Ansätze zur Berechnung der grundlegenden Aktivitätsgrenzen der Transportvorschriften

Abschlussbericht zu AP 2

GRS - 603

Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH

Ansätze zur Berechnung der grundlegenden Aktivitätsgrenzen der Transportvorschriften

Abschlussbericht zu AP 2

Holger Eberhardt
Janis Endres

September 2020

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4717E03370 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.

GRS - 603
ISBN 978-3-947685-89-9

Deskriptoren

A-Werte, MCBAS, Monte-Carlo Simulationen, Q-System, Transportsicherheit, Transportvorschriften

Kurzfassung

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 des Vorhabens 4717E03370 wurden die Ansätze zur Berechnung der grundlegenden Aktivitätsgrenzen der Transportvorschriften weiterentwickelt. Dazu wurde die Arbeit innerhalb einer internationalen Arbeitsgruppe intensiviert, um die Überarbeitung des aktuellen Q-Systems zu unterstützen. Diese Überarbeitung soll aktuelle Nukliddaten der neuen ICRP 107, sowie Dosisleistungskoeffizienten der ICRP 116 verwenden. Zusätzlich sollen Berechnungsmethoden angewendet werden, die dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Auf dieser Grundlage wurde der GRS-Codes MCBAS weiterentwickelt, mit dessen Hilfe basierend auf Monte-Carlo Simulationen neue Q-Werte und A_1-Werte berechnet werden sollen. Der Stand der Arbeiten sowie vorläufige Ergebnisse werden in diesem Bericht präsentiert und diskutiert.

Abstract

Within the scope of work package 2 of the project 4717E03370, basic approaches of calculations for activity limits related to transport regulations have been developed further. An international working group has been supported that is currently reviewing the current Q-system on the basis of new nuclear data from ICRP 107 and conversion coefficients from ICRP 116. Furthermore, the calculation method is under review regarding state of the art Monte-Carlo simulation tools. Hence, GRS continued the development of the code MCBAS for calculating Q- and A_1-values based on this new basis. The status and preliminary results as well as discussions are presented in this report.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung I

1 Einleitung 1

2 Das Q-System 3

3 Internationale Arbeitsgruppe 7

3.1 Ergebnisse der Arbeitsgruppe 11

3.1.1 Bestrahlungsgeometrie 13

3.1.2 Dosiskonversionskoeffizienten für die Haut 14

3.1.3 Tochternuklide 15

3.1.4 Augenlinsendosis 15

3.1.5 Neutronenquellen 16

3.1.6 Zwischenergebnisse für A_1-Werte 16

3.1.7 Modell für Q_C 17

3.1.8 Modell für Q_D 18

3.1.9 Modell für Q_E 19

3.2 SOFT 19

4 Programmentwicklung und Ergebnisse der GRS 25

4.1 Entwicklungen zu A_1-Werten 25

4.1.1 Generelle Annahmen 25

4.1.2 Geometrie 25

4.1.3 Festlegungen für die Simulationen 26

4.1.4 Monte-Carlo Based A-value Simulator (MCBAS) für A_1-Werte 27

4.2 Ergebnisse für A_1-Werte 28

4.3 Entwicklungen zu Q_D 29

4.4 Entwicklungen zu Q_E 31

4.5 Beiträge zu SOFT 32

5 Diskussion und Ausblick 41

5.1 Finalisierung der A_1-Werte 41
5.2 Modellentwicklung für A_2-Werte 42
5.3 Neutronenquellen 42

Literatur 45

Abkürzungsverzeichnis 51

Abbildungsverzeichnis 53

Tabellenverzeichnis 55

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 14/. Auf diese Weise wurden die in den Transportvorschriften angegebenen Akti-vitätsgrenzwerte für radioaktive Stoffe in besonderer Form[1] (A_1-Wert) sowie für alle an-deren 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 Vorläuferforschungsvorhabens 3611R03300, Arbeitspaket 4, Teilarbeitsgebiete 2, 3 und 4 wurde daher das Rechentool Ber*QA*Trans entwickelt, das in Anlehnung an die Methodik der IAEO die Bestimmung von Aktivitätsgrenzwerten auf Basis des Q-Systems ermöglicht /BÜT 14/. 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. Im Rahmen des Vorläuferforschungsvorhabens 3614R03343, Arbeitspaket 5, wurde BerQATrans weiterentwickelt und finalisiert /GRS 17/.

Zum damaligen Zeitpunkt beschäftigte sich nicht nur die GRS mit diesem Thema, sondern es wurde auch international bearbeitet. Daher traten Mitglieder des Transport Safety Standards Committee der IAEO (TRANSSC) an BASE, GRS, das Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), die Japan Nuclear Energy Safety Organisation

[1] Ein radioaktiver Stoff in besonderer Form ist gemäß den Transportvorschriften /IAEA 18/ entweder ein nicht dispergierbarer fester radioaktiver Stoff oder eine dichte Kapsel, die radioaktive Stoffe enthält.

(JNES), Public Health England (PHE) und das World Nuclear Transport Institute (WNTI) heran und schlugen ein Treffen zur Erörterung von Fragestellungen in Bezug auf die Transportvorschriften der IAEO /IAEA 14/, /IAEA 18/ vor. Hauptthemen waren das Q-System und die Berechnung von *Q*- und *A*-Werten sowie die Beförderung von LSA-III-Stoffen. Dieses Treffen fand im September 2013 mit 12 Teilnehmern aus den o. g. Organisationen sowie einem Consultant bei der GRS in Köln statt. Als Ergebnis dieses Treffens wurde eine internationale Arbeitsgruppe zur Bearbeitung des Themenkomplexes Q-System gegründet. Ziel ist die Bereitstellung einer gemeinsamen wissenschaftlich fundierten und dokumentierten Basis für die Berechnung der grundlegenden Aktivitätsgrenzwerte in den Transportvorschriften, die den Schutz nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik gewährleistet.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Entwicklung von Programmen für die Berechnung von *A*-Werten sowie die Arbeit innerhalb der internationalen Arbeitsgruppe. Kapitel 2 gibt eine Einführung in das aktuelle Q-System. Kapitel 3 behandelt die Entwicklungen innerhalb der internationalen Arbeitsgruppe und dessen Vorgehensweise. Weiterhin werden hier die bisherigen Ergebnisse der Arbeitsgruppe vorgestellt. Kapitel 4 beschreibt die Weiterentwicklungen des Programms MCBAS (Monte-Carlo Based A-value Simulator) zur Berechnung von Q-Werten. Die ersten vorläufigen Ergebnisse werden ebenfalls in diesem Kapitel präsentiert und diskutiert. Eine weiterführende Diskussion und ein Ausblick werden in Kapitel 5 gegeben.

2 Das Q-System

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 IAEO-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 die äußere Exposition durch 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 und somit die Summe über die Expositionspfade über 50 mSv liegen. 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 500 mSv oder zu einer Dosis der Augenlinse von 150 mSv 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.

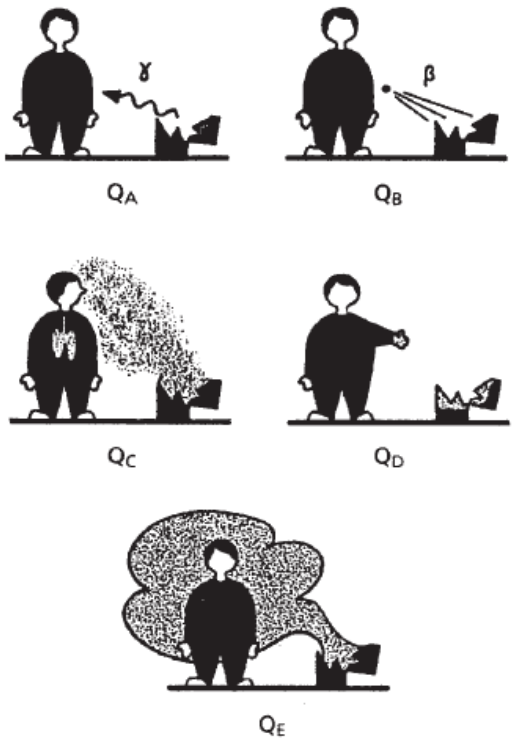

Abb. 2.1 Schematische Darstellung der Expositionspfade, Quelle: /IAEA 08/

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.[2] 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.

Eine detaillierte Übersicht über die Berechnungen und Gleichungen des aktuellen Q-Systems ist in /BÜT 14/ dargestellt. Hier finden sich ebenfalls Diskussionen über die Probleme, die bezüglich des Q-Systems identifiziert wurden.

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

[2] 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.

$$A_1 = \begin{cases} \min\{Q_A, Q_B, Q_F\} & \text{für Alphastrahler} \\ \min\{Q_A, Q_B\} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.1)$$

und für radioaktive Stoffe nicht in besonderer Form durch

$$A_2 = \begin{cases} \min\{Q_C, Q_E, A_1\} & \text{für Edelgase} \\ \min\{Q_C, Q_D, A_1\} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.2)$$

Für einige Nuklide werden die *A*-Werte nicht mit den angegebenen Formeln berechnet, sondern aufgrund zusätzlicher Annahmen festgelegt. Diese Ausnahmen sind ebenfalls in /BÜT 14/ diskutiert.

3 Internationale Arbeitsgruppe

Die „International Working Group on Basic Radionuclide Values for the IAEA Transport Regulations“ traf sich erstmalig im Juli 2014 bei IRSN in Fontenay-aux-Roses, Frankreich und trifft sich seitdem mehrfach im Jahr. Eine Übersicht der bisherigen Meetings ist in Tab. 3.1 zusammengefasst. Den Kern der Arbeitsgruppe bilden die GRS für Deutschland, IRSN für Frankreich, PHE für UK sowie NRA, NMRI und MHI NSENG für Japan sowie seit dem 10. Meeting die Forschungseinrichtung CERN. Für weitere Teilnehmer war die Arbeitsgruppe jederzeit offen wodurch Fluktuationen durch nicht-ständige Mitglieder entstanden.

Tab. 3.1 Meetings der internationalen Arbeitsgruppe

Meeting	Datum	Ort	Teilnehmende Organisationen
1	17.-18. Juli 2014	IRSN, Paris	ASN, GRS, IRSN, NRA, PHE, WNTI
2	20.-21. November 2014	PHE, Chilton	GRS, IRSN, NRA, PHE
3	23.-24. Februar 2015	IAEO, Wien	GRS, IRSN, NRA, PHE, WNTI
4	19. Juni 2015	IRSN, Paris	GRS, IRSN, MHI, NMRI, NRA, PHE
5	2.-4. September 2015	GRS, Köln	BASE, BMU, GRS, IRSN, MHI, NMRI, NRA, PHE, US DOT (via Telefon), WNTI
6	10.-11. Mai 2016	IRSN, Paris	GRS, IRSN, NMRI, NRA, PHE, US DOT (via Telefon)
7	14.-15. Dezember 2016	IAEO, Wien	GRS, IRSN, Lorenz Consulting, MHI, NRA, NMRI, PHE, WNTI
8	10.-11. Juli 2017	IAEO, Wien	BMU, GRS, IRSN, Lorenz Consulting, MHI, NRA, PHE
9	11.-12. Dezember 2017	IAEO Wien	IRSN, Lorenz Consulting, MHI, NRA, PHE, Gäste (MBVIT, ISPRA, KINS, IAEC)
10	4.-5. Juni 2018	IAEO Wien	GRS, IRSN, Lorenz Consulting, MHI, NRA, PHE, CERN, Gäste (ISPRA, IAEC, ICAO)

11	26.-27. November 2018	IAEO Wien	GRS, IRSN, Lorenz Consulting, MHI, NRA, PHE, CERN, Gäste (ISPRA)
12	24.-25. Juni 2019	IAEO Wien	GRS, IRSN, MHI, NRA, PHE, CERN, Gäste (BADR, USDOT)
13	23.-24. Oktober 2019	CERN	GRS, IRSN, MHI, NRA, PHE, CERN, Gäste (CNEN, CNSNS)

Obwohl es sich um keine direkte Arbeitsgruppe von TRANSSC handelt, wird TRANSSC aber regelmäßig über die Ergebnisse und den Diskussionsverlauf informiert. Zudem wurde die Arbeitsgruppe 2016 zu einer „Special Group“ der IAEO ernannt. Dies ermöglicht es, kostenlos die Sitzungsräume der IAEO für die Besprechungen zu nutzen. Seitdem wurde beschlossen, die Sitzungen bei der IAEO in Wien abzuhalten. Da einige Teilnehmer zudem Vertreter oder Unterstützer bei der TRANSSC sind, wurde beschlossen, die Treffen mit den Terminen der TRANSSC zu verbinden. Seit der 7. Sitzung der Arbeitsgruppe finden daher die Meetings direkt vor den TRANSSC Sitzungen statt. Aufgrund der Corona Pandemie konnte die geplante Sitzung im Juni 2020 nicht stattfinden. Stattdessen wurden Videokonferenzen durchgeführt. Weiterhin wurden die zentralen Mitglieder der Arbeitsgruppe 2019 ebenfalls Mitglieder der TRANSSC Technical Expert Group on Radiation Protection (TTEG-RP). Diese Gruppe von Experten steht der TRANSSC für Diskussionen und gegebenenfalls für Berechnungen bei technischen Fragen bezüglich IAEO Transportregularien zur Verfügung.

