0,25%). Hierbei ist eine mittlere Spurbreite von 5 m und ein mittlerer Unterbau von 0,5 m unterstellt. Für die vorliegenden Berechnungen wird ein Vermischungsgrad von 1% als eine konservative Annahme angenommen.

Die NORM-Rückstände, die aus der Weiternutzung ausgeschlossen werden sollen und daher einer Deponie zuzuführen sind, werden meist von nur wenigen Erzeugern verursacht. Es liegt in deren Interesse, die Kosten, die mit der Deponierung verbunden sind, zu minimieren. Daher finden häufig Monodeponien (Deponien, denen nur Material einer Sorte zugeführt wird) Verwendung. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit bei Betrachtung der Expositionsszenarien, die bereits geschlossene Deponien vor Augen haben – es handelt sich dabei um die Szenarien „Wohnen auf einer Deponie“, „Wohnen an einer Deponie“ sowie „Zeitweiliger Aufenthalt auf einer Deponie“ –, keine Vermischung mit Nicht-NORM-Material unterstellt. Dies stellt das abdeckende Szenario dar.

Für das Szenario „Arbeiten in der Deponie“ ist im Fall von Monodeponien für NORM-Materialien aufgrund der heute gültigen Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2001/ für den Beschäftigten keine Exposition zu unterstellen, die eine Verletzung des heute gültigen Grenzwertes von 1 mSv/Jahr nach sich zöge. Dennoch ist daran zu denken, dass NORM-Material, beispielsweise aus dem Abriss von mit NORM-Material gebauten Häusern, in Mischdeponien eingebracht wird. Auch hier wird keine Vermischung mit Nicht-NORM-Material unterstellt. Allerdings wird aufgrund des im Vergleich zur absoluten Jahresmenge geringen Anteils von NORM-Material eine reduzierte Expositionszeit angenommen. Diese liegt entsprechend den bei /Thierfeldt und Wörlen, 2004/ ermittelten Werten bei 50 Stunden im Jahr (vgl. Kap. 5.2).

Anders verhält sich die Situation bei Betrachtung der Expositionsszenarien, die von NORM-Material als Zuschlagstoff in der Bauindustrie sowie in der Düngemittelherstellung ausgehen:

Bei Verwendung von NORM-Material in Form von Schlacken in der Bauindustrie wird im Folgenden der Zuschlag als nichtbindende Komponente zu Beton herangezogen. Im Hausbau ist ein Verhältnis von 1:3 für bindende Komponenten (Zement) und nicht-bindende Komponenten üblich. Da Schlacken aber besonders dicht sind und eine Wand mit entsprechendem Zuschlag besonders schwer wird, wird in der vorliegenden Arbeit für die Expositionsszenarien, die eine Verwendung von NORM-Materialien im Hausbau vorsehen, ein Anteil der NORM-Materialien von 30 % des gesamten Baumaterials unterstellt.

Bei Verwendung von NORM-Material zum Bau von Strukturen im Außenbereich spielt der Bau von Lärmschutzeinrichtungen eine besondere Rolle. Dabei wird gerade die erhöhte Dichte des Schlackenmaterials ausgenutzt. Es wird in den entsprechenden Expositionsszenarien daher ein Anteil der NORM-Materialien von 75 % des gesamten Baumaterials unterstellt.

Bei Verwendung von NORM-Material in der Baustoffherstellung sowie in der Düngemittelindustrie ist der Vermischungsgrad stark vom jeweiligen Einzelfall abhängig. Da aber auch in diesen Szenarien NORM-Material nur als Zuschlag verwendet wird und in jedem Fall noch eine Vielzahl weiterer Materialien eine Rolle spielen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Anteil des NORM-Materials zu 50 % als konservativ betrachtet und die Dosisabschätzungen entsprechend mit dem Faktor 0,5 gewertet.



5.4 Zusammenfassung der in die Dosisberechnung eingehenden Parameter

In Tab. 2 sind für alle berechneten Szenarien Expositionsdauern, Vermischungsgrad mit Nicht-NORM-Material und Schwebstaubkonzentration als einige der wichtigsten Eingangsparameter zusammengefasst dargestellt. Alle weiteren Parameter sind den im Anhang beschriebenen Berechnungsverfahren der einzelnen Expositionspfade zu entnehmen.

Tab. 2: Zusammenfassung einiger wichtiger in die Dosisberechnung eingehender Parameter

Szenario	Expositionsdauer	Vermischungsgrad mit Nicht-NORM-Material	Schwebstaubkonzentration
Straßenbau:			
Wohnen an der Straße (Haus in Massivbauweise)	7000 h (Haus) + 1000 h (Garten)	100% (Keine Vermischung)	$5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Arbeiten auf der Straße	2000 h	100% (Keine Vermischung)	$5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Bau der Straße	2000 h	1%	
Wasserbau:			
Wohnen am Wasserlauf (Haus in Massivbauweise)	7000 h (Haus) + 1000 h (Garten)	100% (Keine Vermischung)	-
Arbeiten am Wasserlauf	2000 h	100% (Keine Vermischung)	-
Gleisbau:			
Wohnen an der Trasse (Haus in Massivbauweise)	7000 h (Haus) + 1000 h (Garten)	100% (Keine Vermischung)	$5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Arbeiten auf/an der Trasse	2000 h	100% (Keine Vermischung)	$5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Nutzung als Zuschlagstoff in der Bauindustrie			
Wohnen in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien	7000 h (Haus) + 1000 h (Garten)	30%	-
Arbeiten in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien	2000 h	30%	-
Wohnen an einer NORM-Materialien bebauten Struktur (Haus in Massivbauweise)	7000 h (Haus) + 1000 h (Garten)	75%	-
Arbeiten an einer NORM-Materialien bebauten Struktur	2000 h	75%	-
Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses	200 h	30%	$1 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$
Arbeiten in der Baustoffindustrie	2000 h; Inh. von Staub: 50 h	50%	$1 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$
Nutzung als Wertstoff in der Düngemittelindustrie			
Verzehr von entsprechend gedüngter Nahrung	-	-	-
Arbeiten in der Düngemittelindustrie	2000 h; Inh. von Staub: 50 h	50%	$1 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$
Zuführen auf eine Deponie:			
Wohnen auf der Deponie (Haus in Massivbauweise)	7000 h (Haus) + 1000 h (Garten)	100% (Keine Vermischung)	$5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Wohnen an der Deponie (Haus in Massivbauweise)	7000 h (Haus) + 1000 h (Garten)	100% (Keine Vermischung)	$5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie	300 h	100% (Keine Vermischung)	$5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Arbeiten in der Deponie	2000 h; Inh. von Staub: 50 h	100%	$1 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$

Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise											
< 1 a	1,3E-03	1,8E-05	2,1E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,4E-03
1 - 2 a	1,2E-03	1,8E-05	3,4E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,2E-03
3 - 7 a	1,2E-03	1,8E-05	3,6E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,2E-03
8 - 12 a	1,2E-03	1,8E-05	4,6E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,2E-03
13 - 17 a	9,9E-04	1,8E-05	5,1E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,1E-03
> 17 a, Gruppe A	9,9E-04	1,8E-05	5,3E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,1E-03
> 17 a, Gruppe B	6,7E-04	1,6E-05	4,1E-05	-	-	-	-	-	-	-	7,2E-04

Thorium-Reihe

Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise											
< 1 a	1,0E-03	-	2,5E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,0E-03
1 - 2 a	8,8E-04	-	3,8E-05	-	-	-	-	-	-	-	9,2E-04
3 - 7 a	8,8E-04	-	4,1E-05	-	-	-	-	-	-	-	9,2E-04
8 - 12 a	8,8E-04	-	4,9E-05	-	-	-	-	-	-	-	9,3E-04
13 - 17 a	7,5E-04	-	5,6E-05	-	-	-	-	-	-	-	8,1E-04
> 17 a, Gruppe A	7,5E-04	-	5,7E-05	-	-	-	-	-	-	-	8,1E-04
> 17 a, Gruppe B	3,1E-04	-	4,4E-05	-	-	-	-	-	-	-	3,5E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise											
< 1 a	1,8E-03	-	2,5E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,9E-03
1 - 2 a	1,6E-03	-	3,8E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,6E-03
3 - 7 a	1,6E-03	-	4,1E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,6E-03
8 - 12 a	1,6E-03	-	4,9E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,7E-03
13 - 17 a	1,4E-03	-	5,6E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,4E-03
> 17 a, Gruppe A	1,4E-03	-	5,7E-05	-	-	-	-	-	-	-	1,4E-03
> 17 a, Gruppe B	9,3E-04	-	4,4E-05	-	-	-	-	-	-	-	9,8E-04

-: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 3 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 4 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, die Jahresdosen für die in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Thorium-Reihe

Beschäftigter	8,9E-04	–	2,2E-05	–	–	–	–	–	–	9,1E-04
----------------------	---------	---	---------	---	---	---	---	---	---	----------------

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 5 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 6 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 6: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an/auf einer mit NORM-Materialien gebauten Straße“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
7,2E-02	1,8E-01	9,0E-01
Thorium-Reihe		
9,1E-02	2,3E-01	1,1E+00

6.1.3 Bau der Straße

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.1 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 7 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 7: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Bau einer Straße mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	1,6E-06	1,4E-07	1,3E-05	–	–	–	–	–	9,6E-08	1,4E-05
Thorium-Reihe										
Beschäftigter	2,2E-06	–	5,5E-07	–	–	–	–	–	5,8E-08	2,8E-06

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 7 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 8 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 8: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Bau einer Straße mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
1,4E-03	3,6E-03	1,8E-02
Thorium-Reihe		
2,8E-04	6,9E-04	3,5E-03

6.2 Nutzung im Wasserbau

6.2.1 Wohnen am Wasserlauf

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.2 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 9 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 9: Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	7,2E-04	1,8E-05	–	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	7,5E-04
1 - 2 a	6,3E-04	1,8E-05	–	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	–	6,7E-04
3 - 7 a	6,3E-04	1,8E-05	–	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	–	6,7E-04
8 - 12 a	6,3E-04	1,8E-05	–	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	–	6,8E-04
13 - 17 a	5,4E-04	1,8E-05	–	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	–	5,9E-04
> 17 a, Gruppe A	5,4E-04	1,8E-05	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	6,0E-04
> 17 a, Gruppe B	2,2E-04	1,6E-05	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	2,8E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,3E-03	1,8E-05	–	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	1,3E-03
1 - 2 a	1,2E-03	1,8E-05	–	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	–	1,2E-03
3 - 7 a	1,2E-03	1,8E-05	–	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	–	1,2E-03

8 - 12 a	1,2E-03	1,8E-05	–	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	–	1,2E-03
13 - 17 a	9,9E-04	1,8E-05	–	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	–	1,0E-03
> 17 a, Gruppe A	9,9E-04	1,8E-05	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	1,0E-03
> 17 a, Gruppe B	6,7E-04	1,6E-05	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	7,3E-04
Thorium-Reihe										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	1,0E-03	–	–	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	–	1,0E-03
1 - 2 a	8,8E-04	–	–	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	–	–	9,0E-04
3 - 7 a	8,8E-04	–	–	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	–	–	9,0E-04
8 - 12 a	8,8E-04	–	–	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	–	–	9,1E-04
13 - 17 a	7,5E-04	–	–	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	–	–	7,8E-04
> 17 a, Gruppe A	7,5E-04	–	–	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	7,9E-04
> 17 a, Gruppe B	3,1E-04	–	–	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	3,5E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,8E-03	–	–	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	–	1,8E-03
1 - 2 a	1,6E-03	–	–	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	–	–	1,6E-03
3 - 7 a	1,6E-03	–	–	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	–	–	1,6E-03
8 - 12 a	1,6E-03	–	–	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	–	–	1,6E-03
13 - 17 a	1,4E-03	–	–	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	–	–	1,4E-03
> 17 a, Gruppe A	1,4E-03	–	–	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	1,4E-03
> 17 a, Gruppe B	9,3E-04	–	–	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	9,7E-04

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 9 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 10 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, die Jahresdosen für die in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 10: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
6,0E-02	1,5E-01	7,5E-01
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,0E-01	2,6E-01	1,3E+00
Thorium-Reihe		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
7,9E-02	2,0E-01	9,9E-01
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,4E-01	3,5E-01	1,8E+00

