



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

Ermittlung der Strahlenexposition
Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 263. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 12. September 2013

Inhalt

1	Einleitung.....	5
2	Empfehlung	7
3	Wissenschaftliche Begründung	17
3.1	Einleitung.....	17
3.2	Grundlagen.....	17
3.2.1	Die EURATOM-Grundnormen.....	17
3.2.2	Die Strahlenschutzverordnung.....	19
3.2.3	Verwaltungsvorschriften, Richtlinien und sonstige Regelungen.....	21
3.2.4	Die Empfehlung 103 der ICRP.....	25
3.2.5	Zusammenfassung und Bewertung.....	29
3.3	Anwendungsbereiche und Zwecke der Expositionsermittlung.....	31
3.4	Ermittlung der Strahlenexposition mittels Modellierung.....	39
3.4.1	Dosisgrößen	39
3.4.2	Radioökologische Modellierung	40
3.4.3	Strahlenexposition als Zufallsgröße	42
3.4.4	Quantifizierung von Unsicherheit und Variabilität	42
3.5	Realistische Ermittlung der Strahlenexposition.....	47
3.5.1	Methodik der Empfehlung	47
3.5.2	Exemplarische Anwendungen.....	57
3.5.3	Zusammenfassung der Empfehlung.....	76
	Literatur.....	79

Anhang

A-1	Bisherige Vorgehensweise in Deutschland.....	A-3
A-1.1	Die Allgemeinen Berechnungsgrundlagen und die Modellstudie Radioökologie Biblis	A-3
A-1.2	Die AVV zu § 47 StrlSchV	A-4
A-1.3	Die Berechnungsgrundlagen Bergbau.....	A-7
A-1.4	Das vom Bundesamt für Strahlenschutz vorgeschlagene Stufenkonzept.....	A-11
A-2	Vorgehensweise im Ausland	A-16
A-2.1	Empfehlung Artikel 31 EURATOM (RP 129)	A-16
A-2.2	IAEA Safety Series No. 19.....	A-18
A-2.3	ICRP 101	A-20
A-2.4	Ermittlung der Strahlenexposition in Frankreich	A-22
A-2.5	Ermittlung der Strahlenexposition im Vereinigten Königreich	A-27

A-2.6 Ermittlung der Strahlenexposition in der Ukraine	A-30
A-2.7 Ermittlung der Strahlenexposition in den USA	A-33
Literatur	A-41

1 Einleitung

In vielen Fällen übernimmt die Radioökologie die Aufgabe, die Auswirkungen von Emissionen und Freisetzungen von Radionukliden auf Mensch und Umwelt zu beschreiben und Strahlenexpositionen durch Modellierung zu quantifizieren. In allen Fällen, in denen Strahlenexpositionen nicht direkt gemessen werden können, müssen sie mit Methoden der Radioökologie bestimmt werden.

Dazu gehören die Rekonstruktion vergangener Expositionen, die Bestimmung aktueller Expositionen und die Voraussage zukünftiger oder auch nur potenzieller Expositionen. Gegenstand radioökologischer Modellierung können Einzelpersonen oder Gruppen der Beschäftigten oder der allgemeinen Bevölkerung, ganze Populationen oder Referenzpersonen sein. Die Zielstellungen radioökologischer Expositionsermittlungen sind so vielfältig wie die möglichen methodischen Ansätze.

Ein grundsätzliches Problem der methodischen Ansätze ist der Grad der Konservativität oder des Realismus, der in den radioökologischen Expositionsermittlungen zur Anwendung kommt. Die Europäische Kommission (EC) hat in Artikel 45 der Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen (EURATOM-Grundnormen) (EC 1996) gefordert, dass die aus Tätigkeiten herrührenden Strahlenexpositionen für die Bevölkerung in ihrer Gesamtheit und für Bevölkerungsgruppen so realistisch wie möglich ermittelt werden sollen, ohne jedoch festzulegen, wie dies praktisch zu geschehen hat. Im Gegensatz dazu werden in Deutschland in Genehmigungsverfahren bei der Anwendung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV (BMU 2012a) im Sinne der Vorsorge extrem konservative Annahmen zur Abschätzung der potenziellen Strahlenexpositionen gemacht.

Dieser anscheinende Gegensatz führt immer wieder zu kontroversen Diskussionen, wenn übersehen wird, dass verschiedene Zielstellungen unterschiedliche methodische Ansätze erfordern. Die Frage, für welche Zielstellung welcher Grad der Konservativität oder des Realismus erforderlich ist, ist bis heute im deutschen Regelwerk weitgehend unbeantwortet.

Kompliziert wird die Diskussion durch unklare Begrifflichkeiten, wenn synonym von Ermittlung, Schätzung und Abschätzung der Strahlenexposition gesprochen wird. Zur Klärung ist es sinnvoll, auf den englischen Text der EURATOM-Grundnormen zurückzugreifen. Dort heißt es: „*The competent authorities shall: (a) ensure that dose estimates from practices referred to in Article 44 are made as realistic as possible for the population as a whole and for reference groups of the population in all places where such groups may occur; (b) ...*“.

Auch die International Commission on Radiological Protection (ICRP) hat sich in der Empfehlung 103 (ICRP 2007) zur Ermittlung der Strahlenexposition geäußert. Dort heißt es in Kapitel 6.6.5. Compliance with the intended standard of protection: „(320) *The measurement or assessment of radiation doses is fundamental to the practice of radiological protection. Neither the equivalent dose in an organ nor the effective dose can be measured directly. Values of these quantities must be inferred with the aid of models, usually involving environmental, metabolic, and dosimetric components. Ideally, these models and the values chosen for their parameters should be realistic, so that the results they give can be described as 'best estimates'. Where practicable, estimates and discussion should be made of the uncertainties inherent in these results (see Section 4.4)*“. Dieser Satz war wörtlich bereits in der Empfehlung 60 der ICRP (1991) in Paragraph 264 im Kapitel 7.5 *Assessment of doses* enthalten.

In den deutschen Versionen der EURATOM-Grundnormen und der Empfehlung 103 der ICRP wurde das Wort *estimate* missdeutig mit Abschätzung übersetzt. Speziell der Begriff *best*

estimate, der mit bester Schätzwert zu übersetzen ist, ist mit bester Abschätzung im deutschen Sprachgebrauch nicht üblich.

In der Strahlenschutzverordnung (BMU 2012b) werden die Begriffe Ermittlung und Abschätzung voneinander abgegrenzt benutzt, allerdings in den Begriffsbestimmungen nicht näher definiert.

Am deutlichsten wird die Unterscheidung von Ermittlung und Abschätzung im deutschen Regelwerk in der „Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 Strahlenschutzverordnung (Richtlinie Arbeiten)“ vom 15. Dezember 2003 (BMU 2003). Dort heißt es zu Abschätzung: *„Die Abschätzung der Strahlenexposition muss repräsentativ für die durchgeführten Arbeiten der Person sein. Die der Abschätzung zu Grunde liegenden Annahmen müssen konservativ in Bezug auf die tatsächlich vorliegenden Expositionsbedingungen sein.“* Der Begriff Ermittlung der Strahlenexposition geht in dieser Richtlinie von Messwerten stationärer oder personengetragener Messgeräte aus, die *„repräsentativ für die Aufenthaltszeiten der Person an dem oder den Arbeitsorten sind.“*

Die Strahlenschutzkommission (SSK) benutzt in dieser Empfehlung die Begriffe Ermittlung und Abschätzung, sofern nicht in Zitaten anders genannt, in dem Sinne, dass unter Ermittlung die Bestimmung eines (besten) Schätzwertes¹, engl. (*best*) *estimate*, und unter Abschätzung die Angabe einer oberen (oder unteren) Schranke verstanden wird. In diesem Sinne versteht sie unter dem *„dose estimates“* der EURATOM-Grundnormen Ermittlungen von Strahlenexpositionen.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Strahlenexposition in einer Bevölkerung hoch variabel ist. Strahlenexpositionen hängen von einer Vielzahl von Parametern ab, die unter natürlichen Umweltbedingungen als Zufallsvariable zu betrachten sind. Damit ist auch die Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung eine Zufallsgröße. Dies hat zur Folge, dass die Strahlenexpositionen in einer Bevölkerung oder einer anderen Gruppe Verteilungen aufweisen, die retrospektiv die tatsächlichen Unterschiede der individuellen Expositionen, prospektiv die erwarteten Verteilungen zukünftiger oder potenzieller Expositionen darstellen.

Angesichts des stochastischen Charakters der individuellen Strahlenexposition ist es derzeit in Deutschland eine offene Frage, welche Größen bei radioökologischen Expositionsermittlungen zur Charakterisierung der Exposition heranzuziehen sind. Die Möglichkeiten reichen von der Angabe einfacher Punktschätzer bis zur Beschreibung der vollständigen Verteilungen. Auch hier ist eine Klärung erforderlich.

Ein drittes Problem ist, dass nicht definiert ist, was unter dem Begriff realistisch verstanden werden soll. Auch hier ist der gemeine Sprachgebrauch mehrdeutig. Ohne eine allgemeine semantische Diskussion bezeichnet die SSK als realistische Ermittlung eine Bestimmung eines (besten) Schätzwertes, der den Wert einer Größe bewusst weder über- noch unterschätzt, d. h. verzerrungsfrei oder ohne Bias ist.

Von diesem Verständnis des Begriffs Realismus ist ein Aspekt abzugrenzen, der in der Diskussion um Ermittlungen von Strahlenexpositionen immer wieder eine Rolle spielt, nämlich der der Unsicherheit des ermittelten Schätzwertes. Realismus wird dabei gerne mit einer geforderten relativen Unsicherheit verknüpft. Dies ist nach Auffassung der SSK nicht sinnvoll. Auch ein sehr unsicherer Schätzwert kann realistisch sein. Auch ein Schätzwert mit geringer Unsicherheit kann unrealistisch sein. Die realistische Ermittlung einer Strahlenexposition und

¹ Der beste Schätzwert und die ihm zugeordnete Standardunsicherheit werden gemäß GUM (JCGM 2008a) (Paragraph 4.1.6) und GUM Supplement 1 (JCGM 2008b) (Paragraph 5.6.2) als Erwartungswert bzw. Standardabweichung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Ergebnisgröße definiert.

die Analyse ihrer Unsicherheit sind unterschiedliche aber komplementäre Aufgaben, die beide zu bearbeiten sind.

Mit welchem Aufwand die Strahlenexposition überhaupt realistisch ermittelt werden kann und wie inakzeptabel hohe Unsicherheiten vermieden werden können, ist zum einen die wissenschaftliche Frage nach Möglichkeiten und Grenzen der Radioökologie. Zum anderen ist es die Frage, welchen gesellschaftlichen Stellenwert die Ermittlung der Strahlenexposition für eine bestimmte Zielstellung hat und welcher Aufwand an Ressourcen gesellschaftlich vertretbar ist. Beide Fragen sind nicht abschließend beantwortet.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat mit Schreiben vom 06.11.2006 die SSK um Beratung zur realistischen Ermittlung der Strahlenexposition gebeten.

Mit Bezug auf die in Artikel 45 der EURATOM-Grundnormen geforderte möglichst realistische Ermittlung der Bevölkerungsdosen aufgrund von Tätigkeiten nach Artikel 44 wünscht das BMU die Erarbeitung einer Stellungnahme unter Berücksichtigung folgender Aspekte:

- Identifizierung und Festlegung solcher Situationen, die eine realistische Berechnung der Strahlenexpositionen erfordern oder sinnvoll machen,
- Festlegung, welche Modelle, Modellparameter oder -größen bei den identifizierten Situationen realistisch anzusetzen sind.

Der Ausschuss „Radioökologie“ der Strahlenschutzkommission hat auf einer Klausurtagung, die am 25./26. November 2003 in Eltville am Rhein stattfand, eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme in Bezug auf die Notwendigkeiten und Möglichkeiten der realistischen Ermittlung der Strahlenexposition durchgeführt (SSK 2005a). Auf der Grundlage dieser Tagung und weiterer Diskussionen wurde diese Empfehlung der Strahlenschutzkommission erarbeitet, in der Anforderungen an die Ermittlung von Strahlenexpositionen für die verschiedenen Zielstellungen und die jeweils erforderlichen Methoden empfohlen werden.

2 Empfehlung

Diese Empfehlung behandelt Anforderungen an den Realismus der Ermittlung der Strahlenexposition, bei der solche Ermittlungen auf der Grundlage radioökologischer Modellierung vorgenommen werden. Sie ist generalisiert anwendbar auf alle Expositionssituationen, in denen Expositionsszenarien aus FEPs (Features, Events, Processes = Merkmale, Ereignisse, Prozesse) abgeleitet werden können. Ein Szenario einer Expositionssituation besteht dann aus den natürlichen und technischen Merkmalen der Expositionssituation sowie einem Satz von Prozessen und Ereignissen, die die Strahlenexpositionen von Menschen beeinflussen können und Expositionsszenarien festlegen.

Die grundsätzliche Aufgabe der Radioökologie besteht darin, in einer Expositionssituation den Wert der Dosis von Referenzpersonen oder real existierenden Personen an einem gegebenen Ort durch Modellierung zu ermitteln. Dazu ist eine eindeutige Definition der jeweiligen Ergebnisgröße erforderlich, um Fehlinterpretationen beim Vergleich unterschiedlicher Dosisangaben zu vermeiden. Dabei ist es unerheblich, ob der Wert der Ergebnisgröße einer Expositionsermittlung zum Vergleich mit einem Grenzwert, einem Richtwert oder einem Referenzwert benutzt wird, ob er wie bei einem Langzeitsicherheitsnachweis lediglich eine Indikatorgröße darstellt, oder ob er wissenschaftlichen Untersuchungen dient.

Die eindeutige Definition der Ergebnisgröße betrifft nicht nur die Festlegung der Dosisgröße sondern auch die der Bezugsperson einschließlich ihrer Charakteristika. So ist es wesentlich, ob es sich um ein real existierende Person oder eine Referenzperson im Sinne von ICRP 23 (ICRP 1975) handelt oder ob es sich um eine Person mit einer mittleren Exposition in einer Population oder eine Person handelt, die repräsentativ für höher exponierte Teile einer Population ist.

Für höher exponierte Personen, d. h. solche in einer sogenannten „low-probability exposure situation“, hat die ICRP das Konzept der repräsentativen Referenzperson (ICRP 2006) eingeführt. Die Dosis der repräsentativen Person ist äquivalent der mittleren Dosis der Personen der „kritischen Gruppe“ in früheren ICRP-Empfehlungen und ersetzt diese. Es wird von der ICRP als ausreichend angesehen, für die repräsentative Person die Altersgruppen Kleinkind (Alter 1 Jahr, repräsentativ für bis 5-Jährige), Kind (Alter 10 Jahre, repräsentativ für 6- bis 15-Jährige) sowie Erwachsener (repräsentativ bis 16- bis 70-Jährige) zu betrachten.

Die SSK weist darauf hin, dass es wichtig ist, im Regelwerk die Referenzperson im Sinne von ICRP 23 von der repräsentativen Person nach ICRP 101 (ICRP 2006) zu unterscheiden. Sie empfiehlt, die repräsentative Referenzperson ins deutsche Regelwerk aufzunehmen und dort zu verwenden, wo auf höher exponierte Personen einer Population abgehoben wird. In dieser Empfehlung wird daher die Unterscheidung zwischen der Referenzperson und der repräsentativen Person gemacht.

Die Dosis einer – wie auch immer spezifizierten – Person ergibt sich aus den Eigenschaften der Quelle und der Verknüpfung von resultierenden Konzentrationen radioaktiver Stoffe in der Umwelt mit Lebens- und Verzehrsgewohnheiten der Person. Sie kann und sollte jeweils so realistisch wie möglich ermittelt werden.

Realistische Ermittlung der Strahlenexposition bedeutet im Sinne dieser Empfehlung, den wahren Wert der Ergebnisgröße auf der Grundlage verfügbarer Informationen so gut wie möglich zu schätzen und die Unsicherheit der Schätzung zu quantifizieren². Das beinhaltet zwei Aspekte. Zum einen sind Überschätzungen (Konservativitäten) und Unterschätzungen zu vermeiden. Zum anderen sollen die Unsicherheiten bei Berücksichtigung aller Beiträge der Unsicherheit so gering wie möglich sein. Ermittlungen der Strahlenexposition sind umso realistischer, je weniger der wahre Wert unter- oder überschätzt wird und je geringer die Unsicherheit des ermittelten Dosiswertes ist.

Die Aufstellung des Modells der Auswertung³ ist allgemein in der Metrologie und so auch bei der Ermittlung der Strahlenexposition der schwierigste Teil der Lösung der Aufgabe. In dieser Empfehlung wird davon ausgegangen, dass das Modell gegeben ist und seine Sinnhaftigkeit nicht in Frage gestellt wird. Es soll dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Gleiche Sachverhalte sollten in unterschiedlichen Fragestellungen durch gleiche Modelle beschrieben werden. Wenn vereinfachte Modelle benutzt werden, sollten sie verzerrungsfrei sein und die gemachten Näherungen hinreichend sein. Abdeckende, d. h. konservativ überschätzende Modellierungen, sind für die Beantwortung mancher Fragestellungen ausreichend, können aber nach Einschätzung der SSK nicht als Ermittlungen der Strahlenexposition angesehen werden.

² Abschätzungen von Strahlenexposition können – mit unterschiedlichen Konservativitäten – zwar zum Nachweis der Einhaltung von Grenz- oder Richtwerten herangezogen werden, sie stellen jedoch keine Ermittlungen von Strahlenexpositionen dar.

³ In Anlehnung an das International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (JGCM 2008c) wird unter dem Modell der Auswertung die Summe der mathematischen Relationen aller Größen verstanden, die in die Ermittlung des Wertes der Ergebnisgröße eingehen.

Die Realitätsnähe der Modellierung ist anhand bekannter Expositionssituationen zu validieren. Ein Modell, das die Natur oder die vergangenen Erfahrungen nicht beschreibt, ist für die realistische Ermittlung der Strahlenexposition ungeeignet.

In Übereinstimmung mit einer Empfehlung der World Health Organization (WHO) aus dem Jahr 2008 (WHO 2008) hält die SSK die Angabe der dem Ergebnis zugeordneten Unsicherheit, die vor allem die Variabilität der Eingangsgrößen abbildet, für erforderlich. Die Notwendigkeit, Unsicherheiten bei der Ermittlung von Strahlenexpositionen zu quantifizieren, ergibt sich auch aus ICRP 103 (ICRP 2007) und dem dort verwendeten Ansatz der Optimierung. Eine Optimierung ist generell ohne eine realistische Ermittlung der Strahlenexposition nicht möglich; im Ansatz von ICRP 103 ist Optimierung ohne Probabilistik, d. h. die Ermittlung von Wahrscheinlichkeitsdichten (PDF = probability density function) von Expositionen, nicht möglich, da bei der Optimierung besonderer Wert auf die Quantile der PDF gelegt wird, die Werte der Strahlenexposition oberhalb von Referenzwerten aufweisen.

Zur Interpretation der ermittelten Wahrscheinlichkeitsdichten ist anzumerken, dass diese PDFs retrospektiv die tatsächlichen Unterschiede der individuellen Expositionen, d. h. die erwarteten Häufigkeitsverteilungen der Expositionen, darstellen. Prospektiv beschreiben sie sowohl die erwarteten Verteilungen zukünftiger oder potenzieller Expositionen als auch die Wahrscheinlichkeit für die Exposition eines nicht näher bestimmten Individuums der betrachteten Population.

Die Darstellung von Unsicherheiten über Wahrscheinlichkeitsdichten oder -funktionen ist gegenüber der Angabe von besten Schätzwerten und Standardunsicherheiten zu bevorzugen. Wenn Quantile von Ergebnisgrößen zu ermitteln sind, müssen die Wahrscheinlichkeitsdichten der Ergebnisgrößen ermittelt werden. Deterministisches Rechnen mit Quantilen ergibt keine Quantile, sondern ist stark verzerrend. Die Analyse von Unsicherheiten erlaubt zudem über Sensitivitätsanalysen die Identifizierung kritischer Parameter, für die detailliertere Information beschafft werden müssen.

