

**Untersuchungen  
zur Sicherheit bei  
der Beförderung  
radioaktiver Stoffe**

Teil 1.1  
Berechnung von  
Aktivitätsgrenzwerten –  
Q-Modell



## **Untersuchungen zur Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe**

Teil 1.1  
Berechnung von  
Aktivitätsgrenzwerten –  
Q-Modell

Abschlussbericht zum  
Arbeitspaket 4

Uwe Büttner

August 2014

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben 3611R03300 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

## **Deskriptoren**

A-Werte, BerQATrans, Q-System, Transportsicherheit, Transportvorschriften

## Kurzfassung

Ein Ziel des Vorhabens 3611R03300 war die Analyse der Berechnungsmethodik und die entsprechende Entwicklung eines Programms zur Berechnung der Q- und  $A_1/A_2$ -Werte der Transportvorschriften der IAEO (IAEA Safety Requirements No. SSR-6). Damit sollten zum einen die bestehenden Q- und  $A_1/A_2$ -Werte nachvollzogen und insbesondere auch solche Werte neu berechnet werden können, die nicht in den Transportvorschriften der IAEO gelistet sind. Zur Umsetzung dieser Aufgabe wurde ein Rechenprogramm in Microsoft Excel entwickelt, die notwendigen Rechenfunktionen sind in Excel-VBA-Code geschrieben. Die Programmentwicklung und die zugrundeliegenden Rechenmodelle sind in diesem Bericht dokumentiert. Ein Vergleich der Ergebnisse des Rechenprogrammes mit denen der Transportvorschriften zeigt eine gute Übereinstimmung der meisten berechneten  $A_1/A_2$ -Werte. Es besteht darüberhinaus die Möglichkeit, nicht nur die bestehenden Q- und  $A_1/A_2$ -Werte nach der bisher verwendeten Datengrundlage der älteren ICRP 38 zu berechnen, sondern auch aktuelle Nuklidaten der neueren ICRP 107 zu verwenden.

Im Rahmen der Entwicklung traten viele Dokumentationsschwächen und Problempunkte des den Berechnungen der Q- und  $A_1/A_2$ -Werte zugrundeliegenden sogenannten Q-Systems zutage. Diese werden in diesem Bericht angesprochen und diskutiert. Im Anschluss wird eine Möglichkeit zur Überarbeitung des Q-Systems vorgeschlagen.

## Abstract

One aim of this project 3611R03300 was the analysis of the methods used in the Q system to establish a program for calculation of Q and  $A_1/A_2$  values. With this program not only the already known nuclides listed in the IAEA Transport Regulations SSR-6 should be recalculated, but one should also be able to calculate new radionuclides. For this reason a program was developed, using Microsoft Excel sheets and Excel VBA programming language. This report is the documentation of the development of this program and the used models for calculating Q and  $A_1/A_2$  values. In comparison with the Transport Regulations SSR-6 the results of this program are in good agreement for most of the  $A_1/A_2$  values. Furthermore, it is possible not even to recalculate Q and

$A_1/A_2$  values on the up to now used older data basis of ICRP 38 but also by using recent nuclide data presented in ICRP 107.

Within the development of the calculation program many lacks of the documentation and problematic issues of the used so called Q system were found and are discussed in this report. At the end some points for a possible improvement of the Q system are presented.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Das Q-System .....</b>	<b>3</b>
2.1	Allgemeines .....	3
2.2	Berechnung der Q-Werte .....	4
2.2.1	Berechnung von $Q_A$ .....	5
2.2.2	Berechnung von $Q_B$ .....	7
2.2.3	Berechnung von $Q_C$ .....	9
2.2.4	Berechnung von $Q_D$ .....	10
2.2.5	Berechnung von $Q_E$ .....	12
2.2.6	Berechnung von $Q_F$ .....	13
2.3	Berechnung der A-Werte .....	13
2.4	Besondere Berechnungen und Annahmen .....	14
2.4.1	Neutronenstrahler .....	14
2.4.2	Bremsstrahlung .....	15
2.4.3	Tritium und Tritiumverbindungen .....	15
2.4.4	Radon und Radonfolgeprodukte .....	15
2.4.5	LSA-Stoffe .....	16
<b>3</b>	<b>Programmentwicklung zur Berechnung der <math>A_1/A_2</math>-Werte .....</b>	<b>19</b>
3.1	Berechnung von $Q_A$ .....	21
3.1.1	Massenenergieabsorptionskoeffizient .....	21
3.1.2	Linearer Schwächungskoeffizient .....	23
3.1.3	Aufbaufaktor .....	25
3.1.4	Dosiskonversionsfaktoren .....	28
3.2	Berechnung von $Q_B$ .....	37
3.2.1	Dosis pro Zerfall .....	38
3.2.2	CSDA-Reichweite .....	40
3.2.3	Dimensionslose Dosisverteilung .....	42
3.2.4	Diskrete Elektronen .....	44
3.3	Berechnung von $Q_C$ .....	45

3.4	Berechnung von $Q_D$ .....	46
3.4.1	Dosis pro Zerfall.....	46
3.4.2	CSDA-Reichweite .....	47
3.4.3	Dimensionslose Dosisverteilung .....	48
3.4.4	Diskrete Elektronen .....	51
3.5	Berechnung von $Q_E$ .....	51
3.6	Berechnung von $Q_F$ .....	52
3.7	Berechnung der A-Werte .....	52
3.8	Nuklidgemische .....	55
3.8.1	Rubidium .....	55
3.8.2	Rhenium .....	56
3.8.3	Thorium .....	56
3.8.4	Uran.....	56
3.9	Sonstige Annahmen zur Berechnung der Q- und A-Werte.....	59
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>61</b>
4.1	Dosisleistungskoeffizienten.....	61
4.2	Q- und A-Werte .....	63
<b>5</b>	<b>Programmbeschreibung BerQATrans.....</b>	<b>65</b>
5.1	Installation .....	65
5.2	Programmstart.....	68
5.3	Durchführen einer Rechnung.....	69
5.3.1	Nuklidauswahl .....	69
5.3.2	Optionen für Berechnung und Ergebnisdarstellung.....	71
5.3.3	Start der Rechnung.....	74
5.4	Rechenergebnisse.....	74
5.4.1	Schaltfläche „Ergebnisse“ .....	74
5.4.2	Ergebnisblätter .....	76
5.5	Weitere Funktionen.....	78
5.6	Nachrechnen der Q- und A-Werte gemäß den Transportvorschriften .....	79
5.7	Fehlermeldung.....	79

<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>81</b>
6.1	Datenlage und Dokumentation des Q-Systems .....	81
6.2	Berechnung der Q- und A-Werte .....	82
6.3	Festgestellte Problempunkte .....	83
6.4	Vorschlag für eine Überarbeitung des Q-Systems .....	84
6.5	Ausblick zur Programmentwicklung .....	87
	<b>Literatur .....</b>	<b>89</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>95</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>97</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>101</b>
	<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>105</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>109</b>
A	Herleitung der Gleichung zur Berechnung von $Q_A$ .....	109
B	Berücksichtigung von Tochternukliden.....	115
C	Tabellierte Werte .....	121
D	Verwendete Tochternuklide zu Berechnung von Nuklidgemischen .....	133
E	Massen- und Aktivitätsanteile bei Urangemischen .....	135
F	Vergleich der Dosisleistungskoeffizienten .....	143
G	Berücksichtigte Tochternuklide .....	155
H	Vergleich der Q- und A-Werte.....	159



# 1 Einleitung

Gemäß dem abgestuften Sicherheitskonzept der Transportvorschriften werden die Aktivitätsgrenzwerte für Versandstücke so festgelegt, dass die radiologischen Folgen sowohl beim normalen (unfallfreien) Transport als auch bei Unfällen begrenzt sind. Hierzu wurde von der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) das sogenannte Q-System eingeführt, das auf Basis von festgelegten radiologischen Kriterien die zu ihrer Einhaltung maximal zulässigen Aktivitätswerte (sogenannte A-Werte) bestimmt /IAEA 08/. Auf diese Weise wurden die in den Transportvorschriften angegebenen Aktivitätsgrenzwerte für radioaktive Stoffe in besonderer Form ( $A_1$ -Wert) sowie für alle anderen radioaktiven Stoffe, die nicht in besonderer Form vorliegen ( $A_2$ -Wert), festgelegt. Die nuklidspezifischen  $A_1/A_2$ -Werte begrenzen dabei diejenige Aktivitätsmenge, die mit einem Versandstück vom Typ A befördert werden darf.

Die von der IAEO veröffentlichten Tabellen beinhalten eine sehr umfangreiche Nuklidliste in der die Grenzwerte für die bisher relevanten Nuklide aufgeführt sind. Es besteht jedoch der Bedarf und damit auch die Notwendigkeit, für nicht aufgelistete Nuklide die entsprechenden Grenzwerte berechnen zu können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 3611R03300, Arbeitspaket (AP) 4, Teilarbeitsgebiete (TAG) 2, 3 und 4 wurde daher ein Modellsystem entwickelt, das in Anlehnung an die Methodik der IAEO die Bestimmung von Aktivitätsgrenzwerten auf Basis des Q-Systems ermöglicht. Ziel war hierbei die Bereitstellung eines Analyseinstrumentariums, das die Anwendung der Methodik sowohl für Standardszenarien erlaubt als auch die Möglichkeit einer späteren Erweiterung für flexiblere Randbedingungen bietet.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Recherche- und Entwicklungsarbeit für die Erstellung eines Rechenprogramms zur Berechnung von Q- und A-Werten gemäß dem Q-System der IAEO. In Kapitel 2 wurden die Angaben zur Berechnung der Q- und A-Werte entsprechend der recherchierten Vorschriften und ggf. sonstigen (impliziten) Annahmen zusammengestellt. Kapitel 3 enthält die Umsetzung der Vorschriften in das Rechenprogramm BerQATrans. Zusätzlich sind hier theoretische Betrachtungen zu finden, die in den Vorschriften des Q-Systems nicht enthalten sind, aber Grundlage für die Berechnung der Q- und A-Werte sind. Die Ergebnisse der Berechnungen mit BerQATrans sind in Kapitel 4 zusammengestellt, Kapitel 5 enthält eine Kurzbeschreibung des Programms. Dieser Bericht schließt in Kapitel 6 mit einer Diskussion des

Q-Systems anhand der gewonnenen Erkenntnisse während der Arbeit in diesem Vorhaben und mit Vorschlägen für mögliche Verbesserungen.

## 2 Das Q-System

### 2.1 Allgemeines

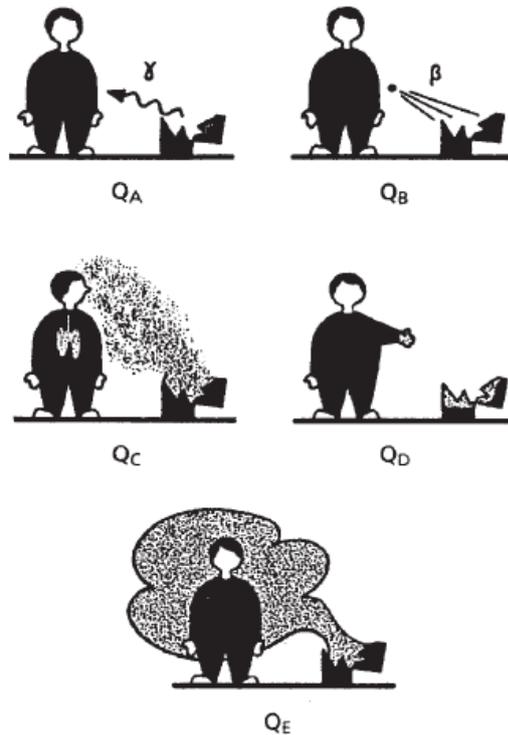
Das heutige Q-System wurde in den 1980er Jahren zur Berechnung von  $A_1$ - und  $A_2$ -Werten für Typ A-Versandstücke entwickelt und mit den IAEA-Transportvorschriften 1985 eingeführt /IAEA 86/, /IAEA 90/, es löste die bisherige Berechnung der A-Werte nach dem „ $A_1/A_2$ -System“ von 1973 /IAEA 73/ ab. Seit dem wurde es beständig weiterentwickelt und ist in seiner derzeit gültigen Form in /IAEA 08/, Appendix I wiedergegeben.

Die betrachteten Expositionspfade im Q-System sind

- äußere Exposition durch Gamma- und Röntgenstrahlung ( $Q_A$ ),
- äußere Exposition durch Betastrahlung ( $Q_B$ ),
- innere Exposition durch Inhalation ( $Q_C$ ),
- Kontamination der Haut sowie innere Exposition durch Ingestion ( $Q_D$ ) und
- Submersion ( $Q_E$ ).

Zusätzlich wird für Alphastrahler der Pfad  $Q_F$  betrachtet. In Abb. 2.1 sind die Pfade  $Q_A$  bis  $Q_E$  schematisch dargestellt. Diese werden jeweils gesondert betrachtet, d. h. theoretisch könnte über jeden betrachteten Pfad der Grenzwert (z. B. 50 mSv) erreicht werden. Dies wäre jedoch laut /IAEA 08/ nur für eine kleine Anzahl von Nukliden der Fall, weshalb die gesonderte Betrachtungsweise der Q-Werte beibehalten wird.

Für jeden dieser Expositionspfade wird eine solche nuklidspezifische maximale Aktivität  $Q$  berechnet, die zu einer effektiven Dosis von 50 mSv bzw. zu einer Organdosis (inkl. Haut) von 0,5 Sv oder zu einer Dosis der Augenlinse von 0,15 Sv bei Personen führen, die sich in der Umgebung eines durch einen Unfall beschädigten Versandstückes befinden. Dabei ist es unwahrscheinlich, dass eine Person sich in einem Abstand von einem Meter zum beschädigten Versandstück länger als 30 Minuten aufhält. Aus dem kleineren Wert von  $Q_A$  und  $Q_B$  (sowie ggf.  $Q_F$ ) wird der  $A_1$ -Wert für Stoffe in besonderer Form ermittelt; der  $A_2$ -Wert ergibt sich aus dem kleinsten Wert aller betrachteten Q-Werte.



**Abb. 2.1** Schematische Darstellung der Expositionspfade, Quelle: /IAEA 08/

Bei der Festlegung des Referenzwertes der effektiven Dosis von 50 mSv wurde unterstellt, dass die Wahrscheinlichkeit nach einem Transportunfall ionisierender Strahlung ausgesetzt zu sein für eine einzelne Person sehr klein ist. Weiterhin wird angenommen, dass dies praktisch nur einmal im Leben einer Person stattfindet.<sup>1</sup> Diese Annahme stimmt überein mit Erfahrungen aus erfassten Unfällen, bei denen Typ A-Versandstücke involviert waren. Solche Unfälle sind selten und führten nur zu sehr geringen Strahlenexpositionen.

## 2.2 Berechnung der Q-Werte

Annahmen für die Berechnung der Q-Werte sind u. a.:

- Die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls, infolgedessen ein großer Teil des Inhalts eines Typ A-Versandstückes freigesetzt wird, ist klein.

<sup>1</sup> Bei der Einführung des Q-Systems orientierte sich die Bestimmung der Referenzdosis von 50 mSv an dem damaligen Grenzwert der zulässigen Jahresdosis für beruflich strahlenexponierte Personen.

- Nach einem Unfall wird der Verlust der Verpackung bzw. der Verlust der Abschirmwirkung der Verpackung unterstellt; Betastrahler haben jedoch eine gewisse verbleibende Abschirmwirkung („residual shielding factor“).
- Ein Anteil von  $10^{-3}$  bis  $10^{-2}$  des Inhaltes wird freigesetzt.
- Ein Anteil von  $10^{-4}$  bis  $10^{-3}$  des freigesetzten Materials wird von einer in der Nähe befindlichen Person inhaliert.
- Vereinfachend wird somit insgesamt ein Anteil von  $10^{-6}$  des Inhaltes des Versandstücks, d. h.  $10^{-6} A_2$ , von einer in der Nähe befindlichen Person inhaliert.
- Als vorsichtige Abschätzung wird der Aufenthalt einer Person in einem Abstand von 1 m zum beschädigten Versandstück über 30 min unterstellt.

Die genaue Berechnung der einzelnen Pfade wird in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

### 2.2.1 Berechnung von $Q_A$

Der Pfad  $Q_A$  dient zur Berechnung einer äußeren Exposition durch Photonenstrahlung. Dabei werden Röntgen- und Gammastrahlung sowie Annihilationsphotonen der Nuklide berücksichtigt. Gemäß /IAEA 08/ wird angenommen, dass nach einem Unfall eine Person nahe dem Unfallort in 1 m Abstand 30 min lang exponiert wird. Es wird unterstellt, dass keine Abschirmung des Versandstückes bzw. dessen Inhalts mehr vorhanden ist. Zudem betrage die Dosisrate in 1 m Abstand vom verunfallten Versandstück maximal 0,1 Sv/h. Das Versandstück wird als Punktquelle angesehen.

Der Wert  $Q_A$  wird berechnet durch

$$Q_A = \frac{H_E}{A \cdot \dot{e}_{pt} \cdot t} \quad (2.1)$$

mit

$H_E$	Referenzwert der effektiven Äquivalentdosis (50 mSv),
$A$	Aktivität des Nuklids (1 Bq),
$\dot{e}_{pt}$	Dosisleistungskoeffizient für Röntgen- und Gammastrahlung (Punktquelle) in 1 m Abstand (in $\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ),
$t$	Expositionszeit (0,5 h).

Der Dosisleistungskoeffizient  $\dot{e}_{\text{pt}}$  wird in /IAEA 08/ berechnet über

$$\dot{e}_{\text{pt}} = \frac{1}{4\pi \cdot x^2} \cdot C_1 \cdot \sum_i k_{1,i} \cdot Y_i \cdot E_{\text{pt}_i} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i(E_{\text{pt}_i}, x) \quad (2.2)$$

mit

$C_1$	Konstante ( $6,581 \cdot 10^{-5} \text{ R} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}^{-1}$ ),
$x$	Abstand zur Quelle (100 cm),
$i$	Energiegruppe,
$k_{1,i}$	Dosiskonversionsfaktor (in $\text{Sv} \cdot \text{R}^{-1}$ ),
$Y_i$	Wahrscheinlichkeit für die Emission eines Photons der Energie $E_i$ (Yield) pro Zerfall <sup>2</sup> (in $(\text{Bq} \cdot \text{s})^{-1}$ ),
$E_{\text{pt}_i}$	Energie (in MeV) der $i$ -ten Energiegruppe,
$\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i$	Massenenergieabsorptionskoeffizient in Luft (in $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ),
$\mu_i$	Linearer Schwächungskoeffizient in Luft (in $\text{cm}^{-1}$ ),
$B_i$	Flussdichteaufbaufaktor (Build-up-Faktor) in Luft,

wobei über alle beim Zerfall des Nuklids auftretenden Photonen der Energiegruppe  $i$  summiert wird. Die Herleitung dieser Formel ist im Anhang A enthalten. Da hierfür zusätzliche Umrechnungen in die Einheit Röntgen und zurück in SI-konforme Einheiten notwendig sind, wurde eine alternative Formel basierend auf dem SI-Einheitensystem erstellt, deren Herleitung sich ebenfalls im Anhang A (Gleichung (A.16)) befindet:

$$\dot{e}_{\text{pt}} = \frac{1}{4\pi \cdot x^2} \cdot C_2 \cdot \sum_i k_{2,i} \cdot Y_i \cdot E_{\text{pt}_i} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i(E_{\text{pt}_i}, x) \quad (2.3)$$

mit

$C_2$	Konstante ( $5,768 \cdot 10^{-7} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}^{-1}$ ),
$k_{2,i}$	Dosiskonversionsfaktor (in $\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$ ).

Die Berechnung einzelner Faktoren aus Literaturwerten wird in Abschnitt 3.1 gezeigt. Die Herleitung der Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  findet sich im Anhang A, Gleichung (A.10) bzw. (A.17).

---

<sup>2</sup> Eine Kernumwandlung oder ein Zerfall (engl. nuclear transition (nt)) bzw. deren Anzahl ist dimensionslos, wird jedoch teilweise mit der Einheit Bq·s dargestellt.

### 2.2.2 Berechnung von $Q_B$

Der Pfad  $Q_B$  stellt die externe Exposition der Haut einer Person über 30 min in 1 m Entfernung durch Betastrahlung dar. Es wird angenommen, dass grundsätzlich keine Abschirmung durch das Versandstück mehr vorhanden ist. Dem Inhalt selbst wird noch eine abschirmende Wirkung für Betastrahlung unterstellt. Dieser Abschirmfaktor sei abhängig von der Energie der Betateilchen bei einem angenommenen Absorber mit einer Flächenmasse von  $150 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  und wird als stetige Funktion der Maximalenergie der Betateilchen berechnet. Neben dem kontinuierlichen Betaspektrum werden auch diskrete Elektronen (z. B. Konversionselektronen) betrachtet.

Der Wert  $Q_B$  wird berechnet durch

$$Q_B = \frac{H_{\text{Haut}}}{A \cdot \dot{e}_\beta \cdot t} \quad (2.4)$$

mit

$H_{\text{Haut}}$	Referenzwert der Hautdosis (500 mSv),
$A$	Aktivität des Nuklids (1 Bq),
$\dot{e}_\beta$	Dosisleistungskoeffizient für Betastrahlung (Punktquelle) in 1 m Abstand (in $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ),
$t$	Expositionszeit (0,5 h).

Der Dosisleistungskoeffizient  $\dot{e}_\beta$  wird berechnet über

$$\dot{e}_\beta = \frac{J_{\text{Luft}} \cdot C_2}{f_{\beta_{\text{max}}}} \quad (2.5)$$

mit

$J_{\text{Luft}}$	Dosis in Luft pro Zerfall (Punktquelle) in 1 m Abstand (in $\text{MeV}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ),
$C_2$	Umrechnungsfaktor für $J_{\text{Luft}}$ ( $5,768 \cdot 10^{-7} \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{s}\cdot\text{g}$ ),
$f_{\beta_{\text{max}}}$	Abschirmfaktor für maximale Betaenergie.

Die Konstante  $C_2$  wird in Anhang A Gleichung (A.17) hergeleitet. Der Abschirmfaktor  $f_{\beta_{\text{max}}}$  wird mit

$$f_{\beta_{\text{max}}} = e^{\mu_\beta \cdot d} \quad (2.6)$$

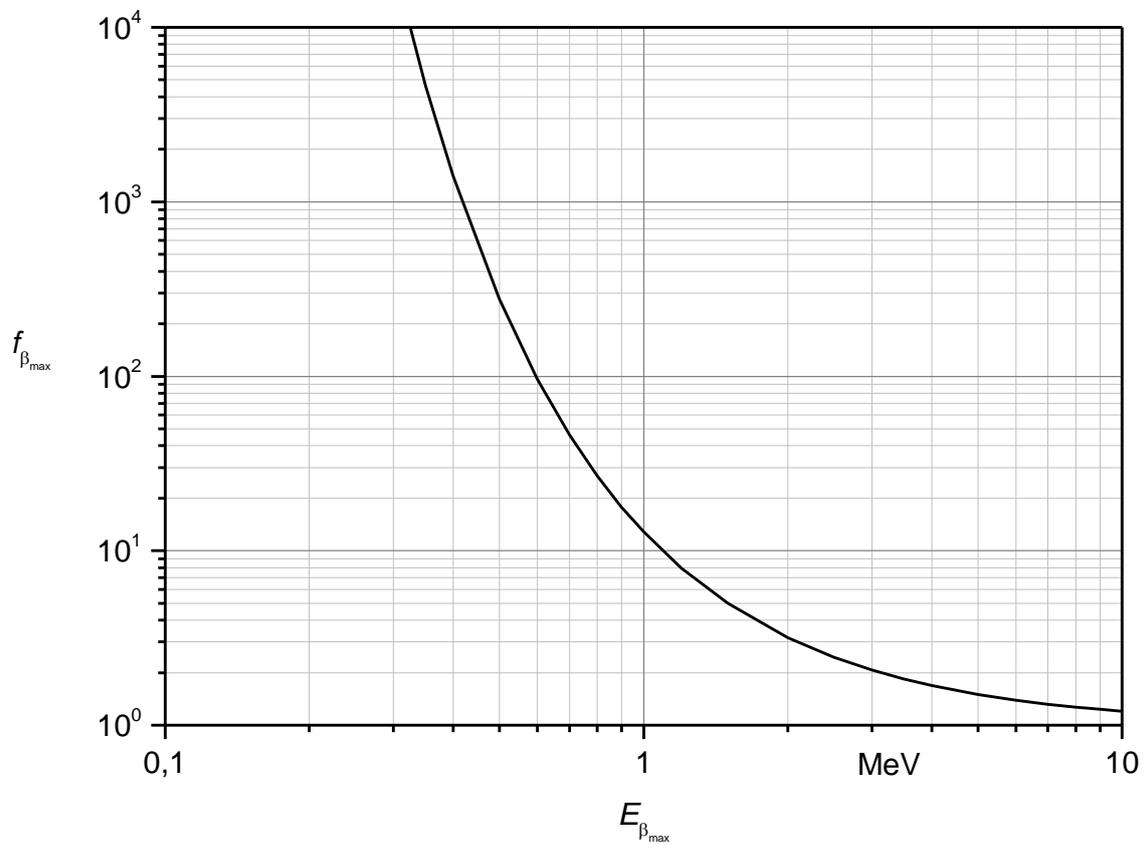
und der Gleichung

$$\mu_{\beta} = 0,017 \cdot E_{\beta_{\max}}^{-1,14} \cdot \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{MeV}^{1,14}}{\text{mg}} \quad (2.7)$$

berechnet /IAEA 90/ mit

- $\mu_{\beta}$             Absorptionskoeffizient (in  $\text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ),  
 $d$                 Flächenmasse des Absorbers ( $150 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  
 $E_{\beta_{\max}}$         maximale Betaenergie (in MeV).

In Abb. 2.2 ist der so berechnete Abschirmfaktor  $f_{\beta_{\max}}$  dargestellt.



**Abb. 2.2** Abschirmfaktor zur Berechnung von  $Q_B$

Die Dosis pro Zerfall  $J(r)$  in Luft für eine Punktquelle wird berechnet durch

$$J_{\text{Luft}}(r_{\text{Luft}}) = \frac{n}{4\pi \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot r_{\text{Luft}}^2} \cdot \int_0^{E_{\beta\text{max}}} N(E_{\beta}) \cdot j\left(\frac{r_{\text{Luft}}}{r_E}, E_{\beta}\right) \cdot \frac{E_{\beta}}{r_E} dE_{\beta} \quad (2.8)$$

mit

$r$  Abstand von der Quelle zum Aufpunkt (in cm),

$r_E$  CSDA-Reichweite im Medium (in cm),

$\rho_{\text{Luft}}$  Dichte der Luft ( $1,205 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ),

$n$  Anzahl emittierter Betateilchen pro Zerfall (in  $\text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$ ),

$E_{\beta\text{max}}$  maximale Betaenergie (in MeV),

$N(E_{\beta})$  normalisiertes Energiespektrum emittierter Betateilchen pro Zerfall (Anzahl der emittierten Elektronen in einem Energiebereich von  $E_{\beta}$  bis  $E_{\beta} + dE_{\beta}$ ) (in  $\text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$ ),

$j\left(\frac{r}{r_E}, E_{\beta}\right)$  dimensionslose Dosisverteilung (Anteil der emittierten Energie, der in der Kugelschale mit einem Radius von  $\frac{r}{r_E}$  bis  $\frac{r}{r_E} + d\left(\frac{r}{r_E}\right)$  deponiert wird).

Die Berechnung einzelner Faktoren aus Literaturwerten wird in Abschnitt 3.2 gezeigt.

### 2.2.3 Berechnung von $Q_C$

Mit dem Pfad  $Q_C$  wird die interne Exposition nach Inhalation radioaktiver Partikel berechnet. Dazu wird ein Unfall unterstellt, bei dem radioaktive Stoffe in die Luft freigesetzt werden. Der Anteil des freigesetzten Inhaltes eines Versandstücks wird mit  $1 \cdot 10^{-3}$  bis  $1 \cdot 10^{-2}$  angegeben, der durch die in der Nähe stehende Person inhalierte Anteil<sup>3</sup> dessen liegt zwischen  $1 \cdot 10^{-4}$  und  $1 \cdot 10^{-3}$ . Daraus wird ein Aufnahmefaktor von  $1 \cdot 10^{-6}$  abgeleitet.

---

<sup>3</sup> Der inhalierte Anteil der freigesetzten radioaktiven Stoffe in Höhe von  $1 \cdot 10^{-3}$  wurde in früheren Versionen des Q-Systems durch folgende Annahmen ermittelt: Es wurde ein Unfall in einer Lagerhalle mit einem Volumen von  $300 \text{ m}^3$  angenommen. In dieser Halle finden vier Luftwechsel pro Stunde statt. Eine Person hält sich nach dem Unfall und der Freisetzung der radioaktiven Stoffe maximal 30 min in dieser Halle auf und hat eine Atemrate von  $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Der Wert  $Q_C$  wird berechnet durch

$$Q_C = \frac{E}{f_{\text{int}} \cdot e_{\text{inh}}} \quad (2.9)$$

mit

$E$	Referenzwert der effektiven Dosis (50 mSv),
$f_{\text{int}}$	Anteil des radioaktiven Stoffes, der freigesetzt und inhaliert wird ( $1 \cdot 10^{-6}$ ),
$e_{\text{inh}}$	Dosiskoeffizient Inhalation für beruflich strahlenexponierte Personen (worker) (in Sv·Bq <sup>-1</sup> ).

Dosiskoeffizienten für Inhalation sind in /IAEA 08/, Appendix II, enthalten. Diese gelten für Partikel mit einem AMAD<sup>4</sup> von 1 µm. Es wird in /IAEA 08/ darauf hingewiesen, dass diese Dosiskoeffizienten nicht in jedem Fall den konservativen Wert darstellen, andere AMAD können zu einem restriktiveren Wert für  $Q_C$  führen. Weiterhin wird grundsätzlich nicht zwischen den unterschiedlichen Lungenabsorptionsklassen<sup>5</sup> unterschieden, es wird der jeweils restriktivste Koeffizient („maximierter“ Dosiskoeffizient) genommen. Eine Ausnahme bilden Uranisotope, hier wird zum Teil die chemische Form durch die Lungenabsorptionsklassen berücksichtigt.

#### 2.2.4 Berechnung von $Q_D$

Mit Hilfe des Pfades  $Q_D$  werden zwei Expositionsszenarien abgedeckt: Zum einen eine Kontamination der Haut durch Betastrahler und zum anderen die Ingestion radioaktiver Stoffe. Der Pfad  $Q_D$  wird für alle Radionuklide mit Ausnahme der Edelgase berechnet.

#### Kontamination der Haut

Es wird angenommen, dass ein Arbeiter ein verunfalltes Versandstück handhabt. Aufgrund des Unfalls sind 1 % des radioaktiven Inhaltes gleichmäßig auf einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> verteilt worden. Daraufhin werden die Hände des Arbeiters – der dem Szenario

---

<sup>4</sup> Der Activity Median Aerodynamic Diameter (AMAD) ist eine Größe die angibt, dass 50 % der in einem Aerosol enthaltenen Aktivität an Partikeln haftet, deren AED größer als der AMAD ist.

<sup>5</sup> Es wird zwischen den Lungenabsorptionsklassen „fast (F)“, „medium (M)“ und „slow (S)“ unterschieden. In Einzelfällen werden zusätzlich noch besondere chemisch-physikalische Zusammensetzungen betrachtet (z. B. „Dampf“ oder bestimmte chemische Verbindungen).

entsprechend keine Handschuhe trägt – mit 10 % des verteilten Inhaltes kontaminiert. Dies führt zu einem Anteil von  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$  des radioaktiven Stoffes, der zur Kontamination der Haut beiträgt. Es wird unterstellt, dass der Arbeiter innerhalb eines Zeitraumes von fünf Stunden entweder die mögliche Kontamination bemerkt oder seine Hände wäscht.

Der Wert  $Q_D$  wird berechnet durch

$$Q_D = \frac{H_{\text{Haut}}}{f_{\text{Haut}} \cdot \dot{h}_{\text{Haut}} \cdot t} \quad (2.10)$$

mit

$H_{\text{Haut}}$  Referenzwert der Hautdosis (500 mSv),

$f_{\text{Haut}}$  Anteil des radioaktiven Stoffes, der auf der Hautfläche verteilt wird ( $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ ),

$\dot{h}_{\text{Haut}}$  Dosisleistungskoeffizient für Hautkontamination (in  $\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ),

$t$  Expositionszeit (5 h).

Neben dem kontinuierlichen Betaspektrum werden auch diskrete Elektronen (z. B. Konversionselektronen) betrachtet.

## Ingestion

Der Pfad  $Q_D$  wird zusätzlich zur Abschätzung einer Ingestionsdosis verwendet. Dabei wird unterstellt, dass die gesamte Kontamination (der Anteil  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$  des radioaktiven Stoffes aus dem verunfallten Versandstück) innerhalb von 24 Stunden verschluckt wird.

Der Ingestionspfad kann berechnet werden mit

$$Q_{D, \text{ing}} = 10^{-6} \cdot Q_D . \quad (2.11)$$

Laut /IAEA 08/ ist die Dosis durch inkorporierte radioaktive Stoffe über den Inhalationspfad im Allgemeinen in der gleichen Größenordnung oder größer als über den Ingestionspfad. In allen anderen Fällen gelte fast immer, dass  $Q_D \ll Q_C$  ist, so dass der Ingestionspfad nicht gesondert betrachtet werden muss.

### 2.2.5 Berechnung von $Q_E$

Für radioaktive gasförmige Stoffe, welche nicht inkorporiert werden (z. B. Edelgase), wird mit Hilfe des Pfades  $Q_E$  eine Dosis durch Submersion berechnet. Es wird unterstellt, dass nach einem Transportunfall der gesamte gasförmige Inhalt des Versandstücks in eine Lagerhalle mit den Dimensionen 3 m × 10 m × 10 m (Volumen  $V = 300 \text{ m}^3$ ) austritt. In dieser Lagerhalle finden vier Luftwechsel pro Stunde statt. Ein Arbeiter hält sich nach diesem Unfall maximal noch 30 min in dieser Atmosphäre auf. Daraus kann die zeitintegrierte Luftkonzentration  $c$  berechnet werden mit

$$\begin{aligned}
 c &= \int_0^t \frac{A(t')}{V} dt' = \\
 &= \frac{A_0}{V} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} = \\
 &= \frac{1 \text{ Bq}}{300 \text{ m}^3} \cdot \frac{1 - e^{-(4 \text{ h}^{-1} \cdot 30 \text{ min})}}{4 \text{ h}^{-1}} = \\
 &= 2,6 \frac{\text{Bq} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}.
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Es werden sowohl die effektive Dosis als auch die Hautdosis für das jeweilige Nuklid berechnet. Der Wert  $Q_E$  wird berechnet durch

$$Q_E = \min\{Q_{E, \text{eff}}, Q_{E, \text{Haut}}\} \tag{2.13}$$

wobei  $Q_{E, \text{eff}}$  und  $Q_{E, \text{Haut}}$  berechnet werden durch

$$Q_{E, \text{eff}} = \frac{E}{c \cdot h_{\text{subm, eff}}} \tag{2.14}$$

bzw.

$$Q_{E, \text{Haut}} = \frac{H_{\text{Haut}}}{c \cdot h_{\text{subm, Haut}}} \tag{2.15}$$

mit

- $E$  Referenzwert der effektiven Dosis (50 mSv),
- $H_{\text{Haut}}$  Referenzwert der Hautdosis (500 mSv),
- $c$  zeitintegrierte Luftkonzentration ( $2,6 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ ),
- $h_{\text{subm, eff}}$  Dosiskoeffizient Submersion für effektive Dosis (in  $\text{Sv} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ),
- $h_{\text{subm, Haut}}$  Dosiskoeffizient Submersion für Hautdosis (in  $\text{Sv} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Es wurden zur Berechnung der Werte des Pfades  $Q_E$  in /IAEA 08/ die Dosiskoeffizienten aus /EPA 93/ für eine semi-infinite Wolke genutzt.

Der Submersionspfad ist gemäß dem Q-System strenggenommen nur für Edelgase anzuwenden, die nicht inkorporiert werden und deren Folgeprodukte entweder auch Edelgase oder aber stabile Nuklide sind. Für andere Nuklide wird im Q-System der Submersionspfad nicht betrachtet. Derzeit wird das Isotop  $^{222}\text{Rn}$  abweichend vom Pfad  $Q_E$  gesondert betrachtet (s. Abschnitt 2.4.4). Für das Nuklid  $^{37}\text{Ar}$  wird  $Q_E$  ebenfalls nicht berechnet, da die Energien zu schwach sind, um die Basalschicht der Haut zu erreichen, stattdessen wird  $Q_D$  ermittelt (vgl. auch Erläuterungen in /ICRP 94/, S. 18 f.).

### 2.2.6 Berechnung von $Q_F$

Da viele Alphastrahler Photonen oder Elektronen mit relativ geringen Energien emittieren, können deren Beiträge über die Pfade  $Q_A$  und  $Q_B$  gering sein. Daher wird für Alphastrahler zusätzlich der Wert  $Q_F$  berechnet durch

$$Q_F = 10^4 \cdot Q_C. \quad (2.16)$$

In /IAEA 08/ wird dieser Wert in der Spalte für  $Q_A$  angegeben, sofern es sich um einen Alphastrahler handelt und der Wert für  $Q_F$  restriktiver ist. Als Alphastrahler werden gemäß /IAEA 08/ solche Nuklide betrachtet, die mit einem Anteil von mehr als  $1 \cdot 10^{-3}$  ihrer Zerfälle Alphateilchen emittieren oder selbst zu einem Alphastrahler zerfallen.

### 2.3 Berechnung der A-Werte

Aus den vorgenannten Q-Werten werden die A-Werte gebildet. Diese werden berechnet für radioaktive Stoffe in besonderer Form durch

$$A_1 = \begin{cases} \min\{Q_A, Q_B, Q_F\} & \text{für Alphastrahler} \\ \min\{Q_A, Q_B\} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.17)$$

und für radioaktive Stoffe nicht in besonderer Form durch

$$A_2 = \begin{cases} \min\{Q_C, Q_E, A_1\} & \text{für Edelgase} \\ \min\{Q_C, Q_D, A_1\} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.18)$$

Für einige Nuklide werden die  $A$ -Werte nicht mit den angegebenen Formeln berechnet, sondern aufgrund zusätzlicher Annahmen festgelegt. Diese Ausnahmen werden im folgenden Abschnitt behandelt.

## **2.4 Besondere Berechnungen und Annahmen**

Neben den bisherigen Rechenvorschriften beinhaltet das Q-System weitere Regelungen und Ausnahmen. Diese werden im Folgenden behandelt.

### **2.4.1 Neutronenstrahler**

In früheren Ausgaben des Q-Systems ging man davon aus, dass Neutronenstrahler nicht wesentlich zur Gesamtdosis beitragen. Im derzeitigen Q-System in /IAEA 08/ werden ausgewählte Neutronenstrahler gesondert berechnet. Dies betrifft die Nuklide  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Cf}$  und  $^{248}\text{Cm}$ . In der Vergangenheit wurde zuerst  $^{252}\text{Cf}$  ein spezieller Wert für den Pfad  $Q_A$  zugewiesen, dieser betrug zunächst  $9,5 \cdot 10^{-2}$  TBq. 1996 wurde er gesenkt auf  $4,7 \cdot 10^{-2}$  TBq. Im derzeit gültigen Q-System von 2008 ist der  $A_1$ -Wert auf  $1 \cdot 10^{-1}$  TBq gesetzt, der  $Q_A$ -Wert ist mit  $1,3 \cdot 10^{-1}$  TBq angegeben.

Die beiden anderen Nuklide  $^{254}\text{Cf}$  und  $^{248}\text{Cm}$  werden mit ihren  $Q_A$ -Werten in Relation zum  $Q_A$ -Wert von  $^{252}\text{Cf}$  gesetzt, bezogen auf die jeweiligen Anteile der Emissionen von Neutronen. Es wird dadurch für alle drei Nuklide der gleiche Dosiskonversionsfaktor angenommen. Gemäß Table I.2 in /IAEA 08/ beträgt der  $Q_A$ -Wert von  $^{254}\text{Cf}$   $1,4 \cdot 10^{-3}$  TBq und von  $^{248}\text{Cm}$   $1,8 \cdot 10^{-2}$  TBq.

Die Vorgehensweise zur Berechnung des Anteils von Neutronen an der Dosis aller drei Nuklide wird in /ECK 01/ beschrieben. Es wurden für den Pfad  $Q_A$  die jeweiligen Anteile am Dosisfaktor durch Spaltneutronen, aufgrund der Spontanspaltung entstehenden prompten und verzögerten Gammaquanten sowie beim Alphazerfall der Nuklide entstehender Photonen berechnet und in einem gemeinsamen Faktor summiert. Die so ermittelten  $A_1$ -Werte sind in Tab. 2.1 dargestellt.

**Tab. 2.1** Vergleich der  $A_1$ -Werte berechnet nach /ECK 01/ und aufgelistet in /IAEA 08/

Nuklid	PATRAM 2001		TS-G-1.1 (2008)	
	$A_1$ (TBq)	$A_2$ (TBq)	$A_1$ (TBq)	$A_2$ (TBq)
$^{248}\text{Cm}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$
$^{252}\text{Cf}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$^{254}\text{Cf}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Ob die Unterschiede der  $A_1$ -Werte bei den Nukliden  $^{248}\text{Cm}$  und  $^{254}\text{Cf}$  zwischen /ECK 01/ und /IAEA 08/ auf einer späteren Neuberechnung beruhen oder nicht in die Transportvorschriften übernommen wurden, wird in /IAEA 08/ nicht erläutert.

#### 2.4.2 Bremsstrahlung

Zur Berücksichtigung von Bremsstrahlung wurde 1973 eine willkürliche Grenze für  $A_1$ - und  $A_2$ -Werte bei 1000 Ci festgelegt; diese wurde später auf 40 TBq gesetzt. Eine spezielle Berechnung im Zuge der Berechnung der einzelnen Pfade (insbesondere  $Q_A$  und  $Q_B$ ) wird derzeit nicht durchgeführt. In /IAEA 08/ wird erwähnt, dass eine solche Berücksichtigung für einzelne Nuklide eine obere Grenze der  $A_1$ - und  $A_2$ -Werte schon bei 20 TBq nach sich ziehen könnte.

#### 2.4.3 Tritium und Tritiumverbindungen

Tritium ( $^3\text{H}$ ) und Tritiumverbindungen werden im Q-System gesondert betrachtet. Es wird angenommen, dass sie als Flüssigkeit vorliegen. Entsprechend wurde für das Freisetzungsszenario angenommen, dass eine größere Menge tritiiertes Wasser eine Lache bildet und anschließend ein Brand stattfindet /IAEA 08/. 1985 wurde im Q-System der  $A_2$ -Wert für tritiierte Flüssigkeiten auf 40 TBq begrenzt, dies wurde im aktuellen System beibehalten.

#### 2.4.4 Radon und Radonfolgeprodukte

Das Radonisotop  $^{222}\text{Rn}$  wird aufgrund seiner besonderen Eigenschaften bzw. wegen seiner Zerfallsprodukte einer speziellen Betrachtung unterzogen. Es ist zwar ein Edelgas und könnte somit gemäß den Formeln für den Pfad  $Q_E$  (Submersion) berechnet

werden, allerdings sind seine Folgeprodukte keine stabilen Nuklide. Zudem tragen Radonfolgeprodukte in einem besonderen Maße zur Lungendosis bei.

In den Transportvorschriften von 1985 wurde für  $^{222}\text{Rn}$  der Pfad  $Q_C$  mit 3,6 TBq berechnet /IAEA 08/. Unter der Annahme dass – entgegen dem Szenario für den Pfad  $Q_C$ , bei welchem ein Anteil von  $1 \cdot 10^{-3}$  bis  $1 \cdot 10^{-2}$  freigesetzt wird – das gesamte  $^{222}\text{Rn}$  freigesetzt wird, ergäbe sich für  $Q_C$  ein Wert zwischen  $3,6 \cdot 10^{-3}$  TBq und  $3,6 \cdot 10^{-2}$  TBq. Die Berechnung des Pfades  $Q_E$  für  $^{222}\text{Rn}$  inkl. seiner Töchter ergab einen Wert von  $4,2 \cdot 10^{-3}$  TBq und entspricht ungefähr der unteren Grenze des Pfades  $Q_C$ . Der Wert von  $Q_E$  wurde genutzt, um den  $A_2$ -Wert für  $^{222}\text{Rn}$  bei  $4 \cdot 10^{-3}$  TBq festzulegen.

#### 2.4.5 LSA-Stoffe

Stoffe mit geringer spezifischer Aktivität (LSA, low specific activity) bilden innerhalb der Transportvorschriften /IAEA 12/ eine spezielle Gruppe. Während das Q-System sich auf Aktivitäten bezieht, werden LSA-Stoffe nach ihrer spezifischen Aktivität, d. h. Aktivität pro Masse, gruppiert:

- LSA-I  
z. B. Uranium- und Thoriumerze oder Stoffe, deren  $A_2$ -Wert „unlimited“ ist
- LSA-II  
z. B. Stoffe, deren spezifische Aktivität  $1 \cdot 10^{-4} A_2/g$  (bzw.  $1 \cdot 10^{-5} A_2/g$  für Flüssigkeiten) nicht übersteigt
- LSA-III  
z. B. feste Stoffe, deren spezifische Aktivität  $2 \cdot 10^{-3} A_2/g$  nicht übersteigt

Diese Angaben verdeutlichen, dass sich die Definition von LSA-Stoffen direkt auf das Q-System bezieht, und zwar auf den  $A_2$ -Wert, und dass es innerhalb des Q-Systems speziell für LSA-Stoffe  $A$ -Werte gibt, die mit „unlimited“ gekennzeichnet sind.

Die Definition der LSA-Stoffe beruht auf einem Modell, nachdem es nach einem Unfall und der Freisetzung radioaktiver Stoffe als sehr unwahrscheinlich angesehen wird, dass sich eine Person in der entstandenen staubigen Atmosphäre für längere Zeit aufhält (s. para 226.1 /IAEA 08/). Es wird unterstellt, dass die betroffene Person dadurch nicht mehr als 10 mg des freigesetzten radioaktiven Stoffes inhalieren kann. Die weitere Verknüpfung mit dem Q-System erfolgt, indem angenommen wird, dass bei LSA-

Stoffen und ihrer definierten spezifischen Aktivität durch Inhalation dieser maximal 10 mg nicht mehr Aktivität in den Körper gelangt, als nach einem Unfall<sup>6</sup> mit einem Typ A-Versandstück aufgrund der dann freigesetzten Aktivität und dem Aufnahmefaktor in den Körper einer Person gelangen könne, d. h.  $1 \cdot 10^{-6} A_2$  (s. Abschnitt 2.2.3). Hierbei wird angenommen, dass der Pfad  $Q_C$  der für den  $A_2$ -Wert begrenzende ist bzw. dass umgekehrt die Definition der spezifischen Aktivität bei LSA-Stoffen konservativ ist für diejenigen Radionuklide, bei denen ein anderer als der Pfad  $Q_C$  den  $A_2$ -Wert bestimmt /GRS 11/.

Auf dieser Grundlage wird in /IAEA 08/ das LSA-Kriterium für den Pfad  $Q_C$  mit  $1 \cdot 10^{-4} Q_C/g$  definiert. Nuklide, deren spezifische Aktivität unter diesem Kriterium liegt, werden für den Pfad  $Q_C$  als „unlimited“ geführt.

In analoger Weise wird der Pfad  $Q_D$  betrachtet: Es wird angenommen, dass 1...10 mg/cm<sup>2</sup> als erkennbare Verschmutzung (unabhängig von einer möglichen Kontamination mit Radionukliden) auf der Haut auftreten kann, welche dann sofort weggewischt oder abgewaschen wird /IAEA 08/. Damit ergibt sich – unter Zugrundelegung von 10 mg/cm<sup>2</sup> als Kontamination – mit dem Modell der Hautkontamination des Q-Systems (s. Abschnitt 2.2.4) ein LSA-Kriterium für den Pfad  $Q_D$  mit  $1 \cdot 10^{-5} Q_D/g$ . Nuklide, deren spezifische Aktivität unter diesem Kriterium liegt, werden für den Pfad  $Q_D$  als „unlimited“ geführt.

---

<sup>6</sup> Es wird in /IAEA 08/ von einem „median accident“ gesprochen. Dieser Begriff wird im aktuellen Q-System nicht mehr verwendet. Weiterführende Erläuterungen bezüglich der Verknüpfung von LSA-Stoffen mit dem Q-System und der historischen Entwicklung sind in /GRS 11/ enthalten.



### 3 Programmentwicklung zur Berechnung der $A_1/A_2$ -Werte

Zur Berechnung von  $A_1/A_2$ -Werten wurde ein Rechenprogramm entwickelt. Dieses basiert auf dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2010 und ist in Excel-VBA-Code geschrieben. Das Programm besteht aus mehreren Modulen.

Die Berechnung der  $Q_A$ -,  $Q_B$ - und  $Q_D$ -Werte kann im Programm wahlweise für Nuklid-daten der ICRP 38 /ICRP 83/ und der ICRP 107 /ICRP 08/ durchgeführt werden. Grundlage sind Datenbibliotheken bzw. Rechenprogramme, die auf den Daten der ICRP beruhen: für die ICRP 38 das Programm DEXRAX /ORNL 03/ und für die ICRP 107 das Programm DECADATA /ECK 08/. Die ICRP 38 enthält Daten zu 838 Nukliden von 98 Elementen, die ICRP 107 enthält aktualisierte Daten zu 1252 Nukliden von 97 Elementen.

Für die Berechnung der  $Q_C$ - und  $Q_E$ -Werte wurde auf tabellierte Dosiskoeffizienten der ICRP 68 /ICRP 94/ und ICRP 119 /ICRP 12/ bzw. der US Environmental Protection Agency (EPA) /EPA 93/ zurückgegriffen.<sup>7</sup> Die ICRP 68 enthält Daten zu 738 Nukliden und die Datenbank der Radiological Toolbox /NRC 06/ zu Submersionsdosiskoeffizienten, die auf /EPA 93/ basiert, enthält 825 Nuklide. Bereits dadurch kann ein deutlich größerer Umfang an Nukliden abgedeckt werden, im Vergleich zu den in den Transportvorschriften tabellierten  $Q$ - und  $A$ -Werten für 369 Nuklide.

Die Bezeichnung der Nuklide ist in den genutzten Quellen nicht immer einheitlich. Neben der heute üblichen Unterscheidung kurz- und langlebiger Zustände eines Isotops mit einem an die Massenzahl angehängtem kleinem „m“ für metastabil finden sich in den zitierten Quellen auch Bezeichnungen mit nachgestelltem „a“ bzw. „b“ oder „short“ und „long“ etc. Zur Vereinheitlichung und für den reibungslosen Ablauf des Rechenprogrammes wurden die Bezeichnungen wie folgt vereinheitlicht: Nuklide, welche im Rechenprogramm berechnet werden sollen, werden mit dem Elementnamen (großer Anfangsbuchstabe, ggf. kleiner Zweitbuchstabe) und der Massenzahl (ggf. statt der Massenzahl einem speziellen Bezeichner bei Nuklidgemischen, siehe Tab. 3.1) verbunden durch einen Bindestrich geschrieben, z. B. Eu-150. Metastabile Zustände werden entsprechend mit einem nachgestelltem kleinen „m“ gekennzeichnet, z. B.

---

<sup>7</sup> Die Dosiskoeffizienten zur Berechnung des Pfades  $Q_C$  wurden aus /IAEA 03/ (Schedule II, Table II-III) extrahiert, der Dosiskoeffizient für Ra-226 wurde gemäß /ICRP 94/ angepasst.

Eu-150m. Sofern ein zweiter metastabiler Zustand in den Daten enthalten ist, wird dieser durch ein nachgestelltes kleines „n“ bezeichnet, z. B. Ir-190n. Grundlage zur Zuordnung älterer Nuklid Schreibweisen zum Grundzustand und zum metastabilen Zustand war /ECK 08/, die betroffenen Nuklide aus /ORNL 03/, /ICRP 94/ und /EPA 93/ sind in Tab. 3.2 aufgeführt. Die Zuordnung in Tab. 3.1 stimmt auch mit den Angaben in /ICRP 12/ (Table 2.3) überein. Andere Schreibweisen im Rechenprogramm sind nicht möglich, eine Berechnung des betreffenden Nuklids kann dann nicht erfolgen.

**Tab. 3.1** Schreibweise der Nuklidgemische im Rechenprogramm

Nuklidgemisch	Schreibweise im Excel-Programm
Rubidium in natürlicher Zusammensetzung	Rb-nat
Rhenium in natürlicher Zusammensetzung	Re-nat
Thorium in natürlicher Zusammensetzung	Th-nat
Uran in natürlicher Zusammensetzung	U-nat
abgereichertes Uran	U-dep
angereichertes Uran (20 % $^{235}\text{U}$ )	U-enr

**Tab. 3.2** Schreibweise spezieller Nuklidnamen im Rechenprogramm

Bezeichnung	Halbwertszeit	Schreibweise im Excel-Programm
Eu-150a	12,62 h	Eu-150m
Eu-150b	34,2 a	Eu-150
In-110a	69,1 min	In-110m
In-110b	4,9 h	In-110
Ir-186a	15,8 h	Ir-186
Ir-186b	1,75 h	Ir-186m
Nb-89a	66 min	Nb-89m
Nb-89b	122 min	Nb-89
Np-236a	$1,15 \cdot 10^5$ a	Np-236
Np-236b	22,5 h	Np-236m
Re-182a	12,7 h	Re-182m
Re-182b	64 h	Re-182
Sb-120a	15,89 min	Sb-120
Sb-120b	5,76 d	Sb-120m
Sb-128a	10,4 min	Sb-128m
Sb-128b	9,01 h	Sb-128
Ta-178a	9,31 min	Ta-178
Ta-178b	2,2 h	Ta-178m

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Berechnungen erläutert, die in der Beschreibung des Q-Systems in /IAEA 08/ nicht näher ausgeführt werden. Dazu wurden auch die Berichte /ANPA 94/ und /HPA 11/ ausgewertet. Im Rahmen dieser beiden Arbeiten wurden 1994 die  $Q_A$ -, und  $Q_B$ -Werte bzw. 2011 alle Q-Werte neu berechnet bzw. nachgerechnet.

Im Rahmen der Programmentwicklung mussten auch Interpolationsfunktionen nachgerechnet oder neu erstellt werden. Diese Funktionen wurden mit dem Analyseprogramm OriginPro (Versionen 8.6.0G und 9.0.0G) der OriginLab Corporation berechnet.

### **3.1 Berechnung von $Q_A$**

Neben den in den Datensammlungen enthaltenen Werten zu Energien der Photonen bei Übergängen bzw. Zerfällen und deren Emissionswahrscheinlichkeiten sind zur Berechnung von Gleichung (2.2) bzw. (2.3) weitere Größen notwendig, deren Bestimmung in den nachfolgenden Unterabschnitten beschrieben wird.

Die Berechnung der nachfolgenden Größen im Excel-Programm erfolgt mit Interpolationsfunktionen. Deren Interpolationsparameter sind jeweils nur für bestimmte Energiebereiche erstellt worden. Zusammenfassend werden daher die Dosisleistungskoeffizienten im Rechenprogramm für einen Energiebereich der Photonen zwischen 1 keV und 10 MeV berechnet. Das obere Abschneidekriterium bewirkt derzeit keine Einschränkungen, da die höchsten in /ECK 08/ erfassten und zur Berechnung verwendeten Photonenenergien knapp unter 10 MeV liegen.

#### **3.1.1 Massenenergieabsorptionskoeffizient**

Werte für Massenenergieabsorptionskoeffizienten  $\frac{\mu_{en}}{\rho}$  in Luft sind von Hubbel 1982 /HUB 82/ berechnet worden. Diese Werte werden ebenfalls von /ANPA 94/ und /HPA 11/ genutzt. Die Werte von Hubbel sind ebenfalls im Internet durch das National Institute of Standards and Technology (NIST) veröffentlicht worden /NIST 04/. Deren Massenenergieabsorptionskoeffizienten für Luft<sup>8</sup> sind für die Berechnungen verwendet worden (Anhang C, Tab. C.1). Zur Interpolation zwischen den tabellierten Werten wur-

---

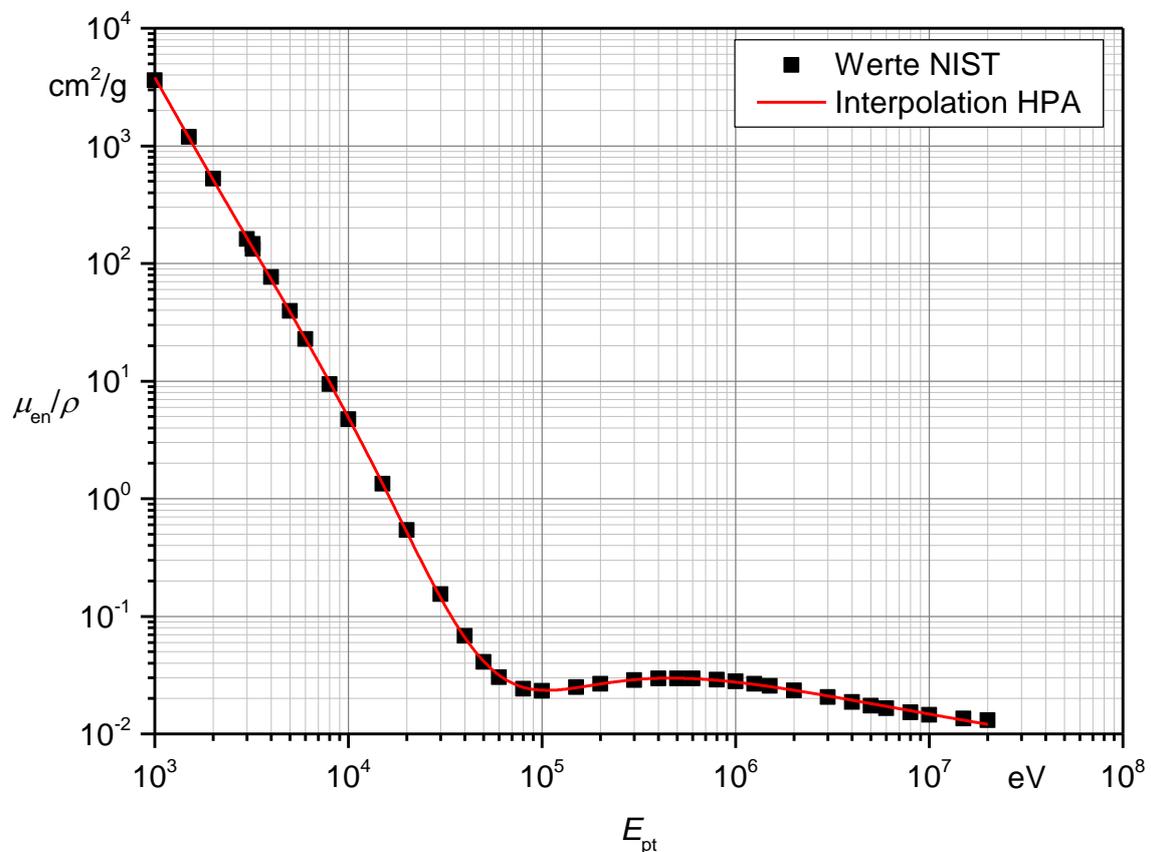
<sup>8</sup> Die Zahlenwerte entstammen der Kategorie „Air, Dry (near sea level)“.

de die Interpolationsfunktion aus /HPA 11/ genutzt, die entsprechende Funktion aus /ANPA 94/ konnte mit den dort angegebenen Parametern nicht reproduziert werden.

Die Funktion lautet

$$\lg\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right) = \frac{a_5 \cdot x^5 + a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^1 + a_0}{b_5 \cdot x^5 + b_4 \cdot x^4 + b_3 \cdot x^3 + b_2 \cdot x^2 + b_1 \cdot x^1 + b_0} \quad (3.1)$$

mit  $x = \lg E_{\text{pt}}$ ,  $[E_{\text{pt}}] = \text{eV}$ ,  $\left[\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right] = \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$  und den Parametern in Tab. 3.3. Die genutzten Werte von Hubbel sowie die Interpolationsfunktion sind in Abb. 3.1 dargestellt.



**Abb. 3.1** Werte für den Massenenergieabsorptionskoeffizienten in Luft nach /NIST 04/ und Interpolationsfunktion nach /HPA 11/

**Tab. 3.3** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Massenenergieabsorptionskoeffizienten /HPA 11/

Parameter	Wert	Parameter	Wert
$a_5$	0,019626	$b_5$	-0,007719
$a_4$	-1,1702	$b_4$	0,402538
$a_3$	12,3564	$b_3$	-4,1864
$a_2$	-39,6652	$b_2$	18,1687
$a_1$	-13,44	$b_1$	-40,6171
$a_0$	179,3046	$b_0$	47,7859

Die Interpolationsfunktion nach Gleichung (3.1) deckt einen Wertebereich von  $E_{\text{pt}} = 1 \text{ keV} \dots 20 \text{ MeV}$  ab.

### 3.1.2 Linearer Schwächungskoeffizient

Der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu$  wird aus dem Massenschwächungskoeffizienten mit der Dichte  $\rho_{\text{Luft}} = 1,205 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  berechnet. Werte für Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho}$  in Luft sind von Hubbel 1982 /HUB 82/ berechnet worden. Diese Werte werden ebenfalls von /ANPA 94/ und /HPA 11/ genutzt. Die Werte von Hubbel sind auch im Internet durch das NIST veröffentlicht worden /NIST 04/. Deren Massenschwächungskoeffizienten in Luft<sup>9</sup> sind für die Berechnungen verwendet worden (Anhang C, Tab. C.2). Zur Interpolation zwischen den tabellierten Werten wurde die Interpolationsfunktion aus /HPA 11/ genutzt, die entsprechende Funktion aus /ANPA 94/ konnte mit den dort angegebenen Parametern nicht reproduziert werden. Die Funktion lautet

$$\lg\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{a_5 \cdot x^5 + a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^1 + a_0}{b_6 \cdot x^6 + b_5 \cdot x^5 + b_4 \cdot x^4 + b_3 \cdot x^3 + b_2 \cdot x^2 + b_1 \cdot x^1 + b_0} \quad (3.2)$$

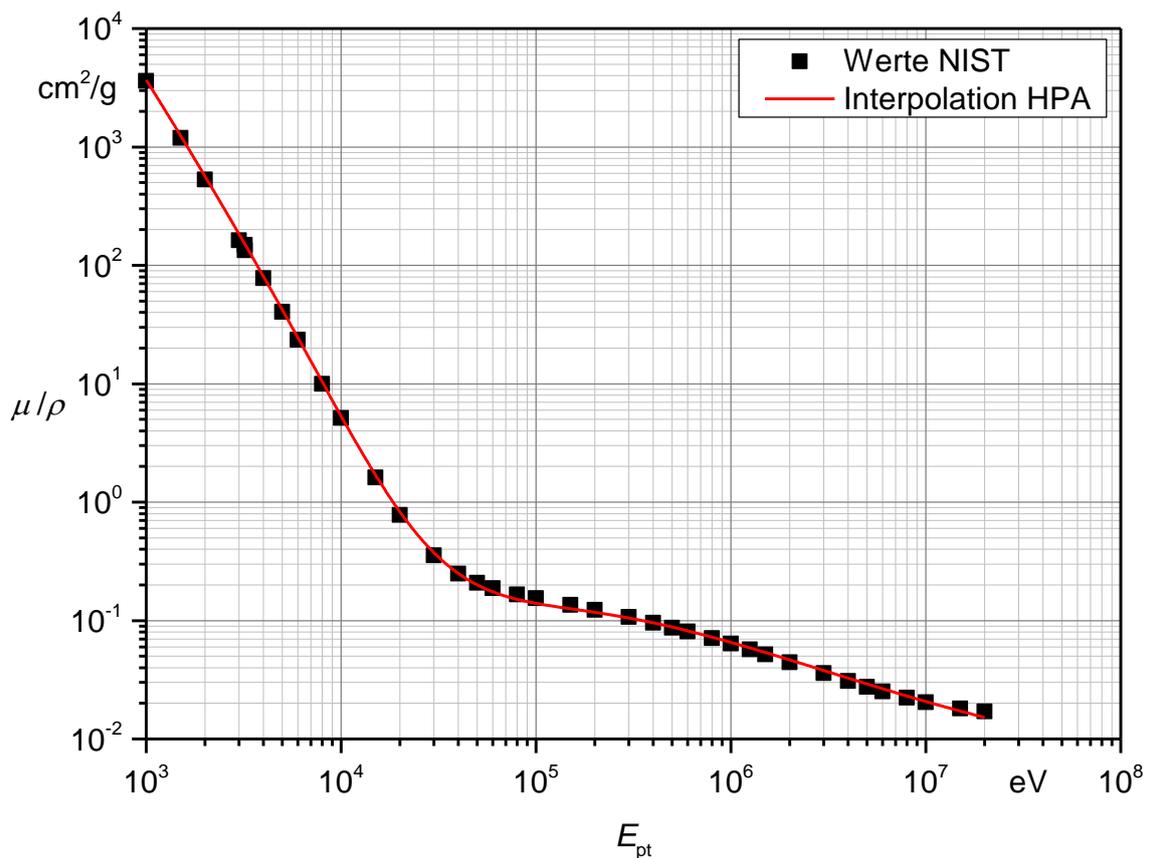
mit  $x = \lg E_{\text{pt}}$ ,  $[E_{\text{pt}}] = \text{eV}$ ,  $\left[\frac{\mu}{\rho}\right] = \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$  und den Parametern in Tab. 3.4.