6.2.2 Arbeiten am Wasserlauf

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.2 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 11 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 11: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direkt ingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	–	5,7E-05	–	–	–	–	–	–	3,8E-05	9,6E-05

Thorium-Reihe

Beschäftigter	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3E-05	2,3E-05
----------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---------	---------

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 11 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 12 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 12: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einem mit NORM-Materialien gebauten Wasserlauf“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
9,6E-03	2,4E-02	1,2E-01
Thorium-Reihe		
2,3E-03	5,8E-03	2,9E-02

6.3 Nutzung im Gleisbau

6.3.1 Wohnen an der Trasse

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.3 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 13 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 13: Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammastrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	7,2E-04	1,8E-05	2,1E-05	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	7,7E-04
1 - 2 a	6,3E-04	1,8E-05	3,4E-05	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	–	7,0E-04
3 - 7 a	6,3E-04	1,8E-05	3,6E-05	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	–	7,1E-04
8 - 12 a	6,3E-04	1,8E-05	4,6E-05	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	–	7,3E-04
13 - 17 a	5,4E-04	1,8E-05	5,1E-05	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	–	6,4E-04
> 17 a, Gruppe A	5,4E-04	1,8E-05	5,3E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	6,6E-04
> 17 a, Gruppe B	2,2E-04	1,6E-05	4,1E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	3,2E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,3E-03	1,8E-05	2,1E-05	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	1,4E-03
1 - 2 a	1,2E-03	1,8E-05	3,4E-05	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	–	1,2E-03
3 - 7 a	1,2E-03	1,8E-05	3,6E-05	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	–	1,2E-03
8 - 12 a	1,2E-03	1,8E-05	4,6E-05	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	–	1,2E-03
13 - 17 a	9,9E-04	1,8E-05	5,1E-05	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	–	1,1E-03
> 17 a, Gruppe A	9,9E-04	1,8E-05	5,3E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	1,1E-03
> 17 a, Gruppe B	6,7E-04	1,6E-05	4,1E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	7,7E-04
Thorium-Reihe										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	1,0E-03	–	2,5E-05	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	–	1,0E-03
1 - 2 a	8,8E-04	–	3,8E-05	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	–	–	9,3E-04
3 - 7 a	8,8E-04	–	4,1E-05	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	–	–	9,4E-04
8 - 12 a	8,8E-04	–	4,9E-05	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	–	–	9,6E-04
13 - 17 a	7,5E-04	–	5,6E-05	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	–	–	8,4E-04

> 17 a, Gruppe A	7,5E-04	–	5,7E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	8,5E-04
> 17 a, Gruppe B	3,1E-04	–	4,4E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	3,9E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,8E-03	–	2,5E-05	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	–	1,9E-03
1 - 2 a	1,6E-03	–	3,8E-05	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	–	–	1,7E-03
3 - 7 a	1,6E-03	–	4,1E-05	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	–	–	1,7E-03
8 - 12 a	1,6E-03	–	4,9E-05	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	–	–	1,7E-03
13 - 17 a	1,4E-03	–	5,6E-05	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	–	–	1,5E-03
> 17 a, Gruppe A	1,4E-03	–	5,7E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	1,5E-03
> 17 a, Gruppe B	9,3E-04	–	4,4E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	1,0E-03

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 13 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 14 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, die Jahresdosen für die in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 14: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
6,6E-02	1,6E-01	8,2E-01
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,1E-01	2,8E-01	1,4E+00
Thorium-Reihe		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
8,5E-02	2,1E-01	1,1E+00
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,5E-01	3,7E-01	1,8E+00

6.3.2 Arbeiten auf/an der Trasse

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.3 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 15 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 15: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten auf/an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	6,4E-04	5,7E-05	2,5E-05	–	–	–	–	–	3,8E-05	7,6E-04
Thorium-Reihe										
Beschäftigter	8,9E-04	–	2,2E-05	–	–	–	–	–	2,3E-05	9,3E-04

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 15 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 16 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 16: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten auf/an einer mit NORM-Materialien gebauten Schienentrasse“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
7,6E-02	1,9E-01	9,5E-01
Thorium-Reihe		
9,3E-02	2,3E-01	1,2E+00

6.4 Nutzung als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie

6.4.1 Wohnen in einem Haus, gebaut mit entsprechenden Baumaterialien

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.4 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 17 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 17: Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direkt ingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
< 1 a	1,8E-03	3,0E-04	–	–	–	–	–	–	–	2,1E-03
1 - 2 a	1,6E-03	3,0E-04	–	–	–	–	–	–	–	1,9E-03
3 - 7 a	1,6E-03	3,0E-04	–	–	–	–	–	–	–	1,9E-03
8 - 12 a	1,6E-03	3,0E-04	–	–	–	–	–	–	–	1,9E-03
13 - 17 a	1,4E-03	3,0E-04	–	–	–	–	–	–	–	1,7E-03
> 17 a, Gruppe A	1,4E-03	3,0E-04	–	–	–	–	–	–	–	1,7E-03
> 17 a, Gruppe B	1,3E-03	3,0E-04	–	–	–	–	–	–	–	1,6E-03
Thorium-Reihe										
< 1 a	2,2E-03	1,3E-05	–	–	–	–	–	–	–	2,2E-03
1 - 2 a	1,9E-03	1,3E-05	–	–	–	–	–	–	–	1,9E-03
3 - 7 a	1,9E-03	1,3E-05	–	–	–	–	–	–	–	1,9E-03
8 - 12 a	1,9E-03	1,3E-05	–	–	–	–	–	–	–	1,9E-03
13 - 17 a	1,6E-03	1,3E-05	–	–	–	–	–	–	–	1,6E-03
> 17 a, Gruppe A	1,6E-03	1,3E-05	–	–	–	–	–	–	–	1,6E-03
> 17 a, Gruppe B	1,6E-03	1,3E-05	–	–	–	–	–	–	–	1,6E-03

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Aus den in Tab. 17 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis

Thorium-Reihe

Beschäftigter	4,5E-04	4,9E-06	-	-	-	-	-	-	-	4,6E-04
----------------------	---------	---------	---	---	---	---	---	---	---	----------------

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 19 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 20 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 20: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
4,9E-02	1,2E-01	6,1E-01
Thorium-Reihe		
4,6E-02	1,1E-01	5,7E-01

6.4.3 Wohnen an einer mit entsprechenden Baumaterialien gebauten Struktur³

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.4 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 21 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

³ Zum Begriff „Struktur“: vgl. Fußnote 2, Kap. 3.4

13 - 17 a	1,4E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	1,4E-04
> 17 a, Gruppe A	1,4E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	1,4E-04
> 17 a, Gruppe B	5,7E-05	9,9E-08	-	-	-	-	-	-	-	5,7E-05
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	3,4E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	3,4E-04
1 - 2 a	3,0E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	3,0E-04
3 - 7 a	3,0E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	3,0E-04
8 - 12 a	3,0E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	3,0E-04
13 - 17 a	2,5E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	2,5E-04
> 17 a, Gruppe A	2,5E-04	1,3E-07	-	-	-	-	-	-	-	2,5E-04
> 17 a, Gruppe B	1,7E-04	9,9E-08	-	-	-	-	-	-	-	1,7E-04

-: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Aus den in Tab. 21 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 22 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, die Jahresdosen für die in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 22: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an einer mit NORM-Materialien gebauten Struktur“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
1,0E-02	2,5E-02	1,3E-01
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,8E-02	4,6E-02	2,3E-01
Thorium-Reihe		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
1,4E-02	3,5E-02	1,7E-01
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
2,5E-02	6,3E-02	3,2E-01

6.4.4 Arbeiten an einer mit entsprechenden Baumaterialien gebauten Struktur⁴

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.4 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 23 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 23: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einer mit NORM-Materialien gebauten Struktur“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	1,2E-05	8,3E-10	–	–	–	–	–	–	–	1,2E-05
Thorium-Reihe										
Beschäftigter	1,6E-05	2,8E-08	–	–	–	–	–	–	–	1,6E-05

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 23 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 24 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

⁴ Zum Begriff „Struktur“: vgl. Fußnote 2, Kap. 3.4

Tab. 24: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten an einer mit NORM-Materialien gebauten Struktur“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
1,2E-03	3,0E-03	1,5E-02
Thorium-Reihe		
1,6E-03	4,1E-03	2,0E-02

6.4.5 Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.4 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 25 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 25: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	3,8E-05	9,6E-07	1,5E-04	–	–	–	–	–	1,1E-06	1,9E-04

Thorium-Reihe

Beschäftigter	4,5E-05	2,0E-05	1,3E-04	–	–	–	–	–	6,9E-07	2,0E-04
----------------------	---------	---------	---------	---	---	---	---	---	---------	----------------

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 25 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 26 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 26: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
1,9E-02	4,8E-02	2,4E-01
Thorium-Reihe		
2,0E-02	5,0E-02	2,5E-01

Bemerkung zur Berechnung des aufgrund des Expositionspfads „Inhalation von Staub“ zu berücksichtigenden Dosisanteils:

Abrissarbeiten sind den stark Staub entwickelnden Arbeiten zuzurechnen. Entsprechend ist hier für die Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis gemäß Anlage A 1.3 als Schwebstaubkonzentration der allgemeine Staubgrenzwert von 10 mg/m³ anzusetzen. Die in der Bundesrepublik gültigen „Technischen Regeln für Gefahrstoffe“ /TRGS 900, 2000/ sehen insbesondere für Abbrucharbeiten noch einen weiteren Grenzwert, speziell für die Feinstaubfraktion, von 6 mg/m³ vor. Laut dem in /Reichelt und Lehmann, 1993/ empirisch ermittelten Verhältnis von Fein- zu Gesamtstaub liegt einer Feinstaubkonzentration von 6 mg/m³ eine Gesamtstaubkonzentration von 60 – 70 mg/m³ zugrunde, was zu einer erheblich höheren mittleren effektiven Jahresdosis führen würde. Da das Regelwerk aber vorsieht, dass stets beide Grenzwerte unabhängig voneinander einzuhalten sind, kommt der Grenzwert der Feinstaubkonzentration im Allgemeinen nicht zum tragen und wird daher hier auch nicht verwendet.

6.4.6 Arbeiten in der Baustoffindustrie

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.4 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 25 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 27: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Baustoffindustrie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	3,8E-04	9,6E-06	3,8E-05	–	–	–	–	–	1,1E-05	4,4E-04
Thorium-Reihe										
Beschäftigter	4,5E-04	2,0E-04	3,3E-05	–	–	–	–	–	6,9E-06	7,0E-04

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 25 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 26 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 28: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Baustoffindustrie“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
4,4E-02	1,1E-01	5,5E-01
Thorium-Reihe		
7,0E-02	1,7E-01	8,7E-01

6.5 Nutzung als Wertstoff in der Düngemittelindustrie

6.5.1 Verzehr von entsprechend gedüngter Nahrung

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.5 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 29 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 29: Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Verzehr von mit NORM-Produkten gedüngten Nahrungsmitteln“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammastrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktiongestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
< 1 a	-	-	-	9,8E-08	6,1E-08	4,9E-06	1,4E-06	9,1E-08	-	6,6E-06
1 - 2 a	-	-	-	8,3E-08	1,6E-07	2,9E-05	2,6E-06	-	-	3,2E-05

3 - 7 a	-	-	-	5,5E-08	6,1E-07	2,9E-05	4,3E-06	-	-	3,4E-05
8 - 12 a	-	-	-	5,7E-08	7,9E-07	4,4E-05	4,9E-06	-	-	5,0E-05
13 - 17 a	-	-	-	8,4E-08	9,7E-07	4,9E-05	5,2E-06	-	-	5,5E-05
> 17 a	-	-	-	1,7E-08	1,1E-06	7,4E-05	4,8E-06	-	-	8,0E-05
Thorium-Reihe										
< 1 a	-	-	-	3,6E-07	1,3E-08	3,2E-07	1,0E-06	5,9E-08	-	1,8E-06
1 - 2 a	-	-	-	1,9E-07	3,3E-08	1,9E-06	1,9E-06	-	-	4,0E-06
3 - 7 a	-	-	-	1,4E-07	1,3E-07	1,9E-06	3,1E-06	-	-	5,2E-06
8 - 12 a	-	-	-	1,7E-07	1,6E-07	2,9E-06	3,5E-06	-	-	6,7E-06
13 - 17 a	-	-	-	2,4E-07	2,0E-07	3,2E-06	3,7E-06	-	-	7,3E-06
> 17 a	-	-	-	2,4E-08	2,3E-07	4,8E-06	3,4E-06	-	-	8,4E-06

-: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 29 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 30 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen die Jahresdosen berechnet.