Die SSK empfiehlt deshalb, Ungewissheiten nach Möglichkeit mittels Wahrscheinlichkeitsdichten (PDF) zu berücksichtigen. Hierzu ist eine Informations- bzw. Datenlage erforderlich, die die Ableitung solcher Wahrscheinlichkeitsdichten erlaubt. Die SSK empfiehlt, für die radiologischen Parameter (wie Transferfaktoren und Verzehrswerten) die zur Ableitung begründeter Wahrscheinlichkeitsdichten erforderlichen Daten sowie die diesen zugrunde liegenden Primärstudien beim Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zu sammeln und für die Öffentlichkeit verfügbar zu halten.

In Fällen, bei denen die vorliegende Informations- bzw. Datenlage es nicht erlaubt, begründete Wahrscheinlichkeitsdichten abzuleiten, kann es erforderlich sein, andere Methoden zur Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten zu verwenden, wie z. B. 2D-Monte-Carlo, p-Box oder Angabe von Bandbreiten (Barthel und Thierfeldt 2012).

Im Folgenden wird unterstellt, dass die vorliegende Informations- bzw. Datenlage eine Ableitung begründeter Wahrscheinlichkeitsdichten für die radiologischen Parameter erlaubt.

In radioökologischen Dosierermittlungen müssen die von einer bestimmten Strahlenquelle ausgehenden Strahlenexpositionen durch Modellrechnungen und/oder Messungen an relevanten Umweltmedien geschätzt werden. Abbildung 2.1 stellt exemplarisch die komplexen Wege der Radionuklide durch die Umwelt von einer Quelle zum Menschen dar. Der mögliche Expositionspfad „Aufnahme von Radionukliden durch die Haut“ und die Betrachtung der Hautdosis werden hier aus Gründen der Vereinfachung nicht dargestellt.

Abbildung 2.1 gibt häufig vorkommende Expositionssituationen exemplarisch wieder. Sie stellt nicht alle Expositionssituationen oder -szenarien dar, die durch FEPs beschrieben werden

können. So werden zum Beispiel Modelle, die zur Ableitung der Freigabewerte benutzt werden, wie die Szenarien „Arbeiter an einer kontaminierten Maschine“ oder „in einem kontaminierten Labor“, „Lastwagenfahrer bei der Freigabe zur Deponierung“ oder „Deponiearbeiter bei der Freigabe zur Deponierung“, „Radioaktivität in Baumaterialien“ etc., andere Modelle benutzen. Jedoch bleibt die Anwendbarkeit der im Folgenden empfohlenen Methodik auf diese Fälle unberührt.

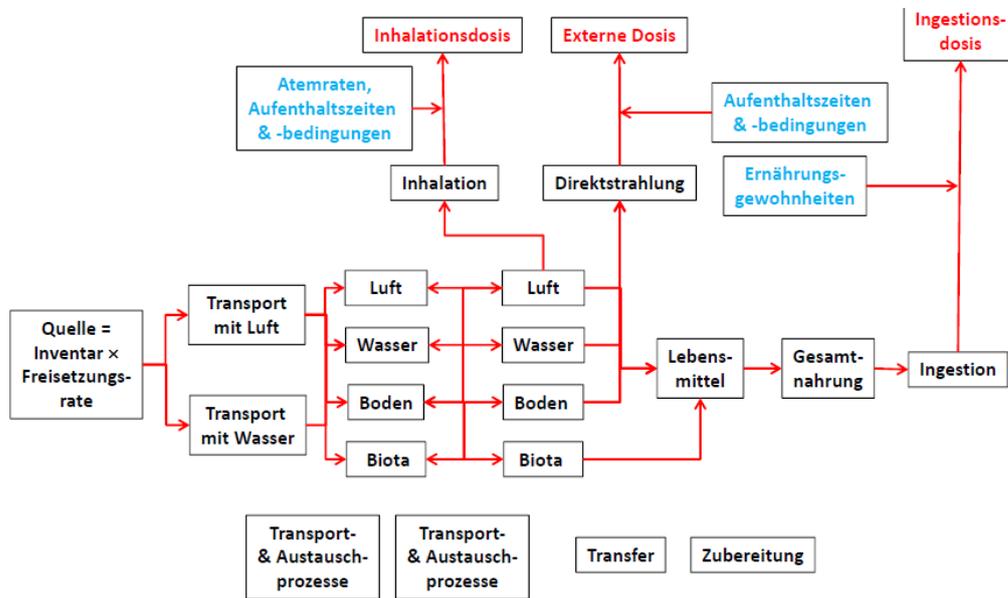


Abb. 2.1: Exemplarische Darstellung der Wege der Radionuklide von einer Quelle zum Menschen.

Die Komplexität der Modelle/Modellstrukturen, aber auch der Realismus (die Realitätsnähe) der Modellierung, ist zum einen abhängig von den Informationen, die über die Quelle und über die Radionuklide in den verschiedenen Umweltmedien verfügbar sind, zum anderen von den Kenntnissen über die Situationen, die zu einer Exposition von Personen führen.

Eine Kategorisierung der jeweils im Einzelfall verfügbaren Informationen in Hinblick auf die Ermittlung der Strahlenexposition in die fünf Kategorien I0 – I4 enthält Tabelle 2.1. Bei einer informationsadäquaten Modellierung nimmt der Realismus der Dosisermittlung von I0 nach I4 zu.

Tab. 2.1: Kategorisierung der Ermittlung der Strahlenexposition auf der Grundlage der verfügbaren Information (Informationskategorisierung).

Kategorie	verfügbare Information
I0	aus abdeckendem hypothetischem Quellterm
I1	aus hypothetischem Quellterm (bester Schätzwert aus Vorhersagen)
I2	aus tatsächlichem Quellterm (bester Schätzwert nach gemessenen Daten)
I3	aus gemessener ODL und Aktivitätskonzentrationen in Lebensmitteln modelliert aus gemessenen Daten für Luft, Boden, Wasser
I4	aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Wasser, Lebensmitteln, ODL; auch Dosimeter, Ganzkörper(GK)-Messung, Bioassay etc.

In die Expositionsermittlung gehen die aus den FEPs resultierenden Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter als Eingangsgrößen ein, die die Expositionssituation charakterisieren. Die verfügbaren Kenntnisse zur Expositionssituation bestimmen ebenfalls die Realitätsnähe der Modellierung/Expositionsermittlung. Tabelle 2.2 zeigt ein System mit 4 Stufen für FEPs, Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter. Diese Stufen werden im Folgenden als Situationskategorien bezeichnet. Die Werte der Eingangsgrößen reichen von abdeckenden und unmöglichen (S0) über mögliche und generische (S1) und fallspezifische und real existierende (S2) zu fallspezifischen und individuellen Daten (S3). Der Realismus der Dosiermittlung nimmt von S0 nach S3 zu. Der Übergang von S0 nach S1 bewirkt den Abbau von Überschätzungen (Konservativitäten), der Übergang von S1 nach S3 dient dem Abbau von Unsicherheiten.

Tab. 2.2: Kategorisierung der FEPs, Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter (Situationskategorisierung).

	Situationskategorie (Stufen der FEPs, Szenarien und Expositionspfade, Modellparameter, menschlichen Parameter)			
	S0	S1	S2	S3
FEPs, Szenarien und Expositionspfade	abdeckende (auch unmögliche); z. B. Gleichgewichtsbedingung (50 a), Ubiquität, unplausible Verzehrsmengen	nur realistisch und rechtlich mögliche, generisch, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, individuelle Daten einer Kohorte, Ungleichgewichte
Radioökologische Modellparameter *	generische 95. Perzentile	generische Daten	fallspezifische Daten	fallspezifische Daten
Ernährungsgewohnheiten	generische Daten, abdeckend oder 95. Perzentile	generische Daten	fallspezifische Daten	individuelle Daten
Aufenthaltszeiten	Daueraufenthalt	generische Daten	fallspezifische Daten	individuelle Daten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	100 %	generische Daten	fallspezifische Daten	individuelle Daten

* z. B. K_d -Werte, Transferfaktoren, Löslichkeiten etc.

Die verfügbare Information zur Strahlenquelle legt die Informationskategorie fest. FEPs, Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter bestimmen die Situationskategorie. Durch die Kombination einer Informationskategorie

mit einer Situationskategorie wird die Realitätsnähe der Modellierung festgelegt. Der Realismus der Dosisermittlung steigt mit der Informationskategorie ($I1 < I2 < I3 < I4$) und der Situationskategorie ($S0 < S1 < S2 < S3$). Tabelle 2.3 stellt den Grad des Realismus in einem Farbcode mit rot = unrealistisch zu grün = realistisch dar. Die Forderung der EURATOM-Grundnormen, Strahlenexpositionen so realistisch wie möglich zu ermitteln, bedeutet im Schema der Tabelle 2.3, soweit mit vertretbarem Aufwand möglich, nach rechts unten zu kommen.

Tab. 2.3: Kategorisierung der möglichen Ermittlungen von Strahlenexpositionen.

Situationskategorie Informationskategorie	S0 abdeckende (auch unmögliche); z. B. Gleichgewichts- bedingung (50 a), Ubiquität, unplausible Verzehrs- mengen	S1 nur realistisch und rechtlich mögliche, generisch, Ungleich- gewichte	S2 fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleich- gewichte	S3 fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, individuelle Daten einer Kohorte, Ungleich- gewichte
I0 aus abdeckendem hypothetischem Quellterm				
I1 aus hypothetischer Quelle				
I2 aus tatsächlicher Quelle				
I3 Daten für Luft, ODL, Boden, Wasser				
I4 Daten für Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL; auch Dosimeter, GK-Messung, Bioassay etc.				

Anhand der Einteilung von Expositionssituationen nach ICRP 103 als geplante, bestehende oder Notfall-Expositionssituationen und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass retrospektive und prospektive Ermittlungen der Strahlenexposition stets unterschiedliche verfügbare Informationen haben werden, empfiehlt die SSK, die radioökologische Dosisermittlung nach dem in Tabelle 2.4 festgelegten Schema durchzuführen.

Tab. 2.4: Empfehlung der SSK für die Zuordnung der Anwendungsbereiche zu den Kategorien der Ermittlungen der Strahlenexposition.

Situationskategorie Informationskategorie	S0	S1	S2	S3
	abdeckende (auch unmögliche); z. B. Gleichgewichtsbedingung (50 a), Ubiquität, unplausible Verzehrsmengen	nur realistisch und rechtlich mögliche, generisch, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, individuelle Daten einer Kohorte, Ungleichgewichte
I0 aus abdeckendem hypothetischem Quellterm	prospektiv in geplanten Situationen in Genehmigungsverfahren nach § 47 StrlSchV mittels AVV			
I1 aus hypothetischer Quelle		prospektiv in Notfall-Expositionssituationen und sonstigen* geplanten Expositionssituationen	prospektiv in sonstigen* geplanten Expositionssituationen	
I2 aus tatsächlicher Quelle		retrospektiv und prospektiv in geplanten, bestehenden sowie Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv und prospektiv in geplanten, bestehenden sowie Notfall-Expositionssituationen	
I3 Daten für Luft, ODL, Boden, Wasser		retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen
I4 Daten für Luft, Boden, Lebensmittel, ODL, auch Dosimeter, GK-Messung, Bioassay etc.		retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv und prospektiv für Kohorten in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen

* Expositionssituationen, die nicht einer Genehmigung nach § 47 StrlSchV bedürfen.

Während die verfügbare Information zur Strahlenquelle die Informationskategorie festlegt, hat man bei der Festlegung der Situationskategorie mit den Teilaspekten FEPs, Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter gewisse Wahlmöglichkeiten (Tab. 2.5), die allerdings den Aufwand der Ermittlung der Werte der Eingangsgrößen bestimmen: Aufwand (S1) < Aufwand (S2) < Aufwand (S3).

Die SSK hält die Annahme der Situationskategorie S0 nur im Falle der AVV zu § 47 StrlSchV und der Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) zu § 49 StrlSchV (SSK 2004) für sinnvoll. In allen anderen Expositionssituationen ist mindestens die Stufe S1 und – wenn möglich – S2 anzusetzen. S3 sollte der Untersuchung von Kohorten einschließlich real existierenden kritischen Gruppen vorbehalten bleiben.

Tab. 2.5: Empfehlung der SSK zur realistischen Ermittlung der Strahlenexposition in den verschiedenen Expositionssituationen. Die Pfeile deuten an, dass in diesen Fällen ein gestuftes Vorgehen sinnvoll sein kann.

	prospektiv		retrospektiv	
	I0	S0	I2	S1 → S2
geplante Expositionssituationen, AVV in Genehmigungsverfahren nach § 47 StrlSchV				
sonstige geplante Expositionssituationen; z. B. Endlagerung und Sanierung von Altlasten	I1	S1 → S2	I2 → I4	S1 → S2
Notfall-Expositionssituationen	I1 → I4	S1 → S2	I3 → I4	S1 → S3
bestehende Expositionssituationen	I2 → I4	S1 → S2	I3 → I4	S1 → S3

Ein besonderes Problem ergibt sich, wenn Strahlenexpositionen für Situationen in einer fernen Zukunft angegeben werden sollen, für die eine Übertragung derzeitiger Verhältnisse nicht zulässig ist. Das ist z. B. bei der Betrachtung von Endlagern und ggf. auch bei Altlasten der Fall. Hier kann die potenzielle Strahlenexposition nicht realistisch ermittelt werden, da insbesondere die Expositionssituationen, die in ferner Zukunft bestehen werden, nicht zuverlässig vorhergesagt werden können. Bei Langzeitbewertungen für Endlager und auch für Altlasten sind die ermittelten potenziellen Strahlenexpositionen lediglich Indikatorwerte im Rahmen der Betrachtungen der Langzeitsicherheit. Die Unsicherheit dieser Betrachtung kann durch Variation möglicher FEPs und Expositionsszenarien abgebildet werden. Zum Vergleich der sich in unterschiedlichen FEPs und Expositionsszenarien ergebenden potenziellen Strahlenexpositionen und damit zur Optimierung geplanter Maßnahmen ist jedoch für die einzelnen FEPs und Szenarien die Modellierung so realistisch wie möglich durchzuführen.

In Tabelle 2.6 ist die Empfehlung der SSK für verschiedene Anwendungsbereiche zusammengefasst. Abhängig von den Anwendungsbereichen werden jeweils die Informationskategorien I_i und die Situationskategorien S_j empfohlen. Die empfohlenen Anforderungen an die Darstellung der Unsicherheiten sind mit „u(D)“, Unsicherheiten nach GUM⁴ (JCGM 2008a) bzw. PDF nach GUM Supplement 1 (JCGM 2008b), Angabe der Wahrscheinlichkeitsdichte oder Wahrscheinlichkeitsfunktion, dargestellt.

Ein gestuftes Verfahren zur Ermittlung der Strahlenexposition steht nach Auffassung der SSK nicht der Realismusforderung der EURATOM-Grundnormen entgegen, solange die jeweils benutzten Verfahren nicht zu einer Über- oder Unterschätzung der Strahlenexpositionen führen. Eine solche Stufung kann in unterschiedlichem Umfang verfügbarer Information bestehen und damit unterschiedlichen Aufwand der Informationsbeschaffung zur Folge haben. Dabei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass das Ziel „so realistisch wie möglich“ bedeutet, im Schema der Tabelle 2.3, soweit mit vertretbarem Aufwand erreichbar, nach rechts unten zu gelangen.

Die SSK empfiehlt daher, dass das BMU die Ermittlung und Bereitstellung der benötigten Datensätze in Auftrag geben möge.

⁴ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

Tab. 2.6: Vorschlag der SSK für die verschiedenen Anwendungsbereiche der Ermittlung der Strahlenexposition mit Empfehlungen der Informationskategorien Ii und Situationskategorien Sj mit den Unsicherheiten u(D) oder PDF.

	Anwendungsbereiche	ICRP ^{a)}	Ii; Sj; u(D) oder PDF	Zweck
I	Information			
I.1	Natürliche Strahlenexposition	B	I3 → I4; S1; PDF	Parlamentsbericht
I.2	Kernwaffenversuche	B	I3 → I4; S1; u(D)	Parlamentsbericht
I.3	Tschernobyl	B	I3 → I4; S1; PDF	Parlamentsbericht
I.4	Kerntechnik, Technik, Forschung, Medizin (zum Zweck der Berichterstattung)			
I.4-1	Strahlenexposition von Referenzgruppen oder der allgemeinen Bevölkerung aus Tätigkeiten im Normalbetrieb	G	I2; S1 → S2; u(D) oder PDF	EU Art. 45 Parlamentsbericht
I.4-2	Strahlenexposition von Referenzgruppen oder der allgemeinen Bevölkerung aus Tätigkeiten nach Störfällen	B	I2 → I4; S1 → S2 ; PDF	EU Art. 45 Parlamentsbericht
I.5	Epidemiologische Forschung			
I.5-1	Epidemiologische Forschung; Kohorten- und Fall-Kontrollstudien	B, N	I4; S3; PDF	Wissenschaft
I.5-2	Epidemiologische Forschung; ökologische Studien	B	I4; S1 → S2, PDF	Wissenschaft
II	Dosisbegrenzung durch Grenz-, Richt-, Referenz- und Indikatorwerte: Planung und Überwachung			
II.1	Errichtung und Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen, die einer Genehmigung nach § 47 StrlSchV bedürfen			
II.1-1	Genehmigung – Normalbetrieb	G	I0; S0 (S1 bei radioökologischen Modellparametern); keine	§§ 13, 46, 47 StrlSchV
II.1-2	Genehmigung – Störfall	G	I0; S0 (S1 bei radioökologischen Modellparametern); keine	§ 49 StrlSchV
II.1-3	Überwachung – Normalbetrieb	B	I2; S1 → S2; keine	Auflagen aus Genehmigungen
II.2	Notfallschutz			allg.: §§ 51-58 StrlSchV
II.2-1	Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – prospektiv (aufgrund von Prognosen)	N	I1 → I2; S1 → S2 ; keine	
II.2-2	Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – retrospektiv (aufgrund von Aktivitätsmesswerten)	N	I3 → I4; S1 → S2; keine	
II.2-3	Sanierung	B	I3 → I4; S1 → S2; PDF	
II.2-4	Festlegung von Schutzmaßnahmen – langfristig (Aufhebung von Nutzungseinschränkungen, Wiederbesiedlung)	N, B	I3 → I4; S1 → S2; PDF	
II.2-5	Rettungsmaßnahmen – Personal	N	I1 → I3; S1 (→ S2); u(D) oder PDF	§ 59 StrlSchV
II.3	Freigabe			
II.3-1	Ableitung von Freigabewerten	G	I0; S1; PDF	§ 29 StrlSchV
II.3-2	Freigabe im Einzelfall	G	I1 → I2 ^{b)} ; S1 – S2; PDF	§ 29 StrlSchV
II.4	Langzeitsicherheitsanalyse bei Endlager			
II.4-2	Stand der Diskussion für Prognosen in überschaubaren Zeiträumen	G	I1; S1 → S2; PDF	ESK/SSK + ICRP
II.4-3	Stand der Diskussion für Langzeitbewertungen ^{c)}	G	I1; S1; PDF	

	Anwendungsbereiche	ICRP ^{a)}	Ii; Sj; u(D) oder PDF	Zweck
II.5	Altlasten			
II.5-1	Beschäftigte	G, B	I3 → 4; S1 → S2; u(D) oder PDF	§ 95f StrlSchV
II.5-2	Allgemeine Bevölkerung	G, B	I3 → I4; S1 → S2; u(D) oder PDF	BglBb
II.5-3	Ableitung von Prüf- oder Maßnahmewerten	B	I0; S1 (S1 → S2 bei radioökologischen Modellparametern); u(D) oder PDF	<i>(gibt es noch nicht)</i>
II.5-4	Einzelfall / Ist-Situation	B	I2 → I4; S1 → S2; u(D)	
II.5-5	Einzelfall / während der Sanierung	B	I3 → I4; S1 → S2; PDF	
II.5-6	Einzelfall / künftig (mit/ohne Sanierung)	B	I1 → I3; S1; PDF	
II.6	NORM			
II.6-1	Beschäftigte	B, G	I1 (hypothetischer Quellterm), I2 (tatsächlicher Quellterm); S2; u(D) oder PDF	§§ 95, 96 StrlSchV
II.6-2	Allgemeine Bevölkerung	G	I1 → I2; S1 → S2; PDF	§§ 97, 98, 101, 102 StrlSchV

- a) Diese Spalte charakterisiert die Expositionssituationen nach ICRP 103:
G: geplante Expositionssituationen, B: bestehende Expositionssituationen, N: Notfall-Expositionssituationen.
- b) In Einzelfällen bei Flächenfreigabe bis I4
- c) Bei Langzeitbewertungen für Endlager und auch für Altlasten sind die ermittelten potenziellen Strahlenexpositionen lediglich Indikatorwerte im Rahmen der Betrachtungen für einen Langzeitsicherheitsnachweis.
- „u(D)“: Unsicherheiten nach GUM (JCGM 2008a)
- PDF: Unsicherheiten nach GUM Supplement 1 (JCGM 2008b)

In der wissenschaftlichen Begründung zu dieser Empfehlung der SSK werden anhand der in Tabelle 2.7 dargestellten Vorlage die Festlegungen für verschiedene Expositionssituationen exemplarisch dargestellt. Zu einer gegebenen Problemstellung dient die Vorlage dazu, das Problem exakt zu beschreiben, die Ergebnisgröße(n) zu definieren, sich über die Informationskategorie Klarheit zu verschaffen, die wesentlichen Parameter zu charakterisieren und die Art und Weise der Behandlung von Unsicherheiten festzulegen.