<sup>9</sup> Die Zahlenwerte entstammen der Kategorie „Air, Dry (near sea level)“.

**Tab. 3.4** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Massenschwächungskoeffizienten /HPA 11/

Parameter	Wert	Parameter	Wert
$a_5$	0,036271	$b_6$	0,002140
$a_4$	-1,0530	$b_5$	-0,064373
$a_3$	10,8707	$b_4$	0,787644
$a_2$	-51,5158	$b_3$	-4,7476
$a_1$	111,3816	$b_2$	14,7258
$a_0$	-84,0828	$b_1$	-22,4831
–	–	$b_0$	14,3532

Die Werte von Hubbel sowie die Interpolationsfunktion sind in Abb. 3.2 dargestellt. Die Interpolationsfunktion nach Gleichung (3.2) deckt einen Wertebereich von  $E_{pt} = 1 \text{ keV} \dots 20 \text{ MeV}$  ab.



**Abb. 3.2** Werte für den Massenschwächungskoeffizienten in Luft nach /NIST 04/ und Interpolationsfunktion nach /HPA 11/

### 3.1.3 Aufbaufaktor

Die Berechnung der Aufbaufaktoren  $B$  in Luft erfolgte in /ANPA 94/ durch:

$$B(E_{\text{pt}}, x) = \begin{cases} 1 + (b - 1) \cdot \frac{K^x - 1}{K - 1} & \text{für } K \neq 1 \\ 1 + (b - 1) \cdot x & \text{für } K = 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

mit

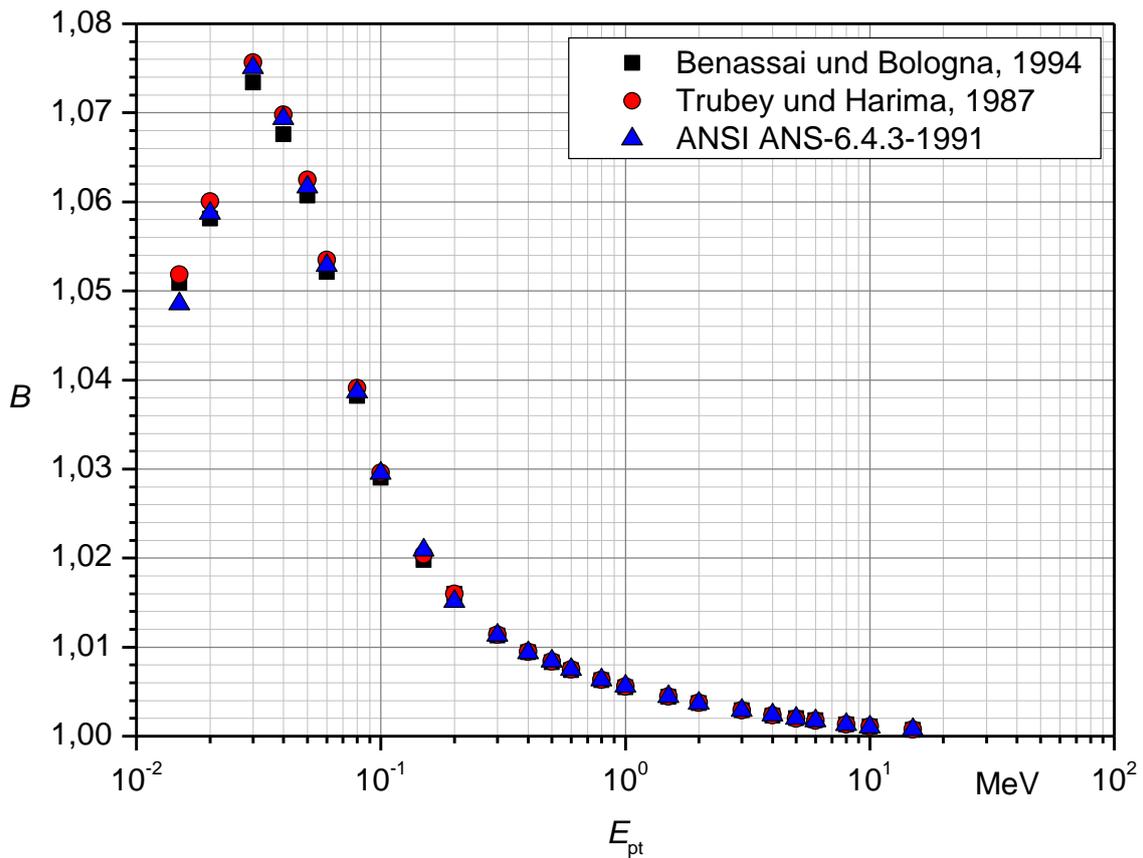
$$K(x) = cx^a + d \cdot \frac{\tanh\left(\frac{x}{X_k} - 2\right) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (3.4)$$

und

- $x$  Abstand von der Quelle zum Detektor (in Anzahl der *mfp*),
- $b$  Aufbaufaktor für 1 *mfp*,
- $K$  Multiplikationsfaktor,
- $a, c, d, X_k$  Interpolationsparameter.

Die Gleichungen (3.3) und (3.4) sowie die entsprechenden Parameter sind /TRU 87/ entnommen. Die berechneten Werte sind in /ANPA 94/ im Anhang tabelliert. Der Abstand  $x$  ist hier in der „Einheit“ Anzahl der *mfp* (mean free path, mittlere freie Weglänge) anzugeben. Die mittlere freie Weglänge  $\lambda_{\text{eff}}$  kann berechnet werden durch  $\lambda_{\text{eff}} = \frac{1}{\mu}$  und hat die Dimension einer Länge. Die Anzahl der *mfp* ergibt sich durch Multiplikation von  $\mu$  mit dem Abstand der Quelle vom Detektor und ist dimensionslos. Mit o. g. Gleichungen und Parametern wurden die Aufbaufaktoren neu berechnet und mit den tabellierten Werten aus /ANPA 94/ verglichen (Abb. 3.3). Zusätzlich wurden berechnete Werte nach tabellierten Parametern aus /ANSI 91/ dargestellt. Die Rechnungen wurden jeweils für einen Abstand zwischen Quelle und Detektor von 100 cm durchgeführt.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Aufbaufaktoren, kleinere Abweichungen sind hin zu kleinen Energien zu sehen. Für die weiteren Betrachtungen wurden die tabellierten Werte aus /ANPA 94/ genutzt (Anhang C, Tab. C.3). Zur Interpolation zwischen den tabellierten Werten wurden eigene Interpolationsfunktionen genutzt, die entsprechende Funktionen aus /ANPA 94/ konnte mit den dort angegebenen Parametern nicht reproduziert werden, ebenfalls nicht die Funktion aus /HPA 11/ für den Energiebereich zwischen 15 keV und 20 keV.



**Abb. 3.3** Vergleich der Aufbaufaktoren in Luft, tabelliert in /ANPA 94/ sowie berechnet nach /TRU 87/ bzw. /ANSI 91/ bei einem Abstand Quelle zu Detektor von 100 cm

Für den Energiebereich 15 keV bis 20 keV wurde die Funktion

$$B = a_1 \cdot x + a_0 \quad (3.5)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{pt}$ ,  $[E_{pt}] = \text{MeV}$  und den Parametern in Tab. 3.5.

**Tab. 3.5** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Aufbaufaktor, Energiebereich 15 keV bis 20 keV

Parameter	Wert
$a_1$	0,0576
$a_0$	1,156

Für den Energiebereich 20 keV bis 15 MeV wurde die Funktion

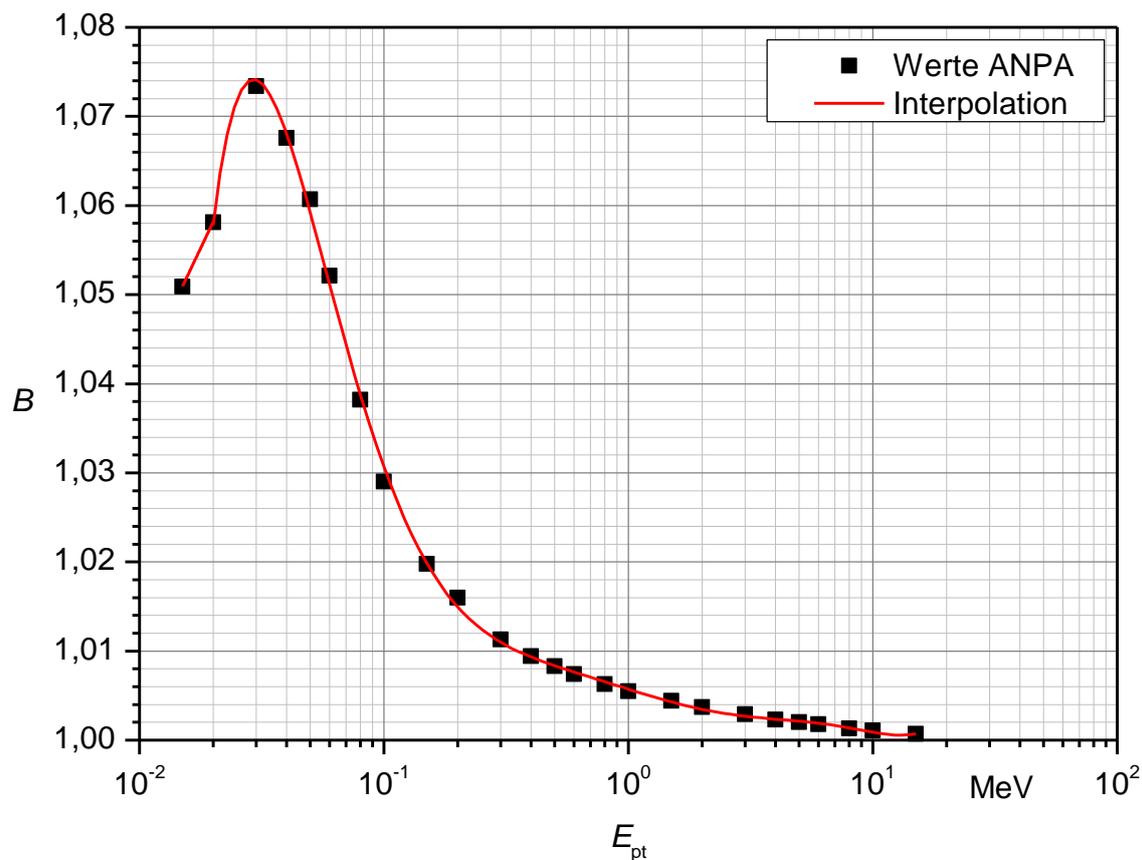
$$B = b_7 \cdot x^7 + b_6 \cdot x^6 + b_5 \cdot x^5 + b_4 \cdot x^4 + b_3 \cdot x^3 + b_2 \cdot x^2 + b_1 \cdot x + b_0 \quad (3.6)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{\text{pt}}, [E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$  und den Parametern in Tab. 3.6.

**Tab. 3.6** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Aufbaufaktor, Energiebereich 20 keV bis 15 MeV

Parameter	Wert
$b_7$	0,00655
$b_6$	-0,00108
$b_5$	-0,01961
$b_4$	0,00998
$b_3$	0,00674
$b_2$	0,00118
$b_1$	-0,00858
$b_0$	1,00572

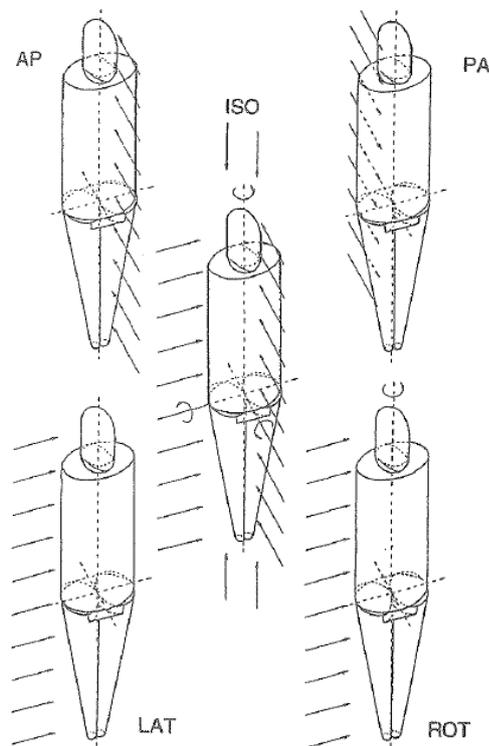
Für Energien kleiner 15 keV wurde analog zu /ANPA 94/ und /HPA 11/  $B = 1,05$  gesetzt. Aufbaufaktoren und Interpolationsfunktionen sind auch in Abb. 3.4 dargestellt.



**Abb. 3.4** Werte für den Aufbaufaktor in Luft nach /ANPA 94/ und Interpolationsfunktionen

### 3.1.4 Dosiskonversionsfaktoren

Die Werte für den Dosiskonversionsfaktor  $k_1$  mit  $[k_1] = \frac{\text{Sv}}{\text{R}}$  sind /ICRP 87/ entnommen (Anhang C, Tab. C.4). Sie beruhen auf der Annahme einer isotropen Verteilung des Strahlungsfeldes in Bezug auf das Phantom (s. Abb. 3.5, Mitte). Weshalb diese Verteilung für die Berechnung der Exposition durch eine Punktquelle genutzt wurde, ist in /ANPA 94/ nicht weiter ausgeführt worden.<sup>10</sup> In Abb. 3.6 sind Dosiskonversionsfaktoren aus /ICRP 87/ für verschiedene Strahlungsfelder<sup>11</sup> dargestellt; die Werte für ISO entsprechen den Dosiskonversionsfaktoren, die für  $k_1$  verwendet werden.



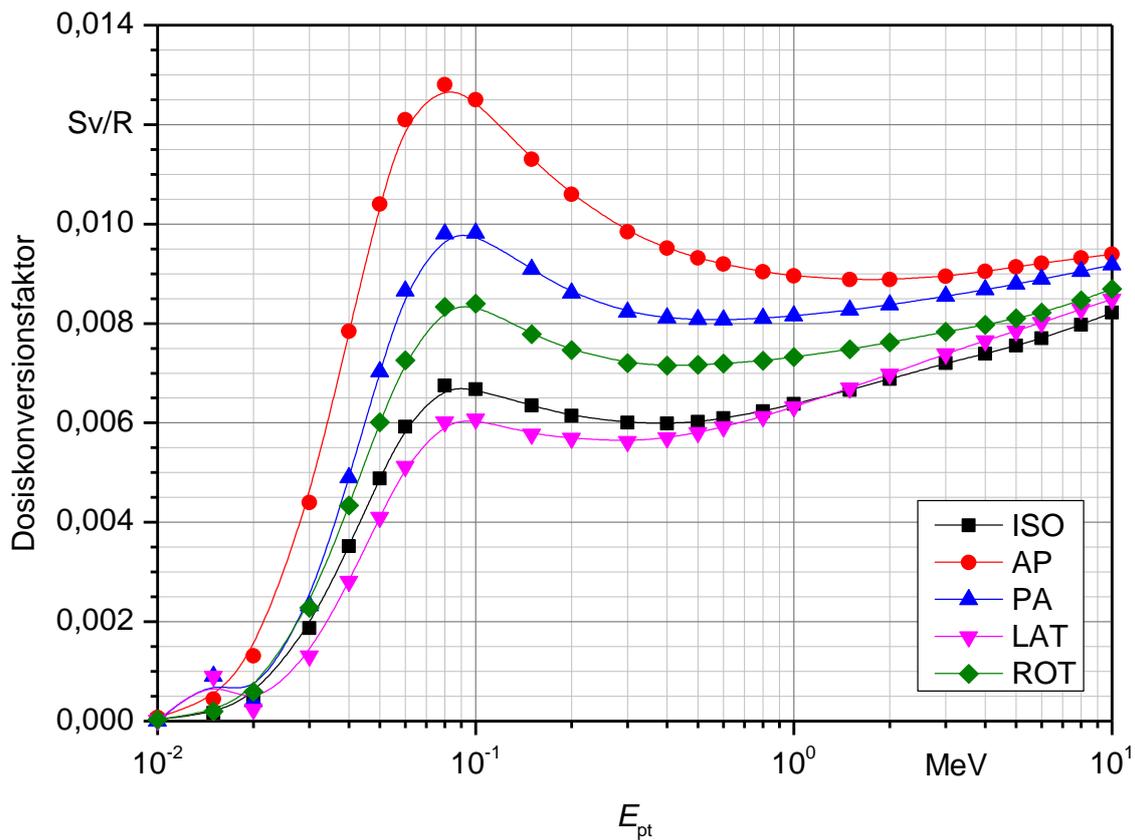
**Abb. 3.5** Strahlungsfelder in Bezug auf ein Phantom, Quelle: /ICRP 96/

Zur Interpolation der Werte für den Dosiskonversionsfaktor (isotropes Strahlungsfeld) wurden die Funktionen mit den dazugehörigen Parametern<sup>12</sup> aus /ANPA 94/ genutzt.

<sup>10</sup> In /ICRP 87/ wird als Beispiel für ein isotropes Strahlungsfeld bezogen auf das Phantom eine Person in einer (unendlich ausgedehnten) Wolke radioaktiven Gases genannt.

<sup>11</sup> Parallele Strahlenbündel, die wie folgt auf das Phantom treffen: AP: anterior-posterior (von vorn nach hinten), PA: posterior-anterior (von hinten nach vorn), ISO: isotrop (gleichmäßig verteilt, richtungsunabhängig), LAT: lateral (seitlich), ROT: rotierend um die Längsachse des Phantoms.

<sup>12</sup> Die in /ANPA 94/ veröffentlichten Parameter gelten für  $[k_1] = 10^{-2} \text{ Sv/R}$ , sie wurden entsprechend für  $[k_1] = \text{Sv/R}$  skaliert.



**Abb. 3.6** Vergleich von Dosiskonversionsfaktoren aus /ICRP 87/ für verschiedene Strahlungsfelder bezogen auf ein Phantom

Für den Energiebereich 10 keV bis 60 keV wurde die Funktion

$$k_1 = \frac{a_3 \cdot E^3 + a_2 \cdot E^2 + a_1 \cdot E + a_0}{b_2 \cdot E^2 + b_1 \cdot E + b_0} \quad (3.7)$$

genutzt mit  $[E_{pt}] = \text{MeV}$ ,  $[k_1] = \frac{\text{Sv}}{\text{R}}$  und den Parametern in Tab. 3.7.

**Tab. 3.7** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_1$ , Energiebereich 10 keV bis 60 keV

Parameter	Wert	Parameter	Wert
$a_3$	5430	$b_2$	87600
$a_2$	-12,4	$b_1$	-3870
$a_1$	-0,741	$b_0$	101
$a_0$	0,0054	–	–

Für den Energiebereich 60 keV bis 10 MeV wurde die Funktion

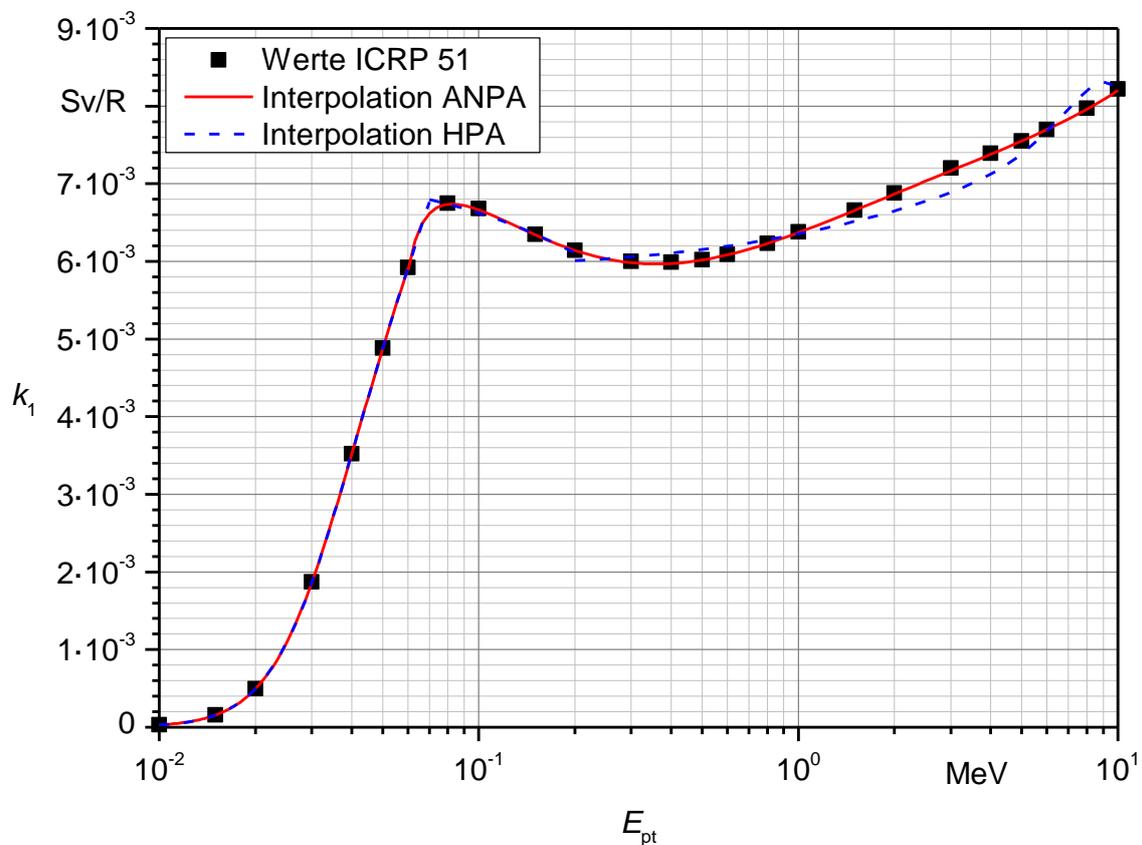
$$k_1 = \frac{c_3 \cdot E^3 + c_2 \cdot E^2 + c_1 \cdot E + c_0}{d_4 \cdot E^4 + d_3 \cdot E^3 + d_2 \cdot E^2 + d_1 \cdot E + d_0} \quad (3.8)$$

genutzt mit  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_1] = \frac{\text{Sv}}{\text{R}}$  und den Parametern in Tab. 3.8.

**Tab. 3.8** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_1$ , Energiebereich 60 keV bis 10 MeV

Parameter	Wert	Parameter	Wert
$c_3$	0,00245	$d_4$	-0,00335
$c_2$	$9,17 \cdot 10^{-4}$	$d_3$	0,321
$c_1$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$d_2$	0,225
$c_0$	$-8,48 \cdot 10^{-6}$	$d_1$	0,00235
–	–	$d_0$	$-6,99 \cdot 10^{-4}$

Für Energien kleiner 10 keV wurde analog zu /ANPA 94/ und /HPA 11/  $k_1 = 3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Sv}}{\text{R}}$  gesetzt, das entspricht dem Wert für eine Energie von 10 keV. Dosiskonversionsfaktoren und Interpolationsfunktionen sind in Abb. 3.7 dargestellt.



**Abb. 3.7** Werte für den Dosiskonversionsfaktor  $k_1$  nach /ICRP 87/ und Interpolationsfunktionen nach /ANPA 94/ und /HPA 11/, isotropes Strahlungsfeld

Zu Vergleichszwecken wurden zusätzlich die Funktionen von /HPA 11/ benutzt, um die Werte zu interpolieren. Der erste Teil der Werte wurde ebenfalls mit der Gleichung (3.7) und den Parametern aus Tab. 3.7, jedoch für den Energiebereich 10 keV bis 70 keV interpoliert.

Für den Energiebereich<sup>13</sup> 70 keV bis 200 keV wurde die Funktion

$$k_1 = c_5 \cdot E^5 + c_4 \cdot E^4 + c_3 \cdot E^3 + c_2 \cdot E^2 + c_1 \cdot E + c_0 \quad (3.9)$$

genutzt mit  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_1] = \frac{\text{Sv}}{\text{R}}$  und den Parametern in Tab. 3.9.

**Tab. 3.9** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_1$ , Energiebereich 70 keV bis 200 keV

Parameter	Wert
$c_5$	-0,000013
$c_4$	0,000254
$c_3$	-0,001795
$c_2$	0,005506
$c_1$	-0,006711
$c_0$	0,00724

Für den Energiebereich<sup>14</sup> 200 keV bis 10 MeV wurde die Funktion

$$k_1 = d_5 \cdot E^5 + d_4 \cdot E^4 + d_3 \cdot E^3 + d_2 \cdot E^2 + d_1 \cdot E + d_0 \quad (3.10)$$

genutzt mit  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_1] = \frac{\text{Sv}}{\text{R}}$  und den Parametern in Tab. 3.10.

Im Ergebnis geben die Funktionen von /ANPA 94/ die Konversionsfaktoren etwas besser wieder (Abb. 3.7).

<sup>13</sup> Laut Text in /HPA 11/ wird diese zweite Funktion für den Energiebereich 70 keV bis 150 keV und die dritte ab 150 keV verwendet. Sowohl die dortige Abbildung A3 als auch Nachrechnungen lassen vermuten, dass der Übergang zwischen zweiter und dritter Funktion bei 200 keV stattfindet.

<sup>14</sup> Laut Text in /HPA 11/ wird diese dritte Funktion für Energien größer 150 keV verwendet. Sowohl die dortige Abbildung A3 als auch Nachrechnungen lassen vermuten, dass der Übergang zwischen zweiter und dritter Funktion bei 200 keV stattfindet.

**Tab. 3.10** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_1$ , Energiebereich 200 keV bis 10 MeV

Parameter	Wert
$d_5$	0,00000002
$d_4$	-0,0000016
$d_3$	0,0000246
$d_2$	-0,00014
$d_1$	0,00057
$d_0$	0,0059 <sup>a)</sup>

a) Die Funktion konnte statt mit dem in /HPA 11/ angegebenen Wert von 0,00059 für den dortigen Parameter  $p_0$  mit dem Wert 0,0059 nachgerechnet werden.

Für den zweiten Dosiskonversionsfaktor  $k_2$  mit  $[k_2] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  wurden Werte aus /GSF 84/ genommen (Anhang C, Tab. C.5). Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden analog zu  $k_1$  die Faktoren für eine isotrope Verteilung des Strahlungsfeldes verwendet (s. o.). Die Interpolation erfolgte mit drei Polynomen.

Für den Energiebereich 10 keV bis 100 keV wurde die Funktion

$$k_2 = a_6 \cdot x^6 + a_5 \cdot x^5 + a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (3.11)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{\text{pt}}$ ,  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_2] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  und den Parametern in Tab. 3.11.

**Tab. 3.11** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_2$ , Energiebereich 10 keV bis 100 keV

Parameter	Wert
$a_6$	15,43327
$a_5$	141,19391
$a_4$	527,63074
$a_3$	1027,5819
$a_2$	1096,69126
$a_1$	607,50942
$a_0$	137,29601

Für den Energiebereich 100 keV bis 1 MeV wurde die Funktion

$$k_2 = b_4 \cdot x^4 + b_3 \cdot x^3 + b_2 \cdot x^2 + b_1 \cdot x + b_0 \quad (3.12)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{\text{pt}}$ ,  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_2] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  und den Parametern in Tab. 3.12.

**Tab. 3.12** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_2$ , Energiebereich 100 keV bis 1 MeV

Parameter	Wert
$b_4$	-0,29019
$b_3$	-0,55743
$b_2$	-0,06746
$b_1$	0,16177
$b_0$	0,728

Für den Energiebereich 1 MeV bis 10 MeV wurde die Funktion

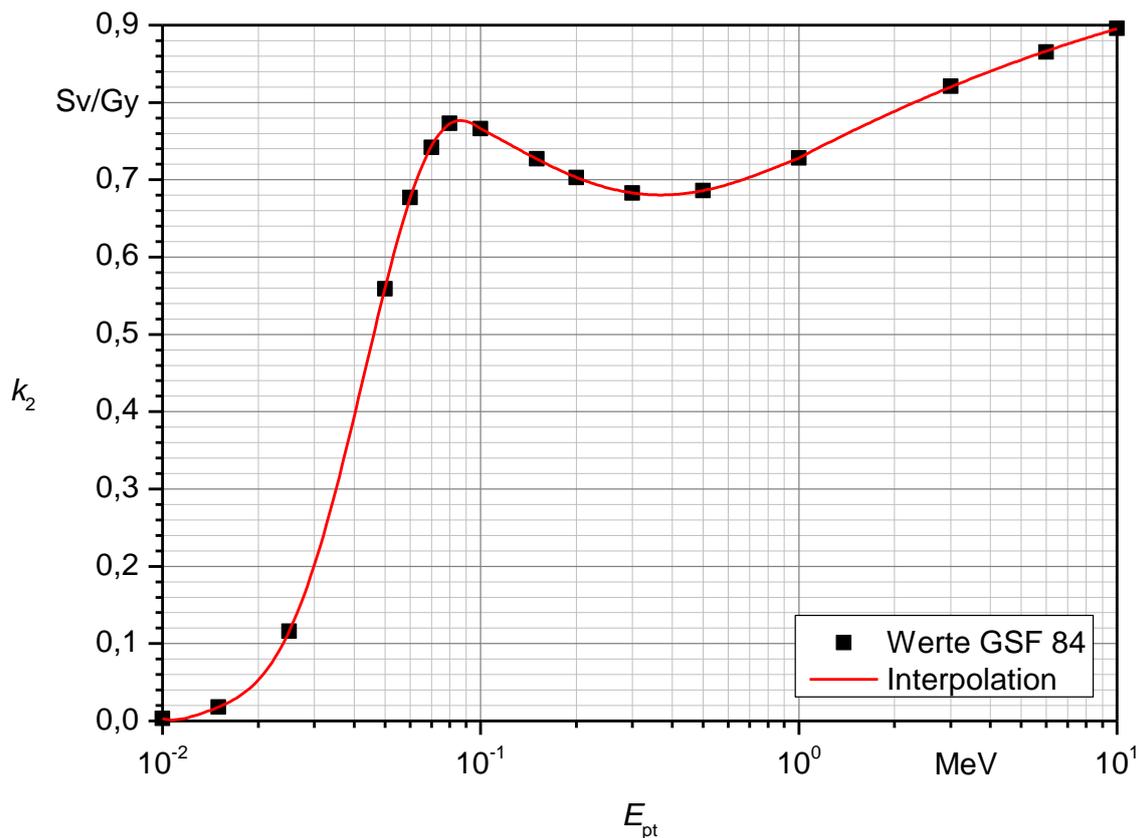
$$k_2 = c_2 \cdot x^2 + c_1 \cdot x + c_0 \quad (3.13)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{\text{pt}}$ ,  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_2] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  und den Parametern in Tab. 3.13.

**Tab. 3.13** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor, Energiebereich 1 MeV bis 10 MeV

Parameter	Wert
$c_2$	-0,04808
$c_1$	0,21517
$c_0$	0,72822

Für Energien kleiner 10 keV wurde  $k_2 = 3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  gesetzt, das entspricht dem Wert für eine Energie von 10 keV. Dosiskonversionsfaktoren und Interpolationsfunktionen sind auch in Abb. 3.8 dargestellt.



**Abb. 3.8** Werte für den Dosiskonversionsfaktor nach /GSF 84/ und Interpolationsfunktionen, isotropes Strahlungsfeld

Die beide Dosiskonversionsfaktoren  $k_1$  und  $k_2$  gelten für die Umrechnung in die effektive Äquivalentdosis  $H_E$  nach ICRP 26 /ICRP 77/. Daher wurde ein dritter Dosiskonversionsfaktor  $k_3$  mit  $[k_3] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  eingeführt mit Werten aus /ICRP 96/ (Anhang C, Tab. C.6). Diese gelten für die Umrechnung in die effektive Dosis  $E$  nach ICRP 60 /ICRP 91/. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden analog zu  $k_1$  die Faktoren für eine isotrope Verteilung des Strahlungsfeldes verwendet (s. o.). Die Interpolation erfolgte mit drei Polynomen.

Für den Energiebereich 10 keV bis 50 keV wurde die Funktion

$$k_3 = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (3.14)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{pt}$ ,  $[E_{pt}] = \text{MeV}$ ,  $[k_3] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  und den Parametern in Tab. 3.14.

**Tab. 3.14** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_3$ , Energiebereich 10 keV bis 50 keV

Parameter	Wert
$a_3$	1,96143
$a_2$	11,37362
$a_1$	22,00608
$a_0$	14,21247

Für den Energiebereich 50 keV bis 100 keV wurde die Funktion

$$k_3 = b_2 \cdot x^2 + b_1 \cdot x + b_0 \quad (3.15)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{\text{pt}}$ ,  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_3] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  und den Parametern in Tab. 3.15.

**Tab. 3.15** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_3$ , Energiebereich 50 keV bis 100 keV

Parameter	Wert
$b_2$	-4,0266
$b_1$	-8,47812
$b_0$	-3,70378

Für den Energiebereich 100 keV bis 10 MeV wurde die Funktion

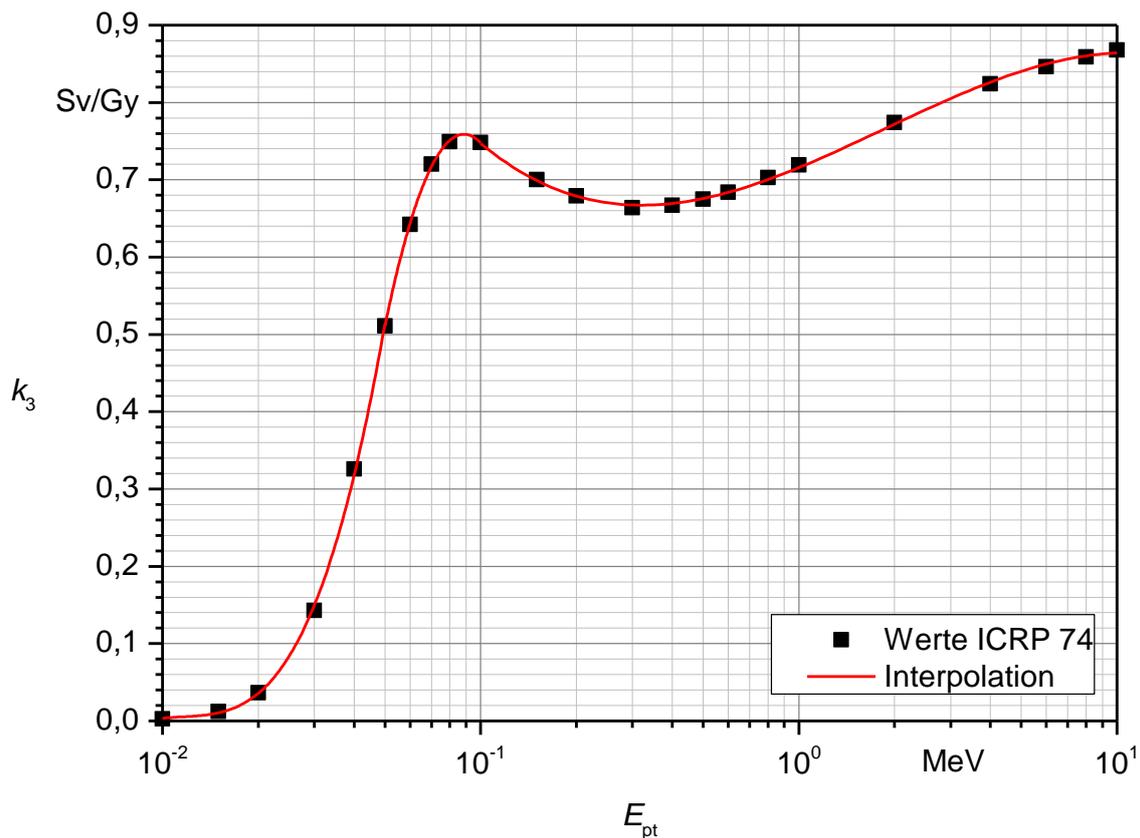
$$k_3 = c_3 \cdot x^3 + c_2 \cdot x^2 + c_1 \cdot x + c_0 \quad (3.16)$$

genutzt mit  $x = \lg E_{\text{pt}}$ ,  $[E_{\text{pt}}] = \text{MeV}$ ,  $[k_3] = \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  und den Parametern in Tab. 3.16.

**Tab. 3.16** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor  $k_3$ , Energiebereich 100 keV bis 10 MeV

Parameter	Wert
$c_3$	-0,11145
$c_2$	0,08986
$c_1$	0,16989
$c_0$	0,71575

Für Energien kleiner 10 keV wurde  $k_3 = 0,00271 \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  gesetzt, das entspricht dem Wert für eine Energie von 10 keV. Dosiskonversionsfaktoren und Interpolationsfunktionen sind in Abb. 3.9 dargestellt.



**Abb. 3.9** Werte für den Dosiskonversionsfaktor nach /ICRP 96/ und Interpolationsfunktionen, isotropes Strahlungsfeld

Durch die Nutzung des Dosiskonversionsfaktors  $k_3$  ändern sich die Gleichungen (2.1) und (2.3) formal zu

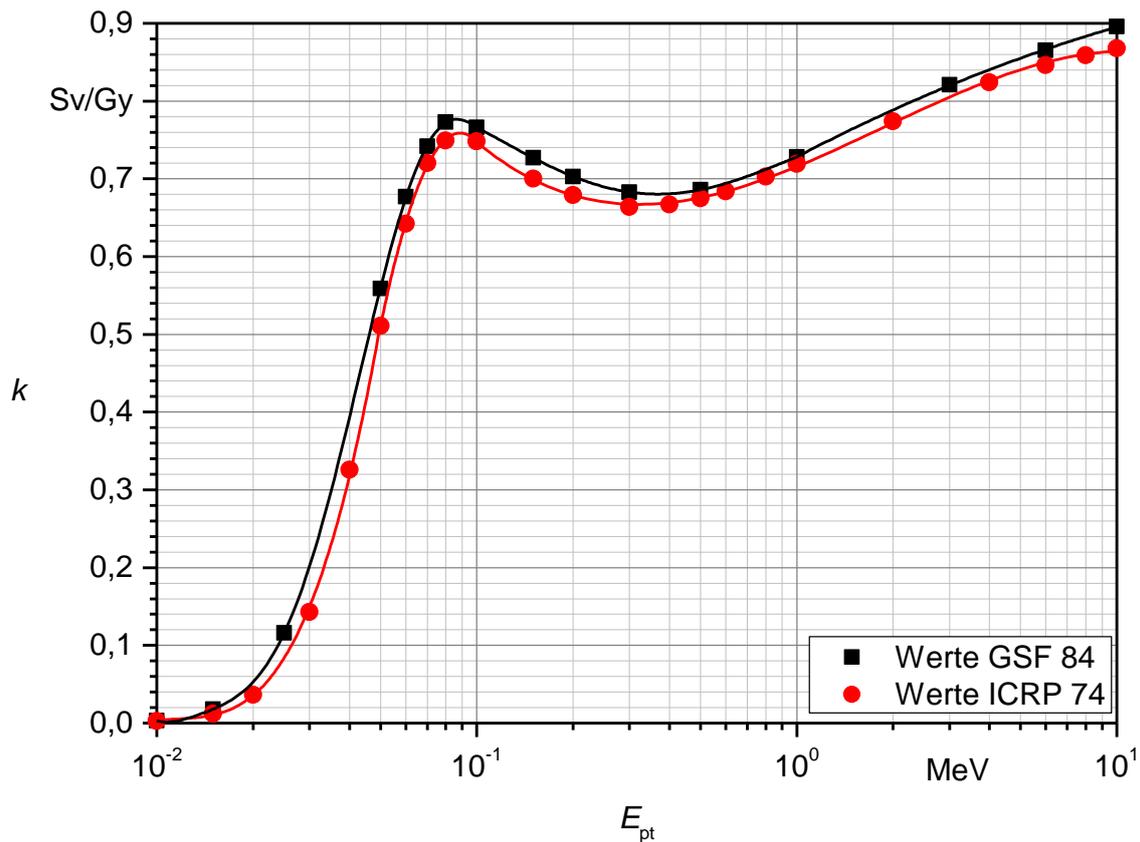
$$Q_A = \frac{E}{A \cdot \dot{e}_{pt} \cdot t} \quad (3.17)$$

mit  $E = 50$  mSv als Referenzwert der effektiven Dosis und

$$\dot{e}_{pt} = \frac{1}{4\pi x^2} \cdot C_2 \cdot \sum_i k_{3,i} \cdot Y_i \cdot E_{pt_i} \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i(E_{pt_i}, x). \quad (3.18)$$

Auch in Gleichung (3.18) wird die im Anhang A hergeleitete Konstante  $C_2$  verwendet.

Ein Vergleich der Dosiskonversionsfaktoren  $k_2$  und  $k_3$  wird in Abb. 3.10 gezeigt. Die aus /GSF 84/ bzw. /ICRP 96/ entnommenen Werte sind mit den erzeugten Interpolationsfunktionen dargestellt. Die Berechnung im Pfad  $Q_A$  über die effektive Dosis  $E$  mit  $k_3$  führt somit zu etwas geringeren Dosen bzw. etwas höheren  $Q_A$ -Werten, als bei Verwendung der effektiven Äquivalentdosis  $H_E$  mit  $k_2$ .



**Abb. 3.10** Vergleich der Dosiskonversionsfaktoren  $k_2$  und  $k_3$

Hintergründe zu den Abweichungen der beiden Dosiskonversionskoeffizienten werden in /ICRP 96/ (Chapter 5) erläutert, sie liegen u. a. an geänderten Wichtungsfaktoren. Aktuellere Dosiskonversionsfaktoren, wie z. B. in /ICRP 10/ gelistet, wurden aus Zeitgründen nicht zusätzlich für die Programmentwicklung aufbereitet. Aufgrund neuer Berechnungsmodelle weisen auch diese neuen Dosiskonversionskoeffizienten – abhängig von betrachteter Energie und angenommenem Strahlungsfeld – Abweichungen im Vergleich zu den älteren Konversionsfaktoren auf.

### 3.2 Berechnung von $Q_B$

Neben den in den Datensammlungen enthaltenen Werten zu Energien der emittierten Betateilchen und deren Energiespektren sind zur Berechnung von Gleichung (2.8) weitere Größen notwendig, deren Berechnung nachfolgend beschrieben wird.

Die Reichweite bei kontinuierlicher Abbremsung oder CSDA-Reichweite<sup>15</sup> wurde für Betaenergien im Bereich von 10 keV bis 1 GeV interpoliert. Begrenzend für die Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten für den Pfad  $Q_B$  wirkt sich die Interpolation der dimensionslosen Dosisverteilung  $j\left(\frac{r}{r_E}, E_\beta\right)$  aus, die mit den Daten aus /CRO 92a/ nur im Energiebereich von 25 keV bis 4 MeV (bzw. 10 MeV nach Extrapolation, s. u.) möglich ist. Der Gesamtbeitrag zum Dosisleistungskoeffizienten ergibt sich aus den Anteilen des kontinuierlichen Betateilchenspektrums sowie diskreter Elektronen.

### 3.2.1 Dosis pro Zerfall

Die Dosis pro Zerfall  $J(r)$  für eine Punktquelle in einem bestimmten Medium kann nach /CRO 92a/ berechnet werden durch

$$J(r) = \frac{n}{4\pi \cdot \rho \cdot r^2} \cdot \int_0^{E_{\beta\max}} N(E_\beta) \cdot j\left(\frac{r}{r_E}, E_\beta\right) \cdot \frac{E_\beta}{r_E} dE_\beta \quad (3.19)$$

mit

$r$  Abstand im Medium von der Quelle zum Aufpunkt,

$r_E$  CSDA-Reichweite im Medium,

$\rho$  Dichte des Mediums,

$n$  Anzahl emittierter Betateilchen pro Zerfall,

$E_\beta$  Betaenergie,

$E_{\beta\max}$  maximale Betaenergie,

$N(E_\beta)$  normalisiertes Energiespektrum emittierter Betateilchen pro Zerfall (Anzahl der emittierten Elektronen in einem Energiebereich von  $E_\beta$  bis  $E_\beta + dE_\beta$ ),

$j\left(\frac{r}{r_E}, E_\beta\right)$  dimensionslose Dosisverteilung im Medium (Anteil der emittierten Energie, der in der Kugelschale mit einem Radius von  $\frac{r}{r_E}$  bis  $\frac{r}{r_E} + d\left(\frac{r}{r_E}\right)$  deponiert wird).

Werte für  $j$  sind in /CRO 92a/ für das Medium Wasser enthalten. Dadurch ist für Ergebnisse in Luft eine Umrechnung notwendig mit der Gleichung

---

<sup>15</sup> CSDA steht für continuous slowing down approximation und ist die näherungsweise Annahme, dass das Teilchen entlang seines Weges durch Materie seine Energie kontinuierlich abgibt.

$$J_{\text{Luft}}(R_{\text{Luft}}) = \frac{J_{\text{Wasser}}(R_{\text{Wasser}})}{\eta_{\text{Luft}}^3 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{Wasser}}}{\rho_{\text{Luft}}}\right)^2} \quad (3.20)$$

mit  $\eta_{\text{Luft}} = 1,12$  als relativem Abschwächungsfaktor von Wasser im Vergleich zu Luft (/AECL 82/) sowie  $\rho_{\text{Wasser}} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  und  $\rho_{\text{Luft}} = 1,205 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Die zur Reichweite in Luft äquivalente Reichweite in Wasser wird berechnet durch

$$R_{\text{Wasser}} = \frac{R_{\text{Luft}}}{\eta_{\text{Luft}}} \quad (3.21)$$

mit  $[R] = \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ . Die Reichweite  $r$  im Wasser mit  $[r] = \text{cm}$  kann mit

$$r_{\text{Wasser}} = \frac{r_{\text{Luft}}}{\eta_{\text{Luft}}} \cdot \frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho_{\text{Wasser}}} \quad (3.22)$$

berechnet werden, wobei  $R = r \cdot \rho$  ist. Mit dem Abstand von der Quelle zum Aufpunkt  $r_{\text{Luft}} = 100 \text{ cm}$  beträgt  $r_{\text{Wasser}} \approx 0,108 \text{ cm}$ .

Das Energiespektrum von Betateilchen eines Nuklids ist kontinuierlich. In den Datenbibliotheken /ORNL 03/ und /ECK 08/ sind diese Energien für jedes Nuklid bestimmten Energiebereichen (Gruppen) von 0 bis  $E_{\beta_{\text{max}}}$  zugeordnet. Die Berechnung von  $J_{\text{Wasser}}(r_{\text{Wasser}})$  erfolgt daher mit einer Summenfunktion analog zur Gleichung (2.8)

$$J_{\text{Wasser}}(r_{\text{Wasser}}) \approx \frac{n}{4\pi \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot r_{\text{Wasser}}^2} \cdot \sum_i N(E_{\beta_i}) \cdot j\left(\frac{r_{\text{Wasser}}}{r_E}, E_{\beta_i}\right) \cdot \frac{E_{\beta_i}}{r_E} \cdot \Delta E_{\beta_i} \quad (3.23)$$

mit  $N(E_{\beta_i}) = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  und  $\Delta E_{\beta_i} = E_{\beta_{i+1}} - E_{\beta_i}$  und  $i$  als jeweilige Gruppe von  $E_{\beta_{i=0}}$  bis  $E_{\beta_{i+1=\text{max}}}$  und muss anschließend mit Gleichung (3.20) auf das Medium Luft umgerechnet werden. Mit  $[r_{\text{Wasser}}] = \text{cm}$ ,  $[r_E] = \text{cm}$ ,  $[E_{\beta}] = \text{MeV}$ ,  $[n] = \frac{1}{\text{s} \cdot \text{Bq}}$ ,  $[N(E_{\beta})] = \frac{1}{\text{s} \cdot \text{Bq} \cdot \text{MeV}}$  und  $[\rho] = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ist  $[J(r)] = \frac{\text{MeV}}{\text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{Bq}}$ .

Die Anzahl der emittierten Betateilchen  $n$  pro Zerfall kann über die Gleichung

$$n = \int_0^{E_{\beta_{\text{max}}}} N(E_{\beta}) dE \quad (3.24)$$

bestimmt werden. In /ORNL 03/ bzw. /ECK 08/ sind für die Nuklide jeweils Wertepaare<sup>16</sup>  $(E_{\beta_i}, N(E_{\beta_i}))$  für jede Energiegruppe  $i$  enthalten. Zur Berechnung von  $n$  wurde die Gleichung

$$n = \sum_i N(E_{\beta_i}) \cdot \Delta E_{\beta_i} \quad (3.25)$$

für  $E_{\beta} = 0 \dots E_{\beta_{\max}}$  verwendet.

Nach /ANPA 94/ entspricht die Dosisleistung durch Betastrahlen in Luft ungefähr der Organdosisleistung in Haut, sodass eine Umrechnung von der Dosis in Luft in die Organdosis Haut durch Betateilchen mit dem Faktor  $1 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$  erfolgt.

### 3.2.2 CSDA-Reichweite

Die Reichweite bei kontinuierlicher Abbremsung oder CSDA-Reichweite  $r_E$  wird bestimmt durch

$$r_E = \int_0^{E_{\beta}} \frac{dE'_{\beta}}{\left(\frac{dE_{\beta}}{dx}\right)_{E'_{\beta}}} \quad (3.26)$$

mit dem Bremsvermögen  $S = \frac{dE_{\beta}}{dx}$ .

Werte für die CSDA-Reichweite von Elektronen in Wasser sind im Internet durch das NIST veröffentlicht worden /NIST 05/, diese Werte<sup>17</sup> sind für die Berechnungen verwendet worden (Anhang C, Tab. C.7). Zur Interpolation der Werte wurde eine eigene Funktion entwickelt, da die Interpolationsfunktion aus /ANPA 94/ mit den dort angegebenen Parametern nicht nachgerechnet werden konnte.

Die Interpolationsfunktion lautet

$$\lg(r_E \cdot \rho) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (3.27)$$

---

<sup>16</sup> In der entsprechenden Datei des Programms DEXRAX, welche die Daten der Betaspektren aller erfassten Nuklide enthält, sind die Energien nicht mit enthalten. Diese werden erst bei einem Export des Betaspektrums für ein Nuklid aus dem Programm heraus in eine Exportdatei hinzugefügt.

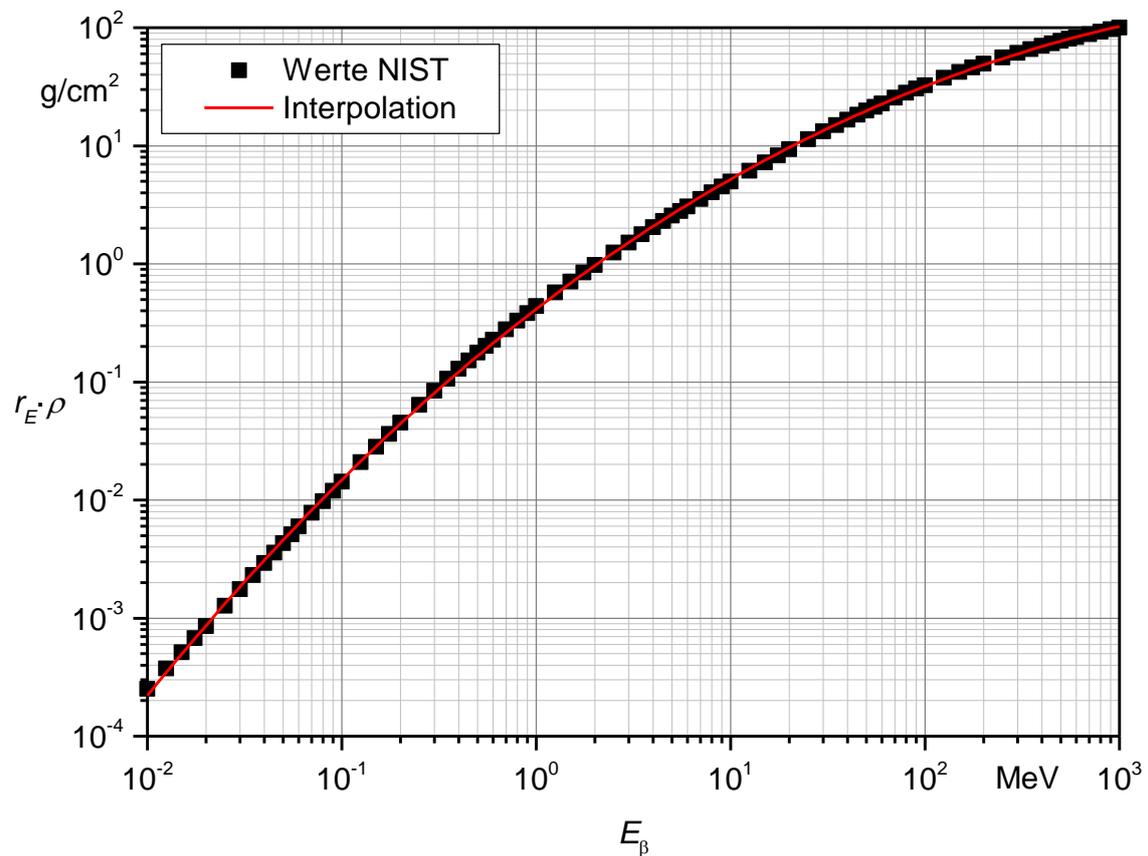
<sup>17</sup> Die Zahlenwerte entstammen der Kategorie „Water, liquid“

mit  $x = \lg E_\beta$ ,  $[E_\beta] = \text{MeV}$ ,  $[(r_E \cdot \rho)] = \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$  und den Parametern in Tab. 3.17.

**Tab. 3.17** Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für die CSDA-Reichweite

Parameter	Wert
$a_3$	0,00576
$a_2$	-0,17353
$a_1$	1,26672
$a_0$	-0,38251

Reichweiten und Interpolationsfunktion sind in Abb. 3.11 dargestellt. Die Interpolationsfunktion nach Gleichung (3.27) deckt einen Wertebereich von  $E_\beta = 10 \text{ keV} \dots 1 \text{ GeV}$  ab. Da  $\rho_{\text{Wasser}} \approx 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ist, kann Gleichung (3.27) auch zur Interpolation von  $r_E$  in Wasser mit  $[r_E] = \text{cm}$  genutzt werden.



**Abb. 3.11** Werte für die CSDA-Reichweite von Betateilchen in Wasser nach /NIST 05/ und Interpolationsfunktion

### 3.2.3 Dimensionslose Dosisverteilung

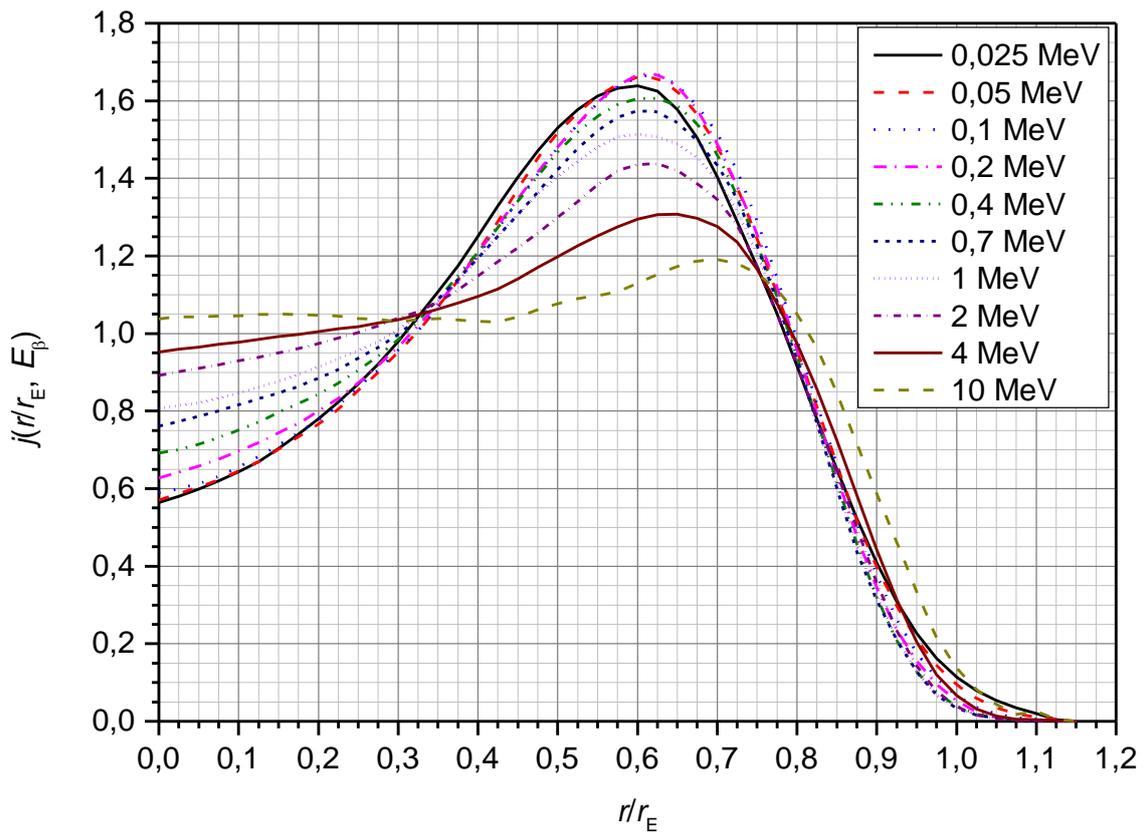
Werte für die dimensionslose Dosisverteilung  $j\left(E_{\beta}, \frac{r}{r_E}\right)$  in Wasser (unendliches Medium) sind in /CRO 92a/ tabelliert (Anhang C, Tab. C.8). In Abb. 3.12 sind diese Werte graphisch dargestellt.

In /CRO 92a/ wird ausgeführt, dass Werte für  $j$  auch für die Betaenergien 10 keV und 10 MeV berechnet und dargestellt wurden (Abb. 3.13). Leider werden für diese beiden Energien keine tabellierten Werte angegeben. Laut /CRO 92a/ sind die Werte der dimensionslosen Dosisverteilung für eine Betaenergie von 10 keV kaum von denen für 25 keV zu unterscheiden. Um auch Betaenergien berechnen zu können, die über 4 MeV liegen<sup>18</sup>, wurden die Werte für  $j\left(E_{\beta}, \frac{r}{r_E}\right)$  für die Energie 10 MeV aus den vorhandenen Daten extrapoliert (Anhang C, Tab. C.10).

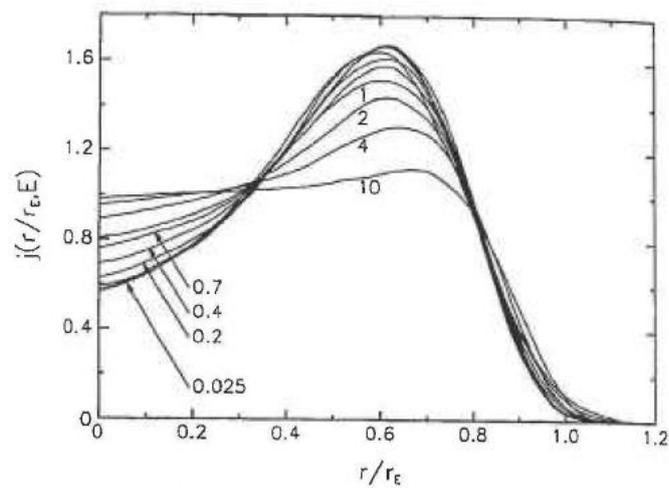
Die Qualität der vorliegenden Graphik (Abb. 3.13) aus /CRO 92a/ erschien nicht ausreichend, um auf dieser Grundlage Werte für  $j$  herauslesen zu können. Daher wurde die Extrapolation in Anlehnung an die Interpolation (s. u.) durchgeführt. Unter der Annahme, dass bei gegebenem normierten Radius  $\frac{r}{r_E}$  der Anstieg der Logarithmen der Energie (und der Dosisverteilung  $j$ ) annähernd gleich bleibt, wurden aus dem Anstieg zwischen  $E_{\beta} = 2$  MeV und  $E_{\beta} = 4$  MeV Werte der dimensionslosen Dosisverteilung für  $E_{\beta} = 10$  MeV erstellt (Abb. 3.12). Der Vergleich der resultierenden Kurve mit der Abbildung aus /CRO 92a/ zeigt, dass dadurch eine befriedigende Übereinstimmung von Kurvenverlauf und Werten für  $j$  erreicht wurde. Die so erstellte Kurve hat im Vergleich bei gegebenen normierten Radien etwas höhere Werte für  $j$ . Dadurch wird eine leichte Überschätzung der Dosis bei Energien zwischen 4 MeV und 10 MeV vorgenommen. Insbesondere für Betaenergien, die nur leicht über 4 MeV liegen, sollte der so entstehende Fehler eher gering sein, mit zunehmender Energie sowie mit zunehmendem normierten Radius sind größere Abweichungen gegenüber von /CRO 92a/ ermittelten Werten für Radionuklide zu erwarten.

---

<sup>18</sup> Durch die wahlweise Nutzung der Nukliddaten der ICRP 107 statt der ICRP 38 ergibt sich das Problem, dass einzelne Nuklide, welche nach ICRP 38 nur Betaenergien unter 4 MeV hatten, nun auch Betaenergien mit etwas mehr als 4 MeV besitzen. Für diese Nuklide hätten mit der neuen ICRP 107 keine Dosisleistungskoeffizienten mehr berechnet werden können, obwohl solche nach Rechnung mit ICRP 38 vorliegen und auch einschlägig tabelliert sind.



**Abb. 3.12** Dimensionslose Dosisverteilung  $j$ , Werte für  $E_\beta$  von 0,025 MeV bis 4 MeV sind /CRO 92a/ entnommen, Werte für 10 MeV sind extrapoliert



**Abb. 3.13** Dimensionslose Dosisverteilung  $j$ , Werte für  $E_\beta$  von 0,025 MeV bis 10 MeV, Quelle: /CRO 92a/

Zwischen den Werten des Logarithmus der Energie und den Werten des normierten Radius wurde zur Bestimmung von  $j\left(E_\beta, \frac{r}{r_E}\right)$  bilinear interpoliert: Für eine gegebene

Energie  $E_\beta$  mit  $E_{kl} < E_\beta < E_{gr}$  und einen normierten Radius  $\frac{r}{r_E}$  mit  $\left(\frac{r}{r_E}\right)_{kl} < \frac{r}{r_E} < \left(\frac{r}{r_E}\right)_{gr}$  kann  $j$  interpoliert werden durch

$$\begin{aligned}
 j\left(E_\beta, \frac{r}{r_E}\right) &= j\left(E_{kl}, \left(\frac{r}{r_E}\right)_{kl}\right) \cdot (1-x) \cdot (1-y) + \\
 &+ j\left(E_{gr}, \left(\frac{r}{r_E}\right)_{kl}\right) \cdot x \cdot (1-y) + \\
 &+ j\left(E_{kl}, \left(\frac{r}{r_E}\right)_{gr}\right) \cdot (1-x) \cdot y + \\
 &+ j\left(E_{gr}, \left(\frac{r}{r_E}\right)_{gr}\right) \cdot x \cdot y
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

mit

$$x = \frac{\lg E_\beta - \lg E_{kl}}{\lg E_{gr} - \lg E_{kl}} \tag{3.29}$$

und

$$y = \frac{\frac{r}{r_E} - \left(\frac{r}{r_E}\right)_{kl}}{\left(\frac{r}{r_E}\right)_{gr} - \left(\frac{r}{r_E}\right)_{kl}} \tag{3.30}$$

Diese Interpolationsmethode entspricht der Empfehlung in /CRO 92a/.