Tab. 30: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen im Expositionsszenario „Verzehr von mit NORM-Produkten gedüngten Nahrungsmitteln“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
8,0E-03	2,0E-02	9,9E-02
Thorium-Reihe		
8,4E-04	2,1E-03	1,1E-02

6.5.2 Arbeiten in der Düngemittelindustrie

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.5 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 31 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 31: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Düngemittelindustrie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	3,8E-04	9,6E-06	3,8E-05	–	–	–	–	–	1,1E-05	4,4E-04
Thorium-Reihe										
Beschäftigter	4,5E-04	2,0E-04	3,3E-05	–	–	–	–	–	6,9E-06	7,0E-04

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 31 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 32 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 32: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Düngemittelindustrie“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
4,4E-02	1,1E-01	5,5E-01
Thorium-Reihe		
7,0E-02	1,7E-01	8,7E-01

6.6 Zuführen von NORM-Material auf eine Deponie

6.6.1 Wohnen auf der Deponie

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.6 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 33 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 33: Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen auf der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									
	äußerer Gammabestrah- lung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	7,2E-04	1,5E-04	2,1E-05	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	9,0E-04

1 - 2 a	6,3E-04	1,5E-04	3,4E-05	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	1,7E-03	2,5E-03
3 - 7 a	6,3E-04	1,5E-04	3,6E-05	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	4,7E-04	1,3E-03
8 - 12 a	6,3E-04	1,5E-04	4,6E-05	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	7,0E-05	9,3E-04
13 - 17 a	5,4E-04	1,5E-04	5,1E-05	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	6,6E-05	8,4E-04
> 17 a, Gruppe A	5,4E-04	1,5E-04	5,3E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	3,1E-05	8,2E-04
> 17 a, Gruppe B	2,2E-04	1,3E-04	4,1E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	4,4E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,3E-03	1,5E-04	2,1E-05	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	1,5E-03
1 - 2 a	1,2E-03	1,5E-04	3,4E-05	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	1,7E-03	3,0E-03
3 - 7 a	1,2E-03	1,5E-04	3,6E-05	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	4,7E-04	1,8E-03
8 - 12 a	1,2E-03	1,5E-04	4,6E-05	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	7,0E-05	1,4E-03
13 - 17 a	9,9E-04	1,5E-04	5,1E-05	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	6,6E-05	1,3E-03
> 17 a, Gruppe A	9,9E-04	1,5E-04	5,3E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	3,1E-05	1,3E-03
> 17 a, Gruppe B	6,7E-04	1,3E-04	4,1E-05	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	8,8E-04
Thorium-Reihe										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	1,0E-03	–	2,5E-05	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	–	1,0E-03
1 - 2 a	8,8E-04	–	3,8E-05	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	–	6,5E-04	1,6E-03
3 - 7 a	8,8E-04	–	4,1E-05	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	–	2,4E-04	1,2E-03
8 - 12 a	8,8E-04	–	4,9E-05	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	–	5,2E-05	1,0E-03
13 - 17 a	7,5E-04	–	5,6E-05	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	–	6,8E-05	9,1E-04
> 17 a, Gruppe A	7,5E-04	–	5,7E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	1,2E-05	8,6E-04
> 17 a, Gruppe B	3,1E-04	–	4,4E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	3,9E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,8E-03	–	2,5E-05	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	–	1,9E-03
1 - 2 a	1,6E-03	–	3,8E-05	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	–	6,5E-04	2,3E-03
3 - 7 a	1,6E-03	–	4,1E-05	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	–	2,4E-04	1,9E-03
8 - 12 a	1,6E-03	–	4,9E-05	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	–	5,2E-05	1,7E-03
13 - 17 a	1,4E-03	–	5,6E-05	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	–	6,8E-05	1,5E-03
> 17 a, Gruppe A	1,4E-03	–	5,7E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	1,2E-05	1,5E-03
> 17 a, Gruppe B	9,3E-04	–	4,4E-05	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	–	–	1,0E-03

--: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 33 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 34 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, die Jahresdosen für die in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 34: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen auf der Deponie“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
8,2E-02	2,0E-01	1,0E+00
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,3E-01	3,2E-01	1,6E+00
Thorium-Reihe		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
8,6E-02	2,1E-01	1,1E+00
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,5E-01	3,7E-01	1,8E+00

6.6.2 Wohnen an der Deponie

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.6 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 35 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 35: Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Wohnen an der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direkt ingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	7,2E-04	1,8E-04	–	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	9,1E-04
1 - 2 a	6,3E-04	1,8E-04	–	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	–	8,3E-04
3 - 7 a	6,3E-04	1,8E-04	–	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	–	8,3E-04
8 - 12 a	6,3E-04	1,8E-04	–	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	–	8,4E-04
13 - 17 a	5,4E-04	1,8E-04	–	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	–	7,5E-04
> 17 a, Gruppe A	5,4E-04	1,8E-04	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	7,6E-04
> 17 a, Gruppe B	2,2E-04	1,6E-04	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	4,2E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,3E-03	1,8E-04	–	3,9E-07	2,3E-08	2,2E-06	3,1E-06	1,6E-07	–	1,5E-03
1 - 2 a	1,2E-03	1,8E-04	–	3,0E-07	5,9E-08	1,3E-05	5,7E-06	–	–	1,3E-03
3 - 7 a	1,2E-03	1,8E-04	–	2,1E-07	2,3E-07	1,3E-05	9,4E-06	–	–	1,4E-03
8 - 12 a	1,2E-03	1,8E-04	–	2,6E-07	2,9E-07	2,0E-05	1,1E-05	–	–	1,4E-03
13 - 17 a	9,9E-04	1,8E-04	–	4,5E-07	3,6E-07	2,2E-05	1,1E-05	–	–	1,2E-03
> 17 a, Gruppe A	9,9E-04	1,8E-04	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	1,2E-03
> 17 a, Gruppe B	6,7E-04	1,6E-04	–	7,2E-08	4,1E-07	3,3E-05	1,0E-05	–	–	8,7E-04
Thorium-Reihe										
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise										
< 1 a	1,0E-03	–	–	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	–	1,0E-03
1 - 2 a	8,8E-04	–	–	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	–	–	9,0E-04
3 - 7 a	8,8E-04	–	–	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	–	–	9,0E-04
8 - 12 a	8,8E-04	–	–	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	–	–	9,1E-04

13 - 17 a	7,5E-04	-	-	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	-	-	7,8E-04
> 17 a, Gruppe A	7,5E-04	-	-	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	-	-	7,9E-04
> 17 a, Gruppe B	3,1E-04	-	-	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	-	-	3,5E-04
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise										
< 1 a	1,8E-03	-	-	1,5E-06	5,1E-08	1,3E-06	4,1E-06	2,4E-07	-	1,8E-03
1 - 2 a	1,6E-03	-	-	7,7E-07	1,3E-07	7,8E-06	7,6E-06	-	-	1,6E-03
3 - 7 a	1,6E-03	-	-	5,8E-07	5,1E-07	7,8E-06	1,3E-05	-	-	1,6E-03
8 - 12 a	1,6E-03	-	-	7,1E-07	6,7E-07	1,2E-05	1,4E-05	-	-	1,6E-03
13 - 17 a	1,4E-03	-	-	9,7E-07	8,2E-07	1,3E-05	1,5E-05	-	-	1,4E-03
> 17 a, Gruppe A	1,4E-03	-	-	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	-	-	1,4E-03
> 17 a, Gruppe B	9,3E-04	-	-	9,6E-08	9,2E-07	2,0E-05	1,4E-05	-	-	9,7E-04

-: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 35 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 36 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, die Jahresdosen für die in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 36: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an der Deponie“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
7,6E-02	1,9E-01	9,5E-01
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,2E-01	3,0E-01	1,5E+00
Thorium-Reihe		
Wohnen in Haus, gebaut in Massivbauweise		
7,9E-02	2,0E-01	9,9E-01
Wohnen in Haus, gebaut in Leichtbauweise		
1,4E-01	3,5E-01	1,8E+00

6.6.3 Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.6 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 37 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 37: Dosiskoeffizienten im Expositionsszenario „Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktiongestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
< 1 a	1,3E-04	5,6E-06	1,4E-06	–	–	–	–	–	–	1,3E-04
1 - 2 a	1,1E-04	5,6E-06	2,3E-06	–	–	–	–	–	5,1E-04	6,3E-04
3 - 7 a	1,1E-04	5,6E-06	2,4E-06	–	–	–	–	–	1,4E-04	2,6E-04
8 - 12 a	1,1E-04	5,6E-06	3,1E-06	–	–	–	–	–	2,1E-05	1,4E-04
13 - 17 a	9,5E-05	5,6E-06	3,4E-06	–	–	–	–	–	2,0E-05	1,2E-04
> 17 a	9,5E-05	5,6E-06	3,5E-06	–	–	–	–	–	9,2E-06	1,1E-04
Thorium-Reihe										
< 1 a	1,8E-04	–	1,6E-06	–	–	–	–	–	–	1,8E-04
1 - 2 a	1,6E-04	–	2,5E-06	–	–	–	–	–	2,0E-04	3,5E-04
3 - 7 a	1,6E-04	–	2,7E-06	–	–	–	–	–	7,1E-05	2,3E-04
8 - 12 a	1,6E-04	–	3,3E-06	–	–	–	–	–	1,6E-05	1,7E-04
13 - 17 a	1,3E-04	–	3,8E-06	–	–	–	–	–	2,0E-05	1,6E-04
> 17 a,	1,3E-04	–	3,8E-06	–	–	–	–	–	3,5E-06	1,4E-04

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Mit den in Tab. 37 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien für jede Altersklasse die Jahresdosis ableiten. In Tab. 38 sind, exemplarisch für Erwachsene der Personengruppe A, die Jahresdosen für die in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 38: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
1,1E-02	2,8E-02	1,4E-01
Thorium-Reihe		
1,4E-02	3,5E-02	1,8E-01

6.6.4 Arbeiten in der Deponie

Unter Berücksichtigung der in Kap. 3.6 dargestellten Expositionspfade ergeben sich für die verschiedenen Personengruppen und Aktivitätsklassen die in Tab. 39 zusammengefassten Dosiskoeffizienten.

Tab. 39: Dosiskoeffizienten für einen Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Deponie“, Angaben in mSv/(Bq/kg)

Altersklasse	Jahresdosis je spezifische Aktivität aufgrund von									Gesamtsumme der Jahresdosis je spezifische Aktivität
	äußerer Gammaabstrahlung	Inhalation von Rn/RnF	Inhalation von Staub	Ingestion (Milch)	Ingestion (Fleisch)	Ingestion (Fisch)	Ingestion (Pflanzliche Nahrung)	Ingestion (Muttermilch)	Direktingestion von Boden	
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radioaktiven Gleichgewicht										
Beschäftigter	6,4E-04	4,8E-05	1,3E-04	–	–	–	–	–	3,8E-05	8,5E-04
Thorium-Reihe										
Beschäftigter	8,9E-04	–	1,1E-04	–	–	–	–	–	2,3E-05	1,0E-03

–: aus dem entsprechenden Expositionspfad resultiert keine Dosis

Aus den in Tab. 39 dargestellten Dosiskoeffizienten lässt sich aus der Kenntnis der massenbezogenen Aktivitäten in den verwendeten NORM-Materialien die Jahresdosis ableiten. In Tab. 40 sind die Jahresdosen für einen Beschäftigten entsprechend der in Kap. 4 definierten Aktivitätsklassen berechnet.