Im Anschluss an die 5. Sitzung der Arbeitsgruppe konnte ein Positionspapier entwickelt werden, das die grundlegenden gemeinsamen Ziele definiert. Dabei konnten insbesondere folgende Einigungen erzielt werden:

- Nutzung der neuen ICRP 107 Nukliddaten sowie Dosiskoeffizienten der ICRP 116
- Fokussierung auf die Berechnung von Q_A und Q_B, während Q_C, Q_D und Q_E bis zur Veröffentlichung entsprechender ICRP Werte zurückgestellt werden
- Nutzung von Monte-Carlo-Methoden
- Die Überprüfung des Q-Systems soll unter Einhaltung der bisherigen Szenarien erfolgen, soweit möglich.
- Einbeziehen aller verfügbaren Strahlungsarten
- Ersetzen der Q_A und Q_B Werte durch $Q_{ext,eff}$ and $Q_{ext,skin}$ wodurch alle Strahlungsarten einen Beitrag zur effektiven Dosis und zur Hautdosis leisten können.

Die offenen Fragen und einzelnen Diskussionspunkte werden in einem strukturierten Plan (activity plan) nummeriert, verfolgt und dokumentiert. Dieses Dokument ermöglicht den Überblick über die verschiedenen Themen und gibt weitestgehend die Struktur für die Sitzungen wieder.

Ein zentraler Aspekt der Arbeit der internationalen Arbeitsgruppe liegt in der Dokumentation. Da bei der Dokumentation des aktuellen Q-Systems einige Probleme identifiziert wurden, siehe auch /BÜT 14/, soll bei einer Präsentation von neuen *Q*-Werten eine nachvollziehbare und transparente Dokumentation vorliegen. Um die Arbeiten der AG entsprechend zu dokumentieren, wurde ein lebendiges technisches Dokument erzeugt, das die Aktivitäten und einzelnen Ergebnisse der verschiedenen beitragenden Institutionen der AG zusammenfasst. Somit sind auch rückblickend die Zwischenergebnisse oder Vorgehensweisen nachvollziehbar, da das Dokument fortgeführt und nicht überschrieben wird. Dieses Dokument kann demnach als Basis für einen abschließenden Bericht verwendet werden. Mit der Gestaltung und Ausarbeitung des Berichts ist die GRS betraut.

Die prinzipielle Vorgehensweise der Berechnungen liegt in der Verwendung von Monte-Carlo Simulationen. Für die einzelnen *Q*-Werte sind die Simulationen unterschiedlich. So werden beispielsweise für Q_A und Q_B lediglich Teilchenfluenz-Spektren simuliert und

im Anschluss mit Dosisleistungskoeffizienten der ICRP 116 (falls vorhanden) verrechnet. Bei anderen Q-Werten (Q_D und ggf. Q_E) werden hingegen ebenfalls die Wechselwirkungen innerhalb des „Detektors“ simuliert, um die vollständige Dosis zu ermitteln. Bei allen Berechnungen kommen verschiedene Monte-Carlo Codes (MCNP /BOO 03/, /VEC 14/; PHITS /IWA 02/; Geant4 /AGO 03/ und FLUKA /FER 05/, /BAT 15/) und Datenbanken zum Einsatz, um die Ergebnisse gegenseitig zu verifizieren. In einigen Fällen wurde im ersten Schritt eine definierte Liste an Nukliden verglichen. Dabei handelt es sich um die folgenden Nuklide:

- F-18
- Co-60
- Kr-85
- Sr-90
- Tc-99m
- Ru-106
- Cs-134
- Cs-137
- Eu-154
- Ir-192

Diese gemeinsame Vorgehensweise der Arbeitsgruppe hat den Vorteil, Ergebnisse (siehe auch Abschnitt 3.1) vergleichen zu können, ohne von weiteren Entscheidungen der Hauptgruppe abhängig zu sein, da der Vergleich von Fluenz-Spektren lediglich die fundamentalen Wechselwirkungen der Primärteilchen mit der Materie beinhaltet. Darin ist der größte Anteil des Simulationsaufwands enthalten. Um die Ergebnisse der einzelnen Institutionen besser vergleichen zu können, wurde durch die Mitglieder des CERN ein Visualisierungs-Tool (SOftware For Transport limits – SOFT, /FRO 20/) entwickelt, siehe Abschnitt 3.2.

3.1 Ergebnisse der Arbeitsgruppe

Der enge Kontakt zur TRANSSC führte während der elften Sitzung der Arbeitsgruppe im November 2018 in Wien dazu, dass den interessierten Mitgliedern der TRANSSC eine Präsentation der Arbeitsgruppe gegeben wurde. Dabei präsentierte die GRS das prinzipielle Vorgehen der Berechnungen unter Verwendung von Monte-Carlo Simulationen. Zur Veranschaulichung wurde eine live Visualisierung einer solchen Simulation gezeigt.

Weiterhin werden regelmäßig Anfragen durch Mitglieder der TRANSSC an die Arbeitsgruppe zur Berechnung von *A*-Werten gerichtet. Dabei sind die Berechnungen nach dem aktuell gültigen Q-System durchzuführen. PHE hat dafür sein Rechenprogramm SEAL /HPA 10/, /JON 11/ verwendet, bei der GRS kam Ber*QA*Trans (in der neuen Version 1.2) zum Einsatz und die japanische Nuclear Regulation Authority (NRA) nutzte ihr Programm BRACSS /NRA 15/. Teilweise konnten zusätzlich auch Beiträge der IRSN oder des CERN herangezogen werden. Die Ergebnisse der GRS sind in Tab. 3.2 und Tab. 3.3 enthalten. Die Ergebnisse aller Organisationen weichen in der Regel bei einigen Nukliden nur geringfügig voneinander ab, bedingt durch im Detail unterschiedliche Berechnungsmethoden. Als finale Ergebnisse werden in der Regel die jeweils kleinsten Werte gewählt, die sich aus den verschiedenen Berechnungstools ergeben.

Tab. 3.2 Ergebnisse von Ber*QA*Trans

Datengrundlage ICRP 38 /ICRP 83/ sowie ICRP 51 /ICRP 87/ für Q_A und ICRP 68 /ICRP 94/ für Q_C

Nuklid[a)]	Q_A (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Ba-135m	1.6E+01	1.0E+03	3.3E+02	5.9E-01	2E+01	6E-01
Br-80m	1.0E+01	8.3E+00	6.6E+02	2.0E+00	8E+00	2E+00
Ce-134	1.4E+00	6.7E-01	3.8E+01	1.3E+00	7E-01	7E-01
Ce-137	2.3E+01	2.3E+05	4.5E+03	1.7E+03	2E+01	2E+01
La-132	5.6E-01	1.2E+00	2.9E+02	2.8E+00	6E-01	6E-01
La-135	2.2E+01	1.0E+05	3.3E+03	1.6E+03	2E+01	2E+01
Sb-119	3.0E+01	1.0E+03.	1.4E+03	1.0E+03	3E+01	3E+01
Sb-120m	4.5E-01	5.6E+02	5.0E+01	3.2E+00	5E-01	5E-01
Tb-149	6.7E-01	8.3E+00	1.2E+01	3.4E+00	7E-01	7E-01
Tb-161	2.6E+01	2.2E+02	4.2E+01	7.1E-01	3E+01	7E-01

Für Ce-132, La-133, Te-118, Te-119 und Te-119m sind keine Daten in ICRP 38 enthalten, daher keine Berechnung von Q_A, Q_B, Q_D, A_1 und A_2 möglich

Tab. 3.3 Ergebnisse von Ber*QA*Trans

Datengrundlage ICRP 107 /ICRP 08/ sowie ICRP 116 /ICRP 10/ für Q_A und ICRP 119 /ICRP 12/ für Q_C

Nuklid	Q_A (TBq)	Q_B (TBq)	Q_C (TBq)	Q_D (TBq)	A_1 (TBq)	A_2 (TBq)
Ba-135m	1.7E+01	1.0E+03	3.3E+02	5.9E-01	2E+01	6E-01
Br-80m	1.1E+01	4.0E-01	6.6E+02	6.0E-01	4E-01	4E-01
Ce-132	4.2E+00	4.5E+04	-	7.9E+00	4E+00	4E+00 a)
Ce-134	1.4E+00	6.3E-01	3.8E+01	1.2E+00	6E-01	6E-01
Ce-137	2.4E+01	1.8E+05	4.5E+03	1.5E+03	2E+01	2E+01
La-132	5.6E-01	1.1E+00	2.9E+02	2.5E+00	6E-01	6E-01 a)
La-133	6.7E+00	2.7E+02	-	6.0E+01	7E+00	7E+00
La-135	2.6E+01	1.1E+05	3.3E+03	1.9E+03	3E+01	3E+01
Sb-119	3.6E+01	1.0E+03	1.4E+03	1.0E+03	4E+01	4E+01
Sb-120m	4.5E-01	5.6E+02	5.0E+01	3.2E+00	5E-01	5E-01
Tb-149	8.3E-01	4.5E+01	1.2E+01	2.9E+00	8E-01	8E-01
Tb-161	2.6E+01	2.9E+02	4.2E+01	7.1E-01	3E+01	7E-01
Te-118	1.3E+00	4.5E-01	-	9.3E-01	5E-01	5E-01 a)
Te-119	1.4E+00	1.2E+03	-	1.3E+02	1E+00	1E+00 a)
Te-119m	7.1E-01	9.1E+02	-	8.7E+00	7E-01	7E-01 a)

Für Ce-132, La-133, Te-118, Te-119 und Te-119m stehen in der IRCP 68 keine Daten zur Berechnung von Q_C, zur Verfügung. Somit ist der angegebene Wert für A_2 ohne Q_C ermittelt und nur eingeschränkt gültig.

Im Rahmen der Projektlaufzeit des aktuellen Forschungsvorhabens fanden die Meetings 9 bis 13 statt. Hierbei lag der Fokus auf der Klärung verschiedener Punkte des Aktionsplans der Arbeitsgruppe. Im Folgenden werden die entscheidenden Entwicklungen vorgestellt. Verschiedene Ergebnisse wurden zusätzlich auf der PATRAM 2019 präsentiert, siehe /INMM 19/.

3.1.1 Bestrahlungsgeometrie

Über einen langen Zeitraum wurde die Bestrahlungsgeometrie diskutiert, da verschiedene Meinungen vertreten wurden. Hierbei handelt es sich um die Frage, aus welcher Richtung der Körper bestrahlt wird. Die energieabhängigen

Dosiskonversionskoeffizienten stehen für verschiedene Strahlungsfelder zur Verfügung, siehe Abb. 3.1. Jedoch gibt es hierbei Einschränkungen bei bestimmten Koeffizienten. Beispielsweise stehen für die Effektive Dosis für Elektronen in der ICRP 116 /ICRP 10/ keine Koeffizienten für seitliche (LLAT und RLAT) und der rotationssymmetrischen (ROT) Bestrahlung zur Verfügung. Es konnte Einigung erzielt werden, auf die stets verfügbare ISO Geometrie zurückzugreifen, die auch im aktuellen *Q*-System verwendet wird. Hier ist die Bestrahlung isotrop und somit trifft die Strahlung von allen Seiten auf den Körper.

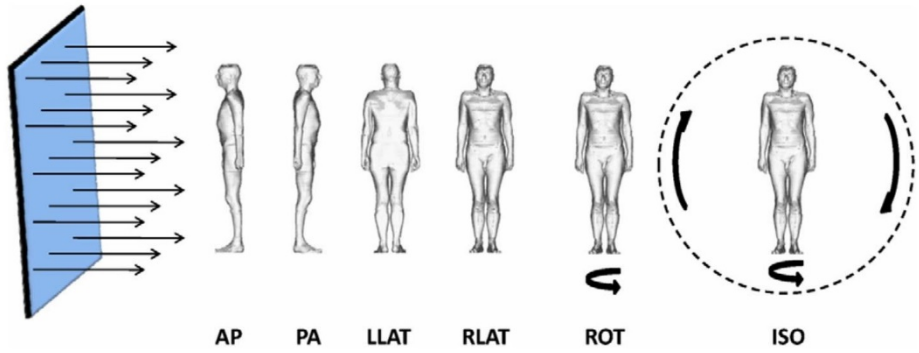

Abb. 3.1 Bestrahlungsfelder der ICRP 116 /ICRP 10/

3.1.2 Dosiskonversionskoeffizienten für die Haut

Ein weiterer Aspekt, der zum Abschluss der Berechnungen für Q_B und somit den A_1-Werten notwendig ist, betrifft die Verfügbarkeit von Dosiskonversionskoeffizienten für die Haut. Die ICRP 116 unterscheidet zwischen einer mittleren Hautdosis und einer lokalen Haut-Äquivalentdosis. Jedoch stehen nicht beide Koeffizienten für alle Teilchenarten zur Verfügung. Während für Photonen die mittlere Hautdosis verfügbar ist, sind für Elektronen zusätzlich Koeffizienten zur lokalen Haut-Äquivalentdosis angegeben. Um konsistente Berechnungen durchzuführen hat die Arbeitsgruppe beschlossen, den Einfluss der Unterschiede beider Parameter zu untersuchen. Berechnungen der IRSN zeigte eine Erhöhung von 45 % aller Q_B-Werte auch wenn 87 % dieser Nuklide durch Q_A limitiert sind und somit keine Änderung des A_1-Wertes erfolgen würde. Dennoch zeigt das Ergebnis einen signifikanten Einfluss und somit wurde entschieden eine eigene Datenbank für die lokalen Haut-Äquivalentdosiskoeffizienten für Photonen und auch für Neutronen zu simulieren und den Berechnungen für Q_B in Zukunft zugrunde zu legen.

3.1.3 Tochternuklide

Für die Bestimmung von finalen *A*-Werten werden weiterhin grundlegende Themen diskutiert, wie beispielsweise die Einbeziehung von Tochternukliden. Das aktuelle Q-System unterscheidet prinzipiell zwei Fälle:

- 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.