### 3.2.4 Diskrete Elektronen

Neben den kontinuierlichen Spektren der Betastrahler wurden zur Bestimmung des Dosisleistungskoeffizienten auch die Beiträge diskreter Elektronen (Konversionselektronen und Auger-Elektronen) berücksichtigt. Die Berechnung der Dosis erfolgte mit o. g. Gleichungen in analoger Weise.

Die Dosis pro Zerfall  $J(r)$  wird über alle monoenergetischen Elektronen  $i$  des Nuklids summiert berechnet durch

$$J_{\text{Wasser}}(r) = \frac{1}{4\pi \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot r^2} \cdot \sum_i Y(E_{\beta_i}) \cdot j\left(\frac{r}{r_E}, E_{\beta_i}\right) \cdot \frac{E_{\beta_i}}{r_E} \tag{3.31}$$

mit der Wahrscheinlichkeit  $Y(E_{\beta_i})$  für die Emission des Elektrons mit der Energie  $E_{\beta}$  pro Zerfall. Mit  $[r] = \text{cm}$ ,  $[r_E] = \text{cm}$ ,  $[E_{\beta}] = \text{MeV}$ ,  $[Y(E_{\beta})] = \frac{1}{\text{s}\cdot\text{Bq}}$  und  $[\rho] = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ist  $[J(r)] = \frac{\text{MeV}}{\text{g}\cdot\text{s}\cdot\text{Bq}}$ . Die Umrechnung auf das Medium Luft erfolgt wieder mit Gleichung (3.20).

### 3.3 Berechnung von $Q_C$

Für die Berechnung des Pfades  $Q_C$  sind in /IAEA 08/ Dosiskoeffizienten angegeben. Eine umfangreichere Liste solcher Koeffizienten für 738 Nuklide ist jedoch in /ICRP 94/ enthalten; mit diesen Werten wird auch im Excel-Programm gerechnet. Ergänzend zu den Koeffizienten für einen AMAD von  $1 \mu\text{m}$  wurden auch die für einen AMAD von  $5 \mu\text{m}$  übernommen. Neben den maximierten Dosiskoeffizienten können alle enthaltenen Nuklide auch mit der jeweiligen Lungenabsorptionsklasse – sofern vorhanden – berechnet werden. Die Koeffizienten berücksichtigen Tochternuklide nach dem Modell des stationären Gleichgewichtes /HPA 11/.

Analog zur ICRP 68 /ICRP 94/ können auch die aktualisierten Dosiskoeffizienten der ICRP 119 /ICRP 12/ verwendet werden. Die ICRP 119 enthält Korrekturen und Neuberechnungen zu Dosiskoeffizienten für Inhalation und Ingestion, die in der ICRP 68 und 72 veröffentlicht wurden. Im Excel-Rechenprogramm werden nur die Dosiskoeffizienten für Inhalation für die Gruppe „worker“ genutzt. Daher betreffen die Korrekturen und Ergänzungen nur sehr wenige Nuklide<sup>19</sup>. Es wurden in der ICRP 119 keine zusätzlichen Nuklide aufgenommen.

Edelgase (außer Radon) sind in /ICRP 94/ nur mit Dosiskoeffizienten für Submersion enthalten, da sie als inert gelten. Entsprechend wird für Edelgase der Pfad  $Q_C$  nicht berechnet. Das Nuklid  $^{13}\text{N}$  hat in /IAEA 08/ ebenfalls keinen Wert für den Pfad  $Q_C$  verzeichnet und ist auch in /ICRP 94/ und /ICRP 12/ nicht enthalten. Stickstoffisotope werden daher ebenfalls als inert angesehen und nicht berechnet (siehe auch Abschnitt 3.7).

---

<sup>19</sup> Korrigiert wurden Dosiskoeffizienten (Inhalation, worker) für  $^{228}\text{Th}$  und  $^{231}\text{U}$ , ergänzt wurden Dosiskoeffizienten (Inhalation, soluble or reactive gases, worker) für  $^3\text{H}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{94}\text{Ru}$ ,  $^{97}\text{Ru}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{105}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{116}\text{Te}$ ,  $^{121}\text{Te}$ ,  $^{121\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{123}\text{Te}$ ,  $^{123\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{125\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{127}\text{Te}$ ,  $^{127\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{129}\text{Te}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{131}\text{Te}$ ,  $^{131\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{Te}$ ,  $^{120}\text{I}$ ,  $^{120\text{m}}\text{I}$ ,  $^{121}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{124}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{126}\text{I}$ ,  $^{128}\text{I}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{130}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{132\text{m}}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$  und  $^{135}\text{I}$ .

### 3.4 Berechnung von $Q_D$

Zur Berechnung des Pfades  $Q_D$  ist die Ermittlung von nuklidbezogenen Dosisleistungskoeffizienten notwendig. Dies geschieht in analoger Weise wie bereits für den Pfad  $Q_B$  durchgeführt. Im Unterschied dazu ist hier jedoch jetzt eine Kontamination der Haut mit einem Betastrahler zu betrachten.

Begrenzend für die Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten für den Pfad  $Q_D$  wirkt sich die Interpolation der dimensionslosen Dosisverteilung  $j\left(\frac{z}{r_E}, E_\beta\right)$  aus, die mit den Daten aus /CRO 92b/ nur im Energiebereich von 25 keV bis 4 MeV (bzw. 10 MeV nach Extrapolation, s. u.) möglich ist. Der Gesamtbeitrag zum Dosisleistungskoeffizienten ergibt sich aus den Anteilen des kontinuierlichen Betateilchenspektrums sowie diskreter Elektronen.

Der Dosisleistungskoeffizient für Hautkontamination wird mit der Gleichung

$$\dot{h}_{\text{Haut}} = J_{\text{Wasser}} \cdot C_3 \quad (3.32)$$

berechnet mit

$J_{\text{Wasser}}$  Dosis in Wasser pro Zerfall (Flächenquelle) (in  $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$ ),  
 $C_3$  Umrechnungsfaktor für  $J_{\text{Wasser}}$  ( $0,016022 \text{ Gy} \cdot \text{g} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Bq} \cdot \text{TBq}^{-1}$ )

und  $C_3 = C_2 \cdot \frac{1 \cdot 10^8 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$ . Es ergibt sich für den Dosisleistungskoeffizienten  $[\dot{h}_{\text{Haut}}] = \frac{\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{TBq}}$  wobei angenommen wird, dass die Dosisleistung in Wasser ungefähr der Organdosisleistung in Haut entspricht und eine Umrechnung mit dem Faktor  $1 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$  erfolgt.

#### 3.4.1 Dosis pro Zerfall

Die Dosis pro Zerfall  $J(z)$  für eine Flächenquelle auf einem bestimmten Medium kann nach /AECL 92/ berechnet werden durch

$$J(z) = \frac{n}{\rho} \cdot \int_0^{E_{\beta\text{max}}} N(E_\beta) \cdot j\left(\frac{z}{r_E}, E_\beta\right) \cdot \frac{E_\beta}{r_E} dE_\beta \quad (3.33)$$

mit

- $z$  Eindringtiefe der Betastrahlung in das Medium,  
 $j\left(\frac{z}{r_E}, E_\beta\right)$  dimensionslose Dosisverteilung im Medium (Anteil der emittierten Energie, der in der Haut in einer Tiefe von  $\frac{z}{r_E}$  bis  $\frac{z}{r_E} + d\left(\frac{z}{r_E}\right)$  deponiert wird).

Werte für  $j$  für das Medium Wasser (Grenzschicht Luft – Wasser) sind in /CRO 92b/ enthalten. Die entnommenen Werte sind für eine kreisförmige Kontamination einer Fläche von  $100 \text{ cm}^2$  berechnet worden.

Die Berechnung von  $J(z)$  mit Hilfe der Datenbibliotheken von /ORNL 03/ und /ECK 08/ erfolgte analog zu den Gleichungen (3.23) und (3.24) aus Abschnitt 3.2.1 auf S. 38 mit

$$J_{\text{Wasser}}(z_{\text{Wasser}}) = \frac{n}{\rho_{\text{Wasser}}} \cdot \sum_i N(E_{\beta_i}) \cdot j\left(\frac{z_{\text{Wasser}}}{r_E}, E_{\beta_i}\right) \cdot \frac{E_{\beta_i}}{r_E} \cdot \Delta E_{\beta_i}. \quad (3.34)$$

Mit  $[z_{\text{Wasser}}] = \text{cm}$ ,  $[r_E] = \text{cm}$ ,  $[E_\beta] = \text{MeV}$ ,  $[n] = \frac{1}{\text{s} \cdot \text{Bq}}$ ,  $[N(E_\beta)] = \frac{1}{\text{s} \cdot \text{Bq} \cdot \text{MeV}}$  und  $[\rho] = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ist  $[J(z)] = \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{Bq}}$ . Die Eindringtiefe in die Haut wird mit  $70 \mu\text{m}$  vorgegeben. Die so berechneten Werte für Wasser können in guter Näherung auch zur Bestimmung der Dosis im Gewebe bzw. in der Haut verwendet werden.<sup>20</sup>

### 3.4.2 CSDA-Reichweite

Ebenso wie zur Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten für den Pfad  $Q_B$  wird für die Berechnung von  $J(z)$  des Pfades  $Q_D$  die CSDA-Reichweite  $r_E$  benötigt. Die in /CRO 92b/ enthaltenen Werte für  $j$  gelten für Wasser, so dass hier ebenfalls Werte von  $r_E$  für Wasser von /NIST 05/ genutzt wurden. Die Interpolationsfunktion (Gleichung (3.27)) und die dazu gehörigen Parameter (Tab. 3.17) sind in Abschnitt 3.2.2 auf S. 40 enthalten.

---

<sup>20</sup> Nach /AECL 82/ beträgt der relative Abschwächungsfaktor  $\eta_{\text{Luft}}$  für Wasser 1,12, der für ICRP-Muskel 1,11 und der für ICRP-Fettgewebe 1,10.

### 3.4.3 Dimensionslose Dosisverteilung

Analog zu Abschnitt 3.2.3 wurden für die dimensionslose Dosisverteilung  $j\left(E_{\beta}, \frac{z}{r_E}\right)$  bei Hautkontamination die tabellierten Werte aus /CRO 92b/ genutzt (Anhang C, Tab. C.9). In Abb. 3.14 sind diese Werte graphisch dargestellt.

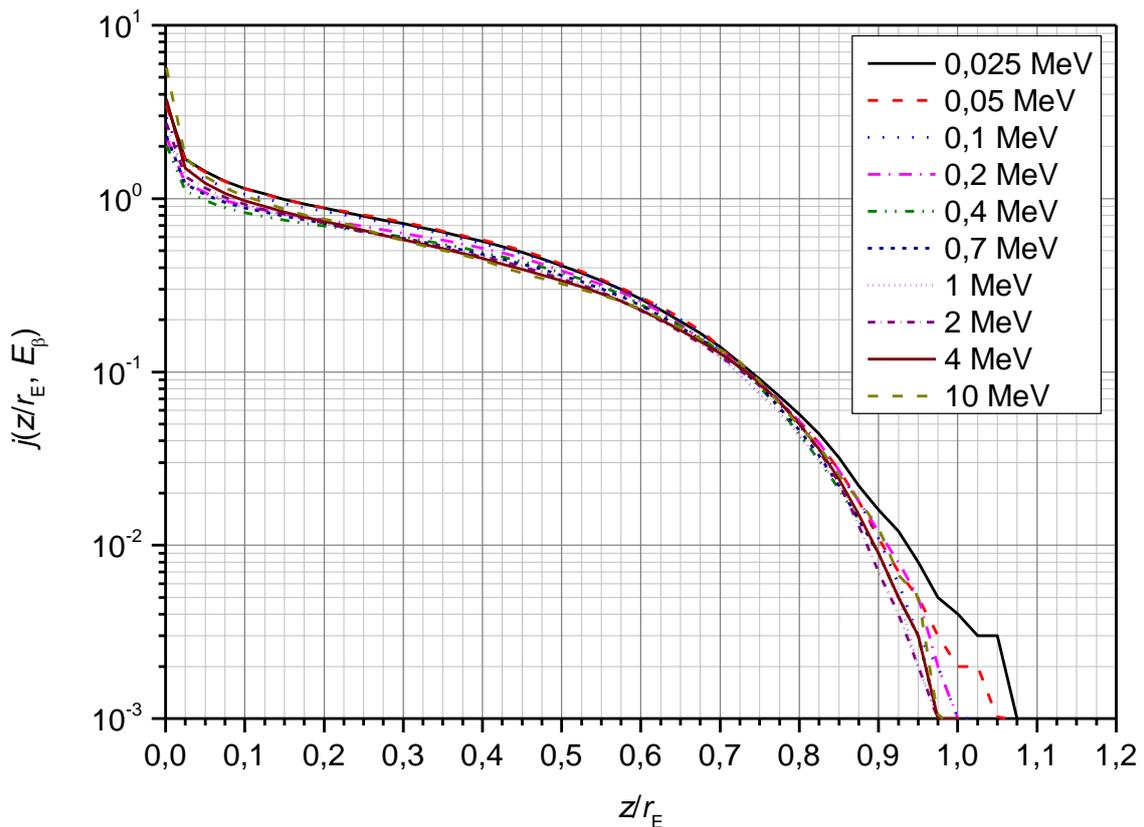
Um auch Betaenergien berechnen zu können, die über 4 MeV liegen<sup>21</sup>, wurden Werte für die dimensionslose Dosis  $j\left(E_{\beta}, \frac{z}{r_E}\right)$  für die Energie 10 MeV aus den vorhandenen Daten extrapoliert (Anhang C, Tab. C.11). Im Gegensatz zur Extrapolation der dimensionslosen Dosis  $j\left(E_{\beta}, \frac{r}{r_E}\right)$  für den Pfad  $Q_B$  lagen in diesem Fall weder tabellarische Werte noch graphische Darstellungen einer solchen Wertekurve vor. Die Extrapolation wurde in Anlehnung an die Extrapolation für den Pfad  $Q_B$  durchgeführt. Unter der Annahme, dass bei gegebener normierter Eindringtiefe  $\frac{z}{r_E}$  der Anstieg der Logarithmen der Energie (und der Dosisverteilung  $j$ ) annähernd gleichbleibt, wurden aus dem Anstieg zwischen  $E_{\beta} = 2$  MeV und  $E_{\beta} = 4$  MeV Werte der dimensionslosen Dosisverteilung für  $E_{\beta} = 10$  MeV erstellt (Abb. 3.14). Für Betaenergien, die nur leicht über 4 MeV liegen, sollte der so entstehende Fehler in der Dosisberechnung gering sein. Für Betaenergien deutlich größer als 4 MeV kann dieser Fehler jedoch zunehmen, wobei es sowohl zu einer Über- als auch zu einer Unterschätzung der berechneten Dosis kommen kann. Eine genauere Aussage ist aufgrund fehlender Vergleichsmöglichkeiten nicht möglich. Da sich die erstellte Kurve für 10 MeV gut in die bisherige Kurvenschaar einpasst und Betaenergien weit über 4 MeV nur bei wenigen Nukliden und in geringem Anteil im Vergleich zum restlichen Betaenergiespektrum des Nuklids zu erwarten sind, wurde im vorliegenden Programm diese extrapolierte Kurve dennoch verwendet.

Eine weitere Extrapolation war aufgrund der tabellierten Daten in /CRO 92b/ notwendig. Als „Wert“ für  $j$  für die normierte Eindringtiefe  $\frac{z}{r_E} = 0$  wurde unendlich angegeben. Daher musste, um auch dimensionslose Dosisverteilungen  $j$  zwischen den normierten Eindringtiefen 0 und 0,025 interpolieren zu können, ein sinnvoll kleiner Wert ungleich Null als Stützstelle extrapoliert werden. Aufgrund der vorgegebenen Eindringtiefe  $z$  der Betateilchen von 0,07 cm in die Haut wurde als Stützstelle eine normierte Eindringtiefe

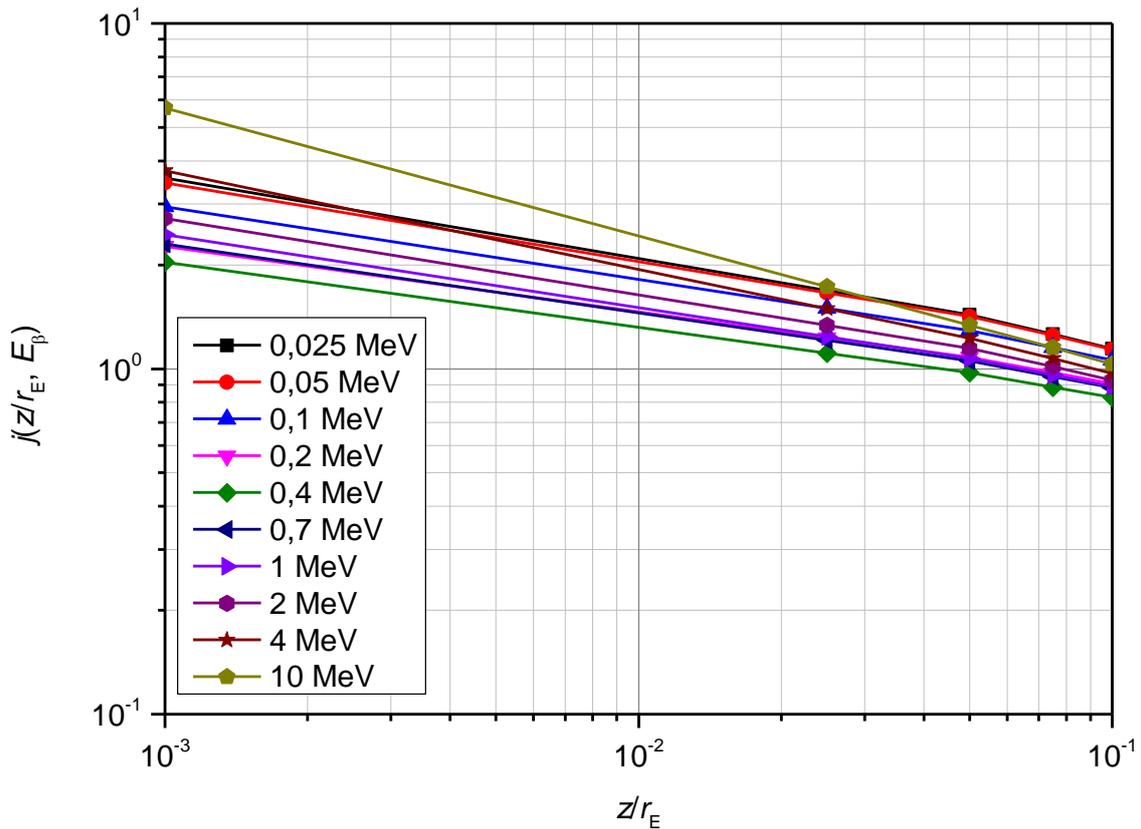
---

<sup>21</sup> Durch die wahlweise Nutzung der Nukliddaten der ICRP 107 statt der ICRP 38 ergibt sich das Problem, dass einzelne Nuklide, welche nach ICRP 38 nur Betaenergien unter 4 MeV hatten, nun auch Betaenergien mit etwas mehr als 4 MeV besitzen. Für diese Nuklide hätten mit der neuen ICRP 107 keine Dosisleistungskoeffizienten mehr berechnet werden können, obwohl solche nach Rechnung mit ICRP 38 vorliegen und auch einschlägig tabelliert sind.

$\frac{z}{r_E}$  von 0,001 gewählt (Anhang C, Tab. C.12). Dadurch werden entsprechend Abb. 3.11 auch Betaenergien von bis zu 10 MeV abgedeckt. Die Extrapolation wurde in Anlehnung an die Interpolation (s. u.) durchgeführt. Unter der Annahme, dass bei gegebener Energie die der Anstieg der Logarithmen der normierten Eindringtiefe für Werte von 0,075 und darunter annähernd gleich bleibt, wurde aus dem Anstieg zwischen  $\frac{z}{r_E} = 0,025$  und  $\frac{z}{r_E} = 0,050$  Werte der dimensionslosen Dosisverteilung  $j$  für  $\frac{z}{r_E} = 0,001$  extrapoliert (Abb. 3.15).



**Abb. 3.14** Dimensionslose Dosisverteilung  $j$ , Werte für  $E_\beta$  von 0,025 MeV bis 4 MeV sind /CRO 92b/ entnommen, Werte für 10 MeV sowie für normierte Eindringtiefen kleiner 0,025 sind extrapoliert



**Abb. 3.15** Dimensionslose Dosisverteilung  $j$ , Werte für  $\frac{z}{r_E}$  von 0,025 und größer sind /CRO 92b/ entnommen, Werte für 10 MeV sowie für die normierte Eindringtiefe von 0,001 sind extrapoliert

Zwischen den Werten des Logarithmus der Energie und den Werten der normierten Eindringtiefe wurde zur Bestimmung von  $j\left(E_\beta, \frac{z}{r_E}\right)$  analog zur Gleichung (3.28) bilinear interpoliert: Für eine Energie  $E_\beta$  mit  $E_{kl} < E_\beta < E_{gr}$  und einem Radius  $\frac{z}{r_E}$  mit  $\left(\frac{z}{r_E}\right)_{kl} < \frac{z}{r_E} < \left(\frac{z}{r_E}\right)_{gr}$  kann  $j$  interpoliert werden durch die Gleichung

$$\begin{aligned}
 j\left(E_\beta, \frac{z}{r_E}\right) &= j\left(E_{kl}, \left(\frac{z}{r_E}\right)_{kl}\right) \cdot (1-x) \cdot (1-y) + \\
 &+ j\left(E_{gr}, \left(\frac{z}{r_E}\right)_{kl}\right) \cdot x \cdot (1-y) + \\
 &+ j\left(E_{kl}, \left(\frac{z}{r_E}\right)_{gr}\right) \cdot (1-x) \cdot y + \\
 &+ j\left(E_{gr}, \left(\frac{z}{r_E}\right)_{gr}\right) \cdot x \cdot y
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

mit

$$x = \frac{\lg E_\beta - \lg E_{kl}}{\lg E_{gr} - \lg E_{kl}} \quad (3.36)$$

und

$$y = \begin{cases} \frac{\lg\left(\frac{Z}{r_E}\right) - \lg\left(\frac{Z}{r_E}\right)_{kl}}{\lg\left(\frac{Z}{r_E}\right)_{gr} - \lg\left(\frac{Z}{r_E}\right)_{kl}} & \text{für } \frac{Z}{r_E} < 0,075 \\ \frac{\frac{Z}{r_E} - \left(\frac{Z}{r_E}\right)_{kl}}{\left(\frac{Z}{r_E}\right)_{gr} - \left(\frac{Z}{r_E}\right)_{kl}} & \text{für } \frac{Z}{r_E} \geq 0,075 \end{cases} \quad (3.37)$$

Diese Interpolationsmethode entspricht der Empfehlung in /CRO 92b/.

#### 3.4.4 Diskrete Elektronen

Neben den kontinuierlichen Spektren der Betastrahler wurden zur Bestimmung des Dosisleistungskoeffizienten auch die Beiträge diskreter Elektronen (Konversionselektronen und Auger-Elektronen) berücksichtigt. Die Berechnung der Dosis erfolgte mit o. g. Gleichungen in analoger Weise.

Die Dosis pro Zerfall  $J(z)$  wird, über alle monoenergetischen Elektronen  $i$  des Nuklids summiert, berechnet mit

$$J_{\text{Wasser}}(z_{\text{Wasser}}) = \frac{1}{\rho_{\text{Wasser}}} \cdot \sum_i Y(E_{\beta_i}) \cdot j\left(\frac{z_{\text{Wasser}}}{r_E}, E_{\beta_i}\right) \cdot \frac{E_{\beta_i}}{r_E} \quad (3.38)$$

mit der Wahrscheinlichkeit  $Y$  für die Emission des Elektrons der Energie  $E_\beta$  pro Zerfall. Mit  $[z] = \text{cm}$ ,  $[r_E] = \text{cm}$ ,  $[E_\beta] = \text{MeV}$ ,  $[Y(E_\beta)] = \frac{1}{\text{s}\cdot\text{Bq}}$  und  $[\rho] = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  ist  $[J(z)] = \frac{\text{MeV}\cdot\text{cm}^2}{\text{g}\cdot\text{s}\cdot\text{Bq}}$ .

#### 3.5 Berechnung von $Q_E$

Für die Berechnung des Pfades  $Q_E$  sind in /IAEA 08/ Dosiskoeffizienten angegeben. Diese wurden /EPA 93/ entnommen. Die darin für verschiedene Nuklide aufgelisteten Dosiskoeffizienten gelten u. a. für die Hautdosis sowie die effektive Äquivalentdosis  $H_E$  (nach ICRP 26). Die Berechnungen in /IAEA 08/ wurden bereits für die effektive Dosis

$E$  (nach ICRP 60) durchgeführt, entsprechende Dosiskoeffizienten sind dort auch aufgelistet. Daher wurden zur Berechnung im Excel-Programm die Dosiskoeffizienten aus den Datenbankdateien des Programmes „Radiological Toolbox“ /NRC 06/ entnommen, die ebenfalls auf /EPA 93/ basieren.

Die Dosiskoeffizienten in /EPA 93/ sind berechnet für die externe Exposition durch Photonen und Elektronen. Darin eingeschlossen sind Beiträge durch Bremsstrahlung. Nicht eingeschlossen sind Beiträge, die aus der Spontanspaltung von Nukliden herrühren können, in /EPA 93/ werden als Beispiele die Nuklide  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{250}\text{Cm}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  und  $^{254}\text{Cf}$  genannt.

Die Koeffizienten sind für das Modell eines erwachsenen Hermaphroditen berechnet worden. Als Strahlenquelle für die Koeffizienten des Pfades  $Q_E$  wird eine semi-infinite Wolke mit einer gleichmäßigen Verteilung der Aktivität in Luft angenommen, wodurch ein isotropes Strahlungsfeld bezogen auf das Phantom entsteht. Die Dosiskoeffizienten gelten für das Nuklid allein, Beiträge von evtl. während des radioaktiven Zerfalls gebildeten Tochternukliden sind nicht enthalten.

Entsprechend des Q-Systems werden Werte für  $Q_E$  für Edelgase angegeben. Eine Ausnahme bildet das Isotop  $^{37}\text{Ar}$ ; für dieses wird  $Q_D$  angegeben (siehe auch Abschnitt 3.7).

### **3.6 Berechnung von $Q_F$**

Die Berechnung der Werte von  $Q_F$  erfolgt für alle Alphastrahler entsprechend den Vorschriften des Q-Systems. Ausgenommen hiervon sind Edelgase: Da für Edelgase keine Werte für den Pfad  $Q_C$  berechnet werden (können), werden auch keine Werte für  $Q_F$  ausgegeben, selbst wenn es sich – wie z. B. bei einigen Radonisotopen – um Alphastrahler handelt.

### **3.7 Berechnung der A-Werte**

Mit Hilfe der in den Abschnitten 2.2 und 3.1 bis 3.5 genannten Gleichungen werden die A-Werte im Excel-Programm berechnet. Zusätzlich wurden die in Abschnitt 2.4 beschriebenen speziellen Annahmen des Q-Systems umgesetzt:

## Neutronenstrahler

Gemäß dem Q-System werden für die Nuklide  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Cf}$  und  $^{248}\text{Cm}$  besondere  $Q_A$ -Werte als Neutronenstrahler berechnet (siehe Abschnitt 2.4.1). Diese  $Q$ -Werte werden statt der  $Q_A$ -Werte angegeben, die sich aus der Rechenvorschrift für den Pfad  $Q_A$  sonst für diese Nuklide ergeben würden. Programmseitig werden dabei die Werte für  $Q_A$  entsprechend den Angaben aus /IAEA 08/ gesetzt, woraus entsprechend auch die  $A_1$ -Werte folgen (s. Tab. 3.18).

**Tab. 3.18** Programmseitig verwendete  $Q_A$ - und resultierende  $A_1$ -Werte für Neutronenstrahler gemäß /IAEA 08/

Nuklid	$Q_A$ (TBq)	$A_1$ (TBq)
$^{248}\text{Cm}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
$^{252}\text{Cf}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$^{254}\text{Cf}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$

## Bremsstrahlung

Die Bremsstrahlung wurde berücksichtigt, indem alle  $A$ -Werte nach ihrer Berechnung den Wert 40 TBq zugewiesen bekommen, sofern sie diesen übersteigen (siehe Abschnitt 2.4.2). Eine weitergehende Berücksichtigung der Bremsstrahlung fand in Übereinstimmung mit dem Q-System nicht statt.

## Tritium und Radon

Der  $A_2$ -Wert wurde für das Nuklid Tritium auf 40 TBq begrenzt. Der  $A_2$ -Wert für das Radonisotop  $^{222}\text{Rn}$  wurde entsprechend Abschnitt 2.4.4 auf  $4 \cdot 10^{-3}$  TBq festgelegt.

## LSA-Stoffe

LSA-Stoffe können im Rechenprogramm berücksichtigt werden. Zunächst werden für alle Nuklide die entsprechenden  $Q$ - und  $A$ -Werte explizit berechnet. Es besteht programmseitig die Möglichkeit, danach eine Prüfung auf „unlimited“ durchzuführen. Dabei wird in den Pfaden  $Q_C$  und  $Q_D$  statt Werten das Wort „unlimited“ eingesetzt, sofern die entsprechenden Bedingungen aus Abschnitt 2.4.5 erfüllt sind. Da diese Prüfung auch

abhängig von den jeweiligen Halbwertszeiten der Nuklide ist, können je nach verwendeter Datenbasis (/ICRP 83/ bzw. /ICRP 08/) Unterschiede in der Bewertung auftreten.

In den Transportvorschriften /IAEA 12/ und in TS-G-1.1 /IAEA 08/ sind ebenfalls „unlimited“-Einträge bei den  $A_1$ - und  $A_2$ -Werten vermerkt, ohne dass dieses Vorgehen dokumentiert ist. Daher wurde die folgende Berechnung im vorliegenden Excelprogramm umgesetzt:  $A_1$ -/ $A_2$ -Werte werden im Rechenprogramm dann auf „unlimited“ gesetzt wenn

- sowohl  $Q_C$  als auch  $Q_D$  „unlimited“ sind und
- der  $A_1$ -Wert entweder größer als  $Q_C$  oder größer als  $Q_D$  ist.

Diese Vorgehensweise wird nachfolgend begründet: Das in den Transportvorschriften enthaltene eigentliche Kriterium für „unlimited“-Werte stellt nur auf die Pfade  $Q_C$  und  $Q_D$  ab (siehe Abschnitt 2.4.5). Somit können zunächst auch nur diese beiden „unlimited“ gesetzt werden. Weiterhin ist der  $A_2$ -Wert das Minimum der Werte  $Q_C$ ,  $Q_D$  (bzw.  $Q_E$ ) und  $A_1$  (vgl. Gleichung (2.18) aus S. 13) und somit der restriktivere von  $A_1$  und  $A_2$ . Wird dieser  $A_2$ -Wert bestimmt durch einen  $Q_C$ - oder  $Q_D$ -Wert (als kleinstem Wert) und sind  $Q_C$  und  $Q_D$  „unlimited“, so kann auch  $A_2$  „unlimited“ gesetzt werden, falls  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_F$  größer sind als der kleinste „unlimited“-Wert. Da der  $A_2$ -Wert kleiner oder gleich dem  $A_1$ -Wert ist, kann dann auch  $A_1$  „unlimited“ gesetzt werden.

Durch Anwendung der „GRS-Methode“ gibt es im Vergleich zu den Transportvorschriften Abweichungen in der Bewertung von Nukliden als „unlimited“, die in Tab. 3.19 aufgeführt sind.

Eine alternative Vorgehensweise wurde in /PHE 13/ dargelegt: Demnach sollen die  $A_1$ -/ $A_2$ -Werte dann „unlimited“ gesetzt werden, wenn der  $Q_B$ -Wert 1000 TBq beträgt und die  $Q_C$ - und  $Q_D$ -/ $Q_E$ -Werte ebenfalls „unlimited“ sind. Davon ausgenommen seien die Nuklide U-nat, Th-nat, U-dep und U-enr, bei denen die  $A_1$ -/ $A_2$ -Werte unabhängig vom  $Q_B$ -Wert „unlimited“ gesetzt werden. Auch diese Rechenmethode ist im Excelprogramm umgesetzt worden, so dass ein direkter Vergleich zwischen der GRS- und der PHE-Methode stattfinden kann. Eine Überprüfung der berechneten Nuklide mit der PHE-Methode zeigt weitgehende Übereinstimmung mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten (siehe auch Abschnitt 4.2).

**Tab. 3.19** Abweichungen in der Bewertung auf „unlimited“ bei Verwendung der GRS-Methode im Vergleich zu /IAEA 08/

Nuklid	Anmerkungen
<sup>41</sup> Ca	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“
<sup>40</sup> K	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert sind „unlimited“ gesetzt
<sup>53</sup> Mn	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“
<sup>59</sup> Ni	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“
<sup>205</sup> Pb	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“
<sup>107</sup> Pd	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“
<sup>187</sup> Re	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“
Re (nat)	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“
<sup>97</sup> Tc	A <sub>1</sub> -/A <sub>2</sub> -Wert nicht „unlimited“

Im Rechenprogramm wird die Prüfung, ob neben den Q<sub>C</sub>- oder Q<sub>D</sub>-Werten auch die A<sub>1</sub>-/A<sub>2</sub>-Werte „unlimited“ gesetzt werden können für beide Methoden, nach eventuell vorzunehmenden Begrenzungen oder Erhöhungen von Q- und A-Werten (z. B. Bremsstrahlung bei A-Werten) durchgeführt.

### 3.8 Nuklidgemische

In den Transportvorschriften /IAEA 12/ werden auch A-Werte für Nuklidgemische angegeben. Im Einzelnen sind das Rubidium in natürlicher Zusammensetzung (Rb-nat), Rhenium in natürlicher Zusammensetzung (Re-nat), Thorium in natürlicher Zusammensetzung (Th-nat), Uran in natürlicher Zusammensetzung (U-nat), abgereichertes Uran (U-dep) und auf bis zu 20 % <sup>235</sup>U angereichertes Uran (U-enr). Weder in den Transportvorschriften /IAEA 12/ noch im Advisory Material TS-G-1.1 /IAEA 08/ sind Angaben zu den verwendeten Zusammensetzungen zur Berechnung der A-Werte enthalten. Die Angaben zur Zusammensetzung musste daher anderen Quellen entnommen werden. Dadurch können sich bei der Berechnung der A-Werte für Urangemische Abweichungen zu den in den Transportvorschriften tabellierten Werten ergeben.

#### 3.8.1 Rubidium

Rubidium in natürlicher Zusammensetzung besteht zu 72,165 % aus dem stabilen Isotop <sup>85</sup>Rb und zu 27,835 % aus dem radioaktiven Isotop <sup>87</sup>Rb /PFE 98/. <sup>87</sup>Rb ist ein Be-

tastrahler und zerfällt in das stabile Isotop  $^{87}\text{Sr}$ . Daher wurden für alle Q-Pfade die gleichen Berechnungen durchgeführt, wie für reines  $^{87}\text{Rb}$ .

### 3.8.2 Rhenium

Rhenium in natürlicher Zusammensetzung besteht zu 37,40 % aus dem stabilen Isotop  $^{185}\text{Re}$  und zu 62,60 % aus dem radioaktiven Isotop  $^{187}\text{Re}$  /PFE 98/.  $^{187}\text{Re}$  ist ein Betastrahler und zerfällt in das stabile Isotop  $^{187}\text{Os}$ . Daher wurden für alle Q-Pfade die gleichen Berechnungen durchgeführt, wie für reines  $^{187}\text{Re}$ .

### 3.8.3 Thorium

In der Natur vorkommendes Thorium besteht aus dem radioaktiven Isotop  $^{232}\text{Th}$  /PFE 98/. Für die Berechnung der Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_D$  werden die Tochternuklide gemäß Anhang D mit einbezogen. Es wird angenommen, dass sich diese Töchter im stationären Gleichgewicht (secular equilibrium) befinden. Zur Berechnung der Pfade  $Q_C$  und  $Q_E$  wurden die jeweiligen Dosiskoeffizienten für  $^{232}\text{Th}$  aus /ICRP 94/ bzw. /EPA 93/ genutzt.

### 3.8.4 Uran

Uran in natürlicher vorkommender Zusammensetzung besteht aus den Isotopen  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  /IAEA 13/ (siehe Tab. 3.20). Angaben zu angereicherterem Uran sind /LOC 95/ entnommen (siehe Anhang E). Aus den dort enthaltenen Angaben wurden Massen- und Aktivitätsanteile für ein Urangemisch mit einem Anreicherungsgrad von 20 %  $^{235}\text{U}$  durch lineare Interpolation errechnet, unter der Annahme, dass im Gemisch nur diese drei Uranisotope enthalten sind (Tab. 3.21). Eine Überprüfung der Werte nach dieser Berechnungsmethode mit den Angaben aus /IAEA 13/ zeigte eine gute Übereinstimmung der erhaltenen Anteile für die einzelnen Uranisotope.

Zur Berechnung der spezifischen Aktivität der Nuklidgemische und zur Überprüfung des „unlimited“-Kriteriums wurden Halbwertszeiten berechnet (Tab. 3.22).

Diese Halbwertszeiten der Urangemische beruhen auf den Halbwertszeiten der drei Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  und wurden jeweils mit dem Aktivitätsanteil des Isotops im

Gemisch gewichtet. Die berechneten spezifischen Aktivitäten für Natururan und abgereichertes Uran stimmen gut mit den Werten aus /IAEA 13/ überein.<sup>22</sup>

**Tab. 3.20** Massen- und Aktivitätsanteile von Uranisotopen in Natururan und abgereichertem Uran (nach /IAEA 13/)

Isotop	Natururan		abgereichertes Uran	
	Massenanteil (%)	Aktivitätsanteil (%)	Massenanteil (%)	Aktivitätsanteil (%)
<sup>234</sup> U	0,0057	48,8	0,001	15,2
<sup>235</sup> U	0,72	2,4	0,2	1,1
<sup>238</sup> U	99,28	48,8	99,8	83,7

**Tab. 3.21** Massen- und Aktivitätsanteile von Uranisotopen in angereichertem Uran (Werte interpoliert, Daten aus /LOC 95/)

Isotop	angereichertes Uran mit 20 % <sup>235</sup> U	
	Massenanteil (%)	Aktivitätsanteil (%)
<sup>234</sup> U	0,17	88
<sup>235</sup> U	20,0	3,5
<sup>238</sup> U	79,8	8,6

**Tab. 3.22** Verwendete Halbwertszeiten und berechnete spezifische Aktivitäten für Uranisotope und -gemische

Isotop/Gemisch	Halbwertszeit (a)	spezifische Aktivität (Bq/g)
<sup>234</sup> U	$2,45 \cdot 10^5$	$2,31 \cdot 10^8$
<sup>235</sup> U	$7,04 \cdot 10^8$	$8,00 \cdot 10^4$
<sup>238</sup> U	$4,47 \cdot 10^9$	$1,24 \cdot 10^4$
Natururan	$2,20 \cdot 10^9$	$2,53 \cdot 10^4$
abgereichertes Uran	$3,75 \cdot 10^9$	$1,48 \cdot 10^4$
angereichertes Uran (20 %)	$4,09 \cdot 10^8$	$1,36 \cdot 10^5$

Zur Berechnung der  $Q_A$ -,  $Q_B$ - und  $Q_D$ -Werte für Natururan wurden alle in ICRP 38 bzw. ICRP 107 verzeichneten Töchter herangezogen, auch solche mit einem sehr geringen

<sup>22</sup> In /IAEA 13/ wird die spezifische Aktivität von Natururan mit 25,4 Bq/mg und von abgereichertem Uran mit 14,8 Bq/mg angegeben.

Dosisbeitrag (siehe Anhang D). Es wurde angenommen, dass sich alle Töchter im stationären Gleichgewicht befinden. Für die Berechnung der  $Q_C$ - und  $Q_E$ -Werte wurden die Dosiskoeffizienten der Einzelisotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  aus /ICRP 94/ bzw. /EPA 93/ nach ihren Aktivitätsanteilen gewichtet aufsummiert.

Die Berechnung von angereichertem und abgereichertem Uran ist mit den Angaben der Transportvorschriften /IAEA 12/ und den Erläuterungen des Q-Systems aus /IAEA 08/ nicht ohne weiteres nachvollziehbar. Insbesondere für angereichertes Uran werden weder  $Q$ - noch  $A$ -Werte angegeben: In den Spalten der  $Q$ -Pfade sind Striche gesetzt, die  $A$ -Werte werden mit „unlimited“ angegeben. Es gibt keine Angaben zu Isotopenverhältnissen oder mitberechneten Töchtern.

Aus diesem Grund wurden zur Berechnung der  $Q_A$ -,  $Q_B$ - und  $Q_D$ -Werte von an- und abgereichertem Uran zwei Ansätze verfolgt:

- Berücksichtigung von Töchtern weitgehend wie in HPA /HPA 11/,
- Berücksichtigung von Töchtern entsprechend der sonst üblichen Berücksichtigung im  $Q$ -System.

Im Programm SEAL /HPA 10/ der HPA werden zur Berechnung der  $A$ -Werte für abgereichertes Uran jeweils die ersten Töchter der jeweiligen Zerfallsketten berücksichtigt. Das Urangemisch wird jedoch mit den Massenanteilen der Uranisotope gewichtet. Dies geschieht mit dem Ziel, die  $A$ -Werte der Transportvorschriften nachzurechnen. Mit diesem Ansatz erhält HPA die gleichen Werte, wie in /IAEA 08/ dokumentiert. In /HPA 11/ selbst wird jedoch darauf hingewiesen, dass dieser Ansatz (der Gewichtung der Uranisotope nach den Massenanteilen statt nach Aktivitätsanteilen) überdacht werden sollte.

Für das vorliegende Excel-Rechenprogramm wurden die im Urangemisch enthaltenen Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  nach ihren Aktivitätsanteilen gewichtet. Dies entspricht auch den Vorgaben des  $Q$ -Systems für sonstige Nuklidgemische (vgl. Gleichung (B.1) auf S. 116).

Des Weiteren wurden zur Umsetzung des ersten Ansatzes die Töchter in Anlehnung an /HPA 11/ verwendet. Keine Berücksichtigung in der Berechnung der  $A$ -Werte für angereichertes Uran findet laut /HPA 11/ das Nuklid  $^{235}\text{U}$ . Für das Excel-Rechenprogramm wird es mitberechnet zuzüglich der Tochter  $^{231}\text{Th}$  (vgl. Anhang D).

Zur Umsetzung des zweiten Ansatzes wurden die Töchter entsprechend den Angaben in /IAEA 13/ berücksichtigt. Danach sind durch vor und während des Anreicherungsprozesses ablaufende Extraktionen und chemische Prozesse nahezu alle Töchter unterhalb von  $^{234}\text{U}$  und  $^{231}\text{Th}$  nicht mehr vorhanden.

Für die Berechnung der  $Q_C$ - und  $Q_E$ -Werte für an- und abgereichertes Uran wurden die Dosiskoeffizienten der Einzelisotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  aus /ICRP 94/ bzw. /EPA 93/ nach ihren Aktivitätsanteilen gewichtet aufsummiert.

### 3.9 Sonstige Annahmen zur Berechnung der Q- und A-Werte

Weiterhin wurden Ausnahmen implizit umgesetzt, ohne dass diese gesondert im Q-System erwähnt werden: Das Nuklid  $^{37}\text{Ar}$  ist ein Edelgas. Nach Rechenvorschrift wäre daher für  $^{37}\text{Ar}$  der Pfad  $Q_E$  statt  $Q_D$  zu berechnen. Gemäß /ICRP 94/ ist jedoch der Anteil der Submersion bei  $^{37}\text{Ar}$  vernachlässigbar, in /EPA 93/ ist der Dosiskoeffizient mit Null angegeben. Daher wird stattdessen für  $^{37}\text{Ar}$  der Pfad  $Q_D$  berechnet und ausgegeben.

In /IAEA 08/ ist für das Nuklid  $^{13}\text{N}$  beim Pfad  $Q_C$  kein Wert gesetzt; in /ICRP 94/ wird für Stickstoffisotope kein Dosiskoeffizient angegeben. Ähnlich wie bei Edelgasen, für die in /ICRP 94/ keine Dosiskoeffizienten angegeben sind, da sie als inert gelten, wird daher angenommen, dass auch  $^{13}\text{N}$  im Q-System als inert angesehen wird und daher der Pfad  $Q_C$  – analog zu den Edelgasen – für Stickstoffisotope im allgemeinen nicht zu berechnen ist.

Das Q-System scheint eine Begrenzung der einzelnen Q-Werte auf 1000 TBq vorzunehmen, ohne dass dies dokumentiert oder begründet ist. Diese Beobachtung wird auch in /HPA 11/ angesprochen. Weiterhin sind vermutlich die in /IAEA 08/ in Table II.2 angegebenen Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten aus den mit o. g. Wert begrenzten Q-Werten „zurückgerechnet“ worden, wodurch für einige Nuklide zu hohe Koeffizienten angegeben sind. Das vorliegende Excel-Rechenprogramm berechnet die Dosisleistungskoeffizienten ausschließlich „vorwärts“ und gibt sie dann aus. Um obiges Verhalten der Q-Werte nachzubilden, kann im Rechenprogramm optional eine solche Begrenzung der Q-Pfade auf 1000 TBq eingestellt werden. Die berechneten Koeffizienten bleiben davon unberührt.

Weiterhin zeigt sich, dass in den Pfaden  $Q_B$  und  $Q_D$  sehr schwache Betastrahler (mit einer Energie kleiner ca. 60 keV) überbewertet sein können. Diese Strahler würden eigentlich keinen oder nur einen sehr geringen Dosisbeitrag in der Haut leisten. Dies würde dazu führen, dass sie quasi keine  $Q_B$ - und/oder  $Q_D$ -Werte hätten. Um eine Vergleichbarkeit mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten zu erhalten, können Betastrahler im Rechenprogramm optional „künstlich verstärkt“ werden, d. h. ihre  $Q_B$ - und  $Q_D$ -Werte werden auf 1000 TBq gesetzt; in Verbindung mit der o. g. Begrenzung der Q-Pfade auf 1000 TBq. Dieses Vorgehen hat keine Auswirkungen auf die berechneten Dosisleistungskoeffizienten der entsprechenden Nuklide.

## 4 Ergebnisse

Zum Vergleich mit den aktuell tabellierten Werten in /IAEA 08/ und /IAEA 12/ wurden exemplarisch Berechnungen mit den gleichen Nukliden durchgeführt, die in /IAEA 12/ in Table 2 gelistet sind. Die Ergebnisse der Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten sind in Anhang F aufgeführt, die Ergebnisse der Berechnung von Q- und A-Werten in Anhang H. In den jeweiligen Tabellen sind die Rechenwerte des Excel-Programms denen aus /IAEA 08/ gegenübergestellt und bei größeren Abweichungen farbig markiert.

Die Vergleichsberechnung wurde mit folgenden Parametern im Excel-Programm durchgeführt:

- Quelle der Nukliddaten: ICRP 38,
- Prüfung der Ergebnisse auf „unlimited“: ja (Berechnung nach PHE),
- Pfad  $Q_A$ , Dosisfaktor nach: ICRP 51 (ANPA),
- Pfad  $Q_C$ , Größe Partikel (AMAD): 1  $\mu\text{m}$ ,
- Pfad  $Q_C$ , chemische Form Dosiskoeffizienten: maximierte DK,
- Pfad  $Q_C$ , Quelle Dosiskoeffizienten: ICRP 68,
- Begrenzung Q-Werte auf 1000 TBq: ja, Betastrahler künstlich verstärkt.

Das Excel-Programm kann, wie in den Kapiteln 3 und 5 beschrieben, weitere Berechnungen mit anderen Parametern durchführen. Diese sind hier nicht weiter aufgeführt, da in diesem Kapitel die entsprechend des in /IAEA 08/ beschriebenen Q-Systems und der aktuellen Transportvorschriften /IAEA 12/ mit dem Excel-Programm berechneten Werte mit den in den Vorschriften tabellierten verglichen werden sollen.

### 4.1 Dosisleistungskoeffizienten

In /IAEA 08/ werden in Appendix II, Table II.2 Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten für die Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$ ,  $Q_C$  und  $Q_D$  aufgelistet. Dabei wird jedoch keine Quelle der aufgeführten Koeffizienten angegeben. In Abschnitt 3.9 wird ausgeführt, dass die Q-Werte vermutlich auf 1000 TBq begrenzt werden, ohne dass dies dokumentiert ist. Zudem scheinen auch sehr schwache Betastrahler in Bezug auf die Q-Werte überbewertet

(„künstlich verstärkt“) zu sein. Diese Vermutungen spiegeln sich in den Vergleichen der berechneten mit den tabellierten Koeffizienten wieder, die vermutlich aus den Q-Werten zurückgerechnet worden sind.

Die für die Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_D$  berechneten und in Anhang F gelisteten Dosisleistungskoeffizienten zeigen mehrheitlich eine gute Übereinstimmung mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten. Abweichungen sind z. B. möglich durch unterschiedliche Fitfunktionen oder anderen Berechnungswege (siehe Kapitel 3). In den meisten Fällen mit einer größeren Abweichung, bei denen der berechnete Wert (teilweise um Größenordnungen) kleiner als der tabellierte Koeffizient ist, wird die o. g. Vermutung der Begrenzung der Q-Werte und des Berechnens der Koeffizienten aus den (begrenzten und sonstig beeinflussten) Q-Werten („Zurückrechnen“) gestützt. Sehr deutlich wird dies bei den Nukliden  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Cf}$  und  $^{248}\text{Cm}$ : Hier wurden für den Pfad  $Q_A$  statt der Dosisleistungskoeffizienten, die sich nach den Vorschriften zur Berechnung des Dosisleistungskoeffizienten für Gamma- und Röntgenstrahlung („Photonenstrahlung“) ergeben würden, die speziell für diese drei Nuklide gesetzten Q-Werte genutzt, die die Neutronenstrahlung repräsentieren sollen. Durch das Zurückrechnen werden bei den Dosisleistungskoeffizienten drei „Grenzwerte“ erzeugt, die von keinem Nuklid unterschritten werden. Diese „Grenzwerte“ betragen für den Pfad  $Q_A$   $\dot{e}_{\text{pt}} = 1,0 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}\cdot\text{h}}$ , für den Pfad  $Q_B$   $\dot{e}_{\beta} = 1,0 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Sv}}{\text{Bq}\cdot\text{h}}$  und für den Pfad  $Q_D$   $\dot{h}_{\text{Haut}} = 2,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Sv}\cdot\text{m}^2}{\text{TBq}\cdot\text{s}}$ .

Es wurde ebenfalls ein Vergleich der Dosiskoeffizienten für den Pfad  $Q_C$  durchgeführt. Dabei zeigten sich für viele Nuklide Abweichungen zwischen den in /ICRP 94/ und in /IAEA 08/ gelisteten Werten, die auch von /HPA 11/ festgestellt wurden. Da in /IAEA 08/ keine Quelle für die Dosiskoeffizienten angegeben wurde, konnte keine detailliertere Analyse durchgeführt werden. Aus Gründen der Konsistenz werden im Excelprogramm ausschließlich die Werte aus /ICRP 94/ verwendet, auch wenn dadurch im Einzelfall Abweichungen der berechneten  $Q_C$ -Werte entstehen. Daher werden (entsprechend der Berechnungsmethodik der Dosiskoeffizienten für  $Q_C$ ) keine Töchter berücksichtigt.<sup>23</sup>

Die bei der Berechnung berücksichtigten Tochternuklide sind in Anhang G tabelliert.

---

<sup>23</sup> In /HPA 11/ wird auch auf die Dosiskoeffizienten aus /ICRP 94/ zurückgegriffen; einzig für  $^{226}\text{Ra}$  wird der Wert aus /IAEA 08/ genommen, um für dieses Nuklid die Töchter zu berücksichtigen. Aus Konsistenzgründen werden im Excel-Rechenprogramm für alle Nuklide die Koeffizienten aus /ICRP 94/ verwendet.

## 4.2 Q- und A-Werte

In Anhang H sind die mit dem Excel-Programm berechneten Q- und A-Werte tabellarisch wiedergegeben und werden mit den entsprechenden Werten aus /IAEA 08/ verglichen.

Es zeigen sich bei den Q-Werten mehrheitlich gute Übereinstimmungen mit den tabellierten Werten. Unterschiede der Q-Werte begründen sich durch unterschiedliche Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten (siehe Abschnitt 4.1). Ebenso können Abweichungen in den Pfaden  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_D$  durch abweichende Berücksichtigung von Tochternukliden entstehen.<sup>24</sup> Aufgrund der Berechnungsmethodik der A-Werte führen Abweichungen der Q-Werte nur in sehr seltenen Fällen auch zu großen (mehr als Faktor 2) Abweichungen der A-Werte (vgl. Tab. 4.1), so dass die berechneten A-Werte weitestgehend mit denen aus /IAEA 08/ übereinstimmen.

**Tab. 4.1** Nuklide mit großen Abweichungen der A-Werte

Nuklid	Anmerkungen
<sup>26</sup> Al	$Q_B$ -Wert größer, daher bestimmt der $Q_A$ -Wert nun den $A_1$ -/ $A_2$ -Wert
<sup>47</sup> Ca	$Q_A$ - und $Q_B$ -Werte kleiner, der $Q_B$ -Wert bestimmt nun den $A_1$ -Wert
<sup>166</sup> Dy	$Q_B$ -Wert kleiner, daher ist auch der $A_1$ -Wert kleiner
<sup>202</sup> Pb	$Q_D$ -Wert größer und „unlimited“, daher auch $A_1$ -/ $A_2$ -Wert „unlimited“
<sup>225</sup> Ra	$Q_B$ - bzw. $Q_C$ -Wert größer, daher ist der $A_1$ - bzw. der $A_2$ -Wert größer
<sup>92</sup> Sr	$Q_C$ -Wert wurde in /IAEA 08/ mit Töchtern berechnet
<sup>96m</sup> Tc	$Q_C$ - und $Q_D$ -Wert wurde in /IAEA 08/ mit Töchtern berechnet
<sup>231</sup> Th	große Abweichung von $Q_C$ -Wert, evtl. in /IAEA 08/ mit Töchtern berechnet?

Die Abweichungen der A-Werte der Nuklide <sup>26</sup>Al und <sup>231</sup>Th sind auch in /HPA 11/ (Appendix F) dokumentiert. Für <sup>231</sup>Th wird dort ein fehlerhafter Dosiskoeffizient für den Pfad  $Q_C$  vermutet. Bei beiden Nukliden stimmen die vom Excel-Programm berechneten  $A_1$ -/ $A_2$ -Werte mit den in /HPA 11/ berechneten Werten überein.

Für die Nuklide <sup>47</sup>Ca, <sup>166</sup>Dy und <sup>225</sup>Ra wurden in /HPA 11/ ebenfalls Abweichungen festgestellt, dort aufgrund der unterschiedlichen Bewertung von Tochternukliden. Die vom Excel-Programm berechneten Werte weichen jedoch noch stärker als in /HPA 11/

<sup>24</sup> Dies gilt im Grunde auch für den Pfad  $Q_C$ , da dort für einzelne Nuklide in /IAEA 08/ (undokumentiert) Töchter mit berücksichtigt wurden, für andere nicht. Laut /HPA 11/ ist dies zumindest für <sup>96m</sup>Tc und <sup>92</sup>Sr sowie <sup>226</sup>Ra geschehen.

vom in /IAEA 08/ tabellierten Wert ab. Die in /HPA 11/ für  $^{92}\text{Sr}$  berechneten  $Q_A$ - und  $Q_B$ -Werte sowie der  $A_1$ -Wert sind denen vom Excel-Programm berechneten Werten sehr ähnlich (auch in den Abweichungen). Die Abweichung im vom Excel-Programm berechneten  $A_2$ -Wert ist auf den unterschiedlichen Dosiskoeffizienten für den Pfad  $Q_C$  zurückzuführen.

Weitere Abweichungen der  $A$ -Werte sind oft in der Methode der Rundung der Werte begründet, sie unterscheiden sich in der Ziffer vor der Zehnerpotenz um 1. Dies führt je nach Wert teilweise zu Abweichungen bis zu einem Faktor 2.

In Bezug auf die Bewertung der  $Q$ - und  $A$ -Werte auf „unlimited“ gibt es – sowohl bei Anwendung der GRS-Methode als auch bei Anwendung der PHE-Methode – im Vergleich zu /IAEA 08/ zwei Abweichungen, die in Tab. 4.2 aufgeführt sind.

**Tab. 4.2** Abweichungen in der Bewertung auf „unlimited“ bei Verwendung der GRS- und der PHE-Methode im Vergleich zu /IAEA 08/

Nuklid	Anmerkungen
$^{137}\text{La}$	$Q_D$ -Wert ist „unlimited“ gesetzt
$^{202}\text{Pb}$	$Q_D$ -Wert und $A_1$ -/ $A_2$ -Werte sind „unlimited“ gesetzt

Bei  $^{137}\text{La}$  wurde in /IAEA 08/ eventuell vergessen, den Pfad  $Q_D$  „unlimited“ zu setzen. Die spezifische Aktivität von  $^{137}\text{La}$  beträgt (nach Berechnung durch das Excel-Programm<sup>25</sup>)  $1,611 \cdot 10^9 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ . Wird der in /IAEA 08/ gelistete Wert für den Pfad  $Q_D$  von  $1,0 \cdot 10^3 \text{ TBq}$  mit dem in Abschnitt 2.4.5 erläuterten Kriterium verwendet, ist dieser Pfad „unlimited“ zu setzen.

Für das Nuklid  $^{202}\text{Pb}$  wurden im Pfad  $Q_D$  ein anderer Dosisleistungskoeffizient und somit auch ein abweichender Wert für  $Q_D$  berechnet. Diese Abweichung bewirkt, dass der Pfad  $Q_D$  „unlimited“ gesetzt wird und dadurch auch das Kriterium erfüllt wird,  $A_1$  und  $A_2$  „unlimited“ zu setzen.

<sup>25</sup> In /IAEA 08/ ist die spezifische Aktivität mit  $1,612 \cdot 10^9 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  angegeben. Dieser sehr geringe Unterschied in der Zahlenangabe würde jedoch keine abweichende Bewertung nach sich ziehen.

## 5 Programmbeschreibung BerQATrans

Das Programm BerQATrans zur Berechnung der Q- und A-Werte basiert auf dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2010 und ist in Excel-VBA-Code geschrieben. Das Programm besteht aus mehreren Modulen. Es wurde mit Office 2010 bzw. Excel 2010 in einer Windows 7-Umgebung (32 Bit) getestet.

### 5.1 Installation

Das Programm und seine Unterverzeichnisse können an eine beliebige Stelle im lokalen Dateiverzeichnis auf einer Festplatte kopiert werden. Der Start von einem Netzlaufwerk kann Probleme verursachen, daher wird von dieser Möglichkeit abgeraten. Der Anwender muss für einen korrekten Rechenlauf volle Schreib- und Leserechte für diese Verzeichnisse – einschließlich des Hauptverzeichnisses, in dem das Programm liegt – besitzen.

Das Programm besteht neben der Hauptdatei `GRS_BerQATrans.xlsm` aus verschiedenen Datendateien in Unterverzeichnissen, auf die während des Rechengangs zugegriffen wird. Ohne diese Hilfsdateien ist das Programm nicht lauffähig. In Abb. 5.1 ist die Verzeichnisstruktur wiedergegeben.

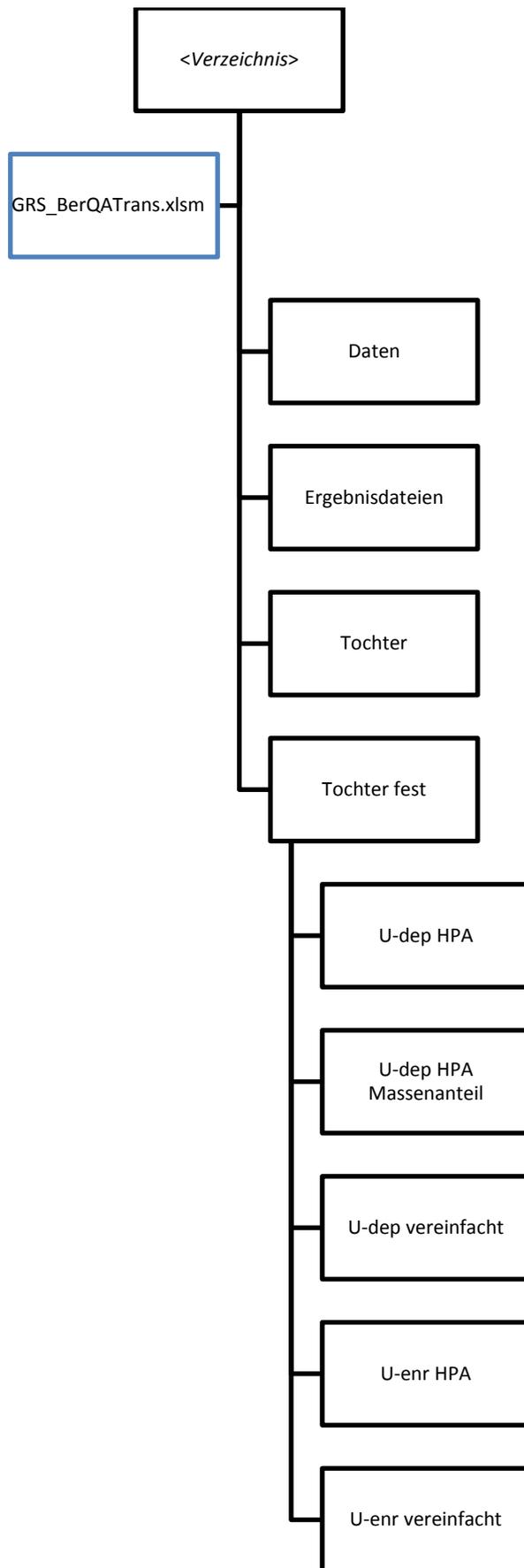
Nachfolgend werden die für den Programmablauf notwendigen Hilfsdateien in den jeweiligen Unterverzeichnissen aufgeführt:

- Daten
  - `Cross_Dimensionslose_Dosis_j.xlsx`
  - `EPA_FGR-12_DK_Submersion.xlsx`
  - `ICRP-38_BET.xlsx`
  - `ICRP-38_NDX.xlsx`
  - `ICRP-38_RAD.xlsx`
  - `ICRP-68_DK_Worker.xlsx`
  - `ICRP-107_BET.xlsx`

- ICRP-107\_NDX.xlsx
- ICRP-107\_RAD.xlsx
- ICRP-119\_DK\_Worker.xlsx
- NIST\_Atommassen.xlsx
- Tochter fest
  - Rb-nat\_ICRP-38.xlsx
  - Rb-nat\_ICRP-107.xlsx
  - Re-nat\_ICRP-38.xlsx
  - Re-nat\_ICRP-107.xlsx
  - Th-nat\_ICRP-38.xlsx
  - Th-nat\_ICRP-107.xlsx
  - U-dep\_ICRP-38.xlsx
  - U-dep\_ICRP-107.xlsx
  - U-enr\_ICRP-38.xlsx
  - U-enr\_ICRP-107.xlsx
  - U-nat\_ICRP-38.xlsx
  - U-nat\_ICRP-107.xlsx

Die Verzeichnisse Ergebnisdateien und Tochter sind leer, müssen jedoch trotzdem angelegt sein. Die Unterverzeichnisse U-dep HPA, U-dep HPA Massenanteil, U-dep vereinfacht, U-enr HPA und U-enr vereinfacht enthalten zusätzliche Tochternukliddateien, die für den normalen Programmablauf nicht unbedingt notwendig sind (Testdateien).

Die Datendateien haben feste Formate für die Inhalte. Diese Formatvorgaben dürfen nicht geändert werden. Korrekturen einzelner Dateien werden durchgeführt, indem mit der neueren Dateiversion die bisherige überschrieben wird.