Tab. 2.7: Vorlage zur Festlegung der zu ermittelnden Ergebnisgröße sowie der Kategorien und Stufen bei der radioökologischen Dosismessung.

Expositionssituation, Anwendungsbereich, Zweck: ...	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	
Modellierung der Exposition (I0 – I4)	
Szenarien und Expositionspfade (S0 – S3)	
radioökologische Modellparameter (S0 – S3)	
Ernährungsgewohnheiten (S0 – S3)	
Aufenthaltszeiten (S0 – S3)	
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel (S0 – S3)	
Unsicherheiten: (GUM, GUM Supplement 1)	

3 Wissenschaftliche Begründung

3.1 Einleitung

Bereits im Jahr 2003 hat der Ausschuss „Radioökologie“ der Strahlenschutzkommission auf einer Klausurtagung eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme in Bezug auf die Notwendigkeiten und Möglichkeiten der realistischen Ermittlung der Strahlenexposition durchgeführt (SSK 2005a). Ende 2006 erhielt die SSK den Beratungsauftrag zur realistischen Ermittlung der Strahlenexposition. Auf der Grundlage dieser Klausurtagung und nach umfangreichen, weiteren Diskussionen wurde diese Empfehlung der SSK erarbeitet, in der Anforderungen an die Ermittlung von Strahlenexpositionen für die verschiedenen Zielstellungen und die jeweils erforderlichen Methoden empfohlen werden.

Zur Bearbeitung des Beratungsauftrages hat die SSK ausgehend vom aktuellen gesetzlichen Regelwerk des Strahlenschutzes die vielfältigen Anwendungsbereiche betrachtet, in denen Strahlenexpositionen abgeschätzt oder ermittelt werden müssen. Hierzu war auch eine Klärung der verschiedenen im Regelwerk benutzten Begriffe, wie Abschätzung und Ermittlung, erforderlich. Die SSK beschränkt diese Empfehlung auf Ermittlungen der Strahlenexposition (siehe Kap. 3.3).

Die SSK hat die bisherigen Vorgehensweisen bei der Ermittlung der Strahlenexposition einer kritischen Durchsicht unterzogen. Sie hat sich auch ausführlich über die Regelungen in anderen Ländern informiert. Im Laufe der Beratungen hat das BfS ein Stufenkonzept zur retrospektiven Abschätzung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen gemäß Artikel 45 der EURATOM-Grundnormen (BfS 2009a) zur Diskussion gestellt. Eine Übersicht hierüber ist im Anhang gegeben.

3.2 Grundlagen

Das System des Strahlenschutzes befindet sich im Wandel. Das geltende Regelwerk der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) von 2001 (BMU 2012b) gründet sich auf die Empfehlung 60 der ICRP aus dem Jahr 1991 (ICRP 1991) und die EURATOM-Grundnormen aus dem Jahr 1996 (EC 1996). Nach der neuen grundlegenden Empfehlung 103 der ICRP aus dem Jahr 2007 (ICRP 2007) werden die IAEA Basic Safety Standards (IAEA 1996) und die EURATOM-Grundnormen überarbeitet. Die StrlSchV wird nach der Verabschiedung der neuen EURATOM-Grundnormen anzupassen sein. Jedoch gibt es derzeit noch beträchtliche Unsicherheiten, wie die EURATOM-Grundnormen im Detail aussehen werden. Daher wird in dieser Empfehlung der SSK zuerst der aktuelle Stand des Regelwerkes betrachtet. Danach werden die neuen Ansätze der Empfehlung 103 der ICRP, die in jedem Falle die Basis der neuen EURATOM-Grundnormen darstellt, in ihrer Bedeutung für die hier vorliegende Fragestellung behandelt. Die Empfehlung ist so strukturiert, dass sie sowohl im derzeit gültigen Regelwerk als auch für die neue Einteilung der Expositionssituationen in ICRP 103 und damit für das zukünftige Regelwerk anwendbar ist.

3.2.1 Die EURATOM-Grundnormen

Grundlage des gesetzlichen Regelwerkes des Strahlenschutzes in der Europäischen Gemeinschaft und damit auch in Deutschland ist die Richtlinie 96/29 EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen (EURATOM-Grundnormen).

Die EURATOM-Grundnormen unterscheiden noch Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten und Arbeiten. In Artikel 2 (1) heißt es bzgl. der Tätigkeiten: *„Diese Richtlinie gilt für alle Tätigkeiten, die mit einer Gefährdung durch ionisierende Strahlung aus einer künstlichen Strahlenquelle oder aus einer natürlichen Strahlenquelle verbunden sind, wenn hierbei natürliche Radionuklide aufgrund ihrer Radioaktivität, Spaltbarkeit oder Bruteigenschaft verarbeitet werden oder verarbeitet worden sind, ...“*

Zu den Strahlenexpositionen bei Arbeiten heißt es in Artikel 2 (2): *„Sie gilt gemäß Titel VII auch für Arbeiten, die nicht unter Absatz 1 fallen, bei denen aber natürliche Strahlenquellen vorhanden sind und durch die sich die Exposition der Arbeitskräfte oder von Einzelpersonen der Bevölkerung so erheblich erhöht, dass dies aus der Sicht des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden darf.“*

Artikel 45 fordert dann die realistische Abschätzung⁵ von Bevölkerungsdosen, die Gegenstand dieser Empfehlung ist. Dort heißt es:

„Die zuständigen Behörden

- a) *sorgen dafür, dass Abschätzungen (im Englischen: „estimates“) der Dosen aus Tätigkeiten nach Artikel 44 für die Bevölkerung in ihrer Gesamtheit und für Bezugsbevölkerungsgruppen überall dort, wo gegebenenfalls solche Gruppen bestehen, so realistisch wie möglich vorgenommen werden;*
- b) *legen die Häufigkeit der Ermittlungen (im Englischen: „assessments“) fest und treffen alle erforderlichen Maßnahmen für die Feststellung der Bezugsbevölkerungsgruppen unter Berücksichtigung der effektiven Übertragungswege der radioaktiven Stoffe;*
- c) *sorgen dafür, dass die Abschätzungen der Bevölkerungsdosen unter Berücksichtigung der radiologischen Gefährdung folgendes umfassen:*
 - *Ermittlung (im Englischen: „assessment“) der Dosen infolge externer Strahlenexposition, gegebenenfalls unter Angabe der betreffenden Strahlungsart;*
 - *Ermittlung der Inkorporation von Radionukliden unter Angabe der Art der Radionuklide und gegebenenfalls ihrer physikalischen und chemischen Beschaffenheit, sowie Bestimmung der Aktivität und Konzentrationen dieser Radionuklide;*
 - *Ermittlung der Dosen, die die Bezugsbevölkerungsgruppen erhalten können, und Spezifizierung der Kennmerkmale dieser Gruppen;*
- d) *verlangen, dass Aufzeichnungen über die Messungen der externen Strahlenexposition, Abschätzungen der Radionuklidinkorporationen und radioaktiven Kontamination sowie über die Ergebnisse der Ermittlung der von Bezugsgruppen und von der Bevölkerung erhaltenen Dosen erstellt werden.“*

Wie diese Forderungen für die realistische Ermittlung von Strahlendosen im Einzelnen erfüllt werden können, ist in den EURATOM-Grundnormen nicht näher spezifiziert. Es gibt jedoch einen Leitfaden (EC 2002), der Hinweise enthält. Dieser Leitfaden ist primär auf die retrospektive Ermittlung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch Ableitungen kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen im Normalbetrieb anwendbar. Die dort vorgeschlagene Vorgehensweise ist im Anhang A-2.1 dargestellt.

⁵ Der deutsche Text der EURATOM-Grundnormen entspricht in der Benutzung der Begriffe Abschätzung und Ermittlung nicht dem Geist des englischen Textes und dem in dieser SSK-Empfehlung benutzten Gebrauch dieser Begriffe.

3.2.2 Die Strahlenschutzverordnung

Die Anforderungen der EURATOM-Grundnormen werden in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) konkretisiert⁶. Von ihrem methodischen Aufbau unterscheidet auch die Strahlenschutzverordnung zwischen Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten und Arbeiten.

Die Notwendigkeit der Ermittlung der Strahlenexposition ergibt sich allgemein durch das der StrlSchV zugrunde liegende Prinzip der Dosisbegrenzung (§ 5 StrlSchV), da eine Begrenzung ohne Kenntnis des Wertes einer Größe nicht möglich ist. § 5 legt fest: *„Wer eine Tätigkeit nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 Buchstabe a bis d plant, ausübt oder ausüben lässt, ist verpflichtet dafür zu sorgen, dass die Dosisgrenzwerte der §§ 46, 47, 55, 56 und 58 nicht überschritten werden. Die Grenzwerte der effektiven Dosis im Kalenderjahr betragen nach § 46 Abs. 1 für den Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung 1 Millisievert und nach § 55 Abs. 1 Satz 1 für den Schutz beruflich strahlenexponierter Personen bei deren Berufsausübung 20 Millisievert.“*

Die Begrenzung der Strahlenexposition aus Tätigkeiten ist grundsätzlich in § 46, die durch Ableitungen kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen im Normalbetrieb in § 47 und die bei sicherheitstechnisch bedeutsamen Ereignissen in § 49 geregelt. § 50 begrenzt die Strahlenexpositionen als Folge von Störfällen bei sonstigen Anlagen und Einrichtungen und bei Stilllegungen.

In § 47 StrlSchV „Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe“ wird explizit die Ermittlung der Strahlenexposition angesprochen und das in Deutschland für die Planung von Anlagen etablierte Verfahren der AVV zu § 47 StrlSchV eingeführt.

Dort heißt es in § 47 Abs. 2 StrlSchV: *„Bei der Planung von Anlagen oder Einrichtungen ist die Strahlenexposition nach Absatz 1 für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen unter Berücksichtigung der in Anlage VII Teil A bis C genannten Expositionspfade, Lebensgewohnheiten der Referenzperson und übrigen Annahmen zu ermitteln; dabei sind die mittleren Verzehrswerten der Anlage VII Teil B Tabelle 1 multipliziert mit den Faktoren der Spalte 8 zu verwenden. Die Bundesregierung erlässt mit Zustimmung des Bundesrates allgemeine Verwaltungsvorschriften über die zu treffenden weiteren Annahmen. Die zuständige Behörde kann davon ausgehen, dass die Grenzwerte des Absatzes 1 eingehalten sind, wenn dies unter Zugrundelegung der allgemeinen Verwaltungsvorschriften nachgewiesen wird.“*

Es sei bereits hier darauf hingewiesen, dass der Anspruch, der im letzten Satz von § 47 Abs. 2 formuliert ist, eine Überschätzung der potenziellen Strahlenexpositionen als Folge von Ableitungen radioaktiver Stoffe aus Anlagen verlangt. Im Sinne der Diskussion in Kap. 3.3 behandelt die AVV zu § 47 StrlSchV nicht eine Ermittlung der Strahlenexposition sondern eine Abschätzung.

In § 49 StrlSchV sind für Störfälle, welche aus Tätigkeiten resultieren, Dosiswerte (Störfallplanungsdaten) festgelegt und die Störfall-Leitlinien zitiert. Dort findet sich der Verweis auf die Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) (SSK 2004), die von ihrer Zweckbestimmung her eine konservative Abschätzung der Strahlenexposition fordern. Analog dazu bezieht sich § 50 Abs. 3 auf die Störfallauswirkungen von Tätigkeiten in „anderen Anlagen“, in § 50 Abs. 4 wird auf eine (noch zu erstellende) AVV verwiesen, welcher auch ein konservatives Vorgehen zugrunde liegen wird.

⁶ Auf die Röntgenverordnung wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da sie für den vorliegenden Beratungsauftrag nicht relevant ist.

Weitere explizite, im Zusammenhang mit dieser Empfehlung relevante Erwähnungen der Ermittlung von Strahlenexpositionen gibt es in § 41 und § 58 StrlSchV. In § 58 in Bezug auf die Körperdosis bei der Zulassung besonderer Strahlenexpositionen von Beschäftigten. § 41 behandelt die Ermittlung der Körperdosis von Personen in Strahlenschutzbereichen.

Es heißt dort in § 41 Abs. 1 StrlSchV: *„Zur Ermittlung der Körperdosis wird die Personendosis gemessen. Die zuständige Behörde kann aufgrund der Expositionsbedingungen bestimmen, dass zur Ermittlung der Körperdosis zusätzlich oder – abweichend von Satz 1 – allein*

1. *die Ortsdosis, die Ortsdosisleistung, die Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft oder die Kontamination des Arbeitsplatzes gemessen wird,*
2. *die Körperaktivität oder die Aktivität der Ausscheidungen gemessen wird oder*
3. *weitere Eigenschaften der Strahlungsquelle oder des Strahlungsfeldes festgestellt werden.“*

Die §§ 54 – 59 StrlSchV enthalten detaillierte Regelungen für die Begrenzung der Strahlenexposition bei der Berufsausübung. Strahlenexpositionen in der Medizin werden in Teil 2 Kapitel 4 behandelt. Auf diese wird hier nicht näher eingegangen, da sie nicht Gegenstand dieser Empfehlung sind (vgl. Kapitel 3.3). Ausnahmen sind die Tatbestände der Paragraphen § 41 und § 58 StrlSchV, in denen die Strahlenexposition von Personen retrospektiv bzw. prospektiv durch Modellierung zu ermitteln ist.

Ermittlungen der Strahlenexposition aus Tätigkeiten sind außerdem ohne explizite Erwähnung in der StrlSchV die Grundlage für die Festlegung von Freigrenzen, Werten der Oberflächenkontamination und Freigabewerten. Ausgehend vom Kriterium der Unterschreitung einer trivialen Dosis von einigen 10 μSv im Kalenderjahr werden diese Werte durch prospektive Modellierung potenzieller Strahlenexpositionen für Beschäftigte und die allgemeine Bevölkerung abgeleitet. Details zur den benutzten Verfahren sind allgemein in (Dymke 2002), zur Ableitung der Freigrenzen in (IAEA 1988, EC 1993) und zur Ableitung von Freigabewerten in (Deckert et al. 2000, SSK 1998, Thierfeldt und Kugeler 2000, Thierfeldt et al. 2003) zu finden.

Strahlenexpositionen bei Arbeiten werden in Teil 3 der StrlSchV behandelt. Hier werden im Hinblick auf Strahlenexpositionen die Begriffe Abschätzung und Ermittlung der Strahlenexposition deutlich unterschieden.

Der § 95 Abs. 1 StrlSchV fordert vom Verpflichteten, dass er die Strahlenexposition an Arbeitsplätzen abschätzen oder ermitteln lässt. Die Art und Weise, in der die Strahlenexposition bei Arbeiten zu ermitteln ist, wird in der StrlSchV nur in den Grundzügen geregelt. § 95 Abs. 10 StrlSchV besagt, dass die Exposition *„auf geeignete Weise durch Messung der Ortsdosis, der Ortsdosisleistung, der Konzentration radioaktiver Stoffe oder Gase in der Luft, der Kontamination des Arbeitsplatzes, der Personendosis, der Körperaktivität oder der Aktivität der Ausscheidung ... zu ermitteln“* ist. Für die in Anlage XI zur StrlSchV aufgeführten Arbeitsfelder gibt § 95 Abs. 10 StrlSchV den zuständigen Behörden die Möglichkeit, Messverfahren und Messstellen vorzuschreiben. Weitere Vorgehensweisen sind in der StrlSchV nicht spezifiziert.

Für den Regelungsbereich der überwachungsbedürftigen Rückstände ist zunächst eine Abschätzung oder Ermittlung der Strahlenexposition nicht vorgesehen. Vielmehr wird anhand der spezifischen Aktivität von Materialien beurteilt, ob bei der Entsorgung die Strahlenexposition für Personen der Bevölkerung den Richtwert von 1 mSv im Kalenderjahr überschreiten kann. Bezugsmaßstab ist dazu die Überwachungsgrenze, deren Höhe in Anlage XII Teil B StrlSchV beschrieben wird. Die zuständige Behörde kann technische Verfahren, geeignete Messverfahren und sonstige Anforderungen, insbesondere solche zur Ermittlung repräsentativer Messwerte der spezifischen Aktivität, mit denen die Einhaltung der Überwachungsgrenzen der Anlage XII Teil B nachgewiesen wird, festlegen.

Sollen überwachungsbedürftige Rückstände entsorgt werden, so setzt dies eine Entlassung nach § 98 StrlSchV voraus. Diese Entlassung ist nur möglich, wenn die durch die Beseitigung oder Verwertung bedingte Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung eine effektive Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr nicht überschreitet. Der Nachweis, dass die Richtdosis von 1 mSv im Kalenderjahr eingehalten wird, ist dabei unter Anwendung der in Anlage XII Teil D StrlSchV genannten Grundsätze zu erbringen. Diese Grundsätze besagen, dass eine Ermittlung von Strahlenexpositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung durchzuführen ist:

1. Es sind bei der Ermittlung realistische Expositionspfade und Expositionsannahmen zu verwenden.
2. Soweit Expositionspfade nach Anlage VII Teil A StrlSchV Berücksichtigung finden, sind die Expositionsannahmen der Anlage VII Teil B und C, insbesondere die Festlegungen der Anlage VII Teil B Tabelle II 1 Spalte 1 bis 7, zugrunde zu legen.
3. Im Falle der Verwertung von Rückständen sind alle Expositionen einzubeziehen, die in allen Phasen eines vorgesehenen Verwertungsweges auftreten können.
4. Im Falle der Beseitigung von Rückständen sind alle Expositionen einzubeziehen, die auf dem vorgesehenen Beseitigungsweg durch Behandlung, Lagerung und Ablagerung der Rückstände auftreten können.
5. Bei Grundstücken, die durch Rückstände verunreinigt sind, sind alle Expositionen einzubeziehen, die bei realistischen Nutzungsannahmen unter Berücksichtigung der natürlichen Standortverhältnisse auftreten können.
6. Die Dosiskoeffizienten gemäß Bundesanzeiger Nr. 160a und b vom 28. August 2001 sind zu verwenden.

Die Regelungen der StrlSchV nach Teil 3 Kapitel 4 fordern, zum Schutz des fliegenden Personals vor Expositionen durch kosmische Strahlung die effektive Dosis, die das fliegende Personal durch kosmische Strahlung während des Fluges erhält, zu ermitteln, soweit die effektive Dosis durch kosmische Strahlung 1 Millisievert im Kalenderjahr überschreiten kann.

3.2.3 Verwaltungsvorschriften, Richtlinien und sonstige Regelungen

Verwaltungsvorschriften und Richtlinien legen unterhalb der Verordnungsebene die praktische Ausgestaltung der Regelungen der StrlSchV fest.