Tab. 40: Mittlere effektive Jahresdosis eines Beschäftigten im Expositionsszenario „Arbeiten in der Deponie“, Angaben in mSv

Aktivitätsklasse 1	Aktivitätsklasse 2	Aktivitätsklasse 3
Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe im radiologischen Gleichgewicht		
8,5E-02	2,1E-01	1,1E+00
Thorium-Reihe		
1,0E-01	2,6E-01	1,3E+00

Bemerkung zur Berechnung des aufgrund des Expositionspfads „Inhalation von Staub“ zu berücksichtigenden Dosisanteils:

Bei der Einlagerung von Deponiematerial kommt es in erster Linie zu einer erhöhten Staubkonzentration beim Abladen und Verfestigen. Wie in Anlage A 1.3 erläutert, wird hierbei die maximale Arbeitsplatzkonzentration von 10 mg m^{-3} nach TRGS 900 /TRGS 900, 2000/ angesetzt. Als Expositionszeit werden dabei 50 Stunden im Jahr herangezogen (Begründung: siehe Kap. 5.2). Die Annahme der maximalen Arbeitsplatzkonzentration wird als konservativ betrachtet, da Messungen an verschiedenen Punkten einer Deponie nur eine mittlere Schwebstaubkonzentration von $0,5 \text{ mg m}^{-3}$ erbrachten /Thierfeldt und Wörlen, 2004/. Diese Messungen wurden an mehreren, über die Deponie verteilten Punkten gemacht, wobei die Messorte nicht notwendigerweise als Orte großer Staubentwicklung oder als Orte erhöhter Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Beschäftigten zu charakterisieren sind. Aus diesem Grund stellt der Wert von $0,5 \text{ mg m}^{-3}$ einen Mittelwert über die gesamte Deponie dar und es muss mit einer Expositionszeit von 2000 Stunden im Jahr gerechnet werden.

Eine mit diesen Parametern durchgeführte Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis führt für einen Beschäftigten im Fall der Aktivitätsklasse 1 zu einer Jahresdosis von 0,1 mSv, im Fall der Aktivitätsklasse 2 zu einer Jahresdosis von 0,26 mSv und im Fall der Aktivitätsklasse 3 zu einer Jahresdosis von 1,3 mSv (aufgrund der Uran-Reihen), bzw. zu 0,12 mSv, 0,29 mSv und 1,5 mSv (aufgrund der Thorium-Reihe). Diese Werte werden aber als unrealistisch hoch erachtet, da im vorliegenden Fall von einer Mischdeponie auszugehen ist und somit der Schwebstaub an nicht jedem beliebigen Punkt der Deponie durch einen NORM-Anteil geprägt ist.

7. Szenario „Wohnen an der Deponie“: Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A unter Verwendung von realen Deponie-Messwerten

Im Rahmen der Bearbeitung des Teils 4 der vorliegenden Studie wurden als Industriezweige, bei denen NORM-Materialien als Rückstände anfallen, die Gewinnung von Steinkohle sowie die Aufbereitung von Rohphosphaten untersucht. In beiden Fällen fallen Rückstände an, die in der Regel auf Monodeponien verbracht werden. Im Folgenden wird die Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis für das Szenario „Wohnen an der Deponie“ unter Zuhilfenahme der im Rahmen der Teile 4a gemessenen spezifischen Aktivität bzw. von Literaturwerten dargestellt.

7.1 Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A für Aktivitätsmesswerte von Halden für Rückstände aus der Steinkohle-Gewinnung

Im Teil 4a der vorliegenden Studie wurden die spezifische Aktivität von Proben aus verschiedenen Halden gemessen und ausgewertet. Die Messwerte der gemittelten Aktivitäten jeweils auf die Uran-Radium- bzw. Thorium-Reihe bezogen, sowie die unter Verwendung der in Tab. 35 dargestellten Dosiskoeffizienten sich ergebenden mittleren effektiven Jahresdosen für Erwachsene der Personengruppe A sind in der Tab. 41 dargestellt.

Tab. 41: Mittlere effektive Jahresdosis eines Erwachsenen der Personengruppe A im Expositionsszenario „Wohnen an der Deponie“ unter Verwendung realer Messwerte, Angaben in mSv

Halden-Standort	Mittelwert der massenbezogenen Aktivität [Bq/kg]		Mittlere effektive Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A [mSv]
	Uran-Radium-Reihe	Thorium-Reihe	
Ruhrgebiet: Halde Rungenberg	42	56	7,6E-02
Oberbayern: Peißenberg, Halde 3	264	24	2,2E-01
Oberbayern: Peißenberg, Halde 4	312	22	2,5E-01
Oberbayern: Penzberg, Halde 2	190	28	1,7E-01
Oberbayern: Marienstein, Halde	386	33	3,2E-01
Oberfranken: Stockheim, St. Katharina	1390	47	1,1E+00
Oberfranken: Reitsch, König Ludwig	3801	72	3,0E+00
Thüringen: Neuhaus, Minna	295	49	2,6E-01
Oberpfalz: Erbdorf, Halde 1	59	56	8,9E-02
Oberpfalz: Erbdorf, Halde 5	51	38	6,9E-02

7.2 Berechnung der mittleren effektiven Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A für Aktivitätsmesswerte von Halden für Rückstände aus der Aufbereitung von Rohphosphat

Im Fall der Aufbereitung von Rohphosphaten treten quantitativ erheblich zwei Rückstandsarten auf, die zu einer Haldenbildung führen: Phosphatgips und Calciumcarbonat-Schlacke. Im Rahmen der vorliegenden Studie konnten dazu keine eigenen Messungen angefertigt werden. Aus Literaturwerten (vgl. Vorliegende Studie, Teil 3b) können jedoch mittlere effektive Jahresdosen abgeschätzt werden:

Fall 1: Monodeponien Phosphatgips:

Der Vergleich der Literaturwerte zeigt, dass für die Uran-Radium-Reihe die Messwerte der spezifischen Aktivität im Mittel bei ca. 500 Bq/kg liegen, wohingegen die Werte für die Thorium-Reihe bei ca. 10 Bq/kg liegen. Es ergibt sich mithin für Erwachsene der Personengruppe A eine

mittlere effektive Jahresdosis von 0,39 mSv. Eine Berechnung, bei der das Szenario „Wohnen auf der Deponie“ zugrunde gelegt wird, ergibt für Erwachsene der Personengruppe A eine mittlere effektive Jahresdosis von 0,42 mSv.

Eine derartige Situation liegt tatsächlich in der Nähe einer Düngemittelproduktion in Holland vor: Dort wurde der anfallende Phosphatgips in einen Fluss entsorgt und später kontaminierte Ablagerungen sowie Aushub aus dem Mündungsbereich des Flusses als Aufschüttung einer Landfläche verwendet, die in der Folge bebaut wurde /Lembrechts, 1997/. In der Literatur /Lembrechts, 1997/ ist eine Reihe von Dosisabschätzungen für diese konkrete Situation beschrieben. Diesen zufolge wird – je nach angenommenen Rahmenparametern – für dort Wohnende eine mittlere effektive Jahresdosis von ca. 1 mSv bis hin zu 6 mSv abgeschätzt. Vor diesem Hintergrund zeigt sich die vorliegende Abschätzung als konservativ.

Fall 2: Monodeponien Calciumcarbonat-Schlacke:

Der Vergleich der Literaturwerte zeigt, dass für die Uran-Radium-Reihe die Messwerte der spezifischen Aktivität erheblich mehr streuen als im Fall der Phosphatgips-Monodeponien, jedoch in der Regel einen Wert von 1500 Bq/kg nicht überschreiten. Die Werte für die Thorium-Reihe liegen bei ca. 10 Bq/kg. Es ergibt sich mithin für Erwachsene der Personengruppe A eine mittlere effektive Jahresdosis von 1,2 mSv.

8. Diskussion der Ergebnisse

8.1 Überprüfung der Berechnungsgrundlagen

Um die radiologische Bewertung zu validieren, wäre es wünschenswert, die gerechneten Werte durch Messungen in entsprechenden realen Szenarien zu bestätigen. Dies war im Rahmen der vorliegenden Studie nur bedingt möglich, da für die meisten angenommenen Szenarien keine reale Entsprechung bekannt ist.

Um dennoch eine Validierung zu erreichen, wurde für die Szenarien „Straßenbau“ Ortsdosisleistung mit redundanten Verfahren ermittelt und mit den Ergebnissen aus den in Kap. 6.1.1 und 6.1.2 ermittelten Berechnungen verglichen.

Szenarien, für die reale Entsprechungen bekannt sind, stellen die Szenarien „Zuführen auf eine Deponie“ dar. In den Teilen 3 und 4 der vorliegenden Studie werden Halden aus dem Steinkohlebergbau und der Rohphosphatverarbeitung untersucht. Die im Zuge dieser Untersuchung gemachten Messungen werden im Folgenden mit den vorstehend gemachten Berechnungen verglichen.

8.1.1 Berechnung der Ortsdosisleistung für die Szenarien „Straßenbau“ mittels einer Monte-Carlo-Simulation

Bei der im Wesentlichen in dieser Studie verwendeten Berechnungsgrundlage handelt es sich um die „Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität“, die sog. „Berechnungsgrundlage Bergbau“ /SSK, 1999/. Das Expositionsszenario, das ihrer Entwicklung zugrunde gelegt wurde, ist eine bergbauliche Halde, in der Material mit erhöhter natürlicher Radioaktivität gelagert wird und in deren unmittelbarer Nähe Personen über eine Vielzahl von Expositionspfaden exponiert werden. Diese Eigenschaft prädestiniert die Berechnungsgrundlage Bergbau für die Anwendung in allen in dieser Studie berechneten Halden- und Deponieszenarien. Ihre Anwendbarkeit in den Szenarien „Straßenbau“,

„Wasserbau“ und „Gleisbau“, in denen sie in der vorliegenden Studie auch noch angewandt wird, ist jedoch nicht offensichtlich und sollte daher durch redundante Verfahren überprüft werden.

Da der dosisbestimmende Expositionspfad in den genannten Szenarien in fast allen Fällen die äußere Gammabestrahlung ist, wurde dieser über ein weiteres Verfahren berechnet. Bei dem verwendeten Verfahren handelt es sich um die Monte-Carlo-Simulation von Photonenspuren, deren Absorption und damit einhergehende Energiedeponierung in Materie. Als Rechenprogramm wurde für diese Simulation „MCNP 4“ herangezogen.

Für die Simulation wurde stellvertretend das Szenario „Straßenbau“ gewählt. Die zugrundeliegte Straße wird als 10 m breit angenommen, wobei sie über einen dichten Straßenbelag von 10 cm Dicke und einen Straßenunterbau von 50 cm verfügt. Die verwendete Geometrie ist in Abb. 1 dargestellt.

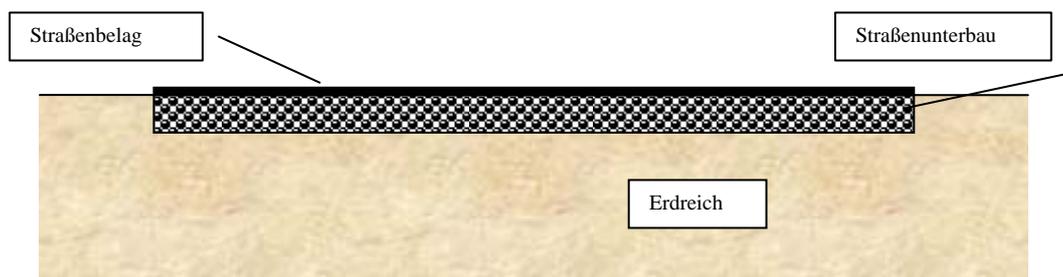


Abb. 1: Modell für die Berechnung der Ortsdosisleistung, die von einer Straße herrührt, in deren Straßenbelag oder in deren Straßenunterbau NORM-Material Verwendung findet

Bei der Simulation wurden unterschiedliche Fälle betrachtet: Das NORM-Material kann einerseits im Straßenbelag miteingebaut sein oder andererseits im Unterbau Verwendung finden. Als Aufpunkt, an dem die Dosisleistung zu ermitteln ist, wurde ein Punkt in 1 m Höhe, 20 m von der Straße entfernt gewählt. Dies entspricht den Annahmen, die in der Berechnungsgrundlage Bergbau getroffen sind.

Das Vergleichsergebnis aus der Berechnungsgrundlage Bergbau ergibt sich aus der Berechnung des Expositionspfades „äußere Gammabestrahlung“ im Szenario „Wohnen an der Straße“ (vgl.

Kap. 6.1), wobei nur eine Situation außer Haus herangezogen wird. Der Wert beträgt bezogen auf die Stunde $3,2 \cdot 10^{-7} \frac{mSv/h}{Bq/kg}$.

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation sind in Tab. 42 dargestellt.