**Abb. 5.1** Verzeichnisstruktur des Programms BerQATrans

## 5.2 Programmstart

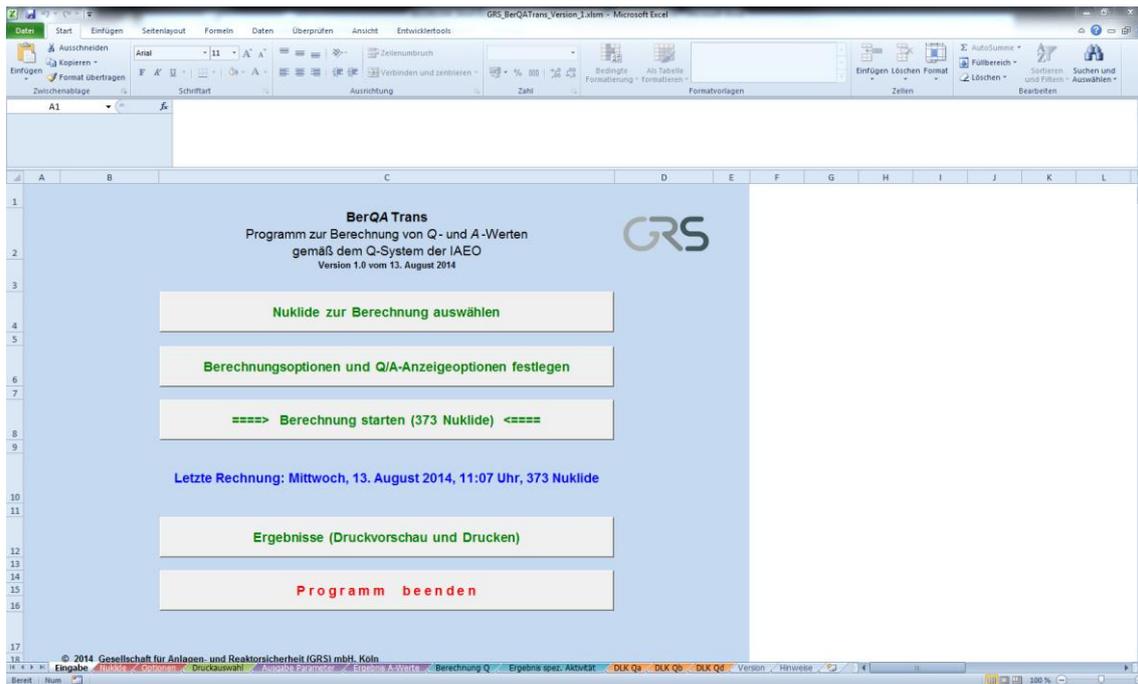
Das Programm wird durch Aufruf der Hauptdatei `GRS_BerQATrans.xlsm` gestartet. Aufgrund der Größe der Datei kann es – abhängig von der Leistung des ausführenden Computers – zu Verzögerungen kommen. Dies kann auch während des laufenden Programms beim Umschalten zwischen den Reitern in Excel geschehen. Dies ist ein normales Verhalten, nach wenigen Augenblicken kann der Nutzer weitere Eingaben durchführen. Aus diesem Grund wird während des Rechenvorganges ausdrücklich davon abgeraten, parallel andere Anwendungen aktiv (Schreib-/Leseaktivitäten; intensive Berechnungen) zu betreiben, da dies zu Programmabstürzen führen kann.

Da das Programm Makros enthält, kann es je nach den Sicherheitseinstellungen von Office auf dem jeweiligen System zu einer Abfrage kommen (Abb. 5.2). Hier müssen für einen korrekten Programmablauf aktive Inhalte aktiviert werden (Schaltfläche „Inhalt aktivieren“ drücken).



**Abb. 5.2** Sicherheitsabfrage in Excel 2010 für aktive Inhalte

Nach dem Programmstart erscheint das Hauptfenster (Reiter „Eingabe“, Abb. 5.3) Von hier aus sind alle wichtigen Programmfenster über Schaltflächen erreichbar. Alternativ können auch die Reiter in Excel am unteren Rand ausgewählt werden.



**Abb. 5.3** Hauptfenster im Rechenprogramm

## 5.3 Durchführen einer Rechnung

Zum Durchführen einer Rechnung müssen nacheinander im Hauptfenster (Abb. 5.3) die ersten drei Menüpunkte „abgearbeitet“ werden. Mit jeder Schaltfläche wird ein Eingabefenster geöffnet, in welchem die notwendigen Angaben zu tätigen sind, danach kehrt man zum Hauptfenster zurück.

### 5.3.1 Nuklidauswahl

Durch Drücken der Schaltfläche „Nuklide zur Berechnung auswählen“ bzw. durch Auswahl des Reiters „Nuklide“ gelangt man zur Nuklidauswahl (Abb. 5.4).<sup>26</sup> Dem Nutzer stehen dazu vier Tabellen zur Auswahl, welche die Eingabe erleichtern sollen. Die Tabellen enthalten Nuklide nach folgendem Schema:

- ICRP 107  
es sind alle Nuklide aufgeführt, die auch in der ICRP 107 /ICRP 08/ enthalten sind,

<sup>26</sup> Der Aufruf dieses Fensters kann auf langsameren Systemen verzögert erfolgen, da ein erheblicher Umfang an Eingabeelementen geladen wird. Nach kurzer Zeit steht das Fenster dann für Eingaben des Nutzers zur Verfügung.

- ICRP 38  
es sind alle Nuklide aufgeführt, die auch in der ICRP 38 /ICRP 83/ enthalten sind,
- ICRP 38, vollständige Pfade  
es sind diejenigen Nuklide aufgeführt, die in der ICRP 38 enthalten sind und deren Pfade vollständig mit BerQATrans berechnet werden können,
- IAEA SSR-6 (2012)  
es sind alle Nuklide aufgeführt, die auch in den Transportvorschriften SSR-6 /IAEA 12/ enthalten sind.

**Wählen Sie hier die zu berechnenden Nuklide aus! Klicken Sie dann auf "Fertig".**  
**"Reset" stellt den vorherigen Zustand (Auswahl) wieder her.**  
 Hinweise: Eventuelle Mehrfacheinträge (identische Nuklide aus mehr als einer Tabelle) werden automatisch korrigiert.  
 Sie können hier nur die Schaltflächen anklicken, Direkteingaben (z. B. "X" vor Nuklidnamen) sind NICHT möglich.

**Leeren** setzt alles zurück (nichts ausgewählt)    **Fertig**    **Reset**

Die Schaltflächen "A", "K" und "U" haben (jeweils für die Tabelle) folgende Bedeutung: "A" selektiert ALLE Nuklide  
 "K" de-selektiert ALLE Nuklide ("KEINE")  
 "U" kehrt die Auswahl komplett um

ICRP 107			ICRP 38			ICRP 38, vollständige Pfade			IAEO SSR-6 (2012)		
A	K	Nuklid	A	K	Nuklid	A	K	Nuklid	A	K	Nuklid
Ausgewählt: 0 von 1260			Ausgewählt: 28 von 839			Ausgewählt: 0 von 768			Ausgewählt: 0 von 373		
		Ac-223			Ac-223			Ac-224			Ac-225
		Ac-224			Ac-224			Ac-225			Ac-227
		Ac-225			Ac-225			Ac-226			Ac-228
		Ac-226			Ac-226			Ac-227			Ag-105
		Ac-227			Ac-227			Ac-228			Ag-108m
		Ac-228		X	Ac-228			Ag-102			Ag-110m
		Ac-230		X	Ag-102			Ag-103			Ag-111
		Ac-231		X	Ag-103			Ag-104			Al-26
		Ac-232	A	X	Ag-104			Ag-104m			Am-241
		Ac-233		X	Ag-104m			Ag-105			Am-242m
		Ag-100m		X	Ag-105			Ag-106			Am-243
		Ag-101			Ag-106			Ag-106m			Ar-37
		Ag-102		X	Ag-106m			Ag-108m			Ar-39
		Ag-102m		X	Ag-108			Ag-110m			Ar-41
		Ag-103		X	Ag-108m			Ag-111			As-72
		Ag-104		X	Ag-109m			Ag-112			As-73
		Ag-104m			Ag-110			Ag-115			As-74
		Ag-105			Ag-110m			Al-26			As-76
		Ag-105m			Ag-111			Am-237			As-77
		Ag-106			Ag-112			Am-238	A		At-211

Abb. 5.4 Nuklidauswahl im Rechenprogramm

Dabei wird durch Nutzung der Tabellen zur NuklidAuswahl keine Einstellung im Programm geändert, mit welchen Datengrundlagen (ICRP 38, ICRP 107 etc.) oder Methoden gerechnet wird, dies erfolgt ausschließlich durch Auswahl entsprechender Optionen im weiteren Verlauf (siehe Abschnitt 5.3.2). Durch Auswahl von Nukliden aus der dritten und vierten Tabelle können mit BerQATrans für bereits gelistete (Tabelle 4) oder gelistete und neue Nuklide (Tabelle 3) Q- und A-Werte vollständig nachgerechnet bzw. neu berechnet werden.

Die Auswahl eines oder mehrerer Nuklide kann direkt über die jeweilige Schaltfläche des Nuklides erfolgen. Eine Auswahl wird durch ein „X“ links neben der Schaltfläche signalisiert. Durch nochmaliges Drücken wird das Nuklid wieder abgewählt und das „X“ entfernt. In den jeweiligen Tabellenköpfen sind Schaltflächen zur Gruppenauswahl eingefügt: Mit Schaltfläche „A“ werden alle Nuklide der Tabelle ausgewählt, mit Schaltfläche „K“ werden alle Nuklide abgewählt und mit Schaltfläche „U“ wird die derzeitige Auswahl umgekehrt (alle ausgewählten Nuklide werden abgewählt und alle nicht gewählten Nuklide werden ausgewählt).

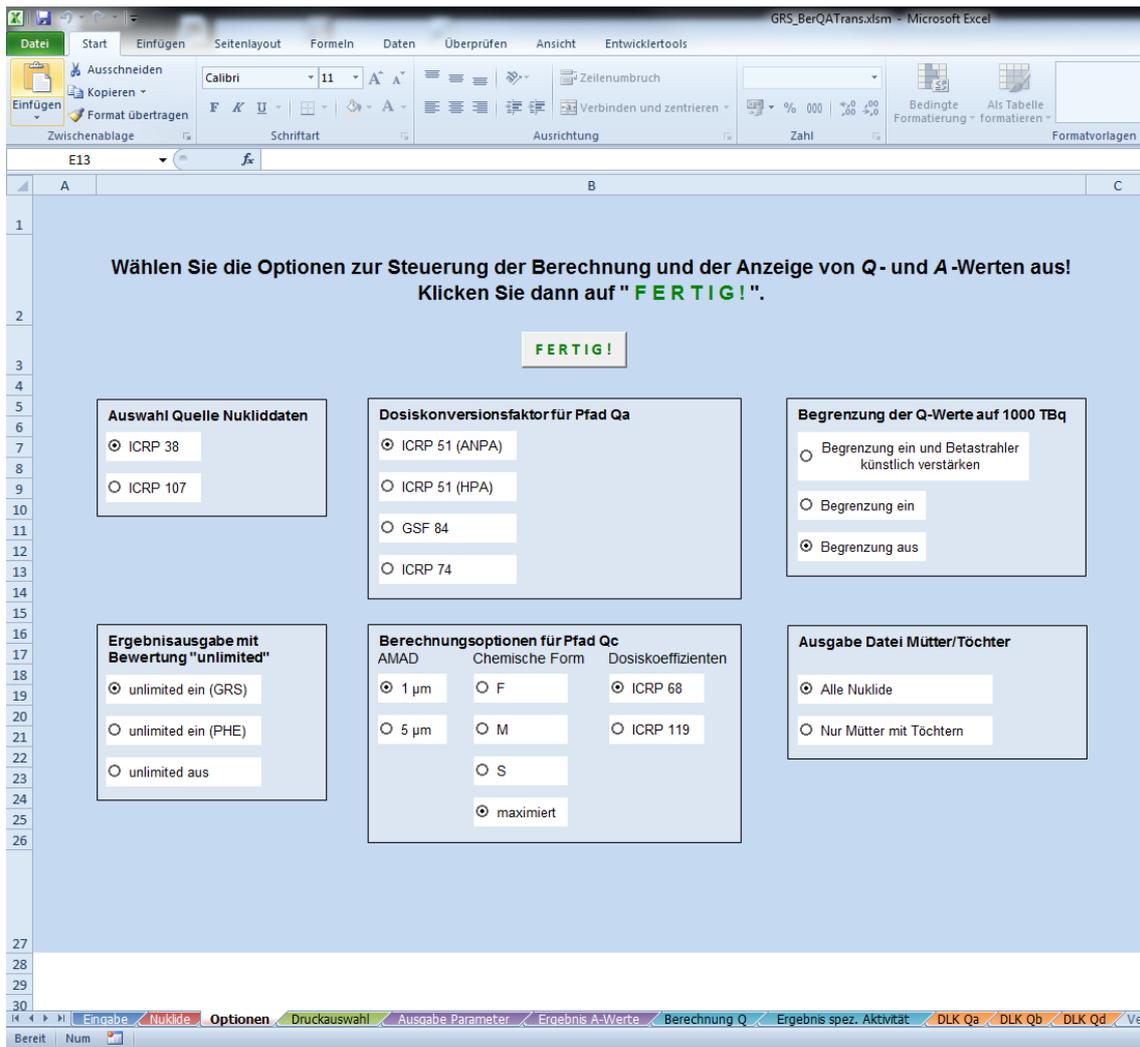
Es ist möglich, das gleiche Nuklid in mehreren Tabellen auszuwählen. Das betreffende Nuklid wird trotzdem nur einmal berechnet und ausgegeben.

Im oberen Bereich der Eingabemaske sind zusätzlich drei global (auf alle vier Auswahltabellen wirkende) Schaltflächen vorhanden: Mit „Leeren“ werden alle vier Tabellen zurückgesetzt und alle Nuklide abgewählt. Diese Aktion kann ggf. einige Sekunden dauern. Mit „Reset“ wird die beim letzten Programmende gespeicherte NuklidAuswahl aufgerufen, die derzeitige Auswahl wird verworfen. Mit der Schaltfläche „Fertig“ beendet man die NuklidAuswahl und kehrt zum Hauptfenster (Abb. 5.3) zurück.

Die angezeigten Nuklidnamen entsprechen den Vereinheitlichungen und Anpassungen, welche in Tab. 3.1 und Tab. 3.2 aufgeführt sind und richten sich ansonsten nach der ICRP. Ein Buchstabe A neben dem Nuklid signalisiert, dass dieses Nuklid gemäß den Transportvorschriften bzw. dem Q-System als Alphastrahler zu behandeln ist.

### **5.3.2 Optionen für Berechnung und Ergebnisdarstellung**

Nach der NuklidAuswahl kann man im Hauptfenster (Abb. 5.3) durch Drücken der Schaltfläche „Berechnungsoptionen und Q/A-Anzeigeoptionen festlegen“ zur Optionsauswahl gelangen (Abb. 5.5).



**Abb. 5.5** Optionsauswahl im Rechenprogramm

Nachfolgend werden die möglichen Optionen kurz beschrieben. Für die fachlichen Hintergründe wird – soweit zutreffend – auf den jeweiligen Abschnitt in diesem Bericht verwiesen. Nach Auswahl der gewünschten Optionen kehrt man mit der Schaltfläche „Fertig“ zum Hauptfenster (Abb. 5.3) zurück.

### Auswahl Quelle Nuklidaten

Mithilfe dieser Option kann gewählt werden, ob für die Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten und Q-Werte der Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_D$  sowie für die Ausgabe der Halbwertszeit und die Berechnung der spezifischen Aktivität auf die Daten aus der ICRP 38 /ICRP 83/ oder ICRP 107 /ICRP 08/ zurückgegriffen wird (vgl. Kapitel 3 auf S. 19). Dabei ist es irrelevant, in welcher Tabelle zur NuklidAuswahl (siehe Abschnitt 5.3.1) die zu berechneten Nuklide gewählt wurden.

### **Ergebnisausgabe mit Bewertung „unlimited“**

Diese Option regelt, ob in der Ergebnisdarstellung Q- und A-Werte in jedem Fall als Zahlenwert dargestellt werden oder ob bei LSA-Stoffen auf „unlimited“ geprüft und ggf. eingesetzt wird. Zudem kann die Methode der Prüfung (GRS-Methode oder PHE-Methode) variiert werden (siehe Abschnitt 2.4.5 auf S. 16 und Abschnitt 3.7 auf S. 52).

### **Dosiskonversionsfaktor für Pfad $Q_A$**

Mit dieser Option kann ausgewählt werden, welcher Dosiskonversionsfaktor zur Berechnung des Q-Wertes im Pfad  $Q_A$  angewendet werden soll. Näheres siehe Abschnitt 2.2.1 auf S. 5 und Abschnitt 3.1.4 auf S. 28.

### **Berechnungsoptionen für Pfad $Q_C$**

Für die Berechnung des Q-Wertes im Pfad  $Q_C$  kann für die Nuklide der zu verwendende AMAD und die chemische Form ausgewählt werden. Maximierte Dosiskoeffizienten nutzen den jeweils größten Koeffizienten für das zu berechnende Nuklid – unabhängig von dessen chemischer Form (vgl. Abschnitt 2.2.3 auf S. 9 und Abschnitt 3.3 auf S. 45). Zusätzlich können neben den Dosiskoeffizienten der ICRP 68 /ICRP 94/ auch die (mit kleineren Korrekturen versehenen) Koeffizienten der ICRP 119 /ICRP 12/ verwendet werden.

### **Begrenzung der Q-Werte auf 1000 TBq**

Mit dieser Option kann die Ausgabe aller Q-Werte in den einzelnen Pfaden auf 1000 TBq begrenzt werden, analog zu den tabellierten Werten der Transportvorschriften. Als Zusatzoption können die Betastrahler der Pfade  $Q_B$  und  $Q_D$  „künstlich verstärkt“ werden, d. h. Betastrahler, welche eigentlich zu schwach sind, um in der menschlichen Haut eine Dosis zu erzeugen, werden soweit verstärkt, dass sie trotzdem einen Dosisbeitrag liefern (siehe Abschnitt 3.9 auf S. 59). Letztere Option macht nur Sinn, wenn sie kombiniert mit der Begrenzung eingesetzt wird, sie kann daher nicht einzeln ausgewählt werden.

Jegliche Einstellungen dieser Optionen haben keine Auswirkungen auf die Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten, diese werden immer korrekt wiedergegeben. Lediglich die Anzeige der Ergebnisse der Q- und A-Werte wird beeinflusst.

### **Ausgabe Datei Mütter/Töchter**

BerQATrans erzeugt bei jedem Rechenlauf u. a. eine Ausgabedatei mit den berechneten Nukliden und den dafür berücksichtigten Tochternukliden (siehe Abschnitt 5.5). Diese Option steuert, ob diese Ausgabedatei alle Nuklide enthält (auch solche ohne zu berücksichtigende Töchter) oder nur „echte“ Mutternuklide mit Töchtern darstellt. Diese Option hat keinen Einfluss auf den tatsächlichen Rechengang.

### **5.3.3 Start der Rechnung**

Nach Eingabe aller Nuklide und Festlegung der Optionen kann durch Drücken der Schaltfläche „Berechnung starten“ eine Berechnung ausgeführt werden. Das jeweils gerade berechnete Nuklid wird unten in einer Statusleiste ausgegeben.

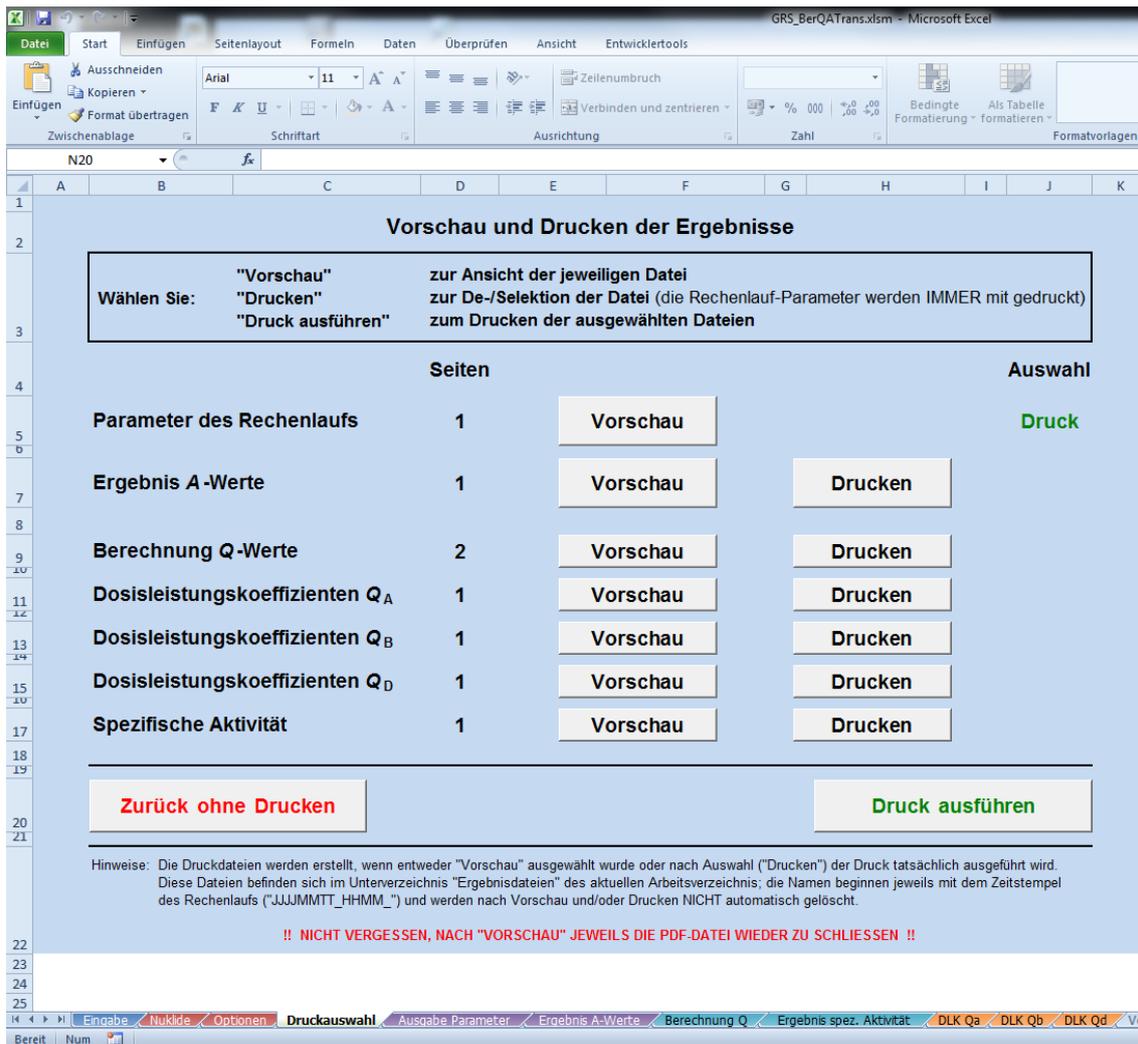
Während des Rechengangs sollten auf dem Rechner keine weiteren Operationen durchgeführt werden, da dies zum unbeabsichtigten Anhalten der Berechnung oder zum Absturz des Rechenprogramms führen kann. Dieses Verhalten ist dem recht großen Umfang des verwendeten VBA-Codes geschuldet.

## **5.4 Rechenergebnisse**

Nachdem die Rechnung beendet wurde, können die Ergebnisse entweder über die Schaltfläche „Ergebnisse“ (als Druckvorschau) oder direkt über die Reiter in Excel betrachtet werden.

### **5.4.1 Schaltfläche „Ergebnisse“**

Die Schaltfläche Ergebnisse führt zu einem Auswahldialog (Abb. 5.6).



**Abb. 5.6** Druckauswahldialog im Rechenprogramm

Mit Hilfe der Schaltfläche „Vorschau“ wird vom jeweiligen Ergebnisblatt ein PDF-Dokument erzeugt und direkt geöffnet. Die Schaltfläche „Drucken“ merkt das Ergebnisblatt zum Drucken (ebenfalls als PDF-Datei) vor, öffnet sie aber nicht. Erst durch die Schaltfläche „Druck ausführen“ werden alle Dokumente mit der Auswahlmarkierung „Druck“ als PDF-Datei erzeugt und in einem PDF-Betrachter geöffnet. Mit diesem können sie dann gedruckt werden. Die Parameter des Rechenlaufes werden immer gedruckt.

Alle erzeugten PDF-Dateien werden auch im Verzeichnis `Ergebnisdateien` gespeichert.

## 5.4.2 Ergebnisblätter

Die Ergebnisse können auch in der Exceltabelle direkt über die Reiter ausgewählt werden. Exemplarisch wird dies hier für das Ergebnisblatt der A-Werte sowie für ein Blatt mit berechneten Q-Werten und zusätzlichen Erläuterungen gemacht.

Der Reiter „Ergebnis A-Werte“ zeigt in übersichtlicher tabellarischer Form die berechneten Ergebnisse (Abb. 5.7).

**BerQATrans**  
 Programm zur Berechnung von Q- und A-Werten gemäß dem Q-System der IAEQ

© 2014 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) Köln

**Ergebnisse A-Werte**      Rechnung von Dienstag, 27. Mai 2014, 10:30 Uhr

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>A</sub> (TBq)	Q <sub>B</sub> (TBq)	Q <sub>C</sub> (TBq)	Q <sub>D</sub> (TBq)	Q <sub>E</sub> (TBq)	Q <sub>F</sub> (TBq)	A <sub>1</sub> (TBq)	A <sub>2</sub> (TBq)
Ac-228	F	6,15 h	1,3E+00	5,7E-01	2,0E+00	5,1E-01	--	2,0E+04	6E-01	5E-01
Ag-102	S	12,9 min	3,2E-01	3,8E-01	2,6E+03	9,0E-01	--	--	3E-01	3E-01
Ag-103	S	65,7 min	1,3E+00	5,7E+00	1,8E+03	2,8E+00	--	--	1E+00	1E+00
Ag-104	S	69,2 min	4,0E-01	1,5E+01	1,3E+03	1,6E+01	--	--	4E-01	4E-01
Ag-104m	S	33,5 min	6,1E-01	6,5E-01	1,9E+03	1,3E+00	--	--	6E-01	6E-01
Ag-105	S	41,29 d	2,1E+00	1,2E+04	6,4E+01	2,4E+01	--	--	2E+00	2E+00
Ag-106m	F	8,28 d	3,9E-01	6,0E+02	4,5E+01	3,4E+01	--	--	4E-01	4E-01
Ag-108		2,37 min	5,7E+01	5,2E-01	??	5,8E-01	--	--	5E-01	k. A.
Ag-108m	S	418 a	6,6E-01	6,0E+00	1,4E+00	5,7E+00	--	--	7E-01	7E-01
Ag-109m		39,6 s	7,4E+01	k. W.	??	1,7E+00	--	--	4E+01	k. A.
Ba-142	F	10,6 min	1,0E+00	5,6E-01	3,1E+03	5,5E-01	--	--	6E-01	5E-01
Be-10	S	1,51E+06 a	k. W.	5,3E+01	1,6E+00	5,7E-01	--	--	4E+01	6E-01
Co-57	S	271,74 d	1,0E+01	6,0E+06	5,3E+01	1,3E+01	--	--	1E+01	1E+01
Eu-148	M	54,5 d	4,8E-01	3,0E+02	1,9E+01	1,8E+01	--	1,9E+05	5E-01	5E-01
Ge-68	M	270,95 d	1,1E+00	4,7E-01	3,8E+00	6,6E-01	--	--	5E-01	5E-01
Ho-164	M	29 min	3,1E+01	2,0E+01	5,8E+03	2,9E+00	--	--	2E+01	3E+00
Kr-77		74,4 min	1,0E+00	4,7E-01	--	--	4,3E-01	--	5E-01	4E-01
Nb-95	S	34,991 d	1,4E+00	1,6E+03	3,1E+01	3,3E+00	--	--	1E+00	1E+00
Pb-202m	F	3,53 h	5,4E-01	3,2E+01	7,5E+02	1,1E+00	--	--	5E-01	5E-01
Pt-195m	F	4,02 d	1,4E+01	k. W.	2,6E+02	4,8E-01	--	--	1E+01	5E-01
Rb-89	F	15,15 min	5,1E-01	1,9E-01	3,6E+03	5,1E-01	--	--	2E-01	2E-01
Rb-nat	F	4,92E+10 a	k. W.	k. W.	unlimited	unlimited	--	--	k. A.	unlimited
Th-226	S	30,57 min	6,0E+01	3,1E+05	8,5E-01	3,0E+00	--	8,5E+03	4E+01	8E-01
Th-227	S	18,68 d	8,6E+00	9,1E+05	5,2E-03	3,4E+00	--	5,2E+01	9E+00	5E-03

Navigation: Eingabe | Nuklide | Optionen | Druckauswahl | Ausgabe Parameter | **Ergebnis A-Werte** | Berechnung Q | Ergebnis spez. Aktivität

Abb. 5.7 Ergebnisdarstellung des Rechenprogramms

Es werden für jedes Nuklid alle Q-Werte angezeigt, sofern möglich. Die Ausgabe „k. W.“ bedeutet „kein Wert“, d. h. das Nuklid wurde für diesen Pfad korrekt berechnet, jedoch kann kein Wert ausgegeben werden (z. B. weil der Dosisleistungskoeffizient Null ist). Dies ist also keine Fehlermeldung im eigentlichen Sinne. Dagegen bedeutet die Ausgabe „??“, dass das Nuklid in diesem Pfad nicht berechnet werden konnte. Diese Ausgabe deutet eine Fehlermeldung an, der entsprechende A-Wert des Nuklids beruht somit nicht auf allen Q-Werten und sollte nur nach eingehender Prüfung verwendet werden. Im Ergebnis wird bei solchen Nukliden der betroffene A-Wert nicht angegeben, und stattdessen „k. A.“ für „keine Angabe“ ausgegeben. Zwei Striche deuten an, dass der betreffende Pfad für das Nuklid nicht anzuwenden ist. Mit zwei geklammerten Strichen werden Pfade gekennzeichnet, die zwar theoretisch berücksichtigt werden müssten, für die aber trotzdem der Pfad wegen anderer Vorschriften nicht verwendet wird.<sup>27</sup>

Zur Fehlersuche und zum Nachvollziehen der Berechnung kann der Reiter „Berechnung Q“ ausgewählt werden (Abb. 5.8). Diese Ergebnisdarstellung ist umfangreicher und zeigt z. B. auch Zwischenergebnisse ausgewählter Q-Pfade an. Zudem werden diejenigen Q-Werte farbig hervorgehoben, die den Ausschlag für den A-Wert des Nuklids gaben. Sofern nicht die Begrenzung auf 1000 TBq in den Optionen eingestellt ist, werden auch alle Q-Werte größer 1000 TBq markiert. Weiterhin erhalten die Zellen bei Fehlermeldungen und Hinweisen im Rechenablauf einen Kommentar (rotes Kommentardreieck oben rechts in den Zellen). Diese Kommentare werden nicht mit ausgedruckt oder abgespeichert.

---

<sup>27</sup> Beispiel Radon: Dies ist ein Alphastrahler und müsste daher auch im Pfad  $Q_F$  berechnet werden. Als Edelgas gibt es aber keine Dosiskoeffizienten für den Pfad  $Q_C$ , so dass auch  $Q_F$  nicht berechnet werden kann.

**GRS**  
© 2014 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) Köln

Rechnung von Donnerstag, 05. Juni 2014, 17:47 Uhr

Nuklid	Alphastrahler	Q <sub>A</sub> (TBq)	Q <sub>B</sub> (TBq)	Q <sub>C</sub> (TBq)	Q <sub>D</sub> (TBq)	Q <sub>E</sub> (TBq)	Q <sub>F</sub> (TBq)	A <sub>1</sub> (TBq)	A <sub>2</sub> (TBq)	Q <sub>D</sub> Ing. (TBq)	Q <sub>E</sub> eff. (TBq)	Q <sub>E</sub> Haut (TBq)	Halbwertszeit	HWZ (s)	spez. Akt. (Bq/g)
Ac-225	A	4,9E+00	7,5E-01	6,3E-03	2,9E-01	3,0E+01	6,3E+01	7E-01	6E-03	2,9E-07	3,0E+01	2,0E+02	10 d	8,64E+05	2,147E+15
Ac-227	A	1,0E+03	1,2E+02	9,3E-05	3,5E+01	1,0E+03	9,3E-01	9E-01	9E-05	3,5E-05	1,0E+03	1,0E+03	21,773 a	6,87E+08	2,678E+12
Ac-228	A	1,1E+00	5,2E-01	2,0E+00	4,9E-01	4,3E-01	1,0E+03	5E-01	5E-01	4,9E-07	4,3E-01	2,4E+00	6,13 h	2,21E+04	8,295E+16
Ag-105		2,0E+00	1,0E+03	6,4E+01	2,4E+01	8,5E-01	2E+00	2E+00	2,4E-05	8,5E-01	6,6E+00	41 d	3,54E+06	1,123E+15	
Ag-108m		6,5E-01	5,5E+00	1,4E+00	5,5E+00	2,7E-01	7E-01	7E-01	5,5E-06	2,7E-01	2,1E+00	127 a	4,01E+09	9,659E+11	
Ag-110m		3,9E-01	1,7E+01	4,2E+00	2,0E+00	1,5E-01	4E-01	4E-01	2,0E-06	1,5E-01	1,2E+00	249,9 d	2,16E+07	1,759E+14	
Ag-111		4,2E+01	1,8E+00	2,9E+01	5,9E-01	8,8E+00	2E+00	6E-01	5,9E-07	1,4E+01	8,8E+00	7,45 d	6,44E+05	5,847E+15	
Al-26		4,2E-01	1,3E+00	2,8E+00	8,1E-01	1,5E-01	4E-01	4E-01	8,1E-07	1,5E-01	1,1E+00	7,16E+05 a	2,26E+13	7,114E+08	
Am-241	A	3,0E+01	1,0E+03	1,3E-03	3,3E+02	2,9E+01	1,3E+01	1E+01	1E-03	3,3E-04	2,9E+01	1,5E+02	432,2 a	1,36E+10	1,270E+11
Am-242m	A	4,0E+01	4,4E+01	1,4E-03	9,8E-01	7,7E+02	1,4E+01	1E+01	1E-03	9,8E-07	7,7E+02	1,0E+03	152 a	4,79E+09	3,598E+11
Am-243	A	4,9E+00	2,1E+02	1,3E-03	4,0E-01	1,0E+01	1,3E+01	5E+00	1E-03	4,0E-07	1,0E+01	7,0E+01	7,38E+03 a	2,33E+11	7,379E+09
Ar-37		1,0E+03					4E+01	4E+01	4E+01				35,02 d	3,03E+06	3,732E+15
Ar-39			6,3E+01		6,1E-01	1,8E+01	4E+01	2E+01	6,1E-07	1,7E+02	1,8E+01	269 a	8,48E+09	1,263E+12	
Ar-41		8,7E-01	2,9E-01		5,6E-01	3,1E-01	3E-01	3E-01	5,6E-07	3,1E-01	1,9E+00	1,827 h	6,58E+03	1,549E+18	
As-72		6,0E-01	2,7E-01	5,4E+01	6,4E-01	2,3E-01	3E-01	3E-01	6,4E-07	2,3E-01	1,1E+00	26 h	9,36E+04	6,200E+16	
As-73		9,4E+01		5,4E+01		1,2E+02	4E+01	4E+01		1,2E+02	6,9E+02	80,3 d	6,94E+06	8,250E+14	
As-74		1,4E+00	1,6E+00	2,4E+01	1,4E+00	5,7E-01	1E+00	1E+00	1,4E-06	5,7E-01	3,3E+00	17,76 d	1,53E+06	3,680E+15	
As-76		2,5E+00	2,4E-01	6,8E+01	5,1E-01	9,3E-01	2E-01	2E-01	5,1E-07	9,3E-01	2,0E+00	26,32 h	9,48E+04	5,803E+16	
As-77		1,3E+02	1,6E+01	1,3E+02	6,3E-01	1,6E+01	2E+01	6E-01	6,3E-07	3,8E+01	1,6E+01	38,8 h	1,40E+05	3,885E+16	
At-211	A	2,6E+01	1,0E+03	5,1E-01	3,4E+02	1,4E+01	1,0E+03	3E+01	5E-01	3,4E-04	1,4E+01	9,8E+01	7,214 h	2,60E+04	7,618E+16
Au-193		6,9E+00	1,0E+03	4,2E+02	1,8E+00	3,2E+00	7E+00	2E+00	1,8E-06	3,2E+00	2,1E+01	17,65 h	6,35E+04	3,404E+16	
Au-194		1,1E+00	2,2E+02	2,0E+02	7,1E+00	3,9E-01	1E+00	1E+00	7,1E-06	3,9E-01	3,1E+00	39,5 h	1,42E+05	1,513E+16	
Au-195		1,3E+01		3,1E+01	5,1E+00	7,0E+00	1E+01	5E+00	5,1E-06	7,0E+00	4,7E+01	183 d	1,58E+07	1,354E+14	
Au-198		2,7E+00	1,0E+00	6,0E+01	5,8E-01	1,1E+00	1E+00	6E-01	5,8E-07	1,1E+00	4,7E+00	2,696 d	2,33E+05	9,052E+15	

Abb. 5.8 Erweiterte Ergebnisdarstellung im Rechenprogramm

## 5.5 Weitere Funktionen

Das Programm erzeugt mit jedem Rechenlauf für die berechneten Nuklide im Verzeichnis `Tochter` einzelne Exceldateien, die Parameter zur Berechnung und zu den verwendeten Töchtern beinhalten. Diese Dateien werden vor jedem neuen Rechenlauf gelöscht.

Ebenfalls im Verzeichnis `Tochter` wird die Datei zu Müttern und Töchtern ausgegeben (`$Mutter-Toechter.xlsx`). Auch diese Datei wird vor jedem neuen Rechenlauf gelöscht.

Das Verzeichnis `Tochter fest` beinhaltet Exceldateien mit festen Einstellungen zur Berechnung von Nuklidgemischen. Diese Dateien dürfen nicht geändert, überschrieben

oder gelöscht werden, da ansonsten das Rechenprogramm die betreffenden Nuklide nicht mehr korrekt bearbeitet. Zu Testzwecken sind in den Unterverzeichnissen `U-dep HPA`, `U-dep HPA Massenanteil`, `U-dep vereinfacht`, `U-enr HPA` und `U-enr vereinfacht` Dateien mit unterschiedlichen Parametern zur Berücksichtigung von Uran-Nuklidgemischen enthalten. Um diese zu verwenden, müssen diese ins Verzeichnis `Tochter fest` kopiert werden. Vorher muss die bisherige Datei gesichert werden, da sie sonst überschrieben wird. Die Verzeichnisse `U-dep vereinfacht` und `U-enr vereinfacht` enthalten daher zusätzlich noch mal die „Originaldateien“.

## 5.6 Nachrechnen der Q- und A-Werte gemäß den Transportvorschriften

Die Q- und A-Werte, welche in den Transportvorschriften aufgeführt sind, können mit folgenden Einstellungen weitgehend nachgerechnet werden (vgl. Kapitel 4 sowie Anhänge F, G und H):

- Auswahl Quelle Nukliddaten: ICRP 38,
- Ergebnisausgabe mit Bewertung „unlimited“: unlimited ein (PHE),
- Dosiskonversionsfaktoren für Pfad  $Q_A$ : ICRP 51 (ANPA),
- Berechnungsoptionen für Pfad  $Q_C$ 
  - AMAD: 1  $\mu\text{m}$ ,
  - Chemische Form: maximiert,
  - Dosiskoeffizienten: ICRP 68,
- Begrenzung der Q-Werte auf 1000 TBq: Begrenzung ein und Betastrahler künstlich verstärken.

Die Urannuklide sind in den Transportvorschriften abweichend mit den chemischen Formen F, M und S berechnet. Dies muss daher für diese Nuklide in gesonderten Rechenläufen mit der entsprechenden Optionsänderung durchgeführt werden.

## 5.7 Fehlermeldung

Sollte während des Rechenlaufs eine Meldung kommen mit der Abfrage, ob eine Nukliddatei im Verzeichnis `Tochter` überschrieben werden soll, so sollte dies mit ja be-

antwortet werden, um eine korrekte Berechnung für dieses Nuklid durchzuführen. Der Fehler rührt daher, dass der Nutzer (und damit das Programm) für das Verzeichnis `Tochter` keine ausreichenden Schreib- bzw. Löschrechte hat (z. B. auf Netzlaufwerken). Für einen korrekten Rechenlauf sollte ggf. das Installationsverzeichnis gewechselt werden.

Dieser Fehler kann auch nach einem unbeabsichtigten Programmabbruch eintreten. Dann sollte er mit dem nächsten gestarteten Rechenlauf nicht mehr auftreten.

## 6 Diskussion und Ausblick

Zur Erstellung des vorliegenden Rechenprogrammes für die Q- und A-Werte gemäß der Transportvorschriften der IAEO /IAEA 12/ war eine intensive Auseinandersetzung mit dem Q-System und der zugrundeliegenden Literatur notwendig. Das ursprüngliche Ziel, mit dem erstellten Programm die Q- und A-Werte für die vorhandenen Nuklide nachzuvollziehen und nachrechnen zu können, wurde – bis auf wenige in Abschnitt 4.2 beschriebene Ausnahmen – erreicht. Bei einigen Nukliden sind – zum Teil große – Abweichungen in den kalkulierten Q-Werten vorhanden, die Auswirkungen auf die daraus berechneten A-Werte sind jedoch relativ gering.

Ein weiteres Ziel dieses Vorhabens war die Berechnung zusätzlicher, in den Transportvorschriften nicht aufgeführter Nuklide. Dieses Ziel ist im Rahmen der zur Verfügung stehenden Datenbibliotheken und unter Nutzung der erarbeiteten Rechenwege (siehe auch Kapitel 3) erreicht worden.

In den nachfolgenden Abschnitten wird das in diesem Teilarbeitspaket des AP 4 im Vorhaben 3611R03300 verwendete Q-System und dessen Grundlage sowie die erzielten Resultate kurz diskutiert.

### 6.1 Datenlage und Dokumentation des Q-Systems

Grundlage für das Q-System bilden die Dokumentationen in /IAEA 08/ und /IAEA 12/ sowie auch /IAEA 86/. Mit diesen Unterlagen allein ist jedoch eine Berechnung oder auch ein Nachrechnen der Q-Werte, wie sie in /IAEA 08/ und /IAEA 12/ tabelliert sind, nicht möglich. Auch durch Hinzuziehen weiterer Literatur zur Berechnung der einzelnen Pfade, wie z. B. /ANPA 94/, /CRO 92a/ oder /CRO 92b/ ist eine Berechnung mit den dortigen Angaben nur sehr schwer und vor allem nur teilweise nachzuvollziehen. Es war daher notwendig, auf Literatur zum Teil aus den 1970er und 1980er Jahren zurückzugreifen.

HPA (heute PHE) hat sich ebenfalls mit der Berechnung von Q- und A-Werten befasst und das Programm SEAL /HPA 10/ entwickelt. Mit diesem Programm ist es möglich, Q- und A-Werte sowie Freigrenzen für alle derzeit in den Transportvorschriften der IAEO gelisteten Radionukliden gemäß dem Q-System zu berechnen; weitere Nuklide können z. Z. nicht betrachtet werden. Die so berechneten Werte stimmen weitgehend mit den

in den Transportvorschriften der IAEA abgedruckten Werten überein; Abweichungen werden in /HPA 11/ diskutiert. Das Programm selbst sowie die Berechnungswege sind in /HPA 11/ ausführlich dokumentiert worden und konnten somit auch als Grundlage für die Untersuchungen in dem vorliegenden Vorhaben verwendet werden. Zudem war HPA/PHE auch bei Rückfragen und Hinweisen (z. B. /PHE 13/) zum Rechenmodell des Q-Systems, insbesondere bei nicht dokumentierten notwendigen Annahmen zur Berechnung der Q- und A-Werte, als Ansprechpartner behilflich.

Im Rahmen eines internationalen Arbeitstreffens, welches vom 11. bis zum 12. September 2013 bei der GRS in Köln stattfand, erörterten Vertreter von BfS, GRS, IRSN, JNES, PHE und WNTI u. a. die Problematik der Dokumentation des Q-Systems und der nicht in allen Belangen nachvollziehbaren Berechnung der A-Werte. Die Diskussion und Bearbeitung der auf diesem Treffen aufgeworfenen Punkte dauern derzeit an und werden in einer internationalen Arbeitsgruppe fortgesetzt, die sich am 17. und 18. Juli 2014 bei IRSN in Fontenay-aux-Roses bei Paris traf. Auch in dieser vorliegenden Dokumentation wird daher eine Zusammenstellung aufgetretener Probleme in diesem Kapitel und teilweise auch in den vorhergehenden Kapiteln diskutiert.

## **6.2 Berechnung der Q- und A-Werte**

Die einzelnen Berechnungswege für die Q-Pfade sind nicht immer eindeutig beschrieben und lassen Interpretationsspielraum zu. Teilweise wird mit Literatur gearbeitet und mit Daten gerechnet, die aus den 1970er und 1980er Jahren stammen. Aktuelle Entwicklungen (z. B. in der Datengrundlage) sind zum Teil nicht in das System eingeflossen; deren Anwendung kann zudem teilweise zu größeren Abweichungen in den berechneten Werten führen. Als Beispiel sei aufgeführt, dass die Q- und A-Werte immer noch auf den Nukliddaten der ICRP 38 /ICRP 83/ beruhen. Wird dagegen als Grundlage die derzeit aktuelle ICRP 107 /ICRP 08/ verwendet, ergeben sich bei einigen Nukliden durchaus Abweichungen in den für die weiteren Berechnungen benötigten Nukliddaten.<sup>28</sup> Ähnliches gilt für die Nutzung von Dosiskonversionskoeffizienten, z. B. im Pfad  $Q_A$ . Zu den verwendeten Daten und Berechnungsmethoden im Einzelnen sowie ggf. einer Einschätzung der Methodiken wird auf die Kapitel 3 und 4 verwiesen. Das vorlie-

---

<sup>28</sup> Zum Beispiel wird die Halbwertszeit von  $^{108m}\text{Ag}$  in der ICRP 38 mit 127 a angegeben, in der ICRP 107 dagegen mit 418 a. Ebenso finden sich erweiterte oder korrigierte Daten zu emittierten Gamma- und Betastrahlen und zu Nuklidtöchtern.

gende Programm bietet zusätzliche Optionen, um Q- und A-Werte auch mit vom derzeitigen Q-System abweichenden Daten und Rechenwegen zu berechnen.<sup>29</sup>

Auch das von der HPA erstellte Programm SEAL /HPA 10/ hat das Ziel, die in den Transportvorschriften aufgeführten Q- und A-Werte nachzurechnen. Dieses war entsprechend /HPA 11/ mit den zur Verfügung stehenden Dokumentationen nicht immer erreichbar, teilweise mussten auch andere Rechenwege verwendet werden (z. B. bei der Berechnung von Nuklidtöchtern). Das im Rahmen dieses Vorhabens erstellte Excel-Rechenprogramm stützt sich in der Erarbeitung von Rechenwegen für die Q-Pfade teilweise auf die Erkenntnisse aus /HPA 11/. In dem Bericht der HPA sind ebenfalls Problempunkte und Unzulänglichkeiten des derzeitigen Q-Systems herausgearbeitet. Im Unterschied zum vorliegenden Excel-Rechenprogramm ist SEAL /HPA 10/ in der vorliegenden Version auf das Nachrechnen der derzeit in /IAEA 08/ tabellierten Q- und A-Werte (sowie die Freigrenzen) beschränkt.

### 6.3 Festgestellte Problempunkte

Nachfolgend werden zusammenfassend wichtige, im Verlauf der Erstellung des Rechenprogrammes festgestellte Problempunkte aufgegriffen:

- teilweise werden relativ alte Daten zur Berechnung der Q-Werte verwendet, obwohl neuere Daten vorliegen,
- die in /IAEA 08/ angegebenen Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten haben keine Quellenangabe, sie scheinen vielmehr aus den dort ebenfalls tabellierten Q-Werten „zurückgerechnet“ worden zu sein und weichen teilweise erheblich von den in diesem Vorhaben berechneten Werten ab,
- die in /IAEA 08/ angegebenen Dosiskoeffizienten für den Pfad  $Q_C$  (Inhalation) stimmen teilweise nicht mit denen der ICRP 68 /ICRP 94/ überein,
- für die Berechnung der Q- und A-Werte werden Dosisgrößen der ICRP 26 (effektive Äquivalentdosis) und ICRP 60 (effektive Dosis) nebeneinander verwendet,

---

<sup>29</sup> Mit den für das Q-System derzeit verwendeten Daten und Rechenwegen sind hier diejenigen gemeint, welche im Excel-Rechenprogramm zum Nachrechnen der in /IAEA 08/ gelisteten Q- und A-Werte verwendet wurden. Wie Vergleiche im Anhang zeigen, können auch diese im Rechenprogramm verwendeten Methoden zum Nachrechnen der Q- und A-Werte von denjenigen abweichen, die zum Erstellen der in den Transportvorschriften gelisteten Werte genutzt wurden.

- die Behandlung der Neutronenstrahler erscheint inkonsistent,
- Bremsstrahlung wird über die Begrenzung der  $A_1$ -/ $A_2$ -Werte auf 40 TBq berücksichtigt, nicht über ein Rechenmodell,
- die Kennzeichnung als „unlimited“ der  $A_1$ -/ $A_2$ -Werte ist nicht dokumentiert,
- die Töchter der Mutternuklide werden in den einzelnen Q-Pfaden sehr unterschiedlich, im Pfad  $Q_E$  gar nicht berücksichtigt,
- Nuklidgemische, insbesondere Urangemische, sind nicht klar definiert,
- Q-Werte sind auf 1000 TBq begrenzt, ohne dass dies begründet oder dokumentiert ist,
- im Pfad  $Q_A$  wird zur Berechnung der Einwirkung einer Punktquelle auf eine Person ein isotropes Strahlungsfeld verwendet,
- im Pfad  $Q_B$  wird die Organdosisleistung in Haut gleich der Dosisleistung in Luft gesetzt, ohne weitere Ausführung,
- in den Pfaden  $Q_B$  und  $Q_D$  wurden sehr schwache Betastrahler, die gemäß verwendetem Rechenmodell keinen oder nur einen sehr geringen Dosisbeitrag liefern würden, künstlich „verstärkt“.

Für detailliertere Informationen wird auf die vorhergehenden Kapitel verwiesen. Auch in /HPA 11/ werden verschiedene Fragestellungen zum aktuellen Q-System aufgeworfen und Lösungsmöglichkeiten diskutiert.

#### **6.4 Vorschlag für eine Überarbeitung des Q-Systems**

Das Q-System ist für den Transport von radioaktiven Stoffen ein im Grunde sehr zweckmäßiges und bewährtes System. Trotzdem erscheint es sinnvoll und notwendig, das bisherige System dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zumindest anzupassen. Denkbar wäre auch die Ersetzung des bisherigen Q-Systems durch ein völlig neues, noch zu entwickelndes System, dies soll an dieser Stelle nicht weiter erörtert werden.

Eine Überarbeitung des derzeitigen Q-Systems an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ist in verschiedenen Varianten denkbar, von denen zwei kurz vor-

gestellt werden sollen: Zum einen ist es mit relativ geringem Aufwand möglich, auf Grundlage der bisherigen Rechenwege aktuelle Daten zur Berechnung zu verwenden. Es würden sich voraussichtlich einige Q- und A-Werte ändern, ggf. zum Teil auch erheblich; weitere tiefgreifendere Änderungen des bestehenden Regelsystems der Transportvorschriften wären nicht notwendig. Aufgrund der sowohl in diesem Vorhaben als auch in Arbeiten anderer Gruppen festgestellten Schwächen, wird dieses Vorgehen nicht favorisiert.

Eine andere Möglichkeit stellt eine Überarbeitung des Q-Systems inklusive der Rechenwege und der Rechenpfade dar. Somit könnte das Q-System nicht nur dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst, sondern auch für einige Zeit quasi „zukunftssicher“ gemacht werden.

Die aktuellen fünf (bzw. sechs) Q-Pfade decken die möglichen Expositionen nicht immer ausreichend ab bzw. begnügen sich mit sehr groben Rechnungen und nicht immer einsichtigen Verknüpfungen, z. B.:

- Der Pfad  $Q_F$  (Alphastrahler) wird mittels konstantem Faktor aus dem Pfad  $Q_C$  (Inhalation) berechnet,
- die Ingestion wird mittels konstantem Faktor aus dem Pfad  $Q_D$  (Hautkontamination mit Betastrahlern) berechnet
- Einflüsse durch Neutronenstrahler werden nicht berechnet; bei den Nukliden  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Cf}$  und  $^{248}\text{Cm}$  wird der Einfluss der Neutronenstrahlung berücksichtigt indem deren  $Q_A$ -Wert ersetzt wird,
- die Bremsstrahlung wird nur über eine allgemeine Begrenzung der A-Werte berücksichtigt, eine genauere Betrachtung der Einzelnuclide findet nicht statt,
- Pfad  $Q_E$  (Submersion) wird nur für Edelgase berechnet und verwendet.

Das bisherige System der Q-Pfade könnte erweitert werden um neue Pfade, die in der bisherigen Berechnung der A-Werte zum Teil bereits implizit oder durch Faktoren berücksichtigt wurden:

- $Q_{\text{Photon}}$   
Entspricht dem bisherigen Pfad  $Q_A$  und berücksichtigt Einflüsse durch externe Gamma- und Röntgenstrahlung.

- $Q_{\text{Beta}}$   
Entspricht dem bisherigen Pfad  $Q_B$  und berücksichtigt Einflüsse durch externe Betastrahlung. Zudem könnte hier ggf. der Einfluss der Bremsstrahlung mit einem Modell statt nur mit einer künstlichen Begrenzung der  $A$ -Werte berücksichtigt werden.
- $Q_{\text{Alpha}}$   
Entspricht dem bisherigen Pfad  $Q_F$ . Er sollte jedoch auf Grundlage eines eigenen, für Alphastrahler sinnvollen, Rechenweges ermittelt werden und für jedes Nuklid (bzw. jeden Alphastrahler) ausgewiesen werden.
- $Q_{\text{Neutron}}$   
Derzeit wird nur für die Nuklide  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Cf}$  und  $^{248}\text{Cm}$  der Einfluss der Neutronenstrahlung berechnet (und diese berechneten Werte ersetzen deren eigentliche Werte für  $Q_A$ ). In diesem neuen Pfad könnte zumindest für Neutronenstrahler ein  $Q$ -Wert berechnet werden, Grundlage könnten die Betrachtungen in /ECK 01/ sein.
- $Q_{\text{Inhalation}}$   
Entspricht dem bisherigen Pfad  $Q_C$  und berücksichtigt Einflüsse durch Inhalation.
- $Q_{\text{Ingestion}}$   
Ein neuer Pfad, der die Einflüsse durch Ingestion für alle Nuklide entsprechend eines zu erstellenden Rechenmodells ermittelt. Er würde die bisherige Betrachtung der Ingestion über den mit einem konstanten Faktor versehenen Pfad  $Q_D$  ersetzen.
- $Q_{\text{Haut}}$   
Entspricht dem bisherigen Pfad  $Q_D$  und berücksichtigt Einflüsse durch Hautkontamination mit Betastrahlern. Zudem könnte hier ggf. der Einfluss der Bremsstrahlung mit einem Modell statt nur mit einer künstlichen Begrenzung der  $A$ -Werte berücksichtigt werden.
- $Q_{\text{Submersion}}$   
Entspricht dem bisherigen Pfad  $Q_E$  und berücksichtigt Einflüsse durch Submersion; er wird für alle Nuklide berechnet.

Im Übrigen sollten bei allen Pfaden die bestehenden Rechenwege geprüft und an den Stand von Wissenschaft und Technik ggf. angepasst oder erneuert werden. Die Berechnung der  $A_1$ -/ $A_2$ -Werte könnte in der gleichen Weise wie bisher erfolgen. Weiterhin sollte die Berücksichtigung von Tochternukliden klar definiert und vereinheitlicht sowie in allen berechneten  $Q$ -Pfaden in gleicher Weise angewandt werden. Das System der

„unlimited“-Werte sollte überdacht, zumindest aber klar definiert und dokumentiert werden.

## **6.5 Ausblick zur Programmentwicklung**

Das im Rahmen dieses Vorhabens erstellte Rechenprogramm nutzt die Umgebung von Microsoft Excel 2010 und ist in Excel-VBA-Code geschrieben. Dies erschien zu Beginn des Vorhabens eine gemäß den Zielen und dem (geplanten) Umfang des Rechenprogrammes sinnvolle Lösung zu sein. Im Verlauf des Vorhabens zeigten sich jedoch die Dokumentationsschwächen des Q-Systems. Daraus resultierte, dass zum Nachvollziehen der Q- und A-Werte z. T. verschiedene Varianten eines Rechenweges programmiert werden mussten, die nun teilweise als Optionen im Programm zur Verfügung stehen. Trotz des modularen Aufbaus der Codebasis ist letztendlich der Rechencode für die gewählte Umgebung zu umfangreich und somit zu unübersichtlich geworden. Sofern das Programm weiterentwickelt oder mit weiteren Optionen versehen werden soll, sollte vorher eine Portierung des bisherigen Rechencodes auf eine andere – dem Umfang angemessene – Programmiersprache erfolgen.

Eine Weiterentwicklung des Programms könnte in Richtung einer verbesserten Nutzerfreundlichkeit erfolgen. Dies betrifft z. B. die Nuklideingabe oder die Darstellung der Zwischen- und Endergebnisse.

Es wäre ebenfalls möglich und es erscheint sinnvoll, eine optionale Prüfroutine zur automatischen Bestimmung von Alphastrahlern entsprechend des Q-Systems bzw. der Transportvorschriften einzusetzen. Dies muss derzeit durch den Nutzer selbst entschieden und entsprechend eingetragen werden. Eine falsche Deklaration eines Nuklides führt somit zu fehlerhaften Ergebnissen, ohne dass dies programmseitig geprüft wird.

Ebenso ist die Einbindung alternativer Dosis- und Dosisleistungsfaktoren sowie weiterer Nukliddatenressourcen denkbar. Dadurch könnten alternative Q- und A-Werte berechnet werden, um Auswirkungen von geänderten und zukünftigen Datengrundlagen mit den aktuellen Q- und A-Werten zu vergleichen.

Weiterhin könnten bisherige feste Rechenparameter der verwendeten Rechenmodelle als optionale Werte gestaltet werden, so dass auch über diesen Weg Änderungen in

den Rechenmodellen in ihren Auswirkungen auf die  $Q$ - und  $A$ -Werte untersucht werden können.