In Bezug auf die Ermittlung der Strahlenexposition aus Tätigkeiten sind dies die Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47, die Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) zu § 49 StrlSchV, die Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb), die Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle (RiPhyKo) zu §§ 40, 41, 42 StrlSchV und § 35 RöV und in Bezug auf die Ermittlung der Strahlenexposition aus Arbeiten die Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 StrlSchV (Richtlinie Arbeiten).

3.2.3.1 Die Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV

Die AVV zu § 47 StrlSchV (BMU 2012a) wird im Anwendungsbereich wie folgt definiert: *„Diese allgemeine Verwaltungsvorschrift gilt für die Ermittlung der Strahlenexposition nach § 47 Absatz 2 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV). Die Ergebnisse dienen der Feststellung im Genehmigungsverfahren, ob die Strahlenschutzverantwortlichen die technische Auslegung und den Betrieb ihrer Anlagen oder Einrichtungen so geplant haben, dass die durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder mit Wasser bedingte Strahlenexposition die Dosisgrenzwerte des § 47 Abs. 1 der StrlSchV nicht überschreitet.“*

In der AVV zu § 47 StrlSchV werden die Modelle und Parameter zur Berechnung der Strahlenexposition so festgelegt, dass bei ihrer Anwendung die zu erwartende Strahlenexposition des Menschen nicht unterschätzt wird. Sie ist hoch konservativ und stellt eine Abschätzung dar.

Die Strahlenexposition wird für die Referenzpersonen der in der Anlage VII Teil B Tabelle 1 StrlSchV aufgeführten Altersgruppen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen berechnet. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen in der Umgebung einer Anlage oder Einrichtung, an denen aufgrund der Verteilung der abgeleiteten radioaktiven Stoffe in der Umwelt durch Aufenthalt oder durch Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchste Strahlenexposition der Referenzperson zu erwarten ist. Berücksichtigt werden alle realen Nutzungsmöglichkeiten unter Einbeziehung auch möglicher künftiger Änderungen der Besiedlung oder künftiger Nutzung, soweit diese nicht prinzipiell aufgrund der ökologischen Verhältnisse außer Betracht bleiben müssen. Eine ausführliche Darstellung der Vorgehensweise der AVV zu § 47 StrlSchV ist in Anhang A.1.2 gegeben.

3.2.3.2 Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) zu § 49 StrlSchV

Die Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition (SSK 2004) dient der Abschätzung der Strahlenexposition von Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen. Referenzpersonen zur Abschätzung der Körperdosen im Sinne von § 49 der StrlSchV sind Personen der Altersgruppen der Anlage VII Teil B StrlSchV mit den in den Tabellen 2 und 3 beschriebenen Lebensgewohnheiten. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen in der Umgebung einer Anlage, bei denen aufgrund der Verteilung der emittierten radioaktiven Stoffe in der Umwelt unter Berücksichtigung realer Nutzungsmöglichkeiten durch Aufenthalt und Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchste Strahlenexposition der Referenzpersonen zu erwarten ist. Bei den Nutzungsmöglichkeiten sind auch mögliche künftige Änderungen der Besiedlung oder künftigen Nutzung, soweit diese nicht prinzipiell aufgrund der ökologischen Verhältnisse außer Betracht bleiben können, einzubeziehen.

3.2.3.3 Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb)

Die Berechnungsgrundlagen Bergbau wurden Mitte der 90er Jahre entwickelt und 1999 vom BMU an die Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen zur Erprobung versandt (BMU 1999a,b). Dort wurden die Berechnungsgrundlagen zur Erprobung im praktischen Vollzug überwiegend bei den Sanierungsvorhaben der Wismut GmbH angewendet.

Im Jahr 2010 wurden sie vom BfS in überarbeiteter Form erneut veröffentlicht (BfS 2010). Zitat aus der Einleitung: *„In den letzten zehn Jahren haben beide Berechnungsgrundlagen eine weite Verbreitung gefunden und sich seit ihrem Erscheinen bei der Abschätzung der Strahlenexposition durch bergbaubedingte Umweltradioaktivität erfolgreich etabliert. Dies liegt auch darin begründet, dass hier erstmalig Berechnungsmodelle und -parameter vorgegeben wurden, die im Sinne der SSK eine „realistische, aber ausreichend konservative“ radiologische Bewertung von Interventionssituationen im Strahlenschutz ermöglichen.“*

Diese Berechnungsgrundlagen Bergbau gelten für die Ermittlung der Strahlenexposition des Menschen in Interventionssituationen aufgrund bergbaulicher Hinterlassenschaften. Sie sind anzuwenden bei der

- Nachweisführung zur Einhaltung von Dosisgrenzwerten für Beschäftigte,
- Nachweisführung zur Einhaltung von Dosisrichtwerten für Einzelpersonen der Bevölkerung,
- Durchführung von Expositionsermittlung an bergbaulichen Hinterlassenschaften,

- Planung und Optimierung expositionsverringender Maßnahmen.

Bei der Anwendung der Berechnungsgrundlagen sind nur die im konkreten Anwendungsfall tatsächlich relevanten Szenarien und Expositionspfade zu berücksichtigen.

Die Auswahl der bei der Ermittlung der bergbaubedingten Strahlenexposition zu berücksichtigenden Expositionsszenarien und -pfade, Berechnungsparameter und Radionuklide hat vorrangig anhand qualitativer Bewertungen zu erfolgen. Zweifelsfälle sind durch vertiefende Untersuchungen der Standort- und Expositionsverhältnisse zu klären.

Die Strahlenexposition ist für Referenzpersonen an ungünstigsten Einwirkungsstellen zu ermitteln. Ungünstigste Einwirkungsstellen sind die Einwirkungsstellen, an denen für die zu betrachtenden Expositionsszenarien und -pfade unter Berücksichtigung realistischer Nutzungen und Verhaltensweisen jeweils die höchste Strahlenexposition der Referenzperson zu erwarten ist. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind im konkreten Anwendungsfall zu bestimmen. Eine ausführliche Darstellung der Vorgehensweise in den Berechnungsgrundlagen Bergbau ist in Anhang A-1.3 gegeben.

3.2.3.4 Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle (RiPhyKo) zu §§ 40, 41, 42 StrlSchV und § 35 RöV

Die Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle (BMU 2007) wird hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt, da sie im Zusammenhang mit dieser Empfehlung nicht relevant ist (vgl. Kap. 3.3).

3.2.3.5 Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 Strahlenschutzverordnung (Richtlinie Arbeiten)

In Bezug auf die Ermittlung der Strahlenexposition aus Arbeiten ist die vom BfS erarbeitete „Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 Strahlenschutzverordnung (Richtlinie Arbeiten)“ vom 15. Dezember 2003 (BMU 2003) zu erwähnen. In dieser Richtlinie werden Art, Umfang, Methoden und administrative Vorgehensweise für

- die Abschätzung der Radon-222-Exposition oder der Körperdosis bei Arbeiten, die den in den Teilen A und B der Anlage XI StrlSchV genannten Arbeitsfeldern zuzuordnen sind, und
- die Ermittlung der Radon-222-Exposition und der Körperdosis für Personen, die anzeigebedürftige Arbeiten ausüben,

festgelegt. Die Richtlinie dient dem bundeseinheitlichen Verwaltungshandeln im Bereich des Teil 3 Kapitel 2 der Strahlenschutzverordnung (s. ebd. Kap. 1).

Die Richtlinie unterscheidet zwischen Abschätzung und Ermittlung, wobei unter Abschätzung *„die Bewertung der Strahlenexposition einer Einzelperson an ihrem Arbeitsplatz bezogen auf das Kalenderjahr“* verstanden wird. *„Die Abschätzung der Strahlenexposition muss repräsentativ für die durchgeführten Arbeiten der Person sein. Die der Abschätzung zu Grunde liegenden Annahmen müssen konservativ in Bezug auf die tatsächlich vorliegenden Expositionsbedingungen sein.“*

Die Ermittlung der Strahlenexposition geht von Messwerten stationärer oder personengetragener Messgeräte aus, die *„repräsentativ für die Aufenthaltszeiten der Person an dem oder den Arbeitsorten sind.“*

Sie enthält Aussagen zur Relevanz von Expositionspfaden:

„Bei der Abschätzung der Strahlenexposition für Arbeiten nach Anlage XI Teil B StrlSchV gelten grundsätzlich alle Expositionspfade, die mehr als zehn Prozent zur Gesamtexposition beitragen als relevant und sind zu berücksichtigen. Relevante Expositionspfade sind in der Regel die äußere Strahlenexposition und die Inhalation von Stäuben, Rauchen oder Aerosolpartikeln. Der Beitrag durch Ingestion liegt in der Regel unter zehn Prozent.“

„Bei der Ermittlung der Strahlenexposition sind grundsätzlich alle Expositionspfade zu betrachten. Werden Arbeiten, die den Arbeitsfeldern der Anlage XI Teil B StrlSchV zugeordnet werden können, in Arbeitsfeldern der Anlage XI Teil A StrlSchV ausgeführt, so ist grundsätzlich auch die Exposition durch Radon-222 zu berücksichtigen.“

„Expositionspfade, die weniger als zehn Prozent zur Gesamtexposition beitragen, können bei der Ermittlung unberücksichtigt bleiben. Die Ingestion muss daher in der Regel nicht betrachtet werden.“

Ebenfalls der Begrenzung der Strahlenexposition durch natürliche Radioaktivität dient die Ableitung von Referenzwerten für Arbeitsplätze nach Radiation Protection 95 (EC 1999).

Zur Identifikation von industriellen Prozessen, die aus Gründen des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden können, wurden im Leitfaden zur Unterstützung der Implementierung von Titel VII der EURATOM-Grundnormen (EC 2002) Referenzniveaus von spezifischen Aktivitäten abgeleitet, bei deren Überschreitung eine Arbeitsplatzbelastung über bestimmten Dosiswerten auftreten kann.

Betrachtet wurden die 3 Szenarien: Exposition von Haufwerken oder Lagerstapeln, Exposition durch Inkrustierungen und Rückstände aus Hochtemperaturprozessen sowie Exposition durch Prozesskessel und Rohranlagen.

Zu jedem dieser Szenarien wurden (relevante) Expositionspfade (Direktstrahlung, Inhalation von Staub oder Rauch, Ingestion von Staub, Inhalation von Radon) zusammengestellt und mit Parametern belegt. Bei den Parametersätzen werden jeweils „normale Annahmen“ und „unwahrscheinliche Annahmen“ unterschieden. Die Parameter dieser Annahmen unterscheiden sich um einen Faktor zwischen 3 und 5. Auch bei „normalen Annahmen“ sind die Parameter so ausgelegt, dass eine gewisse Konservativität der Ergebnisse gegeben ist. Ziel dieser Arbeit ist letztlich keine Ermittlung von tatsächlichen Expositionen, sondern ein Vergleich von Materialien in Bezug auf die mögliche Strahlenexposition von Beschäftigten bei Arbeiten.

3.2.3.6 Sonstige Regelungen

Zur Begrenzung der potenziellen Strahlenexpositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung durch natürliche Radioaktivität in Rückständen (Teil 3 Kapitel 3 StrlSchV) müssen Werte der spezifischen Aktivität dieser Rückstände ermittelt werden. Der Vergleich mit Überwachungsgrenzen der StrlSchV (§ 97 StrlSchV) legt dann fest, wie diese Rückstände weiter zu überwachen sind.

Ziel der Ableitung von Überwachungsgrenzen war die Frage, ab welchen spezifischen Aktivitäten für in Deutschland vorkommende Stoffströme mit erhöhter natürlicher Radioaktivität bei der Entsorgung „Strahlenschutzmaßnahmen zu erwägen sind“ (BS 1999, S. 2). Diese Zielstellung verlangte generell ein konservatives Herangehen. Da keine konkreten Einzelfälle zu betrachten waren, mussten fiktive Referenzpersonen (allgemeine „Personen der Bevölkerung“) gewählt werden, deren Verhalten und Lebensgewohnheiten sich an statistischen Kennziffern realer Personen in Deutschland orientieren. Die Szenarien und Szenarienparameter zur Ableitung der Überwachungsgrenzen wurden daher so ausgelegt, dass sie die tatsächlichen Bedingungen von Einzelfällen weitgehend konservativ-abdeckend beschreiben (z. B. Haus 20 m neben Halde, Brunnen 20 m neben Deponie). Konservativität besteht auch in der

Annahme eines Aktivitätsgleichgewichtes in den Zerfallsreihen (Ausnahme: Spezialfall Pb-210-Anreicherung), wobei in der Anwendung der Modellrechnungen auf Materialien mit radioaktiven Ungleichgewichten stets die maximale spezifische Aktivität der U-238- und Th-232-Reihe unterstellt wird. Durch den Verzicht auf Sicherheitszuschläge wurde allerdings eine übermäßige Konservativität vermieden.

Für die im § 97 Abs. 3 StrlSchV formulierte Möglichkeit, Verfahren zur Ermittlung repräsentativer Messwerte festzulegen, wurden mit der Empfehlung der SSK „Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen“ (SSK 2005b) Grundlagen geschaffen, die der besonderen Problematik der Variabilität und statistischen Unsicherheit Rechnung tragen (vgl. Kap. 3.4.4).

Diese Empfehlung definiert die repräsentative spezifische Aktivität von Chargen als Basiswert zum Nachweis der Einhaltung der Richtdosis u. a. nach Anlage XII Teil C StrlSchV. Implizit wird damit die nach den Vorschriften dieser Empfehlung ermittelte repräsentative spezifische Aktivität als Messgröße zur realistischen Ermittlung von Strahlenexpositionen nach Anlage XII Teil D StrlSchV ausgewiesen.

Die repräsentative spezifische Aktivität wird in der Empfehlung – beurteilungstechnisch (schwach) konservativ – als die obere Konfidenzgrenze des Erwartungswertes gewählt. Die Empfehlung enthält darüber hinaus Hinweise zu Probenahmen und Messungen an Proben.

Im jährlichen Parlamentsbericht unterrichtet das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Umweltradioaktivität den Deutschen Bundestag und den Bundesrat über die Strahlenexposition in Deutschland und die Entwicklung der Radioaktivität in der Umwelt. Das Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG) vom 19. Dezember 1986 (BMU 2008) ist die gesetzliche Grundlage. Diese Daten werden auch im Rahmen der Verpflichtungen der Artikels 35 und 36 des EURATOM-Vertrags vom 25. März 1957 an die Europäische Union übermittelt. Für diese gesetzlich vorgeschriebene Berichterstattung ist die realistische Ermittlung der verschiedenen Strahlenexpositionen eine zentrale Aufgabe. Abschätzungen geben in der Berichterstattung ein verfälschendes Bild (vgl. Kapitel 3.2.5).

3.2.4 Die Empfehlung 103 der ICRP

In ihrer Empfehlung 103 hat die ICRP im Jahr 2007 (ICRP 2007) die bisherigen Grundlagen des Strahlenschutzes weitestgehend bestätigt. Für die Kategorisierung von Strahlenexpositionen ergeben sich nach ICRP 103 jedoch Neuerungen, die auch Auswirkungen auf die realistische Ermittlung der Strahlenexposition haben.

Während ICRP 103 die drei Kategorien Exposition der allgemeinen Bevölkerung, der Beschäftigten und der Patienten beibehält, macht sie für Expositionssituationen keine Unterscheidung mehr nach Expositionen durch natürliche und künstliche Radioaktivität (Tätigkeiten oder Arbeiten), sondern unterscheidet nur noch geplante Expositionssituationen, Notfall-Expositionssituationen und bestehende Expositionssituationen. Diese drei Situationen sollen den gesamten Bereich von Expositionssituationen abdecken.

- Geplante Expositionssituationen sind Situationen, die den geplanten Betrieb von Quellen einschließlich der Stilllegung, der Beseitigung von radioaktivem Abfall und der Sanierung zuvor belasteter Gebiete mit sich bringen. Laufende Tätigkeiten sind geplante Expositionssituationen, die mit der geplanten Einführung und dem geplanten Betrieb von Quellen verbunden sind. Zu dieser Art von Expositionssituationen gehören auch solche, die bisher als Arbeiten klassifiziert wurden.

- Notfall-Expositionssituationen sind unerwartete Situationen, z. B. solche, die störfall- oder unfallbedingt während der Durchführung einer geplanten Situation (bisherige Tätigkeiten oder Arbeiten) oder durch eine böswillige Handlung auftreten können, die sofortige (Notfall)-Maßnahmen erfordern, in erster Linie um eine Gefährdung oder nachteilige Folgen für Gesundheit und Sicherheit, Lebensqualität, Eigentum von Menschen sowie für die Umwelt zu mindern. Dies schließt Situationen ein, für die unverzügliches Handeln gerechtfertigt ist, um die Folgen einer wahrgenommenen Gefährdung abzuschwächen.
- Bestehende Expositionssituationen sind Expositionssituationen, die bereits bestehen, wenn eine Entscheidung für die Überwachung getroffen werden muss. Eingeschlossen sind z. B. Situationen, die natürliche Radioaktivität und Strahlung und die Folgen früherer menschlicher Aktivitäten betreffen.

Die drei Grundprinzipien des Strahlenschutzes werden in ICRP 103 beibehalten.

- Grundsatz der Rechtfertigung: Jede Entscheidung, die die Strahlenexpositionssituation verändert, soll mehr nutzen als schaden.
- Grundsatz der Optimierung des Schutzes: Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Exposition auftritt, die Zahl der exponierten Personen und die Höhe der individuellen Dosen sollen so niedrig gehalten werden, wie es unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren vernünftigerweise erreichbar ist.
- Grundsatz der Anwendung von Dosisgrenzwerten: Die Personendosis aus geregelten Quellen bei geplanten Expositionssituationen, außer medizinischen Expositionen, soll die von der Kommission empfohlenen Grenzwerte nicht überschreiten.

Nach ICRP 103 gelten die Grundsätze der Rechtfertigung und Optimierung für alle drei Expositionssituationen. Allerdings gilt der Grundsatz der Anwendung von Dosisgrenzwerten nur für geplante Expositionssituationen. Für Notfall- und bestehende Expositionssituationen kann es vorkommen, dass Grenzwerte, die für geplante Expositionssituationen gelten, überschritten werden oder nicht eingehalten werden können. Hier greift der Grundsatz der Optimierung.

Das bedeutet, dass unter den gegebenen Umständen das beste Schutzniveau erzielt werden sollte, indem die Spanne zwischen Nutzen und Schaden maximiert wird. Zur Vermeidung unangemessener Ergebnisse dieses Optimierungsverfahrens sollten Beschränkungen für die Dosen oder Risiken von Personen durch eine bestimmte Quelle (Dosis- oder Risikowerte sowie Referenzwerte) bestehen.

Die ICRP verwendet die Begriffe Dosisrichtwert bei geplanten Expositionssituationen und Referenzwert bei Notfall- und bestehenden Expositionssituationen in Verbindung mit der Optimierung des Strahlenschutzes zur Begrenzung von individuellen Dosen. Es werden Werte der individuellen Dosis entweder als Dosisrichtwert oder als Referenzwert definiert. Die Absicht ist dabei, die entsprechenden Werte nicht zu überschreiten bzw. sie einzuhalten. Unbeschadet davon ist es aber das Ziel, alle Dosen auf Werte zu reduzieren, die so niedrig sind, wie es unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren vernünftigerweise erreichbar ist.

Der Dosisgrenzwert gibt bei geplanten Expositionssituationen den Dosis- oder Risikowert an, der nicht überschritten werden darf. Unterhalb der Dosisgrenzwerte werden Dosisrichtwerte (constraints) als Referenzwerte definiert, die nicht überschritten werden sollen. Unterhalb der Dosisrichtwerte gilt der Grundsatz der Optimierung.

Der Referenzwert gibt bei Notfall-Expositionssituationen oder bestehenden kontrollierbaren Expositionssituationen den Dosis- oder Risikowert an, bei dessen Überschreitung Expositionen

als unangemessen betrachtet werden und bei dessen Unterschreitung eine Optimierung des Schutzes durchgeführt werden soll. Der genaue Zahlenwert, der als Referenzwert gewählt wird, hängt von den jeweiligen Umständen der betrachteten Exposition ab.