In der pharmazeutischen Industrie gibt es jedoch Beispiele, in denen diese Regelung nicht haltbar ist, da frisch erzeugte Nuklide aufgrund ihrer geringen Halbwertszeit unmittelbar transportiert werden. Die Arbeitsgruppe würde daher eine Stellungnahme der TRANSSC begrüßen. Die Codes zur Berechnung der Q-Werte wurden so angepasst, dass derzeit keine Tochternuklide in die Berechnungen mit einbezogen werden, durch Aktivierung der Option ist jedoch eine schnelle Berechnung unter Berücksichtigung von Tochternukliden jederzeit möglich.

3.1.4 Augenlinsendosis

Bezüglich der Augenlinsendosis wurde der Referenzwert diskutiert, der in der aktuellen Version des Q-Systems bei 150 mSv liegt. In Anlehnung an die in ICRP Publikationen verwendete deterministische Schwelle von 500 mSv für die Augenlinse, wurde entschieden, diesen Wert zu verwenden und mit einem Sicherheitsfaktor zu versehen. Dieser Sicherheitsfaktor wurde entsprechend des Referenzwertes im aktuellen Q-System für die effektive Dosis (50 mSv) im Verhältnis zu dem von der ICRP maximal empfohlenen Limit von 100 mSv gewählt. Dieser Faktor 2 angewendet auf die 500 mSv ergibt final einen Referenzwert von 250 mSv für die Augenlinse, der in Zukunft von der Arbeitsgruppe verwendet wird. Erste Untersuchungen zeigen, dass keine Limitierung der A-Werte durch die Augenlinsendosis zu erwarten ist.

3.1.5 Neutronenquellen

Die Arbeitsgruppe hat sich als Ziel gesetzt, A-Werte für gängige Neutronenquellen zu generieren. Prinzipiell konnten Neutronen als Sekundärteilchen in die Simulationen und Auswerteroutinen implementiert werden. Die Zentrale Schwierigkeit bei Neutronenquellen liegt in der Bestimmung der emittierten Neutronenspektren. Hierfür hat die Arbeitsgruppe Untersuchungen vorgenommen und Neutronenspektren aus (α,n)-Reaktionen mit dem Code SOURCES-4C /WIL 02/ generiert. Eine entscheidender Einflussfaktor auf diese Spektren sind die Massenverhältnisse zwischen dem α-Emitter (z. B. Am-241) und dem Targetmaterial (z. B. Be-9). Je höher die Masse des Targetmaterials, desto höher ist der Neutronenfluenz. Dieser Trend nähert sich jedoch einem maximalen Wert an. Typische Neutronenquellen weisen ein Massenverhältnis von 0,1 bis 2 auf. Für die Berechnungen der Arbeitsgruppe muss hier eine Methode festgelegt werden, welches Massenverhältnis verwendet werden soll. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung des maximalen Werts, an das sich der Verlauf annähert. Auch wenn es diese Massenverhältnisse in der Praxis nicht existieren würde die Verwendung des maximalen Neutronenfluenzes zu einer abdeckenden und somit konservativen Berechnung führen.

3.1.6 Zwischenergebnisse für A_1-Werte

Obwohl die oben genannten offenen Punkte Einfluss auf die Berechnung der A_1-Werte haben wird, betrachtet die Arbeitsgruppe stetig den Unterschied zu aktuellen A_1-Werten. In einer gemeinsamen Veröffentlichung auf der PATRAM 2019 /INMM 19/ wurde eine Übersicht der Veränderungen gezeigt, siehe Abb. 3.2. Die Darstellung zeigt den Vergleich für 275 A_1-Werte aus der SSR-6 /IAEA 18/ zwischen der aktuellen Version und dem aktuellen Stand der Berechnungen der Arbeitsgruppe. Es zeigt sich, dass 58 % der Werte unverändert bleiben, sich 5 % verringern und 37 % erhöhen. Wie sich die Verringerungen oder Erhöhungen im Detail aufgliedern ist ebenfalls dargestellt.

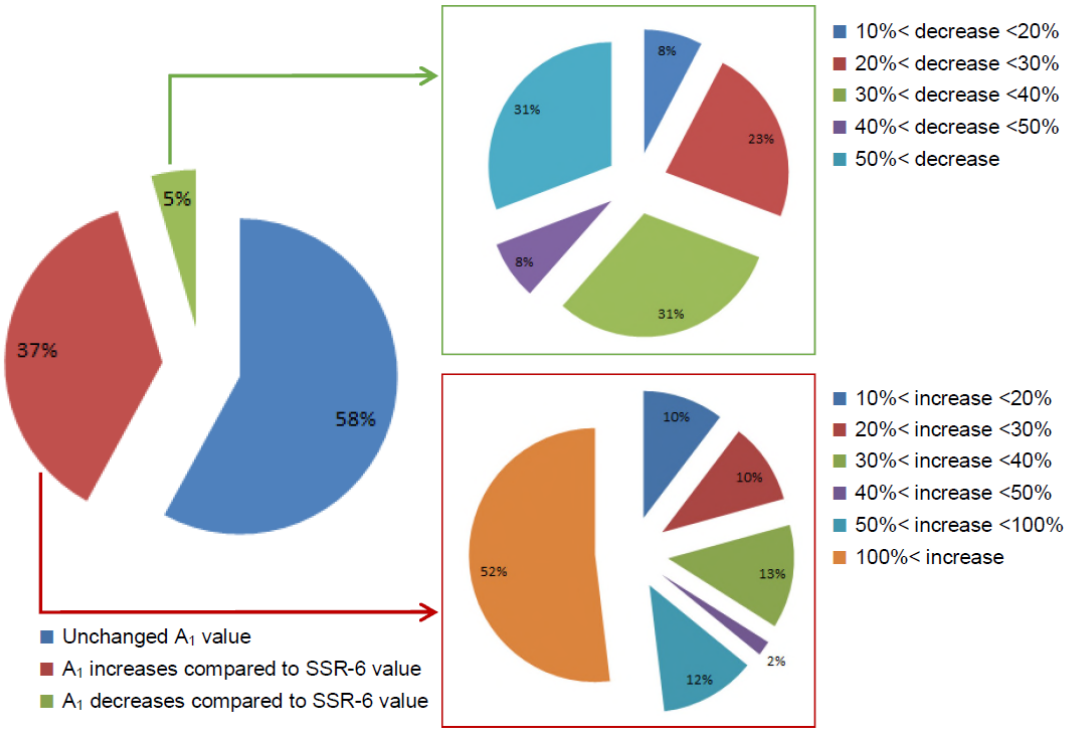

Abb. 3.2 Aktuelle Ergebnisse für A_1 für 275 Radionuklide aus Tabelle 2 der SSR-6 entnommen aus /INMM 19/

3.1.7 Modell für Q_C

Die Arbeitsgruppe hat sich intensiv mit den Modellen für die weiteren Q-Werte befasst. Für Q_C stimmen die Mitglieder der Arbeitsgruppe überein, dass sich das grundlegende Szenario nicht ändern soll. Somit wird in einer 300 m³ großen Lagerhalle für 30 Minuten mit einer Freisetzung von 10^{-3} bis 10^{-2} eine Exposition durch Inhalation herbeigeführt. Dabei liegt der inhalierte Anteil bei 10^{-4} bis 10^{-3} wodurch sich ein Aufnahmefaktor von 10^{-6} ableitet. Im aktuellen Q-System wurden hierfür die Koeffizienten der ICRP 68 /ICRP 94/ verwendet. Es gibt bereits eine Reihe neuerer Veröffentlichungen, siehe ICRP 130 /ICRP 15/, 134 /ICRP 17/, 137 /ICRP 18/ und 141 /ICRP 19/. Eine weitere ist geplant. Hier sind Dosiskoeffizienten für Aerosole mit einer Größe von 0,001 µm bis 20 µm enthalten. Als Größe wird hier der AMAD (Activity Median Aerodynamic Diameter) verwendet. Das aktuelle Q-System greift auf Dosiskoeffizienten mit einem AMAD von 1 µm zurück und es wird darauf hingewiesen, dass dies nicht für jeden Fall den konservativsten Wert darstellt. Mit den neuen AMAD bis zu 0,001 µm, also im Bereich von Nanopartikeln, sind einige restriktivere Werte verfügbar. Dies wirft die Frage nach der Relevanz für Transportunfälle auf. Der aktuelle Stand der Arbeitsgruppe diesbezüglich ist, dass ein Vergleich der verschiedenen Werte für eine Auswahl an Nukliden erstellt

wird und eine Expertenmeinung eingeholt werden soll, ob die normalerweise transportierten Partikelgrößen mit Nanopartikeln vergleichbar sind. Obwohl die Entscheidung über die Verwendung der neuen ICRP Veröffentlichungen getroffen wurde, ist die Frage nach der Partikelgröße weiterhin offen.

3.1.8 Modell für Q_D

Die Arbeitsgruppe hat sich für die Simulation von Q_D-Werten ausgesprochen. Da sich das aktuelle Q-System auf Daten von Cross et al. /CRO 92/ bezieht, war eine Übernahme dieser Geometrie naheliegend. Andererseits hat die ICRP 116 /ICRP 10/ eine Methode veröffentlicht, die den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik widerspiegelt. Um den Unterschied zu erfassen, entschied die Arbeitsgruppe beide Modelle zu berechnen. Die GRS simulierte gemeinsam mit Japan das Modell nach Cross et al. während PHE und IRSN das ICRP Modell implementierte. Im Folgenden werden die groben Parameter der beiden Modelle gegenübergestellt:

- Modell nach Cross et al. /CRO 92/
    - Zylinder mit 100 cm² Grundfläche
    - Isotrope Quelle mit 100 cm² Fläche
    - Detektor mit 1 cm² Fläche
    - Integration der Dosis bei einer Eindringtiefe zwischen 60 µm und 80 µm
- ICRP 116 Modell /ICRP 10/
    - Quader aus Hautmaterial mit 10x10x10 cm³
    - Isotrope Quelle mit 38.5 cm² (entspricht einem Radius von 7 cm)
    - Detektor mit 1 cm² Fläche
    - Integration der Dosis bei einer Eindringtiefe zwischen 50 µm und 100 µm

Obwohl Cross et al. ursprünglich einen wassergefüllten Zylinder verwendeten, beschloss die Arbeitsgruppe ebenfalls wie im ICRP 116 Modell Haut einzusetzen, da dies als realistischer und zeitgemäß angesehen wird.

Die Ergebnisse der vier Institutionen wurde für die bereits erwähnte definierte Liste an Nukliden durchgeführt. Dabei wurden maximal 10 % Abweichung zwischen den Werten der GRS und den Ergebnissen aus Japan sichtbar, die dasselbe Modell verwendet hatten. Im Vergleich hierzu liegt die größte Abweichung zwischen der GRS und dem ICRP-Modell bei 11 %. Diese Untersuchung zeigt, dass im Allgemeinen keine wesentlich

unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den beiden Modellen zu erwarten ist und eine gute Übereinstimmung vorliegt.

3.1.9 Modell für Q_E

Eine Dosis durch Submersion wird mit dem Pfad Q_E für radioaktive Stoffe, die nicht inkorporiert werden (im Wesentlichen Edelgase), abgedeckt. Auch hier hält die Arbeitsgruppe am aktuellen Szenario so weit wie möglich fest. In einer Lagerhalle mit den Dimensionen 3 x 10 x 10 m³ und vier Luftwechseln pro Stunde hält sich ein Arbeiter maximal 30 Minuten nach einem Unfall auf.

Verschiedene Optionen zur Bestimmung der Dosiskoeffizienten wird derzeit noch innerhalb der Arbeitsgruppe diskutiert. Einerseits können eigene Simulationen durchgeführt werden oder es könnte auch bestehende publizierte Koeffizienten zurückgegriffen werden.

Erste Tests mit Simulationen wurden bereits durchgeführt. Dabei wurde sowohl eine Kugeloberfläche (ICRU-Kugel) als Detektor verwendet als auch ein das Phantom der ICRP 110 /ICRP 09/. Trotz intensiver Bemühungen konnten einige existierende Werte nicht reproduziert werden. Um Dosiskoeffizienten zuverlässig simulieren zu können, wären weitere detaillierte Nachforschungen notwendig.

Eine Alternative bietet der Federal Guidance Report No. 15 /BEL 19/ von 2019. Hier wird eine semi-infinite Wolke anstelle eines 300 m³ großen Raumes verwendet. Die Arbeitsgruppe hat gezeigt, dass dieser Ansatz konservativer ist als der bisherige 300 m³ große Raum. Die Verwendung dieser Koeffizienten würde eine Berechnung der Q_E-Werte ohne weitere Simulationen ermöglichen. Eine Entscheidung wurde jedoch noch nicht getroffen.

3.2 SOFT

Um die verschiedenen Ergebnisse der beteiligten Institutionen besser vergleichen zu können, wurde von den Mitgliedern des CERN das Programm SOFT (SOftware For Transport limits – SOFT, /FRO 20/) entwickelt. Dieses Tool ist in C++ mit einer graphischen Oberfläche programmiert und ermöglicht es, sowohl Q- als auch A-Werte anhand einer Datenbasis zu berechnen und verschiedene Darstellungen von Daten zu wählen

und zu vergleichen. Aktuell sind die Datensätze des CERN, der GRS sowie der IRSN in SOFT implementiert.