## Literatur

- /AECL 82/ Cross, W. G.; Ing, H.; Freedman, N. O.; Mainville, J.: Tables of Beta-Ray Dose Distributions in Water, Air and other Media. Atomic Energy of Canada Limited, AECL-7617, Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario, September 1982
- /AECL 92/ Cross, W. G.; Ing, H.; Freedman, N. O.; Wong, P. J.: Tables of Beta-Ray Dose Distributions in Water. Atomic Energy of Canada Limited, AECL-10521, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, February 1992
- /ANPA 94/ Benassai, S.; Bologna L.: Re-Evaluation of  $Q_A$  and  $Q_B$  Values on the Basis of Complete Spectra for Gamma, X and Beta Emissions. National Agency for Environmental Protection, Rome, ANPA-DIR/NOR-RT-2(94), May 1994
- /ANSI 91/ American Nuclear Society (ANS) (Hrsg.): Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. American National Standard, ANSI/ANS-6.4.3-1991, 1991
- /CRO 92a/ Cross, W. G.; Freedman, N. O.; Wong, P. Y.: Beta-Ray Dose Distributions from Point Sources in an Infinite Water Medium. In: Health Physics. Vol. 63, No. 2, pp. 160-171, 1992
- /CRO 92b/ Cross, W. G.; Freedman, N. O.; Wong, P. Y.: Beta Ray Dose Distributions from Skin Contamination. In: Radiation Protection Dosimetry. Vol. 40, No. 3, pp. 149-168, 1992
- /DÖR 92/ Dörschel, B.; Schuricht, V.; Steuer J.: Praktische Strahlenschutzphysik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1992
- /ECK 01/ Eckerman, K. F.; Rawl, R.; Hughes, J. S.; Bologna, L.: Type A Package Limits of Spontaneous Fission Radionuclides. 13th International Symposium on the Packaging and Transport of Radioactive Materials (PATRAM), Chicago, 2001

- /ECK 08/ Eckerman, K. F.: DECDATA. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, Version 1.0, CD-Beilage zur ICRP 107, 2008
- /EPA 93/ Eckerman, K. F.; Ryman, J. C.: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. US Environmental Protection Agency (EPA), Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-R-93-081, September 1993
- /GRS 11/ Brücher, W.; Büttner, U.; Lange, F.; Sentuc, F.-N.: Entwicklung eines Regelländerungsvorschlages für die Anforderungen in den IAEA-Transportvorschriften TS-R-1 zum Auslaugtest für LSA-III-Material. Abschlussbericht zum Vorhaben 3609R03320, GRS-A-3599, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2011
- /GSF 84/ Williams, G.; Zankl, M.; Eckerl, H.; Drexler, G.: The Calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part II: Organ Doses from Occupational Exposures. Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, GSF-Bericht S-1079, December 1984
- /HPA 10/ Health Protection Agency: SEAL. System for Calculating Exemption and  $A_1$  and  $A_2$  Limits. Software, Version 1.0, Revision 174, 2010
- /HPA 11/ Jones, K. A.; Cabianna, T.; Harvey, M. P.; Hughes, J. S.; Brown, I. K.; Anderson, T.: Review of Methodologies to Calculate  $A_1$  and  $A_2$  Values and Exemption Values. Health Protection Agency, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, HPA-CRCE-027, October 2011
- /HUB 82/ Hubbel, J. H.: Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV. In: International Journal of Applied Radiation and Isotopes. Bd. 33, Nr. 11, S. 1269-1290, November 1982
- /IAEA 73/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the Application of the IAEA Transport Regulations. Safety Series No. 37, Vienna, 1973

- /IAEA 86/ MacDonald, H. F.; Goldfinch, E. P.: Radioactive material transport package activity release limits. In: International Atomic Energy Agency (IAEA): International studies on certain aspects of the safe transport of radioactive materials 1980-1985. IAEA-Tecdoc-375, Vienna, 1986
- /IAEA 90/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Explanatory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (1985 Edition). Second Edition (As Amended 1990), Safety Series No. 7, Vienna, 1990
- /IAEA 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA): International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115, CD-ROM Edition, 2003
- /IAEA 08/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Guide No. TS-G-1.1 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2008
- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2012 Edition. Safety Requirements No. SSR-6, IAEA, Vienna, 2012
- /IAEA 13/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Questions and Answers. Features: Depleted Uranium. Internet:  
[http://www.iaea.org/newscenter/features/du/du\\_qaa.shtml](http://www.iaea.org/newscenter/features/du/du_qaa.shtml), zuletzt abgerufen: 24.10.2013
- /ICRP 77/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. In: Annals of the ICRP, Volume 1, No. 3, Pergamon Press, Oxford, 1977
- /ICRP 83/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. In: Annals of the ICRP, Volume 11-13, Pergamon Press, Oxford, 1983

- /ICRP 87/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Data for Use in Protection Against External Radiation. ICRP Publication 51. In: Annals of the ICRP, Volume 17, No. 2/3, Pergamon Press, Oxford, 1987
- /ICRP 91/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. In: Annals of the ICRP, Volume 21, No. 1-3, Pergamon Press, Oxford, 1991
- /ICRP 94/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. Replacement of ICRP Publication 61, ICRP Publication 68. In: Annals of the ICRP, Volume 24, No. 4, Pergamon, 1994
- /ICRP 96/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. In: Annals of the ICRP, Volume 26, No. 3/4, Pergamon, 1996
- /ICRP 08/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. In: Annals of the ICRP, Volume 38, No. 3, Elsevier, 2008
- /ICRP 10/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. In: Annals of the ICRP, Volume 40, No. 2–5, Elsevier, 2010
- /ICRP 12/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41 (Suppl.) In: Annals of the ICRP, Volume 41, Supplement 1, Elsevier, 2012
- /ICRU 92/ International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations. ICRU Report 47, April 1992

- /KOH 96/ Kohlrausch, F.: Praktische Physik. Band 2, B. G. Teubner, Stuttgart, 24. Auflage, 1996
- /LOC 95/ Lockheed Martin Energy Systems: HEU to LEU Conversion and Blending Facility. UF<sub>6</sub> Blending Alternative to Produce LEU UF<sub>6</sub> for Commercial Use. Y/ES-063/R2, Nuclear Materials Disposition Program Office, Y-12 Plant Defence Programs, Oak Ridge Y-12 Plant, U.S. Department of Energy, Pre-decisional Draft, September 1995
- /NIST 04/ Hubbel, J. H.; Seltzer, S. M.: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. National Institute of Standards and Technology (NIST), Internetseite: <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>, last update: July 2004, zuletzt aufgerufen: 24.07.2012
- /NIST 05/ Berger, M. J.; Coursey, J. S.; Zucker, M. A.; Chang, J.: Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions. National Institute of Standards and Technology (NIST), Internetseite: <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm>, last update: August 2005, zuletzt aufgerufen: 27.07.2012
- /NRC 06/ US Nuclear Regulatory Commission (NRC) (Hrsg.): Radiological Toolbox. Version 2.0.0, August 2006
- /ORNL 03/ Oak Ridge National Laboratory (ORNL); Eckerman, K. F.: ICRP38 data files and DEXRAX, RADSUM and WINCHAIN Codes, Corrected and Revised Codes, March 2003
- /PFE 98/ Pfennig, G.; Klewe-Nebenius, H.; Seelmann-Eggebert, W.: Karlsruher Nuklidkarte. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Technik und Umwelt, Druckhaus Haberbeck GmbH, Lippe, korrigierter Nachdruck 1998
- /PHE 13/ Harvey, Mike: Persönliche Mitteilung an Uwe Büttner (GRS). E-Mail, Public Health England (PHE), 29. Oktober 2013

/TRU 87/ Trubey, D. K.; Harima, Y.: New Buildup Factor Data for Point Kernel Calculations. In: Proceedings of the Conference sponsored by the A. N. S. on "Theory and Practices in Radiation Protection and Shieldings", CONF-870405—10, Knoxville, Tennessee, April 22-24, 1987

## Abkürzungsverzeichnis

AED	aerodynamischer Äquivalentdurchmesser
AMAD	Activity Median Aerodynamic Diameter
ANPA	National Agency for Environmental Protection (Italien)
ANS	American Nuclear Society
ANSI	American National Standards Institute
AP	Arbeitspaket
AP	anterior-posterior
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
HPA	Health Protection Agency (Vereinigtes Königreich)
IAEO	Internationale Atomenergieorganisation; engl. IAEA: International Atomic Energy Agency
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission; engl.: International Commission on Radiological Protection
ICRU	Internationale Kommission für Strahlungseinheiten und Messung; engl.: International Commission on Radiation Units and Measurements
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Frankreich)
ISO	isotrop
JNES	Japan Nuclear Energy Safety Organization (Japan); seit 1. März 2014 zusammengeführt mit der Nuclear Regulation Authority (NRA) in Japan
LAT	lateral
LSA	low specific activity, dt.: geringe spezifische Aktivität
mfp	mean free path, mittlere freie Weglänge
NIST	National Institute of Standards and Technology
nt	nuclear transition; dt.: Kernumwandlung, Zerfall
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PA	posterior-anterior
PHE	Public Health England (Vereinigtes Königreich)
ROT	rotierend
SEAL	System for calculating Exemption and $A_1$ and $A_2$ Limits (Software der PHE)
SI	Internationales Einheitensystem; frz.: Système international d'unités

TAG	Teilarbeitsgebiet
VBA	Visual Basic for Applications
WNTI	World Nuclear Transport Institute

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Vergleich der $A_1$ -Werte berechnet nach /ECK 01/ und aufgelistet in /IAEA 08/ .....	15
Tab. 3.1	Schreibweise der Nuklidgemische im Rechenprogramm .....	20
Tab. 3.2	Schreibweise spezieller Nuklidnamen im Rechenprogramm .....	20
Tab. 3.3	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Massenenergieabsorptionskoeffizienten /HPA 11/ .....	23
Tab. 3.4	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Massenschwächungskoeffizienten /HPA 11/ .....	24
Tab. 3.5	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Aufbaufaktor, Energiebereich 15 keV bis 20 keV .....	26
Tab. 3.6	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Aufbaufaktor, Energiebereich 20 keV bis 15 MeV .....	27
Tab. 3.7	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_1$ , Energiebereich 10 keV bis 60 keV .....	29
Tab. 3.8	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_1$ , Energiebereich 60 keV bis 10 MeV .....	30
Tab. 3.9	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_1$ , Energiebereich 70 keV bis 200 keV .....	31
Tab. 3.10	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_1$ , Energiebereich 200 keV bis 10 MeV .....	32
Tab. 3.11	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_2$ , Energiebereich 10 keV bis 100 keV .....	32

Tab. 3.12	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_2$ , Energiebereich 100 keV bis 1 MeV .....	33
Tab. 3.13	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor, Energiebereich 1 MeV bis 10 MeV .....	33
Tab. 3.14	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_3$ , Energiebereich 10 keV bis 50 keV.....	35
Tab. 3.15	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_3$ , Energiebereich 50 keV bis 100 keV.....	35
Tab. 3.16	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für den Dosiskonversionsfaktor $k_3$ , Energiebereich 100 keV bis 10 MeV.....	35
Tab. 3.17	Parameterwerte zur Interpolationsfunktion für die CSDA-Reichweite.....	41
Tab. 3.18	Programmseitig verwendete $Q_A$ - und resultierende $A_1$ -Werte für Neutronenstrahler gemäß /IAEA 08/ .....	53
Tab. 3.19	Abweichungen in der Bewertung auf „unlimited“ bei Verwendung der GRS-Methode im Vergleich zu /IAEA 08/.....	55
Tab. 3.20	Massen- und Aktivitätsanteile von Uranisotopen in Natururan und abgereichertem Uran (nach /IAEA 13/) .....	57
Tab. 3.21	Massen- und Aktivitätsanteile von Uranisotopen in angereichertem Uran (Werte interpoliert, Daten aus /LOC 95/) .....	57
Tab. 3.22	Verwendete Halbwertszeiten und berechnete spezifische Aktivitäten für Uranisotope und -gemische .....	57
Tab. 4.1	Nuklide mit großen Abweichungen der $A$ -Werte .....	63
Tab. 4.2	Abweichungen in der Bewertung auf „unlimited“ bei Verwendung der GRS- und der PHE-Methode im Vergleich zu /IAEA 08/ .....	64

Tab. C.1	Massenenergieabsorptionskoeffizienten nach /NIST 04/.....	121
Tab. C.2	Massenschwächungskoeffizienten nach /NIST 04/ .....	122
Tab. C.3	Aufbaufaktoren in Luft nach /ANPA 94/.....	123
Tab. C.4	Dosiskonversionsfaktoren nach /ICRP 87/.....	124
Tab. C.5	Dosiskonversionsfaktoren nach /GSF 84/ .....	125
Tab. C.6	Dosiskonversionsfaktoren nach /ICRP 96/.....	125
Tab. C.7	CSDA-Reichweite von Elektronen in Wasser nach /NIST 05/ .....	126
Tab. C.8	Dimensionslose Dosisverteilung in Wasser nach /CRO 92a/ .....	127
Tab. C.9	Dimensionslose Dosisverteilung bei Hautkontamination mit einer Fläche von Fläche 100 cm <sup>2</sup> nach /CRO 92b/ .....	128
Tab. C.10	Extrapolierte Werte zur dimensionslosen Dosisverteilung in Wasser .....	130
Tab. C.11	Extrapolierte Werte zur dimensionslosen Dosisverteilung bei Hautkontamination für die Betaenergie 10 MeV .....	131
Tab. C.12	Extrapolierte Werte zur dimensionslosen Dosisverteilung bei Hautkontamination für die normierte Eindringtiefe 0,001 .....	132
Tab. E.1	Massenanteile von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden nach /LOC 95/ .....	135
Tab. E.2	Spezifische Aktivität von Uranisotopen nach /LOC 95/ .....	136
Tab. E.3	Aktivität von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden nach /LOC 95/.....	137
Tab. E.4	Aktivitätsanteil von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	138

Tab. E.5	Massenanteile der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	139
Tab. E.6	Aktivität der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	140
Tab. E.7	Aktivitätsanteile der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	141
Tab. E.8	Interpolierte Massenanteile der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ im Urangemisch mit 20 % Anreicherung.....	142
Tab. E.9	Interpolierte Aktivitätsanteile der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ im Urangemisch mit 20 % Anreicherung.....	142
Tab. F.1	Vergleich der berechneten Dosisleistungskoeffizienten mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten.....	143
Tab. G.1	Bei der Berechnung nach ICRP 38 berücksichtigte Tochternuklide .....	155
Tab. H.1	Vergleich der berechneten Q-Werte der Pfade $Q_A$ , $Q_B$ und $Q_C$ mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten sowie berechnete spezifische Aktivität.....	160
Tab. H.2	Vergleich der berechneten Q-Werte der Pfade $Q_D$ , $Q_E$ und $Q_F$ sowie der berechneten $A_1$ - und $A_2$ -Werte mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten.....	177

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung der Expositionspfade, Quelle: /IAEA 08/ .....	4
Abb. 2.2	Abschirmfaktor zur Berechnung von $Q_B$ .....	8
Abb. 3.1	Werte für den Massenenergieabsorptionskoeffizienten in Luft nach /NIST 04/ und Interpolationsfunktion nach /HPA 11/ .....	22
Abb. 3.2	Werte für den Massenschwächungskoeffizienten in Luft nach /NIST 04/ und Interpolationsfunktion nach /HPA 11/ .....	24
Abb. 3.3	Vergleich der Aufbaufaktoren in Luft, tabelliert in /ANPA 94/ sowie berechnet nach /TRU 87/ bzw. /ANSI 91/ bei einem Abstand Quelle zu Detektor von 100 cm .....	26
Abb. 3.4	Werte für den Aufbaufaktor in Luft nach /ANPA 94/ und Interpolationsfunktionen .....	27
Abb. 3.5	Strahlungsfelder in Bezug auf ein Phantom, Quelle: /ICRP 96/ .....	28
Abb. 3.6	Vergleich von Dosiskonversionsfaktoren aus /ICRP 87/ für verschiedene Strahlungsfelder bezogen auf ein Phantom .....	29
Abb. 3.7	Werte für den Dosiskonversionsfaktor $k_1$ nach /ICRP 87/ und Interpolationsfunktionen nach /ANPA 94/ und /HPA 11/, isotropes Strahlungsfeld .....	30
Abb. 3.8	Werte für den Dosiskonversionsfaktor nach /GSF 84/ und Interpolationsfunktionen, isotropes Strahlungsfeld .....	34
Abb. 3.9	Werte für den Dosiskonversionsfaktor nach /ICRP 96/ und Interpolationsfunktionen, isotropes Strahlungsfeld .....	36
Abb. 3.10	Vergleich der Dosiskonversionsfaktoren $k_2$ und $k_3$ .....	37

Abb. 3.11	Werte für die CSDA-Reichweite von Betateilchen in Wasser nach /NIST 05/ und Interpolationsfunktion.....	41
Abb. 3.12	Dimensionslose Dosisverteilung $j$ , Werte für $E_{\beta}$ von 0,025 MeV bis 4 MeV sind /CRO 92a/ entnommen, Werte für 10 MeV sind extrapoliert.....	43
Abb. 3.13	Dimensionslose Dosisverteilung $j$ , Werte für $E_{\beta}$ von 0,025 MeV bis 10 MeV, Quelle: /CRO 92a/ .....	43
Abb. 3.14	Dimensionslose Dosisverteilung $j$ , Werte für $E_{\beta}$ von 0,025 MeV bis 4 MeV sind /CRO 92b/ entnommen, Werte für 10 MeV sowie für normierte Eindringtiefen kleiner 0,025 sind extrapoliert.....	49
Abb. 3.15	Dimensionslose Dosisverteilung $j$ , Werte für $zrE$ von 0,025 und größer sind /CRO 92b/ entnommen, Werte für 10 MeV sowie für die normierte Eindringtiefe von 0,001 sind extrapoliert .....	50
Abb. 5.1	Verzeichnisstruktur des Programms BerQATrans.....	67
Abb. 5.2	Sicherheitsabfrage in Excel 2010 für aktive Inhalte.....	68
Abb. 5.3	Hauptfenster im Rechenprogramm .....	69
Abb. 5.4	Nuklidauswahl im Rechenprogramm.....	70
Abb. 5.5	Optionsauswahl im Rechenprogramm .....	72
Abb. 5.6	Druckauswahldialog im Rechenprogramm.....	75
Abb. 5.7	Ergebnisdarstellung des Rechenprogramms .....	76
Abb. 5.8	Erweiterte Ergebnisdarstellung im Rechenprogramm .....	78
Abb. E.1	Massenanteile von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	136

Abb. E.2	Aktivität von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	137
Abb. E.3	Aktivitätsanteil von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	138
Abb. E.4	Massenanteile der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	139
Abb. E.5	Aktivität der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	140
Abb. E.6	Aktivitätsanteile der Isotope $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ und $^{238}\text{U}$ in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden .....	141



## Symbolverzeichnis

$A$	Aktivität des Nuklids
$A_1$	A-Wert für Stoffe in besonderer Form
$A_2$	A-Wert für sonstige Stoffe (nicht in besonderer Form)
$B$	Flussdichteaufbaufaktor (Build-up-Faktor)
$c$	zeitintegrierte Luftkonzentration
$C$	Konstante ( $6,217 \cdot 10^{-16} \text{ R} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{J} \cdot \text{eV}^{-1}$ )
$C_1$	Konstante ( $6,581 \cdot 10^{-5} \text{ R} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}^{-1}$ )
$C_2$	Konstante ( $5,768 \cdot 10^{-7} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}^{-1}$ )
$C_3$	Konstante ( $0,016022 \text{ Gy} \cdot \text{g} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Bq} \cdot \text{TBq}^{-1}$ )
$d$	Flächenmasse
$D$	Energiedosis
$\dot{D}$	Dosisleistung
$e_{\text{inh}}$	Dosiskoeffizient Inhalation für beruflich strahlenexponierte Personen
$\dot{e}_{\text{pt}}$	Dosisleistungskoeffizient für Röntgen- und Gammastrahlung
$\dot{e}_{\beta}$	Dosisleistungskoeffizient für Betastrahlung
$E$	effektive Dosis (ICRP 60)
$E_{\text{pt}}$	Energie der Photonen
$E_{\beta}$	Energie der Betateilchen
$E_{\beta_{\text{max}}}$	maximale Betaenergie
$f(i)$	Anteil der Aktivität des Radionuklides $i$ im Nuklidgemisch
$f_{\text{Haut}}$	Anteil des radioaktiven Stoffes, der auf der Hautfläche verteilt wird
$f_{\text{int}}$	Anteil des radioaktiven Stoffes, der freigesetzt und inhaliert wird
$f_{\beta_{\text{max}}}$	Abschirmfaktor für maximale Betaenergie
$g$	Bremsstrahlungs-Ausbeutefaktor
$\dot{h}_{\text{Haut}}$	Dosisleistungskoeffizient für Hautkontamination
$h_{\text{subm, eff}}$	Dosiskoeffizient Submersion für effektive Dosis

$h_{\text{subm, Haut}}$	Dosiskoeffizient Submersion für Hautdosis
$H_E$	effektive Äquivalentdosis (ICRP 26)
$H_{\text{Haut}}$	Organdosis Haut
$i$	Energiegruppe, Index
$j\left(\frac{r}{r_E}, E_\beta\right)$	dimensionslose Dosisverteilung (Anteil der emittierten Energie, der in der Kugelschale mit einem Radius von $\frac{r}{r_E}$ bis $\frac{r}{r_E} + d\left(\frac{r}{r_E}\right)$ deponiert wird)
$j\left(\frac{z}{r_E}, E_\beta\right)$	dimensionslose Dosisverteilung (Anteil der emittierten Energie, der in der Haut in einer Tiefe von $\frac{z}{r_E}$ bis $\frac{z}{r_E} + d\left(\frac{z}{r_E}\right)$ deponiert wird)
$J$	Dosis pro Zerfall
$J_S$	Standard-Ionendosis
$k$	Index
$k_1$	Dosiskonversionsfaktor (in Sv·R <sup>-1</sup> )
$k_2$	Dosiskonversionsfaktor (in Sv·Gy <sup>-1</sup> )
$k_3$	Dosiskonversionsfaktor (in Sv·Gy <sup>-1</sup> )
$K$	Kerma
$n$	Anzahl emittierter Betateilchen pro Zerfall
$N$	Anzahl der Atomkerne eines Nuklids
$N(E_\beta)$	normalisiertes Energiespektrum emittierter Betateilchen (Anzahl der emittierten Elektronen in einem Energiebereich von $E_\beta$ bis $E_\beta + dE_\beta$ )
$Q_A$	Q-Wert für äußere Exposition durch Gamma- und Röntgenstrahlung
$Q_B$	Q-Wert für äußere Exposition durch Betastrahlung
$Q_C$	Q-Wert für innere Exposition durch Inhalation
$Q_D$	Q-Wert für Kontamination der Haut sowie innere Exposition durch Ingestion
$Q_{D, \text{ing}}$	Q <sub>D</sub> -Wert für Ingestion
$Q_E$	Q-Wert für Submersion
$Q_{E, \text{eff}}$	Q <sub>E</sub> -Wert für effektive Dosis
$Q_{E, \text{Haut}}$	Q <sub>E</sub> -Wert für Hautdosis

$Q_F$	Q-Wert für Alphastrahler
$r$	Abstand von der Quelle zum Aufpunkt
$r_E$	CSDA-Reichweite
$R$	Reichweite
$S$	Quellstärke, Bremsvermögen
$t$	Expositionszeit, Zeit
$t_{eq}$	Zeitpunkt, zu der im laufenden Gleichgewicht die Aktivität des Mutternuklids gleich der Aktivität des Tochternuklids ist
$T_{1/2}$	Halbwertszeit
$V$	Volumen
$\frac{W}{e}$	Ionisierungskonstante
$x$	Abstand zur Quelle
$X$	Exposure
$X(i)$	A-Wert des $i$ -ten Radionuklids
$X_m$	A-Wert des Nuklidgemisches
$\dot{X}$	Exposureleistung
$y$	Zerfallsanteil der Tochter in der Zerfallskette der Mutter
$Y$	Wahrscheinlichkeit für die Emission eines Photons oder Elektrons der Energie $E$ pro Zerfall
$z$	Eindringtiefe der Betastrahlung in das Medium
$\eta_{Luft}$	relativer Abschwächungsfaktor eines Mediums im Vergleich zu Luft
$\lambda$	Zerfallskonstante
$\lambda_{eff}$	mittlere freie Weglänge (Photonenstrahlung)
$\mu$	Linearer Schwächungskoeffizient
$\mu_\beta$	Absorptionskoeffizient
$\mu_{en}$	Linearer Energieabsorptionskoeffizient
$\mu_{tr}$	Linearer Energieumwandlungskoeffizient
$\frac{\mu_{en}}{\rho}$	Massenenergieabsorptionskoeffizient

$\frac{\mu_{tr}}{\rho}$	Massenenergieumwandlungskoeffizient
$\rho$	Dichte
$\varphi$	Flussdichte
$\Phi_E$	spektrale Fluenz

## Anhang

### A Herleitung der Gleichung zur Berechnung von $Q_A$

Zunächst soll die Herleitung der in /IAEA 08/ verwendeten Rechenformel nachvollzogen werden. Diese wurde in /ANPA 94/ erstellt und auch in /HPA 11/ verwendet.

Nach /KOH 96/ kann die Kerma  $K$  in einem Stoff (hier Luft) berechnet werden durch

$$K_{\text{Luft}} = \int \Phi_E(\mathbf{r}, E_{\text{pt}}) \cdot E_{\text{pt}} \cdot \left( \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} \right)_{\text{Luft}} dE_{\text{pt}} \quad (\text{A.1})$$

mit

$\Phi_E$	spektrale Fluenz,
$E_{\text{pt}}$	Energie der Photonen,
$\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho}$	Massenenergieumwandlungskoeffizient.

Der lineare Energieumwandlungskoeffizient  $\mu_{\text{tr}}$  kann in den linearen Energieabsorptionskoeffizienten  $\mu_{\text{en}}$  über die Beziehung

$$\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{tr}}(1 - g_m) \quad (\text{A.2})$$

(mit  $g_m$  als Bremsstrahlungs-Ausbeutefaktor in einem Stoff  $m$ ) umgerechnet werden, wodurch sich

$$K_{\text{Luft}} = \int \Phi_E(\mathbf{r}, E_{\text{pt}}) \cdot E_{\text{pt}} \cdot \frac{1}{1 - g_{\text{Luft}}} \cdot \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{Luft}} dE_{\text{pt}} \quad (\text{A.3})$$

ergibt.

Für Luftkerma  $K_{\text{Luft}}$  und Exposure  $X$  gilt die Beziehung<sup>30</sup>

$$K_{\text{Luft}} = \frac{1}{1 - g_{\text{Luft}}} \cdot \frac{W}{e} \cdot X. \quad (\text{A.4})$$

---

<sup>30</sup> Strenggenommen müsste in dieser Beziehung statt der Exposure  $X$  die Standard-Ionendosis  $J_s$  verwendet werden. Nach /KOH 96/ sind jedoch beide Größen unter den Bedingungen des Sekundärelektronengleichgewichts gleichwertig; die Standard-Ionendosis wird als die deutsche Übersetzung der Exposure angesehen.

Der Faktor  $\frac{W}{e}$  ist die Ionisierungskonstante und beträgt für schnelle Elektronen ( $\geq 1$  keV, /KOH 96/) in trockener Luft  $33,97 \pm 0,05 \frac{J}{C}$  /ICRU 92/. Nach Einsetzen erhält man für die Exposure die Gleichung

$$X = \int \Phi_E(r, E_{pt}) \cdot E_{pt} \cdot \frac{e}{W} \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{Luft} dE_{pt}. \quad (A.5)$$

Bei einer Punktquelle gilt nach /DÖR 92/ für die Photonenflussdichte  $\varphi$

$$\varphi_i = \frac{S_i}{4\pi \cdot x^2} \cdot B_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \quad (A.6)$$

mit

- $S_i$  Quellstärke,
- $i$  Energiegruppe,
- $x$  Abstand zur Quelle,
- $B_i$  Flussdichteaufbaufaktor (Build-up-Faktor),
- $\mu_i$  Linearer Schwächungskoeffizient,

und man erhält mit  $S_i = Y_i \cdot A$  für die Exposureleistung  $\dot{X}$

$$\dot{X} = \frac{A}{4\pi \cdot x^2} \cdot \frac{e}{W} \cdot \sum_i Y_i \cdot E_{pt_i} \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i \quad (A.7)$$

mit

- $A$  Aktivität,
- $Y_i$  Wahrscheinlichkeit für die Emission eines Photons der Energie  $E_{pt,i}$  (Yield).

Der Übergang von der Exposure  $X$  (in Luft) zu einer effektiven Äquivalentdosis  $H_E$  im Gewebe gelingt mit einem Dosiskonversionsfaktor  $k_1$  und man erhält

$$H_E = \frac{A \cdot t}{4\pi \cdot x^2} \cdot \frac{e}{W} \cdot \sum_i k_{1,i} \cdot Y_i \cdot E_{pt_i} \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i. \quad (A.8)$$

In /ANPA 94/ und /HPA 11/ werden Dosiskonversionsfaktoren der ICRP 51 /ICRP 87/ für eine isotrope Verteilung des Strahlungsfeldes bezogen auf das Phantom benutzt, diese sind in der Einheit  $[k_1] = \frac{Sv}{R}$  angegeben. Die Einheit Röntgen ist mit dem SI-System über die Beziehung  $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{C}{kg}$  verknüpft und muss in obiger Formel

berücksichtigt werden. Für die Umrechnung der Energieeinheit von Elektronenvolt in Joule wird der Faktor  $1,6022 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$  benötigt. Einsetzen in Gleichung (A.8) ergibt

$$H_E = \frac{A \cdot t}{4\pi \cdot x^2} \cdot \frac{e}{W} \cdot C \cdot \sum_i k_{1,i} \cdot Y_i \cdot E_{\text{pt}_i} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i \quad (\text{A.9})$$

mit  $C = 6,217 \cdot 10^{-16} \frac{\text{R} \cdot \text{kg} \cdot \text{J}}{\text{eV} \cdot \text{C}}$  als Umrechnungskonstante. Die in /IAEA 08/ verwendete Konstante  $C_1 = 6,581 \cdot 10^{-5} \frac{\text{R} \cdot \text{g} \cdot \text{s}}{\text{MeV} \cdot \text{h}}$  enthält noch einen weiteren Umrechnungsfaktor für den Einheitenübergang von Sekunden in Stunden sowie Anpassungen an geläufige Einheitsgrößen. Außerdem wurde die Ionisierungskonstante mit eingerechnet:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2,58 \cdot 10^{-4}} \frac{\text{R} \cdot \text{kg}}{\text{C}} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{33,97} \frac{\text{C}}{\text{J}} = \\ &= 6,581 \cdot 10^{-5} \frac{\text{R} \cdot \text{g} \cdot \text{s}}{\text{MeV} \cdot \text{h}}. \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Mit  $H_E = A \cdot t \cdot \dot{e}_{\text{pt}}$  ergibt sich die Gleichung aus /IAEA 08/:

$$\dot{e}_{\text{pt}} = \frac{1}{4\pi \cdot x^2} \cdot C_1 \cdot \sum_i k_{1,i} \cdot Y_i \cdot E_{\text{pt}_i} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i(E_{\text{pt}_i}, x) \quad (\text{A.11})$$

mit

$C_1$	Konstante ( $6,581 \cdot 10^{-5} \text{ R} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}^{-1}$ ),
$x$	Abstand zur Quelle (100 cm),
$i$	Energiegruppe,
$k_{1,i}$	Dosiskonversionsfaktor (in $\text{Sv} \cdot \text{R}^{-1}$ ),
$Y_i$	Wahrscheinlichkeit für die Emission eines Photons der Energie $E_i$ (Yield) pro Zerfall (in $(\text{Bq} \cdot \text{s})^{-1}$ ),
$E_{\text{pt}_i}$	Energie (in MeV) der $i$ -ten Energiegruppe,
$\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i$	Massenenergieabsorptionskoeffizient in Luft (in $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ),
$\mu_i$	Linearer Schwächungskoeffizient in Luft (in $\text{cm}^{-1}$ ),
$B_i$	Flussdichteaufbaufaktor (Build-up-Faktor) in Luft

und  $[\dot{e}_{\text{pt}}] = \frac{\text{Sv}}{\text{Bq} \cdot \text{h}}$ .

Nachfolgend soll eine Formel für  $\dot{e}_{\text{pt}}$  ohne die Umrechnung in die Einheit Röntgen hergeleitet werden. Ausgehend von Gleichung (A.3) und der Beziehung /KOH 96/

$$D_{\text{Luft}} = k_{\text{Luft}} \cdot (1 - g_{\text{Luft}}) \cdot K_{\text{Luft}} \quad (\text{A.12})$$

mit  $k_{\text{Luft}}$  als einem Konversionsfaktor von Kerma in Energiedosis erhält man

$$D_{\text{Luft}} = \int k_{\text{Luft}} \cdot \Phi_E(\mathbf{r}, E_{\text{pt}}) \cdot E_{\text{pt}} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{Luft}} dE_{\text{pt}} \quad (\text{A.13})$$

und mit Gleichung (A.6) für die Dosisleistung

$$\dot{D}_{\text{Luft}} = \frac{A}{4\pi \cdot x^2} \cdot \sum_i Y_i \cdot E_{\text{pt}_i} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i. \quad (\text{A.14})$$

Für die effektive Äquivalentdosis ergibt sich mit einem Dosiskonversionsfaktor  $k_2$

$$H_E = \frac{A \cdot t}{4\pi \cdot x^2} \cdot \sum_i k_{2,i} \cdot Y_i \cdot E_{\text{pt}_i} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i. \quad (\text{A.15})$$

Für  $\dot{e}_{\text{pt}}$  ergibt sich

$$\dot{e}_{\text{pt}} = \frac{1}{4\pi \cdot x^2} \cdot C_2 \cdot \sum_i k_{2,i} \cdot Y_i \cdot E_{\text{pt}_i} \cdot \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_i \cdot e^{-\mu_i \cdot x} \cdot B_i(E_{\text{pt}_i}, x) \quad (\text{A.16})$$

mit

$C_2$  Konstante ( $5,768 \cdot 10^{-7} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}^{-1}$ ),

$k_{2,i}$  Dosiskonversionsfaktor (in  $\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$ ),

und  $[\dot{e}_{\text{pt}}] = \frac{\text{Sv}}{\text{Bq} \cdot \text{h}}$ . Die Konstante  $C_2$  berechnet sich mit  $1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  über

$$\begin{aligned} C_2 &= 1 \frac{\text{Gy} \cdot \text{kg}}{\text{J}} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = \\ &= 5,768 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Gy} \cdot \text{g} \cdot \text{s}}{\text{MeV} \cdot \text{h}}. \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

Das Verhältnis der beiden Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  beträgt

$$\frac{\{C_2\}}{\{C_1\}} = \frac{5,768 \cdot 10^{-7}}{6,581 \cdot 10^{-5}} = 8,765 \cdot 10^{-3} \quad (\text{A.18})$$

und führt zu dem in /ICRP 87/ erwähnten Umrechnungsfaktor<sup>31</sup> zwischen den dort angegebenen Dosiskonversionskoeffizienten in der Einheit  $\frac{\text{Sv}}{\text{R}}$  und evtl. benötigten Dosiskonversionskoeffizienten in der Einheit  $\frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$ .

---

<sup>31</sup> Der erwähnte Umrechnungsfaktor ist in /ICRP 87/ mit 0,873 angegeben. Der Unterschied in der Zehnerpotenz liegt daran, dass der Dosiskonversionskoeffizient in ICRP 51 in der Einheit  $10^{-2}$  Sv/R angegeben ist. Der geringe Unterschied im Zahlenwert ist darauf zurückzuführen, dass dieser Faktor auch energieabhängig und somit nicht konstant ist. Der genauere Faktor beträgt nach /ICRP 87/  $0,873 \cdot (\mu_{\text{tr}}/\mu_{\text{en}})$ .



## B Berücksichtigung von Tochternukliden

Gemäß den Transportvorschriften sind bei der Berechnung der  $A_1$ - und  $A_2$ -Werte ggf. Tochternuklide zu berücksichtigen. In /IAEA 12/ wird in para. 404 dazu ausgeführt:

*“404. In the calculations of  $A_1$  and  $A_2$  for a radionuclide not in Table 2, a single radioactive decay chain in which the radionuclides are present in their naturally occurring proportions, and in which no progeny nuclide has a half-life either longer than 10 days or longer than that of the parent nuclide, shall be considered as a single radionuclide; and the activity to be taken into account and the  $A_1$  or  $A_2$  value to be applied shall be that corresponding to the parent nuclide of that chain. In the case of radioactive decay chains in which any daughter nuclide has a half-life either longer than 10 days or longer than that of the parent nuclide, the parent and such daughter nuclides shall be considered as mixtures of different nuclides.”*

In /IAEA 08/ steht in para. 403.1 dazu erläuternd:

*“403.1. In the event that  $A_1$  or  $A_2$  values need to be calculated, the methods outlined in Appendix I should be used. Two situations are considered here. First, for a radionuclide with a decay chain including one or more radionuclides in equilibrium in which the half-lives of all progeny (daughters) are less than 10 d and in which no progeny radionuclide has a half-life longer than the parent nuclide; and, second, any other situation. In the former case, only the chain parent should be considered because the contribution of the daughters was considered in developing the  $A_1/A_2$  values (see Appendix I) whereas, in the latter case, all the nuclides should be considered separately and as a mixture of radionuclides, in accordance with para. 404 of the Transport Regulations.”*

Somit sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden:

- Bei Radionukliden, deren Töchter eine Halbwertszeit kleiner 10 Tagen haben und die Halbwertszeiten dieser Töchter kleiner oder gleich der Halbwertszeit des Mutternuklids sind, sind die Beiträge der Töchter bei den  $A$ -Werten des Mutternuklids mit zu berücksichtigen.
- Bei Radionukliden mit Töchtern, bei denen obige Bedingungen nicht zutreffen, sind die Beiträge der Töchter über die Berechnung als Nuklidgemisch zu berücksichtigen.

Für den zweiten Fall stellen die Transportvorschriften die Formel

$$X_m = \frac{1}{\sum_i \frac{f(i)}{X(i)}} \quad (\text{B.1})$$

mit

- $X_m$        $A$ -Wert des Nuklidgemisches,  
 $f(i)$       Anteil der Aktivität des Radionuklides  $i$  im Nuklidgemisch,  
 $X(i)$        $A$ -Wert des  $i$ -ten Radionuklids,

zur Verfügung. Der erste Fall wurde in der Vergangenheit mit verschiedenen Ansätzen zur Berechnung der  $A$ -Werte durchgeführt (s. u.).

### Grundlagen zur Berücksichtigung von Töchtern

Die Aktivität  $A$  eines radioaktiven Nuklids kann mit der Beziehung

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (\text{B.2})$$

mit

- $A$       Aktivität,  
 $N$       Anzahl der zum Zeitpunkt  $t$  vorhandenen Atomkerne eines Nuklids,  
 $t$       Zeit,  
 $\lambda$       Zerfallskonstante,

dargestellt werden. Der Zerfall wird beschrieben durch

$$A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{B.3})$$

wobei  $A(0)$  die Aktivität des Nuklids zum Zeitpunkt  $t = 0$  und  $A(t)$  die Aktivität zu einem Zeitpunkt  $t$  ist. Für die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  gilt ferner

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,6931}{\lambda}. \quad (\text{B.4})$$

Wird der Zerfall einer radioaktiven Tochter betrachtet, so werden durch den Zerfall der Mutter immer neue Tochterkerne erzeugt; Gleichung (B.2) wird erweitert zu

$$\frac{dN_{\text{Tochter}}}{dt} = \lambda_{\text{Mutter}} \cdot N_{\text{Mutter}} - \lambda_{\text{Tochter}} \cdot N_{\text{Tochter}} \quad (\text{B.5})$$

Die Aktivität des  $k$ -ten Tochternuklids (Index 0 ist das Mutternuklid) zum Zeitpunkt  $t$  wird nach /KOH 96/ berechnet über

$$A_k(t) = A_0(0) \cdot \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_k \cdot \left[ \frac{e^{-\lambda_0 t}}{(\lambda_1 - \lambda_0)(\lambda_2 - \lambda_0) \dots (\lambda_k - \lambda_0)} + \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_0 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1) \dots (\lambda_k - \lambda_1)} + \dots + \frac{e^{-\lambda_k t}}{(\lambda_0 - \lambda_k)(\lambda_1 - \lambda_k) \dots (\lambda_{k-1} - \lambda_k)} \right] \quad (\text{B.6})$$

mit  $A_0(0)$  als Aktivität des Mutternuklids zum Zeitpunkt  $t = 0$ .

### Ansatz des ANPA-Berichtes

In /ANPA 94/ werden die  $Q_A$ - und  $Q_B$ -Werte neu berechnet. Dazu wurden gemäß den Transportvorschriften auch Tochternuklide betrachtet. Es wurde zur Berücksichtigung der Töchter der Ansatz nach Gleichung (B.6) gewählt. Zusätzlich wurden weitere Annahmen zur Vereinfachung gemacht. Für  $T_{1/2_0} > T_{1/2_1}, T_{1/2_2}, \dots, T_{1/2_k}$  können nach einigen Halbwertszeiten der Töchter die Exponentialterme der Anteile der Töchter vernachlässigt werden und Gleichung (B.6) zur Berechnung der Aktivität kann vereinfacht werden zu

$$A_k(t) = A_0(t) \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_k}{(\lambda_1 - \lambda_0) \cdot (\lambda_2 - \lambda_0) \cdot \dots \cdot (\lambda_k - \lambda_0)} \quad (\text{B.7})$$

Die Gesamtdosisleistung  $\dot{D}$  des betrachteten Mutternuklids setzt sich nun aus den einzelnen Beiträgen des Mutternuklides  $\dot{D}_0$  und seiner  $k$  Tochternuklide zusammen zu

$$\dot{D} = \dot{D}_0 + \dot{D}_1 + \dots + \dot{D}_k \quad (\text{B.8})$$

und der Gesamtdosisleistungskoeffizient kann mit der Näherung  $e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{T_{1/2_0}}} \approx 1$  und  $A_0(0) = 1 \text{ Bq}$  berechnet werden durch

$$\dot{e} = \dot{e}_0 + \sum_{i=1}^k \frac{T_{1/2_0}^i}{(T_{1/2_0} - T_{1/2_1}) \cdot (T_{1/2_0} - T_{1/2_2}) \cdot \dots \cdot (T_{1/2_0} - T_{1/2_k})} \cdot \dot{e}_i \cdot y_i \quad (\text{B.9})$$

mit  $y_i$  als Zerfallsanteil der  $i$ -ten Tochter in der Zerfallskette der Mutter.

### Ansatz des HPA-Berichtes

Im Bericht /HPA 11/ werden zur Berücksichtigung zwei weitere Ansätze verfolgt. Dabei wird – abhängig von den Halbwertszeiten der Töchter – zwischen dem laufenden und dem stationären Gleichgewicht<sup>32</sup> unterschieden.

Ein laufendes Gleichgewicht stellt sich ein, wenn die Halbwertszeit des Mutternuklids größer als die der Tochternuklide ist. Über eine längere Zeit stellt sich ein derartiges Gleichgewicht zwischen Mutter und Tochter bzw. Töchtern ein, dass die Aktivitäten aller Nuklide mit der Halbwertszeit des Mutternuklids abnehmen. Für den Fall nur einer Tochter kann die Aktivität der Tochter mit (B.6) berechnet werden durch

$$A_1(t) = A_0(0) \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_0} \cdot (e^{-\lambda_0 \cdot t} - e^{-\lambda_1 \cdot t}). \quad (\text{B.10})$$

Es lässt sich dann ein Zeitpunkt  $t_{\text{eq}}$  mit

$$t_{\text{eq}} = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)}{\lambda_1 - \lambda_0} \quad (\text{B.11})$$

berechnen, zu der  $A_1(t = t_{\text{eq}}) = A_0(t = t_{\text{eq}})$  gilt. Der Gesamtdosisleistungskoeffizient kann dann durch

$$\dot{e} = \frac{A_0(t_{\text{eq}})}{A_0(0)} \cdot \left( \dot{e}_0 + \sum_{i=1}^k \dot{e}_i \cdot y_i \right) \quad (\text{B.12})$$

berechnet werden.

Ein stationäres Gleichgewicht ergibt sich als Grenzfall, wenn  $T_{1/2_0} \gg T_{1/2_1}, T_{1/2_2}, \dots, T_{1/2_k}$  gilt. Die Aktivitäten der Tochternuklide sind dann gleich der Aktivität des Mutternuklids und Gleichung (B.12) vereinfacht sich zu

---

<sup>32</sup> Im Bericht „transient equilibrium method“ und „secular equilibrium method“ genannt.

$$\dot{e} = \dot{e}_0 + \sum_{i=1}^k \dot{e}_i y_i . \quad (\text{B.13})$$

## Diskussion

Eine grundsätzliche Diskussion der Ansätze sowie ein Vergleich der Ergebnisse mit den bekannten  $A_1/A_2$ -Werten wird in /HPA 11/ geführt. Auf die wichtigsten Punkte soll hier nochmals eingegangen werden.

Es wird in /HPA 11/ festgestellt, dass in den Transportvorschriften selbst die Behandlung von Radionukliden und ihrer Töchter inkonsistent ist: Zur Berechnung der Pfade  $Q_C$  und  $Q_D$  wurde davon ausgegangen, dass sich Tochternuklide im stationären Gleichgewicht mit dem Mutternuklid befänden. Zur Berechnung der Pfade  $Q_A$  und  $Q_B$  wurde jedoch die in /ANPA 94/ erläuterte Methode benutzt. Für den Pfad  $Q_E$  wurden keine Töchter berücksichtigt. Weiterhin wird erläutert, dass es bei den in den Transportvorschriften berechneten Nukliden nur zwei gibt ( $^{96m}\text{Tc}$ ,  $^{92}\text{Sr}$ ), bei denen gemäß eingangs dargestellter Definition nicht die Anteile der Töchter in den  $A_1/A_2$ -Werten zu berücksichtigen wären, da die Halbwertszeiten der Töchter größer als die der Mutter sind.<sup>33</sup> Definitionsgemäß müsste für diese Nuklide und deren Töchter die Nuklidmischungsformel (B.1) angewandt werden. Nach /HPA 11/ sind trotzdem bei der Berechnung der Pfade  $Q_C$  und  $Q_D$  Beiträge der Töchter bei beiden Nukliden mit eingerechnet worden; bei den Pfaden  $Q_A$  und  $Q_B$  ist die Tochter  $^{96}\text{Tc}$  berücksichtigt worden, das Mutternuklid  $^{92}\text{Sr}$  ist jedoch ohne Tochterbeiträge berechnet worden.

In /HPA 11/ wird weiter untersucht, inwieweit mit den oben beschriebenen Vorgehensweisen die bisherigen  $A_1/A_2$ -Werte nachgerechnet werden können. Dabei treten bei allen Methoden Abweichungen zu den tabellierten Werten auf, oft in einem Bereich von einem Faktor 1 bis 2, in seltenen Fällen auch größer (siehe Table B2 und Table B3 in /HPA 11/). In ihrem Rechenprogramm SEAL verwendet die HPA daher folgende Herangehensweise: Beiträge von Töchtern werden in den  $A_1/A_2$ -Werten des Mutternuklids berücksichtigt, wenn die Halbwertszeit der Tochter kleiner oder gleich als 10 Tage ist und zudem die Halbwertszeit der Tochter kleiner oder gleich der Halbwertszeit der Mut-

---

<sup>33</sup>  $^{96m}\text{Tc}$  hat eine Halbwertszeit von 51,5 Minuten und zerfällt zu  $^{96}\text{Tc}$  mit einer Halbwertszeit von 4,28 Tagen.  $^{92}\text{Sr}$  hat eine Halbwertszeit von 2,66 Stunden und zerfällt zu  $^{92}\text{Y}$  mit einer Halbwertszeit von 3,54 Stunden (Werte gemäß ICRP 107 /ICRP 08/).

ter ist. Ist die Halbwertszeit der Mutter größer als das 40fache der Halbwertszeit der Tochter, wird stationäres Gleichgewicht angenommen, ansonsten laufendes Gleichgewicht.

Für die Berücksichtigung der Beiträge von Tochternukliden in den Berechnungen der GRS wurde der Ansatz gemäß /IAEA 12/ und /IAEA 08/ gewählt. D. h., dass Tochternuklide Berücksichtigung fanden, sofern die Halbwertszeit der Töchter kleiner 10 d ist und kleiner oder gleich der Halbwertszeit des Mutternuklids ist. Bei Zerfallsketten wurden mit Tochternukliden der folgenden Generationen entsprechend verfahren. Die Berechnung des Beitrages zum Q-Wert durch Töchter wurde mit dem Ansatz des ANPA-Berichtes durchgeführt.

## C            Tabellierte Werte

Nachfolgend sind die für die Berechnungen aus der Literatur entnommenen Werte tabellarisch erfasst.

### Massenenergieabsorptionskoeffizient

Die in Tab. C.1 aufgeführten Massenenergieabsorptionskoeffizienten  $\frac{\mu_{en}}{\rho}$  sind /NIST 04/ entnommen. Sie gelten für Luft („Dry Air, near sea level“).

**Tab. C.1**    Massenenergieabsorptionskoeffizienten nach /NIST 04/

Energie (MeV)	Massenenergie- absorptionskoeffizient (cm <sup>2</sup> /g)	Energie (MeV)	Massenenergie- absorptionskoeffizient (cm <sup>2</sup> /g)
1,00000E-03	3,599E+03	1,50000E-01	2,496E-02
1,50000E-03	1,188E+03	2,00000E-01	2,672E-02
2,00000E-03	5,262E+02	3,00000E-01	2,872E-02
3,00000E-03	1,614E+02	4,00000E-01	2,949E-02
3,20290E-03	1,330E+02	5,00000E-01	2,966E-02
3,20290E-03	1,460E+02	6,00000E-01	2,953E-02
4,00000E-03	7,636E+01	8,00000E-01	2,882E-02
5,00000E-03	3,931E+01	1,00000E+00	2,789E-02
6,00000E-03	2,270E+01	1,25000E+00	2,666E-02
8,00000E-03	9,446E+00	1,50000E+00	2,547E-02
1,00000E-02	4,742E+00	2,00000E+00	2,345E-02
1,50000E-02	1,334E+00	3,00000E+00	2,057E-02
2,00000E-02	5,389E-01	4,00000E+00	1,870E-02
3,00000E-02	1,537E-01	5,00000E+00	1,740E-02
4,00000E-02	6,833E-02	6,00000E+00	1,647E-02
5,00000E-02	4,098E-02	8,00000E+00	1,525E-02
6,00000E-02	3,041E-02	1,00000E+01	1,450E-02
8,00000E-02	2,407E-02	1,50000E+01	1,353E-02
1,00000E-01	2,325E-02	2,00000E+01	1,311E-02

## Massenschwächungskoeffizient

Die in Tab. C.2 aufgeführten Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho}$  sind /NIST 04/ entnommen. Sie gelten für Luft („Dry Air, near sea level“).

**Tab. C.2** Massenschwächungskoeffizienten nach /NIST 04/

Energie (MeV)	Massen- schwächungskoeffizient (cm <sup>2</sup> /g)	Energie (MeV)	Massen- schwächungskoeffizient (cm <sup>2</sup> /g)
1,00000E-03	3,606E+03	1,50000E-01	1,356E-01
1,50000E-03	1,191E+03	2,00000E-01	1,233E-01
2,00000E-03	5,279E+02	3,00000E-01	1,067E-01
3,00000E-03	1,625E+02	4,00000E-01	9,549E-02
3,20290E-03	1,340E+02	5,00000E-01	8,712E-02
3,20290E-03	1,485E+02	6,00000E-01	8,055E-02
4,00000E-03	7,788E+01	8,00000E-01	7,074E-02
5,00000E-03	4,027E+01	1,00000E+00	6,358E-02
6,00000E-03	2,341E+01	1,25000E+00	5,687E-02
8,00000E-03	9,921E+00	1,50000E+00	5,175E-02
1,00000E-02	5,120E+00	2,00000E+00	4,447E-02
1,50000E-02	1,614E+00	3,00000E+00	3,581E-02
2,00000E-02	7,779E-01	4,00000E+00	3,079E-02
3,00000E-02	3,538E-01	5,00000E+00	2,751E-02
4,00000E-02	2,485E-01	6,00000E+00	2,522E-02
5,00000E-02	2,080E-01	8,00000E+00	2,225E-02
6,00000E-02	1,875E-01	1,00000E+01	2,045E-02
8,00000E-02	1,662E-01	1,50000E+01	1,810E-02
1,00000E-01	1,541E-01	2,00000E+01	1,705E-02

## Aufbaufaktor

Die in Tab. C.3 aufgeführten Aufbaufaktoren *B* in Luft sind /ANPA 94/ entnommen.

**Tab. C.3** Aufbaufaktoren in Luft nach /ANPA 94/

Energie (MeV)	Aufbaufaktor	Energie (MeV)	Aufbaufaktor
1,50E-02	1,0509	6,00E-01	1,0074
2,00E-02	1,0581	8,00E-01	1,0063
3,00E-02	1,0734	1,00E+00	1,0055
4,00E-02	1,0676	1,50E+00	1,0044
5,00E-02	1,0607	2,00E+00	1,0037
6,00E-02	1,0521	3,00E+00	1,0029
8,00E-02	1,0382	4,00E+00	1,0023
1,00E-01	1,0290	5,00E+00	1,0020
1,50E-01	1,0198	6,00E+00	1,0018
2,00E-01	1,0160	8,00E+00	1,0013
3,00E-01	1,0113	1,00E+01	1,0011
4,00E-01	1,0094	1,50E+01	1,0007
5,00E-01	1,0083	–	–

## Dosiskonversionsfaktoren

Die in Tab. C.4 enthaltenen Dosiskonversionsfaktoren  $k_1$  sind /ICRP 87/ entnommen. Sie gelten zur Umrechnung von Exposure  $X$  in effektive Äquivalentdosis  $H_E$  (nach ICRP 26 /ICRP 77/) für das Modell eines Hermaphroditen und bei isotroper Verteilung des Strahlungsfeldes.

**Tab. C.4** Dosiskonversionsfaktoren nach /ICRP 87/

Energie (MeV)	Dosiskonversionsfaktor ( $10^{-2}$ Sv/R)	Energie (MeV)	Dosiskonversionsfaktor ( $10^{-2}$ Sv/R)
1,0E-02	0,0030	5,0E-01	0,602
1,5E-02	0,0160	6,0E-01	0,609
2,0E-02	0,0495	8,0E-01	0,623
3,0E-02	0,187	1,0E+00	0,638
4,0E-02	0,352	1,5E+00	0,666
5,0E-02	0,488	2,0E+00	0,688
6,0E-02	0,592	3,0E+00	0,720
8,0E-02	0,675	4,0E+00	0,739
1,0E-01	0,668	5,0E+00	0,755
1,5E-01	0,635	6,0E+00	0,770
2,0E-01	0,614	8,0E+00	0,797
3,0E-01	0,600	1,0E+01	0,822
4,0E-01	0,599	–	–

Die in Tab. C.5 enthaltenen Dosiskonversionsfaktoren  $k_2$  sind /GSF 84/ entnommen. Sie gelten zur Umrechnung von Luftkerma  $K_{Luft}$  in effektive Äquivalentdosis  $H_E$  (nach ICRP 26 /ICRP 77/) für das Modell eines Hermaphroditen und bei isotroper Verteilung des Strahlungsfeldes.

**Tab. C.5** Dosiskonversionsfaktoren nach /GSF 84/

Energie (MeV)	Dosiskonversionsfaktor (Sv/Gy)	Energie (MeV)	Dosiskonversionsfaktor (Sv/Gy)
1,0E-02	3,00E-03	1,5E-01	7,27E-01
1,5E-02	1,80E-02	2,0E-01	7,03E-01
2,5E-02	1,16E-01	3,0E-01	6,83E-01
5,0E-02	5,59E-01	5,0E-01	6,86E-01
6,0E-02	6,77E-01	1,0E+00	7,28E-01
7,0E-02	7,42E-01	3,0E+00	8,21E-01
8,0E-02	7,73E-01	6,0E+00	8,65E-01
1,0E-01	7,66E-01	1,0E+01	8,96E-01

Die in Tab. C.6 enthaltenen Dosiskonversionsfaktoren  $k_3$  sind /ICRP 96/ entnommen. Sie gelten zur Umrechnung von Luftkerma  $K_{\text{Luft}}$  in effektive Dosis  $E$  (nach ICRP 60 /ICRP 91/) für das Modell eines Hermaphroditen und bei isotroper Verteilung des Strahlungsfeldes.

**Tab. C.6** Dosiskonversionsfaktoren nach /ICRP 96/

Energie (MeV)	Dosiskonversionsfaktor (Sv/Gy)	Energie (MeV)	Dosiskonversionsfaktor (Sv/Gy)
1,0E-02	0,00271	3,0E-01	0,664
1,5E-02	0,0123	4,0E-01	0,667
2,0E-02	0,0362	5,0E-01	0,675
3,0E-02	0,143	6,0E-01	0,684
4,0E-02	0,326	8,0E-01	0,703
5,0E-02	0,511	1,0E+00	0,719
6,0E-02	0,642	2,0E+00	0,774
7,0E-02	0,720	4,0E+00	0,824
8,0E-02	0,749	6,0E+00	0,846
1,0E-01	0,748	8,0E+00	0,859
1,5E-01	0,700	1,0E+01	0,868
2,0E-01	0,679	–	–

## CSDA-Reichweite

Die Werte für die CSDA-Reichweite  $r_E$  von Elektronen in Wasser („Water, liquid“) sind /NIST 05/ entnommen (Tab. C.7).

**Tab. C.7** CSDA-Reichweite von Elektronen in Wasser nach /NIST 05/

kinetische Energie (MeV)	CSDA- Reichweite (g/cm <sup>2</sup> )	kinetische Energie (MeV)	CSDA- Reichweite (g/cm <sup>2</sup> )	kinetische Energie (MeV)	CSDA- Reichweite (g/cm <sup>2</sup> )
1,000E-02	2,515E-04	5,500E-01	2,013E-01	3,000E+01	1,317E+01
1,250E-02	3,728E-04	6,000E-01	2,265E-01	3,500E+01	1,496E+01
1,500E-02	5,147E-04	7,000E-01	2,778E-01	4,000E+01	1,665E+01
1,750E-02	6,762E-04	8,000E-01	3,302E-01	4,500E+01	1,828E+01
2,000E-02	8,566E-04	9,000E-01	3,832E-01	5,000E+01	1,983E+01
2,500E-02	1,272E-03	1,000E+00	4,367E-01	5,500E+01	2,132E+01
3,000E-02	1,756E-03	1,250E+00	5,717E-01	6,000E+01	2,276E+01
3,500E-02	2,306E-03	1,500E+00	7,075E-01	7,000E+01	2,547E+01
4,000E-02	2,919E-03	1,750E+00	8,432E-01	8,000E+01	2,799E+01
4,500E-02	3,591E-03	2,000E+00	9,785E-01	9,000E+01	3,035E+01
5,000E-02	4,320E-03	2,500E+00	1,247E+00	1,000E+02	3,258E+01
5,500E-02	5,103E-03	3,000E+00	1,514E+00	1,250E+02	3,761E+01
6,000E-02	5,940E-03	3,500E+00	1,777E+00	1,500E+02	4,204E+01
7,000E-02	7,762E-03	4,000E+00	2,037E+00	1,750E+02	4,600E+01
8,000E-02	9,773E-03	4,500E+00	2,295E+00	2,000E+02	4,957E+01
9,000E-02	1,196E-02	5,000E+00	2,550E+00	2,500E+02	5,582E+01
1,000E-01	1,431E-02	5,500E+00	2,802E+00	3,000E+02	6,116E+01
1,250E-01	2,083E-02	6,000E+00	3,052E+00	3,500E+02	6,583E+01
1,500E-01	2,817E-02	7,000E+00	3,545E+00	4,000E+02	6,996E+01
1,750E-01	3,622E-02	8,000E+00	4,030E+00	4,500E+02	7,368E+01
2,000E-01	4,488E-02	9,000E+00	4,506E+00	5,000E+02	7,706E+01
2,500E-01	6,372E-02	1,000E+01	4,975E+00	5,500E+02	8,014E+01
3,000E-01	8,421E-02	1,250E+01	6,117E+00	6,000E+02	8,299E+01
3,500E-01	1,060E-01	1,500E+01	7,219E+00	7,000E+02	8,810E+01
4,000E-01	1,288E-01	1,750E+01	8,286E+00	8,000E+02	9,258E+01
4,500E-01	1,523E-01	2,000E+01	9,320E+00	9,000E+02	9,657E+01
5,000E-01	1,766E-01	2,500E+01	1,130E+01	1,000E+03	1,002E+02

## Dimensionslose Dosisverteilung

Die Werte für die dimensionslose Dosisverteilung  $j\left(\frac{r}{r_E}, E_\beta\right)$  in Wasser (unendliches Medium) sind /CRO 92a/ entnommen (Tab. C.8).

**Tab. C.8** Dimensionslose Dosisverteilung in Wasser nach /CRO 92a/

$r/r_E$	Energie (MeV)								
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,700	1,000	2,000	4,000
0,000	0,564	0,570	0,589	0,627	0,692	0,761	0,807	0,892	0,952
0,025	0,580	0,587	0,600	0,642	0,700	0,773	0,814	0,902	0,960
0,050	0,599	0,604	0,613	0,658	0,714	0,787	0,821	0,910	0,965
0,075	0,620	0,623	0,632	0,676	0,732	0,800	0,833	0,920	0,972
0,100	0,643	0,645	0,656	0,697	0,751	0,816	0,847	0,930	0,978
0,125	0,670	0,670	0,683	0,718	0,772	0,832	0,862	0,939	0,985
0,150	0,703	0,701	0,712	0,744	0,797	0,847	0,877	0,950	0,992
0,175	0,740	0,734	0,744	0,768	0,819	0,864	0,894	0,961	0,998
0,200	0,780	0,767	0,777	0,801	0,844	0,885	0,914	0,974	1,005
0,225	0,824	0,805	0,815	0,832	0,872	0,907	0,935	0,988	1,012
0,250	0,870	0,853	0,861	0,872	0,905	0,936	0,956	1,003	1,018
0,275	0,921	0,900	0,906	0,917	0,942	0,964	0,979	1,020	1,027
0,300	0,980	0,952	0,957	0,966	0,984	0,998	1,010	1,040	1,036
0,325	1,043	1,005	1,007	1,020	1,031	1,038	1,046	1,057	1,048
0,350	1,107	1,068	1,068	1,077	1,088	1,087	1,085	1,082	1,063
0,375	1,175	1,138	1,134	1,138	1,149	1,140	1,135	1,113	1,079
0,400	1,251	1,212	1,202	1,207	1,210	1,195	1,193	1,148	1,096
0,425	1,329	1,289	1,271	1,278	1,273	1,251	1,252	1,185	1,115
0,450	1,403	1,373	1,342	1,348	1,341	1,308	1,308	1,221	1,141
0,475	1,471	1,453	1,411	1,416	1,407	1,365	1,360	1,259	1,170
0,500	1,530	1,517	1,478	1,481	1,468	1,423	1,405	1,299	1,198
0,525	1,578	1,569	1,540	1,541	1,520	1,477	1,444	1,340	1,226
0,550	1,612	1,612	1,594	1,596	1,561	1,523	1,481	1,383	1,252
0,575	1,632	1,642	1,635	1,640	1,590	1,557	1,507	1,419	1,275
0,600	1,639	1,661	1,662	1,667	1,606	1,574	1,514	1,436	1,295
0,625	1,625	1,659	1,668	1,670	1,606	1,571	1,507	1,437	1,307
0,650	1,578	1,625	1,641	1,638	1,587	1,544	1,489	1,420	1,308
0,675	1,505	1,565	1,588	1,578	1,542	1,497	1,453	1,387	1,297
0,700	1,404	1,483	1,516	1,489	1,461	1,434	1,396	1,345	1,276
0,725	1,289	1,378	1,420	1,379	1,355	1,348	1,316	1,280	1,236
0,750	1,173	1,246	1,291	1,257	1,232	1,226	1,206	1,175	1,166
0,775	1,050	1,102	1,143	1,119	1,093	1,083	1,075	1,050	1,077
0,800	0,916	0,958	0,984	0,959	0,940	0,931	0,924	0,920	0,974
0,825	0,780	0,812	0,820	0,792	0,780	0,771	0,764	0,784	0,857
0,850	0,648	0,661	0,660	0,629	0,615	0,599	0,605	0,642	0,723

$r/r_E$	Energie (MeV)								
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,700	1,000	2,000	4,000
0,875	0,523	0,518	0,510	0,477	0,457	0,438	0,455	0,499	0,583
0,900	0,409	0,398	0,377	0,345	0,320	0,312	0,324	0,358	0,443
0,925	0,308	0,296	0,263	0,235	0,207	0,210	0,213	0,233	0,313
0,950	0,227	0,211	0,176	0,155	0,128	0,128	0,128	0,142	0,205
0,975	0,162	0,144	0,111	0,096	0,074	0,068	0,067	0,077	0,120
1,000	0,114	0,094	0,066	0,053	0,039	0,034	0,034	0,038	0,066
1,025	0,079	0,059	0,036	0,024	0,019	0,016	0,017	0,016	0,032
1,050	0,054	0,035	0,019	0,009	0,009	0,008	0,009	0,006	0,014
1,075	0,035	0,020	0,010	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002	0,005
1,100	0,020	0,011	0,005	0,003	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004
1,125	0,004	0,005	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002
1,150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Die Werte für die dimensionslose Dosisverteilung  $j\left(\frac{z}{r_E}, E_\beta\right)$  bei Hautkontamination (Fläche 100 cm<sup>2</sup>) sind /CRO 92b/ entnommen (Tab. C.9).

**Tab. C.9** Dimensionslose Dosisverteilung bei Hautkontamination mit einer Fläche von Fläche 100 cm<sup>2</sup> nach /CRO 92b/

$z/r_E$	Energie (MeV)								
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,700	1,000	2,000	4,000
0,000	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
0,025	1,685	1,659	1,495	1,230	1,110	1,210	1,240	1,337	1,493
0,050	1,434	1,417	1,292	1,079	0,974	1,054	1,071	1,147	1,225
0,075	1,260	1,250	1,153	0,975	0,885	0,949	0,960	1,015	1,072
0,100	1,143	1,138	1,060	0,906	0,826	0,881	0,890	0,925	0,970
0,125	1,063	1,060	0,996	0,860	0,787	0,837	0,845	0,864	0,900
0,150	0,990	0,989	0,937	0,818	0,750	0,792	0,800	0,813	0,837
0,175	0,930	0,931	0,887	0,783	0,720	0,755	0,760	0,769	0,785
0,200	0,880	0,884	0,843	0,753	0,694	0,718	0,719	0,723	0,739
0,225	0,836	0,844	0,805	0,724	0,670	0,683	0,680	0,680	0,698
0,250	0,794	0,806	0,767	0,692	0,645	0,650	0,640	0,646	0,655
0,275	0,752	0,770	0,730	0,660	0,622	0,619	0,607	0,616	0,615
0,300	0,717	0,730	0,696	0,630	0,600	0,590	0,578	0,585	0,580
0,325	0,677	0,691	0,661	0,602	0,572	0,562	0,550	0,554	0,545
0,350	0,640	0,650	0,623	0,575	0,545	0,534	0,524	0,521	0,513
0,375	0,602	0,612	0,586	0,547	0,520	0,507	0,497	0,489	0,481
0,400	0,568	0,577	0,550	0,518	0,491	0,478	0,469	0,461	0,453
0,425	0,528	0,540	0,515	0,487	0,462	0,448	0,439	0,434	0,420
0,450	0,489	0,502	0,480	0,454	0,432	0,420	0,412	0,404	0,390
0,475	0,449	0,461	0,444	0,419	0,403	0,392	0,383	0,375	0,362

$z/r_E$	Energie (MeV)								
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,700	1,000	2,000	4,000
0,500	0,409	0,420	0,405	0,385	0,373	0,361	0,355	0,344	0,335
0,525	0,372	0,380	0,372	0,351	0,343	0,332	0,325	0,317	0,309
0,550	0,335	0,342	0,336	0,320	0,312	0,302	0,292	0,288	0,283
0,575	0,300	0,305	0,300	0,289	0,280	0,272	0,260	0,256	0,256
0,600	0,264	0,270	0,268	0,256	0,246	0,241	0,231	0,226	0,228
0,625	0,228	0,236	0,236	0,222	0,213	0,210	0,203	0,197	0,200
0,650	0,196	0,205	0,201	0,187	0,185	0,181	0,176	0,170	0,174
0,675	0,167	0,174	0,166	0,154	0,158	0,154	0,149	0,146	0,150
0,700	0,139	0,139	0,136	0,129	0,131	0,129	0,122	0,123	0,128
0,725	0,113	0,107	0,110	0,108	0,105	0,106	0,096	0,102	0,107
0,750	0,091	0,085	0,086	0,087	0,082	0,083	0,075	0,084	0,086
0,775	0,072	0,067	0,065	0,068	0,061	0,062	0,058	0,068	0,067
0,800	0,057	0,052	0,049	0,052	0,044	0,046	0,043	0,051	0,050
0,825	0,044	0,039	0,036	0,039	0,031	0,033	0,031	0,035	0,036
0,850	0,032	0,027	0,026	0,027	0,021	0,022	0,022	0,023	0,024
0,875	0,022	0,018	0,018	0,018	0,014	0,014	0,015	0,013	0,015
0,900	0,016	0,011	0,011	0,012	0,009	0,009	0,009	0,007	0,009
0,925	0,012	0,007	0,006	0,008	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005
0,950	0,008	0,005	0,003	0,005	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003
0,975	0,005	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
1,000	0,004	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
1,025	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,050	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,075	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

In Tab. C.10 sind extrapolierte Werte für die dimensionslose Dosisverteilung  $j\left(\frac{r}{r_E}, E_\beta\right)$  in Wasser (unendliches Medium) für die Betaenergie 10 MeV aufgeführt.