In Tabelle 3.1 sind die verschiedenen im Schutzsystem der ICRP verwendeten Arten von Dosisbegrenzungen (Grenzwerte, Richtwerte, Referenzwerte) in Bezug auf die Art der Expositionssituation und die Expositions-kategorie angegeben. In geplanten Expositionssituationen gibt es auch Risikorichtwerte, um potenziellen Expositionen Rechnung zu tragen.

Tab. 3.1: Die im Schutzsystem der ICRP verwendeten Dosisrichtwerte und Referenzwerte [aus (ICRP 2007) in der deutschen Übersetzung des BfS (2009b), siehe dort Tab.4].

Expositionssituation	berufliche Exposition	Exposition der allgemeinen Bevölkerung	Medizinische Exposition
Geplante Expositionssituation	Dosisgrenzwert Dosisrichtwert	Dosisgrenzwert Dosisrichtwert	Diagnostischer Referenzwert ^d (Dosisrichtwert ^e)
Notfall-Expositionssituation	Referenzwert ^a	Referenzwert	n. z. ^b
Bestehende Expositionssituation	n. z. ^{b,c}	Referenzwert	n. z. ^b

a Langzeitmaßnahmen sollten als Teil geplanter beruflicher Expositionen behandelt werden.

b Nicht zutreffend

c Expositionen infolge von Langzeit-Sanierungsmaßnahmen oder zeitlich ausgedehnter Beschäftigung in betroffenen Gebieten sollten als Teil geplanter beruflicher Expositionen behandelt werden.

d Patienten

e ausschließlich Betreuungs- und Begleitpersonen sowie Probanden in der Forschung

Abbildung 3.1 stellt den Zusammenhang zwischen Dosisrichtwerten und Referenzwerten und der Optimierung des Schutzes dar. Für die Referenzwerte in Notfall- und bestehenden Expositionssituationen empfiehlt die ICRP lediglich Bandbreiten: 20 mSv pro Jahr bis 100 mSv pro Jahr in Notfall-Expositionssituationen, und 1 mSv pro Jahr bis 20 mSv pro Jahr in bestehenden Expositionssituationen. Als langfristiges Ziel wird im Rahmen der Optimierung des Schutzes ein Referenzwert von 1 mSv pro Jahr angestrebt.

Die ICRP betont, dass im Rahmen der Optimierung besonderer Wert auf die Reduzierung der Anzahl der Personen gelegt werden soll, deren Dosen die Referenzwerte überschreiten (Abb. 3.2). Maßnahmen zur Dosisreduzierung sollen danach bewertet werden, welche verbleibende Dosis nach ihrer Durchführung oberhalb der Referenzwerte liegen werden (Abb. 3.2). Dies setzt die Kenntnis einer Dosisverteilung in exponierten Personengruppen voraus. Wenn die Ermittlungen der Strahlenexpositionen nicht die Realität abbilden, ist eine Optimierung unmöglich.

Die ICRP spricht sich dafür aus, bei der Durchführung von Maßnahmen zur Optimierung des Schutzes in Notfall- oder bestehenden Expositionssituationen besonderen Wert auf die Verringerung der Perzentile der Expositionsverteilung zu legen, die oberhalb der Referenzwerte liegen. Vordringliche Aufgabe sei es, diese zu verringern. Dies ist aber ohne eine realistische, probabilistische Ermittlung der Strahlenexposition in einer betroffenen Bevölkerung nicht möglich.

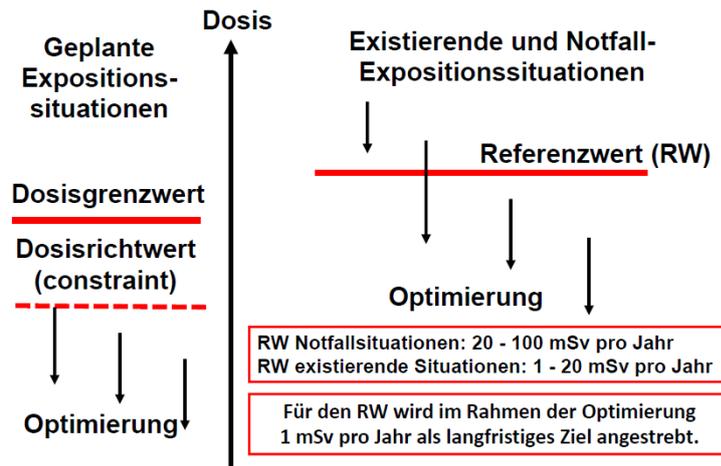


Abb. 3.1: Das System der Grenzwerte, Richtwerte, Referenzwerte und der Optimierung des Schutzes nach ICRP 103.

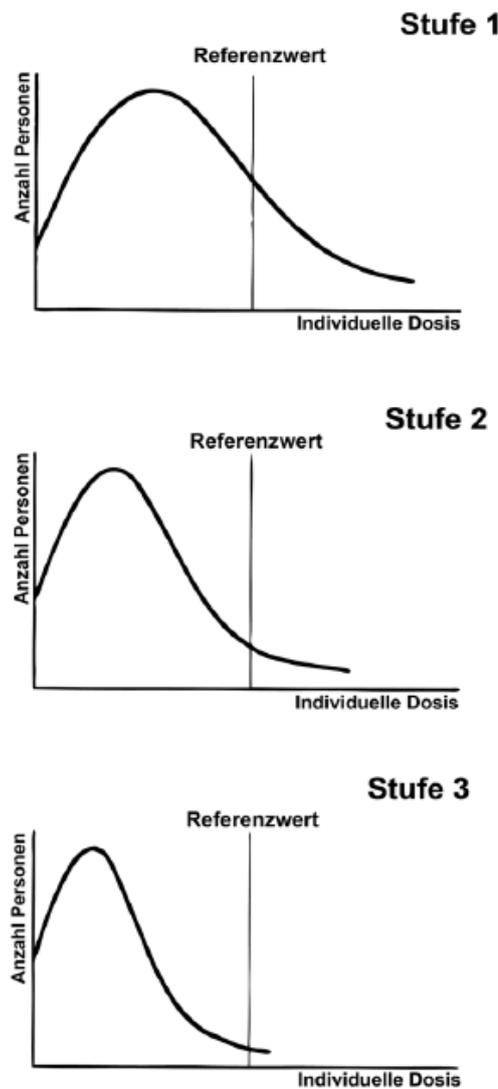


Abb. 3.2: Entwicklung der Dosisverteilung in einer exponierten Gruppe im Rahmen der Optimierung als Funktion der Zeit (aus ICRP 2007 in der deutschen Übersetzung des BfS (2009b), siehe dort Abb.4: Verwendung eines Referenzwerts bei einer bestehenden Expositionssituation und zeitlicher Verlauf der Verteilung individueller Dosen als Ergebnis des Optimierungsverfahrens).

Ganz generell stellt die ICRP in Bezug auf den Realismus der Ermittlung von Strahlenexpositionen in Kapitel 6.6.5 *Übereinstimmung mit dem beabsichtigten Schutzstandard* fest:

„(320) Die Messung oder Abschätzung von Dosen ist für die Praxis des Strahlenschutzes grundlegend. Weder die Organdosis noch die effektive Dosis können direkt gemessen werden. Werte dieser Größen müssen mit Hilfe von Modellen hergeleitet werden, die gewöhnlich Umwelt-, Stoffwechsel- und Dosimetriekomponenten enthalten. Im Idealfall sollen diese Modelle und die für ihre Parameter ausgewählten Daten realistisch sein, so dass ihre Ergebnisse als „beste Schätzungen“ beschrieben werden können. Wenn möglich, sollen die in diesen Ergebnissen enthaltenen Unsicherheiten abgeschätzt werden.“

Bereits in der Empfehlung 60 der ICRP (ICRP 1991) war diese Forderung wörtlich in Paragraph 264 im Kapitel 7.5 *Assessment of doses* enthalten.

3.2.5 Zusammenfassung und Bewertung

Sowohl in ICRP 60 von 1991 als auch in den EURATOM-Grundnormen von 1996 war die Forderung nach einer realistischen Ermittlung der Strahlenexposition erhoben worden. In ICRP 103 und im vorliegenden Entwurf der EURATOM-Grundnormen (EC 2012) wird an dieser Forderung festgehalten. In den Formulierungen der ICRP (1991, 2007) wird der Ausdruck „so realistisch wie möglich“ so präzisiert, dass die Ergebnisse von Ermittlungen der Strahlenexposition „beste Schätzwerte“ im metrologischen Sinne sein sollen. Gleichzeitig wird auf die Bedeutung der Angabe von Unsicherheiten hingewiesen.

In Deutschland liegt ein historisch gewachsenes System der Ermittlung und Abschätzung der Strahlenexposition vor, das weder konsistent noch auf die realistische Ermittlung der Strahlenexposition ausgerichtet ist. Es ist nicht hinreichend, um dem Realitätsanspruch der EURATOM-Grundnormen gerecht zu werden.

Da derzeit das Regelwerk der EURATOM-Grundnormen und der IAEA Basic Safety Standards auf der Grundlage von ICRP 103 überarbeitet wird, sollte bei der absehbar erforderlichen Novellierung der StrlSchV auch die Realismus-Forderung in angemessener Weise umgesetzt werden. Hierzu soll diese Empfehlung beitragen.

In Deutschland werden Abschätzungen und Ermittlungen der Strahlenexposition derzeit auf der Grundlage der AVV zu § 47 StrlSchV, der SBG zu § 49 StrlSchV und der Berechnungsgrundlagen Bergbau bei der Ableitung von Freigabewerten, Freigrenzen und Überwachungsgrenzen sowie bei der Berichterstattung an das Parlament und die EU durchgeführt. Die dabei benutzten Verfahren unterscheiden sich drastisch in Bezug auf ihre Realitätsnähe. Begründet wird dies damit, dass sich die Erfordernis einer konservativen Abschätzung oder realistischen Ermittlung der Strahlenexposition aus dem jeweiligen Ziel der Ermittlung definiere.

So sind die bei der Planung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen eingesetzten Verfahren der AVV zu § 47 StrlSchV und der SBG zu § 49 StrlSchV – in unterschiedlichem Maße – extrem konservativ. Für die retrospektive Ermittlung der Strahlenexposition durch Emissionen aus genehmigtem Umgang und genehmigten Anlagen werden die Verfahren der AVV unter Verwendung aktueller Ableitungs- und Wetterdaten ebenfalls angewandt und im Parlamentsbericht als Daten für die mittlere Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung publiziert; z. B. Abbildung 1 des Parlamentsberichts 2011 (BMU 2013). Jedoch bilden die Ergebnisse dieser Berechnungen weder die mittlere Exposition der allgemeinen Bevölkerung noch die tatsächliche Exposition der am höchsten exponierten Personen der Bevölkerung ab.

Nach Auffassung der SSK ist für die Berichterstattung jedoch eine möglichst realistische Ermittlung erforderlich, die die tatsächlichen Werte der Strahlenexposition wiedergibt.

Die im Parlamentsbericht angegebenen mittleren Strahlenexpositionen der Bevölkerung (Abb. 3.3) werfen noch ein anderes Problem auf. Hier werden Größen miteinander verglichen, die sich auf unterschiedliche Bevölkerungsgruppen beziehen und daher nicht miteinander verglichen werden können.

In dieser Abbildung werden realistisch berechnete mittlere Strahlenexpositionen aus natürlichen Quellen mit denen aus der Röntgendiagnostik und nuklearmedizinischen Diagnostik verglichen. Letztere sind als Mittelwerte für einen Vergleich ungeeignet, da man bei der Mittelwertbildung auch alle die Menschen einbezieht, die keine diagnostische Maßnahme und damit keine Strahlenexposition hatten. Die Angabe zur Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen bezieht sich auf Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen und ist weder repräsentativ für die Strahlenexpositionen in der Umgebung der Anlagen noch für die allgemeine Bevölkerung in Deutschland. Die mittleren Expositionen aus den Folgen des Unfalls von Tschernobyl und aus dem globalen Fallout der Kernwaffenversuche können wiederum als realistische Mittelwerte angesehen werden.

Diese Inkonsistenzen weisen jenseits der Frage nach dem Realismus der Angaben auf die Notwendigkeit hin, die Zielgröße eindeutig zu definieren und nicht unterschiedliche Größen miteinander zu vergleichen.

Die SSK weist an dieser Stelle auf ein weiteres Defizit der Berichterstattung hin. Zu keinem Beitrag zur Strahlenexposition werden Aussagen zu den Unsicherheiten der Angaben gemacht oder Verteilungen der Strahlenexpositionen in der Bevölkerung angegeben.

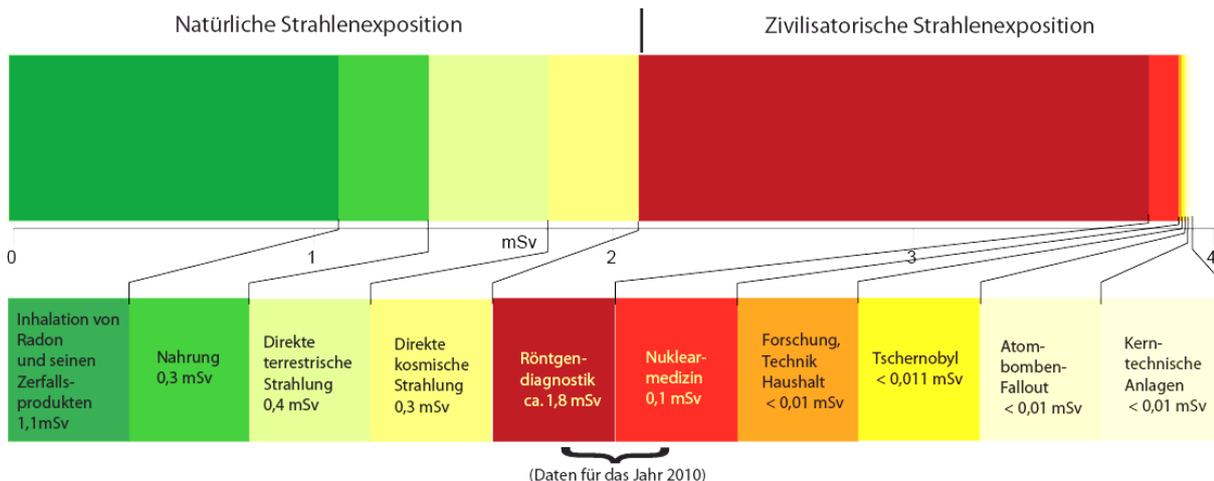


Abb. 3.3: Effektive Jahresdosis einer Person durch ionisierende Strahlung in mSv im Jahr 2011, gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands und aufgeschlüsselt nach Strahlenursprung (BMU 2013).

Bisher nicht angesprochen wurden prospektive Dosismittlungen für die Planung von Notfallschutzmaßnahmen (§§ 51, 53 StrlSchV). Hier müssen die zugrunde liegenden Dosisberechnungen auf einem möglichst realistischen Szenario beruhen und generell möglichst realistisch sein, um sowohl angemessen auf einen Notfall reagieren zu können als auch unangemessene Maßnahmen mit dem Risiko von Folgeschäden zu vermeiden.

Bei der Planung von Tätigkeiten ist das deutsche Regelwerk nicht gleichermaßen konservativ; so werden bei der Ableitung von Freigabewerten und Freigrenzen weitgehend realistischere Annahmen für die Modelle und Parameter bei Ermittlungen der potenziellen Strahlenexposition zugrunde gelegt als bei Planung und Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen.

Im Gegensatz zu den bei Tätigkeiten eingesetzten Verfahren sind die für die Ermittlung von Strahlenexpositionen aus natürlichen Strahlenquellen bei Arbeiten benutzten Verfahren weit realistischer. Wenn bestimmte Schwellenwerte überschritten werden können, orientiert das deutsche Regelwerk auf eine realistische Ermittlung der Exposition. Die Vorabbeurteilung, ob eine solche Situation vorliegt, ist allerdings durch konservative Abschätzung der Strahlenexposition möglich.

Soweit konkrete Beschäftigte (Arbeitsplätze) betrachtet werden, orientiert die StrlSchV auf geeignete Messungen als Basis von Ermittlungen. Abschätzungen können auch mit (konservativen) Annahmen getroffen werden.

Die Realismusforderung wird umgesetzt, indem nur relevante Pfade in die Expositionsermittlung einbezogen werden, repräsentative spezifische Aktivitäten benutzt werden und realistische Parameterwerte ohne Sicherheitszuschläge verwendet werden.

Allerdings sind auch in den realistischen Ermittlungen konservative Elemente enthalten, indem Referenzpersonen betrachtet werden, die sich an ungünstigsten Einwirkstellen aufhalten und deren Lebensgewohnheiten und Verhaltensweisen zu Expositionen führen, die für die meisten realen Personen konservativ im Sinne der Vorsorge ausfallen.

Eine Analyse der Unsicherheiten der Dosisermittlungen oder auch die Angabe von Dosisverteilungen ist auch für Arbeiten derzeit nicht gegeben.

Die vorliegende Empfehlung der SSK soll dazu beitragen, dass in Deutschland die Forderungen der EURATOM-Grundnormen in der Zukunft umgesetzt werden und eine begründete, konsistente Methodik zur Ermittlung der Strahlenexposition eingeführt wird. Da im derzeitigen Regelwerk noch die Unterscheidung zwischen Tätigkeiten und Arbeiten gemacht wird, ICRP 103 aber unabhängig davon, ob es sich um Tätigkeiten oder Arbeiten oder natürliche oder künstliche Radioaktivität handelt, das System des Strahlenschutzes über die Unterscheidung von Expositionssituationen (geplante, bestehende und Notfall-Expositionssituation) strukturiert, wird auch in dieser Empfehlung bereits die Einteilung der Expositionssituationen nach ICRP 103 zugrunde gelegt. Dabei soll das empfohlene, neue System logisch geschlossen sein und den bisherigen als auch den zukünftigen Anforderungen genügen.

3.3 Anwendungsbereiche und Zwecke der Expositionsermittlung

Die Anwendung des Begriffes „Ermittlung“ ist im deutschen Regelwerk sowohl sprachlich als auch begrifflich nicht eindeutig. Am präzisesten formuliert die Richtlinie Arbeiten (BMU 2003), wo unter dem Oberbegriff „Bestimmung“ zwischen „Abschätzung“ und „Ermittlung“ unterschieden wird.

„Abschätzung“ bedeutet dort eine konservative Betrachtung von potenziellen Expositionen, um zu klären, ob Grenz- oder Richtwerte in jedem Fall eingehalten werden oder ob dies nicht sicher gewährleistet ist und eine Ermittlung im Sinne einer realistischeren Schätzung des wahren Wertes der Strahlenexposition erforderlich ist.

In dieser Empfehlung der SSK wird als Abschätzung eine deterministische, konservative Modellierung potenziell höchster Expositionen verstanden, für die keine Realitätsnähe gefordert ist. Der Oberbegriff Bestimmung wird in dieser Empfehlung nicht verwendet, da er suggeriert, dass Abschätzungen etwas mit Realitätsnähe zu tun haben müssten.

„Ermittlung“ ist die Schätzung des wahren Wertes der Exposition und die Quantifizierung der Unsicherheit der Schätzung nach GUM (JCGM 2007a) oder GUM Supplement 1 (JCGM 2007b). Ermittlungen erfolgen über Berechnungen der Strahlenexposition auf der Grundlage von Modellen, Messungen und sonstigen Informationen.

Die hier empfohlene Methodik zur realistischen Ermittlung der Strahlenexposition betrifft hauptsächlich die Ermittlung der Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung durch radioökologische Modellierung. Die Expositions-kategorie „Exposition der Beschäftigten“ ist nur dort betroffen, wo Strahlenexpositionen nicht mittels Messmethoden der Personendosimetrie sondern durch (radioökologische) Modellierung ermittelt werden müssen. Die Expositions-kategorie „Exposition der Patienten“ ist nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

Für die Exposition werden nach ICRP 103 unterschieden:

- Geplante Expositionssituationen: Dies umfasst die Kerntechnik mit dem gesamten Brennstoffkreislauf, die Anwendung von Radioaktivität in Medizin, Forschung und sonstiger Technik, die Sanierung von Altlasten, die Auswirkungen von NORM- und TENORM-Industrien und die Planung, Errichtung und den Betrieb von Zwischen- und Endlagern.
- Notfall-Expositionssituationen: Dies umfasst Stör- und Unfälle mit natürlichen und künstlichen Radionukliden, böswillige Handlungen, verlorene Quellen.
- Bestehende Expositionssituationen: Dies umfasst die langfristigen Folgen von Stör- und Unfällen mit natürlichen und künstlichen Radionukliden einschließlich der Optimierung des Schutzes.