Tab. 42: Vergleich der mittels Monte-Carlo-Simulation gewonnenen Ergebnisse der durch äußere Gammabestrahlung erfolgte Exposition mit dem Ergebnis aus der Berechnungsgrundlage Bergbau für die Szenarien „Straßenbau“

Monte-Carlo-Simulation		Vergleichsergebnis mittels Berechnungsgrundlage Bergbau
NORM im Straßenbelag	NORM im Unterbau	
$2,5 \cdot 10^{-7} \frac{mSv/h}{Bq/kg}$	$6,7 \cdot 10^{-7} \frac{mSv/h}{Bq/kg}$	$3,2 \cdot 10^{-7} \frac{mSv/h}{Bq/kg}$

Das Ergebnis zeigt, dass die Berechnungsgrundlage Bergbau selbst für Szenarien, die nur noch als entfernt haldenähnlich zu betrachten sind – Darstellung einer Straßen als eine geringmächtige, schmale, lang gestreckte Halde –, noch gute Ergebnisse liefert.

8.1.2 Vergleich des berechneten Dosisleistungsbeitrags der äußeren Gammabestrahlung mit der gemessenen Ortsdosisleistung für die untersuchten Halden des Steinkohlebergbaus

Im Rahmen von Untersuchungen zu realen, in der Bundesrepublik befindlichen Halden aus dem Steinkohlebergbau – detaillierte Erläuterungen zu diesen Untersuchungen finden sich in Teil 4 der vorliegenden Studie – wurde die Ortsdosisleistung auf den untersuchten Halden gemessen. Die Ergebnisse sind in Tab. 43 dargestellt.

Tab. 43: Vergleich der Messwerte mit dem errechneten Wert bzgl. des Dosisbeitrags der mittleren effektiven Jahresdosis je Bq/kg

Halden-Standort	Mittelwert der Ortsdosisleistung [nSv/h]	Mittelwert der massenbezogenen Aktivität [Bq/kg]	Mittlere effektive Jahresdosis je Bq/kg [10 ⁻⁴ mSv/(Bq/kg)]	Mittlere effektive Jahresdosis je Bq/kg [10 ⁻⁴ mSv/(Bq/kg)]
	Messung			Berechnung
Ruhrgebiet: Halde Rungenberg	25	40	6,25	5,40
Oberbayern: Peißenberg, Halde 3	67	270	2,48	
Oberbayern: Peißenberg, Halde 4	54	343	1,57	
Oberbayern: Penzberg, Halde 2	53	193	2,75	
Oberbayern: Marienstein, Halde	92	368	2,50	
Oberfranken: Stockheim, St. Katharina	103	1060	0,97	
Oberfranken: Reitsch, König Ludwig	140	3825	0,37	
Thüringen: Neuhaus, Minna	65	337	1,93	
Oberpfalz: Erbendorf, Halde 1	56	49	11,40	
Oberpfalz: Erbendorf, Halde 5	22	39	5,64	

Der Vergleich zeigt eine hohe Übereinstimmung der gemessenen Werte zeigt eine hohe Übereinstimmung mit dem errechneten Werten. Allein der Wert für den Haldenstandort Reitsch, König Ludwig in Oberfranken zeigt einen etwas zu geringen Wert auf. Dieser lässt sich aufgrund der sehr inhomogenen Messwerte der massenbezogenen Aktivität erklären. Diese lassen darauf schließen, dass die Halde vergleichsweise uneinheitlich und die Anzahl an Messproben nicht repräsentativ ist.

Die abgesehen von diesem Wert hohe Übereinstimmung zeigt die hohe Relevanz der Dosisberechnung auf.

Eine Untersuchung weiterer dosisrelevanter Größen wie beispielsweise der Uran- und Thoriumgehalt des Grundwassers oder dort angebaute Feldfrüchte, der Uran- und Thoriumgehalt dort

produzierten Fleisches oder von Milch, u. s. w. war im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich.

8.2 Vergleich mit weiteren Studien

Die radiologische Bewertung von Rückständen aus mit NORM-Material war bereits früher Gegenstand von Studien, wobei allerdings in der vorliegenden Arbeit der Hauptaugenmerk auf Hinterlassenschaften aus früherer Tätigkeit gerichtet ist. In Teilen vergleichbare Ergebnisse lieferte die 1999 veröffentlichten Studie „Ableitung von Überwachungsgrenzen für Reststoffe mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radioaktivität“ /Barthel et al., 1999/. In beiden Studien vergleichbare Szenarien sind „Wohnen an der Straße“, „Bau einer Straße“, „Wohnen in einem mit NORM-Material gebauten Haus“, „Wohnen auf einer Deponie“ und „Arbeiten auf einer Deponie“. Die Ergebnisse sind in Tab. 44 zusammengestellt.

Tab. 44: Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Studie mit vergleichbaren Ergebnissen aus der Studie „Ableitung von Überwachungsgrenzen für Reststoffe mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radioaktivität“ /Barthel et al., 1999/; Vergleichsgröße: Jahresdosis je spezifische Aktivität für Erwachsene (Personengruppe A) bzw. für Beschäftigte

Szenario	Ergebnis	
	Vorliegende Studie	Barthel et al., 1999
	Jahresdosis [10^{-3} mSv/(Bq/kg)]	
Straßenbau:		
Wohnen an der Straße (Haus in Massivbauweise)	U: 0,61 Th: 0,81	U: 0,511 Th: 0,005
Bau der Straße	U: 0,014 Th: 0,003	U: 0,507 Th: 0,653
Nutzung als Zuschlagstoff in der Bauindustrie		
Wohnen in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien	U: 1,7 Th: 1,6	U: 1,769 Th: 1,683
Zuführen auf eine Deponie:		
Wohnen auf der Deponie (Haus in Massivbauweise)	U: 0,82 Th: 0,86	U: 0,631 Th: 0,150
Arbeiten in der Deponie	U: 0,85 Th: 1,0	U: 0,716 Th: 0,940

Der Vergleich zeigt, dass sich die Ergebnisse in der Summe der Einzeldosen aus allen Expositionspfaden im Wesentlichen gleichen. Ein signifikanter Unterschied ergibt sich lediglich beim Szenario „Bau einer Straße“. Hier wurde im Unterschied zur Studie /Barthel et al., 1999/ in der vorliegenden Studie berücksichtigt, dass nur ein kleiner Teil des im Straßenbau benötigten Materials aus NORM-Rückständen sein kann und somit ein Beschäftigter nur einen kleinen Teil des Jahres exponiert ist. Diese Überlegungen fanden ihren Niederschlag im Vermischungsgrad (vgl. Kap. 5.3).

Eine detailliertere Betrachtung des Ergebnisses des Szenarios „Wohnen an der Straße“ zeigt, dass sich die Dosisbeiträge der einzelnen Expositionspfade gänzlich anders zusammensetzen. Dies liegt an einer grundsätzlich anderen Modelvorstellung: Während in der Studie /Barthel et al., 1999/ eine unabgedeckte Straße zugrunde gelegt wird, wird in der vorliegenden Studie eine abgedeckte (i. d. R. asphaltierte) Straße angenommen. Dies führt dazu, dass der Grundwasserpfad für die Exposition entfällt und die äußere Gammabestrahlung den dosisbestimmenden Pfad darstellt. Das Szenario der abgedeckten Straße wird als das für bundesdeutsche Gegebenheiten bestimmende Szenario gehalten.

Die gegenüber /Barthel et al., 1999/ generell geringfügig höheren Werte in der vorliegenden Studie im Szenario „Wohnen in einem mit NORM-Materialien gebauten Haus“ liegen zum Teil an einer grundsätzlich unterschiedlichen Gewichtung der Dosisbeiträge der einzelnen Expositionspfade. Den dosisbestimmenden Beitrag liefert bei /Barthel et al., 1999/ der Grundwasserpfad. Dies setzt einen Hausbrunnen voraus, was in der vorliegenden Studie für bundesdeutsche Gegebenheiten als ein Szenario mit untergeordneter Bedeutung angesehen wird. Die bei Weitem überwiegende Mehrzahl von 99 % der deutschen Haushalte ist an eine öffentliche Wasserversorgung angeschlossen /BGW, 2001/.

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen der durch die Novellierung der Strahlenschutzverordnung neu in Kraft getretenen Regelungen wurden Überwachungsgrenzen für die Deponierung bzw. Weiterverwertung von Rückständen mit natürlichen Radionukliden aus definierten Industriezweigen festgelegt. Da es vor der Einführung der novellierten Strahlenschutzverordnung keine entsprechende Regelung gab, ist aufgrund der Deponierung bzw. Weiterverwertung von Rückständen aus der Zeit vor 2001 mit z. T. nennenswerten Strahlenexpositionen von Beschäftigten und Personen der allgemeinen Bevölkerung zu rechnen.

Um das gesundheitliche Risiko der Exponierten abzuschätzen, ist die resultierende Exposition zu ermitteln. Eine Grundlage für diese Ermittlung zu schaffen, war Absicht der vorliegenden Arbeit.

Dazu wurde festgestellt, zu welchem Anteil Rückstände, in denen sich natürliche Radionuklide anreichern, einer weiteren Verwertung zugeführt oder durch Beseitigung aus dem Stoffkreislauf ausgegliedert werden. Es zeigte sich, dass bei der Gewinnung von Metallen aus Erzen als Rückstand überwiegend Schlacken anfallen. Diese finden weitere Verwendung vor allem im Straßen-, Wasser- und Gleisbau, zu einem geringeren Anteil werden sie als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie oder als Wertstoff in der Düngemittelindustrie genutzt. Rückstände, die keiner Weiternutzung mehr zugeführt werden können, werden schließlich deponiert.

Für alle Szenarien wurde für unterschiedliche Personengruppen – Beschäftigte einerseits und Erwachsene und Kinder der Allgemeinbevölkerung andererseits – die jährliche Strahlenexposition errechnet und tabellarisch angegeben. Zusammenfassend für alle betrachteten Szenarien ist in Tab. 45 für Erwachsene der Personengruppe A bzw. für Beschäftigte die jährliche Strahlendosis, wie sie aus der Uran-Radium- und Uran-Actinium-Reihe einerseits und der Thorium-Reihe andererseits resultiert, dargestellt. Dabei wird eine spezifische Aktivität der Aktivitätsklasse 2 angesetzt, da dies als der im Allgemeinen wahrscheinlichste Fall anzunehmen ist (vgl. Kap. 4).

Tab. 45: Effektive Jahresdosis für Erwachsene der Personengruppe A bzw. für Beschäftigte bei Annahme der Aktivitätsklasse 2 (0,2 – 1 Bq/g), Angaben in mSv

Szenario	Jahresdosis [mSv]		Referenzkapitel in dieser Arbeit
	U	Th	
Straßenbau:			
Wohnen an der Straße (Haus in Massivbauweise)	0,15	0,2	Kap. 6.1.1
Arbeiten auf der Straße	0,18	0,23	Kap. 6.1.2
Bau der Straße	0,0036	0,00069	Kap. 6.1.3
Wasserbau:			
Wohnen am Wasserlauf (Haus in Massivbauweise)	0,15	0,2	Kap. 6.2.1
Arbeiten am Wasserlauf	0,024	0,0058	Kap. 6.2.2
Gleisbau:			
Wohnen an der Trasse (Haus in Massivbauweise)	0,16	0,21	Kap. 6.3.1
Arbeiten auf/an der Trasse	0,19	0,23	Kap. 6.3.2
Nutzung als Zuschlagstoff in der Bauindustrie			
Wohnen in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien	0,41	0,41	Kap. 6.4.1
Arbeiten in einem Haus, gebaut mit NORM-Materialien	0,12	0,11	Kap. 6.4.2
Wohnen an einer NORM-Materialien bebauten Struktur (Haus in Massivbauweise)	0,025	0,035	Kap. 6.4.3
Arbeiten an einer NORM-Materialien bebauten Struktur	0,003	0,0041	Kap. 6.4.4
Abriss eines mit NORM-Materialien gebauten Hauses	0,048	0,0052	Kap. 6.4.5
Arbeiten in der Baustoffindustrie	0,11	0,17	Kap. 6.4.6
Nutzung als Wertstoff in der Düngemittelindustrie			
Verzehr von entsprechend gedüngter Nahrung	0,02	0,0021	Kap. 6.5.1
Arbeiten in der Düngemittelindustrie	0,11	0,17	Kap. 6.5.2
Zuführen auf eine Deponie:			
Wohnen auf der Deponie (Haus in Massivbauweise)	0,2	0,21	Kap. 6.6.1
Wohnen an der Deponie (Haus in Massivbauweise)	0,19	0,2	Kap. 6.6.2
Zeitweiliger Aufenthalt auf der Deponie	0,028	0,035	Kap. 6.6.3
Arbeiten in der Deponie	0,21	0,26	Kap. 6.6.4

9.2 Ausblick

Die Werte in Tab. 45 zeigen für eine Reihe von Expositionsszenarien, dass insgesamt, d. h. bei Berücksichtigung der Exposition aus der Uran-Radium- und der Uran-Actinium-Reihe einerseits und der Thorium-Reihe andererseits, Werte im Bereich des Schutzzieles der Strahlenschutzverordnung für die allgemeine Bevölkerung von 1 mSv im Jahr auftreten können. Allerdings musste in der vorliegenden Studie aufgrund ihres generalisierten Ansatzes bei der Berechnung dieser Werte eine Vielzahl von Annahmen getroffen werden.