**Tab. C.10** Extrapolierte Werte zur dimensionslosen Dosisverteilung in Wasser

$r/r_E$	$E_\beta$ 10 MeV
0,000	1,038
0,025	1,042
0,050	1,043
0,075	1,045
0,100	1,045
0,125	1,049
0,150	1,050
0,175	1,049
0,200	1,047
0,225	1,045
0,250	1,038
0,275	1,036
0,300	1,031
0,325	1,036
0,350	1,038
0,375	1,036
0,400	1,031
0,425	1,029
0,450	1,043
0,475	1,062
0,500	1,076
0,525	1,090
0,550	1,098
0,575	1,107
0,600	1,130
0,625	1,153
0,650	1,173
0,675	1,187
0,700	1,190
0,725	1,180
0,750	1,154
0,775	1,114
0,800	1,050
0,825	0,964
0,850	0,846
0,875	0,716
0,900	0,587
0,925	0,462
0,950	0,333

$r/r_E$	$E_\beta$ 10 MeV
0,975	0,216
1,000	0,137
1,025	0,080
1,050	0,043
1,075	0,017
1,100	0,025
1,125	0,005
1,150	0,000

In Tab. C.11 sind extrapolierte Werte für die dimensionslose Dosisverteilung  $j\left(\frac{z}{r_E}, E_\beta\right)$  bei Hautkontamination (Fläche 100 cm<sup>2</sup>) für die Betaenergie 10 MeV (inkl. extrapoliertem Wert für die normierte Eindringtiefe 0,001) aufgelistet.

**Tab. C.11** Extrapolierte Werte zur dimensionslosen Dosisverteilung bei Hautkontamination für die Betaenergie 10 MeV

$z/r_E$	$E_\beta$ 10 MeV
0,001	5,692
0,025	1,727
0,050	1,336
0,075	1,152
0,100	1,033
0,125	0,950
0,150	0,870
0,175	0,807
0,200	0,761
0,225	0,723
0,250	0,667
0,275	0,614
0,300	0,573
0,325	0,533
0,350	0,503
0,375	0,471
0,400	0,443
0,425	0,402
0,450	0,372
0,475	0,346
0,500	0,323
0,525	0,299
0,550	0,277
0,575	0,256
0,600	0,231

$z/r_E$	$E_\beta$ 10 MeV
0,625	0,204
0,650	0,179
0,675	0,155
0,700	0,135
0,725	0,114
0,750	0,089
0,775	0,066
0,800	0,049
0,825	0,037
0,850	0,025
0,875	0,018
0,900	0,013
0,925	0,007
0,950	0,005
0,975	0,001
1,000	0,001
1,025	0,000
1,050	0,000
1,075	0,000

In Tab. C.12 sind extrapolierte Werte für die dimensionslose Dosisverteilung  $j\left(\frac{z}{r_E}, E_\beta\right)$  bei Hautkontamination (Fläche 100 cm<sup>2</sup>) für die normierte Eindringtiefe 0,001 aufgeführt.

**Tab. C.12** Extrapolierte Werte zur dimensionslosen Dosisverteilung bei Hautkontamination für die normierte Eindringtiefe 0,001

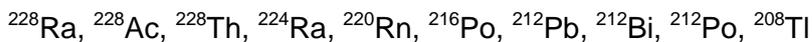
$z/r_E$	Energie (MeV)								
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,700	1,000	2,000	4,000
0,001	3,564	3,450	2,944	2,260	2,037	2,297	2,449	2,724	3,742

## D            **Verwendete Tochternuklide zu Berechnung von Nuklidgemischen**

Nachstehend sind die Töchter aufgeführt, die zur Berechnung der Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_D$  herangezogen wurden.

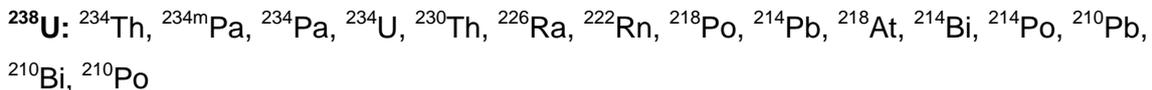
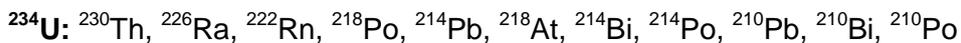
### **Thorium**

Folgende Tochternuklide wurden zur Berechnung von Th-nat ( $^{232}\text{Th}$  im stationären Gleichgewicht) nach der ICRP 38 und der ICRP 107 verwendet:



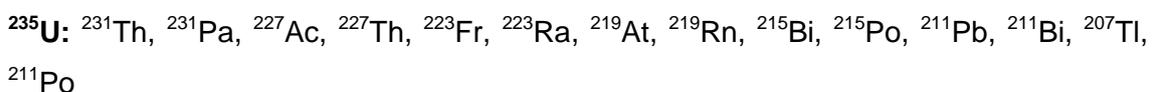
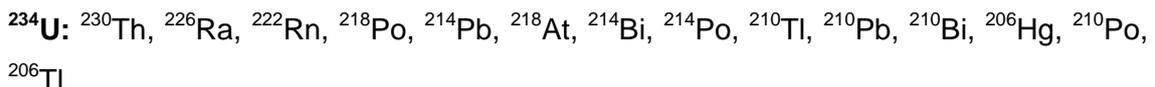
### **Uran**

Folgende Tochternuklide wurden zur Berechnung von U-nat (Nuklidgemisch aus  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  im stationären Gleichgewicht) nach der ICRP 38 verwendet:



Dabei handelt es sich um alle Töchter einer Zerfallsreihe zu den jeweiligen Nukliden, die in der ICRP 38 aufgeführt werden, auch solche mit sehr geringen Dosisbeiträgen.

Folgende Tochternuklide wurden zur Berechnung von U-nat (Nuklidgemisch aus  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  im stationären Gleichgewicht) nach der ICRP 107 verwendet:



$^{238}\text{U}$ :  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ,  $^{234}\text{Pa}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{218}\text{At}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Tl}$ ,  
 $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{206}\text{Hg}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{206}\text{Tl}$

Dabei handelt es sich um alle Töchter einer Zerfallsreihe zu den jeweiligen Nukliden, die in der ICRP 107 aufgeführt werden, auch solche mit sehr geringen Dosisbeiträgen.

Zur Berechnung der A-Werte für U-dep und U-enr wurden zwei unterschiedliche Ansätze zur Mitberechnung von Töchtern verfolgt:

- Berücksichtigung von Töchtern weitgehend wie in HPA /HPA 11/ (dort nur für U-dep und nur für die Nuklide  $^{234}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$ )<sup>34</sup>,
- Berücksichtigung von Töchtern entsprechend /IAEA 13/.

Folgende Tochternuklide wurden im ersten Ansatz (Berücksichtigung von Töchtern nach HPA) zur Berechnung von U-dep und U-enr (Nuklidgemisch aus  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$ ) nach der ICRP 38 und der ICRP 107 verwendet:

$^{234}\text{U}$ :  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{218}\text{At}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$

$^{235}\text{U}$ :  $^{231}\text{Th}$

$^{238}\text{U}$ :  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{234\text{m}}\text{Pa}$

Für den zweiten Ansatz wurden die Töchter entsprechend den Angaben in /IAEA 13/ berücksichtigt. Danach sind durch vor und während des Anreicherungsprozesses ablaufende Extraktionen und chemische Prozesse nahezu alle Töchter unterhalb von  $^{234}\text{U}$  und  $^{231}\text{Th}$  nicht mehr vorhanden:

$^{234}\text{U}$ : keine

$^{235}\text{U}$ :  $^{231}\text{Th}$

$^{238}\text{U}$ :  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ,  $^{234}\text{Pa}$

---

<sup>34</sup> In /HPA 11/ werden nur die Nuklide  $^{234}\text{U}$  mit einem Massenanteil von 0,001 % und  $^{238}\text{U}$  mit einem Anteil von 99,8 % zur Berechnung von U-dep herangezogen. Die mit berechneten Tochternuklide in /HPA 11/ sind für  $^{234}\text{U}$ :  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{218}\text{At}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$  sowie für  $^{238}\text{U}$ :  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ . Das Nuklid  $^{235}\text{U}$  scheint nicht berücksichtigt worden zu sein. Für U-enr wurden offenbar keine Berechnungen durchgeführt.

## E Massen- und Aktivitätsanteile bei Urangemischen

In den Transportvorschriften /IAEA 12/ werden auch *A*-Werte für Nuklidgemische berechnet, u. a. für Uran in natürlich vorkommender Zusammensetzung, abgereichertes und angereichertes Uran. Weder in den Transportvorschriften noch in der TS-G-1.1 /IAEA 08/ sind jedoch Angaben zur Zusammensetzung der Gemische enthalten; für angereichertes Uran werden zudem weder für die Q-Pfade noch für die *A*-Werte Zahlenangaben gemacht<sup>35</sup>. Daher wurde zur Bestimmung der Anteile der Uranisotope auf weitere Literatur zurückgegriffen.

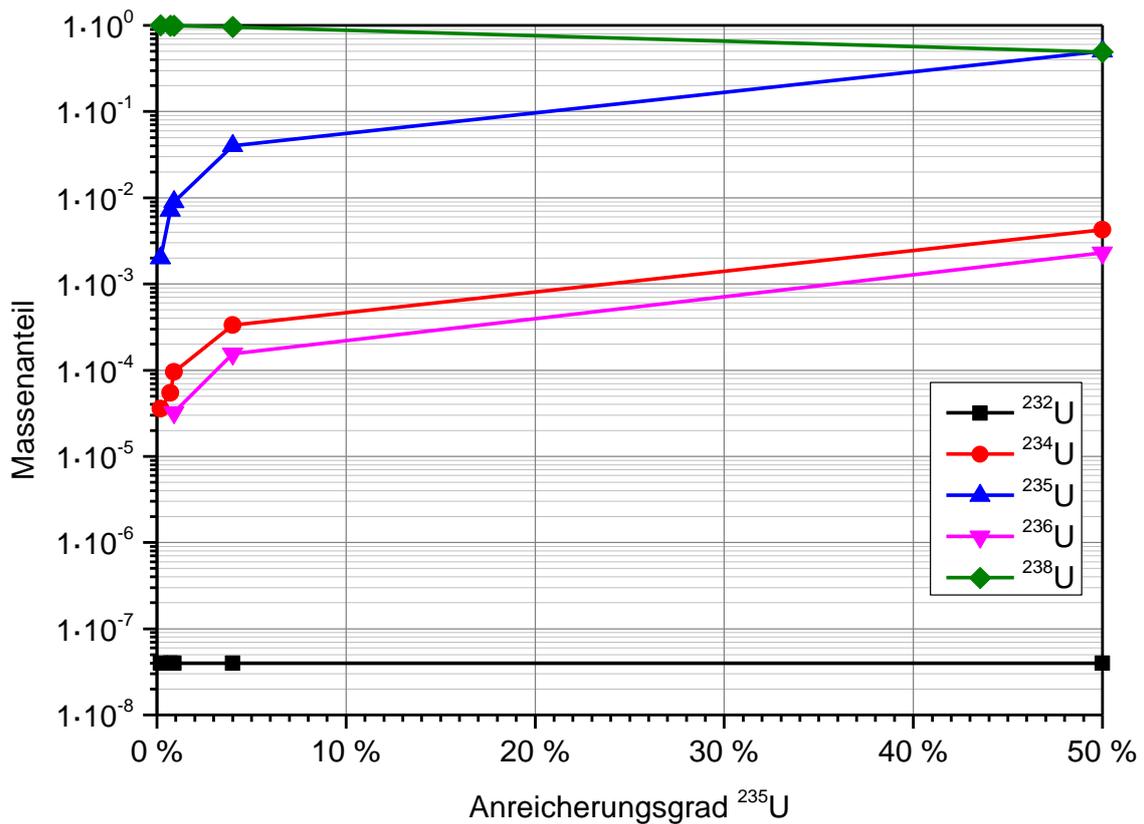
In /LOC 95/ sind Angaben zu Anteilen verschiedener Uranisotope in einem Urangemisch enthalten, jeweils abhängig von Anreicherungsgrad des Isotops <sup>235</sup>U (Tab. E.1, Abb. E.1).

**Tab. E.1** Massenanteile von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden nach /LOC 95/

Anreicherungsgrad <sup>235</sup> U (%)	Massenanteil <sup>a)</sup>					gesamt
	<sup>232</sup> U	<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>236</sup> U	<sup>238</sup> U	
0,2	$4 \cdot 10^{-8}$	$3,56 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0	$9,98 \cdot 10^{-1}$	1,000
0,71	$4 \cdot 10^{-8}$	$5,41 \cdot 10^{-5}$	$7,11 \cdot 10^{-3}$	0	$9,93 \cdot 10^{-1}$	1,000
0,9	$4 \cdot 10^{-8}$	$9,48 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$9,91 \cdot 10^{-1}$	1,000
4	$4 \cdot 10^{-8}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$9,60 \cdot 10^{-1}$	1,000
50	$4 \cdot 10^{-8}$	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$2,31 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-1}$	1,000

<sup>a)</sup> Der Massenanteil für <sup>238</sup>U bei einem Anreicherungsgrad von 4 % <sup>235</sup>U wird in /LOC 95/ mit  $9,68 \cdot 10^{-1}$  angegeben, die Summe der Anteile betrüge dann jedoch 1,008.

<sup>35</sup> Für auf bis zu 20 % <sup>235</sup>U angereichertes Uran (U-enr) ist in den Spalten der Tabelle I.2 in /IAEA 08/ der Q-Werte jeweils ein Strich gesetzt, die *A*-Werte werden in /IAEA 08/ und /IAEA 12/ mit „unlimited“ angegeben.



**Abb. E.1** Massenanteile von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

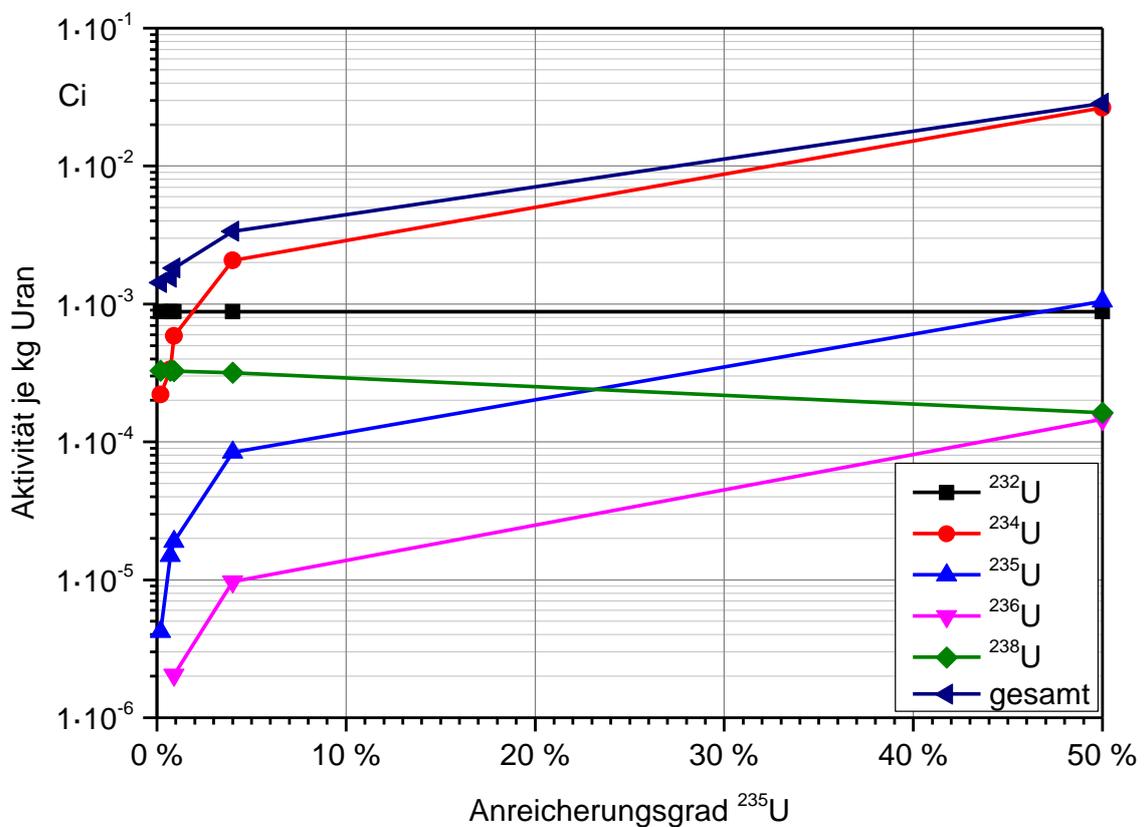
Unter Einbeziehung der spezifischen Aktivität der jeweiligen Isotope (Tab. E.2) wird in /LOC 95/ ebenfalls die jeweilige Aktivität der Uranisotope angegeben (Tab. E.3, Abb. E.2).

**Tab. E.2** Spezifische Aktivität von Uranisotopen nach /LOC 95/

Spezifische Aktivität (Ci / kg)				
<sup>232</sup> U	<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>236</sup> U	<sup>238</sup> U
2,2·10 <sup>4</sup>	6,2	2,1·10 <sup>-3</sup>	6,3·10 <sup>-2</sup>	3,3·10 <sup>-4</sup>

**Tab. E.3** Aktivität von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden nach /LOC 95/

Anreicherungsgrad <sup>235</sup> U (%)	Aktivität je 1 kg Uran					
	<sup>232</sup> U (Ci)	<sup>234</sup> U (Ci)	<sup>235</sup> U (Ci)	<sup>236</sup> U (Ci)	<sup>238</sup> U (Ci)	gesamt (Ci)
0,2	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	0	$3,29 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$
0,71	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$3,35 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	0	$3,28 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$
0,9	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$5,88 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-5}$	$2,05 \cdot 10^{-6}$	$3,27 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$
4	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$9,71 \cdot 10^{-6}$	$3,17 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$
50	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$

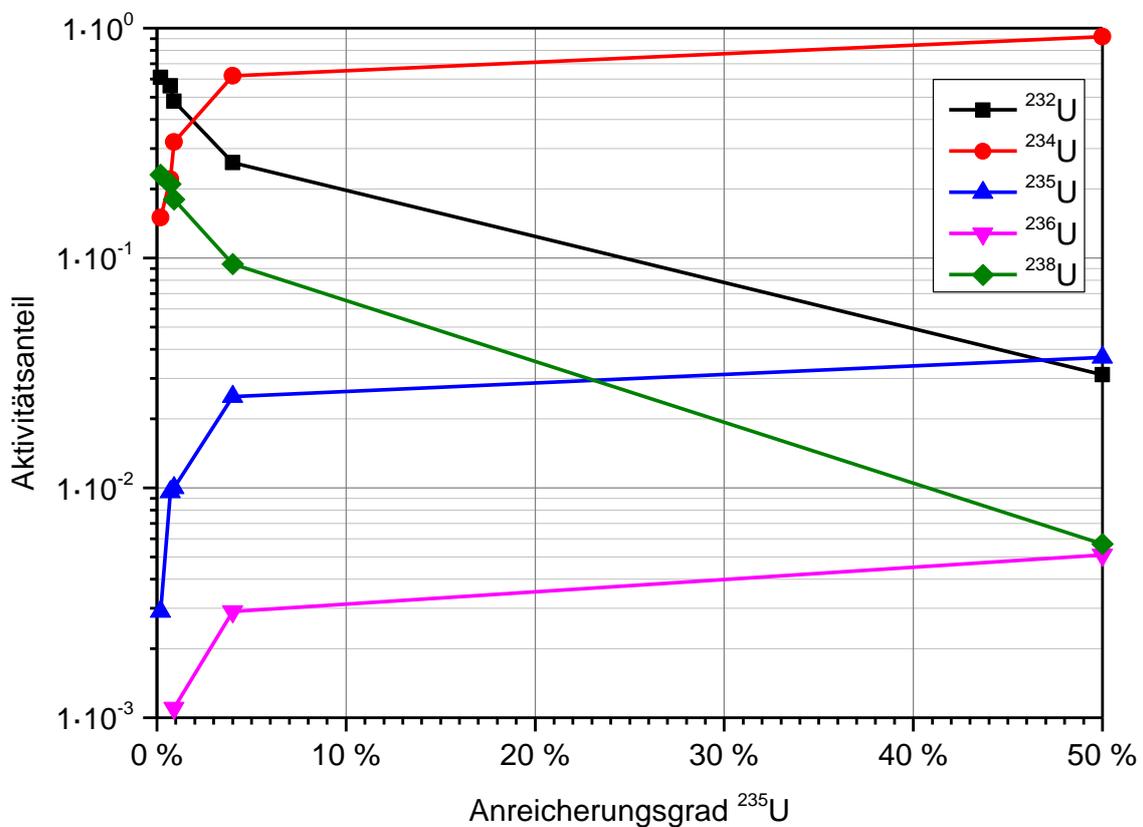


**Abb. E.2** Aktivität von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

Mit Hilfe dieser Angaben wurde die anteilige Aktivität der Uranisotope im Gemisch berechnet (Tab. E.4, Abb. E.3).

**Tab. E.4** Aktivitätsanteil von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

Anreicherungsgrad <sup>235</sup> U (%)	Aktivitätsanteil					
	<sup>232</sup> U	<sup>234</sup> U	<sup>235</sup> U	<sup>236</sup> U	<sup>238</sup> U	gesamt
0,2	$6,1 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	0	$2,3 \cdot 10^{-1}$	1,00
0,71	$5,6 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	0	$2,1 \cdot 10^{-1}$	1,00
0,9	$4,8 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	1,00
4	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-2}$	1,00
50	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	1,00

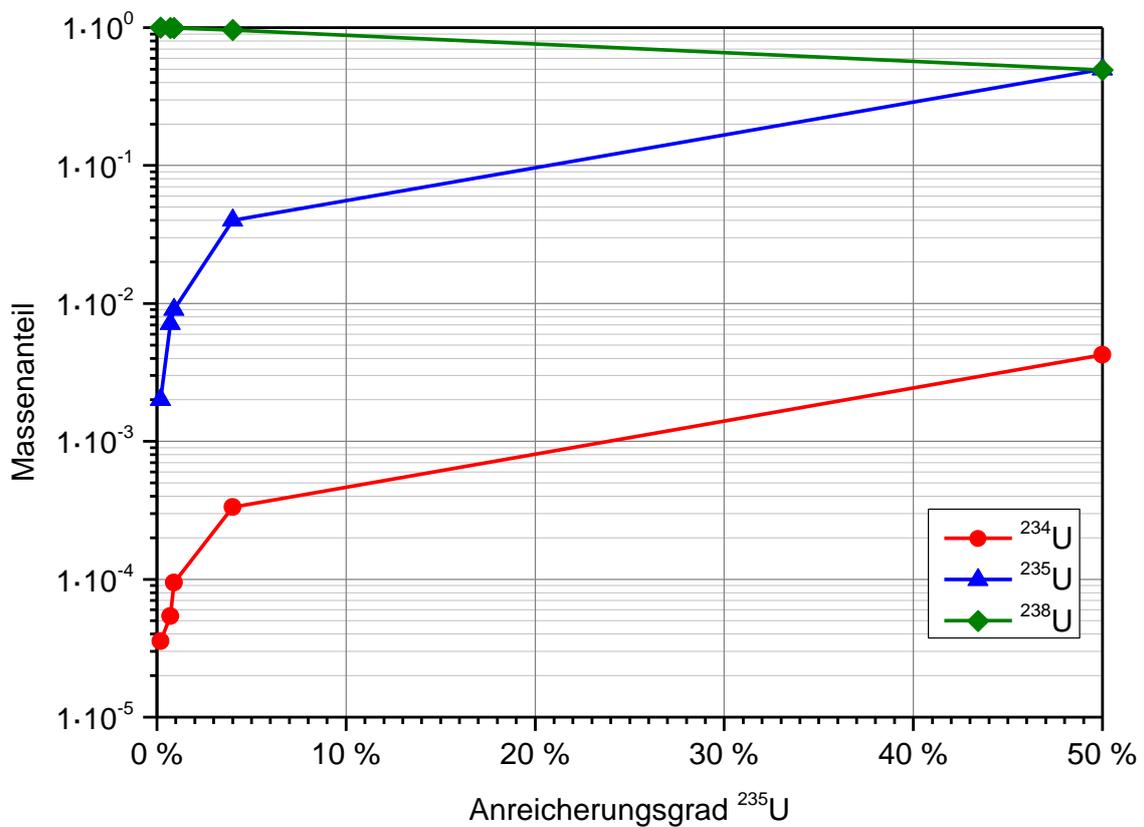


**Abb. E.3** Aktivitätsanteil von Uranisotopen in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

Unter der Annahme, dass das Urangemisch ausschließlich die Isotope <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U und <sup>238</sup>U enthielte, würden sich die in Tab. E.5, Tab. E.6 und Tab. E.7 angegebenen sowie in Abb. E.4, Abb. E.5 und Abb. E.6 dargestellten Massen- und Aktivitätsanteile ergeben. Dabei wurden für <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U und <sup>238</sup>U die Massenanteile beibehalten und die geringen Beiträge der Massenanteile von <sup>232</sup>U und <sup>236</sup>U gestrichen.

**Tab. E.5** Massenanteile der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

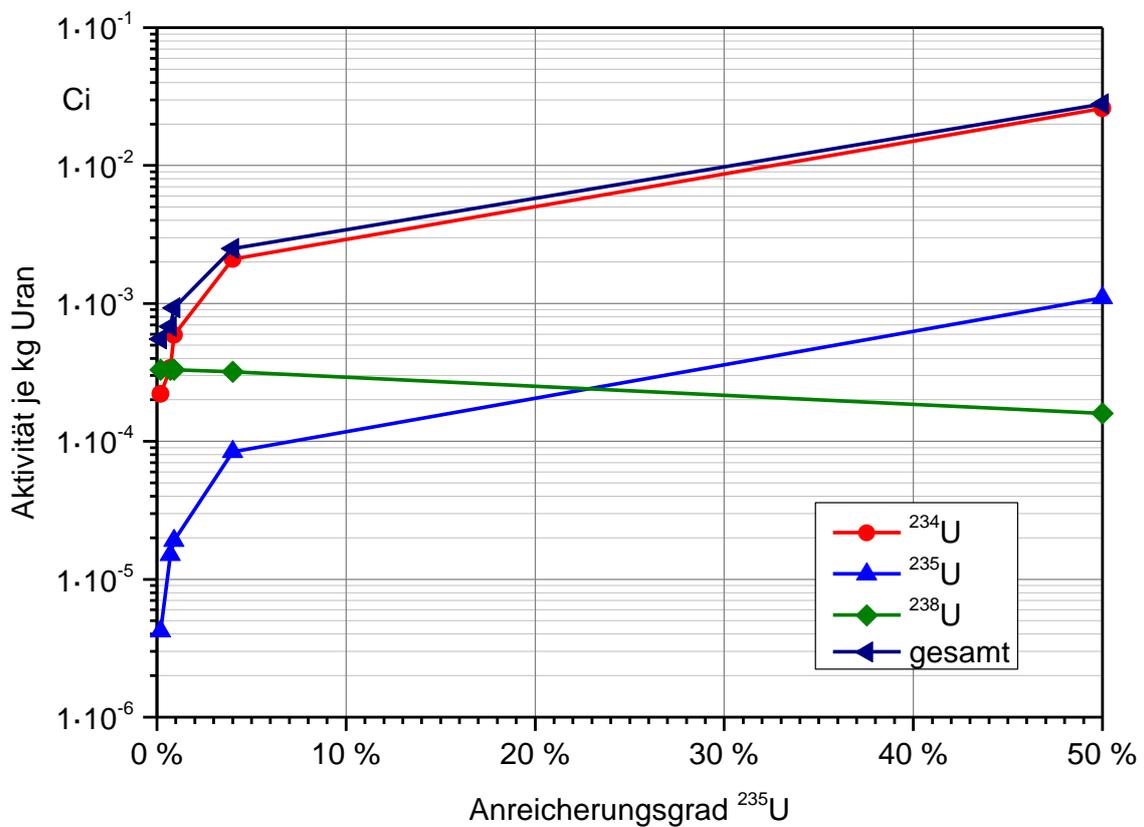
Anreicherungsgrad $^{235}\text{U}$ (%)	Massenanteil			
	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	gesamt
0,2	$3,56 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$9,98 \cdot 10^{-1}$	1,000
0,71	$5,41 \cdot 10^{-5}$	$7,11 \cdot 10^{-3}$	$9,93 \cdot 10^{-1}$	1,000
0,9	$9,48 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$9,91 \cdot 10^{-1}$	1,000
4	$3,34 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$9,60 \cdot 10^{-1}$	1,000
50	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$4,93 \cdot 10^{-1}$	0,997



**Abb. E.4** Massenanteile der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

**Tab. E.6** Aktivität der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

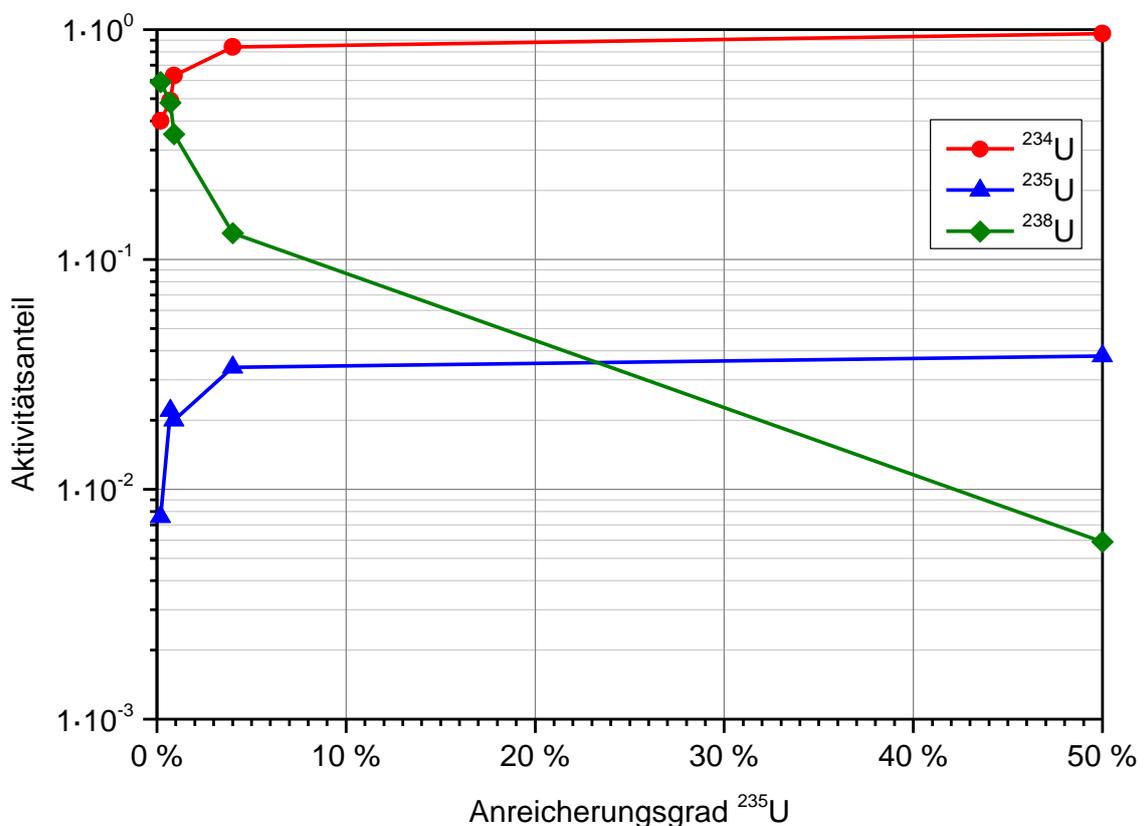
Anreicherungsgrad $^{235}\text{U}$ (%)	Aktivität je 1 kg Uran			
	$^{234}\text{U}$ (Ci)	$^{235}\text{U}$ (Ci)	$^{238}\text{U}$ (Ci)	gesamt (Ci)
0,2	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
0,71	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$
0,9	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$
4	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
50	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$



**Abb. E.5** Aktivität der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

**Tab. E.7** Aktivitätsanteile der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

Anreicherungsgrad $^{235}\text{U}$ (%)	Aktivitätsanteil			
	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	gesamt
0,2	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-1}$	1,00
0,71	$4,9 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$	1,00
0,9	$6,3 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	1,00
4	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	1,00
50	$9,6 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	1,00



**Abb. E.6** Aktivitätsanteile der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  in Urangemischen mit unterschiedlichen Anreicherungsgraden

Diese für ein Urangemisch bestehend aus den Isotopen  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  berechneten Werte stimmen gut mit den Angaben zu Massen- und (teilweise) Aktivitätsanteilen in /IAEA 13/ für abgereichertes Uran und Uran in natürlicher Zusammensetzung überein (siehe Tab. 3.20 auf S. 57). Die Aktivitätsanteile für Uran mit einem Anreicherungsgrad von 0,2 %  $^{235}\text{U}$  weichen stark ab. Dies ist dem Massenanteil von  $^{234}\text{U}$  geschuldet. Wird dessen Anteil von 0,004 % (/LOC 95/) auf 0,001 % (/IAEA 13/) gesenkt – unter

Beibehaltung aller anderen Massenanteile – so ergeben sich folgende Aktivitätsanteile:  $^{234}\text{U}$ :  $1,6 \cdot 10^{-1}$ ,  $^{235}\text{U}$ :  $1,1 \cdot 10^{-2}$  und  $^{238}\text{U}$ :  $8,3 \cdot 10^{-1}$ . Diese Werte stimmen wieder gut mit /IAEA 13/ und den Aktivitätsanteilen in Tab. 3.20 für abgereichertes Uran überein. Dies verdeutlicht, dass aufgrund der sehr hohen spezifischen Aktivität von  $^{234}\text{U}$  im Vergleich zu den anderen Uranisotopen bereits kleine Änderungen in der Zusammensetzung – insbesondere beim Anteil von  $^{234}\text{U}$  – weitreichende Auswirkungen auf die radiologische Betrachtung des Urangemisches haben können. Die Berechnung der Q- und A-Werte im Excel-Programm für abgereichertes Uran erfolgt mit den Aktivitätsanteilen aus /IAEA 13/.

In /IAEA 12/ und /IAEA 08/ werden auch A-Werte für angereichertes Uran mit einem Anteil von  $^{235}\text{U} < 20\%$  angegeben. Im vorliegenden Excel-Programm wurden daher Q-Werte und A-Werte für ein Urangemisch mit einem Anreicherungsgrad von  $20\%$   $^{235}\text{U}$  berechnet. Die Massen- und Aktivitätsanteile in Tab. E.8 und Tab. E.9 wurden aus den Daten von /LOC 95/ durch lineare Interpolation ermittelt.

**Tab. E.8** Interpolierte Massenanteile der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  im Urangemisch mit  $20\%$  Anreicherung

Anreicherungsgrad $^{235}\text{U}$ (%)	Massenanteil			
	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	gesamt
20	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$7,98 \cdot 10^{-1}$	0,999

**Tab. E.9** Interpolierte Aktivitätsanteile der Isotope  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  im Urangemisch mit  $20\%$  Anreicherung

Anreicherungsgrad $^{235}\text{U}$ (%)	Aktivitätsanteil			
	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	gesamt
20	$8,8 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$	1,00

Die Berechnung der Q- und A-Werte für angereichertes Uran ( $20\%$   $^{235}\text{U}$ ) erfolgt mit den Aktivitätsanteilen aus Tab. E.9. Ein Vergleich der berechneten Werte war aufgrund fehlender Angaben für Q- und A-Werte in /IAEA 08/ nicht möglich. Ebenso konnten aufgrund fehlender Angaben in /IAEA 08/ die ermittelten Aktivitätsanteile für angereichertes Uran mit den Isotopen  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  nicht überprüft werden.

## F Vergleich der Dosisleistungskoeffizienten

Nachfolgend werden in Tab. F.1 die im Excel-Programm mit den Nukliddaten der ICRP 38 /ICRP 83/ berechneten Dosisleistungskoeffizienten der Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_D$  mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten verglichen.

**Fett gedruckt** sind Abweichungen von mehr als 10 %. **Fett und blau hervorgehoben** sind Abweichungen um den Faktor 2 und mehr, **fett und dunkelrot** Abweichungen um einen Faktor 5 und mehr, im Vergleich zu den tabellierten Werten. **Gelb hinterlegt** sind Werte, die in /IAEA 08/ vermutlich durch Rückrechnung aus den auf 1000 TBq beschränkten  $Q$ -Werten ermittelt wurden (siehe Abschnitt 3.9), sie sind in /IAEA 08/ zu hoch angegeben; diese Kennzeichnung wurde nur angewandt, wenn die von der GRS berechneten Werte niedriger als die tabellierten waren.

Davon abweichend sind Werte **Fett und rot hinterlegt**, die in /IAEA 08/ vermutlich durch Rückrechnung aus den für den Pfad  $Q_A$  gesetzten Werten für Neutronenstrahler ermittelt wurden (siehe Abschnitt 2.4.1), diese wären keine „wirklichen“ Dosisleistungsfaktoren für Photonenstrahlung. Die Berechnung der GRS gibt dagegen den Dosisleistungskoeffizienten für Photonenstrahlung gemäß den Rechenvorschriften des  $Q$ -Systems an.

**Tab. F.1** Vergleich der berechneten Dosisleistungskoeffizienten mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>-2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Ac-225	10 d	2,1E-14	2,0E-14	1,3E-12	1,2E-12	9,7E-02	9,3E-02
Ac-227	21,773 a	9,9E-17	9,6E-17	<b>8,6E-15</b>	<b>7,7E-15</b>	8,0E-04	7,6E-04
Ac-228	6,13 h	8,9E-14	8,3E-14	1,9E-12	1,8E-12	5,7E-02	5,3E-02
Ag-105	41 d	4,9E-14	5,0E-14	<b>1,5E-16</b>	<b>1,0E-15</b>	1,1E-03	1,1E-03
Ag-108m	127 a	1,5E-13	1,5E-13	1,8E-13	1,7E-13	5,0E-03	4,7E-03
Ag-110m	249,9 d	2,5E-13	2,4E-13	<b>5,9E-14</b>	<b>5,3E-14</b>	1,4E-02	1,4E-02
Ag-111	7,45 d	2,4E-15	2,4E-15	5,7E-13	5,3E-13	4,7E-02	4,5E-02
Al-26	7,16E+05 a	2,4E-13	2,3E-13	<b>7,8E-13</b>	<b>7,1E-12</b>	<b>3,4E-02</b>	<b>3,9E-02</b>
Am-241	432,2 a	3,4E-15	3,3E-15	<b>6,2E-19</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>8,5E-05</b>	<b>7,4E-05</b>
Am-242m	152 a	2,5E-15	2,5E-15	<b>2,2E-14</b>	<b>2,0E-14</b>	<b>2,8E-02</b>	<b>3,3E-02</b>
Am-243	7,38E+03 a	2,0E-14	2,0E-14	<b>4,8E-15</b>	<b>3,8E-15</b>	7,0E-02	6,8E-02
Ar-37	35,02 d	<b>2,4E-28</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>

Nuklid	Halbwertszeit		$\dot{e}_{pt}$		$\dot{e}_{\beta}$		$\dot{h}_{Haut}$	
			(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Ar-39	269 a		0,0E+00	–	<b>1,6E-14</b>	<b>1,4E-14</b>	<b>4,5E-02</b>	–
Ar-41	1,827 h		1,1E-13	1,1E-13	3,4E-12	3,2E-12	<b>5,0E-02</b>	–
As-72	26 h		1,7E-13	1,6E-13	3,7E-12	3,6E-12	4,4E-02	4,2E-02
As-73	80,3 d		1,1E-15	1,1E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
As-74	17,76 d		7,1E-14	7,1E-14	6,2E-13	5,9E-13	<b>2,0E-02</b>	<b>2,9E-02</b>
As-76	26,32 h		4,0E-14	4,0E-14	4,1E-12	4,0E-12	<b>5,5E-02</b>	<b>4,7E-02</b>
As-77	38,8 h		7,9E-16	7,7E-16	6,1E-14	5,6E-14	4,4E-02	4,2E-02
At-211	7,214 h		3,9E-15	4,0E-15	<b>6,4E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>8,1E-05</b>	<b>6,3E-05</b>
Au-193	17,65 h		1,5E-14	1,4E-14	<b>2,3E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	1,6E-02	1,5E-02
Au-194	39,5 h		9,5E-14	9,1E-14	<b>4,6E-15</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>3,9E-03</b>	<b>4,6E-03</b>
Au-195	183 d		7,8E-15	7,7E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	5,5E-03	5,0E-03
Au-198	2,696 d		3,8E-14	3,8E-14	9,5E-13	9,1E-13	4,8E-02	4,6E-02
Au-199	3,139 d		7,5E-15	7,1E-15	<b>3,9E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	4,5E-02	4,4E-02
Ba-131	11,8 d		<b>4,7E-14</b>	<b>6,3E-14</b>	<b>2,9E-16</b>	<b>1,0E-15</b>	1,3E-02	1,3E-02
Ba-133	10,74 a		3,9E-14	3,8E-14	<b>3,1E-19</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>3,1E-03</b>	<b>2,7E-03</b>
Ba-133m	38,9 h		6,8E-15	6,7E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	4,6E-02	4,5E-02
Ba-140	12,74 d		<b>2,2E-13</b>	<b>1,6E-13</b>	<b>3,3E-12</b>	<b>2,2E-12</b>	9,6E-02	9,0E-02
Be-7	53,3 d		4,6E-15	4,8E-15	<b>4,1E-21</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>4,1E-09</b>	<b>2,8E-05</b>
Be-10	1,60E+06 a		0,0E+00	–	<b>2,0E-14</b>	<b>1,7E-14</b>	4,9E-02	4,8E-02
Bi-205	15,31 d		1,5E-13	1,4E-13	<b>7,9E-15</b>	<b>1,0E-15</b>	2,6E-03	2,5E-03
Bi-206	6,243 d		3,0E-13	2,9E-13	<b>1,4E-14</b>	<b>1,0E-15</b>	2,5E-02	2,4E-02
Bi-207	38 a		1,4E-13	1,4E-13	<b>7,2E-14</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>6,3E-03</b>	<b>5,5E-03</b>
Bi-210	5,012 d		0,0E+00	–	8,2E-13	7,7E-13	4,7E-02	4,5E-02
Bi-210m	3,00E+06 a		2,3E-14	2,3E-14	1,7E-12	1,6E-12	6,1E-02	5,7E-02
Bi-212	60,55 min		<b>1,2E-13</b>	<b>1,0E-13</b>	<b>2,0E-12</b>	<b>1,5E-12</b>	<b>4,1E-02</b>	<b>4,8E-02</b>
Bk-247	1,38E+03 a		9,2E-15	9,1E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	2,0E-02	2,0E-02
Bk-249	320 d		<b>4,9E-20</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>3,3E-18</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>3,2E-03</b>	<b>2,3E-03</b>
Br-76	16,2 h		2,3E-13	2,3E-13	1,7E-12	1,6E-12	<b>1,9E-02</b>	<b>2,8E-02</b>
Br-77	56 h		2,9E-14	2,9E-14	<b>5,9E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>8,9E-04</b>	<b>1,2E-03</b>
Br-82	35,3 h		2,4E-13	2,4E-13	1,0E-15	1,0E-15	3,8E-02	3,6E-02
C-11	20,38 min		9,6E-14	1,0E-13	5,3E-13	5,0E-13	5,0E-02	4,8E-02
C-14	5,73E+03 a		0,0E+00	–	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>1,0E-02</b>	<b>8,8E-03</b>
Ca-41	1,40E+05 a		<b>2,0E-22</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	0,0E+00	–
Ca-45	163 d		<b>2,3E-21</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	2,5E-02	2,3E-02
Ca-47	4,53 d		<b>1,0E-13</b>	<b>3,7E-14</b>	<b>1,4E-12</b>	<b>2,7E-14</b>	8,8E-02	8,4E-02
Cd-109	464 d		3,5E-15	3,4E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>1,6E-02</b>	<b>1,4E-02</b>
Cd-113m	13,6 a		0,0E+00	–	<b>1,3E-14</b>	<b>1,1E-14</b>	4,2E-02	4,0E-02

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
		Cd-115	53,46 h	<b>3,7E-14</b>	<b>2,6E-14</b>	<b>5,0E-13</b>	<b>3,0E-13</b>
Cd-115m	44,6 d	2,0E-15	2,0E-15	2,0E-12	1,9E-12	5,0E-02	4,6E-02
Ce-139	137,66 d	1,5E-14	1,5E-14	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	1,3E-02	1,3E-02
Ce-141	32,501 d	6,6E-15	6,3E-15	<b>3,9E-15</b>	<b>3,1E-15</b>	4,9E-02	4,8E-02
Ce-143	33 h	2,7E-14	2,7E-14	1,2E-12	1,1E-12	4,9E-02	4,6E-02
Ce-144	284,3 d	4,7E-15	4,5E-15	4,2E-12	4,0E-12	<b>8,4E-02</b>	<b>7,3E-02</b>
Cf-248	333,5 d	1,5E-16	1,5E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Cf-249	350,6 a	3,1E-14	3,1E-14	<b>1,3E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	6,2E-03	6,1E-03
Cf-250	13,08 a	1,5E-16	1,5E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Cf-251	898 a	1,2E-14	1,1E-14	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	5,5E-02	5,4E-02
Cf-252	2,638 a	<b>1,4E-16</b>	<b>7,5E-13</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>6,1E-05</b>	<b>5,4E-05</b>
Cf-253	17,81 d	8,2E-18	8,1E-18	<b>7,8E-16</b>	<b>1,0E-15</b>	2,5E-02	2,3E-02
Cf-254	60,5 d	<b>4,8E-19</b>	<b>7,1E-11</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Cl-36	3,01E+05 a	<b>1,4E-17</b>	<b>1,0E-16</b>	1,1E-13	1,0E-13	4,5E-02	4,4E-02
Cl-38	37,21 min	1,3E-13	1,2E-13	<b>5,5E-12</b>	<b>4,5E-12</b>	<b>6,1E-02</b>	<b>5,0E-02</b>
Cm-240	27 d	2,2E-16	2,2E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Cm-241	32,8 d	4,6E-14	4,5E-14	<b>1,3E-15</b>	<b>1,0E-15</b>	2,0E-02	1,9E-02
Cm-242	162,8 d	2,0E-16	2,0E-16	<b>1,7E-19</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>1,3E-05</b>	<b>2,8E-05</b>
Cm-243	28,5 a	1,2E-14	1,2E-14	<b>2,2E-26</b>	<b>1,0E-15</b>	3,4E-02	3,4E-02
Cm-244	18,11 a	1,9E-16	1,9E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Cm-245	8,50E+03 a	8,2E-15	7,9E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	1,0E-02	1,0E-02
Cm-246	4,73E+03 a	1,7E-16	1,7E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Cm-247	1,56E+07 a	3,2E-14	3,1E-14	<b>7,3E-15</b>	<b>6,3E-15</b>	<b>4,2E-02</b>	–
Cm-248	3,39E+05 a	<b>1,3E-16</b>	<b>5,6E-12</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	0,0E+00	–
Co-55	17,54 h	1,8E-13	1,9E-13	1,1E-12	1,0E-12	<b>3,0E-02</b>	<b>3,6E-02</b>
Co-56	78,76 d	3,1E-13	3,0E-13	7,2E-14	6,7E-14	<b>2,1E-03</b>	<b>9,5E-03</b>
Co-57	270,9 d	1,0E-14	1,0E-14	<b>1,8E-19</b>	<b>1,0E-15</b>	2,1E-03	2,1E-03
Co-58	70,8 d	9,1E-14	9,1E-14	<b>2,0E-15</b>	<b>1,3E-15</b>	<b>1,2E-03</b>	<b>7,4E-03</b>
Co-58m	9,15 h	<b>7,6E-17</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Co-60	5,271 a	2,2E-13	2,2E-13	<b>1,8E-15</b>	<b>1,4E-15</b>	3,0E-02	2,9E-02
Cr-51	27,704 d	2,9E-15	2,9E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>8,7E-06</b>	<b>2,8E-05</b>
Cs-129	32,06 h	2,8E-14	2,8E-14	<b>4,4E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	7,7E-04	7,4E-04
Cs-131	9,69 d	3,2E-15	3,2E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Cs-132	6,475 d	6,7E-14	6,7E-14	9,7E-16	1,0E-15	<b>2,4E-04</b>	<b>1,1E-03</b>
Cs-134	2,062 a	1,5E-13	1,4E-13	<b>3,1E-13</b>	<b>2,8E-13</b>	3,2E-02	3,0E-02
Cs-134m	2,9 h	2,7E-15	2,7E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	4,5E-02	4,4E-02
Cs-135	2,30E+06 a	0,0E+00	–	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>2,1E-02</b>	<b>1,9E-02</b>

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>-2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
		Cs-136	13,1 d	2,0E-13	2,0E-13	<b>3,8E-15</b>	<b>1,2E-15</b>
Cs-137	30 a	5,3E-14	5,6E-14	<b>1,6E-13</b>	<b>1,2E-13</b>	4,6E-02	4,4E-02
Cu-64	12,701 h	1,8E-14	1,8E-14	<b>1,1E-14</b>	<b>9,1E-15</b>	<b>1,4E-02</b>	<b>2,4E-02</b>
Cu-67	61,86 h	9,8E-15	1,0E-14	<b>3,0E-15</b>	<b>2,4E-15</b>	4,2E-02	4,0E-02
Dy-159	144,4 d	5,1E-15	5,0E-15	<b>2,5E-25</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>9,8E-08</b>	<b>2,8E-05</b>
Dy-165	2,334 h	2,5E-15	2,4E-15	1,1E-12	1,1E-12	4,9E-02	4,6E-02
Dy-166	81,6 h	<b>6,7E-15</b>	<b>2,9E-15</b>	<b>2,4E-12</b>	<b>1,2E-12</b>	8,8E-02	8,1E-02
Er-169	9,3 d	<b>4,5E-19</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>3,8E-20</b>	<b>1,0E-15</b>	3,1E-02	2,9E-02
Er-171	7,52 h	3,5E-14	3,4E-14	1,3E-12	1,2E-12	5,8E-02	5,5E-02
Eu-147	24 d	4,6E-14	4,5E-14	<b>8,2E-16</b>	<b>1,0E-15</b>	7,8E-03	7,4E-03
Eu-148	54,5 d	2,0E-13	2,0E-13	<b>3,2E-15</b>	<b>1,0E-15</b>	1,5E-03	1,4E-03
Eu-149	93,1 d	6,7E-15	6,7E-15	<b>7,2E-18</b>	<b>1,0E-15</b>	3,8E-04	3,8E-04
Eu-150	34,2 a	1,4E-13	1,4E-13	<b>8,3E-15</b>	<b>1,0E-15</b>	4,2E-03	3,9E-03
Eu-150m	12,62 h	4,4E-15	4,3E-15	<b>7,4E-13</b>	<b>6,7E-13</b>	3,8E-02	4,0E-02
Eu-152	13,33 a	1,1E-13	1,0E-13	<b>1,1E-14</b>	<b>5,9E-15</b>	<b>1,4E-02</b>	<b>2,1E-02</b>
Eu-152m	9,32 h	2,7E-14	2,7E-14	1,3E-12	1,2E-12	<b>2,9E-02</b>	<b>3,6E-02</b>
Eu-154	8,8 a	1,1E-13	1,1E-13	<b>7,0E-13</b>	<b>6,3E-13</b>	5,3E-02	5,0E-02
Eu-155	4,96 a	5,5E-15	5,3E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>1,0E-02</b>	<b>8,7E-03</b>
Eu-156	15,19 d	1,2E-13	1,1E-13	1,5E-12	1,4E-12	4,6E-02	4,2E-02
F-18	109,77 min	9,6E-14	1,0E-13	<b>4,1E-14</b>	<b>3,6E-14</b>	4,9E-02	4,8E-02
Fe-52	8,275 h	<b>2,9E-13</b>	<b>2,4E-13</b>	<b>3,8E-12</b>	<b>3,1E-12</b>	6,9E-02	7,4E-02
Fe-55	2,7 a	<b>3,3E-17</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Fe-59	44,529 d	1,1E-13	1,1E-13	<b>3,2E-14</b>	<b>2,3E-14</b>	3,3E-02	3,1E-02
Fe-60	1,00E+05 a	5,1E-16	5,0E-16	<b>1,2E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>9,4E-03</b>	<b>7,6E-03</b>
Ga-67	78,26 h	1,4E-14	1,4E-14	<b>5,4E-19</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>9,9E-03</b>	<b>8,6E-03</b>
Ga-68	68 min	8,9E-14	9,1E-14	2,3E-12	2,2E-12	4,2E-02	4,2E-02
Ga-72	14,1 h	2,4E-13	2,3E-13	2,9E-12	2,7E-12	4,8E-02	4,5E-02
Gd-146	48,3 d	<b>2,5E-13</b>	<b>1,9E-13</b>	<b>8,4E-15</b>	<b>3,4E-15</b>	2,6E-02	2,7E-02
Gd-148	93 a	0,0E+00		0,0E+00		0,0E+00	
Gd-153	242 d	1,1E-14	1,1E-14	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	3,3E-03	3,1E-03
Gd-159	18,56 h	4,8E-15	4,8E-15	3,5E-13	3,2E-13	4,6E-02	4,4E-02
Ge-68	288 d	8,9E-14	9,1E-14	2,3E-12	2,2E-12	4,2E-02	4,2E-02
Ge-71	11,8 d	1,9E-16	1,9E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>
Ge-77	11,3 h	9,8E-14	9,1E-14	3,2E-12	3,0E-12	<b>5,1E-02</b>	<b>4,6E-02</b>
H-3	12,35 a	0,0E+00	–	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	0,0E+00	–
Hf-172	1,87 a	1,8E-13	1,7E-13	<b>7,4E-15</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>1,9E-02</b>	<b>1,6E-02</b>
Hf-175	70 d	3,4E-14	3,4E-14	<b>4,9E-18</b>	<b>1,0E-15</b>	6,2E-03	5,9E-03

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
		Hf-181	42,4 d	5,1E-14	5,3E-14	4,5E-16	1,0E-15
Hf-182	9,00E+06 a	2,1E-14	2,2E-14	0,0E+00	1,0E-15	2,0E-02	–
Hg-194	260 a	9,5E-14	9,1E-14	4,6E-15	1,0E-15	3,9E-03	4,6E-03
Hg-195m	41,6 h	3,0E-14	3,2E-14	1,1E-15	1,0E-15	3,8E-02	3,8E-02
Hg-197	64,1 h	6,4E-15	6,3E-15	0,0E+00	1,0E-15	2,5E-03	1,8E-03
Hg-197m	23,8 h	8,1E-15	7,7E-15	4,4E-19	1,0E-15	8,0E-02	7,9E-02
Hg-203	46,6 d	2,1E-14	2,2E-14	6,5E-20	1,0E-15	2,7E-02	2,5E-02
Ho-166	26,8 h	2,7E-15	2,6E-15	2,4E-12	2,3E-12	5,3E-02	4,8E-02
Ho-166m	1,20E+03 a	1,6E-13	1,6E-13	2,4E-15	1,0E-15	2,4E-02	2,2E-02
I-123	13,2 h	1,6E-14	1,6E-14	1,4E-17	1,0E-15	9,5E-03	9,5E-03
I-124	4,18 d	1,0E-13	9,1E-14	1,8E-13	1,7E-13	2,9E-03	1,1E-02
I-125	60,14 d	6,0E-15	6,3E-15	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
I-126	13,02 d	4,3E-14	4,3E-14	1,7E-13	1,6E-13	1,0E-02	2,1E-02
I-129	1,57E+07 a	3,4E-15	3,4E-15	0,0E+00	1,0E-15	1,1E-02	–
I-131	8,04 d	3,5E-14	3,6E-14	5,7E-14	5,0E-14	4,2E-02	4,0E-02
I-132	2,3 h	2,1E-13	2,1E-13	2,5E-12	2,3E-12	4,9E-02	4,6E-02
I-133	20,8 h	5,7E-14	5,6E-14	1,5E-12	1,4E-12	4,8E-02	4,5E-02
I-134	52,6 min	2,4E-13	2,4E-13	3,4E-12	3,1E-12	5,2E-02	4,7E-02
I-135	6,61 h	1,5E-13	1,2E-13	2,1E-12	1,6E-12	4,8E-02	4,5E-02
In-111	2,83 d	3,6E-14	3,6E-14	0,0E+00	1,0E-15	9,3E-03	9,3E-03
In-113m	1,658 h	2,4E-14	2,4E-14	1,6E-16	1,0E-15	1,8E-02	1,7E-02
In-114m	49,51 d	9,3E-15	9,1E-15	1,1E-16	1,0E-15	5,0E-02	5,8E-02
In-115m	4,486 h	1,5E-14	1,5E-14	5,1E-16	1,0E-15	2,6E-02	2,7E-02
Ir-189	13,3 d	7,6E-15	7,7E-15	7,5E-21	1,0E-15	1,7E-03	1,6E-03
Ir-190	12,1 d	1,3E-13	1,3E-13	2,0E-15	1,0E-15	3,8E-02	3,7E-02
Ir-192	74,02 d	7,5E-14	7,7E-14	2,5E-14	2,2E-14	4,5E-02	4,5E-02
Ir-194	19,15 h	8,2E-15	8,3E-15	3,2E-12	3,0E-12	5,3E-02	4,7E-02
K-40	1,28E+09 a	1,4E-14	1,4E-14	1,1E-12	1,1E-12	4,0E-02	–
K-42	12,36 h	2,4E-14	2,4E-14	4,8E-12	4,5E-12	5,9E-02	4,9E-02
K-43	22,6 h	9,0E-14	9,1E-14	1,5E-12	1,4E-12	4,7E-02	4,5E-02
Kr-81	2,10E+05 a	9,0E-16	9,1E-16	0,0E+00	1,0E-15	8,8E-06	–
Kr-85	10,72 a	2,1E-16	2,1E-16	7,9E-14	7,1E-14	4,5E-02	–
Kr-85m	4,48 h	1,3E-14	1,3E-14	1,4E-13	1,3E-13	3,5E-02	–
Kr-87	76,3 min	6,8E-14	6,7E-14	4,9E-12	4,8E-12	5,8E-02	–
La-137	6,00E+04 a	3,3E-15	3,3E-15	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
La-140	40,272 h	2,1E-13	2,0E-13	2,9E-12	2,7E-12	5,1E-02	4,7E-02
Lu-172	6,7 d	1,7E-13	1,7E-13	7,4E-15	1,0E-15	1,5E-02	1,3E-02

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$		$\dot{e}_{\beta}$		$\dot{h}_{Haut}$	
		(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Lu-173	1,37 a	1,3E-14	1,3E-14	2,6E-17	1,0E-15	1,8E-03	1,6E-03
Lu-174	3,31 a	1,2E-14	1,2E-14	6,7E-17	1,0E-15	1,4E-03	9,6E-04
Lu-174m	142 d	6,3E-15	6,3E-15	1,7E-17	1,0E-15	7,7E-04	7,5E-04
Lu-177	6,71 d	3,0E-15	3,0E-15	1,1E-15	1,0E-15	4,0E-02	3,8E-02
Mg-28	20,91 h	2,8E-13	2,7E-13	4,2E-12	4,0E-12	9,7E-02	8,7E-02
Mn-52	5,591 d	3,1E-13	3,1E-13	1,9E-15	1,4E-15	4,5E-03	1,5E-02
Mn-53	3,70E+06 a	1,5E-17	1,0E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	–
Mn-54	312,5 d	7,8E-14	7,7E-14	1,1E-16	1,0E-15	1,3E-05	2,8E-05
Mn-56	2,5785 h	1,5E-13	1,5E-13	3,5E-12	3,3E-12	5,2E-02	4,7E-02
Mo-93	3,50E+03 a	1,2E-15	1,2E-15	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
Mo-99	66 h	2,3E-14	1,6E-14	8,6E-13	8,0E-13	5,3E-02	5,1E-02
N-13	9,965 min	9,6E-14	1,0E-13	1,2E-12	1,1E-12	5,1E-02	4,8E-02
Na-22	2,602 a	2,0E-13	2,0E-13	3,2E-13	2,6E-13	3,9E-02	4,2E-02
Na-24	15 h	3,4E-13	3,3E-13	5,6E-12	5,0E-12	5,1E-02	4,7E-02
Nb-93m	13,6 a	2,1E-16	2,0E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
Nb-94	2,03E+04 a	1,5E-13	1,5E-13	2,1E-15	1,0E-15	4,1E-02	4,0E-02
Nb-95	35,15 d	7,1E-14	7,1E-14	5,1E-16	1,0E-15	8,4E-03	7,0E-03
Nb-97	72,1 min	6,1E-14	6,3E-14	1,2E-12	1,1E-12	4,9E-02	4,6E-02
Nd-147	10,98 d	1,3E-14	1,4E-14	1,9E-13	1,8E-13	4,5E-02	4,3E-02
Nd-149	1,73 h	3,5E-14	3,4E-14	1,7E-12	1,6E-12	5,8E-02	5,4E-02
Ni-59	7,50E+04 a	8,9E-17	1,0E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	–
Ni-63	96 a	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	5,0E-07	2,8E-05
Ni-65	2,52 h	4,9E-14	4,8E-14	2,4E-12	2,3E-12	5,0E-02	4,6E-02
Np-235	396,1 d	7,3E-16	7,1E-16	0,0E+00	1,0E-15	2,8E-05	2,8E-05
Np-236	1,15E+05 a	1,2E-14	1,1E-14	1,6E-21	1,0E-15	5,5E-02	5,6E-02
Np-236m	22,5 h	4,4E-15	4,3E-15	1,1E-15	1,0E-15	9,2E-03	1,9E-02
Np-237	2,14E+06 a	3,3E-15	3,3E-15	0,0E+00	1,0E-15	3,0E-03	–
Np-239	2,355 d	1,5E-14	1,5E-14	4,8E-15	3,8E-15	7,0E-02	6,7E-02
Os-185	94 d	6,7E-14	6,7E-14	2,4E-15	1,0E-15	1,3E-03	1,2E-03
Os-191	15,4 d	7,1E-15	6,7E-15	0,0E+00	1,0E-15	1,3E-02	1,2E-02
Os-191m	13,03 h	8,0E-16	7,7E-16	0,0E+00	1,0E-15	1,7E-03	1,0E-03
Os-193	30 h	6,7E-15	6,7E-15	6,7E-13	6,3E-13	5,0E-02	4,7E-02
Os-194	6 a	8,4E-15	8,3E-15	3,2E-12	3,2E-12	5,3E-02	4,7E-02
P-32	14,29 d	0,0E+00	–	2,4E-12	2,2E-12	5,2E-02	4,7E-02
P-33	25,4 d	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	2,4E-02	2,3E-02
Pa-230	17,4 d	6,0E-14	6,0E-14	1,8E-15	1,0E-15	3,1E-03	1,3E-02
Pa-231	3,28E+04 a	4,5E-15	1,1E-14	1,4E-19	1,0E-15	1,6E-03	1,5E-03