Dosisermittlungen können prospektiv oder retrospektiv sein oder die aktuelle Expositionssituation betreffen. Für jede Expositionssituation ist es wichtig, prospektive Aussagen von retrospektiven Aussagen zu unterscheiden, da retrospektiv Informationen verfügbar sind, die prospektiv nicht zur Verfügung stehen.

Strahlenexpositionen müssen für vielfältige Anwendungsbereiche ermittelt werden. Im Sinne von ICRP 103 ist es dabei unerheblich, ob die Strahlenexpositionen durch natürliche oder künstliche Radionuklide oder Felder ionisierender Strahlung verursacht werden. In dieser Empfehlung werden solche Expositionssituationen behandelt, in denen radioökologische Aspekte bei der Ermittlung der Expositionen zu berücksichtigen sind, d. h. Situationen, in denen natürliche und künstliche Strahlungsfelder und Radionuklide in der natürlichen oder vom Menschen veränderten Umwelt die Exposition von Menschen verursachen. In diesem Zusammenhang wird auch auf frühere Empfehlungen der SSK verwiesen (SSK 1992, 1997). Dabei wird Radioökologie verstanden als die Beschreibung der Wege der Radionuklide von den Quellen bis zu den Senken, insbesondere ihrer Wege zum Menschen oder anderen Lebewesen, mit dem Ziel der Ermittlung der Strahlenexposition, die durch Radioaktivität am Arbeitsplatz oder in der Umwelt verursacht wird, zu verstehen und quantitativ zu beschreiben.

Die außerhalb der Radioökologie liegenden Aspekte der Ermittlung von Strahlenexpositionen, insbesondere die Festlegung von Dosiskoeffizienten und anderer Konventionsgrößen, liegen außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Empfehlung.

In Tabelle 3.2 sind die Zuordnungen von Anwendungsbereichen, in denen die Ermittlung der Strahlenexposition erforderlich – oder im Fall von Genehmigungsverfahren anzustreben – ist, zu den drei Expositionssituationen nach ICRP 103 und zum heutigen Stand des Regelwerkes dargestellt.

Tab. 3.2: Anwendungsbereiche der Ermittlung der Strahlenexposition durch (radio-ökologische) Modellierung und ihre Zuordnung zu den Expositionssituationen nach ICRP 103 sowie den Zwecken nach dem derzeitigen Regelwerk.

	Anwendungsbereiche	ICRP ^{a)}	Zweck
I	Information		
I.1	Natürliche Strahlenexposition	B	Parlamentsbericht
I.2	Kernwaffenversuche	B	Parlamentsbericht
I.3	Tschernobyl	B	Parlamentsbericht
I.4	Kerntechnik, Technik, Forschung, Medizin (zum Zweck der Berichterstattung)		
I.4-1	Strahlenexposition von Referenzgruppen oder der allgemeinen Bevölkerung aus Tätigkeiten im Normalbetrieb	G	EU Art. 45 Parlamentsbericht
I.4-2	Strahlenexposition von Referenzgruppen oder der allgemeinen Bevölkerung aus Tätigkeiten nach Störfällen	B	EU Art. 45 Parlamentsbericht
I.5	Epidemiologische Forschung		
I.5-1	Epidemiologische Forschung; Kohorten- und Fall-Kontrollstudien	B, N	Wissenschaft
I.5-2	Epidemiologische Forschung; ökologische Studien	B	Wissenschaft
II	Dosisbegrenzung durch Grenz-, Richt-, Referenz- und Indikatorwerte: Planung und Überwachung		
II.1	Errichtung und Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen, die einer Genehmigung nach § 47 StrlSchV bedürfen		
II.1-1	Genehmigung – Normalbetrieb	G	§§ 13, 46, 47 StrlSchV
II.1-2	Genehmigung – Störfall	G	§ 49 StrlSchV
II.1-3	Überwachung – Normalbetrieb	B	Auflagen aus Genehmigungen
II.2	Notfallschutz		allg.: §§ 51-58 StrlSchV
II.2-1	Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – prospektiv (aufgrund von Prognosen)	N	
II.2-2	Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – retrospektiv (aufgrund von Aktivitätsmesswerten)	N	
II.2-3	Sanierung	B	
II.2-4	Festlegung von Schutzmaßnahmen – langfristig (Aufhebung von Nutzungseinschränkungen, Wiederbesiedlung)	N, B	
II.2-5	Rettungsmaßnahmen – Personal	N	§ 59 StrlSchV

	Anwendungsbereiche	ICRP ^{a)}	Zweck
II.3	Freigabe		
II.3-1	Ableitung von Freigabewerten	G	§ 29 StrlSchV
II.3-2	Freigabe im Einzelfall	G	§ 29 StrlSchV
II.4	Langzeitsicherheitsanalyse bei Endlagern		
II.4-1	derzeit geltendes Recht	G	BMU 2010
II.4-2	Stand der Diskussion für Prognosen in überschaubaren Zeiträumen	G	ESK/SSK + ICRP
II.4-3	Stand der Diskussion für Langzeitbewertungen ^{b)}	G	
II.5	Radiologische Altlasten		
II.5-1	Beschäftigte		§ 95ff StrlSchV
II.5-2	Allgemeine Bevölkerung	G, B	BglBb
II.5-3	Ableitung von Prüf- und Maßnahmewerten	B	<i>(gibt es noch nicht)</i>
II.5-4	Einzelfall / Ist-Situation	B	
II.5-5	Einzelfall / während der Sanierung	B	
II.5-6	Einzelfall / künftig (mit/ohne Sanierung)	B	
II.6	NORM		
II.6-1	Beschäftigte	B, G	§§ 95, 96 StrlSchV
II.6-2	Allgemeine Bevölkerung	G	§§ 97, 98, 101, 102 StrlSchV

- a) Diese Spalte charakterisiert die Expositionssituationen nach ICRP 103:
G: geplante Expositionssituationen, B: bestehende Expositionssituationen, N: Notfall-Expositionssituationen.
- b) Bei Langzeitbewertungen für Endlager und auch für Altlasten sind die ermittelten potenziellen Strahlenexpositionen lediglich Indikatorwerte im Rahmen der Betrachtungen für einen Langzeitsicherheitsnachweis.

Alle in Tabelle 3.2 aufgeführten Anwendungsbereiche werden in dieser Empfehlung explizit behandelt (siehe Kapitel 3.5).

Nicht Thema dieser Empfehlung sind u. a. folgende Bereiche:

- die Ermittlung der Expositionen von Beschäftigten bei Tätigkeiten,
- die Ermittlung der Expositionen von Patienten bei der diagnostischen und therapeutischen Anwendung von Strahlung und Radionukliden,
- die auf eine Exposition folgende Risikobewertung anhand strahlenepidemiologischer Tabellen sowie die Klärung von Schadensersatzansprüchen.

Die Strahlenexposition von Beschäftigten bei Arbeiten hat bisweilen auch den Charakter einer „ökologischen Exposition“ und ist dann auch Thema dieser Empfehlung. Auch bei Patienten gibt es im Bereich der Heilbäder und speziell der Radontherapie Expositionen, die zu den hier

behandelten zu rechnen sind. Die Strahlenexposition des fliegenden Personals und der Fluggäste wird in Deutschland durch standardisierte Verfahren ermittelt, die als realistisch zu betrachten sind. Auf diese wird hier ebenfalls nicht eingegangen.

Mit den gleichen Prinzipien und Methoden behandelbar sind Strahlenexpositionen der allgemeinen Bevölkerung durch

- Radioaktivität in technischen Produkten (gezieltes und ungezieltes Einbringen),
- sonstige zivilisatorische Quellen,
- Radioaktivität in Nahrungsmitteln,
- Transport radioaktiver Stoffe: Auswirkungen auf die Bevölkerung,
- sonstige Tätigkeiten (Überwachungssysteme, Werkstoffprüfung).

Die Zielgruppen von Abschätzungen und Ermittlungen der Strahlenexposition sind vielfältig und gehen über die Kategorien Beschäftigte, Patienten und allgemeine Bevölkerung hinaus. Je nach der Fragestellung kann es sich um eine real existierende oder hypothetische kritische Gruppe, ein real existierendes oder hypothetisches sogenanntes „most exposed individual“ an der ungünstigsten Einwirkungsstelle oder um Referenzpersonen oder real existierende Personen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen oder an einem beliebigen Ort handeln. Die Eigenschaften von Referenzpersonen können die mittleren Eigenschaften oder extreme Eigenschaften, z. B. 95. Perzentile, abbilden. Für die Ermittlung der Strahlenexposition ist dies unerheblich.

In diesem Zusammenhang sind auch die Begriffe Referenzperson im Sinne von ICRP 23 und repräsentative Person nach ICRP 101 näher zu betrachten. ICRP 108 (ICRP 2008) gibt in *Fig. 1.1 „Relationships between various points of reference for protection of the public“* eine graphische Darstellung, die zur Unterscheidung der Referenzperson und der repräsentativen Person nützlich ist. Danach ist die Referenzperson der ICRP ein Referenzwesen, das männliche und weibliche Eigenschaften des „Reference Man“ (ICRP 2002) in sich vereinigt, für das die Gewebeäquivalentdosen und die effektive Dosis definiert sind und für das die Dosiskoeffizienten gelten. Die Dosisgrößen der Referenzperson dienen dem Vergleich mit Grenz- und Richtwerten (constraints) und Referenzwerten. Die repräsentative Person, sei es eine real existierende Person oder eine Referenzperson, ist in geplanten, bestehenden und Notfall-Expositionssituationen charakteristisch für die Radionuklidaufnahme und die externe Exposition, die von den Ernährungsgewohnheiten und den Aufenthaltszeiten abhängen und die damit Eigenschaften der repräsentativen Person sind.

Die repräsentative Person nach ICRP 101 soll eine Dosis erhalten, die repräsentativ für höher exponierte Personen der Bevölkerung ist. Die Dosis der repräsentativen Person ist äquivalent der mittleren Dosis der Personen der „kritischen Gruppe“ in früheren ICRP-Empfehlungen und ersetzt diese.

Es erscheint damit logisch, bei Ermittlungen der Strahlenexposition höher exponierter Personen anstatt von Referenzpersonen genauer von repräsentativen Referenzpersonen zu sprechen. Es ist der SSK bewusst, dass die deutschen und internationalen Regelwerke sich dieser Sichtweise der Referenzperson und der repräsentativen Person nicht immer anschließen und daher auch hier in den Begrifflichkeiten Verwirrung herrscht. Sie schlägt vor, den Begriff der repräsentativen Referenzpersonen in die internationale Diskussion einzubringen und ins deutsche Regelwerk einzuführen.

Die Aufgabe der realistischen Ermittlung ist jeweils, für eine gegebene Person an einem gegebenen Ort in einem realen oder hypothetischen Expositionsszenario, d. h. für eine repräsentative Referenzperson oder eine repräsentative reale Person, den wahren Wert der

Ergebnisgröße auf der Grundlage der verfügbaren Information so gut wie möglich im Sinne eines „*best estimates*“ zu schätzen und die Unsicherheit der Schätzung zu quantifizieren.

Die Ermittlungen können auch ganz unterschiedlichen Zwecken dienen. Zu nennen sind z. B. Nachweis der Einhaltung von Grenz- und Richtwerten (constraints), Prüfung in Bezug auf Richtwerte im Sinne der Erfordernis behördlichen Handelns, Überschreitung von Wahrscheinlichkeitsschwellen für stochastische Schäden und Schwellen für deterministische Schäden sowie Berichterstattung und wissenschaftliche Fragestellungen. Sie können von den Anforderungen her konservativ zur sicheren Einhaltung von Dosisbegrenzungen bei der Planung von Anlagen und Tätigkeiten sein, oder sie können der Dosisermittlung für existierende Anlagen oder Zustände durch Modellrechnungen oder Messungen dienen.

Jede Ermittlung oder Abschätzung von Strahlenexpositionen dient einem bestimmten Zweck⁷. Beispiele für solche Zwecke im Zusammenhang mit Strahlenexpositionen sind:

- Die Überwachung von Beschäftigten bei Tätigkeiten und überwachungsbedürftigen Arbeiten auf der Grundlage der EURATOM-Grundnormen (EC 1996), der StrlSchV (BMU 2012b) und der RöV (BMU 2011b).
- Die Erfüllung hoheitlicher Aufgaben, wie z. B. die Verpflichtungen von Artikel 35, 36 EURATOM-Vertrag (EURATOM 1957).
- Die Vorsorge im Strahlenschutz für die Bevölkerung nach StrVG (BMU 2008).
- Die Ermittlung der natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung.
- Die Ermittlung von Normal- oder Hintergrundwerten.
- Der Nachweis der Erfüllung von Forderungen von Behörden im Einzelfall.
- Die Prüfung der Expositionssituation bei Interventionen, Sanierung und Wiederbesiedlung.
- Die Bewertung von besonderen Situationen, in denen erhöhte Expositionen vorliegen oder vermutet werden.
- Die Überwachung von Probanden in der medizinischen Forschung, inklusive der Epidemiologie.
- Die Bestimmung von Verursachungswahrscheinlichkeiten (probability of causation) bei der Prüfung von Schadenersatzansprüchen.
- Der Vergleich unterschiedlicher Handlungsoptionen im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit.
- Die Ermittlung von Dosis-Risiko-Beziehungen in der Epidemiologie.
- Die medizinischen Anwendungen in Diagnostik und Therapie.
- Die Beurteilung von bestehenden Expositionssituationen und bestehenden Anlagen.

In Bezug auf die Ermittlung oder Abschätzung von Strahlenexpositionen ergeben sich aus dem Zweck heraus Anforderungen, die unterschiedliche Herangehensweisen an den zu ermittelnden Wert zur Folge haben. Dabei sind 2 Fälle von Zwecken zu unterscheiden:

- Prüfung von Strahlenexpositionen in Relation zu vorgegebenen Werten (Grenzwerten, Richtwerten, Referenzwerten, Prüfwerten, ...). Durch diesen (expliziten oder impliziten) Bezug wird die Bestimmung der Strahlenexposition auf ein konkretes (quantitatives) Ziel

⁷ „Zweck“ beschreibt den Beweggrund einer zielgerichteten Tätigkeit oder eines Verhaltens.

ausgerichtet, bei dem die Einhaltung oder Überschreitung des Bezugswertes in den Mittelpunkt des Vorgehens rückt.

- Ermittlung von Strahlenexpositionen ohne Bezüge auf vorgegebene Vergleichs- oder Bezugswerte. Fehlen Vorgaben solcher Werte, verbleibt als konkretes Ziel nur die Bestimmung realistischer Werte der Exposition. Alle davon abweichenden Vorgehensweisen sind als spekulativ und damit unwissenschaftlich einzustufen.

Folgende Anforderungen leiten sich aus dem Zweck der Bestimmung von Strahlenexpositionen ab:

- Jede Ermittlung von Strahlenexpositionen ohne Bezüge auf vorgegebene Werte ist nur dann sinnvoll, wenn sie anstrebt, die tatsächliche oder mögliche Strahlenexposition einer Person annähernd zu erfassen oder zumindest in einem vorgegebenen Handlungsrahmen („Rechenvorschrift“) vergleichbare Ergebnisse zu produzieren. Dabei ist die Methode der Annäherung und jede wie auch immer geartete „Genauigkeit“ des Ergebnisses zunächst offen. Grundsätzliche Ansprüche an das Ergebnis resultieren allerdings aus der notwendigen Forderung einer Verwendbarkeit der erzeugten Ergebnisse durch Vergleichbarkeit mit anderen Werten (nicht vorrangig mit rechtlich festgesetzten Werten) und Reproduzierbarkeit. So ist die Ermittlung allgemeiner Expositionen der Bevölkerung nur dann verwendbar, wenn sie (interpretierbare) Vergleiche mit der Exposition der allgemeinen Bevölkerung anderer Staaten zulässt.
- Dient die Bestimmung der Strahlenexposition der Prüfung einer vorliegenden oder geplanten Expositionssituation in Bezug auf Vergleichswerte, ist es vielfach nicht erforderlich, die tatsächliche oder mögliche Strahlenexposition einer Person annähernd zu erfassen. Vielmehr genügen Abschätzungen, die zeigen, in welchem Verhältnis die Strahlenexposition einer zu bewertenden Expositionssituation zu dem Bezugswert steht. Das kann sowohl durch gezielte Überschätzung („konservativ“) als auch Unterschätzung⁸ („restriktiv“) der realen Exposition geschehen. Soweit die Abschätzung der Strahlenexposition ausreicht, um den Zweck der Abschätzung zu erreichen, widersprechen darüber hinaus gehende Forderungen nach Genauigkeit oder Realismus dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz.

In folgenden Fällen sind realistische Ermittlungen oder zumindest stärker realistisch orientierte Abschätzungen der Strahlenexposition notwendig:

- Die konservativ abgeschätzten Expositionen können die Einhaltung von Grenz- oder Richtwerten nicht sicher nachweisen.
- Die Expositionen vieler Einzelfälle (einzelner Quellen), die als nicht vernachlässigbar eingestuft werden, sollen kumuliert und das Ergebnis auf die Einhaltung von Grenz- oder Richtwerten geprüft werden.
- Die Expositionen verschiedener Quellen sollen auch unterhalb von Grenz- oder Prüfwerten verglichen werden.

Mit den genannten Anforderungen ist jedoch die Frage: „Was ist realistisch, was ist konservativ?“ noch nicht beantwortet.

In dieser Empfehlung geht die SSK davon aus, dass realistische Ermittlung der Strahlenexposition bedeutet, die tatsächliche oder mögliche Strahlenexposition einer Person oder

⁸ z. B. bei der Ermittlung von Schadenersatzansprüchen, indem Mindestwerte der Exposition abgeschätzt werden.

Personengruppe in ihrem wirklichen Ansichsein wenigstens annähernd zu quantifizieren. Die Strahlenexposition wird dazu im metrologischen Sinne als Ergebnisgröße betrachtet, deren wahrer Wert durch Messung oder Modellierung so exakt wie möglich zu schätzen ist.

Von der realistischen Ermittlung der Strahlenexposition zu unterscheiden sind die

- konservative Abschätzung der Strahlenexposition, d. h. die hinreichend sichere Schätzung der tatsächlichen oder möglichen Strahlenexposition einer Person oder Personengruppe in ihrem wirklichen Kleinersein. Die Strahlenexposition wird dazu als Ergebnisgröße betrachtet, deren wahrer Wert mit hinreichender Sicherheit unter dem durch die Schätzung erhaltenen Wert liegt und die
- restriktive Abschätzung der Strahlenexposition, die hinreichend sicher das wirkliche Größersein einer tatsächlichen oder möglichen Strahlenexposition einer Person oder Personengruppe bestimmt. Die Strahlenexposition wird dazu als Ergebnisgröße betrachtet, deren wahrer Wert mit hinreichender Sicherheit über dem durch die Schätzung erhaltenen Wert liegt.

Konservative (oder restriktive) Abschätzungen der Strahlenexposition können erreicht werden, indem

- 1) bei probabilistischen Rechnungen hohe (oder geringe) Quantile der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Strahlenexposition gefordert oder betrachtet werden,
- 2) bei deterministischen Rechnungen für die Eingabegrößen als Punktschätzer hohe (oder geringe) Quantile der Werte der Eingabegrößen gewählt werden⁹ oder
- 3) grundsätzlich in der Praxis nicht vorkommende Expositionspfade, Verhaltensweisen, Verzehrsgewohnheiten etc.

berücksichtigt werden¹⁰.

Eine Analyse der Unsicherheiten ist für konservative Abschätzungen lediglich im Fall 1) möglich.