Zusätzlich zu den getroffenen Annahmen stellt die überwiegende Verwendung der Berechnungsgrundlage Bergbau /SSK, 1999/ eine gewisse Einschränkung dar, da diese für die Berechnung von Strahlenexpositionen durch Halden aus dem Bergbau entwickelt wurde. Das hierbei betrachtete Material wurde entgegen dem in der vorliegenden Arbeit zu betrachtenden Material nicht chemisch/technisch verändert, wodurch die Annahme des Vorliegens des radioaktiven Gleichgewichts durchaus berechtigt ist. Da hier aber überwiegend Schlacken zu betrachten sind, bei deren Entstehung ein Teil der Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen zu einem hohen Anteil abgetrennt wurde, sind die Voraussetzungen für die Annahme von radioaktivem Gleichgewicht nicht mehr gegeben. Dieses hier dennoch anzunehmen, stellt eine Einschränkung der Aussagekraft der ermittelten Dosiswerte dar, kann aber als eine konservative Annahme betrachtet werden.

In einer Weiterführung der Arbeit wäre mithin zu prüfen, in welchem Umfang die betrachteten Expositionsszenarien in der Bundesrepublik Deutschland tatsächlich auftreten. Konkrete Expositionsparameter sind dazu zu eruieren und mit den in der vorliegenden Arbeit getroffenen Annahmen zu vergleichen.

Trotz der genannten Einschränkungen bietet diese Arbeit eine Grundlage zur Abschätzung der potentiellen Strahlenexposition infolge der Nutzung bzw. Beseitigung von Rückständen aus der Gewinnung von Metallen und zur Bewertung des Strahlenrisikos für verschiedene Bevölkerungsgruppen.

10. Literatur

- Barthel et al., 1999:** Barthel, R., Goldammer, W., Kisting, S., Kugeler, E., Nüsser, A., Thierfeldt, S.: Ableitung von Überwachungsgrenzen für Reststoffe mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radioaktivität, Studie, erstellt für das Bundesministerium für Umwelt, Brenk Systemplanung
- BGW, 2001:** BGW-Stellungnahme: Wasserver- und Abwasserentsorgung erfüllt ökologische Anforderungen, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft,
<http://www.bgw.de/de/trinkwasser/wasserpreise/stellungnahme-20010319-anlage1.html>
- Bruch et al., 1995:** Bruch, W., Gohlke, D., Kögler, C., Krüger, J., Reuter, M., von Röpenack, I., Rombach, E., Rombach, G., Winkler, P.: Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung, METALL Hefte 4-6
- Bundestag, 1999:** Straßenbaubericht 1999, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 14/2488 des Deutschen Bundestags
- Bundestag, 2000:** Straßenbaubericht 2000, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 14/5064 des Deutschen Bundestags
- Bundestag, 2001:** Straßenbaubericht 2001, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 14/8754 des Deutschen Bundestags
- Bundestag, 2002:** Straßenbaubericht 2002, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 15/265 des Deutschen Bundestags

Bundestag, 2003: Straßenbaubericht 2003, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 15/2456 des Deutschen Bundestags

Bundestag, 2004: Straßenbaubericht 2004, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 15/4609 des Deutschen Bundestags

DKI, 1995: Kupfer – Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung, Informationsdruck des Deutschen Kupferinstituts, Am Bonneshof 5, 40474 Düsseldorf

Gellermann et al., 2003: Gellermann, R., Schulz, H., Küppers, C.: Mengenaufkommen an NORM-Rückständen für das deutsche Entsorgungskonzept, Studie, erstellt für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, HGN Hydrogeologie GmbH

ICRU (1994): Gamma-Ray Spectrometry in the Environment, ICRU Report 53, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, USA

Lange und Benke, 2005: Lange, G., Benke, M.: Richtwerte für die Grünlanddüngung 2005, Landwirtschaftskammer Hannover,
<http://www.lwk-hannover.de/index.cfm/startid/571/doc/5172/cfid/1662379/cftoken/50419342.html>

Lembrechts, 1997: Lembrechts, J.: Emissions of Radionuclides by the Dutch Phosphate Industry - A Review of the Fluctuations in the Estimated Risks, International Symposium on Radiological Problems in the Non-nuclear Industry, Amsterdam, September 1997

Reich, 1990: Dosimetrie ionisierender Strahlung, B.G.Teubner Verlag, Stuttgart

Reichelt und Lehmann, 1993: Reichelt, A., Lehmann, K.-H.: Anthropogene Stoffe und Produkte mit natürlichen Radionukliden, Teil 2: Untersuchungen zur Strahlenexposition beim beruflichen Umgang, Studie, erstellt für das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, TÜV Bayern Sachsen

StrlSchV 2001: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001, § 3, §§ 97 - 102

SSK, 1999: Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität, Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Thierfeldt und Wörten, 2004: Thierfeldt, S., Wörten, S.: Fortentwicklung des radiologischen Modells für die Berechnung von Freigabewerten für die Freigabe zur Beseitigung, Studie, erstellt für das Bundesministerium für Umwelt, Brenk Systemplanung

TRGS 900, 2000: Technische Regeln für Gefahrstoffe, Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz „Luftgrenzwerte“, Ausgabe Oktober 2000, Bundesarbeitsblatt BArbBl. Heft 10/2000

TRGS 901, 2001: Begründungen und Erläuterungen zu Grenzwerten in der Luft am Arbeitsplatz, Ausgabe September 2001, Bundesarbeitsblatt BArbBl. Heft 9/2001

Winnacker und Küchler, 1986: Winnacker, K., Küchler, L.: Chemische Technologie, Bd. 4: Metalle, Carl Hanser Verlag, München und Wien

Anhang: Verfahren zur Berechnung der Strahlenexposition

Die Berechnung der Strahlenexposition folgte entsprechend den Vorgaben des Auftraggebers weitgehend der von BMU und BfS entwickelten „Berechnungsgrundlage zu Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität“, kurz „Berechnungsgrundlage Bergbau“, in Form der 1999 von der SSK herausgegebenen Empfehlung /SSK, 1999/. Für Szenarien, die nicht näherungsweise den in der Berechnungsgrundlage Bergbau unterstellten Voraussetzungen entsprechen, wurden zusätzliche Berechnungsverfahren herangezogen. Diese wurden der Studie „Ableitung von Überwachungsgrenzen für Reststoffe mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radioaktivität“ /Barthel et al., 1999/ entnommen und für den jeweils gegebenen Fall angepasst.

Im Folgenden werden die Berechnungsverfahren im Einzelnen detailliert aufgeführt.

A 1. Berechnung der Strahlenexposition mit Hilfe der Berechnungsgrundlage Bergbau

Die Berechnungsgrundlage Bergbau konnte in den Fällen angewandt werden, deren Expositionsszenario von einer Verteilung der Strahlungsquellen ausging, die – z. T. auch nur sehr entfernt – einer Haldensituation vergleichbar ist. Dies ist jeweils dann gegeben, wenn der Strahlungskörper als ein dreidimensionales, aber flaches Gebilde sich weitestgehend unberührt in der Umgebung der Personengruppe befindet, für die eine Strahlendosis zu berechnen ist.

Derartige Situationen sind gegeben, wenn NORM-haltiges Material im Straßen-, Wasser- und Gleisbau verwendet oder einer Deponie zugeführt wird. Keine Anwendung findet die Berechnungsgrundlage Bergbau bei Verwendung von NORM-haltigem Material als Zuschlagsstoff in der Bau- oder Düngemittelindustrie.

A 1.1. Äußere Gammabestahlung

In der Berechnungsgrundlage Bergbau wird dem Beitrag zur Gesamtdosis durch äußere Gammabestahlung durch die Beziehung

$$H_{E,j} = f_{Kon,j} \sum_s C_{Bo,s} g_{ext} t_{Exp,j,s} a_{x,s}$$

Rechnung getragen, wobei

$H_{E,j}$:	Effektive Jahresdosis durch äußere Gammabestahlung für eine Referenzperson j
$f_{Kon,j}$:	Umrechnungsfaktor der Photonen-Äquivalentdosis in die effektive Dosis für die Referenzperson j Personen $\leq 1a$: 0,8 Personen 1 - 2a: 0,7 Personen 2 - 7a: 0,7 Personen 7 - 12a: 0,7 Personen 12 - 17a: 0,6 Personen $> 17a$: 0,6
$C_{Bo,s}$:	Spezifische Aktivität eines Radionuklids der Uran-Radium-Reihe am Expositionsort s
g_{ext} :	Konversionsfaktor für die Umrechnung der spezifischen Aktivität des Bodens in die Photonen-Äquivalentdosis
$t_{Exp,j,s}$:	Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s
$a_{x,s}$:	Faktor zur Berücksichtigung der Abschirmwirkung am Expositionsort s: Im Freien: $a_{x,s} = 1$ In Gebäuden in Leichtbauweise: $a_{x,s} = 0,3$ In Gebäuden in Massivbauweise: $a_{x,s} = 0,1$

Bei der Berechnung des Dosisbeitrags durch äußere Gammabestahlung aufgrund der Folgenuklide der Uran-Actinium-Reihe wurde entsprechend der „Berechnungsgrundlage Bergbau“ für den Konversionsfaktor für die Umrechnung der spezifischen Aktivität des Bodens in die Photonen-Äquivalentdosis g_{ext} ein Wert von $g_{ext,Uran} = 5,3 \cdot 10^{-10} \frac{Sv \cdot kg}{Bq \cdot h}$ angenommen. Einen entsprechenden Wert für die Berechnung des Dosisbeitrags aufgrund von Folgenukliden der Thorium-Reihe gibt die Berechnungsgrundlage Bergbau nicht vor. Bei den vorliegenden Berechnungen wurde für die Berechnung des Dosisbeitrags aufgrund von Folgenukliden der

Thorium-Reihe der Wert $g_{ext,Thorium} = 7,4 \cdot 10^{-10} \frac{Sv \cdot kg}{Bq \cdot h}$ herangezogen. Dieser wurde unter Verwendung der Verhältnisse der Energiedosisleistungen der im radioaktiven Gleichgewicht befindlichen Thorium- und Uran-Actinium-Reihe (in Luft, 1 m über Grund, vgl. /ICRU, 1994/) sowie der Konversionskoeffizienten $H^*(10)/K_a$ (berechnet jeweils für die mittleren Energien der Thorium- und Uran-Actinium-Reihe; vgl. /Reich, 1990/) aus $g_{ext,Uran}$ mittels

$$g_{ext,Thorium} = g_{ext,Uran} \cdot \frac{K_{a,Thorium}}{K_{a,Uran}} \cdot \frac{(H^*(10)/K_a)_{Thorium}}{(H^*(10)/K_a)_{Uran}}$$

ermittelt.