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
		Pa-233	27 d	1,8E-14	1,9E-14	4,2E-16	1,0E-15
Pb-201	9,4 h	7,0E-14	6,7E-14	2,9E-15	1,0E-15	8,7E-03	8,4E-03
Pb-202	3,00E+05 a	1,1E-16	1,1E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	1,7E-03
Pb-203	52,05 h	2,8E-14	2,8E-14	2,1E-17	1,0E-15	1,1E-02	1,1E-02
Pb-205	1,43E+07 a	1,2E-16	1,2E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	–
Pb-210	22,3 a	4,2E-16	4,2E-16	8,2E-13	7,7E-13	4,7E-02	4,5E-02
Pb-212	10,64 h	1,3E-13	1,0E-13	2,0E-12	1,4E-12	9,6E-02	1,0E-01
Pd-103	16,96 d	2,1E-15	2,1E-15	1,0E-20	1,0E-15	2,2E-07	2,8E-05
Pd-107	6,50E+06 a	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	–
Pd-109	13,427 h	1,4E-15	1,4E-15	5,7E-13	5,3E-13	6,4E-02	5,9E-02
Pm-143	265 d	3,0E-14	3,0E-14	5,0E-16	1,0E-15	8,6E-05	7,7E-05
Pm-144	363 d	1,5E-13	1,5E-13	2,4E-15	1,0E-15	8,9E-04	8,2E-04
Pm-145	17,7 a	3,9E-15	3,8E-15	0,0E+00	1,0E-15	2,9E-05	2,8E-05
Pm-147	2,6234 a	3,9E-19	1,0E-16	0,0E+00	1,0E-15	1,8E-02	1,6E-02
Pm-148m	41,3 d	1,9E-13	1,2E-13	2,1E-13	1,3E-13	3,9E-02	3,9E-02
Pm-149	53,08 h	9,7E-16	1,0E-15	6,4E-13	5,9E-13	4,7E-02	4,5E-02
Pm-151	28,4 h	3,0E-14	3,0E-14	5,7E-13	5,6E-13	4,8E-02	4,5E-02
Po-210	138,38 d	7,9E-19	7,9E-19	3,7E-20	1,0E-15	5,7E-09	2,8E-05
Pr-142	19,13 h	5,1E-15	5,0E-15	2,9E-12	2,8E-12	5,2E-02	4,6E-02
Pr-143	13,56 d	8,3E-22	1,0E-16	3,6E-13	3,3E-13	4,6E-02	4,4E-02
Pt-188	10,2 d	1,6E-13	1,0E-13	1,0E-14	1,0E-15	3,6E-02	3,6E-02
Pt-191	2,8 d	2,8E-14	2,8E-14	5,2E-16	1,0E-15	8,5E-03	7,9E-03
Pt-193	50 a	1,2E-16	1,1E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
Pt-193m	4,33 d	1,1E-15	1,1E-15	0,0E+00	1,0E-15	5,1E-02	5,1E-02
Pt-195m	4,02 d	6,9E-15	6,7E-15	0,0E+00	1,0E-15	5,8E-02	5,7E-02
Pt-197	18,3 h	2,2E-15	2,1E-15	4,7E-14	4,2E-14	4,6E-02	4,4E-02
Pt-197m	94,4 min	7,6E-15	7,7E-15	7,2E-17	1,0E-15	4,8E-02	4,8E-02
Pu-236	2,851 a	2,2E-16	2,2E-16	4,2E-19	1,0E-15	4,5E-05	4,3E-05
Pu-237	45,3 d	4,6E-15	4,3E-15	3,4E-23	1,0E-15	2,6E-04	2,3E-04
Pu-238	87,74 a	1,9E-16	1,9E-16	2,4E-19	1,0E-15	2,9E-05	2,8E-05
Pu-239	2,41E+04 a	7,6E-17	7,5E-17	1,7E-20	1,0E-15	1,2E-05	–
Pu-240	6,54E+03 a	1,8E-16	1,8E-16	2,2E-22	1,0E-15	2,8E-05	–
Pu-241	14,4 a	5,4E-19	1,0E-16	2,9E-25	1,0E-15	1,6E-06	2,8E-05
Pu-242	3,76E+05 a	1,5E-16	1,5E-16	0,0E+00	1,0E-15	3,1E-05	–
Pu-244	8,26E+07 a	3,2E-14	3,2E-14	2,8E-12	2,6E-12	8,2E-02	–
Ra-223	11,434 d	2,6E-14	2,6E-14	2,7E-12	2,5E-12	1,2E-01	1,1E-01
Ra-224	3,66 d	1,3E-13	9,1E-14	2,0E-12	2,3E-12	9,7E-02	1,0E-01

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>-2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
		Ra-225	14,8 d	2,2E-14	8,3E-15	1,3E-12	4,5E-12
Ra-226	1,60E+03 a	1,6E-13	1,5E-13	4,3E-12	4,0E-12	1,1E-01	1,0E-01
Ra-228	5,75 a	8,9E-14	8,3E-14	1,9E-12	1,8E-12	5,7E-02	5,3E-02
Rb-81	4,58 h	5,7E-14	5,9E-14	7,3E-14	6,7E-14	2,4E-02	3,4E-02
Rb-83	86,2 d	4,7E-14	4,8E-14	1,2E-16	1,0E-15	6,9E-05	6,4E-05
Rb-84	32,77 d	8,5E-14	8,3E-14	2,7E-14	2,5E-14	3,3E-03	1,2E-02
Rb-86	18,66 d	8,6E-15	8,3E-15	2,2E-12	2,1E-12	5,1E-02	4,6E-02
Rb-87	4,70E+10 a	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	3,8E-02	–
Rb-nat	4,70E+10 a	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	3,8E-02	–
Re-184	38 d	8,3E-14	8,3E-14	2,5E-15	1,0E-15	1,7E-02	1,6E-02
Re-184m	165 d	3,6E-14	3,6E-14	5,3E-16	1,0E-15	2,5E-02	2,2E-02
Re-186	90,64 h	1,8E-15	1,7E-15	5,4E-13	5,0E-13	4,7E-02	4,7E-02
Re-187	5,00E+10 a	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	–
Re-188	16,98 h	5,1E-15	5,0E-15	3,0E-12	2,9E-12	5,8E-02	5,2E-02
Re-189	24,3 h	6,1E-15	3,1E-15	4,4E-13	4,0E-13	5,1E-02	4,9E-02
Re-nat	5,00E+10 a	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	–
Rh-99	16 d	5,6E-14	5,6E-14	9,1E-16	1,0E-15	1,8E-03	3,7E-03
Rh-101	3,2 a	2,4E-14	2,3E-14	2,0E-19	1,0E-15	1,1E-02	1,1E-02
Rh-102	2,9 a	2,0E-13	2,0E-13	1,4E-15	1,0E-15	5,5E-04	5,1E-04
Rh-102m	207 d	4,6E-14	4,5E-14	1,2E-13	1,1E-13	5,6E-03	1,5E-02
Rh-103m	56,12 min	2,2E-16	2,2E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
Rh-105	35,36 h	7,1E-15	7,1E-15	6,7E-15	5,6E-15	3,7E-02	3,5E-02
Rn-222	3,8235 d	1,6E-13	1,5E-13	4,3E-12	3,8E-12	1,1E-01	–
Ru-97	2,9 d	2,1E-14	2,1E-14	5,3E-18	1,0E-15	2,1E-03	2,1E-03
Ru-103	39,28 d	4,4E-14	4,5E-14	5,7E-15	5,0E-15	1,9E-02	1,8E-02
Ru-105	4,44 h	7,3E-14	7,1E-14	8,9E-13	8,3E-13	4,8E-02	4,5E-02
Ru-106	368,2 d	1,9E-14	1,9E-14	4,8E-12	4,5E-12	5,9E-02	4,9E-02
S-35	87,44 d	0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	1,1E-02	9,4E-03
Sb-122	2,7 d	4,1E-14	4,2E-14	2,5E-12	2,3E-12	4,8E-02	4,5E-02
Sb-124	60,2 d	1,6E-13	1,6E-13	1,5E-12	1,4E-12	4,3E-02	4,0E-02
Sb-125	2,77 a	4,1E-14	4,2E-14	4,8E-15	4,0E-15	2,2E-02	2,1E-02
Sb-126	12,4 d	2,6E-13	2,6E-13	8,4E-13	7,7E-13	4,1E-02	3,9E-02
Sc-44	3,927 h	2,0E-13	2,0E-13	1,7E-12	1,6E-12	4,6E-02	4,5E-02
Sc-46	83,83 d	1,8E-13	1,9E-13	4,6E-16	1,0E-15	3,4E-02	3,3E-02
Sc-47	3,351 d	9,0E-15	9,1E-15	7,1E-15	5,9E-15	4,1E-02	3,9E-02
Sc-48	43,7 h	3,0E-13	3,0E-13	1,2E-12	1,1E-12	4,5E-02	4,3E-02
Se-75	119,8 d	3,4E-14	3,4E-14	3,8E-19	1,0E-15	2,9E-03	2,8E-03

Nuklid	Halbwertszeit		$\dot{e}_{pt}$		$\dot{e}_{\beta}$		$\dot{h}_{Haut}$	
			(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		(Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		(Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Se-79	6,50E+04 a		0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	1,4E-02	1,2E-02
Si-31	157,3 min		8,0E-17	1,0E-16	1,8E-12	1,7E-12	5,1E-02	4,7E-02
Si-32	450 a		0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	1,9E-02	1,7E-02
Sm-145	340 d		7,9E-15	7,7E-15	1,8E-20	1,0E-15	9,0E-07	2,8E-05
Sm-147	1,06E+11 a		0,0E+00		0,0E+00		0,0E+00	
Sm-151	90 a		1,1E-18	1,0E-16	0,0E+00	1,0E-15	2,2E-05	2,8E-05
Sm-153	46,7 h		6,1E-15	5,9E-15	1,2E-13	1,1E-13	4,7E-02	4,5E-02
Sn-113	115,1 d		2,7E-14	2,7E-14	1,6E-16	1,0E-15	1,8E-02	1,7E-02
Sn-117m	13,61 d		1,4E-14	1,4E-14	0,0E+00	1,0E-15	7,0E-02	7,0E-02
Sn-119m	293 d		1,6E-15	1,6E-15	0,0E+00	1,0E-15	1,3E-04	2,8E-05
Sn-121m	55 a		6,9E-16	7,0E-16	2,2E-18	1,0E-15	2,8E-02	3,3E-02
Sn-123	129,2 d		6,3E-16	6,3E-16	1,4E-12	1,3E-12	4,9E-02	4,5E-02
Sn-125	9,64 d		2,8E-14	2,8E-14	2,9E-12	2,7E-12	5,0E-02	4,5E-02
Sn-126	1,00E+05 a		1,5E-13	1,5E-13	1,8E-12	1,7E-12	7,7E-02	7,7E-02
Sr-82	25 d		1,0E-13	1,0E-13	4,3E-12	4,2E-12	5,4E-02	4,7E-02
Sr-85	64,84 d		4,8E-14	4,8E-14	4,9E-16	1,0E-15	3,5E-04	3,3E-04
Sr-85m	69,5 min		1,9E-14	1,9E-14	0,0E+00	1,0E-15	1,5E-03	1,5E-03
Sr-87m	2,805 h		3,0E-14	3,0E-14	9,6E-17	1,0E-15	8,9E-03	8,5E-03
Sr-89	50,5 d		7,8E-18	1,0E-16	1,7E-12	1,6E-12	5,0E-02	4,6E-02
Sr-90	29,12 a		1,8E-19	1,0E-16	3,3E-12	3,1E-12	9,6E-02	8,8E-02
Sr-91	9,5 h		9,3E-14	6,6E-14	3,5E-12	3,3E-12	5,2E-02	4,6E-02
Sr-92	2,71 h		1,2E-13	1,2E-14	3,8E-13	9,1E-13	4,2E-02	8,9E-02
Ta-178m	2,2 h		9,4E-14	9,1E-14	6,0E-17	1,0E-15	3,7E-02	3,4E-02
Ta-179	664,9 d		3,2E-15	3,2E-15	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
Ta-182	115 d		1,2E-13	1,1E-13	1,1E-13	7,7E-14	5,5E-02	5,2E-02
Tb-157	150 a		3,2E-16	3,2E-16	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	2,8E-05
Tb-158	150 a		7,4E-14	7,1E-14	7,5E-15	6,3E-15	1,0E-02	1,5E-02
Tb-160	72,3 d		1,0E-13	1,0E-13	4,8E-13	4,3E-13	5,1E-02	4,8E-02
Tc-95m	61 d		6,5E-14	6,7E-14	3,6E-16	1,0E-15	2,0E-03	2,3E-03
Tc-96	4,28 d		2,3E-13	2,3E-13	1,6E-15	1,0E-15	2,3E-04	2,0E-04
Tc-96m	51,5 min		4,9E-15	2,3E-13	2,5E-17	1,0E-15	4,1E-06	2,0E-04
Tc-97	2,60E+06 a		1,3E-15	1,3E-15	0,0E+00	1,0E-15	0,0E+00	–
Tc-97m	87 d		1,2E-15	1,2E-15	0,0E+00	1,0E-15	2,2E-02	1,9E-02
Tc-98	4,20E+06 a		1,3E-13	1,3E-13	1,2E-15	1,0E-15	4,2E-02	4,1E-02
Tc-99	2,13E+05 a		0,0E+00	–	0,0E+00	1,0E-15	3,3E-02	3,1E-02
Tc-99m	6,02 h		1,0E-14	1,0E-14	0,0E+00	1,0E-15	6,5E-03	6,5E-03
Te-121	17 d		5,5E-14	5,6E-14	5,8E-16	1,0E-15	3,0E-04	2,8E-04

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>-2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
		Te-121m	154 d	2,0E-14	2,0E-14	<b>2,6E-17</b>	<b>1,0E-15</b>
Te-123m	119,7 d	1,3E-14	1,3E-14	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	2,6E-02	2,4E-02
Te-125m	58 d	5,0E-15	5,0E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	3,3E-02	3,1E-02
Te-127	9,35 h	4,5E-16	4,5E-16	<b>6,0E-14</b>	<b>5,3E-14</b>	4,3E-02	4,2E-02
Te-127m	109 d	2,0E-15	2,0E-15	5,8E-14	5,3E-14	5,9E-02	5,6E-02
Te-129	69,6 min	5,7E-15	5,9E-15	1,6E-12	1,5E-12	4,9E-02	4,6E-02
Te-129m	33,6 d	7,6E-15	7,7E-15	1,3E-12	1,2E-12	5,7E-02	6,3E-02
Te-131m	30 h	1,4E-13	1,3E-13	8,8E-13	8,3E-13	5,3E-02	5,7E-02
Te-132	78,2 h	<b>2,3E-13</b>	<b>2,0E-13</b>	<b>2,5E-12</b>	<b>2,0E-12</b>	7,2E-02	6,6E-02
Th-227	18,718 d	9,9E-15	9,1E-15	<b>9,1E-19</b>	<b>1,0E-15</b>	6,0E-03	5,9E-03
Th-228	1,9131 a	1,3E-13	1,3E-13	2,0E-12	1,9E-12	9,9E-02	1,0E-01
Th-229	7,34E+03 a	8,3E-15	8,1E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	1,7E-02	1,6E-02
Th-230	7,70E+04 a	1,4E-16	1,4E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>8,8E-05</b>	–
Th-231	25,52 h	2,6E-15	2,6E-15	<b>9,8E-22</b>	<b>1,0E-15</b>	2,5E-02	2,3E-02
Th-232	1,41E+10 a	<b>1,2E-16</b>	<b>8,3E-14</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>8,0E-05</b>	–
Th-234	24,1 d	2,5E-15	2,4E-15	3,2E-12	3,3E-12	<b>6,4E-02</b>	<b>5,6E-02</b>
Th-nat	1,41E+10 a	2,2E-13	2,2E-13	3,9E-12	3,7E-12	<b>1,6E-01</b>	–
Ti-44	47,3 a	2,1E-13	2,1E-13	1,7E-12	1,6E-12	4,7E-02	4,5E-02
Tl-200	26,1 h	1,2E-13	1,2E-13	<b>6,4E-15</b>	<b>1,0E-15</b>	3,9E-03	3,9E-03
Tl-201	3,044 d	8,4E-15	8,3E-15	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	7,6E-03	7,0E-03
Tl-202	12,23 d	4,4E-14	4,3E-14	<b>1,8E-16</b>	<b>1,0E-15</b>	1,8E-03	1,7E-03
Tl-204	3,779 a	1,0E-16	1,0E-16	1,1E-13	1,0E-13	4,1E-02	4,0E-02
Tm-167	9,24 d	1,4E-14	1,4E-14	<b>1,3E-17</b>	<b>1,0E-15</b>	3,4E-02	3,4E-02
Tm-170	128,6 d	5,1E-16	5,0E-16	4,1E-13	3,8E-13	4,8E-02	4,5E-02
Tm-171	1,92 a	<b>6,6E-17</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>5,3E-04</b>	<b>2,7E-04</b>
U-230	20,8 d	1,9E-15	1,9E-15	<b>3,3E-18</b>	<b>1,0E-15</b>	9,5E-03	9,0E-03
U-232	72 a	2,1E-16	2,1E-16	<b>1,9E-22</b>	<b>1,0E-15</b>	1,5E-04	1,5E-04
U-233	1,59E+05 a	1,3E-16	1,3E-16	<b>2,6E-21</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>2,0E-04</b>	–
U-234	2,45E+05 a	1,7E-16	1,7E-16	<b>1,7E-20</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>1,0E-04</b>	–
U-235	7,04E+08 a	1,6E-14	1,6E-14	<b>1,1E-19</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>3,0E-02</b>	–
U-236	2,34E+07 a	1,5E-16	1,5E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>5,8E-05</b>	–
U-238	4,47E+09 a	1,3E-16	1,3E-16	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	0,0E+00	–
U-nat	2,20E+09 a	1,6E-13	1,6E-13	<b>6,7E-12</b>	<b>7,9E-12</b>	<b>1,9E-01</b>	–
U-dep	3,75E+09 a	2,4E-15	2,2E-15	<b>2,7E-12</b>	<b>3,1E-12</b>	<b>5,4E-02</b>	–
U-enr <sup>a)</sup>	4,09E+08 a	<b>9,3E-16</b>		<b>2,8E-13</b>		<b>6,6E-03</b>	
V-48	16,238 d	2,7E-13	2,6E-13	<b>3,7E-13</b>	<b>3,3E-13</b>	<b>1,3E-02</b>	<b>2,5E-02</b>
V-49	330 d	<b>1,1E-18</b>	<b>1,0E-16</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>1,0E-15</b>	<b>0,0E+00</b>	<b>2,8E-05</b>

Nuklid	Halbwertszeit	$\dot{e}_{pt}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{e}_{\beta}$ (Sv·Bq <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		$\dot{h}_{Haut}$ (Sv·m <sup>2</sup> ·TBq <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
		W-178	21,7 d	1,2E-14	1,1E-14	2,5E-16	1,0E-15
W-181	121,2 d	4,0E-15	3,8E-15	0,0E+00	1,0E-15	5,7E-05	5,2E-05
W-185	75,1 d	5,1E-18	1,0E-16	8,8E-17	1,0E-15	3,5E-02	3,4E-02
W-187	23,9 h	4,5E-14	4,5E-14	5,3E-13	4,8E-13	4,7E-02	4,5E-02
W-188	69,4 d	5,3E-15	5,0E-15	3,0E-12	2,7E-12	8,8E-02	7,9E-02
Xe-122	20,1 h	9,6E-14	9,1E-14	2,7E-12	2,5E-12	3,5E-02	–
Xe-123	2,08 h	5,8E-14	5,6E-14	1,0E-13	1,0E-13	1,6E-02	–
Xe-127	36,41 d	2,6E-14	2,6E-14	3,0E-19	1,0E-15	8,7E-03	–
Xe-131m	11,9 d	2,6E-15	2,6E-15	0,0E+00	1,0E-15	6,0E-02	–
Xe-133	5,245 d	4,9E-15	4,8E-15	7,3E-21	1,0E-15	3,2E-02	–
Xe-135	9,09 h	2,2E-14	2,2E-14	3,1E-13	2,9E-13	5,0E-02	–
Y-87	80,3 h	7,2E-14	7,1E-14	2,1E-16	1,0E-15	9,0E-03	8,7E-03
Y-88	106,64 d	2,4E-13	2,3E-13	5,0E-16	1,0E-15	2,5E-05	1,3E-04
Y-90	64 h	1,8E-19	1,0E-16	3,3E-12	3,1E-12	5,4E-02	4,7E-02
Y-91	58,51 d	3,3E-16	3,2E-16	1,8E-12	1,7E-12	5,0E-02	4,6E-02
Y-91m	49,71 min	5,0E-14	5,0E-14	5,6E-15	1,0E-15	2,5E-03	2,3E-03
Y-92	3,54 h	2,3E-14	2,3E-14	4,8E-12	4,5E-12	5,9E-02	4,9E-02
Y-93	10,1 h	7,8E-15	7,7E-15	4,0E-12	3,8E-12	5,6E-02	4,8E-02
Yb-169	32,01 d	2,9E-14	2,9E-14	3,7E-19	1,0E-15	2,7E-02	2,7E-02
Yb-175	4,19 d	3,6E-15	3,7E-15	4,2E-16	1,0E-15	3,4E-02	3,2E-02
Zn-65	243,9 d	5,3E-14	5,3E-14	8,5E-17	1,0E-15	1,5E-05	6,7E-04
Zn-69	57 min	5,5E-19	1,0E-16	3,4E-13	3,1E-13	4,7E-02	4,5E-02
Zn-69m	13,76 h	3,9E-14	2,9E-14	3,4E-13	2,5E-13	5,0E-02	4,7E-02
Zr-88	83,4 d	3,7E-14	3,8E-14	2,2E-17	1,0E-15	1,4E-03	1,3E-03
Zr-93	1,53E+06 a	0,0E+00		0,0E+00	1,0E-15	1,5E-08	
Zr-95	63,98 d	6,9E-14	5,6E-14	3,3E-15	2,2E-15	3,4E-02	3,3E-02
Zr-97	16,9 h	1,4E-13	1,1E-13	3,8E-12	2,7E-12	1,0E-01	4,9E-02

a) Keine Dosisleistungskoeffizienten für U-enr in /IAEA 08/ angegeben



## G Berücksichtigte Tochternuklide

Nachfolgend werden in Tab. G.1 bei der Berechnung der Dosisleistungskoeffizienten der Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_D$  (siehe Anhang F) berücksichtigte Tochternuklide angegeben. Die Rechnung wurde mit folgenden Programmeinstellungen durchgeführt:

- Quelle Nukliddaten: ICRP 38,
- Prüfung auf „unlimited“: ja, nach der PHE-Methode,
- Dosiskonversionsfaktor für Pfad  $Q_A$  nach ICRP 51/ANPA-Report,

Es sind nur Nuklide aufgeführt, deren Töchter berücksichtigt wurden.

**Tab. G.1** Bei der Berechnung nach ICRP 38 berücksichtigte Tochternuklide

Mutter	Töchter
Ac-225	Fr-221, At-217, Bi-213, Po-213, Tl-209, Pb-209
Ac-227	Fr-223
Ag-108m	Ag-108
Ag-110m	Ag-110
Am-242m	Am-242, Np-238
Am-243	Np-239
At-211	Po-211
Ba-131	Cs-131
Ba-140	La-140
Bi-210m	Tl-206
Bi-212	Po-212, Tl-208
Bk-249	Am-245
Ca-47	Sc-47
Cd-115	In-115m
Ce-144	Pr-144, Pr-144m
Cf-253	Cm-249
Cm-247	Pu-243
Cs-137	Ba-137m
Dy-166	Ho-166
Fe-52	Mn-52m
Fe-60	Co-60m
Gd-146	Eu-146
Ge-68	Ga-68
Hf-172	Lu-172

Mutter	Töchter
Hg-194	Au-194
Hg-195m	Hg-195
I-135	Xe-135m
In-114m	In-114
Ir-189	Os-189m
Mg-28	Al-28
Mo-99	Tc-99m
Os-194	Ir-194
Pa-230	Ac-226, Th-226, Fr-222, Ra-222, Rn-218, Po-214
Pb-210	Bi-210
Pb-212	Bi-212, Po-212, Tl-208
Pd-103	Rh-103m
Pm-148m	Pm-148
Pt-188	Ir-188
Pu-241	U-237
Pu-244	U-240, Np-240m
Ra-223	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211
Ra-224	Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212, Tl-208
Ra-225	Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Po-213, Tl-209, Pb-209
Ra-226	Rn-222, Po-218, Pb-214, At-218, Bi-214, Po-214
Ra-228	Ac-228
Rb-83	Kr-83m
Re-189	Os-189m
Rn-222	Po-218, Pb-214, At-218, Bi-214, Po-214
Ru-103	Rh-103m
Ru-106	Rh-106
Sn-113	In-113m
Sn-121m	Sn-121
Sn-126	Sb-126m
Sr-82	Rb-82
Sr-90	Y-90
Sr-91	Y-91m
Tc-95m	Tc-95
Te-127m	Te-127
Te-129m	Te-129
Te-131m	Te-131

Mutter	Töchter
Te-132	I-132
Th-228	Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212, Tl-208
Th-234	Pa-234m, Pa-234
Th-nat	Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212, Tl-208
Ti-44	Sc-44
U-230	Th-226, Ra-222, Rn-218, Po-214
U-235	Th-231
U-nat	Th-234, Pa-234m, Pa-234, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, At-218, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210, Th-231, Pa-231, Ac-227, Th-227, Fr-223, Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Tl-207, Po-211
U-dep	Th-234, Pa-234m, Pa-234, Th-231
U-enr	Th-234, Pa-234m, Pa-234, Th-231
W-178	Ta-178
W-188	Re-188
Xe-122	I-122
Y-87	Sr-87m
Zn-69m	Zn-69
Zr-95	Nb-95m
Zr-97	Nb-97m, Nb-97



## H Vergleich der Q- und A-Werte

Nachfolgend werden in Tab. H.1 und Tab. H.2 die im Excel-Programm mit den Nuklid-daten der ICRP 38 /ICRP 83/ berechneten Q- und A-Werte mit den in /IAEA 08/ tabel-lierten Werten verglichen. Die Rechnung wurde mit folgenden Programmeinstellungen durchgeführt:

- Quelle Nuklid-daten: ICRP 38,
- Prüfung auf „unlimited“: ja, nach der PHE-Methode,
- Dosiskonversionsfaktor für Pfad  $Q_A$  nach ICRP 51/ANPA-Report,
- Größe (AMAD) der Partikel für Pfad  $Q_C$ : 1  $\mu\text{m}$ ,
- chemische Form für Pfad  $Q_C$ : es wurden sogenannte maximierte Dosiskoeffizien-ten verwendet, d. h. es wurde diejenige chemische Form gewählt, die den größten Dosisbeitrag hat (für Uran-Isotope werden alle chemischen Formen angegeben),
- Pfad  $Q_C$ , Quelle Dosiskoeffizienten: ICRP 68,
- Begrenzung der Q-Werte auf 1000 TBq und künstliche Verstärkung schwacher Be-  
tastrahler.

**Fett gedruckt** sind Q-Werte mit Abweichungen von mehr als 10 %; abweichende A-Werte sind generell fett gedruckt. **Fett und blau hervorgehoben** sind Abweichun-gen um den Faktor 2 und mehr (bei A-Werten sind nur Abweichungen größer Faktor 2 blau markiert), **fett und dunkelrot** Abweichungen um einen Faktor 5 und mehr, im Vergleich zu den tabellierten Werten.

In der Spalte Alphastrahler der Tab. H.1 sind mit kleinem „a“ die Nuklide gekennzeich-net, bei denen in /IAEA 08/ in Table I.2 statt der  $Q_A$ -Werte die  $Q_F$ -Werte gelistet worden sind. Mit einem großen „A“ sind die Nuklide gekennzeichnet, die nach dem Q-System ebenfalls als Alphastrahler berechnet werden müssen. Die  $Q_F$ -Werte letzterer Nuklide sind größer (und somit nicht für den  $A_1$ -Wert beschränkend) als deren  $Q_A$ -Werte.

**Tab. H.1** Vergleich der berechneten Q-Werte der Pfade  $Q_A$ ,  $Q_B$  und  $Q_C$  mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten sowie berechnete spezifische Aktivität

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	$Q_A$ (TBq)		$Q_B$ (TBq)		$Q_C$ (TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
					Ac-225	A	S	10 d	2,147E+15	4,9E+00
Ac-227	a	F	21,773 a	2,678E+12	1,0E+03		1,2E+02	1,3E+02	9,3E-05	9,3E-05
Ac-228	A	F	6,13 h	8,295E+16	1,1E+00	1,2E+00	5,2E-01	5,6E-01	2,0E+00	2,0E+00
Ag-105		S	41 d	1,123E+15	2,0E+00	2,0E+00	1,0E+03	1,0E+03	6,4E+01	6,3E+01
Ag-108m		S	127 a	9,659E+11	6,5E-01	6,5E-01	5,5E+00	5,9E+00	1,4E+00	1,4E+00
Ag-110m		S	249,9 d	1,759E+14	3,9E-01	4,2E-01	<b>1,7E+01</b>	<b>1,9E+01</b>	4,2E+00	4,2E+00
Ag-111		S	7,45 d	5,847E+15	4,2E+01	4,1E+01	1,8E+00	1,9E+00	2,9E+01	2,9E+01
Al-26		M	7,16E+05 a	7,114E+08	4,2E-01	4,3E-01	<b>1,3E+00</b>	<b>1,4E-01</b>	2,8E+00	2,8E+00
Am-241	a	M	432,2 a	1,270E+11	3,0E+01		1,0E+03	1,0E+03	1,3E-03	1,3E-03
Am-242m	a	M	152 a	3,598E+11	4,0E+01		<b>4,4E+01</b>	<b>5,0E+01</b>	1,4E-03	1,4E-03
Am-243	A	M	7,38E+03 a	7,379E+09	4,9E+00	5,0E+00	<b>2,1E+02</b>	<b>2,6E+02</b>	1,3E-03	1,3E-03
Ar-37			35,02 d	3,732E+15	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	--	
Ar-39			269 a	1,263E+12	k. W.		<b>6,3E+01</b>	<b>7,3E+01</b>	--	
Ar-41			1,827 h	1,549E+18	8,7E-01	8,8E-01	2,9E-01	3,1E-01	--	
As-72		M	26 h	6,200E+16	6,0E-01	6,1E-01	2,7E-01	2,8E-01	5,4E+01	5,4E+01
As-73		M	80,3 d	8,250E+14	9,4E+01	9,5E+01	1,0E+03	1,0E+03	5,4E+01	5,4E+01
As-74		M	17,76 d	3,680E+15	1,4E+00	1,4E+00	1,6E+00	1,7E+00	2,4E+01	2,4E+01
As-76		M	26,32 h	5,803E+16	2,5E+00	2,5E+00	2,4E-01	2,5E-01	6,8E+01	6,8E+01
As-77		M	38,8 h	3,885E+16	1,3E+02	1,3E+02	<b>1,6E+01</b>	<b>1,8E+01</b>	1,3E+02	1,3E+02
At-211	A	M	7,214 h	7,618E+16	2,6E+01	2,5E+01	1,0E+03	1,0E+03	5,1E-01	5,1E-01
Au-193		S	17,65 h	3,404E+16	6,9E+00	7,0E+00	1,0E+03	1,0E+03	4,2E+02	4,2E+02
Au-194		S	39,5 h	1,513E+16	1,1E+00	1,1E+00	<b>2,2E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	2,0E+02	2,0E+02

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Au-195		S	183 d	1,354E+14	1,3E+01	1,3E+01	1,0E+03	1,0E+03	3,1E+01	3,1E+01
Au-198		S	2,696 d	9,052E+15	2,7E+00	2,6E+00	1,0E+00	1,1E+00	6,0E+01	6,0E+01
Au-199		S	3,139 d	7,735E+15	1,3E+01	1,4E+01	1,0E+03	1,0E+03	6,7E+01	6,7E+01
Ba-131		F	11,8 d	3,128E+15	<b>2,1E+00</b>	<b>1,6E+00</b>	1,0E+03	1,0E+03	<b>2,2E+02</b>	<b>1,9E+02</b>
Ba-133		F	10,74 a	9,273E+12	2,6E+00	2,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	3,3E+01	3,3E+01
Ba-133m		F	38,9 h	2,243E+16	1,5E+01	1,5E+01	1,0E+03	1,0E+03	2,6E+02	2,6E+02
Ba-140		F	12,74 d	2,710E+15	<b>4,5E-01</b>	<b>6,3E-01</b>	<b>3,1E-01</b>	<b>4,5E-01</b>	<b>5,0E+01</b>	<b>2,4E+01</b>
Be-7		S	53,3 d	1,292E+16	2,2E+01	2,1E+01	1,0E+03	1,0E+03	9,6E+02	9,4E+02
Be-10		S	1,60E+06 a	8,262E+08	k. W.		<b>5,1E+01</b>	<b>5,8E+01</b>	1,6E+00	1,5E+00
Bi-205		M	15,31 d	1,540E+15	6,7E-01	6,9E-01	<b>1,3E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	5,4E+01	5,4E+01
Bi-206		M	6,243 d	3,757E+15	3,3E-01	3,4E-01	<b>7,3E+01</b>	<b>1,0E+03</b>	2,9E+01	2,9E+01
Bi-207		M	38 a	1,683E+12	7,1E-01	7,1E-01	<b>1,4E+01</b>	<b>1,0E+03</b>	9,6E+00	9,4E+00
Bi-210	A	M	5,012 d	4,591E+15	k. W.		1,2E+00	1,3E+00	6,0E-01	6,0E-01
Bi-210m	A	M	3,00E+06 a	2,101E+07	4,3E+00	4,3E+00	5,8E-01	6,2E-01	1,6E-02	1,6E-02
Bi-212	A	M	60,55 min	5,420E+17	<b>8,5E-01</b>	<b>1,0E+00</b>	<b>5,0E-01</b>	<b>6,5E-01</b>	1,7E+00	1,7E+00
Bk-247	a	M	1,38E+03 a	3,882E+10	1,1E+01		1,0E+03	1,0E+03	7,7E-04	7,7E-04
Bk-249	A	M	320 d	6,062E+13	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	3,3E-01	3,3E-01
Br-76		M	16,2 h	9,427E+16	4,3E-01	4,4E-01	6,0E-01	6,3E-01	1,2E+02	1,2E+02
Br-77		M	56 h	2,692E+16	3,4E+00	3,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	5,7E+02	5,7E+02
Br-82		M	35,3 h	4,010E+16	4,1E-01	4,1E-01	9,6E+02	1,0E+03	7,8E+01	7,8E+01
C-11		vapour	20,38 min	3,100E+19	1,0E+00	1,0E+00	1,9E+00	2,0E+00	1,0E+03	1,0E+03
C-14		vapour	5,73E+03 a	1,650E+11	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	8,6E+01	8,6E+01
Ca-41		M	1,40E+05 a	2,308E+09	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Ca-45		M	163 d	6,593E+14	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,9E+01	1,9E+01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Ca-47		M	4,53 d	2,271E+16	<b>9,6E-01</b>	<b>2,7E+00</b>	<b>7,2E-01</b>	<b>3,7E+01</b>	<b>2,8E+01</b>	<b>2,0E+01</b>
Cd-109		F	464 d	9,561E+13	2,9E+01	2,9E+01	1,0E+03	1,0E+03	6,2E+00	6,2E+00
Cd-113m		F	13,6 a	8,620E+12	k. W.		<b>7,8E+01</b>	<b>9,1E+01</b>	4,5E-01	4,5E-01
Cd-115		S	53,46 h	1,888E+16	<b>2,7E+00</b>	<b>3,9E+00</b>	<b>2,0E+00</b>	<b>3,3E+00</b>	4,5E+01	4,3E+01
Cd-115m		S	44,6 d	9,427E+14	5,0E+01	5,0E+01	4,9E-01	5,2E-01	6,8E+00	6,8E+00
Ce-139		S	137,66 d	2,527E+14	6,8E+00	6,8E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,8E+01	2,8E+01
Ce-141		S	32,501 d	1,055E+15	1,5E+01	1,6E+01	<b>2,5E+02</b>	<b>3,2E+02</b>	1,4E+01	1,4E+01
Ce-143		S	33 h	2,459E+16	3,7E+00	3,7E+00	8,2E-01	8,9E-01	6,2E+01	6,2E+01
Ce-144		S	284,3 d	1,181E+14	2,1E+01	2,2E+01	2,4E-01	2,5E-01	1,0E+00	1,0E+00
Cf-248	a	M	333,5 d	5,840E+13	6,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	6,1E-03	6,1E-03
Cf-249	A	M	350,6 a	1,516E+11	3,2E+00	3,2E+00	1,0E+03	1,0E+03	7,6E-04	7,6E-04
Cf-250	a	M	13,08 a	4,047E+12	6,9E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,6E-03	1,6E-03
Cf-251	a	M	898 a	5,871E+10	8,7E+00		1,0E+03	1,0E+03	7,5E-04	7,5E-04
Cf-252	A	M	2,638 a	1,990E+13	1,3E-01	1,3E-01	1,0E+03	1,0E+03	2,8E-03	2,8E-03
Cf-253	a	M	17,81 d	1,072E+15	1,0E+03		1,0E+03	1,0E+03	4,2E-02	4,2E-02
Cf-254	A	M	60,5 d	3,143E+14	1,4E-03	1,4E-03	1,0E+03	1,0E+03	1,4E-03	1,4E-03
Cl-36		M	3,01E+05 a	1,223E+09	1,0E+03	1,0E+03	9,3E+00	1,0E+01	7,2E+00	7,2E+00
Cl-38		M	37,21 min	4,924E+18	7,9E-01	8,1E-01	<b>1,8E-01</b>	<b>2,2E-01</b>	1,0E+03	1,0E+03
Cm-240	a	M	27 d	7,454E+14	4,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,7E-02	1,7E-02
Cm-241	A	M	32,8 d	6,110E+14	2,2E+00	2,2E+00	<b>7,4E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	<b>1,5E+00</b>	<b>1,3E+00</b>
Cm-242	a	M	162,8 d	1,226E+14	4,9E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,0E-02	1,0E-02
Cm-243	A	M	28,5 a	1,911E+12	8,5E+00	8,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	<b>1,7E-03</b>	<b>1,3E-03</b>
Cm-244	a	M	18,11 a	2,995E+12	5,3E+02		1,0E+03	1,0E+03	<b>2,0E-03</b>	<b>1,6E-03</b>
Cm-245	a	M	8,50E+03 a	6,354E+09	1,2E+01		1,0E+03	1,0E+03	<b>1,3E-03</b>	<b>9,1E-04</b>

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Cm-246	a	M	4,73E+03 a	1,137E+10	6,0E+02		1,0E+03	1,0E+03	<b>1,3E-03</b>	<b>9,1E-04</b>
Cm-247	A	M	1,56E+07 a	3,434E+06	3,2E+00	3,2E+00	<b>1,4E+02</b>	<b>1,6E+02</b>	<b>1,4E-03</b>	<b>9,8E-04</b>
Cm-248	A	M	3,39E+05 a	1,574E+08	1,8E-02	1,8E-02	1,0E+03	1,0E+03	<b>3,6E-04</b>	<b>2,5E-04</b>
Co-55		S	17,54 h	1,203E+17	5,4E-01	5,4E-01	9,1E-01	9,7E-01	9,1E+01	9,1E+01
Co-56		S	78,76 d	1,097E+15	3,2E-01	3,3E-01	1,4E+01	1,5E+01	7,9E+00	7,8E+00
Co-57		S	270,9 d	3,132E+14	9,9E+00	1,0E+01	1,0E+03	1,0E+03	5,3E+01	5,3E+01
Co-58		S	70,8 d	1,178E+15	1,1E+00	1,1E+00	<b>5,1E+02</b>	<b>7,8E+02</b>	2,5E+01	2,5E+01
Co-58m		S	9,15 h	2,187E+17	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Co-60		S	5,271 a	4,190E+13	4,4E-01	4,5E-01	<b>5,5E+02</b>	<b>7,3E+02</b>	1,7E+00	1,7E+00
Cr-51		S	27,704 d	3,423E+15	3,5E+01	3,4E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Cs-129		F	32,06 h	2,806E+16	3,6E+00	3,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Cs-131		F	9,69 d	3,809E+15	3,1E+01	3,1E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Cs-132		F	6,475 d	5,657E+15	1,5E+00	1,5E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,1E+02	2,1E+02
Cs-134		F	2,062 a	4,794E+13	6,9E-01	6,9E-01	<b>3,2E+00</b>	<b>3,6E+00</b>	7,4E+00	7,4E+00
Cs-134m		F	2,9 h	2,986E+17	3,7E+01	3,7E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Cs-135		F	2,30E+06 a	4,266E+07	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Cs-136		F	13,1 d	2,714E+15	5,0E-01	5,1E-01	<b>2,6E+02</b>	<b>8,3E+02</b>	3,8E+01	3,8E+01
Cs-137		F	30 a	3,223E+12	1,9E+00	1,8E+00	<b>6,1E+00</b>	<b>8,2E+00</b>	1,0E+01	1,0E+01
Cu-64		S	12,701 h	1,428E+17	5,6E+00	5,6E+00	<b>9,4E+01</b>	<b>1,1E+02</b>	4,2E+02	4,2E+02
Cu-67		S	61,86 h	2,801E+16	1,0E+01	1,0E+01	<b>3,3E+02</b>	<b>4,1E+02</b>	8,6E+01	8,6E+01
Dy-159		M	144,4 d	2,105E+14	2,0E+01	2,0E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,4E+02	1,4E+02
Dy-165		M	2,334 h	3,012E+17	4,1E+01	4,1E+01	8,7E-01	9,4E-01	8,2E+02	8,2E+02
Dy-166		M	81,6 h	8,564E+15	<b>1,5E+01</b>	<b>3,4E+01</b>	<b>4,1E-01</b>	<b>8,6E-01</b>	<b>2,8E+01</b>	<b>2,0E+01</b>
Er-169		M	9,3 d	3,075E+15	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	5,1E+01	5,1E+01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Er-171		M	7,52 h	9,020E+16	2,9E+00	2,9E+00	7,7E-01	8,3E-01	2,3E+02	2,3E+02
Eu-147	A	M	24 d	1,370E+15	2,2E+00	2,2E+00	1,0E+03	1,0E+03	5,0E+01	5,0E+01
Eu-148	A	M	54,5 d	5,993E+14	4,9E-01	5,1E-01	<b>3,1E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	1,9E+01	1,9E+01
Eu-149	A	M	93,1 d	3,485E+14	1,5E+01	1,5E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,9E+02	1,9E+02
Eu-150		M	34,2 a	2,582E+12	7,2E-01	7,2E-01	<b>1,2E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	1,0E+00	1,0E+00
Eu-150m	A	M	12,62 h	6,129E+16	2,3E+01	2,3E+01	<b>1,3E+00</b>	<b>1,5E+00</b>	2,6E+02	2,6E+02
Eu-152		M	13,33 a	6,536E+12	9,5E-01	9,6E-01	<b>9,5E+01</b>	<b>1,7E+02</b>	1,3E+00	1,3E+00
Eu-152m	A	M	9,32 h	8,189E+16	3,7E+00	3,7E+00	7,6E-01	8,1E-01	2,3E+02	2,3E+02
Eu-154		M	8,8 a	9,772E+12	8,9E-01	9,0E-01	<b>1,4E+00</b>	<b>1,6E+00</b>	1,0E+00	1,0E+00
Eu-155		M	4,96 a	1,723E+13	1,8E+01	1,9E+01	1,0E+03	1,0E+03	7,7E+00	7,7E+00
Eu-156		M	15,19 d	2,040E+15	8,5E-01	8,8E-01	6,9E-01	7,4E-01	1,5E+01	1,5E+01
F-18		S	109,77 min	3,521E+18	1,0E+00	1,0E+00	<b>2,4E+01</b>	<b>2,8E+01</b>	8,3E+02	8,3E+02
Fe-52		M	8,275 h	2,697E+17	<b>3,5E-01</b>	<b>4,1E-01</b>	<b>2,6E-01</b>	<b>3,2E-01</b>	7,9E+01	7,6E+01
Fe-55		F	2,7 a	8,923E+13	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	6,5E+01	6,5E+01
Fe-59		M	44,529 d	1,841E+15	9,3E-01	9,4E-01	<b>3,1E+01</b>	<b>4,4E+01</b>	1,4E+01	1,4E+01
Fe-60		F	1,00E+05 a	2,208E+09	2,0E+02	2,0E+02	1,0E+03	1,0E+03	<b>1,8E-01</b>	<b>2,1E-01</b>
Ga-67		M	78,26 h	2,214E+16	7,3E+00	7,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,2E+02	2,2E+02
Ga-68		M	68 min	1,506E+18	1,1E+00	1,1E+00	4,3E-01	4,6E-01	9,8E+02	9,8E+02
Ga-72		M	14,1 h	1,143E+17	4,2E-01	4,3E-01	3,4E-01	3,7E-01	9,1E+01	9,1E+01
Gd-146		M	48,3 d	6,855E+14	<b>3,9E-01</b>	<b>5,3E-01</b>	<b>1,2E+02</b>	<b>2,9E+02</b>	<b>8,3E+00</b>	<b>7,3E+00</b>
Gd-148	a	F	93 a	9,622E+11	k. W.		<b>1,0E+03</b>	--	2,0E-03	2,0E-03
Gd-153		F	242 d	1,306E+14	9,4E+00	9,5E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,4E+01	2,4E+01
Gd-159		M	18,56 h	3,931E+16	2,1E+01	2,1E+01	2,9E+00	3,1E+00	1,9E+02	1,9E+02
Ge-68		M	288 d	2,470E+14	1,1E+00	1,1E+00	4,3E-01	4,6E-01	3,8E+00	3,8E+00

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Ge-71		M	11,8 d	5,773E+15	5,2E+02	5,2E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Ge-77		M	11,3 h	1,334E+17	1,0E+00	1,1E+00	3,1E-01	3,3E-01	1,4E+02	1,4E+02
H-3		OBT	12,35 a	3,554E+14	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Hf-172		F	1,87 a	4,117E+13	5,4E-01	5,8E-01	<b>1,4E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	1,6E+00	1,5E+00
Hf-175		M	70 d	3,945E+14	2,9E+00	2,9E+00	1,0E+03	1,0E+03	4,5E+01	4,5E+01
Hf-181		M	42,4 d	6,297E+14	2,0E+00	1,9E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+01	1,1E+01
Hf-182		F	9,00E+06 a	8,083E+06	4,7E+00	4,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Hg-194		vapour	260 a	2,625E+11	1,0E+00	1,1E+00	<b>2,2E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	1,3E+00	1,3E+00
Hg-195m		vapour	41,6 h	1,430E+16	3,4E+00	3,1E+00	9,0E+02	1,0E+03	<b>6,1E+00</b>	<b>5,3E+00</b>
Hg-197		vapour	64,1 h	9,184E+15	1,6E+01	1,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+01	1,1E+01
Hg-197m		vapour	23,8 h	2,473E+16	1,2E+01	1,3E+01	1,0E+03	1,0E+03	8,6E+00	8,1E+00
Hg-203		vapour	46,6 d	5,108E+14	4,7E+00	4,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	7,1E+00	6,7E+00
Ho-166		M	26,8 h	2,607E+16	3,8E+01	3,8E+01	4,1E-01	4,4E-01	7,6E+01	7,6E+01
Ho-166m		M	1,20E+03 a	6,647E+10	6,2E-01	6,2E-01	<b>4,1E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	4,5E-01	4,5E-01
I-123		vapour	13,2 h	7,147E+16	6,3E+00	6,3E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,4E+02	2,3E+02
I-124		vapour	4,18 d	9,328E+15	9,9E-01	1,1E+00	5,7E+00	6,0E+00	<b>4,2E+00</b>	<b>3,8E+00</b>
I-125		vapour	60,14 d	6,432E+14	1,7E+01	1,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	3,6E+00	3,3E+00
I-126		vapour	13,02 d	2,947E+15	2,3E+00	2,3E+00	5,9E+00	6,4E+00	<b>1,9E+00</b>	<b>1,7E+00</b>
I-129		vapour	1,57E+07 a	6,540E+06	2,9E+01	2,9E+01	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
I-131		vapour	8,04 d	4,590E+15	2,8E+00	2,8E+00	<b>1,7E+01</b>	<b>2,0E+01</b>	2,5E+00	2,3E+00
I-132		vapour	2,3 h	3,822E+17	4,7E-01	4,8E-01	4,1E-01	4,4E-01	<b>1,6E+02</b>	<b>1,8E+02</b>
I-133		vapour	20,8 h	4,194E+16	1,8E+00	1,8E+00	6,8E-01	7,3E-01	<b>1,3E+01</b>	<b>1,1E+01</b>
I-134		vapour	52,6 min	9,877E+17	4,2E-01	4,2E-01	3,0E-01	3,2E-01	<b>3,3E+02</b>	<b>6,9E+02</b>
I-135		vapour	6,61 h	1,300E+17	<b>6,8E-01</b>	<b>8,2E-01</b>	<b>4,9E-01</b>	<b>6,2E-01</b>	5,4E+01	5,2E+01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
In-111		M	2,83 d	1,539E+16	2,8E+00	2,8E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,2E+02	2,2E+02
In-113m		M	1,658 h	6,194E+17	4,1E+00	4,1E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
In-114m		F	49,51 d	8,567E+14	1,1E+01	1,1E+01	1,0E+03	1,0E+03	5,4E+00	5,4E+00
In-115m		M	4,486 h	2,249E+17	6,6E+00	6,5E+00	1,0E+03	1,0E+03	8,3E+02	8,3E+02
Ir-189		S	13,3 d	1,922E+15	1,3E+01	1,3E+01	1,0E+03	1,0E+03	9,1E+01	9,1E+01
Ir-190		S	12,1 d	2,102E+15	7,5E-01	7,5E-01	<b>4,9E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	2,2E+01	2,2E+01
Ir-192		S	74,02 d	3,400E+14	1,3E+00	1,3E+00	<b>3,9E+01</b>	<b>4,6E+01</b>	8,1E+00	8,1E+00
Ir-194		S	19,15 h	3,122E+16	1,2E+01	1,2E+01	3,1E-01	3,3E-01	8,9E+01	8,9E+01
K-40		F	1,28E+09 a	2,588E+05	7,2E+00	7,3E+00	8,8E-01	9,4E-01	unlimited	unlimited
K-42		F	12,36 h	2,236E+17	4,1E+00	4,2E+00	2,1E-01	2,2E-01	3,8E+02	3,8E+02
K-43		F	22,6 h	1,194E+17	1,1E+00	1,1E+00	6,7E-01	7,3E-01	3,3E+02	3,3E+02
Kr-79 <sup>a)</sup>			35,04 h	4,193E+16	4,2E+00		1,0E+03		--	
Kr-81			2,10E+05 a	7,790E+08	1,1E+02	1,1E+02	1,0E+03	1,0E+03	--	
Kr-85			10,72 a	1,454E+13	4,8E+02	4,8E+02	1,3E+01	1,4E+01	--	
Kr-85m			4,48 h	3,048E+17	7,5E+00	7,5E+00	7,0E+00	7,6E+00	--	
Kr-87			76,3 min	1,049E+18	1,5E+00	1,5E+00	2,0E-01	2,1E-01	--	
La-137		F	6,00E+04 a	1,611E+09	3,0E+01	3,0E+01	1,0E+03	1,0E+03	5,8E+00	5,7E+00
La-140		M	40,272 h	2,058E+16	4,9E-01	4,9E-01	3,4E-01	3,7E-01	4,5E+01	4,5E+01
Lu-172		S	6,7 d	4,194E+15	5,8E-01	5,9E-01	<b>1,4E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	3,3E+01	3,3E+01
Lu-173		S	1,37 a	5,587E+13	8,0E+00	8,0E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,2E+01	2,2E+01
Lu-174		M	3,31 a	2,299E+13	8,4E+00	8,5E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,3E+01	1,3E+01
Lu-174m		S	142 d	1,956E+14	1,6E+01	1,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,3E+01	1,3E+01
Lu-177		S	6,71 d	4,069E+15	3,3E+01	3,3E+01	9,2E+02	1,0E+03	4,5E+01	4,2E+01
Mg-28		M	20,91 h	1,982E+17	3,6E-01	3,7E-01	2,4E-01	2,5E-01	<b>4,2E+01</b>	<b>2,6E+01</b>

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Mn-52		M	5,591 d	1,664E+16	3,2E-01	3,2E-01	<b>5,2E+02</b>	<b>7,3E+02</b>	3,6E+01	3,6E+01
Mn-53		M	3,70E+06 a	6,757E+07	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Mn-54		M	312,5 d	2,866E+14	1,3E+00	1,3E+00	1,0E+03	1,0E+03	3,3E+01	3,3E+01
Mn-56		M	2,5785 h	8,039E+17	6,7E-01	6,7E-01	2,8E-01	3,0E-01	3,8E+02	3,8E+02
Mo-93		S	3,50E+03 a	4,071E+10	8,5E+01	8,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	2,3E+01	2,3E+01
Mo-99		S	66 h	1,776E+16	<b>4,3E+00</b>	<b>6,2E+00</b>	1,2E+00	1,3E+00	5,2E+01	5,1E+01
N-13			9,965 min	5,368E+19	1,0E+00	1,0E+00	8,7E-01	9,3E-01	--	
Na-22		F	2,602 a	2,313E+14	5,0E-01	5,0E-01	<b>3,1E+00</b>	<b>3,8E+00</b>	3,8E+01	3,8E+01
Na-24		F	15 h	3,222E+17	2,9E-01	3,0E-01	1,8E-01	2,0E-01	1,7E+02	1,7E+02
Nb-93m		S	13,6 a	1,048E+13	4,8E+02	4,9E+02	1,0E+03	1,0E+03	3,1E+01	3,1E+01
Nb-94		S	2,03E+04 a	6,943E+09	6,8E-01	6,8E-01	<b>4,7E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	1,1E+00	1,1E+00
Nb-95		S	35,15 d	1,448E+15	1,4E+00	1,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	3,1E+01	3,1E+01
Nb-97		S	72,1 min	9,957E+17	1,6E+00	1,6E+00	8,4E-01	9,0E-01	1,0E+03	1,0E+03
Nd-147		S	10,98 d	2,995E+15	7,4E+00	7,4E+00	5,2E+00	5,6E+00	2,2E+01	2,2E+01
Nd-149		S	1,73 h	4,501E+17	2,9E+00	2,9E+00	5,9E-01	6,3E-01	5,6E+02	5,6E+02
Ni-59		carbonyl	7,50E+04 a	2,995E+09	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Ni-63		carbonyl	96 a	2,191E+12	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	<b>2,5E+01</b>	<b>2,9E+01</b>
Ni-65		carbonyl	2,52 h	7,086E+17	2,0E+00	2,1E+00	4,1E-01	4,4E-01	<b>1,4E+02</b>	<b>5,7E+02</b>
Np-235	A	M	396,1 d	5,189E+13	1,4E+02	1,4E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,3E+02	1,3E+02
Np-236	A	M	1,15E+05 a	4,876E+08	8,5E+00	8,7E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,7E-02	1,7E-02
Np-236m	A	M	22,5 h	2,183E+16	2,3E+01	2,3E+01	9,1E+02	1,0E+03	1,0E+01	1,0E+01
Np-237	a	M	2,14E+06 a	2,609E+07	3,0E+01		1,0E+03	1,0E+03	2,4E-03	2,4E-03
Np-239	A	M	2,355 d	8,582E+15	6,6E+00	6,7E+00	<b>2,1E+02</b>	<b>2,6E+02</b>	5,6E+01	5,6E+01
Os-185		S	94 d	2,779E+14	1,5E+00	1,5E+00	<b>4,1E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	3,3E+01	3,3E+01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Os-191		S	15,4 d	1,643E+15	1,4E+01	1,5E+01	1,0E+03	1,0E+03	2,8E+01	2,8E+01
Os-191m		S	13,03 h	4,660E+16	1,2E+02	1,3E+02	1,0E+03	1,0E+03	3,3E+02	3,3E+02
Os-193		S	30 h	2,003E+16	1,5E+01	1,5E+01	1,5E+00	1,6E+00	9,8E+01	9,8E+01
Os-194		S	6 a	1,137E+13	1,2E+01	1,2E+01	3,1E-01	3,1E-01	6,3E-01	6,3E-01
P-32		M	14,29 d	1,057E+16	k. W.		4,2E-01	4,5E-01	1,6E+01	1,6E+01
P-33		M	25,4 d	5,769E+15	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	3,6E+01	3,6E+01
Pa-230	A	S	17,4 d	1,207E+15	1,7E+00	1,7E+00	<b>5,7E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	7,0E-02	6,6E-02
Pa-231	a	M	3,28E+04 a	1,749E+09	2,2E+01		1,0E+03	1,0E+03	3,8E-04	3,8E-04
Pa-233	A	S	27 d	7,678E+14	5,4E+00	5,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,4E+01	1,4E+01
Pb-201		F	9,4 h	6,138E+16	1,4E+00	1,5E+00	<b>3,5E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	7,7E+02	7,7E+02
Pb-202		F	3,00E+05 a	2,185E+08	9,0E+02	9,0E+02	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Pb-203		F	52,05 h	1,098E+16	3,6E+00	3,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	5,5E+02	5,5E+02
Pb-205		F	1,43E+07 a	4,516E+06	8,4E+02	8,3E+02	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Pb-210		F	22,3 a	2,827E+12	2,4E+02	2,4E+02	1,2E+00	1,3E+00	5,6E-02	5,1E-02
Pb-212	A	F	10,64 h	5,141E+16	<b>7,6E-01</b>	<b>1,0E+00</b>	<b>5,0E-01</b>	<b>7,0E-01</b>	<b>2,6E+00</b>	<b>2,2E-01</b>
Pd-103		S	16,96 d	2,768E+15	4,7E+01	4,7E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,3E+02	1,2E+02
Pd-107		S	6,50E+06 a	1,905E+07	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Pd-109		S	13,427 h	7,929E+16	7,0E+01	7,0E+01	<b>1,7E+00</b>	<b>1,9E+00</b>	1,4E+02	1,4E+02
Pm-143		M	265 d	1,276E+14	3,3E+00	3,3E+00	1,0E+03	1,0E+03	3,6E+01	3,6E+01
Pm-144	A	M	363 d	9,248E+13	6,8E-01	6,7E-01	<b>4,2E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	6,4E+00	6,4E+00
Pm-145		M	17,7 a	5,160E+12	2,6E+01	2,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,5E+01	1,5E+01
Pm-147	A	M	2,6234 a	3,434E+13	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,1E+01	1,1E+01
Pm-148m	A	S	41,3 d	7,908E+14	<b>5,3E-01</b>	<b>8,3E-01</b>	<b>4,7E+00</b>	<b>7,6E+00</b>	9,3E+00	9,1E+00
Pm-149	A	S	53,08 h	1,467E+16	1,0E+02	1,0E+02	1,6E+00	1,7E+00	6,9E+01	6,9E+01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Pm-151		S	28,4 h	2,705E+16	3,4E+00	3,3E+00	1,7E+00	1,8E+00	1,1E+02	1,1E+02
Po-210	a	M	138,38 d	1,663E+14	1,0E+03		1,0E+03	1,0E+03	1,7E-02	1,7E-02
Pr-142		S	19,13 h	4,271E+16	2,0E+01	2,0E+01	3,4E-01	3,6E-01	8,9E+01	8,9E+01
Pr-143		S	13,56 d	2,493E+15	1,0E+03	1,0E+03	2,8E+00	3,0E+00	2,2E+01	2,2E+01
Pt-188		F	10,2 d	2,520E+15	<b>6,4E-01</b>	<b>9,7E-01</b>	<b>1,0E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	<b>1,2E+02</b>	<b>5,7E+01</b>
Pt-191		F	2,8 d	9,036E+15	3,5E+00	3,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	4,5E+02	4,5E+02
Pt-193		F	50 a	1,372E+12	8,7E+02	8,7E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Pt-193m		F	4,33 d	5,782E+15	8,8E+01	9,1E+01	1,0E+03	1,0E+03	3,8E+02	3,8E+02
Pt-195m		F	4,02 d	6,164E+15	1,4E+01	1,5E+01	1,0E+03	1,0E+03	2,6E+02	2,6E+02
Pt-197		F	18,3 h	3,217E+16	4,6E+01	4,7E+01	<b>2,1E+01</b>	<b>2,4E+01</b>	5,5E+02	5,5E+02
Pt-197m		F	94,4 min	3,742E+17	1,3E+01	1,3E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Pu-236	a	M	2,851 a	1,967E+13	4,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	2,8E-03	2,8E-03
Pu-237	A	S	45,3 d	4,499E+14	2,2E+01	2,3E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,4E+02	1,4E+02
Pu-238	a	M	87,74 a	6,337E+11	5,2E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,2E-03	1,2E-03
Pu-239	a	M	2,41E+04 a	2,301E+09	1,0E+03		1,0E+03	1,0E+03	1,1E-03	1,1E-03
Pu-240	a	M	6,54E+03 a	8,435E+09	5,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,1E-03	1,1E-03
Pu-241	A	M	14,4 a	3,813E+12	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	5,9E-02	5,9E-02
Pu-242	a	M	3,76E+05 a	1,453E+08	6,6E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,1E-03	1,1E-03
Pu-244	A	M	8,26E+07 a	6,566E+05	3,1E+00	3,1E+00	3,6E-01	3,8E-01	1,1E-03	1,1E-03
Ra-223	A	M	11,434 d	1,895E+15	3,8E+00	3,9E+00	3,7E-01	4,0E-01	7,2E-03	7,2E-03
Ra-224	A	M	3,66 d	5,892E+15	<b>7,6E-01</b>	<b>1,1E+00</b>	<b>5,0E-01</b>	<b>4,3E-01</b>	1,7E-02	1,6E-02
Ra-225	A	M	14,8 d	1,451E+15	<b>4,5E+00</b>	<b>1,2E+01</b>	<b>7,5E-01</b>	<b>2,2E-01</b>	<b>8,6E-03</b>	<b>3,6E-03</b>
Ra-226	A	M	1,60E+03 a	3,660E+10	6,4E-01	6,5E-01	2,3E-01	2,5E-01	<b>3,1E-03</b>	<b>2,7E-03</b>
Ra-228		M	5,75 a	1,010E+13	1,1E+00	1,2E+00	5,2E-01	5,6E-01	1,9E-02	1,9E-02

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Rb-81		F	4,58 h	3,129E+17	1,8E+00	1,7E+00	1,4E+01	1,5E+01	1,0E+03	1,0E+03
Rb-83		F	86,2 d	6,760E+14	2,1E+00	2,1E+00	1,0E+03	1,0E+03	7,0E+01	6,9E+01
Rb-84		F	32,77 d	1,757E+15	1,2E+00	1,2E+00	3,7E+01	4,0E+01	4,5E+01	4,5E+01
Rb-86		F	18,66 d	3,014E+15	1,2E+01	1,2E+01	4,5E-01	4,8E-01	5,2E+01	5,2E+01
Rb-87		F	4,70E+10 a	3,240E+03	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Rb-nat		F	4,70E+10 a	3,240E+03	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Re-184	A	M	38 d	6,912E+14	1,2E+00	1,2E+00	<b>4,0E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	2,8E+01	2,8E+01
Re-184m		M	165 d	1,592E+14	2,8E+00	2,8E+00	1,0E+03	1,0E+03	8,2E+00	8,2E+00
Re-186	A	M	90,64 h	6,879E+15	5,6E+01	5,8E+01	1,8E+00	2,0E+00	4,5E+01	4,5E+01
Re-187		M	5,00E+10 a	1,416E+03	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Re-188		M	16,98 h	3,633E+16	2,0E+01	2,0E+01	3,3E-01	3,5E-01	9,1E+01	9,1E+01
Re-189		M	24,3 h	2,525E+16	<b>1,6E+01</b>	<b>3,2E+01</b>	2,3E+00	2,5E+00	1,2E+02	1,2E+02
Re-nat		M	5,00E+10 a	1,416E+03	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Rh-99		S	16 d	3,053E+15	1,8E+00	1,8E+00	1,0E+03	1,0E+03	6,0E+01	6,0E+01
Rh-101		S	3,2 a	4,099E+13	4,2E+00	4,3E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+01	9,8E+00
Rh-102		S	2,9 a	4,479E+13	5,0E-01	5,0E-01	<b>7,4E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	3,1E+00	3,1E+00
Rh-102m		S	207 d	2,290E+14	2,2E+00	2,2E+00	8,4E+00	8,9E+00	7,5E+00	7,5E+00
Rh-103m		S	56,12 min	1,205E+18	4,6E+02	4,5E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Rh-105		S	35,36 h	3,126E+16	1,4E+01	1,4E+01	<b>1,5E+02</b>	<b>1,8E+02</b>	1,5E+02	1,5E+02
Rn-222	A		3,8235 d	5,691E+15	6,4E-01	6,7E-01	<b>2,3E-01</b>	<b>2,6E-01</b>	--	
Ru-97		M	2,9 d	1,719E+16	4,7E+00	4,7E+00	1,0E+03	1,0E+03	4,5E+02	4,5E+02
Ru-103		S	39,28 d	1,195E+15	2,3E+00	2,2E+00	1,8E+02	2,0E+02	1,8E+01	1,8E+01
Ru-105		S	4,44 h	2,489E+17	1,4E+00	1,4E+00	1,1E+00	1,2E+00	2,8E+02	2,8E+02
Ru-106		S	368,2 d	1,239E+14	5,2E+00	5,3E+00	2,1E-01	2,2E-01	8,1E-01	8,1E-01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
S-35		M	87,44 d	1,580E+15	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	3,8E+01	3,8E+01
Sb-122		M	2,7 d	1,468E+16	2,4E+00	2,4E+00	4,0E-01	4,3E-01	5,0E+01	5,0E+01
Sb-124		M	60,2 d	6,477E+14	6,1E-01	6,2E-01	6,7E-01	7,2E-01	8,2E+00	8,2E+00
Sb-125		M	2,77 a	3,826E+13	2,4E+00	2,4E+00	<b>2,1E+02</b>	<b>2,5E+02</b>	1,1E+01	1,1E+01
Sb-126		M	12,4 d	3,094E+15	3,8E-01	3,8E-01	1,2E+00	1,3E+00	1,9E+01	1,8E+01
Sc-44		S	3,927 h	6,717E+17	5,1E-01	5,1E-01	5,8E-01	6,1E-01	2,6E+02	2,6E+02
Sc-46		S	83,83 d	1,254E+15	5,4E-01	5,4E-01	1,0E+03	1,0E+03	7,8E+00	7,8E+00
Sc-47		S	3,351 d	3,071E+16	1,1E+01	1,1E+01	<b>1,4E+02</b>	<b>1,7E+02</b>	7,1E+01	7,1E+01
Sc-48		S	43,7 h	5,533E+16	3,3E-01	3,3E-01	<b>8,0E-01</b>	<b>9,0E-01</b>	4,5E+01	4,5E+01
Se-75		M	119,8 d	5,383E+14	2,9E+00	2,9E+00	1,0E+03	1,0E+03	3,6E+01	3,6E+01
Se-79		M	6,50E+04 a	2,580E+09	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	1,7E+01	1,7E+01
Si-31		S	157,3 min	1,428E+18	1,0E+03	1,0E+03	5,4E-01	5,8E-01	6,3E+02	6,3E+02
Si-32		S	450 a	9,199E+11	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	4,5E-01	4,5E-01
Sm-145		M	340 d	9,806E+13	1,3E+01	1,3E+01	1,0E+03	1,0E+03	3,3E+01	3,3E+01
Sm-147	A	M	1,06E+11 a	8,500E+02	k. W.	5,6E+01	<b>1,0E+03</b>	--	unlimited	unlimited
Sm-151		M	90 a	9,745E+11	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,4E+01	1,4E+01
Sm-153		M	46,7 h	1,624E+16	1,6E+01	1,7E+01	8,2E+00	9,1E+00	8,2E+01	8,2E+01
Sn-113		M	115,1 d	3,718E+14	3,7E+00	3,7E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,0E+01	2,0E+01
Sn-117m		M	13,61 d	3,037E+15	7,1E+00	7,1E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,2E+01	2,2E+01
Sn-119m		M	293 d	1,387E+14	6,3E+01	6,2E+01	1,0E+03	1,0E+03	2,5E+01	2,5E+01
Sn-121m		M	55 a	1,991E+12	1,5E+02	1,4E+02	1,0E+03	1,0E+03	1,2E+01	1,1E+01
Sn-123		M	129,2 d	3,042E+14	1,6E+02	1,6E+02	7,0E-01	7,5E-01	6,5E+00	6,5E+00
Sn-125		M	9,64 d	4,012E+15	3,5E+00	3,6E+00	3,5E-01	3,7E-01	1,7E+01	1,7E+01
Sn-126		M	1,00E+05 a	1,051E+09	6,7E-01	6,6E-01	5,5E-01	5,9E-01	1,9E+00	1,9E+00