Die Datensätze enthalten sogenannte Transferfunktionen. Dabei wird für jede Bestrahlungsgeometrie und jedes Primärteilchen ein Datenfile erzeugt, das die energieabhängigen Werte der Transferfunktion für alle Szenarien (Q_A, Q_B, …) in der Einheit Sv/Primärteilchen enthält. Die Transferfunktion $H_{p,g}(E, Q_x)$ gibt die Dosis für ein spezifisches Primärteilchen bestimmter Energie unter Berücksichtigung aller Annahmen und Szenarien wider und lässt sich laut /FRO 20/ darstellen als:

$$H_{p,g}(E, Q_x) = 3600 * 10^3 * 10^{-12} * \sum_{p'} \int_{1\ keV}^{12\ MeV} \Phi_{E,p}\,(E', p', Q_x) C_g(E, p') dE \qquad (3.1)$$

Dabei ist:

- *p* das Primärteilchen
- *E* die Primärenergie des Primärteilchens
- *g* die Geometrie des Szenarios Q_x
- $\Phi_{E,p}(E', p', Q_x)$ die Fluenz des Sekundärteilchens *p*‘ mit Energie *E*‘ für ein Primärteilchen p mit Primärenergie E im Szenario Q_x
- $C_g(E, p')$ die Dosiskoeffizienten der ICRP 116 zur Umrechnung von Fluenz nach Dosis für das Sekundärteilchen *p*‘ im Szenario Q_x

Die Integrationsgrenzen werden hier von 1 keV bis 12 MeV angegeben, wobei diese abhängig sind von den tatsächlich simulierten Fluenz-Spektren und somit gegebenenfalls abweichen können. Der Faktor 3.600 transformiert die Größe „pro Primärteilchen“ nach „Zerfälle pro Zeit“. Der Faktor 10^3 ist eine Einheitentransformation von GeV in MeV und ist je nach Eingangsdaten gegebenenfalls nicht notwendig oder fällt unterschiedlich aus. Der Faktor 10^{-12} stammt aus der Definition der Koeffizienten aus der ICRP 116, die in Einheiten von pSv*cm² angegeben sind. Aufgrund der simulierten Fluenz-Spektren, die in 1 keV Schritten verfügbar sind, lässt sich das Integral näherungsweise durch eine Summe darstellen. In Abb. 3.3 ist die graphische Oberfläche von SOFT gezeigt. Das gewählte Beispiel stellt die Transferfunktionen der GRS für Co-60 für das ISO Strahlenfeld und verschiedene Szenarien, bzw. Dosen dar. Jeder gezeigte Plot enthält den Verlauf für jede Teilchenart.

Anhand dieser Transferfunktionen lassen sich Unterschiede zwischen den verschiedenen Codes der simulierenden Institutionen effizient untersuchen. Die graphische Visualisierung erlaubt einen schnellen Einblick und ermöglicht direkte Diskussionen der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse, die zu den Unterschieden führen könnten. Mit Hilfe von SOFT wurden bereits einige Unterschiede erkannt, analysiert und behoben. Einige Analysen sind noch ausstehend, da beispielsweise verschiedene Verläufe für Q_B zwischen allen drei verfügbaren Datensätzen erkennbar sind. Diese Analysen werden in Zukunft fortgeführt, um die Ergebnisse gegenseitig zu verifizieren oder zu verbessern.

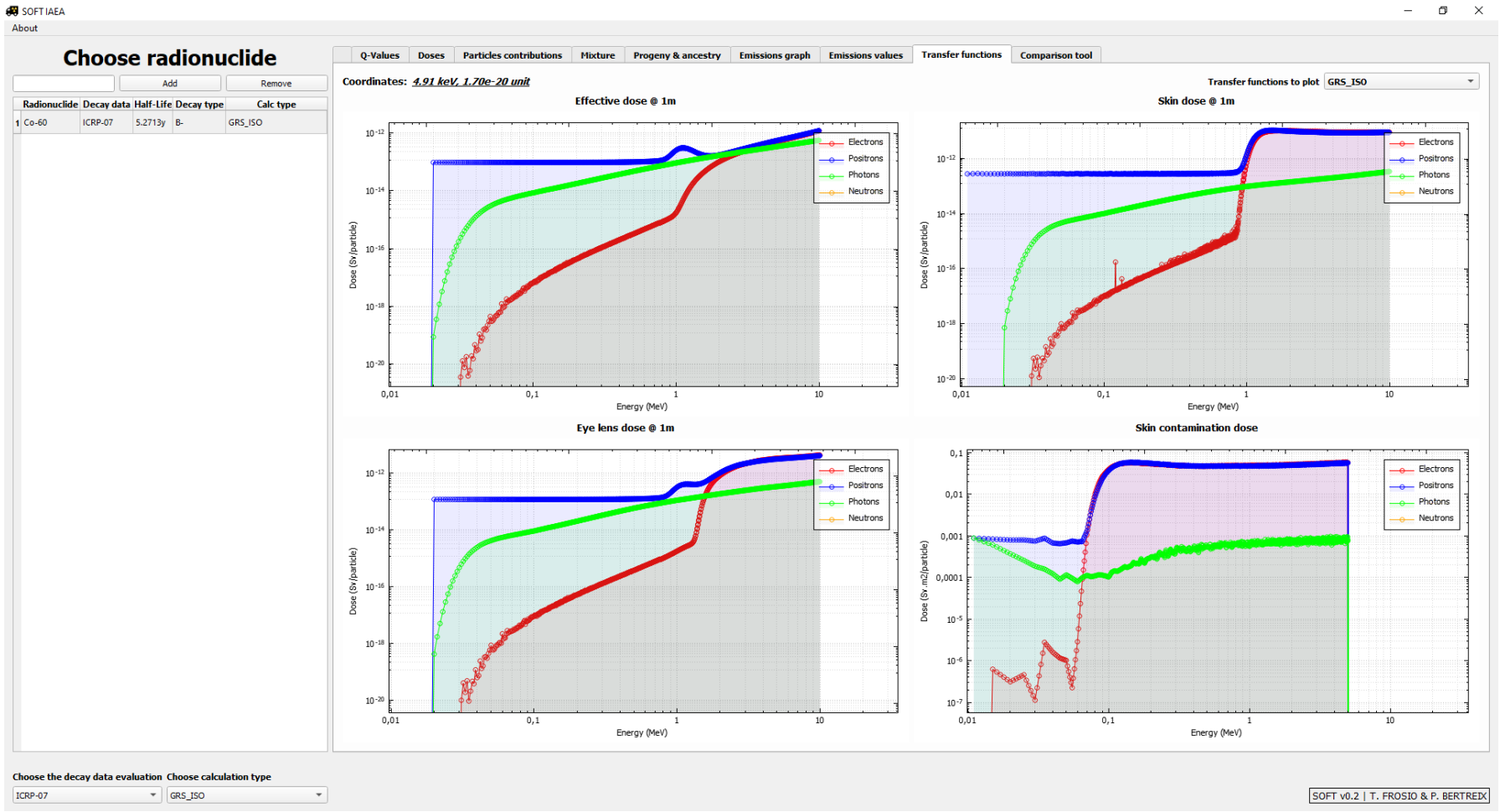

Abb. 3.3 Transferfunktionen der GRS für Co-60 in SOFT

SOFT verfügt insgesamt über verschiedene Funktionen. Neben der Berechnung und Anzeige von Q- und A-Werten für ausgewählte Nuklide werden auch die Dosiskoeffizienten für jeden Q-Wert ausgegeben. Weiterhin erfolgt als graphische Anzeige unter Angabe der entsprechenden Werte die Darstellung der Beiträge zur Dosis für jede Teilchenart. Eine weitere graphische Darstellung ist für die Zerfallsmöglichkeiten des ausgewählten Nuklids programmiert, inklusive Zerfallswahrscheinlichkeiten, Halbwertszeiten, Tochternuklide, etc. Die nächste Option ist die Zusammenstellung von Nuklidgemischen. Die Ergebnisse werden sowohl numerisch als auch graphisch angezeigt und ein Report kann erzeugt und gespeichert werden. Für das ausgewählte Nuklid werden in zwei weiteren Fenstern die Nukliddaten der ICRP 107 numerisch und graphisch dargestellt. Die letzte Option der derzeitigen Version 0.2 von SOFT ist ein Vergleichs-Tool, um bis zu vier verschiedene Modelle miteinander zu vergleichen. Dabei kann gewählt werden zwischen der Darstellung der Dosiskoeffizienten in Sv/Bq und der Teilchenbeiträge zur Dosis in %. Die Teilchenarten können individuell an- und abgestellt werden. Eine Erweiterung der Vergleichsmöglichkeiten ist in den nächsten Versionen von SOFT geplant.

4 Programmentwicklung und Ergebnisse der GRS

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, konnten grundlegende Parameter innerhalb der internationalen Arbeitsgruppe festgelegt werden, die für die Simulationen zu verwenden sind. Da die GRS ebenfalls Simulationen durchführt, wurden diese in Abstimmung mit der Arbeitsgruppe angepasst. Dieses Kapitel befasst sich mit den verwendeten Geometrien, der Weiterentwicklung von MCBAS sowie dem aktuellen Stand der Ergebnisse.

4.1 Entwicklungen zu A_1-Werten

4.1.1 Generelle Annahmen

Es wird vorgeschlagen, im revidierten Q-System alle Strahlungsarten zu berücksichtigen und für die den A_1-Werten zugrunde liegenden Szenarien identische geometrische Bedingungen vorzugeben. Insbesondere soll eine Restabschirmung für alle Szenarien gelten. Da die Berücksichtigung aller Strahlungsarten die ursprüngliche Unterscheidung zwischen Q_A und Q_B nicht vollständig wiedergeben kann, werden diese Werte abweichend interpretiert. Demnach wird Q_A zu einer Abbildung der effektiven Dosis (Q_{eff}) und Q_B zu einer der Hautdosis (Q_{skin}). Weiterhin soll die Augenlinse explizit berücksichtigt werden (Q_{eye}). Der A_1-Wert soll sich entsprechend aus dem Minimum der drei Werte bilden:

$$A_1 = \min\{Q_{eff}, Q_{skin}, Q_{eye}\} \tag{4.1}$$

4.1.2 Geometrie

Um möglichst wenige Änderungen im Vergleich zum aktuellen Q-System vorzunehmen, wird für A_1- und A_2-Werte nicht von einer Punktquelle abgewichen und weiterhin ein Abstand zur exponierten Person von 1 m angenommen, siehe Abb. 4.1.

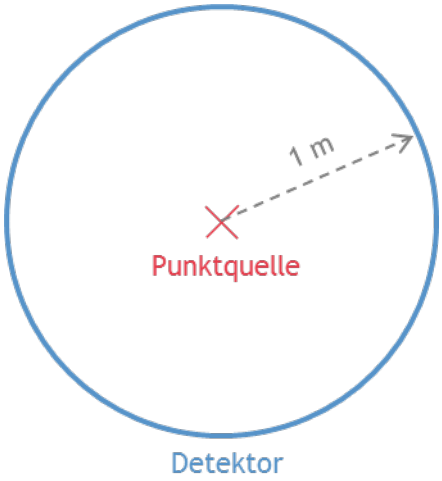

Abb. 4.1 Grundlegende Geometrie für Q_A und Q_B

Die Monte-Carlo Simulationen sind 3D Simulationen, sodass eine Kugeloberfläche mit einem Radius von 1 m angenommen wird. Die Kugeloberfläche fungiert als Detektor. Die Kugel selbst besteht im Inneren aus Luft und außen endet die Welt der Simulation, um Rückstreueffekte zu vermeiden. Die Zusammensetzung der Luft wurde mit Air, Dry (near sea level) und einer Dichte von 0,001205 g/cm³ nach PNNL 15870 Rev. 1 des U.S. Department of Homeland Security /MCC 11/ festgelegt.

Dieser Geometrie wird eine Restabschirmung bestehend aus 0,5 mm Stahl 316L mit einer Dichte von 7,8 g/cm³ hinzugefügt, siehe PNNL-15870 Rev. 1. Diese wird als Kugel um die Punktquelle platziert.

4.1.3 Festlegungen für die Simulationen

Neben der Geometrie gibt es diverse Eingangsparameter, die in der Arbeitsgruppe festgelegt wurden und in den Codes der GRS übernommen wurden, darunter fallen die Nukliddaten, die Dosiskoeffizienten und die Behandlung von Tochternukliden.

Aktuelle Nukliddaten, die den Stand der Wissenschaft repräsentieren, sind essenzielle Eingangsgrößen in die Berechnungen. Die Arbeitsgruppe hat daher beschlossen, die aktuellen Daten aus der ICRP 107 „Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations“ /ICRP 08/ zu verwenden. Diese Publikation stellt Daten für 1.252 Radionuklide von 97 Elementen digital zur Verfügung und enthält Informationen u.a. zur Halbwertszeit, zu den Zerfallslinien und deren Intensitäten.

Wie im Bericht GRS - 477 /GRS 17/ im Detail beschrieben kommt die Fluenz-Methode zum Einsatz, die die Teilchenfluenz durch eine Fläche, hier die Oberfläche der Kugel, bestimmt. Durch die Anwendung entsprechender Dosiskoeffizienten der ICRP 116 /ICRP 10/ erfolgt eine Umrechnung von der Teilchenfluenz auf die Dosis. Die Teilchenfluenz wird über die gesamte Kugeloberfläche vermessen. Da die Koeffizienten für bestimme Energien gegeben sind, wird zwischen den jeweiligen Stützstellen doppeltlogarithmisch interpoliert. Teilweise ist die Steigung der Koeffizienten in Abhängigkeit der Energie groß in Bezug auf die bisherigen simulierten 5 keV-Schritte an Primärenergien. Daher wurden neue Simulationen von Fluenz-Spektren mit einem Binning von 1 keV durchgeführt. Für Neutronen, deren Datenbank ebenfalls erzeugt wurde, sind die Energien der ICRP 116 Tabellen gewählt worden.