Realistische Ermittlungen der Strahlenexposition können einschließlich der Analyse der Unsicherheit erreicht werden, indem

- 1) probabilistische Rechnungen mit Verteilungen der Eingangsgrößen,
- 2) deterministische Rechnungen mit besten Schätzwerten der Eingangsgrößen und den ihnen zugeordneten Standardunsicherheiten und
- 3) lediglich in der Realität vorkommende Expositionspfade, Verhaltensweisen, Verzehrsgewohnheiten etc.

berücksichtigt werden.

Bezüglich der Anwendung probabilistischer und deterministischer Verfahren zur Ermittlung der Strahlenexposition siehe Barthel und Thierfeldt (2012). Probabilistische Verfahren bieten den Vorteil, dass sie vollständige Informationen über die Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf

⁹ Es ist darauf hinzuweisen, dass dieses Vorgehen statistisch nicht korrekt ist. Das Rechnen mit Quantilen einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erzeugt keine Quantile derselben Wahrscheinlichkeit. Siehe hierzu eine ausführliche Darstellung in (Barthel und Thierfeldt 2012).

¹⁰ Bei restriktiven Ermittlungen werden grundsätzlich in der Praxis nur unumgängliche Expositionspfade, Verhaltensweisen, Verzehrsgewohnheiten etc. berücksichtigt.

der Grundlage der verfügbaren Information liefern. Deterministische Verfahren mit Standardunsicherheiten nach dem GUM sind Näherungen erster Ordnung, die – wenn hinreichend – allerdings ebenfalls den Stand der verfügbaren Information wiedergeben. Das häufig vorgebrachte Argument, dass die Anforderungen an die Qualität der Daten bei probabilistischen Rechnungen höher seien als bei deterministischen Rechnungen, ist falsch; deterministische und probabilistische Rechnungen sollen und können nur den jeweiligen Stand der verfügbaren Information wiedergeben.

3.4 Ermittlung der Strahlenexposition mittels Modellierung

Diese Empfehlung behandelt Anforderungen an den Realismus der Ermittlung der Strahlenexposition, wobei solche Ermittlungen auf der Grundlage von (radioökologischer) Modellierung vorgenommen werden. Hierbei wird generalisierend unter Radioökologie die Beschreibung des Verhaltens von Radionukliden und Strahlungsfeldern in der natürlichen und technischen Umwelt des Menschen verstanden. Die Empfehlung ist anwendbar auf alle Expositionssituationen, in denen Expositionsszenarien durch FEPs beschrieben werden können. Ein Szenario einer Expositionssituation besteht dann aus den natürlichen und technischen Merkmalen der Expositionssituation sowie einem Satz von Prozessen und Ereignissen, die die Strahlenexpositionen von Menschen beeinflussen können.

Dazu gehören die Rekonstruktion vergangener Expositionen, die Bestimmung aktueller Expositionen und die Voraussage zukünftiger oder auch nur potenzieller Expositionen. Gegenstand der Modellierung können Einzelpersonen oder Gruppen der Beschäftigten oder der allgemeinen Bevölkerung, ganze Populationen oder Referenzpersonen sein. Die Zielstellungen radioökologischer Expositionsermittlungen sind so vielfältig wie die möglichen methodischen Ansätze.

Die Aufgabe ist immer, den Wert der aus einer bestimmten Strahlenquelle resultierenden Dosis von Referenzpersonen oder real existierenden Personen an einem gegebenen Ort in einer gegebenen Expositionssituation durch Modellierung zu ermitteln. Dazu ist eine eindeutige Definition der jeweiligen Ergebnisgröße erforderlich, um Fehlinterpretationen beim Vergleich unterschiedlicher Dosisangaben zu vermeiden. Dabei ist es unerheblich, ob der Wert der Ergebnisgröße einer Expositionsermittlung zum Vergleich mit einem Grenzwert, einem Richtwert oder einem Referenzwert benutzt wird, ob er wie bei einem Langzeitsicherheitsnachweis lediglich eine Indikatorgröße darstellt, oder ob er wissenschaftlichen Untersuchungen dient.

3.4.1 Dosisgrößen

Die Strahlenexposition wird hier ohne Einschränkung der Allgemeinheit exemplarisch als effektive Dosis E betrachtet:

$$E = \sum_T w_T \sum_r w_r \cdot D_{r,T} \quad (4)$$

T	Index zur Bezeichnung der verschiedenen Gewebe bzw. Organe
w_T	Gewebewichtungsfaktor für das Gewebe oder Organ T
r	Index zur Bezeichnung der verschiedenen Strahlenarten
w_r	Strahlenwichtungsfaktor der Strahlenart r
$D_{r,T}$	Energiedosis im Gewebe T durch die Strahlenart r

In dieser Definition sind die Wichtungsfaktoren w_T und w_r nach ICRP (1991) enthalten. Die Tatsache, dass die Wichtungsfaktoren w_T und w_r für einzelne Individuen nicht konstant, sondern

variabel sind, wird hier nicht behandelt. Die effektive Dosis in der Konvention ihrer Definition nach Gleichung (4) ist die Ergebnisgröße, in der hier Strahlenexpositionen betrachtet werden. Wegen der verschiedenen Expositionspfade ergibt sich die gesamte effektive Dosis

$$E_{\text{gesamt}} = E_{\text{ext}} + E_{\text{inh}} + E_{\text{ing}} \quad (5)$$

als Summe der externen effektiven Dosis E_{ext} und der effektiven Dosen durch Inhalation E_{inh} und durch Ingestion E_{ing} . Zusätzliche Expositionspfade wie die Aufnahme von Radionukliden durch die Haut, die Direkt ingestion von Boden und die Inhalation von Staub werden hier zur Vereinfachung nicht betrachtet. Für jedes Radionuklid werden die drei Summanden jeweils als Produkt mehrerer Faktoren nach Gleichungen (6) – (8) berechnet.

$$E_{\text{ext}} = \dot{E}_{\text{ext}} \cdot t_{\text{exp}} \quad (6)$$

$$E_{\text{inh}} = \sum_r A_{\text{V},r} \cdot \dot{V} \cdot t_{\text{exp}} \cdot g_{\text{inh},r} \quad (7)$$

$$E_{\text{ing}} = \sum_r A_{\text{m},r} \cdot \dot{U} \cdot t_{\text{exp}} \cdot g_{\text{ing},r} \quad (8)$$

\dot{E}_{ext} ist die effektive Dosisleistung am Ort der externen Exposition. A_{V} und A_{m} sind die Aktivitätskonzentrationen eines Radionuklids in der jeweils für den Expositionspfad relevanten Matrix in geeigneten Einheiten; A_{V} als Aktivitätskonzentration der Atemluft und A_{m} als Aktivitätskonzentration im Lebensmittel. \dot{V} und \dot{U} sind die Atemraten bzw. Verzehr rates der Lebensmittel und t_{exp} ist die jeweilige Expositionszeit. Die Dosiskoeffizienten $g_{\text{inh},r}$ für die Exposition durch ein Radionuklid r durch Inhalation in Sv/Bq und $g_{\text{ing},r}$ für die Exposition durch Ingestion in Sv/Bq sind nuklid- und altersabhängig und sind durch ICRP (1996) bzw. die EURATOM-Grundnormen verbindlich festgelegte Parameter, und die effektiven Dosen müssen für die verschiedenen Altersklassen separat betrachtet werden. Die Gleichungen (3) – (5) sind der Einfachheit halber für die effektive Dosis angegeben. Sie gelten entsprechend für die Organ- und Gewebedosen.

Da Strahlenexpositionen stark altersabhängig sind und sich in unterschiedlichen Ländern die Altersverteilungen der Bevölkerungen stark unterscheiden können, werden nach UNSCEAR (2000), um die lokalen Strahlenexpositionen international vergleichen zu können, die altersabhängigen Strahlenexpositionen mit Hilfe einer Gewichtung zusammengefasst, die die Häufigkeit der Altersgruppen in der Gesellschaft berücksichtigt, in dem als Mittelwert

$$E_{\text{gesamt, Mittel}} = 0,05 \cdot E_{\text{gesamt}, 1 < a \leq 2} + 0,30 \cdot E_{\text{gesamt}, 7 < a \leq 12} + 0,65 \cdot E_{\text{gesamt}, a > 17} \quad (9)$$

gebildet wird. Dies entspricht nicht den tatsächlichen Altersverteilungen in Deutschland oder anderen Ländern, kann aber als Konvention zum Vergleich herangezogen werden.

Mit den Definitionen in Gleichungen (5) – (8) ist die Strahlenexposition für ein Individuum eine Ergebnisgröße mit einem wohl definierten wahren Wert.

3.4.2 Radioökologische Modellierung

In vielen Fällen übernimmt die klassische Radioökologie die Aufgabe, die Auswirkungen von Emissionen und Freisetzungen von Radionukliden auf Mensch und Umwelt zu beschreiben und Strahlenexpositionen durch Modellierung zu quantifizieren. In allen Fällen, in denen

Strahlenexpositionen nicht direkt gemessen werden können, müssen sie durch Modellrechnungen und/oder Messungen an relevanten Umweltmedien geschätzt werden.

Die Aufstellung des Modells ist allgemein in der Metrologie und so auch bei der Ermittlung der Strahlenexposition der schwierigste Teil zur Lösung der Aufgabe. In dieser Empfehlung wird davon ausgegangen, dass das Modell gegeben ist und seine Sinnhaftigkeit nicht in Frage gestellt wird. Es soll dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Gleiche Sachverhalte sollten in unterschiedlichen Fragestellungen durch gleiche Modelle beschrieben werden. Wenn vereinfachte Modelle als Näherungen benutzt werden, sollten sie verzerrungsfrei sein und die gemachten Näherungen hinreichend sein. Abdeckende, d. h. konservativ überschätzende Modellierungen sind für die Beantwortung mancher Fragestellungen ausreichend, können aber nach Einschätzung der SSK nicht als Ermittlung der Strahlenexposition angesehen werden.

Die Realitätsnähe der Modellierung ist anhand bekannter Expositionssituationen zu validieren. Ein Modell, das die Natur oder die vergangenen Erfahrungen nicht beschreibt, ist für die realistische Ermittlung der Strahlenexposition ungeeignet.

In radioökologischen Dosisermittlungen liegen jedoch die tatsächlichen, individuellen Werte der Eingangsgrößen in Gleichungen (5) – (8) zur Ermittlung der Strahlenexposition nicht vor, sondern müssen durch radioökologische Modellrechnungen oder Messungen geeigneter Proben geschätzt werden. Abbildung 3.4 stellt die komplexen Wege der Radionuklide von einer Quelle zum Menschen dar.

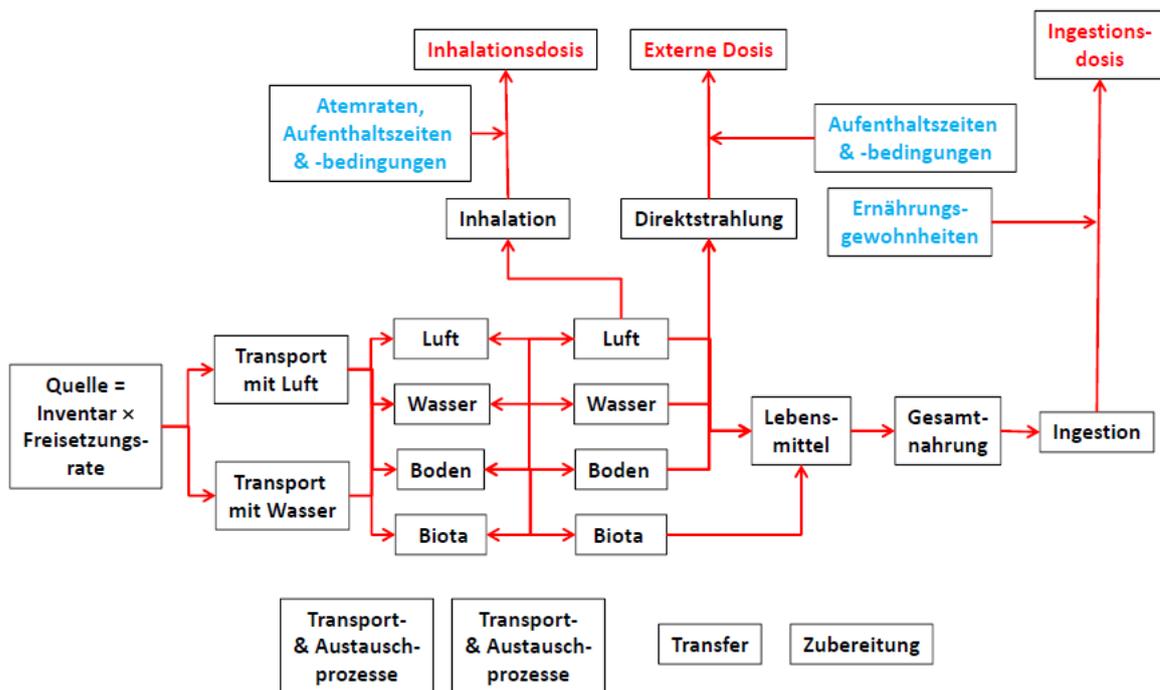


Abb. 3.4: Exemplarische Darstellung der Wege der Radionuklide durch die Umwelt von der Quelle zum Menschen. Da die Kette der Transport- und Austauschprozesse lang und komplex sein kann, sind sie hier doppelt und vernetzt dargestellt.

Die Komplexität aber auch der Realismus (die Realitätsnähe) der Modellierung ist abhängig von der Information, die über die Quelle und über die Radionuklide in den verschiedenen Umweltmedien vorliegt (vgl. hierzu Kap. 2.5.1).

3.4.3 Strahlenexposition als Zufallsgröße

In jedem Fall unterliegen die Strahlenexpositionen vielfachen Einflüssen und Abhängigkeiten mit hoher Variabilität und sind daher Zufallsgrößen, deren wahren Werte durch die Modellierung geschätzt werden müssen.

Aufgrund der Variabilität der externen Dosisleistungen, der Aktivitätskonzentrationen in den relevanten Umweltmedien und Lebens- und Verhaltensweisen gilt dies aber nicht nur für eine Gruppe von Individuen, sondern auch für die Wahrscheinlichkeit der Exposition einer Einzelperson. Dies hat zur Folge, dass die Strahlenexpositionen in einer Bevölkerung oder Gruppe Verteilungen aufweisen, die retrospektiv die tatsächlichen Unterschiede der individuellen Expositionen, prospektiv die erwarteten Verteilungen zukünftiger oder potenzieller Expositionen darstellen.

Eine derartige Verteilung kann durch die Angabe von Kenngrößen der Verteilung charakterisiert werden, z. B. von Mittelwerten, Medianen, Moden oder Erwartungswerten. Bei diesen Kenngrößen handelt es sich um Punktschätzer von Verteilungen. Nur im Falle der Poissonverteilung als einparametrischer Verteilung genügt die Angabe eines Punktschätzers zur vollständigen Charakterisierung der Verteilung. Bei anderen, mehrparametrischen Verteilungen ist dies nicht hinreichend, ja es ist nicht einmal sicher, ob in einer gegebenen Population die Strahlenexpositionen monomodal sind oder durch eine einzige Verteilung beschrieben werden können.

Das heißt, dass Annahmen über die Art der Verteilungen gemacht werden müssen und dass eine hinreichende Anzahl von Kenngrößen zur vollständigen Charakterisierung der Verteilung(en) angegeben werden muss. Ohne nähere Betrachtung des jeweiligen Verteilungstyps muss neben den oben genannten Punktschätzern wenigstens eine hinreichende Anzahl von Quantilen der Verteilung gewonnen und dokumentiert werden.

3.4.4 Quantifizierung von Unsicherheit und Variabilität

Die Quantifizierung von Unsicherheiten, die dem Wert einer Ergebnisgröße zuzuordnen ist, ist in vielen Wissenschaftsbereichen zu einer *conditio sine qua non* geworden. Unsicherheiten ergeben sich sowohl aus mangelnder Kenntnis und Information als auch aus der natürlichen oder anthropogenen Variabilität von Eingangsgrößen. Eine ausführliche Darstellung dazu ist bei Barthel und Thierfeldt (2012) zu finden.

In der Metrologie werden Unsicherheiten auf der Basis internationaler Empfehlungen standardisiert ermittelt (JCGM 2008a, 2008b). Für Strahlenmessverfahren in den Bereichen der Dosimetrie, der Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und der Freigabe ist die Angabe von Unsicherheiten als Grundlage für die Ermittlung charakteristischer Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze, Grenzen des Vertrauens- oder Überdeckungsbereichs) Teil des nationalen und internationalen Regelwerks geworden (JCGM 2008a, 2008b). Die SSK hat im Jahr 2005 in ihrer Empfehlung „Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen“ (SSK 2005b) die Bedeutung von Unsicherheiten betont.

Obwohl die ICRP bereits in der Empfehlung 60 (ICRP 1991) und erneut in der Empfehlung 103 (ICRP 2007) die Bedeutung der Angabe von Unsicherheiten betont hat (vgl. Kapitel 3.2.4), wurden bei der Ermittlung der Strahlenexposition bisher in Deutschland keine Angaben zu Unsicherheiten und Variabilität gemacht. Jedoch ist der Trend zur Quantifizierung von Unsicherheiten im Strahlenschutz und in der Metrologie international deutlich. So bereitet auch UNSCEAR derzeit einen Bericht über „Uncertainties in Risk Estimates for Cancer due to Exposure to Ionizing Radiation“ vor.

Im konventionellen Umweltschutz und der dort benutzten Risikoanalytik sind Unsicherheitsanalysen heute Standard; siehe auch (Barthel und Thierfeldt 2012). Die WHO hat im Rahmen des International Programme on Chemical Safety (IPCS) zehn Prinzipien zur Charakterisierung und Bewertung von Unsicherheiten bei Expositionsermittlungen formuliert (WHO 2008):

„Principle 1: Uncertainty analysis should be an integral part of exposure assessment.

Principle 2: The level of detail of the uncertainty analysis should be based on a tiered approach and consistent with the overall scope and purpose of the exposure and risk assessment.

Principle 3: Sources of uncertainty and variability should be systematically identified and evaluated in the exposure assessment.

Principle 4: The presence or absence of moderate to strong dependencies between model inputs is to be discussed and appropriately accounted for in the analysis.

Principle 5: Data, expert judgement or both should be used to inform the specification of uncertainties for scenarios, models and model parameters.

Principle 6: Sensitivity analysis should be an integral component of the uncertainty analysis in order to identify key sources of variability, uncertainty or both and to aid in iterative refinement of the exposure model. The results of sensitivity analysis should be used to identify key sources of uncertainty that should be the target of additional data collection or research, to identify key sources of controllable variability that can be the focus of risk management strategies and to evaluate model responses and the relative importance of various model inputs and model components to guide model development.

Principle 7: Uncertainty analyses for exposure assessment should be documented fully and systematically in a transparent manner, including both qualitative and quantitative aspects pertaining to data, methods, scenarios, inputs, models, outputs, sensitivity analysis and interpretation of results.

Principle 8: The uncertainty analysis should be subject to an evaluation process that may include peer review, model comparison, quality assurance or comparison with relevant data or independent observations.

Principle 9: Where appropriate to an assessment objective, exposure assessments should be iteratively refined over time to incorporate new data, information and methods to better characterize uncertainty and variability.

Principle 10: Communication of the results of exposure assessment uncertainties to the different stakeholders should reflect the different needs of the audiences in a transparent and understandable manner“.

Diese Prinzipien sollten nach Einschätzung der SSK auch bei der Ermittlung der Strahlenexposition zur Anwendung kommen. Die dazu benötigten Handwerkszeuge existieren, z. B. (JCGM 2008a, 2008b). Siehe dazu auch (Barthel und Thierfeldt 2012).

Die Frage des Realismus einer Dosisermittlung ist eng verbunden mit der Frage nach der Unsicherheit des Ergebnisses und der Variabilität der Einflussgrößen. Dies soll an den einfachen Modellen der Gleichungen (3) – (5) diskutiert werden.

In Übereinstimmung mit einer Empfehlung der WHO aus dem Jahr 2008 hält die SSK die Angabe der dem Ergebnis zugeordneten Unsicherheit für erforderlich. Die Notwendigkeit, Unsicherheiten bei der Ermittlung von Strahlenexpositionen zu quantifizieren, ergibt sich auch

aus ICRP 103 und dem dort verwendeten Ansatz der Optimierung. Eine Optimierung ist generell ohne eine realistische Ermittlung der Strahlenexposition nicht möglich; im Ansatz von ICRP 103 ist Optimierung ohne Probabilistik, d. h. die Ermittlung von Wahrscheinlichkeitsdichten (PDF) von Expositionen, nicht möglich.