A 1.2. Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten

Für den Beitrag zur Gesamtdosis durch Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten wird in der Berechnungsgrundlage Bergbau die Beziehung

$$H_{Rn,j} = g_{EEC} \sum_s \left(z \left(11 C_{Ra,j} b_j \ln(1 + 1,7 F_j) \right) + 377 \sum_{i=1}^n \left(10 C_{Ra,i} b_i F_i \left(\frac{k}{r_{i,s}} \right)^{1,58} \right) \right) F_{Rn,s} t_{Exp,j,s}$$

herangezogen. Dabei bedeutet:

- $H_{Rn,j}$: Effektive Jahresdosis für eine Referenzperson j durch Inhalation von ^{222}Rn und seinen kurzlebigen Folgeprodukten
- g_{EEC} : Dosiskonversionskoeffizient der Referenzperson j für das Produkt aus ^{222}Rn -Exposition und Gleichgewichtsfaktor für Nicht-Beschäftigte aller Altersgruppen $6,1 \cdot 10^{-9} \text{ Sv m}^3 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$, für Beschäftigte $7,8 \cdot 10^{-9} \text{ Sv m}^3 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$
- z : Entscheidungsparameter ob eine Situation auf einer mit Aktivität beaufschlagten Fläche ($z = 1$) oder neben einer mit Aktivität beaufschlagten Fläche ($z = 0$) zu betrachten ist
- $C_{Ra,j}$: Massenbezogene ^{226}Ra -Aktivität der Halde
- b_j : Umrechnungsfaktor zur Abschätzung der Rn-Exhalation der Halde; $b_j = 0,05 \cdot \tanh(H)$, wobei H , die Mächtigkeit der Halde, bei Anwendung auf geringmächtige Situationen (Straßen, etc.) zu 0,5 m angenommen wurde
- F_j : mit Aktivität beaufschlagte Fläche, bei Anwendung auf Deponien zu 1 ha, bei Vergleichsanwendung (Straßen, etc.) zu 0,2 ha angenommen

- k : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der meteorologischen und topographischen Standortbedingungen für ebenes Gelände $k = 1,25$
- $r_{i,s}$: Abstand des Expositionsortes vom nächstgelegenen Rand der mit Aktivität beaufschlagten Fläche, hier mit 20 m angenommen
- $F_{Rn,s}$: Faktor zur Beschreibung des radioaktiven Gleichgewichtes von Rn und seinen kurzlebigen Folgeprodukten; auf einer mit Aktivität beaufschlagten Fläche: in Gebäuden 0,2, im Freien 0,4; neben einer mit Aktivität beaufschlagten Fläche: in Gebäuden und im Freien 0,4
- $t_{Exp,j,s}$: Jährliche Aufenthaltszeit der Person j am Expositionsort s

A 1.3. Inhalation von Staub

Zur Berechnung des Dosisbeitrages durch Inhalation von Staub wird entsprechend der Vorgaben der Berechnungsgrundlage Bergbau in der vorliegenden Arbeit die Beziehung

$$H_{Inh,j} = \dot{V} \sum_s \sum_r C_{Bo,r,s} \cdot AF_{0,02,r} \cdot S_{Staub} \cdot g_{Inh,r,j} \cdot t_{Exp,j,s} \cdot a_{Luft,s}$$

zugrunde gelegt. Dabei bedeutet:

- $H_{Inh,j}$: Effektive Jahresdosis für eine Referenzperson j durch Inhalation von Staub
- \dot{V} : Atemrate für die Referenzperson j
- | | |
|----------------------|-----------------------------------|
| Personen $\leq 1a$: | $0,12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
| Personen 1 - 2a: | $0,22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
| Personen 2 - 7a: | $0,36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
| Personen 7 - 12a: | $0,64 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
| Personen 12 - 17a: | $0,84 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
| Personen $> 17a$: | $0,93 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
| Beschäftigte: | $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
- $C_{Bo,r,s}$: Massenbezogene Aktivität für Mitglieder der Uran- und Actinium- bzw. der Thorium-Reihe in der oberen Bodenschicht
- $AF_{0,02,r}$: Aufkonzentrationsfaktor, der das mittlere Verhältnis von Staubfraktion und Gesamtprobe beschreibt, $AF_{0,02,r} = 0,4$
- S_{Staub} : Referenzwert für Schwebstaubkonzentration:
 In gering staubbelasteten Situationen (z.B. Wohnen):
 $5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
 In stark staubbelasteten Situationen (z.B. stark staubentwickelnde Arbeiten):
 $1 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ (Allgemeiner Staubgrenzwert, /TRGS 900, 2000/)
- $g_{Inh,r,j}$: Inhalationskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j, siehe

/SSK, 1999/

$a_{Luft,s}$: Faktor zur Ermittlung der Staubkonzentration, im Freien $a_{Luft,s} = 1$, in Gebäuden $a_{Luft,s} = 0,5$

A 1.4. Ingestion von Radionukliden über Lebensmittel

Zur Berechnung des Dosisbeitrags durch Ingestion von Radionukliden über Lebensmittel müssen zwei Komponenten betrachtet werden: Zum Einen ist die Konzentration der Radionuklide für den Aufpunkt A zu berechnen, an dem das entsprechende Lebensmittel erzeugt wird, zum Anderen ergibt sich daraus die Dosis, der eine Einzelperson durch Verzehr entsprechender Lebensmittel ausgesetzt ist.

Pfade, auf denen Lebensmittel von einer haldenähnlichen Situation zum Aufpunkt A gelangen können, sind entweder der Transport über die Luft oder der Transport durch Auswaschung über das Grundwasser. Da die haldenähnlichen Situationen der vorliegenden Arbeit eine Abdeckung bzw. eine Bindung der Radionuklide in eine feste Matrix voraussetzen, z. B. ist im Straßenbau die Fahrbahn immer durch eine dichte Fahrbahndecke abgeschlossen, aus der ein Transport Radionuklid-kontaminierter Materials durch den Wind nicht in einem relevanten Umfang anzunehmen ist, wird der erstgenannte Pfad im Folgenden vernachlässigt. Die Berechnung des „Grundwasserpfad“ wird im Abschnitt A1.4.1, die Berechnung der daraus resultierenden Dosis in Abschnitt A1.4.2 erläutert.

A 1.4.1 Die Konzentration von Radionukliden in Boden und Oberflächenwassern bei Ausbreitung über den Transport im Grundwasser

Die Berechnung der Konzentration von Radionukliden am Aufpunkt A wird mittels des in /Barthel et al., 1999/ entwickelten Formelsatzes berechnet. Es ergibt sich:

$$C_{\max,r} = \begin{cases} \exp\left(-\lambda\left(\frac{h_1}{v_y} + \frac{1}{\lambda}\right)\right) \frac{C_0}{n_{GW} + \rho_{GW} K_{d,GW}} \frac{|v_y|}{h} \frac{1}{\lambda}; & \text{wenn } \frac{1}{\lambda} \leq t_i - \frac{h_1}{|v_y|} \\ \exp(-\lambda t_i) \frac{C_0}{n_{GW} + \rho_{GW} K_{d,GW}} \frac{|v_y|}{h} \left(t_i - \frac{h_1}{|v_y|}\right); & \text{wenn } \frac{1}{\lambda} \geq t_i - \frac{h_1}{|v_y|} \end{cases}$$

mit

$$t_i = \min\left(\frac{h_2}{|v_y|}; \frac{h_1}{|v_y|} + \frac{L}{v_x}\right)$$

$$v_y = \frac{h_{NG} f_{Si}}{n_{Bo} \left(1 + \frac{\rho_{Bo} K_{d,Bo}}{n_{Bo}}\right)}$$

$$v_x = \frac{v_{GW}}{1 + \frac{\rho_{GW} K_{d,GW}}{n_{GW}}}$$

Dabei bedeutet:

- $C_{\max,r}$: Maximale Konzentration des Radionuklids r am Rand der kontaminierten Zone
- h_1 : Abstand der unteren Kante der kontaminierten Zone zum Grundwasser; $h_1 = 3$ m
- h_2 : Abstand der oberen Kante der kontaminierten Zone zum Grundwasser; $h_2 = 3,5$ m
- h : Mächtigkeit des Grundwasserleiters; $h = 5$ m
- λ_r : Zerfallskonstante des jeweils betrachteten Radionuklides
- $c_{0,r}$: Mittlere Konzentration des Radionuklids r in der kontaminierten Zone
- n_{GW} : Nutzbarer Porenraum im Grundwasserleiter; $n_{GW} = 0,4$
- ρ_{GW} : Trockendichte des Grundwasserleiters; $\rho_{GW} = 1,8 \text{ g cm}^{-3}$
- $K_{d,GW}$: K_d -Wert innerhalb des Grundwasserleiters
- v_{GW} : Fließgeschwindigkeit des Grundwassers; $v_{GW} = 365 \text{ m a}^{-1}$
- L : Ausdehnung der kontaminierten Fläche; $L = 100$ m
- $N_{NG} f_{Si}$: Sickerwasserneubildung; $N_{NG} f_{Si} = 200 \text{ mm a}^{-1}$
- n_{Bo} : Nutzbarer Porenraum des Bodens; $n_{Bo} = 0,4$
- ρ_{Bo} : Trockendichte des Bodens; $\rho_{Bo} = 1,8 \text{ g cm}^{-3}$

$K_{d,Bo}$: K_d -Wert innerhalb des Bodens

A 1.4.2 Die Konzentration von Radionukliden im Boden bei direktem Eintrag über Düngung mit mit NORM-Material beaufschlagten Düngemitteln

Bei direktem Eintrag von Radionukliden in den Boden über die Düngung sind generell andere Mechanismen als beim Transport über den Grundwasserpfad zu berücksichtigen. Dies ergibt sich im Wesentlichen aus der chemischen Aufbereitung des Materials zu Wertstoffen für Düngemittel. Anders als bei Expositionsszenarien, die die Lagerung von NORM-Material im Boden in Form eines Schlackensteines vor Augen haben, liegen hier die Radionuklide in höchst mobilen Verbindungen vor und ein langsames Auswaschen aus einer festen Matrix ist nicht zu betrachten. Die Konzentration der Radionuklide im Boden ergibt sich gemäß

$$C_{Boden,r} = C_{NORM,r} f \frac{\left(\frac{dm}{dF}\right)_{Düngemittel}}{d \cdot \rho_{Bo}}$$

Dabei bedeutet:

$C_{Boden,r}$:	Konzentration des Radionuklids r im Boden
$C_{NORM,r}$:	Konzentration des Radionuklids r im NORM-Ausgangsmaterial
f :	Verdünnungsfaktor der Konzentration des Radionuklids r im NORM-Ausgangsmaterial aufgrund der chemischen Aufbereitung zu Dünger
$C_{NORM,f}$:	Konzentration des Radionuklids r im Düngemittel
$\left(\frac{dm}{dF}\right)_{Düngemittel}$:	Typischer Wert für Ausbringung von Dünger je Fläche und Vegetationsperiode; $\left(\frac{dm}{dF}\right)_{Düngemittel} = 100 \text{ kg/ha /Lange und Benke, 2005/}$
d :	Eindringtiefe in den Boden; $d = 0,3\text{m}$
ρ_{Bo} :	Trockendichte des Bodens; $\rho_{Bo} = 1,8 \text{ g cm}^{-3}$

A 1.4.3 Berechnung der resultierenden Dosis

Die Berechnung der resultierenden Dosis wird mit der in der Berechnungsgrundlage Bergbau dargestellten Formel

$$H_{Ing,j} = \sum_n p_n U_{n,j} \sum_r C_{n,r} g_{Ing,r,j}$$

durchgeführt. Dabei bedeutet:

- $H_{Ing,j}$: Effektive Jahresdosis für eine Referenzperson j durch Ingestion lokal erzeugter Lebensmittel
- p_n : Anteil an lokaler Produktion des Lebensmittels n am Jahresverbrauch;
für Milch, Fleisch, Fisch, pflanzliche Produkte: $p_n = 0,25$
für Wasser und Muttermilch: $p_n = 1$
- $U_{n,j}$: Jahresverbrauch des Lebensmittels n durch die Referenzperson j; siehe /SSK, 1999/
- $C_{n,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r im Lebensmittel n
- $g_{Ing,r,j}$: Ingestionskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j; siehe /SSK, 1999/

Grundsätzlich können die Radionuklide über verschiedene Pfade vom Aufpunkt A, an dem die Pflanze steht oder ein Tier weidet, in die Lebensmittelkette gelangen. Die Pfade, die hierbei betrachtet werden, sind in Anlehnung an die Anlage VII der Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2001/

- Boden – Pflanze
- Boden – Pflanze – Muttermilch
- Boden – Futterpflanze – Kuh – Milch
- Boden – Futterpflanze – Kuh – Milch – Muttermilch
- Boden – Futterpflanze – Tier – Fleisch
- Boden – Futterpflanze – Tier – Fleisch – Muttermilch
- Luft – Pflanze
- Luft – Pflanze – Muttermilch

-
- Luft – Futterpflanze – Kuh – Milch
 - Luft – Futterpflanze – Kuh – Milch – Muttermilch
 - Luft – Futterpflanze – Tier – Fleisch
 - Luft – Futterpflanze – Tier – Fleisch – Muttermilch
 - Wasser – Fisch
 - Wasser – Fisch – Muttermilch
 - Beregnung – Pflanze
 - Beregnung – Pflanze - Muttermilch
 - Beregnung – Futterpflanze – Kuh – Milch
 - Beregnung – Futterpflanze – Kuh – Milch – Muttermilch
 - Beregnung – Futterpflanze – Tier – Fleisch
 - Beregnung – Futterpflanze – Tier – Fleisch – Muttermilch
 - Viehtränke – Kuh – Milch
 - Viehtränke – Kuh – Milch – Muttermilch
 - Viehtränke – Tier – Fleisch
 - Viehtränke – Tier – Fleisch – Muttermilch

Der in der Berechnungsgrundlage Bergbau vorgesehene Pfad „Ingestion über das Trinkwasser“ wird hier nicht berücksichtigt, da nach /BGW, 2001/ nur 1 % aller Verbraucher nicht an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossen sind und somit ihren Wasserbedarf aus Eigengewinnungsanlagen, sog. Privatbrunnen, beziehen.