4.1.4 Monte-Carlo Based A-value Simulator (MCBAS) für A_1-Werte

Die GRS hat im Rahmen des Forschungsvorhabens 3614R03343 /GRS 17/ unter Berücksichtigung der Entscheidungen der internationalen Arbeitsgruppe mit der Entwicklung von Computer-Programmen begonnen, die der Berechnung von *A*-Werten dienen, insbesondere dem Code MCBAS (Monte-Carlo Based A-value Simulator). Dieses Programm ist selbst kein MC-Code und führt daher keine Simulationen aus, sondern greift auf die bereits diskutierte Datenbank zurück, die mit dem MC-Code Geant4 erzeugt wird. Der damalige Status der Entwicklungen von MCBAS erlaubte diverse Analysen und die Berechnung von A_1-Werten auf der Basis der in der Arbeitsgruppe beschlossenen Grundlagen. Die Möglichkeiten der Analyse wurden in /GRS 17/ im Detail diskutiert.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens wurde MCBAS für die A_1-Werte weiterentwickelt. Dabei wurde insbesondere die Behandlung von Neutronen implementiert. Auch die Berechnung von Q_{eye} wurde erfolgreich implementiert.

Die Grundlage von MCBAS wurde zur Entwicklung eines zusätzlichen Tools verwendet, um die Transferfunktionen zum Einlesen in SOFT, siehe Abschnitt 3.2, zu berechnen. Diese aufwendige zusätzliche Programmierarbeit war entscheidend, um die Vorteile von SOFT zu nutzen und die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Institutionen analysieren zu können.

Trotz der hilfreichen Entwicklung von SOFT durch das CERN wurde MCBAS weiterentwickelt. Zum einen liegt der GRS ein Nutzungsrecht für SOFT vor, jedoch kann keine eigene Entwicklung vorgenommen werden. Somit besteht nicht die Möglichkeit, eigene

Tests durchzuführen, die mit MCBAS möglich sind. Zweitens dient MCBAS der Verifizierung der Berechnungen in SOFT.

4.2 Ergebnisse für A_1-Werte

Obwohl sich in Zukunft verschiedene Eingangsparameter ändern werden, siehe Kapitel 3, wurden die 373 in SSR-6 /IAEA 18/ gelisteten Nuklide mit MCBAS berechnet. Von den resultierenden A_1-Werte konnten 311 Ergebnisse mit Berechnungen der IRSN verglichen werden. Davon weisen 249 Nuklide eine Abweichung von < 15 % auf. Weitere 27 Nuklide weisen eine Abweichung zwischen 15 % und 20 % auf. Da die Optimierungen noch nicht abgeschlossen sind, ist diese Übereinstimmung ein gutes Zwischenergebnis. Dennoch sind weitere Anpassungen möglich, um die Abweichungen noch weiter zu reduzieren.

Eine geplante Änderung von Eingangsparametern sind die Dosiskonversionskoeffizienten für die lokale Haut-Äquivalentdosis für Photonen und Neutronen, die nicht in der ICRP 116 enthalten sind. Hier hat die GRS eigene Simulationen mit Geant4 durchgeführt. Die gewählte Geometrie ist in Abb. 4.2 dargestellt. Das Material für die Haut wurde nach den Empfehlungen der ICRP 110 /ICRP 09/ nachgebildet. Die energieabhängigen Dosiskonversionsfaktoren für Photonen sind in Abb. 4.3 gezeigt.

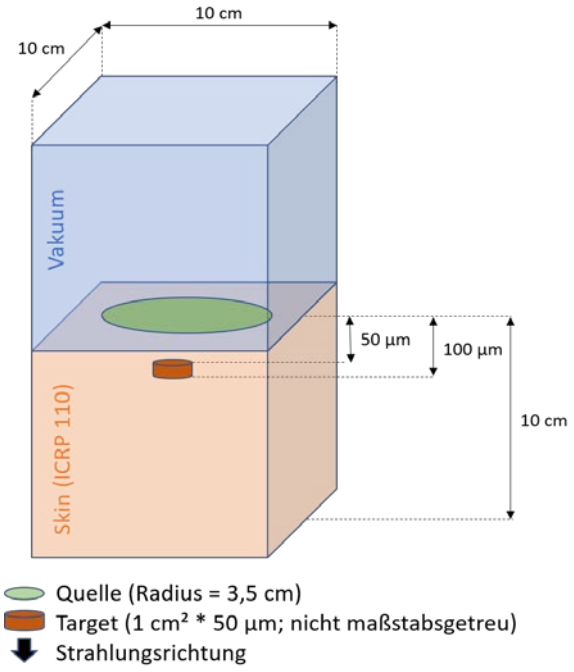

Abb. 4.2 Geometrie zur Simulation der lokalen Haut-Äquivalentdosis

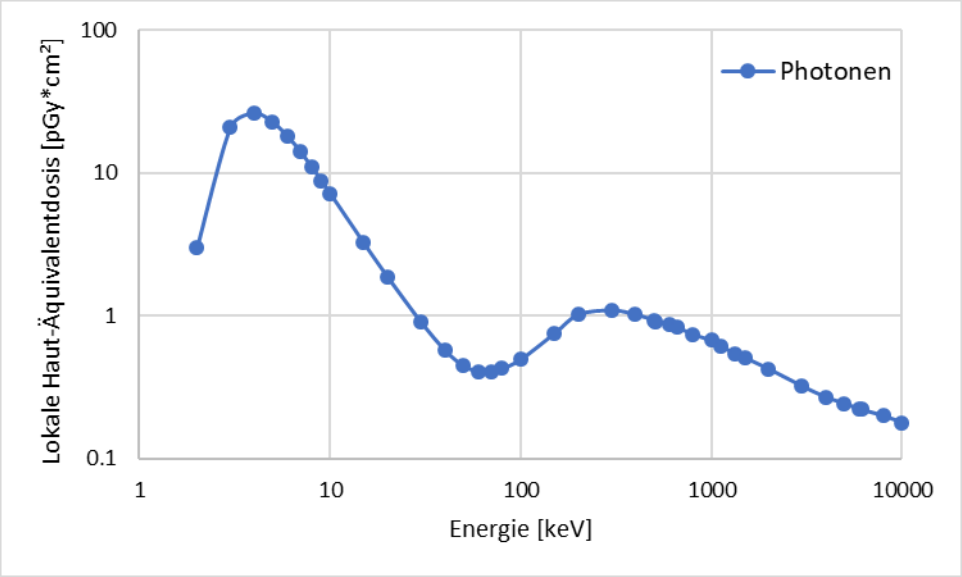

Abb. 4.3 Lokale Haut-Äquivalentdosis für Photonen aus Geant4

4.3 Entwicklungen zu Q_D

Wie in Abschnitt 3.1.8 beschrieben, hat die GRS eine Simulation in Geant4 zur Berechnung von Q_D entwickelt. Die geometrische Grundlage ist dem aktuellen Q-System nachempfunden, die sich auf die Publikation von Cross et al. /CRO 92/ bezieht. Eine Skizze ist in Abb. 4.4 gezeigt. Für die Haut wurde erneut nach den Empfehlungen der ICRP 110 /ICRP 09/ nachgebildet.

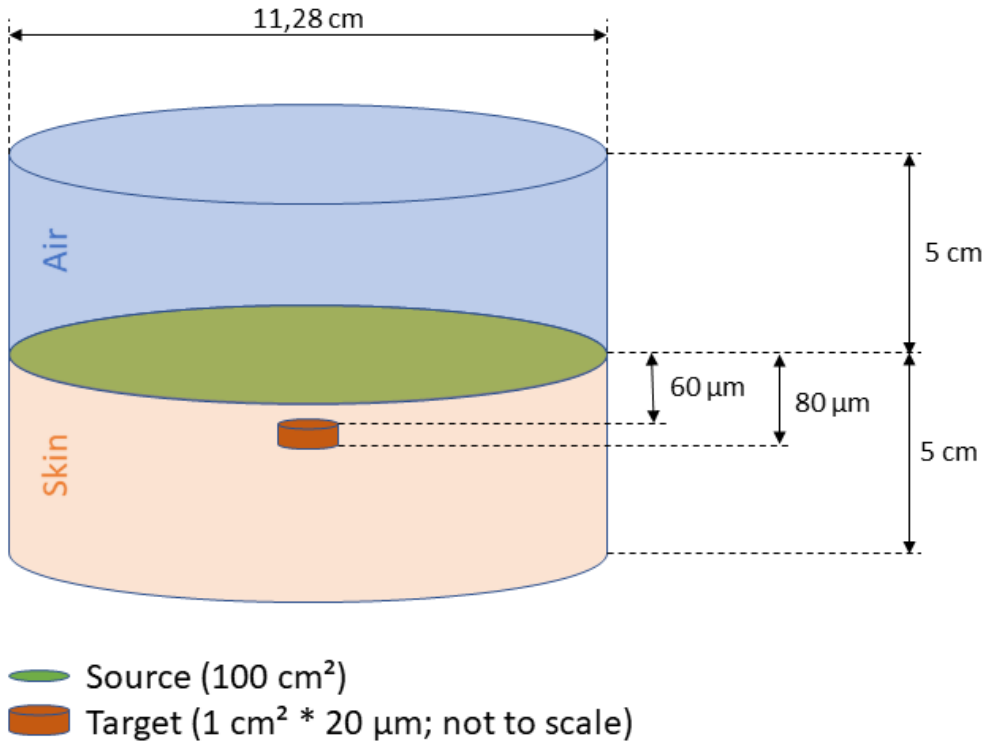

Abb. 4.4 Geometrie der GRS für Q_D

Entgegen der Teilchenfluenz-Spektren für die A_1-Werte wurde hier (derzeit bis auf Neutronen) ein vollständiger Datensatz an deponierten Energien simuliert. Dabei werden die Wechselwirkungen innerhalb des Targets mitsimuliert und direkt eine Dosis bestimmt. Die Verwendung von Dosiskonversionskoeffizienten entfällt demnach bei dieser Vorgehensweise.

Eine eigene Version von MCBAS wurde für die Berechnung von Q_D-Werten programmiert. Durch den modularen Aufbau des Tools konnte ein Großteil der Strukturen übernommen und auf die Anforderungen zur Berechnung von Q_D-Werten angepasst werden. Die Berechnung einer großen Anzahl an Nukliden ist nun möglich. In Abb. 4.5 sind die Ergebnisse für die typische Nuklidliste der Arbeitsgruppe im Vergleich zu den Werten der SSG-26 /IAEA 14/ dargestellt. Für Kr-85 gibt es keinen Q_D-Werte der IAEO, da eine Berechnung technisch jedoch möglich ist, wurden sie von der GRS durchgeführt. Das Modell liefert vergleichbare Werte zur SSG-26 und somit kann bestätigt werden, dass es sich um eine gute Nachbildung für aktuelle Berechnungen handelt und somit für weitere Nuklide angewendet werden kann. Wie bereits erwähnt liegen die Abweichungen zu den Berechnungen aus Japan innerhalb von 10 %.