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Sr-82		S	25 d	2,359E+15	9,7E-01	9,7E-01	2,3E-01	2,4E-01	5,0E+00	5,0E+00
Sr-85		S	64,84 d	8,775E+14	2,1E+00	2,1E+00	1,0E+03	1,0E+03	6,5E+01	6,5E+01
Sr-85m		S	69,5 min	1,179E+18	5,2E+00	5,2E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Sr-87m		S	2,805 h	4,756E+17	3,4E+00	3,3E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Sr-89		S	50,5 d	1,076E+15	1,0E+03	1,0E+03	5,9E-01	6,2E-01	6,7E+00	6,7E+00
Sr-90		S	29,12 a	5,056E+12	1,0E+03	1,0E+03	3,0E-01	3,2E-01	3,3E-01	3,3E-01
Sr-91		S	9,5 h	1,343E+17	<b>1,1E+00</b>	<b>1,5E+00</b>	2,9E-01	3,0E-01	1,2E+02	1,2E+02
Sr-92		S	2,71 h	4,655E+17	<b>8,4E-01</b>	<b>8,2E+00</b>	<b>2,7E+00</b>	<b>1,1E+00</b>	<b>2,2E+02</b>	<b>1,2E+02</b>
Ta-178m		S	2,2 h	2,962E+17	1,1E+00	1,1E+00	1,0E+03	1,0E+03	7,2E+02	7,2E+02
Ta-179		S	664,9 d	4,061E+13	3,1E+01	3,1E+01	1,0E+03	1,0E+03	9,6E+01	9,6E+01
Ta-182		S	115 d	2,309E+14	8,5E-01	8,7E-01	<b>9,5E+00</b>	<b>1,3E+01</b>	5,2E+00	5,1E+00
Tb-157		M	150 a	5,623E+11	3,1E+02	3,1E+02	1,0E+03	1,0E+03	4,5E+01	4,2E+01
Tb-158		M	150 a	5,588E+11	1,3E+00	1,4E+00	<b>1,3E+02</b>	<b>1,6E+02</b>	1,2E+00	1,1E+00
Tb-160		M	72,3 d	4,178E+14	9,7E-01	9,8E-01	2,1E+00	2,3E+00	7,6E+00	7,6E+00
Tc-95m		M	61 d	8,345E+14	1,5E+00	1,5E+00	1,0E+03	1,0E+03	5,7E+01	5,7E+01
Tc-96		M	4,28 d	1,177E+16	4,3E-01	4,3E-01	<b>6,4E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	7,0E+01	7,0E+01
Tc-96m		M	51,5 min	1,409E+18	<b>2,0E+01</b>	<b>4,3E-01</b>	1,0E+03	1,0E+03	<b>1,0E+03</b>	<b>7,1E+01</b>
Tc-97		M	2,60E+06 a	5,253E+07	7,5E+01	7,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Tc-97m		M	87 d	5,730E+14	8,6E+01	8,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,6E+01	1,6E+01
Tc-98		M	4,20E+06 a	3,219E+07	7,6E-01	7,5E-01	<b>8,6E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	unlimited	unlimited
Tc-99		M	2,13E+05 a	6,283E+08	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Tc-99m		M	6,02 h	1,947E+17	9,6E+00	9,8E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Te-121		M	17 d	2,351E+15	1,8E+00	1,8E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,3E+02	1,3E+02
Te-121m		M	154 d	2,595E+14	5,1E+00	5,1E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,2E+01	1,2E+01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Te-123m		M	119,7 d	3,284E+14	7,6E+00	7,7E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,3E+01	1,3E+01
Te-125m		M	58 d	6,669E+14	2,0E+01	2,0E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,5E+01	1,5E+01
Te-127		M	9,35 h	9,772E+16	2,2E+02	2,2E+02	<b>1,7E+01</b>	<b>1,9E+01</b>	4,2E+02	4,2E+02
Te-127m		M	109 d	3,493E+14	5,0E+01	5,0E+01	<b>1,7E+01</b>	<b>1,9E+01</b>	6,9E+00	6,8E+00
Te-129		M	69,6 min	7,754E+17	1,7E+01	1,7E+01	6,2E-01	6,6E-01	1,0E+03	1,0E+03
Te-129m		M	33,6 d	1,115E+15	1,3E+01	1,3E+01	7,8E-01	8,5E-01	7,9E+00	7,9E+00
Te-131m		M	30 h	2,952E+16	7,2E-01	7,5E-01	1,1E+00	1,2E+00	4,5E+01	4,5E+01
Te-132		M	78,2 h	1,124E+16	<b>4,3E-01</b>	<b>4,9E-01</b>	<b>4,1E-01</b>	<b>4,9E-01</b>	<b>2,3E+01</b>	<b>2,0E+01</b>
Th-227	A	S	18,718 d	1,137E+15	1,0E+01	1,1E+01	1,0E+03	1,0E+03	5,2E-03	5,2E-03
Th-228	A	S	1,9131 a	3,034E+13	7,5E-01	7,6E-01	5,0E-01	5,3E-01	1,3E-03	1,2E-03
Th-229	a	M	7,34E+03 a	7,874E+09	1,2E+01		1,0E+03	1,0E+03	5,1E-04	5,1E-04
Th-230	a	M	7,70E+04 a	7,473E+08	7,0E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,3E-03	1,2E-03
Th-231	A	S	25,52 h	1,967E+16	3,8E+01	3,9E+01	1,0E+03	1,0E+03	<b>1,6E+02</b>	<b>1,6E-02</b>
Th-232	A	M	1,41E+10 a	4,060E+03	<b>8,2E+02</b>	<b>1,2E+00</b>	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Th-234		S	24,1 d	8,565E+14	4,0E+01	4,2E+01	3,1E-01	3,0E-01	6,8E+00	6,8E+00
Th-nat	A	M	1,41E+10 a	4,060E+03	4,5E-01	4,7E-01	2,5E-01	2,7E-01	unlimited	unlimited
Ti-44		S	47,3 a	6,366E+12	4,8E-01	4,8E-01	5,8E-01	6,1E-01	4,2E-01	4,2E-01
Tl-200		F	26,1 h	2,222E+16	8,4E-01	8,5E-01	<b>1,6E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	3,6E+02	3,6E+02
Tl-201		F	3,044 d	7,897E+15	1,2E+01	1,2E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
Tl-202		F	12,23 d	1,956E+15	2,3E+00	2,3E+00	1,0E+03	1,0E+03	2,5E+02	2,5E+02
Tl-204	A	F	3,779 a	1,717E+13	9,7E+02	9,9E+02	8,8E+00	9,6E+00	1,1E+02	1,1E+02
Tm-167		M	9,24 d	3,132E+15	7,3E+00	7,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	4,5E+01	4,5E+01
Tm-170		M	128,6 d	2,211E+14	2,0E+02	2,0E+02	2,4E+00	2,6E+00	7,6E+00	7,6E+00
Tm-171		M	1,92 a	4,033E+13	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	3,8E+01	3,8E+01

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
U-230	A	F	20,8 d	1,010E+15	5,1E+01		1,0E+03	1,0E+03	1,4E-01	1,4E-01
U-230	a	M	20,8 d	1,010E+15	5,1E+01		1,0E+03	1,0E+03	<b>4,2E-03</b>	<b>3,8E-03</b>
U-230	a	S	20,8 d	1,010E+15	5,1E+01		1,0E+03	1,0E+03	3,3E-03	3,3E-03
U-232	a	F	72 a	7,923E+11	4,7E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,3E-02	1,4E-02
U-232	a	M	72 a	7,923E+11	4,7E+02		1,0E+03	1,0E+03	6,9E-03	7,1E-03
U-232	a	S	72 a	7,923E+11	4,7E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,4E-03	1,4E-03
U-233	A	F	1,59E+05 a	3,584E+08	7,8E+02		1,0E+03	1,0E+03	8,8E-02	8,8E-02
U-233	a	M	1,59E+05 a	3,584E+08	7,8E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,6E-02	1,6E-02
U-233	a	S	1,59E+05 a	3,584E+08	7,8E+02		1,0E+03	1,0E+03	5,7E-03	5,7E-03
U-234	A	F	2,45E+05 a	2,313E+08	5,9E+02		1,0E+03	1,0E+03	9,1E-02	9,1E-02
U-234	a	M	2,45E+05 a	2,313E+08	5,9E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,6E-02	1,6E-02
U-234	a	S	2,45E+05 a	2,313E+08	5,9E+02		1,0E+03	1,0E+03	5,9E-03	5,9E-03
U-235	A	F	7,04E+08 a	8,002E+04	6,3E+00	6,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
U-235	A	M	7,04E+08 a	8,002E+04	6,3E+00	6,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
U-235	A	S	7,04E+08 a	8,002E+04	6,3E+00	6,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
U-236	A	F	2,34E+07 a	2,395E+06	6,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
U-236	a	M	2,34E+07 a	2,395E+06	6,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	1,7E-02	1,7E-02
U-236	a	S	2,34E+07 a	2,395E+06	6,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	6,3E-03	6,3E-03
U-238	A	F	4,47E+09 a	1,244E+04	7,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
U-238	a	M	4,47E+09 a	1,244E+04	7,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
U-238	a	S	4,47E+09 a	1,244E+04	7,5E+02		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
U-nat	A	S	2,20E+09 a	2,528E+04	6,4E-01	6,4E-01	<b>1,5E-01</b>	<b>1,3E-01</b>	unlimited	unlimited
U-dep	A	S	3,75E+09 a	1,483E+04	<b>4,2E+01</b>	<b>4,7E+01</b>	<b>3,7E-01</b>	<b>3,3E-01</b>	unlimited	unlimited
U-enr	A	S	4,09E+08 a	1,364E+05	<b>1,1E+02</b>	--	<b>3,6E+00</b>	--	<b>unlimited</b>	--

175

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
V-48		M	16,238 d	6,205E+15	3,8E-01	3,8E-01	2,7E+00	3,0E+00	2,2E+01	2,2E+01
V-49		M	330 d	2,991E+14	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
W-178		F	21,7 d	1,251E+15	8,6E+00	8,8E+00	1,0E+03	1,0E+03	6,6E+02	6,4E+02
W-181		F	121,2 d	2,203E+14	2,5E+01	2,6E+01	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03
W-185		F	75,1 d	3,478E+14	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	1,0E+03	3,6E+02	3,6E+02
W-187		F	23,9 h	2,595E+16	2,2E+00	2,2E+00	1,9E+00	2,1E+00	2,5E+02	2,5E+02
W-188		F	69,4 d	3,704E+14	1,9E+01	2,0E+01	<b>3,3E-01</b>	<b>3,7E-01</b>	<b>8,5E+01</b>	<b>4,4E+01</b>
Xe-122			20,1 h	4,732E+16	1,0E+00	1,1E+00	3,7E-01	4,0E-01	--	
Xe-123			2,08 h	4,536E+17	1,7E+00	1,8E+00	9,8E+00	1,0E+01	--	
Xe-127			36,41 d	1,046E+15	3,9E+00	3,9E+00	1,0E+03	1,0E+03	--	
Xe-131m			11,9 d	3,101E+15	3,8E+01	3,8E+01	1,0E+03	1,0E+03	--	
Xe-133			5,245 d	6,931E+15	2,0E+01	2,1E+01	1,0E+03	1,0E+03	--	
Xe-135			9,09 h	9,455E+16	4,5E+00	4,5E+00	3,2E+00	3,5E+00	--	
Y-87		S	80,3 h	1,661E+16	1,4E+00	1,4E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,3E+02	1,2E+02
Y-88		S	106,64 d	5,154E+14	4,2E-01	4,3E-01	1,0E+03	1,0E+03	1,2E+01	1,2E+01
Y-90		S	64 h	2,015E+16	1,0E+03	1,0E+03	3,0E-01	3,2E-01	3,3E+01	3,3E+01
Y-91		S	58,51 d	9,083E+14	3,1E+02	3,1E+02	5,5E-01	5,9E-01	6,0E+00	6,0E+00
Y-91m		S	49,71 min	1,540E+18	2,0E+00	2,0E+00	<b>1,8E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	1,0E+03	1,0E+03
Y-92		S	3,54 h	3,564E+17	4,4E+00	4,4E+00	2,1E-01	2,2E-01	2,5E+02	2,5E+02
Y-93		S	10,1 h	1,236E+17	1,3E+01	1,3E+01	2,5E-01	2,6E-01	1,2E+02	1,2E+02
Yb-169		S	32,01 d	8,934E+14	3,5E+00	3,5E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,8E+01	1,8E+01
Yb-175		S	4,19 d	6,591E+15	2,7E+01	2,7E+01	1,0E+03	1,0E+03	7,1E+01	7,1E+01
Zn-65 <sup>a)</sup>		S	243,9 d	3,051E+14	1,9E+00		1,0E+03		1,7E+01	
Zn-69		S	57 min	1,771E+18	1,0E+03	1,0E+03	2,9E+00	3,2E+00	1,0E+03	1,0E+03

Nuklid	Alphastrahler	chem. Form	Halbwertszeit	spez. Aktivität (Bq/g)	Q <sub>A</sub>		Q <sub>B</sub>		Q <sub>C</sub>	
					(TBq)		(TBq)		(TBq)	
					GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Zn-69m		S	13,76 h	1,223E+17	<b>2,6E+00</b>	<b>3,4E+00</b>	<b>2,9E+00</b>	<b>4,0E+00</b>	<b>1,9E+02</b>	<b>1,7E+02</b>
Zr-88		F	83,4 d	6,590E+14	2,7E+00	2,6E+00	1,0E+03	1,0E+03	1,4E+01	1,4E+01
Zr-93		F	1,53E+06 a	9,312E+07	k. W.		1,0E+03	1,0E+03	unlimited	unlimited
Zr-95		S	63,98 d	7,956E+14	<b>1,4E+00</b>	<b>1,8E+00</b>	<b>3,0E+02</b>	<b>4,5E+02</b>	9,1E+00	9,1E+00
Zr-97		S	16,9 h	7,080E+16	<b>7,0E-01</b>	<b>9,2E-01</b>	<b>2,7E-01</b>	<b>3,7E-01</b>	5,0E+01	5,0E+01

a) A<sub>1</sub>-/A<sub>2</sub>-Werte von Kr-79 und Zn-65 aus /IAEA 12/ entnommen, Q-Werte sind dort nicht enthalten.

**Tab. H.2** Vergleich der berechneten Q-Werte der Pfade  $Q_D$ ,  $Q_E$  und  $Q_F$  sowie der berechneten  $A_1$ - und  $A_2$ -Werte mit den in /IAEA 08/ tabellierten Werten

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	$Q_D$		$Q_E$		$Q_F$		$A_1$		$A_2$	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Ac-225	S	10 d	2,9E-01	3,0E-01	--	--	6,3E+01	--	<b>7E-01</b>	<b>8E-01</b>	6E-03	6E-03
Ac-227	F	21,773 a	3,5E+01	3,7E+01	--	--	9,3E-01	9,3E-01	9E-01	9E-01	9E-05	9E-05
Ac-228	F	6,13 h	4,9E-01	5,2E-01	--	--	1,0E+03	--	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>	5E-01	5E-01
Ag-105	S	41 d	2,4E+01	2,5E+01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Ag-108m	S	127 a	5,5E+00	6,0E+00	--	--	--	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Ag-110m	S	249,9 d	2,0E+00	2,1E+00	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Ag-111	S	7,45 d	5,9E-01	6,2E-01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	6E-01	6E-01
Al-26	M	7,16E+05 a	<b>8,1E-01</b>	<b>7,1E-01</b>	--	--	--	--	<b>4E-01</b>	<b>1E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>1E-01</b>
Am-241	M	432,2 a	<b>3,3E+02</b>	<b>3,8E+02</b>	--	--	1,3E+01	1,3E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
Am-242m	M	152 a	<b>9,8E-01</b>	<b>8,4E-01</b>	--	--	1,4E+01	1,4E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
Am-243	M	7,38E+03 a	4,0E-01	4,1E-01	--	--	1,3E+01	--	5E+00	5E+00	1E-03	1E-03
Ar-37		35,02 d	1,0E+03	1,0E+03	k. W.	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Ar-39		269 a	--	--	1,8E+01	1,8E+01	--	--	4E+01	4E+01	2E+01	2E+01
Ar-41		1,827 h	--	--	3,1E-01	3,1E-01	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
As-72	M	26 h	6,4E-01	6,5E-01	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
As-73	M	80,3 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
As-74	M	17,76 d	<b>1,4E+00</b>	<b>9,4E-01</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	<b>1E+00</b>	<b>9E-01</b>
As-76	M	26,32 h	<b>5,1E-01</b>	<b>5,9E-01</b>	--	--	--	--	<b>2E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>2E-01</b>	<b>3E-01</b>
As-77	M	38,8 h	6,3E-01	6,5E-01	--	--	--	--	2E+01	2E+01	<b>6E-01</b>	<b>7E-01</b>
At-211	M	7,214 h	<b>3,4E+02</b>	<b>4,4E+02</b>	--	--	1,0E+03	--	<b>3E+01</b>	<b>2E+01</b>	5E-01	5E-01
Au-193	S	17,65 h	1,8E+00	1,8E+00	--	--	--	--	7E+00	7E+00	2E+00	2E+00
Au-194	S	39,5 h	<b>7,1E+00</b>	<b>6,1E+00</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Au-195	S	183 d	5,1E+00	5,5E+00	--	--	--	--	1E+01	1E+01	<b>5E+00</b>	<b>6E+00</b>
Au-198	S	2,696 d	5,8E-01	6,1E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	6E-01	6E-01
Au-199	S	3,139 d	6,1E-01	6,4E-01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	6E-01	6E-01
Ba-131	F	11,8 d	2,1E+00	2,2E+00	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Ba-133	F	10,74 a	9,0E+00	1,0E+01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
Ba-133m	F	38,9 h	6,0E-01	6,2E-01	--	--	--	--	<b>1E+01</b>	<b>2E+01</b>	6E-01	6E-01
Ba-140	F	12,74 d	2,9E-01	3,1E-01	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>5E-01</b>	3E-01	3E-01
Be-7	S	53,3 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	2E+01	2E+01	2E+01	2E+01
Be-10	S	1,60E+06 a	5,7E-01	5,8E-01	--	--	--	--	4E+01	4E+01	6E-01	6E-01
Bi-205	M	15,31 d	1,1E+01	1,1E+01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Bi-206	M	6,243 d	1,1E+00	1,1E+00	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Bi-207	M	38 a	<b>4,4E+00</b>	<b>5,0E+00</b>	--	--	--	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Bi-210	M	5,012 d	5,9E-01	6,2E-01	--	--	1,0E+03	--	1E+00	1E+00	6E-01	6E-01
Bi-210m	M	3,00E+06 a	4,6E-01	4,9E-01	--	--	1,6E+02	--	6E-01	6E-01	2E-02	2E-02
Bi-212	M	60,55 min	<b>6,8E-01</b>	<b>5,8E-01</b>	--	--	1,0E+03	--	<b>5E-01</b>	<b>7E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
Bk-247	M	1,38E+03 a	1,4E+00	1,4E+00	--	--	7,7E+00	7,7E+00	8E+00	8E+00	8E-04	8E-04
Bk-249	M	320 d	<b>8,8E+00</b>	<b>1,2E+01</b>	--	--	1,0E+03	--	4E+01	4E+01	3E-01	3E-01
Br-76	M	16,2 h	<b>1,5E+00</b>	<b>9,9E-01</b>	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Br-77	M	56 h	<b>3,1E+01</b>	<b>2,3E+01</b>	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
Br-82	M	35,3 h	7,4E-01	7,7E-01	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
C-11	vapour	20,38 min	5,6E-01	5,8E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	6E-01	6E-01
C-14	vapour	5,73E+03 a	<b>2,6E+00</b>	<b>3,2E+00</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	3E+00	3E+00
Ca-41	M	1,40E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Ca-45	M	163 d	1,1E+00	1,2E+00	--	--	--	--	4E+01	4E+01	1E+00	1E+00

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Ca-47	M	4,53 d	3,2E-01	3,3E-01	--	--	--	--	<b>7E-01</b>	<b>3E+00</b>	3E-01	3E-01
Cd-109	F	464 d	<b>1,7E+00</b>	<b>1,9E+00</b>	--	--	--	--	3E+01	3E+01	2E+00	2E+00
Cd-113m	F	13,6 a	6,7E-01	6,9E-01	--	--	--	--	4E+01	4E+01	5E-01	5E-01
Cd-115	S	53,46 h	3,9E-01	3,9E-01	--	--	--	--	<b>2E+00</b>	<b>3E+00</b>	4E-01	4E-01
Cd-115m	S	44,6 d	5,5E-01	6,1E-01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Ce-139	S	137,66 d	2,2E+00	2,2E+00	--	--	--	--	7E+00	7E+00	2E+00	2E+00
Ce-141	S	32,501 d	5,7E-01	5,8E-01	--	--	--	--	2E+01	2E+01	6E-01	6E-01
Ce-143	S	33 h	5,6E-01	6,0E-01	--	--	--	--	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b>	6E-01	6E-01
Ce-144	S	284,3 d	<b>3,3E-01</b>	<b>3,8E-01</b>	--	--	--	--	2E-01	2E-01	2E-01	2E-01
Cf-248	M	333,5 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	6,1E+01	6,1E+01	4E+01	4E+01	6E-03	6E-03
Cf-249	M	350,6 a	4,5E+00	4,6E+00	--	--	7,6E+00		3E+00	3E+00	8E-04	8E-04
Cf-250	M	13,08 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	1,6E+01	1,6E+01	2E+01	2E+01	2E-03	2E-03
Cf-251	M	898 a	5,1E-01	5,2E-01	--	--	7,5E+00	7,5E+00	7E+00	7E+00	7E-04	7E-04
Cf-252	M	2,638 a	<b>4,5E+02</b>	<b>5,2E+02</b>	--	--	2,8E+01		1E-01	1E-01	3E-03	3E-03
Cf-253	M	17,81 d	1,1E+00	1,2E+00	--	--	4,2E+02	4,2E+02	4E+01	4E+01	4E-02	4E-02
Cf-254	M	60,5 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	1,4E+01		1E-03	1E-03	1E-03	1E-03
Cl-36	M	3,01E+05 a	6,2E-01	6,3E-01	--	--	--		9E+00	1E+01	6E-01	6E-01
Cl-38	M	37,21 min	<b>4,5E-01</b>	<b>5,6E-01</b>	--	--	--		2E-01	2E-01	2E-01	2E-01
Cm-240	M	27 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	1,7E+02	1,7E+02	4E+01	4E+01	2E-02	2E-02
Cm-241	M	32,8 d	1,4E+00	1,5E+00	--	--	1,0E+03		2E+00	2E+00	1E+00	1E+00
Cm-242	M	162,8 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	1,0E+02	1,0E+02	4E+01	4E+01	1E-02	1E-02
Cm-243	M	28,5 a	8,1E-01	8,3E-01	--	--	1,7E+01		<b>8E+00</b>	<b>9E+00</b>	<b>2E-03</b>	<b>1E-03</b>
Cm-244	M	18,11 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	<b>2,0E+01</b>	<b>1,6E+01</b>	2E+01	2E+01	2E-03	2E-03
Cm-245	M	8,50E+03 a	2,7E+00	2,7E+00	--	--	<b>1,3E+01</b>	<b>9,1E+00</b>	<b>1E+01</b>	<b>9E+00</b>	<b>1E-03</b>	<b>9E-04</b>

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit		Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
				(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
				GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Cm-246	M	4,73E+03	a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	<b>1,3E+01</b>	<b>9,1E+00</b>	<b>1E+01</b>	<b>9E+00</b>	<b>1E-03</b>	<b>9E-04</b>
Cm-247	M	1,56E+07	a	unlimited	unlimited	--	--	1,4E+01	--	3E+00	3E+00	1E-03	1E-03
Cm-248	M	3,39E+05	a	unlimited	unlimited	--	--	3,6E+00	--	2E-02	2E-02	<b>4E-04</b>	<b>3E-04</b>
Co-55	S	17,54	h	<b>9,4E-01</b>	<b>7,7E-01</b>	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Co-56	S	78,76	d	<b>1,3E+01</b>	<b>2,9E+00</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Co-57	S	270,9	d	1,3E+01	1,3E+01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	1E+01	1E+01
Co-58	S	70,8	d	<b>2,4E+01</b>	<b>3,8E+00</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Co-58m	S	9,15	h	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Co-60	S	5,271	a	9,2E-01	9,7E-01	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Cr-51	S	27,704	d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	3E+01	3E+01	3E+01	3E+01
Cs-129	F	32,06	h	3,6E+01	3,7E+01	--	--	--	--	4E+00	4E+00	4E+00	4E+00
Cs-131	F	9,69	d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	3E+01	3E+01	3E+01	3E+01
Cs-132	F	6,475	d	<b>1,2E+02</b>	<b>2,5E+01</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Cs-134	F	2,062	a	8,8E-01	9,2E-01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Cs-134m	F	2,9	h	6,2E-01	6,3E-01	--	--	--	--	4E+01	4E+01	6E-01	6E-01
Cs-135	F	2,30E+06	a	<b>1,3E+00</b>	<b>1,5E+00</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	1E+00	1E+00
Cs-136	F	13,1	d	6,7E-01	7,0E-01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Cs-137	F	30	a	6,0E-01	6,3E-01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	6E-01	6E-01
Cu-64	S	12,701	h	<b>2,0E+00</b>	<b>1,1E+00</b>	--	--	--	--	6E+00	6E+00	<b>2E+00</b>	<b>1E+00</b>
Cu-67	S	61,86	h	6,6E-01	6,9E-01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	7E-01	7E-01
Dy-159	M	144,4	d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	2E+01	2E+01	2E+01	2E+01
Dy-165	M	2,334	h	5,7E-01	6,1E-01	--	--	--	--	9E-01	9E-01	6E-01	6E-01
Dy-166	M	81,6	h	3,1E-01	3,4E-01	--	--	--	--	<b>4E-01</b>	<b>9E-01</b>	3E-01	3E-01
Er-169	M	9,3	d	9,1E-01	9,5E-01	--	--	--	--	4E+01	4E+01	9E-01	1E+00

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Er-171	M	7,52 h	4,8E-01	5,1E-01	--	--	--	--	8E-01	8E-01	5E-01	5E-01
Eu-147	M	24 d	3,6E+00	3,8E+00	--	--	1,0E+03	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Eu-148	M	54,5 d	1,9E+01	1,9E+01	--	--	1,0E+03	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Eu-149	M	93,1 d	7,2E+01	7,4E+01	--	--	1,0E+03	--	<b>1E+01</b>	<b>2E+01</b>	<b>1E+01</b>	<b>2E+01</b>
Eu-150	M	34,2 a	6,6E+00	7,1E+00	--	--	--	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Eu-150m	M	12,62 h	7,3E-01	6,9E-01	--	--	1,0E+03	--	<b>1E+00</b>	<b>2E+00</b>	7E-01	7E-01
Eu-152	M	13,33 a	<b>1,9E+00</b>	<b>1,3E+00</b>	--	--	--	--	9E-01	1E+00	9E-01	1E+00
Eu-152m	M	9,32 h	<b>9,5E-01</b>	<b>7,8E-01</b>	--	--	1,0E+03	--	8E-01	8E-01	8E-01	8E-01
Eu-154	M	8,8 a	5,2E-01	5,5E-01	--	--	--	--	9E-01	9E-01	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
Eu-155	M	4,96 a	<b>2,7E+00</b>	<b>3,2E+00</b>	--	--	--	--	2E+01	2E+01	3E+00	3E+00
Eu-156	M	15,19 d	6,1E-01	6,7E-01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	<b>6E-01</b>	<b>7E-01</b>
F-18	S	109,77 min	5,6E-01	5,8E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	6E-01	6E-01
Fe-52	M	8,275 h	4,0E-01	3,7E-01	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Fe-55	F	2,7 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Fe-59	M	44,529 d	8,5E-01	8,9E-01	--	--	--	--	9E-01	9E-01	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b>
Fe-60	F	1,00E+05 a	<b>2,9E+00</b>	<b>3,7E+00</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	2E-01	2E-01
Ga-67	M	78,26 h	<b>2,8E+00</b>	<b>3,2E+00</b>	--	--	--	--	7E+00	7E+00	3E+00	3E+00
Ga-68	M	68 min	6,5E-01	6,6E-01	--	--	--	--	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>
Ga-72	M	14,1 h	5,7E-01	6,2E-01	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>
Gd-146	M	48,3 d	1,1E+00	1,0E+00	--	--	--	--	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>
Gd-148	F	93 a	1,0E+03	--	--	--	2,0E+01	2,0E+01	2E+01	2E+01	2E-03	2E-03
Gd-153	F	242 d	8,5E+00	8,9E+00	--	--	--	--	9E+00	1E+01	<b>8E+00</b>	<b>9E+00</b>
Gd-159	M	18,56 h	6,1E-01	6,4E-01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	6E-01	6E-01
Ge-68	M	288 d	6,5E-01	6,6E-01	--	--	--	--	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Ge-71	M	11,8 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Ge-77	M	11,3 h	5,5E-01	6,0E-01	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
H-3	OBT	12,35 a	1,0E+03		--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Hf-172	F	1,87 a	<b>1,5E+00</b>	<b>1,7E+00</b>	--	--	--	--	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
Hf-175	M	70 d	4,5E+00	4,7E+00	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
Hf-181	M	42,4 d	4,8E-01	5,0E-01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	5E-01	5E-01
Hf-182	F	9,00E+06 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Hg-194	vapour	260 a	<b>7,1E+00</b>	<b>6,1E+00</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Hg-195m	vapour	41,6 h	7,3E-01	7,3E-01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	7E-01	7E-01
Hg-197	vapour	64,1 h	<b>1,1E+01</b>	<b>1,6E+01</b>	--	--	--	--	2E+01	2E+01	1E+01	1E+01
Hg-197m	vapour	23,8 h	3,5E-01	3,5E-01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>
Hg-203	vapour	46,6 d	1,0E+00	1,1E+00	--	--	--	--	5E+00	5E+00	1E+00	1E+00
Ho-166	M	26,8 h	<b>5,2E-01</b>	<b>5,8E-01</b>	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Ho-166m	M	1,20E+03 a	1,2E+00	1,3E+00	--	--	--	--	6E-01	6E-01	5E-01	5E-01
I-123	vapour	13,2 h	2,9E+00	2,9E+00	--	--	--	--	6E+00	6E+00	3E+00	3E+00
I-124	vapour	4,18 d	<b>9,5E+00</b>	<b>2,5E+00</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
I-125	vapour	60,14 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	2E+01	2E+01	<b>4E+00</b>	<b>3E+00</b>
I-126	vapour	13,02 d	<b>2,6E+00</b>	<b>1,3E+00</b>	--	--	--	--	2E+00	2E+00	<b>2E+00</b>	<b>1E+00</b>
I-129	vapour	1,57E+07 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
I-131	vapour	8,04 d	6,6E-01	6,9E-01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	7E-01	7E-01
I-132	vapour	2,3 h	5,6E-01	6,1E-01	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
I-133	vapour	20,8 h	5,8E-01	6,2E-01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	6E-01	6E-01
I-134	vapour	52,6 min	5,4E-01	5,9E-01	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
I-135	vapour	6,61 h	5,8E-01	6,2E-01	--	--	--	--	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
In-111	M	2,83 d	3,0E+00	3,0E+00	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
In-113m	M	1,658 h	1,5E+00	1,6E+00	--	--	--	--	4E+00	4E+00	2E+00	2E+00
In-114m	F	49,51 d	<b>5,5E-01</b>	<b>4,8E-01</b>	--	--	--	--	1E+01	1E+01	<b>6E-01</b>	<b>5E-01</b>
In-115m	M	4,486 h	1,1E+00	1,0E+00	--	--	--	--	7E+00	7E+00	1E+00	1E+00
Ir-189	S	13,3 d	1,7E+01	1,8E+01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	1E+01	1E+01
Ir-190	S	12,1 d	7,2E-01	7,5E-01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Ir-192	S	74,02 d	6,1E-01	6,1E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	6E-01	6E-01
Ir-194	S	19,15 h	<b>5,2E-01</b>	<b>5,9E-01</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
K-40	F	1,28E+09 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	9E-01	9E-01	<b>7E-01</b>	<b>9E-01</b>
K-42	F	12,36 h	<b>4,7E-01</b>	<b>5,7E-01</b>	--	--	--	--	2E-01	2E-01	2E-01	2E-01
K-43	F	22,6 h	5,9E-01	6,2E-01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	6E-01	6E-01
Kr-79 <sup>a)</sup>		35,04 h	--	--	1,7E+00	--	--	--	4E+00	4E+00	2E+00	2E+00
Kr-81		2,10E+05 a	--	--	7,9E+01	7,9E+01	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Kr-85		10,72 a	--	--	1,5E+01	1,4E+01	--	--	1E+01	1E+01	1E+01	1E+01
Kr-85m		4,48 h	--	--	2,8E+00	2,8E+00	--	--	<b>7E+00</b>	<b>8E+00</b>	3E+00	3E+00
Kr-87		76,3 min	--	--	4,8E-01	4,8E-01	--	--	2E-01	2E-01	2E-01	2E-01
La-137	F	6,00E+04 a	<b>unlimited</b>	<b>1,0E+03</b>	--	--	--	--	3E+01	3E+01	6E+00	6E+00
La-140	M	40,272 h	5,5E-01	6,0E-01	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>
Lu-172	S	6,7 d	<b>1,9E+00</b>	<b>2,2E+00</b>	--	--	--	--	6E-01	6E-01	6E-01	6E-01
Lu-173	S	1,37 a	<b>1,5E+01</b>	<b>1,7E+01</b>	--	--	--	--	8E+00	8E+00	8E+00	8E+00
Lu-174	M	3,31 a	<b>2,0E+01</b>	<b>2,9E+01</b>	--	--	--	--	<b>8E+00</b>	<b>9E+00</b>	<b>8E+00</b>	<b>9E+00</b>
Lu-174m	S	142 d	3,6E+01	3,7E+01	--	--	--	--	2E+01	2E+01	1E+01	1E+01
Lu-177	S	6,71 d	7,0E-01	7,3E-01	--	--	--	--	3E+01	3E+01	7E-01	7E-01
Mg-28	M	20,91 h	2,9E-01	3,2E-01	--	--	--	--	<b>2E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>2E-01</b>	<b>3E-01</b>

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Mn-52	M	5,591 d	<b>6,2E+00</b>	<b>1,9E+00</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Mn-53	M	3,70E+06 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Mn-54	M	312,5 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Mn-56	M	2,5785 h	<b>5,3E-01</b>	<b>6,0E-01</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Mo-93	S	3,50E+03 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	2E+01	2E+01
Mo-99	S	66 h	5,2E-01	5,5E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
N-13		9,965 min	5,5E-01	5,8E-01	--	--	--	--	9E-01	9E-01	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
Na-22	F	2,602 a	7,0E-01	6,5E-01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Na-24	F	15 h	5,5E-01	6,0E-01	--	--	--	--	2E-01	2E-01	2E-01	2E-01
Nb-93m	S	13,6 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	3E+01	3E+01
Nb-94	S	2,03E+04 a	6,8E-01	7,0E-01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Nb-95	S	35,15 d	<b>3,3E+00</b>	<b>4,0E+00</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Nb-97	S	72,1 min	5,7E-01	6,1E-01	--	--	--	--	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b>	6E-01	6E-01
Nd-147	S	10,98 d	6,1E-01	6,5E-01	--	--	--	--	<b>5E+00</b>	<b>6E+00</b>	6E-01	6E-01
Nd-149	S	1,73 h	4,8E-01	5,1E-01	--	--	--	--	6E-01	6E-01	5E-01	5E-01
Ni-59	carbonyl	7,50E+04 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Ni-63	carbonyl	96 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	3E+01	3E+01
Ni-65	carbonyl	2,52 h	5,5E-01	6,1E-01	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Np-235	M	396,1 d	9,8E+02	1,0E+03	--	--	1,0E+03	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Np-236	M	1,15E+05 a	5,1E-01	5,0E-01	--	--	1,7E+02	--	<b>8E+00</b>	<b>9E+00</b>	2E-02	2E-02
Np-236m	M	22,5 h	<b>3,0E+00</b>	<b>1,5E+00</b>	--	--	1,0E+03	--	2E+01	2E+01	<b>3E+00</b>	<b>2E+00</b>
Np-237	M	2,14E+06 a	unlimited	unlimited	--	--	2,4E+01	2,4E+01	2E+01	2E+01	2E-03	2E-03
Np-239	M	2,355 d	4,0E-01	4,1E-01	--	--	1,0E+03	--	7E+00	7E+00	4E-01	4E-01
Os-185	S	94 d	2,2E+01	2,3E+01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Os-191	S	15,4 d	2,1E+00	2,3E+00	--	--	--	--	1E+01	1E+01	2E+00	2E+00
Os-191m	S	13,03 h	<b>1,6E+01</b>	<b>2,7E+01</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	<b>2E+01</b>	<b>3E+01</b>
Os-193	S	30 h	5,6E-01	5,9E-01	--	--	--	--	<b>1E+00</b>	<b>2E+00</b>	6E-01	6E-01
Os-194	S	6 a	<b>5,2E-01</b>	<b>5,9E-01</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
P-32	M	14,29 d	5,4E-01	6,0E-01	--	--	--	--	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>
P-33	M	25,4 d	1,1E+00	1,2E+00	--	--	--	--	4E+01	4E+01	1E+00	1E+00
Pa-230	S	17,4 d	<b>8,8E+00</b>	<b>2,1E+00</b>	--	--	7,0E+02	--	2E+00	2E+00	7E-02	7E-02
Pa-231	M	3,28E+04 a	1,7E+01	1,8E+01	--	--	3,8E+00	3,8E+00	4E+00	4E+00	4E-04	4E-04
Pa-233	S	27 d	6,2E-01	6,5E-01	--	--	1,0E+03	--	5E+00	5E+00	<b>6E-01</b>	<b>7E-01</b>
Pb-201	F	9,4 h	3,2E+00	3,3E+00	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Pb-202	F	3,00E+05 a	<b>unlimited</b>	<b>1,6E+01</b>	--	--	--	--	<b>unlimited</b>	<b>4E+01</b>	<b>unlimited</b>	<b>2E+01</b>
Pb-203	F	52,05 h	2,5E+00	2,6E+00	--	--	--	--	4E+00	4E+00	3E+00	3E+00
Pb-205	F	1,43E+07 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Pb-210	F	22,3 a	5,9E-01	6,2E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	<b>6E-02</b>	<b>5E-02</b>
Pb-212	F	10,64 h	2,9E-01	2,7E-01	--	--	1,0E+03	--	<b>5E-01</b>	<b>7E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>2E-01</b>
Pd-103	S	16,96 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Pd-107	S	6,50E+06 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Pd-109	S	13,427 h	4,4E-01	4,7E-01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>
Pm-143	M	265 d	<b>3,2E+02</b>	<b>3,6E+02</b>	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
Pm-144	M	363 d	3,1E+01	3,4E+01	--	--	1,0E+03	--	7E-01	7E-01	7E-01	7E-01
Pm-145	M	17,7 a	9,6E+02	1,0E+03	--	--	--	--	3E+01	3E+01	1E+01	1E+01
Pm-147	M	2,6234 a	<b>1,5E+00</b>	<b>1,7E+00</b>	--	--	1,0E+03	--	4E+01	4E+01	2E+00	2E+00
Pm-148m	S	41,3 d	7,1E-01	7,2E-01	--	--	1,0E+03	--	<b>5E-01</b>	<b>8E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>7E-01</b>
Pm-149	S	53,08 h	5,9E-01	6,2E-01	--	--	1,0E+03	--	2E+00	2E+00	6E-01	6E-01

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Pm-151	S	28,4 h	5,8E-01	6,1E-01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	6E-01	6E-01
Po-210	M	138,38 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	1,7E+02	1,7E+02	4E+01	4E+01	2E-02	2E-02
Pr-142	S	19,13 h	<b>5,3E-01</b>	<b>6,0E-01</b>	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>
Pr-143	S	13,56 d	6,0E-01	6,3E-01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	6E-01	6E-01
Pt-188	F	10,2 d	7,7E-01	7,8E-01	--	--	--	--	<b>6E-01</b>	<b>1E+00</b>	<b>6E-01</b>	<b>8E-01</b>
Pt-191	F	2,8 d	3,3E+00	3,5E+00	--	--	--	--	4E+00	4E+00	3E+00	3E+00
Pt-193	F	50 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Pt-193m	F	4,33 d	5,5E-01	5,5E-01	--	--	--	--	4E+01	4E+01	5E-01	5E-01
Pt-195m	F	4,02 d	4,8E-01	4,8E-01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	5E-01	5E-01
Pt-197	F	18,3 h	6,0E-01	6,3E-01	--	--	--	--	2E+01	2E+01	6E-01	6E-01
Pt-197m	F	94,4 min	5,8E-01	5,8E-01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	6E-01	6E-01
Pu-236	M	2,851 a	6,1E+02	6,5E+02	--	--	2,8E+01	2,8E+01	3E+01	3E+01	3E-03	3E-03
Pu-237	S	45,3 d	1,1E+02	1,2E+02	--	--	1,0E+03	--	2E+01	2E+01	2E+01	2E+01
Pu-238	M	87,74 a	9,5E+02	1,0E+03	--	--	1,2E+01	1,2E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
Pu-239	M	2,41E+04 a	unlimited	unlimited	--	--	1,1E+01	1,1E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
Pu-240	M	6,54E+03 a	unlimited	unlimited	--	--	1,1E+01	1,1E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
Pu-241	M	14,4 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	5,9E+02	--	4E+01	4E+01	6E-02	6E-02
Pu-242	M	3,76E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	1,1E+01	1,1E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
Pu-244	M	8,26E+07 a	unlimited	unlimited	--	--	1,1E+01	--	4E-01	4E-01	1E-03	1E-03
Ra-223	M	11,434 d	2,4E-01	2,6E-01	--	--	7,2E+01	--	4E-01	4E-01	7E-03	7E-03
Ra-224	M	3,66 d	2,9E-01	2,7E-01	--	--	1,7E+02	--	<b>5E-01</b>	<b>4E-01</b>	2E-02	2E-02
Ra-225	M	14,8 d	2,2E-01	2,3E-01	--	--	8,6E+01	--	<b>7E-01</b>	<b>2E-01</b>	<b>9E-03</b>	<b>4E-03</b>
Ra-226	M	1,60E+03 a	2,5E-01	2,7E-01	--	--	1,6E+02	--	2E-01	2E-01	3E-03	3E-03
Ra-228	M	5,75 a	4,9E-01	5,2E-01	--	--	--	--	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>	2E-02	2E-02

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Rb-81	F	4,58 h	<b>1,2E+00</b>	<b>8,3E-01</b>	--	--	--	--	2E+00	2E+00	<b>1E+00</b>	<b>8E-01</b>
Rb-83	F	86,2 d	4,0E+02	4,3E+02	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Rb-84	F	32,77 d	<b>8,5E+00</b>	<b>2,2E+00</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Rb-86	F	18,66 d	5,5E-01	6,1E-01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Rb-87	F	4,70E+10 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Rb-nat	F	4,70E+10 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Re-184	M	38 d	1,7E+00	1,7E+00	--	--	1,0E+03	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Re-184m	M	165 d	1,1E+00	1,2E+00	--	--	--	--	3E+00	3E+00	1E+00	1E+00
Re-186	M	90,64 h	5,9E-01	5,9E-01	--	--	1,0E+03	--	2E+00	2E+00	6E-01	6E-01
Re-187	M	5,00E+10 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Re-188	M	16,98 h	<b>4,8E-01</b>	<b>5,4E-01</b>	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>
Re-189	M	24,3 h	5,4E-01	5,7E-01	--	--	--	--	<b>2E+00</b>	<b>3E+00</b>	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
Re-nat	M	5,00E+10 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Rh-99	S	16 d	<b>1,5E+01</b>	<b>7,5E+00</b>	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Rh-101	S	3,2 a	2,5E+00	2,6E+00	--	--	--	--	4E+00	4E+00	3E+00	3E+00
Rh-102	S	2,9 a	5,0E+01	5,4E+01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Rh-102m	S	207 d	<b>5,0E+00</b>	<b>1,8E+00</b>	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Rh-103m	S	56,12 min	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Rh-105	S	35,36 h	7,6E-01	7,9E-01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	8E-01	8E-01
Rn-222		3,8235 d	--	--	4,2E-03	4,2E-03	(--)	--	<b>2E-01</b>	<b>3E-01</b>	4E-03	4E-03
Ru-97	M	2,9 d	1,3E+01	1,3E+01	--	--	--	--	5E+00	5E+00	5E+00	5E+00
Ru-103	S	39,28 d	<b>1,4E+00</b>	<b>1,6E+00</b>	--	--	--	--	2E+00	2E+00	<b>1E+00</b>	<b>2E+00</b>
Ru-105	S	4,44 h	5,8E-01	6,1E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	6E-01	6E-01
Ru-106	S	368,2 d	<b>4,7E-01</b>	<b>5,7E-01</b>	--	--	--	--	2E-01	2E-01	2E-01	2E-01

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
S-35	M	87,44 d	<b>2,5E+00</b>	<b>3,0E+00</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	3E+00	3E+00
Sb-122	M	2,7 d	5,8E-01	6,2E-01	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Sb-124	M	60,2 d	6,4E-01	6,9E-01	--	--	--	--	6E-01	6E-01	6E-01	6E-01
Sb-125	M	2,77 a	1,3E+00	1,4E+00	--	--	--	--	2E+00	2E+00	1E+00	1E+00
Sb-126	M	12,4 d	6,7E-01	7,1E-01	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Sc-44	S	3,927 h	6,0E-01	6,2E-01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Sc-46	S	83,83 d	8,1E-01	8,5E-01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	5E-01	5E-01
Sc-47	S	3,351 d	6,8E-01	7,0E-01	--	--	--	--	1E+01	1E+01	7E-01	7E-01
Sc-48	S	43,7 h	6,2E-01	6,5E-01	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Se-75	M	119,8 d	9,7E+00	1,0E+01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
Se-79	M	6,50E+04 a	<b>1,9E+00</b>	<b>2,3E+00</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	2E+00	2E+00
Si-31	S	157,3 min	5,5E-01	6,0E-01	--	--	--	--	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
Si-32	S	450 a	<b>1,4E+00</b>	<b>1,6E+00</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	5E-01	5E-01
Sm-145	M	340 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	1E+01	1E+01	1E+01	1E+01
Sm-147	M	1,06E+11 a	<b>unlimited</b>		--	--	5,6E+01		unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Sm-151	M	90 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	1E+01	1E+01
Sm-153	M	46,7 h	5,9E-01	6,1E-01	--	--	--	--	<b>8E+00</b>	<b>9E+00</b>	6E-01	6E-01
Sn-113	M	115,1 d	1,5E+00	1,6E+00	--	--	--	--	4E+00	4E+00	2E+00	2E+00
Sn-117m	M	13,61 d	4,0E-01	4,0E-01	--	--	--	--	7E+00	7E+00	4E-01	4E-01
Sn-119m	M	293 d	<b>2,2E+02</b>	<b>1,0E+03</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	3E+01	3E+01
Sn-121m	M	55 a	<b>9,9E-01</b>	<b>8,5E-01</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	<b>1E+00</b>	<b>9E-01</b>
Sn-123	M	129,2 d	5,7E-01	6,1E-01	--	--	--	--	<b>7E-01</b>	<b>8E-01</b>	6E-01	6E-01
Sn-125	M	9,64 d	<b>5,5E-01</b>	<b>6,2E-01</b>	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>
Sn-126	M	1,00E+05 a	3,6E-01	3,6E-01	--	--	--	--	6E-01	6E-01	4E-01	4E-01

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Sr-82	S	25 d	<b>5,1E-01</b>	<b>5,9E-01</b>	--	--	--	--	2E-01	2E-01	2E-01	2E-01
Sr-85	S	64,84 d	7,9E+01	8,5E+01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Sr-85m	S	69,5 min	1,8E+01	1,8E+01	--	--	--	--	5E+00	5E+00	5E+00	5E+00 <sup>b)</sup>
Sr-87m	S	2,805 h	3,1E+00	3,3E+00	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
Sr-89	S	50,5 d	5,6E-01	6,1E-01	--	--	--	--	6E-01	6E-01	6E-01	6E-01
Sr-90	S	29,12 a	2,9E-01	3,1E-01	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Sr-91	S	9,5 h	<b>5,3E-01</b>	<b>6,0E-01</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Sr-92	S	2,71 h	<b>6,7E-01</b>	<b>3,1E-01</b>	--	--	--	--	<b>8E-01</b>	<b>1E+00</b>	<b>7E-01</b>	<b>3E-01</b>
Ta-178m	S	2,2 h	7,6E-01	8,2E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	8E-01	8E-01
Ta-179	S	664,9 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	3E+01	3E+01	3E+01	3E+01
Ta-182	S	115 d	5,1E-01	5,4E-01	--	--	--	--	9E-01	9E-01	5E-01	5E-01
Tb-157	M	150 a	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Tb-158	M	150 a	<b>2,7E+00</b>	<b>1,8E+00</b>	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Tb-160	M	72,3 d	5,4E-01	5,8E-01	--	--	--	--	1E+00	1E+00	<b>5E-01</b>	<b>6E-01</b>
Tc-95m	M	61 d	<b>1,4E+01</b>	<b>1,2E+01</b>	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Tc-96	M	4,28 d	<b>1,2E+02</b>	<b>1,4E+02</b>	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Tc-96m	M	51,5 min	<b>1,0E+03</b>	<b>1,4E+02</b>	--	--	--	--	<b>2E+01</b>	<b>4E-01</b>	<b>2E+01</b>	<b>4E-01</b>
Tc-97	M	2,60E+06 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Tc-97m	M	87 d	<b>1,2E+00</b>	<b>1,4E+00</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	1E+00	1E+00
Tc-98	M	4,20E+06 a	6,5E-01	6,8E-01	--	--	--	--	8E-01	8E-01	7E-01	7E-01
Tc-99	M	2,13E+05 a	8,5E-01	8,8E-01	--	--	--	--	4E+01	4E+01	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b>
Tc-99m	M	6,02 h	4,3E+00	4,3E+00	--	--	--	--	1E+01	1E+01	4E+00	4E+00
Te-121	M	17 d	9,4E+01	1,0E+02	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Te-121m	M	154 d	<b>2,1E+00</b>	<b>2,5E+00</b>	--	--	--	--	5E+00	5E+00	<b>2E+00</b>	<b>3E+00</b>

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Te-123m	M	119,7 d	1,1E+00	1,2E+00	--	--	--	--	8E+00	8E+00	1E+00	1E+00
Te-125m	M	58 d	8,5E-01	9,1E-01	--	--	--	--	2E+01	2E+01	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b>
Te-127	M	9,35 h	6,4E-01	6,6E-01	--	--	--	--	2E+01	2E+01	<b>6E-01</b>	<b>7E-01</b>
Te-127m	M	109 d	4,7E-01	5,0E-01	--	--	--	--	2E+01	2E+01	5E-01	5E-01
Te-129	M	69,6 min	5,6E-01	6,1E-01	--	--	--	--	<b>6E-01</b>	<b>7E-01</b>	6E-01	6E-01
Te-129m	M	33,6 d	<b>4,9E-01</b>	<b>4,4E-01</b>	--	--	--	--	8E-01	8E-01	<b>5E-01</b>	<b>4E-01</b>
Te-131m	M	30 h	5,3E-01	4,9E-01	--	--	--	--	7E-01	7E-01	5E-01	5E-01
Te-132	M	78,2 h	3,9E-01	4,2E-01	--	--	--	--	<b>4E-01</b>	<b>5E-01</b>	4E-01	4E-01
Th-227	S	18,718 d	4,6E+00	4,7E+00	--	--	5,2E+01	--	1E+01	1E+01	5E-03	5E-03
Th-228	S	1,9131 a	2,8E-01	2,7E-01	--	--	1,3E+01	--	5E-01	5E-01	1E-03	1E-03
Th-229	M	7,34E+03 a	1,7E+00	1,8E+00	--	--	5,1E+00	5,1E+00	5E+00	5E+00	5E-04	5E-04
Th-230	M	7,70E+04 a	unlimited	unlimited	--	--	1,3E+01	1,2E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
Th-231	S	25,52 h	1,1E+00	1,2E+00	--	--	1,0E+03	--	4E+01	4E+01	<b>1E+00</b>	<b>2E-02</b>
Th-232	M	1,41E+10 a	unlimited	unlimited	--	--	1,2E+01	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Th-234	S	24,1 d	<b>4,3E-01</b>	<b>4,9E-01</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Th-nat	M	1,41E+10 a	unlimited	unlimited	--	--	1,2E+01	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Ti-44	S	47,3 a	6,0E-01	6,2E-01	--	--	--	--	5E-01	5E-01	4E-01	4E-01
Tl-200	F	26,1 h	7,1E+00	7,1E+00	--	--	--	--	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b>	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b>
Tl-201	F	3,044 d	3,6E+00	4,0E+00	--	--	--	--	1E+01	1E+01	4E+00	4E+00
Tl-202	F	12,23 d	1,6E+01	1,6E+01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Tl-204	F	3,779 a	6,8E-01	6,9E-01	--	--	1,0E+03	--	9E+00	1E+01	7E-01	7E-01
Tm-167	M	9,24 d	8,1E-01	8,2E-01	--	--	--	--	7E+00	7E+00	8E-01	8E-01
Tm-170	M	128,6 d	5,8E-01	6,1E-01	--	--	--	--	<b>2E+00</b>	<b>3E+00</b>	6E-01	6E-01
Tm-171	M	1,92 a	<b>5,2E+01</b>	<b>1,0E+02</b>	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
U-230	F	20,8 d	2,9E+00	3,1E+00	--	--	1,0E+03	--	4E+01	4E+01	1E-01	1E-01
U-230	M	20,8 d	2,9E+00	3,1E+00	--	--	<b>4,2E+01</b>	<b>3,8E+01</b>	4E+01	4E+01	4E-03	4E-03
U-230	S	20,8 d	2,9E+00	3,1E+00	--	--	3,3E+01	3,3E+01	3E+01	3E+01	3E-03	3E-03
U-232	F	72 a	1,8E+02	1,8E+02	--	--	1,3E+02	1,4E+02	4E+01	4E+01	1E-02	1E-02
U-232	M	72 a	1,8E+02	1,8E+02	--	--	6,9E+01	7,1E+01	4E+01	4E+01	7E-03	7E-03
U-232	S	72 a	1,8E+02	1,8E+02	--	--	1,4E+01	1,4E+01	1E+01	1E+01	1E-03	1E-03
U-233	F	1,59E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	8,8E+02	--	4E+01	4E+01	9E-02	9E-02
U-233	M	1,59E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	1,6E+02	1,6E+02	4E+01	4E+01	2E-02	2E-02
U-233	S	1,59E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	5,7E+01	5,7E+01	4E+01	4E+01	6E-03	6E-03
U-234	F	2,45E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	9,1E+02	--	4E+01	4E+01	9E-02	9E-02
U-234	M	2,45E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	1,6E+02	1,6E+02	4E+01	4E+01	2E-02	2E-02
U-234	S	2,45E+05 a	unlimited	unlimited	--	--	5,9E+01	5,9E+01	4E+01	4E+01	6E-03	6E-03
U-235	F	7,04E+08 a	unlimited	unlimited	--	--	9,8E+02	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-235	M	7,04E+08 a	unlimited	unlimited	--	--	1,8E+02	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-235	S	7,04E+08 a	unlimited	unlimited	--	--	6,5E+01	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-236	F	2,34E+07 a	unlimited	unlimited	--	--	9,6E+02	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-236	M	2,34E+07 a	unlimited	unlimited	--	--	1,7E+02	1,7E+02	4E+01	4E+01	2E-02	2E-02
U-236	S	2,34E+07 a	unlimited	unlimited	--	--	6,3E+01	6,3E+01	4E+01	4E+01	6E-03	6E-03
U-238	F	4,47E+09 a	unlimited	unlimited	--	--	1,0E+03	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-238	M	4,47E+09 a	unlimited	unlimited	--	--	1,9E+02	1,9E+02	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-238	S	4,47E+09 a	unlimited	unlimited	--	--	6,8E+01	6,8E+01	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-nat	S	2,20E+09 a	unlimited	unlimited	--	--	6,3E+01	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-dep	S	3,75E+09 a	unlimited	unlimited	--	--	6,7E+01	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
U-enr	S	4,09E+08 a	<b>unlimited</b>	--	--	--	6,0E+01	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
V-48	M	16,238 d	<b>2,2E+00</b>	<b>1,1E+00</b>	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
V-49	M	330 d	1,0E+03	1,0E+03	--	--	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
W-178	F	21,7 d	<b>4,0E+00</b>	<b>4,6E+00</b>	--	--	--	--	9E+00	9E+00	<b>4E+00</b>	<b>5E+00</b>
W-181	F	121,2 d	4,9E+02	5,3E+02	--	--	--	--	<b>2E+01</b>	<b>3E+01</b>	<b>2E+01</b>	<b>3E+01</b>
W-185	F	75,1 d	7,8E-01	8,1E-01	--	--	--	--	4E+01	4E+01	8E-01	8E-01
W-187	F	23,9 h	5,9E-01	6,2E-01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	6E-01	6E-01
W-188	F	69,4 d	3,2E-01	3,5E-01	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>	3E-01	3E-01
Xe-122		20,1 h	--	--	8,8E+00	8,8E+00	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Xe-123		2,08 h	--	--	6,8E-01	6,8E-01	--	--	2E+00	2E+00	7E-01	7E-01
Xe-127		36,41 d	--	--	1,7E+00	1,7E+00	--	--	4E+00	4E+00	2E+00	2E+00
Xe-131m		11,9 d	--	--	4,0E+01	4,0E+01	--	--	4E+01	4E+01	4E+01	4E+01
Xe-133		5,245 d	--	--	1,4E+01	1,5E+01	--	--	2E+01	2E+01	1E+01	1E+01
Xe-135		9,09 h	--	--	1,7E+00	1,8E+00	--	--	3E+00	3E+00	2E+00	2E+00
Y-87	S	80,3 h	3,1E+00	3,2E+00	--	--	--	--	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
Y-88	S	106,64 d	<b>1,0E+03</b>	<b>2,2E+02</b>	--	--	--	--	4E-01	4E-01	4E-01	4E-01
Y-90	S	64 h	<b>5,2E-01</b>	<b>5,9E-01</b>	--	--	--	--	3E-01	3E-01	3E-01	3E-01
Y-91	S	58,51 d	5,6E-01	6,1E-01	--	--	--	--	6E-01	6E-01	6E-01	6E-01
Y-91m	S	49,71 min	1,1E+01	1,2E+01	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Y-92	S	3,54 h	<b>4,7E-01</b>	<b>5,6E-01</b>	--	--	--	--	2E-01	2E-01	2E-01	2E-01
Y-93	S	10,1 h	<b>5,0E-01</b>	<b>5,8E-01</b>	--	--	--	--	<b>2E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>2E-01</b>	<b>3E-01</b>
Yb-169	S	32,01 d	1,0E+00	1,0E+00	--	--	--	--	<b>3E+00</b>	<b>4E+00</b>	1E+00	1E+00
Yb-175	S	4,19 d	<b>8,2E-01</b>	<b>4,2E+01</b>	--	--	--	--	3E+01	3E+01 <sup>c)</sup>	<b>8E-01</b>	<b>9E-01</b> <sup>c)</sup>
Zn-65 <sup>a)</sup>	S	243,9 d	1,0E+03	--	--	--	--	--	2E+00	2E+00	2E+00	2E+00
Zn-69	S	57 min	5,9E-01	6,2E-01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	6E-01	6E-01

Nuklid	chem. Form	Halbwertszeit	Q <sub>D</sub>		Q <sub>E</sub>		Q <sub>F</sub>		A <sub>1</sub>		A <sub>2</sub>	
			(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)		(TBq)	
			GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/	GRS	/IAEA 08/
Zn-69m	S	13,76 h	5,6E-01	5,9E-01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	6E-01	6E-01
Zr-88	F	83,4 d	2,0E+01	2,1E+01	--	--	--	--	3E+00	3E+00	3E+00	3E+00
Zr-93	F	1,53E+06 a	unlimited	unlimited	--	--	--	--	unlimited	unlimited	unlimited	unlimited
Zr-95	S	63,98 d	8,1E-01	8,5E-01	--	--	--	--	<b>1E+00</b>	<b>2E+00</b>	8E-01	8E-01
Zr-97	S	16,9 h	<b>2,7E-01</b>	<b>5,6E-01</b>	--	--	--	--	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>	<b>3E-01</b>	<b>4E-01</b>

- a) A<sub>1</sub>-/A<sub>2</sub>-Werte von Kr-79 und Zn-65 aus /IAEA 12/ entnommen, Q-Werte sind dort nicht enthalten.
- b) A<sub>2</sub>-Wert von Sr-85m aus /IAEA 12/ entnommen; in /IAEA 08/ ist A<sub>2</sub> mit 2·10<sup>0</sup> angegeben.
- c) A<sub>1</sub>-/A<sub>2</sub>-Werte von Yb-175 aus /IAEA 12/ entnommen; in /IAEA 08/ ist A<sub>1</sub> mit 2·10<sup>0</sup> und A<sub>2</sub> mit 2·10<sup>0</sup> angegeben.

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**ISBN 978-3-944161-23-5**