Aus der Betrachtung der unterschiedlichen Pfade ergibt sich die Notwendigkeit, die Konzentrationen der Radionuklide in den unterschiedlichen Lebensmitteln zu kennen. Im Folgenden sind die entsprechenden Formeln zusammengefasst:

Fisch:

$$C_{Fi,r} = C_{OGW} T_{Fi,r}$$

Pflanzen:

$$C_{Pf,r} = \frac{(C_{Ber,r} W f_w + v_g C_{Bo,r,s} A F_{0,02,r} S_{Staub})}{Y_n \lambda_{eff,r}} (1 - \exp(-\lambda_{eff,Pf,r} t_{n,w}))$$

Milch:

$$C_{Mi,n,r} = \{C_{Wd,r} M_{Fu} + C_{Bo,r} M_{Bo} f_p + C_{Tränke,r} L\} T_{Mi,r}$$

Fleisch:

$$C_{Fl,n,r} = \{C_{Wd,r} M_{Fu} + C_{Bo,r} M_{Bo} f_p + C_{Tränke,r} L\} T_{Fl,r}$$

Muttermilch:

$$C_{MM,r} = \frac{T_{MM,r}}{360} \sum_n P_n C_{n,r} U_{n,>17a}$$

Dabei bedeutet:

- $C_{Fi,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r in Fischfleisch
- C_{OGW} : Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r im Oberflächengewässer
- $C_{Pf,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r in pflanzlichen Produkten
- $C_{Ber,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r im Beregnungswasser
- $C_{Mi,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r in Milch und Milchprodukten
- $C_{Fl,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r in Fleisch und Fleischprodukten
- $C_{Wd,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r in Weidepflanzen
- $C_{Bo,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r im Boden
- $C_{Tränke,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r im Wasser der Viehtränke
- $C_{MM,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r in der Muttermilch
- $C_{n,r}$: Massenbezogene Aktivität des Radionuklids r im Lebensmittel n
- $T_{Fi,r}$: Konzentrationsfaktor für das Radionuklid r im Fischfleisch; siehe /SSK, 1999/.
- W : Beregnungsrate; $W = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ l m}^{-2}$
- f_w : Anteil der bei der Beregnung abgelagerten Aktivität; $f_w = 0,3$
- v_g : Ablagerungsgeschwindigkeit von Staub; $v_g = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$
- $A F_{0,02,r}$: Aufkonzentrationsfaktor, der das mittlere Verhältnis von Staubfraktion und Gesamtprobe beschreibt, $A F_{0,02,r} = 0,4$

S_{Staub} :	Referenzwert für Schwebstaubkonzentration; $S_{Staub} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$
Y_n :	Ertrag bzw. Bewuchsdichte; n = Blattgemüse: $1,6 \text{ kg m}^{-2}$ n = pflanzl. Produkte ohne Blattgemüse: $2,4 \text{ kg m}^{-2}$ n = Weidepflanzen: $0,85 \text{ kg m}^{-2}$
$\lambda_{eff,r}$:	Effektive Verweildauer des Radionuklids r auf der Vegetation; $\lambda_{eff,r} = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
$t_{n,w}$:	Kontaminationszeit für Pflanzen der Gruppe n während der Wachstumsperiode; n = Blattgemüse: $5,2 \cdot 10^6 \text{ s}$ n = pflanzl. Produkte ohne Blattgemüse: $5,2 \cdot 10^6 \text{ s}$ n = Weidepflanzen: $2,6 \cdot 10^6 \text{ s}$
M_{Fu} :	Tägliche Aufnahme von Weidefutter für Rindvieh; $M_{Fu} = 65 \text{ kg d}^{-1}$
M_{Bo} :	Tägliche Aufnahme von Boden für Rindvieh; $M_{Bo} = 0,5 \text{ kg d}^{-1}$
f_p :	Bruchteile des Jahres, in dem die Tiere auf der Weide grasen; $f_p = 0,5$
L :	Täglicher Wasserkonsum eines Rinds; $L = 75 \text{ l d}^{-1}$
$T_{Mi,r}$:	Transferfaktor für das Radionuklid r vom Futter in die Milch; siehe /SSK, 1999/
$T_{Fl,r}$:	Transferfaktor für das Radionuklid r vom Futter in das Fleisch; siehe /SSK, 1999/
$T_{MM,r}$:	Transferfaktor für das Radionuklid r vom Lebensmittel in die Muttermilch; siehe /SSK, 1999/
$U_{n,>17a}$:	Jahresverbrauch des Lebensmittels n durch die Referenzperson „>17a“; siehe /SSK, 1999/
$g_{Ing,r,j}$:	Ingestionskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j; siehe /SSK, 1999/

A 1.5. Direktingestion von Boden

Der Dosisbeitrag, der durch Aufnahme von Boden (z. B. durch Verschlucken von Bodenstaub, der an der Haut anhaftet) mittels Ingestion (Direktingestion) entsteht, wird entsprechend der Berechnungsgrundlage Bergbau wie folgt berechnet:

$$H_{Ing,Bo,j} = U_{Bo,j} \sum_r g_{Ing,r,j} \sum_s C_{Bo,s} t_{Exp,j,s}$$

mit

$H_{Ing,Bo,j}$:	Effektive Jahresdosis für eine Referenzperson j durch die direkte Aufnahme von Boden
$U_{Bo,j}$:	Ingestionskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j
$g_{Ing,r,j}$:	Ingestionskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j; siehe /SSK, 1999/
$C_{Bo,s}$:	Massenbezogene Aktivität der oberen Bodenschicht am Expositionsort s
$t_{Exp,j,s}$:	Jährliche Aufenthaltszeit der Person j am Expositionsort s

A 2. Berechnung der Strahlenexposition in Sondersituationen

Eine Sondersituation, bei der die Berechnungsgrundlage Bergbau keine Anwendung finden kann, weil die Randbedingungen der Berechnungsgrundlage Bergbau grundsätzlich nicht entsprechen, stellt die Verwendung von NORM-haltigem Material in der Bau- und Düngemittelindustrie dar. Insbesondere für die Berechnung des Dosisbeitrags durch äußere Gammabestahlung sowie durch Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten müssen von dem Formalismus der Berechnungsgrundlage Bergbau abweichende Berechnungsweisen gefunden werden. In der vorliegenden Arbeit werden die in /Barthel et al., 1999/ dargestellten Formelbeziehungen insbesondere für die Berechnung der Strahlenexpositionen in den Expositionsszenarien, die sich aus der Verwendung von NORM-Material als Zuschlagstoff in der Bauindustrie bzw. als Wertstoff in der Düngemittelindustrie ergeben, herangezogen.

A 2.1. Äußere Gammabestahlung

Für die Berechnung des Dosisbeitrags durch äußere Gammabestahlung werden bei /Barthel et al., 1999/ mithilfe von Literaturwerten geeignete Dosiskoeffizienten ermittelt. In der vorliegenden Arbeit werden die Dosiskoeffizienten für den Aufenthalt in einem Raum sowie vor einer Wand, beide gebaut unter Verwendung von NORM-Materialien, herangezogen.

Die Berechnung der Dosis ergibt sich mit

$$H_{E,j} = f'_{Kon,j} \sum_r D_r C_r t_{Exp,j,s}$$

mit

$H_{E,j}$:	Effektive Jahresdosis für eine Referenzperson j durch äußere Gammabestrah- lung
$f'_{Kon,j}$:	Modifizierter Umrechnungsfaktor der Photonen-Äquivalentdosis in die effektive Dosis für die Referenzperson j; Personen $\leq 1a$: 1,33 Personen 1 - 2a: 1,17 Personen 2 - 7a: 1,17 Personen 7 - 12a: 1,17 Personen 12 - 17a: 1,00 Personen $> 17a$: 1,00
D_r :	Dosiskoeffizient: <i>Aufenthalt in einem Raum:</i> r: $^{238}\text{Usec} + ^{235}\text{Usec}$: $6,35 \cdot 10^{-4} \text{ (mSv/h)/(Bq/g)}$ r: $^{232}\text{Thsec}$: $7,58 \cdot 10^{-4} \text{ (mSv/h)/(Bq/g)}$ <i>Aufenthalt vor einer Wand:</i> r: $^{238}\text{Usec} + ^{235}\text{Usec}$: $7,87 \cdot 10^{-5} \text{ (mSv/h)/(Bq/g)}$ r: $^{232}\text{Thsec}$: $1,09 \cdot 10^{-4} \text{ (mSv/h)/(Bq/g)}$
C_r :	Massenbezogene Aktivität
$t_{Exp,j,s}$:	Jährliche Aufenthaltszeit der Person j am Expositionsort s

A 2.2. Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten

Für die Berechnung des Dosisbeitrags durch Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten werden bei /Barthel et al., 1999/ mit Hilfe von Literaturwerten geeignete Dosiskoeffizienten ermittelt. In der vorliegenden Arbeit werden die Dosiskoeffizienten für den Aufenthalt in einem Raum sowie vor einer Wand, beide gebaut unter Verwendung von NORM-Materialien, herangezogen.

Die Berechnung der Dosis ergibt sich mit

$$H_{E,j} = \sum_r D_r \frac{A \rho E \sqrt{\lambda_{Rn} D} \tanh(\sqrt{\lambda_{Rn} / D} \cdot H_w / 2)}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} C_r t_{Exp,j,s}$$

mit

$H_{E,j}$:	Effektive Jahresdosis für eine Referenzpersonen j durch Inhalation von Radon und Radon-Folgeprodukten
D_r :	Dosiskoeffizient für <i>Personen der allgemeinen Bevölkerung:</i> r: ^{222}Rn : $6,1 \cdot 10^{-9} \text{ (Sv/h)/(Bq/m}^3\text{)}$ r: ^{220}Rn : $3,0 \cdot 10^{-8} \text{ (Sv/h)/(Bq/m}^3\text{)}$ <i>Beschäftigte:</i> r: ^{222}Rn : $7,8 \cdot 10^{-9} \text{ (Sv/h)/(Bq/m}^3\text{)}$ r: ^{220}Rn : $3,8 \cdot 10^{-8} \text{ (Sv/h)/(Bq/m}^3\text{)}$
A/V :	Verhältnis von exhalierender Fläche zu Raum; Wohnbebauung: $A/V = 1,7 \text{ m}^{-1}$ Produktionsbebauung: $A/V = 0,05 \text{ m}^{-1}$
ρ :	Dichte der Radon exhalierenden Materie; hier Beton: $\rho = 2400 \text{ kg m}^{-3}$
E :	Emanationskoeffizient; $E = 0,3$
λ_{Rn} :	Zerfallskonstante: für ^{222}Rn : $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; für ^{220}Rn : $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
λ_V :	Luftwechselrate; Wohnbebauung: $\lambda_V = 0,5 \text{ h}^{-1}$ Produktionsbebauung: $\lambda_V = 2 \text{ h}^{-1}$
D :	Diffusionskoeffizient; $D_{\text{Beton}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
H_W :	Wandstärke; 0,2 m
C_r :	Massenbezogene Aktivität
$t_{Exp,j,s}$:	Jährliche Aufenthaltszeit der Person j am Expositionsort s