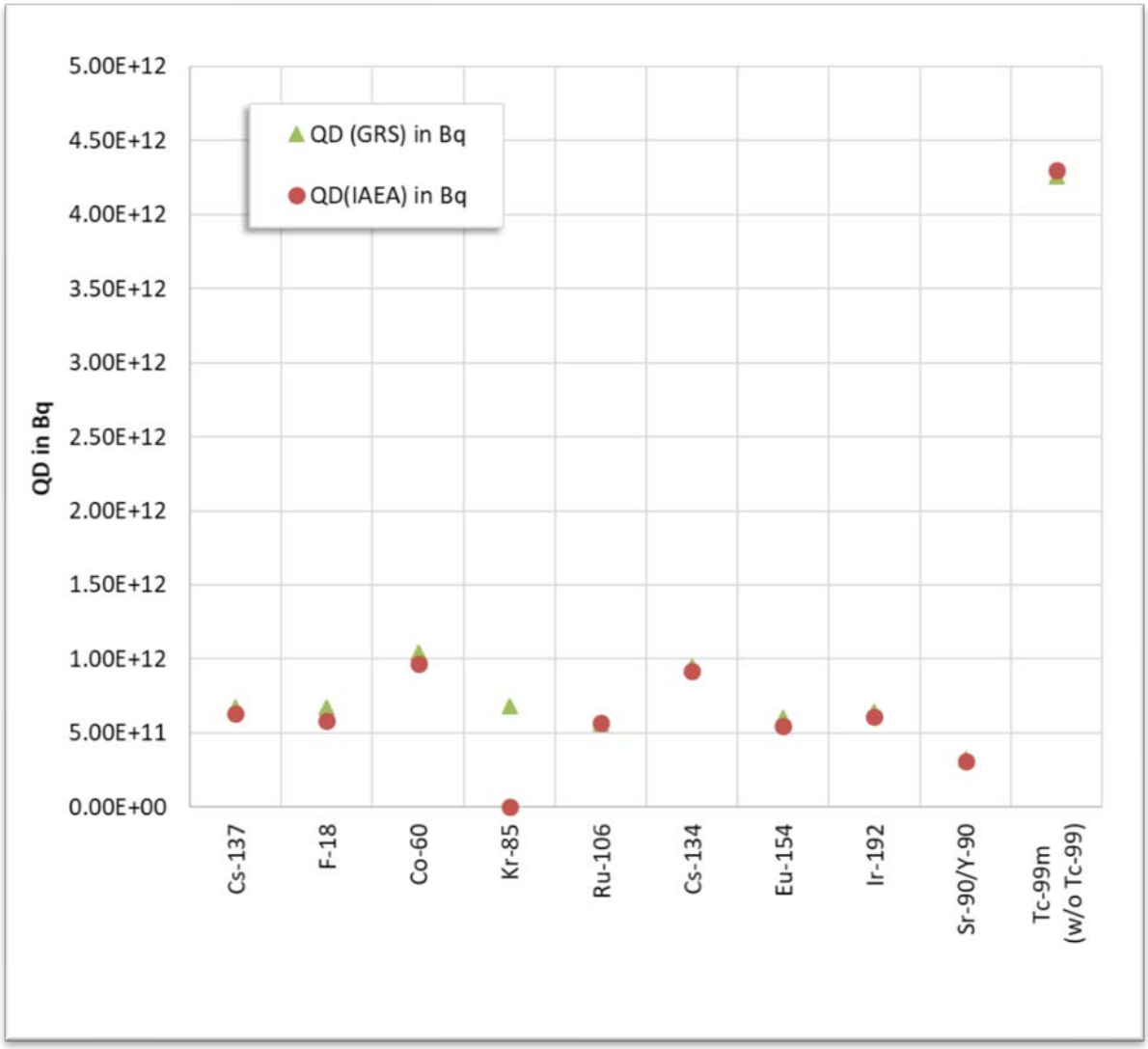

Abb. 4.5 Berechnete Q_D-Werte der GRS für eine Auswahl an Nukliden

4.4 Entwicklungen zu Q_E

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden ebenfalls durch die GRS Simulationen zur Berechnung von Q_E durchgeführt, um mit diesen Erkenntnissen ein geeignetes Modell zu entwickeln. Die Übereinstimmungen zu bekannten Ergebnissen war, ähnlich wie bei der IRSN, siehe Abschnitt 3.1.9, nicht konsistent und vollständig nachvollziehbar. Hier ist die zugrundeliegende Dokumentation der aktuellen Werte nicht ausreichend. Die Betrachtungen der Arbeitsgruppe und auch die geringe Anzahl an Nukliden, für die Q_E berechnet wird führt nach Ansicht der GRS zu der Präferenz, die neuen Daten des Federal Guidance Report No. 15 /BEL 19/ von 2019 zu verwenden, ohne ein eigenes vollständiges Modell zu entwickeln und entsprechende Simulationen durchzuführen.

4.5 Beiträge zu SOFT

Das Berechnungs- und Visualisierungs-Tool SOFT, siehe Abschnitt 3.2, das von den AG-Mitgliedern des CERN entwickelt wird, bietet eine gute Grundlage zur Darstellung und Analyse verschiedener Datensätze. Daher wurden die Daten der GRS trotz eines hohen Programmieraufwands genutzt, um Transferfunktionen zu erzeugen und in SOFT zu integrieren. Weiterhin wurde eine Dokumentation zu SOFT mit den Ansätzen der GRS Methodik erweitert. Darin enthalten ist auch eine tabellarische Übersicht über verwendete Eingangsgrößen, siehe Tab. 4.1.

Anhand der Analysen der Transferfunktionen der verschiedenen Institutionen (derzeit CERN, GRS und IRSN) wurde sichtbar, dass teilweise signifikante Unterschiede vorliegen. Im Folgenden werden die Ergebnisse für das ISO Strahlungsfeld im Detail diskutiert. Für sekundäre Photonen ist die Übereinstimmung sowohl für Q_A als auch für Q_B für alle drei Institutionen sehr gut. Für sekundäre Elektronen im Falle von für Q_A ist der Verlauf der GRS und des CERN nahezu identisch, während die IRSN Daten derzeit ab ca. 1 MeV eine Überhöhung aufweisen. Im Gegensatz zu den Elektronen zeigt der GRS-Verlauf für Positronen eine Überhöhung um ca. 1 MeV auf, der weder bei den CERN noch bei den IRSN Daten erkennbar ist. Für Q_B zeichnet sich ab ca. 1 MeV sowohl für Elektronen als auch für Positronen bei allen drei Institutionen ein stark unterschiedlicher Verlauf ab. Diese vorläufigen Ergebnisse müssen in Zukunft im Detail weiter analysiert und die Gründe für stark abweichende Trends gefunden werden. Möglicherweise ist der Ursprung in minimal unterschiedlichen Methoden zu finden, die in Zukunft angeglichen werden können. Eine Verbesserung der Datenlage könnte die Folge sein. Die aktuellen Transferfunktionen der GRS für das ISO Strahlungsfeld werden in Abb. 4.6 bis Abb. 4.11 präsentiert.

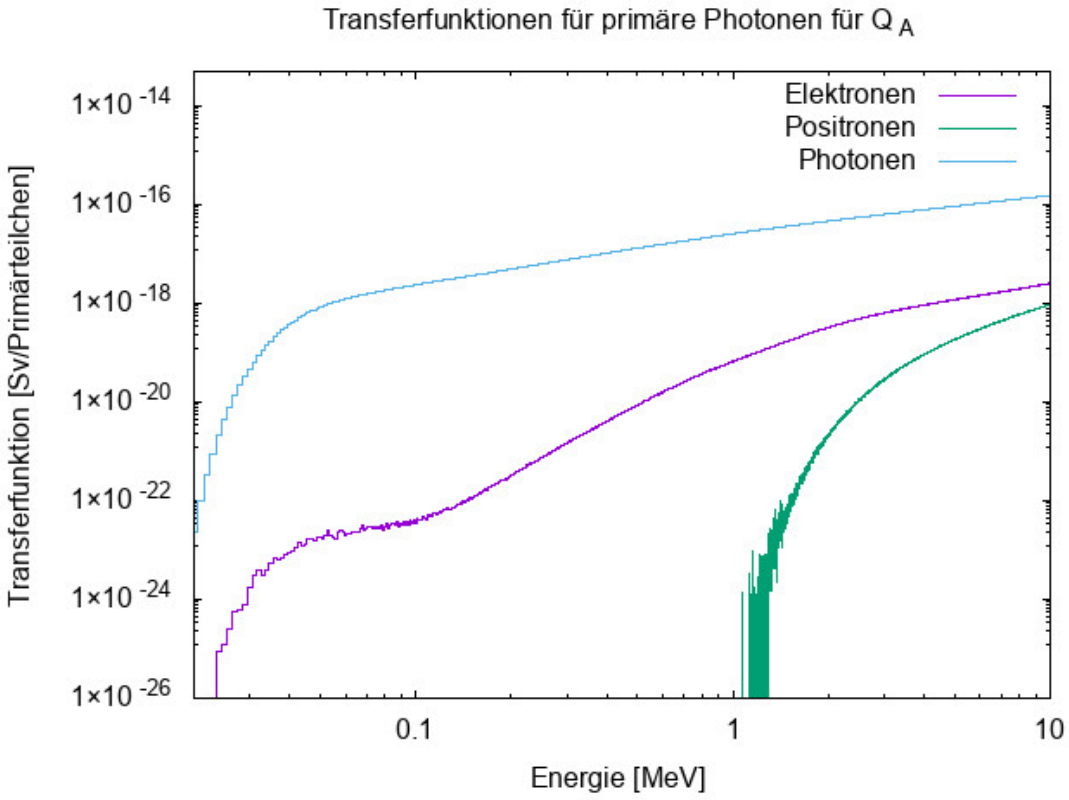

Abb. 4.6 Transferfunktionen für primäre Photonen für Q_A (ISO)

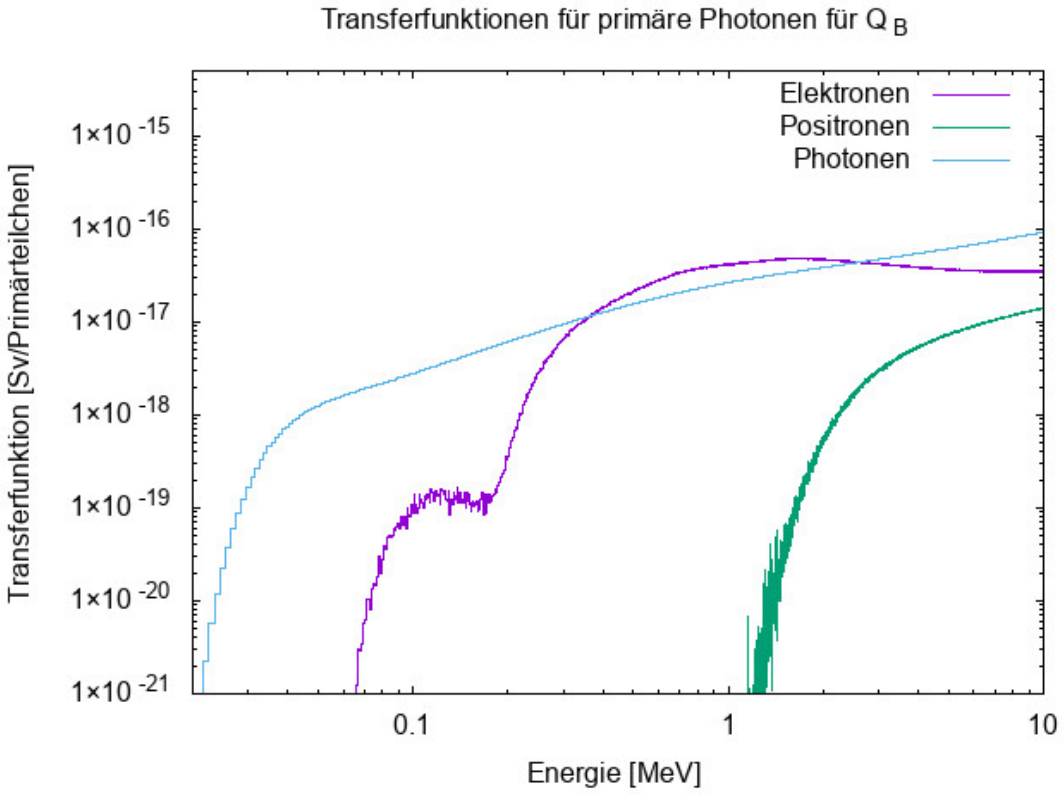

Abb. 4.7 Transferfunktionen für primäre Photonen für Q_B (ISO)

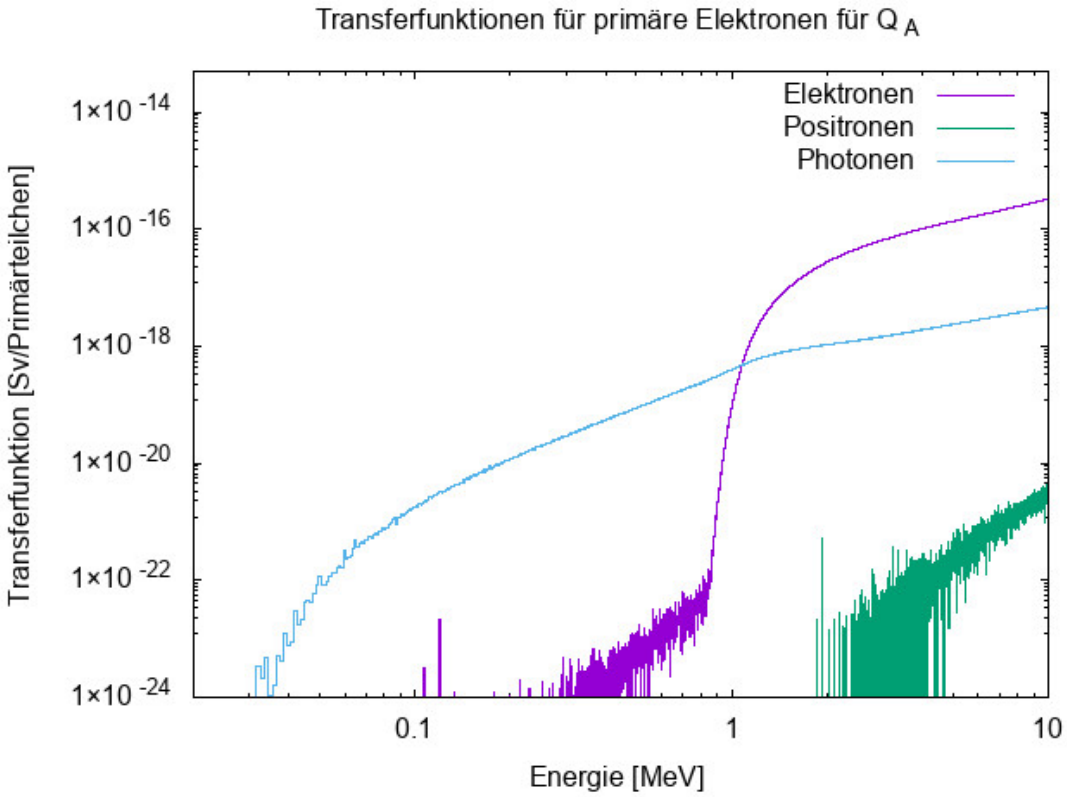

Abb. 4.8 Transferfunktionen für primäre Elektronen für Q_A (ISO)

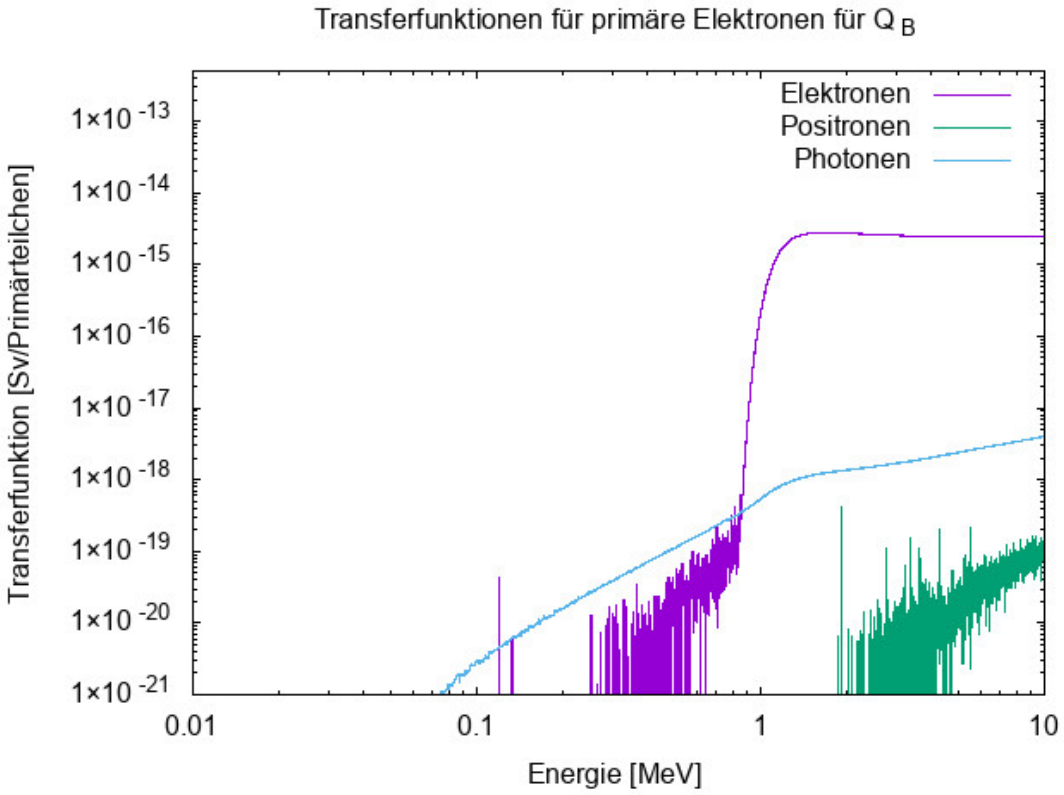

Abb. 4.9 Transferfunktionen für primäre Elektronen für Q_B (ISO)

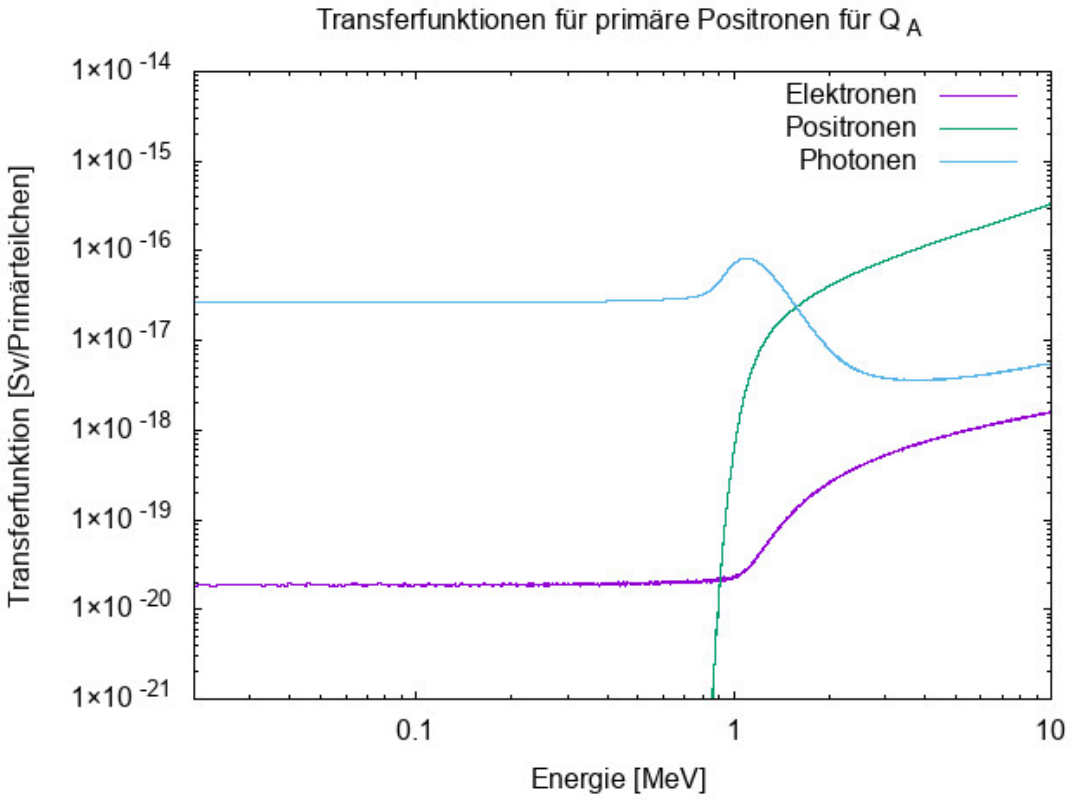

Abb. 4.10 Transferfunktionen für primäre Positronen für Q_A (ISO)

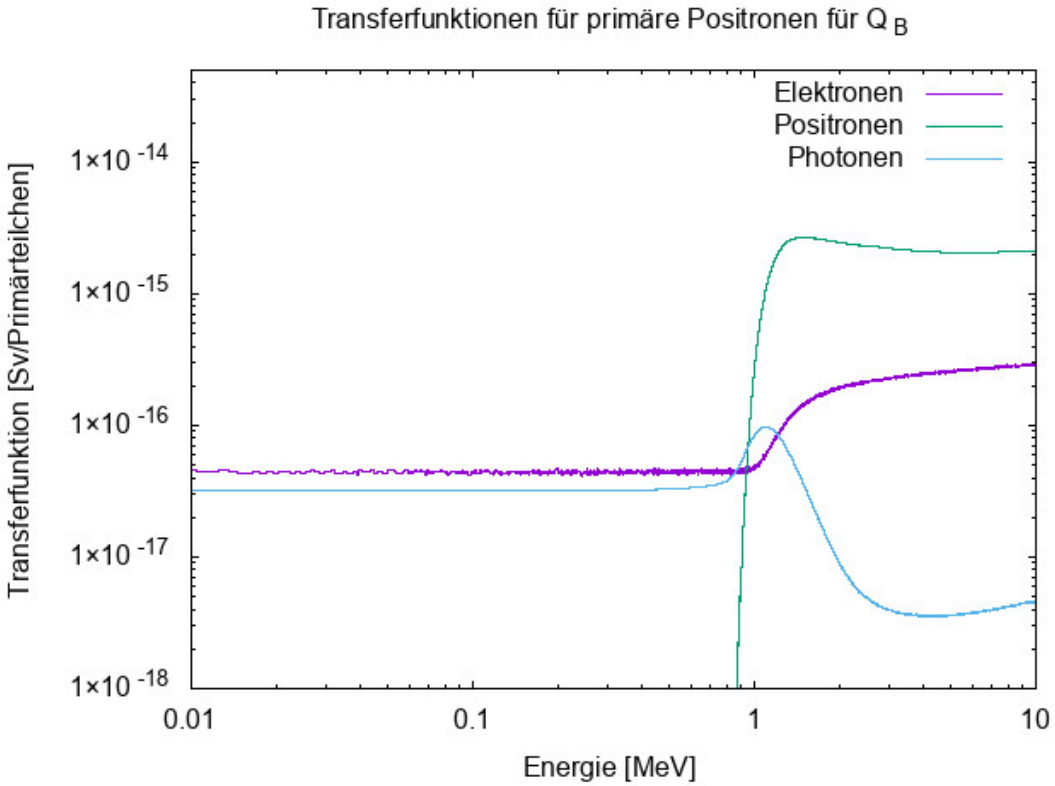

Abb. 4.11 Transferfunktionen für primäre Positronen für Q_B (ISO)

Tab. 4.1 Übersicht über Eingangsparameter der verwendeten Modelle der GRS

GRS AP/PA/ISO				
	Q_A	Q_B	Q_{EYE}	Q_D
Geometrie	Isotrope Punktquelle in Luft (Radius: 1 m)	Isotrope Punktquelle in Luft (Radius: 1 m)	Isotrope Punktquelle in Luft (Radius: 1 m)	Isotrope Scheibenquelle (Radius 5,642 cm) an der Oberfläche eines Stabphantoms aus Haut (10 x 10 x 10 cm^3)
Haut Material	Keine Haut. Fluenz wird in Luft gezählt			Zusammensetzung der Haut nach PNNL
Töchter	Derzeit in der Regel nicht berücksichtigt, aber verfügbar falls gewünscht			
Rest-abschirmung	0.5 mm Stahl (Steel_316) mit einer Dichte von 7,8 g/cm^3 und Zusammensetzung nach PNNL. Umhüllt die Quelle			Nein
MC-Simulationen	Geant4 10.3			
Berücksichtigte Primärteilchen	Photonen / Elektronen / Positronen / Neutronen	Photonen / Elektronen / Positronen / Neutronen	Photonen / Elektronen / Positronen / Neutronen	Photonen / Elektronen / Positronen
Berücksichtigte Sekundär-teilchen	Photonen / Elektronen / Positronen / Neutronen	Photonen / Elektronen / Positronen / Neutronen	Photonen / Elektronen / Positronen / Neutronen	Photonen / Elektronen / Positronen
Simulierte Werte	Teilchenfluenz-Spektren bei Durchquerung der Kugeloberfläche bei 1 m Radius um die Quelle			Deponierte Energie in einem Zylinder zwischen 60 µm und 80 µm Haut-Eindringtiefe, Radius: 0,5642 cm
Energiebereich der Transfer-funktionen	10 keV bis 10 MeV für Photonen / Elektronen / Positronen; 10E-6 keV bis 15 MeV für Neutronen			

GRS AP/PA/ISO				
	Q_A	Q_B	Q_{EYE}	Q_D
Transfer-funktionen	Berechnung für jede Art von Primärteilchen und Geometrie • Fluenz mal ICRP 116 Koeffizient für jedes Sekundärteilchen und jede Energie (normiert) • Summe über alle Sekundärteilchen und -Energien			Umrechnung von deponierter Energie pro Primärteilchen und Energie in Sv*m²/s/Bq pro Primärteilchen und Energie durch entsprechende Normierung
Verwendete ICRP -116 Koeffizienten	Effektive Dosis: Photonen: Tabelle A.1 Elektronen: Tabelle A.3 Positronen: Tabelle A.4 Neutronen: Tabelle A.5	Hautdosis: Photonen: (m) Tabelle B.26 (neue Koeffizienten werden berechnet) Elektronen: Tabelle G.1 Positronen: Tabelle G.1 (eventuell in Zukunft aus /BOU 16/) Neutronen: Tabelle C.12 und C.27 gemittelt (m/w) (neue Koeffizienten werden berechnet)	Augenlinsendosis: Photonen: Tabelle F.1 Elektronen: Tabelle F.2 Positronen: Tabelle F.2 Neutronen: Tabelle F.3	Keine

5 Diskussion und Ausblick

Wie bereits diskutiert, sind die dargelegten Daten lediglich vorläufige Ergebnisse, da sich sowohl der Code MCBAS noch in der Entwicklung befindet als auch die Arbeitsgruppe unter Umständen Änderungen der Eingangsparameter beschließt. In diesem Abschnitt werden daher die ausstehenden geplanten Entwicklungen vorgestellt.

5.1 Finalisierung der A_1-Werte

Um die Berechnungen der A_1-Werte abzuschließen, müssen offene Punkte durch die Arbeitsgruppe gelöst werden. Darunter fallen insbesondere folgende Themen:

- Dosiskonversionskoeffizienten für die Haut, siehe 3.1.2
- Tochternuklide, siehe Abschnitt 3.1.3
- Neutronenquellen, siehe Abschnitt 3.1.5
- Systematische Abweichungen von Transferfunktionen, siehe Abschnitt 4.5

Dabei sind die systematischen Abweichungen der Transferfunktionen keine grundlegenden Modellfragen der Arbeitsgruppe sondern sind essentiell für die Verifizierung der Ergebnisse. Um glaubwürdige und stabile Resultate zu erzeugen und der TRANSSC vorzuschlagen, sind gute Übereinstimmungen mit plausiblen Abweichungen zwischen den Institutionen entscheidend.

Abgesehen von den offenen Punkten, die teilweise bereits in den Diskussionen der Arbeitsgruppe zeitnah zu einem Abschluss kommen könnten, sind die Grundlagen der Modelle, Berechnungstools sowie Dokumentationen in einem weit fortgeschrittenen Zustand, sodass die anstehenden Entscheidungen schnell umsetzbar sind. Im Anschluss können die finalen A_1-Werte unmittelbar berechnet werden. Eine Analyse der Abweichungen innerhalb der Arbeitsgruppe sowie zu den aktuellen A_1-Werten wäre für die Dokumentation sinnvoll. So sollten beispielsweise starke Änderungen im Einzelfall erklärt und begründet werden.

5.2 Modellentwicklung für A_2-Werte

Bezüglich der Modelle für A_2-Werte wurden intensive Fortschritte erzielt. Wie in Abschnitt 3.1.7 beschrieben stehen bereits einige neue Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Q_C-Werte in den Publikationen ICRP 130 /ICRP 15/, 134 /ICRP 17/, 137 /ICRP 18/ und 141 /ICRP 19/. Eine weitere ist ausstehend. Es ist geplant, auf diese Publikationen zurückzugreifen. Jedoch muss eine Entscheidung über die Einbeziehung von Nanopartikeln getroffen werden, wobei die Relevanz für die Beförderung radioaktiver Stoffe nicht abschließend geklärt ist. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung der restriktivsten Werte, die jedoch teilweise zu starken Änderungen führen können. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Beibehaltung des derzeitigen Wertes von 1 bzw. 5 µm.

Modelle für Q_D-Werte wurden entwickelt und in den Simulationen sowie Auswerteroutinen umgesetzt. Für die Nuklidliste der Arbeitsgruppe wurden Werte berechnet und mit den anderen Institutionen verglichen. Die Abweichungen liegen im Rahmen von ca. 10 %. Dabei wurden zwei leicht unterschiedliche Modelle getestet. Die GRS hat gemeinsam mit den Vertretern aus Japan ein Modell in Anlehnung an das aktuelle Q-System verwendet, siehe Abschnitte 3.1.8 und 4.3. Die Übereinstimmungen mit dem alternativen Modell der IRSN und PHE sind sehr gut, sodass eine zeitnahe Einigung erreichbar scheint. Ausstehend für die vollständige Berechnung von Nukliden ist die Erweiterung der Datenbank um Neutronen als Primärteilchen.

Wie in den Abschnitten 3.1.9 und 4.4 beschrieben, haben bisherige Simulationen zu keinem Durchbruch bei der Entwicklung eines eigenen Modells und einer Simulationsumgebung geführt. Nach derzeitigem Stand der Ansichten innerhalb der Arbeitsgruppe könnte die Verwendung von existierenden Koeffizienten des Federal Guidance Reports No. 15 /BEL 19/ von 2019 eine Lösung darstellen. Würde dieser Vorschlag akzeptiert, wäre eine Umsetzung ohne großen Aufwand zeitnah möglich.

5.3 Neutronenquellen

Trotz intensiver Recherchen und eigenen Analysen stehen entscheidende Beschlüsse der Arbeitsgruppe bezüglich der Neutronenspektren aus, die von einer Neutronenquelle, basierend auf (α,n)-Reaktionen, emittiert werden. Die wichtigste Größe hierbei ist das Massenverhältnisse zwischen dem α-Emitter und dem Targetmaterial. Eine Möglichkeit wäre die Verwendung einer maximalen Neutronenfluenz, das jedoch bei untypischen

Massenverhältnissen auftritt. Da dieser maximale Wert jedoch restriktiv ist, wären alle realistischen Neutronenquellen damit abgedeckt.

Die GRS hat die Handhabung von Neutronen im Code MCBAS implementiert und eine Neutronendatenbank simuliert. Sowohl Nuklide mit spontaner Spaltung als auch Neutronenquellen können somit berechnet werden. Die aktuellen Ergebnisse für A_1-Werte für spontan spaltende Kerne weichen derzeit stark von den Resultaten der IRSN ab. Eine detaillierte Analyse sollte hier in Zukunft erfolgen.

Literatur

/AGO 03/ Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., et al.: Geant4—a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Bd. 506, Nr. 3, S. 250–303, DOI 10.1016/S0168-9002(03)01368-8, 2003.

/BAT 15/ Battistoni, G., Boehlen, T., Cerutti, F., Chin, P. W., Esposito, L. S., Fassò, A., Ferrari, A., Lechner, A., Empl, A., Mairani, A., Mereghetti, A., Ortega, P. G., Ranft, J., Roesler, S., et al.: Overview of the FLUKA code. Annals of Nuclear Energy, Nr. 82, S. 10–18, DOI 10.1016/j.anucene.2014.11.007, 2015.

/BEL 19/ Bellamy, M. B., Dewji, S. A., Leggett, R. W., Hiller, M., Veinot, K., Manger, R. P., Eckerman, K. F., Ryman, J. C., Easterly, C. E., Hertel, N. E., Stewart, D. J.: External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil, External Dose Rate Coefficients for General Application. Oak Ridge National Laboratory, Federal Guidance Report No. 15, EPA 402-R-19-002, 2019.

/BOO 03/ Booth, T. E., Brown, F. B., Bull, J. S., Forster, R. A., Goorley, J. T., Hughes, H. G., Mosteller, R. D., Prael, R. E., Sood, A., Sweezy, J. E., Zukaitis, A., Boggs, M., Martz, R.: MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, Report: LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory, 2003.

/BOU 16/ Bourgois, L., Antoni, R.: Fluence to local skin absorbed dose and dose equivalent conversion coefficients for monoenergetic positrons using Monte-Carlo code MCNP6. Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine, Bd. 107, S. 372–376, DOI 10.1016/j.apradiso.2015.11.029, 2016.

/BÜT 14/ Büttner, U.: Untersuchungen zur Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe, Teil 1.1 Berechnung von Aktivitätsgrenzwerten - Q-Modell, Abschlussbericht zum Arbeitspaket 4. GRS-343, 193 S., ISBN 978-3-944161-23-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2014.

/CRO 92/ Cross, W. G., Freedman, N. O., Wong, P. Y.: Beta-Ray Dose Distributions from Skin Contamination. Radiation Protection Dosimetry, Bd. 40, Nr. 3, S. 149–168, 1992.

/FER 05/ Ferrari, A., Sala, P. R., Fasso, A., Ranft, J.: FLUKA: A Multi-Particle Transport Code. Stanford University, SLAC-R-773, 2005.

/FRO 20/ Frosio, T., Hayakawa, N., Louis, B., Thomas, S., Bez, J., Bertreix, P., Theis, C., Donjoux, Y., Cabianca, T., Brown, I., Foster, M., Endres, J., Eberhardt, H.: Computation of Radioactive Material Transport Limits Within A1/A2 Working Group at IAEA TRANSSC. IEEE Access, Bd. 8, S. 29040–29054, DOI 10.1109/ACCESS.2020.2971352, 2020.

/GRS 17/ Endres, J., Eberhardt, H.: Weiterentwicklung der Ansätze zur Berechnung der grundlegenden Aktivitätsgrenzwerte der Transportvorschriften, Abschlussbericht zum Vorhaben 3614R03343, Arbeitspaket 5. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-477, 70 S., Oktober 2017.

/HPA 10/ Health Protection Agency (HPA): SEAL, System for calculating Exemption and A_1 and A_2 Limits. Version 1.0, Windows, Revision 180, Database Version 1.1, 2010.

/IAEA 73/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the Application of the IAEA Transport Regulations. Safety Series, No. 37, 205 S.: Vienna, Juni 1973.

/IAEA 86/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.): International Studies on Certain Aspects of the Safe Transport of Radioactive Materials, 1980 - 1985, Report of the Co-ordinated Research Programme on Safe Transport of Radioactive Materials Sponsored by the International Atomic Energy Agency. IAEA TECDOC, IAEA-TECDOC-375, 125 S.: Vienna, 1986.

/IAEA 90/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Explanatory Material for the IAEA Regulations Explanetory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (1985 Edition). Safety Series No. 7: Vienna, 1990.

/IAEA 08/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, TS-G-1.1 (Rev. 1), 438 S.: Vienna, 2008.

/IAEA 14/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition), Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. SSG-26, 2012. Aufl., 450 S., ISBN 978-92-0-136910-9: Vienna, 2014.

/IAEA 18/ IAEA: Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev.1). Hrsg.: International Atomic Energy Agency (IAEA): Vienna, Austria, 2018.

/ICRP 83/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38. Annals of the ICRP, 11-13, 1983.

/ICRP 87/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Data for Use in Protection Against External Radiation, ICRP Publication 51. Annals of the ICRP, Bd. 17, 2/3, 1987.

/ICRP 94/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 68, Replacement of ICRP Publication 61. Annals of the ICRP, Bd. 24, Nr. 4, 1994.

/ICRP 08/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107. Annals of the ICRP, Bd. 38, Nr. 3, 2008.

/ICRP 09/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 110. Annals of the ICRP, Bd. 39, Nr. 2, 2009.

/ICRP 10/ Petoussi-Henss, N., Bolch, W. E., Eckerman, K. F., Endo, A., Hertel, N., Hunt, J., Pelliccioni, M., Schlattl, H., Zankl, M.: Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116. Annals of the ICRP, Bd. 40, 2-5, S. 1–257, DOI 10.1016/j.icrp.2011.10.001, 2010.

/ICRP 12/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, ICRP Publication 119, Corrected Version. Annals of the ICRP, Bd. 41, Supplement 1, 2012.

/ICRP 15/ International Commission on Radiological Protection: Occupational intakes of radionuclides. ICRP publication, Bd. 130, 188 S., ISBN 9781473944404, SAGE: London, 2015.

/ICRP 17/ International Commission on Radiological Protection: Occupational intakes of radionuclides. ICRP publication, Bd. 134, 351 S., ISBN 9781526408310, SAGE: London, 2017.

/ICRP 18/ International Commission on Radiological Protection: Occupational intakes of radionuclides. ICRP publication, Bd. 137, 487 S., ISBN 9781526440167, SAGE: London, 2018.

/ICRP 19/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Occupational intakes of radionuclides, Part 4. ICRP publication, Bd. 141, 514 S., ISBN 9781529700749, SAGE: Thousand Oaks, California, 2019.

/INMM 19/ Institute of Nuclear Materials Management (INMM): Proceedings PATRAM 2019. 19th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, New Orleans, LA, USA, 4. - 9. August 2019, 2019.

/IWA 02/ IWASE, H., NIITA, K., NAKAMURA, T.: Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code. Journal of Nuclear Science and Technology, Bd. 39, Nr. 11, S. 1142–1151, DOI 10.1080/18811248.2002.9715305, 2002.

/JON 11/ Jones, K. A., Cabianca, 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 (HPA), HPA-CRCE-027, 95 S., ISBN 978-0-85951-707-2: Chilton, Didcot, Oxfordshire, Oktober 2011.

/MCC 11/ McConn, R. J., JR, Gesh, C. J., Pagh, R. T., Rucker, R. A., Williams III, R. G.: Compendium of Material, Composition Data for Radiation, Transport Modeling, Report: PIET-43741-TM-963, PNNL-15870 Rev. 1. U.S. Department of Homeland Security, 2011.

/NRA 15/ Nuclear Regulation Authority (NRA): Influence of Monte Carlo Calculation Parameters on Q Values. Präsentation, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 5th Meeting of the International Working Group on review of methods of calculation of A1 and A2 Values for the IAEA Transport Regulations, International Working Group on Basic Radionuclide Values for the IAEA Transport Regulations: Cologne, 3. September 2015.

/VEC 14/ Vecchiola, S.: Q_A and Q_B calculations performed by MCNPX. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Rapport, PRP-HOM/SER/2014-00014, Oktober 2014.

/WIL 02/ Wilson, W. B., Perry, R. T., Shores, E. F., Charlton, W. S., Parish, T. A., Estes, G. P., Brown, T. H., Arthur, E. D., Bozoian, M., England, T. R., Madland, D. G., Stewart, J. E.: SOURCES 4C: a code for calculating ([alpha],n), spontaneous fission, and delayed neutron sources and spectra, Report LA-UR-02-1839. Los Alamos National Laboratory, 2002.

Abkürzungsverzeichnis

BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
Ber*QA*Trans	Programm zur Berechnung von *Q*- und *A*-Werten für den Transport
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BRACSS	Basic Radionuclide vAlue Calculation SyStem
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
IAEO	Internationale Atomenergieorganisation
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Frankreich)
JNES	Japan Nuclear Energy Safety Organisation (Japan)
LSA	Low Specific Activity
MCNP	Monte-Carlo N-Particle Transport Code
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
NMRI	National Maritime Research Institute (Japan)
NRA	Nuclear Regulation Authority (Japan)
PHE	Public Health England (UK)
SEAL	System for calculating Exemption and A_1 and A_2 Limits
TRANSSC	Transport Safety Standards Committee der IAEO
US DOT	U.S. Department of Transportation (USA)
WNTI	World Nuclear Transport Institute

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Schematische Darstellung der Expositionspfade, Quelle: /IAEA 08/ 4

Abb. 3.1 Bestrahlungsfelder der ICRP 116 /ICRP 10/ 14

Abb. 3.2 Aktuelle Ergebnisse für A_1 für 275 Radionuklide aus Tabelle 2 der SSR-6 entnommen aus /INMM 19/ 17

Abb. 3.3 Transferfunktionen der GRS für Co-60 in SOFT 22

Abb. 4.1 Grundlegende Geometrie für Q_A und Q_B 26

Abb. 4.2 Geometrie zur Simulation der lokalen Haut-Äquivalentdosis 28

Abb. 4.3 Lokale Haut-Äquivalentdosis für Photonen aus Geant4 29

Abb. 4.4 Geometrie der GRS für Q_D 30

Abb. 4.5 Berechnete Q_D-Werte der GRS für eine Auswahl an Nukliden 31

Abb. 4.6 Transferfunktionen für primäre Photonen für Q_A (ISO) 33

Abb. 4.7 Transferfunktionen für primäre Photonen für Q_B (ISO) 34

Abb. 4.8 Transferfunktionen für primäre Elektronen für Q_A (ISO) 35

Abb. 4.9 Transferfunktionen für primäre Elektronen für Q_B (ISO) 36

Abb. 4.10 Transferfunktionen für primäre Positronen für Q_A (ISO) 37

Abb. 4.11 Transferfunktionen für primäre Positronen für Q_B (ISO) 38

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1 Meetings der internationalen Arbeitsgruppe 7

Tab. 3.2 Ergebnisse von Ber*QA*Trans 12

Tab. 3.3 Ergebnisse von Ber*QA*Trans 13

Tab. 4.1 Übersicht über Eingangsparameter der verwendeten Modelle der GRS 39

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
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

ISBN 978-3-947685-89-9