Die Darstellung von Unsicherheiten über Wahrscheinlichkeitsdichten oder -funktionen ist gegenüber der Angabe von besten Schätzwerten und Standardunsicherheiten zu bevorzugen. Wenn Quantile von Ergebnisgrößen zu ermitteln sind, müssen die Wahrscheinlichkeitsdichten der Ergebnisgrößen ermittelt werden. Deterministisches Rechnen mit Quantilen ergibt keine Quantile, sondern ist stark verzerrend. Die Analyse von Unsicherheiten erlaubt zudem über Sensitivitätsanalysen die Identifizierung kritischer Parameter, für die detailliertere Informationen beschafft werden müssen.

In verschiedenen Anwendungsbereichen hat es sich als sinnvoll erwiesen, sogenannte epistemische und aleatorische Unsicherheiten zu unterscheiden. Dabei sind epistemische Unsicherheiten solche, die auf Mangel an Information begründet sind. Messunsicherheiten, Modellunsicherheiten und Unwissen fallen unter epistemische Unsicherheiten. Sie können vielfach durch verstärkte Anstrengungen der Datenbeschaffung und weitere Untersuchungen verringert werden. Aleatorische Unsicherheiten beruhen auf der natürlichen oder anthropogenen Variabilität der Werte von Eingangsgrößen und Parametern und sind Folge stochastischer Prozesse. Aleatorische Unsicherheiten sind im System selbst enthalten und können nicht durch erhöhten Untersuchungsaufwand verringert werden. Siehe hierzu auch eine ausführliche Darstellung und Diskussion bei Barthel und Thierfeldt (2012).

Eine getrennte Behandlung epistemischer und aleatorischer Unsicherheiten in Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen kann vielfach hilfreich sein. Jedoch ist eine Unterscheidung der beiden Typen¹¹ der Unsicherheit in Bezug auf die Unsicherheit, die dem Endergebnis einer Ermittlung der Strahlenexposition zuzuordnen ist, unerheblich. Sie sind gleichwertig.

Es gibt bei der Ermittlung der Strahlenexposition als effektiver Dosis praktisch drei Klassen von Unsicherheiten, die von unterschiedlicher Bedeutung sind. Es handelt sich um:

- Modellunsicherheiten,
- Messunsicherheiten und
- Parameterunsicherheiten.

Modellunsicherheiten sind Auswirkungen vereinfachender Modellstrukturen und -ansätze sowie einer Extrapolation von Modellen über den Rahmen hinaus, in dem sie empirisch geprüft wurden (z. B. auch bei der Spezifikation von Modellen für definierte Fragestellungen und Situationen).

Modellunsicherheiten sind u. a. Unsicherheiten, die der Definition der Dosisgrößen unterliegen. Sie betreffen z. B. die Gewebe- und Strahlungswichtungsfaktoren in Gleichung (1) und die Dosiskoeffizienten in den Gleichungen (3) – (5). Für die Praxis sind diese Modellunsicherheiten im Allgemeinen nicht relevant, da die Modellparameter im Regelwerk verbindlich festgelegt sind. Die Modelle mögen fehlerhaft sein, aber per Konvention wird die Strahlenexposition mit diesem Modell ermittelt.

¹¹ Man beachte, dass die Bezeichnung von epistemischen und aleatorischen Unsicherheiten als Typ A bzw. Typ B, wie sie in der Epidemiologie verbreitet ist, nicht mit der Einteilung von Unsicherheiten in die Typen A und B nach dem GUM übereinstimmt.

Zum Beispiel sind die w_T und w_r mit Unsicherheiten behaftet, die als Modellunsicherheiten zu bezeichnen sind, aber sie sind verbindlich als Zahlenwerte festgelegt. Damit sind ihre Unsicherheiten nicht relevant für den Realismus bei der Bestimmung der Strahlenexposition. Aber es gibt Problemfelder, wo die Frage berechtigt ist, ob die effektive Dosis in Form von Gleichung (1) eine angemessene Größe zur Beschreibung der Strahlenexposition ist. Solche Problemfelder sind die Anwendung der effektiven Dosis zur Beschreibung der Strahlenexposition in der medizinischen Diagnostik, der Gebrauch der w_r nach StrlSchV bei Expositionen bei speziellen Strahlungsfeldern, z. B. Strahlungsfeldern von Radargeräten mit Photonenenergien < 30 keV, und die Angabe der effektiven Folgedosis von Säuglingen bis zum 70. Lebensjahr als Jahresdosis für das Kleinkind ≤ 1 Jahr. Die Frage, ob die Definition einer Ergebnisgröße zur Beschreibung der Strahlenexposition für eine Expositionssituation oder eine bestimmte Fragestellung des Strahlenschutzes sinnvoll ist, ist nicht eine Frage des Realismus der Expositionsermittlung. Auch die Frage, ob die operationellen Größen angemessene Schätzer für die Schutzgrößen sind, ist die Frage nach einer Modellunsicherheit.

Für diese Empfehlung ist es unerheblich, ob die zu betrachtende Dosisgröße auch die Modellunsicherheiten berücksichtigt oder ob einzelne Parameter aufgrund gesetzlicher Festlegungen als Punktschätzer ohne Unsicherheit in die Dosisermittlung eingehen. Die Frage nach Sinnhaftigkeit solcher Festlegungen ist zwar wissenschaftlich hoch interessant und immer wieder neu zu beantworten, ist aber als festgeschriebene Konvention unter gesellschaftlichem Konsens hier nicht in Frage zu stellen.

Modellunsicherheiten werden in dieser Empfehlung nicht betrachtet. Zum einen werden sie wegen normativer Festlegungen (s.o.) nicht berücksichtigt. Zum anderen werden die bei der radioökologischen Modellierung der Wege der Radionuklide von der Quelle durch die Umwelt zum Menschen auftretenden Modellunsicherheiten vernachlässigt. Sie werden hier vernachlässigt, da die in dieser Empfehlung aufgestellte Forderung nach der Benutzung der besten nach dem Stand von Wissenschaft und Technik verfügbaren radioökologischen Modelle sicherstellt, das auf dem jeweiligen Kenntnisstand die bestmögliche Ermittlung vorgenommen wird. Dies schließt nicht aus, dass im Laufe von Ermittlungen von Strahlenexpositionen Defizite von Modellen – unter anderem im Verlaufe von Validierungen – festgestellt werden. Solche Defizite können Forschungsbedarf oder notwendige Verbesserungen der Modelle aufzeigen.

Messunsicherheiten nach GUM oder GUM Supplement 1 (JGCM 2008a, 2008b) betreffen im gewählten Beispiel die Faktoren A_F , A_V und A_m . Auch Messunsicherheiten sind meist in Bezug auf den Realismus der Dosisermittlung nicht relevant, aber es kann technisch oder ökonomisch schwierig sein, die Messungen in der gewünschten Qualität durchzuführen. Jedoch sind Messunsicherheiten nur eine Quelle der Variabilität der Faktoren A_F , A_V und A_m . Sie sind zusätzlich unsicher als Folge der Variabilität der ökologischen Prozesse, die in dieser Betrachtung mit zu den nachfolgend genannten Parameterunsicherheiten zu rechnen sind. A_F , A_V und A_m sind Zufallsvariable physikalischer Größen, die für eine bestimmte Probe jeweils ihren wohl definierten wahren Wert haben. In einer Stichprobe mehrerer Proben eines Materials ist dies bereits für die verschiedenen Proben nicht mehr der Fall.

Parameterunsicherheiten sind die Folge natürlicher und anthropogener Variabilität von Größen, die in die Ermittlung der Strahlenexposition eingehen oder die Strahlenexposition beeinflussen. Eine Vielzahl unsicherer Parameter beeinflusst die Strahlenexposition multiplikativ. Sie sind die wesentliche Ursache der Unsicherheit von radioökologischen Dosisermittlungen und das wesentliche Problem bei der Frage nach einer realistischen Ermittlung der Strahlenexposition. In den Gleichungen (3) – (5) sind dies u. a. A_F , A_V und A_m . Da diese Größen Zufallsvariablen sind, ist auch die Strahlenexposition eine Zufallsgröße.

Aufgrund der Parameterunsicherheiten folgt die Aussage: Der wahre Wert der Strahlenexposition eines Individuums ist der aktuelle Wert einer Zufallsgröße, der durch die aktuellen Werte vieler anderer Zufallsgrößen bestimmt wird.

Aus dieser Aussage sind drei Schlüsse zu ziehen:

- Für ein Individuum ist die Strahlenexposition nach einer vorgegebenen Definition der Dosis eine Ergebnisgröße mit einem wohl definierten wahren Wert. Der wahre Wert ist nicht zugänglich und muss durch Messungen und Modellrechnungen geschätzt werden.
- Aufgrund von Parametervariabilität gilt dies aber nicht für eine Gruppe von Individuen. In einer Gruppe liegt eine Verteilung der individuellen wahren Werte der Exposition vor. Diese Verteilung ist mit den Methoden der Radioökologie zu schätzen.
- Die effektive Dosis E ist für ein Individuum in einer bestimmten Situation eine Ergebnisgröße mit eindeutig festliegendem wahren Wert, den es zu bestimmen gilt. Die effektive Dosis E ist keine Ergebnisgröße für eine Gruppe von Individuen auch unter „gleichen Bedingungen“, da in einer Gruppe aufgrund der zufälligen Variabilität der die Exposition beeinflussenden Größen unterschiedliche Expositionen der Mitglieder der Gruppe zu erwarten sind und die Exposition daher durch eine Verteilung wahrer Werte zu beschreiben ist.

Daraus folgt, dass die realistische Ermittlung der Strahlenexposition einer Gruppe oder einer Population nur in der Ermittlung der Verteilung der Individualdosen bestehen kann; entweder durch Messung der Individualdosen oder als Ermittlung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der Individualdosen.

Derart ermittelte Strahlenexpositionen können durch Angaben von Kenngrößen der Verteilung charakterisiert werden, z. B. von Mittelwerten, Medianen, Moden oder Erwartungswerten. Bei den letztgenannten Kenngrößen handelt es sich um Punktschätzer von Verteilungen. Nur im Falle der Poissonverteilung als einparametrischer Verteilung genügt die Angabe eines Punktschätzers zur vollständigen Charakterisierung der Verteilung. Bei mehrparametrischen Verteilungen ist dies nicht hinreichend, ja es ist nicht einmal sicher, ob in einer gegebenen Population die Strahlenexpositionen monomodal sind oder durch eine einzige Verteilung beschrieben werden können.

Das heißt, dass Annahmen über die Art der Verteilungen gemacht werden müssen, und dass eine hinreichende Anzahl von Kenngrößen zur vollständigen Charakterisierung der Verteilung(en) angegeben werden muss. Ohne nähere Betrachtung des jeweiligen Verteilungstyps muss neben den o. g. Punktschätzern wenigstens eine hinreichende Anzahl von Quantilen der Verteilung gewonnen und dokumentiert werden.

Es gibt auch Fälle, in denen Punktschätzer hinreichend sind. Der Erwartungswert der Strahlenexposition kann in der Strahlenhygiene auf der Grundlage der LNT (linear no-threshold)-Hypothese durchaus als sinnvoller Punktschätzer des Risikos in einer Population herangezogen werden. Dies gilt jedoch nicht für Median oder Mittelwert und gilt auch nicht für Ermittlungen des attributiven Risikos.

Das oben Gesagte gilt auch in der Medizin, wo die Energiedosis eines Gewebes oder eines Organs in einer Gruppe von Patienten einer Verteilung von $D_{r,T}$ unterliegt. Für jeden einzelnen Patienten ist $D_{r,T}$ eine Ergebnisgröße mit einem wahren Wert. Die beobachtete oder ermittelte Verteilung der $D_{r,T}$ unterscheidet sich allerdings von der Verteilung der effektiven Dosen, da in der Medizin im Allgemeinen eine nicht normale Altersverteilung und damit speziell zu bestimmende w_T die Verteilung der Energiedosen verändern.

Die gleichen Formeln (Modelle) gelten für realistische und konservative Rechnungen. Die Frage ist dann: Was ist realistische Ermittlung der Strahlenexposition? Die Antwort lautet: Den wahren Wert der Strahlenexposition durch Messung oder Modellierung so exakt wie möglich zu schätzen.

3.5 Realistische Ermittlung der Strahlenexposition

„Realistische Ermittlung der Strahlenexposition“ bedeutet im Sinne dieser Empfehlung, den wahren Wert der Ergebnisgröße auf der Grundlage verfügbarer Informationen so gut wie möglich zu schätzen und die Unsicherheit der Schätzung zu quantifizieren. Das beinhaltet zwei Aspekte. Zum einen sind Überschätzungen (Konservativitäten) und Unterschätzungen zu vermeiden. Zum anderen sollen die Unsicherheiten bei Berücksichtigung aller Quellen der Unsicherheit so gering wie möglich sein. Ermittlungen der Strahlenexposition sind umso realistischer, je weniger der wahre Wert unter- oder überschätzt wird und je geringer die Unsicherheit des ermittelten Dosiswertes ist.

Es sei hier auf eine sprachliche Schwierigkeit bzgl. des Begriffs Realismus aufmerksam gemacht. Realismus hat im allgemeinen Sprachgebrauch auch den Sinn einer Qualität. Wenig realistisch ist schlecht und ungenau, realistisch ist gut und genau. Im Sinn dieser Empfehlung wird Realismus verstanden als beste Schätzung auf der Grundlage der verfügbaren Information. Im Gegensatz dazu wird Konservativität als gezielte Überschätzung verstanden.

3.5.1 Methodik der Empfehlung

Wenn die Strahlenexposition als Ergebnisgröße angesehen wird, deren wahrer Wert auf der Grundlage der verfügbaren Information zu schätzen ist, ist es unerheblich, ob es sich um erwartete oder bereits erfolgte Strahlenexpositionen oder um verbleibende oder vermiedene Dosis handelt. Auch die Frage, ob man an effektiven Dosen oder Organdosen interessiert ist, berührt nicht die Methoden realistischer Dosisermittlung. Es wird daher im Folgenden ohne Präzisierung lediglich von Dosis gesprochen. In jedem Fall ist es aber erforderlich, die jeweilige Ergebnisgröße eindeutig zu definieren (vgl. hierzu Kapitel 2).

Interessierende Ergebnisgrößen können sein:

- Die Dosis einer Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen (Ubiquität),
- die Dosis einer Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (repräsentative Referenzperson oder most exposed individual),
- die Dosis der höchstexponierten Person (repräsentative Person oder most exposed individual),
- die Dosis einer Referenzperson an einem gegebenen Ort,
- die Dosis einer real existierenden Person an einem gegebenen Ort,
- die Dosis einer kritischen Gruppe real existierender Personen oder von Referenzpersonen (letztere: einer repräsentativen Referenzperson),
- die Dosis von Betroffenen in einer Expositionssituation,
- die Dosisverteilung einer gesamten Population.

Für die Darstellung der Methodik kann man verallgemeinernd formulieren: Zu bestimmen ist die Dosis einer beliebigen Person an einem beliebigen Ort zu einer beliebigen Zeit über alle relevanten Expositionspfade.

Für jede Ergebnisgröße, so auch für die Dosis, ist die Aufstellung des Modells der Auswertung, das die Eingangsgrößen mit der Ergebnisgröße verbindet, grundlegend. In den verschiedenen Varianten der Dosisermittlung mit Hilfe radioökologischer Methoden, wie sie im Folgenden in Abhängigkeit von der verfügbaren Information dargestellt werden, können sich zwar die Modellgleichungen unterscheiden, sie beschreiben aber die gleiche Radioökologie. Darum empfiehlt die SSK, nur ein einziges radioökologisches Modell, das der "best practice" entspricht, anzuwenden. In jedem Fall ist es aber erforderlich, die jeweilige Ergebnisgröße, das Modell der Auswertung und die Modellannahmen vollständig zu dokumentieren.

Außerdem ist zu spezifizieren, welche Werte der Ergebnisgröße zu bestimmen sind: die Wahrscheinlichkeitsdichte der wahren Werte der Ergebnisgröße, einen Überdeckungsbereich oder hohes Quantil zu vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten oder der beste Schätzwert mit der zugehörigen Unsicherheit. Abdeckende Punktschätzer werden als Zielgröße in dieser Empfehlung der SSK lediglich im Fall von Genehmigungsverfahren bei Berechnungen nach der AVV zu § 47 StrlSchV als akzeptabel betrachtet.

Zwei wesentliche Faktoren bestimmen den möglichen Grad des Realismus der Ermittlung der Strahlenexposition, nämlich die durch die verfügbare Information über die Quelle festgelegte Modellierung und die Expositionssituation, in die die Szenarien und Expositionspfade, radioökologischen Modellparameter und menschlichen Parameter einfließen, die in die Modellierung eingehen. In Tabelle 3.3 sind die möglichen Kategorien I0 – I4 der Modellierung zusammengefasst.

Tab. 3.3: *Kategorisierung der Ermittlung der Strahlenexposition auf der Grundlage der verfügbaren Information (Informationskategorisierung).*

Kategorie	verfügbare Information
I0	aus abdeckendem hypothetischem Quellterm
I1	aus hypothetischem Quellterm (bester Schätzwert aus Vorhersagen)
I2	aus tatsächlichem Quellterm (bester Schätzwert nach gemessenen Daten)
I3	aus gemessener ODL und Aktivitätskonzentrationen in Lebensmitteln, modelliert aus gemessenen Daten für Luft, Boden, Wasser
I4	aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Wasser, Lebensmitteln, ODL; auch Dosimeter, Ganzkörper(GK)-Messung, Bioassay etc.

Die Möglichkeit realistischer Ermittlung der Strahlenexposition steigt von I0 zu I4. Je mehr Information verfügbar ist, umso realistischer kann die Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung ermittelt werden. Je länger die zu modellierende Modellkette ist, umso größer werden die Unsicherheiten der Dosisermittlung.

Für die Modellierung der Expositionssituationen können 4 Stufen des Realismus mit den Situationskategorien S0 – S4 unterschieden werden, je nachdem, ob für die Szenarien und Expositionspfade, radioökologischen Modellparameter und menschlichen Parameter abdeckende (auch unmögliche) Annahmen, generische Daten, fallbezogene Daten oder individuelle Daten einer Kohorte oder einer real existierenden kritischen Gruppe verwendet werden. Unter Daten werden hier beste Schätzwerte mit ihren Unsicherheiten oder Wahrscheinlichkeitsdichten oder –funktionen verstanden. Quantile von Wahrscheinlichkeitsdichten sind als Eingabewerte nicht geeignet, da die Rechnungen mit Quantilen keine Quantile zum Ergebnis haben.

In die Expositionsermittlung gehen die aus den FEPs resultierenden Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter als Eingangsgrößen ein, deren Realitätsnähe ebenfalls von der verfügbaren Information abhängt. Tabelle 3.4 zeigt ein System mit 4 Stufen für FEPs, Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter. Die Werte der Eingangsgrößen reichen von abdeckenden und unmöglichen (S0) über mögliche und generische (S1) und fallspezifische und real existierende (S2) zu fallspezifischen und individuellen Daten (S3). Der Realismus der Dosisermittlung nimmt von S0 nach S3 zu. Der Übergang von S0 nach S1 bewirkt den Abbau von Überschätzungen (Konservativitäten), der Übergang von S1 nach S3 dient dem Abbau von Unsicherheiten.

Tab. 3.4: *Kategorisierung der Expositionssituationen (Situationskategorien).*

	Situationskategorien			
	S0	S1	S2	S3
FEPs, Szenarien und Expositionspfade	abdeckende (auch unmögliche); z. B. Gleichgewichtsbedingung (50 a), Ubiquität, unplausible Verzehrsmengen	nur realistisch und rechtlich mögliche, generisch, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, individuelle Daten einer Kohorte, Ungleichgewichte
Radioökologische Modellparameter*	generische 95. Perzentile	generische Daten	fallspezifische Daten	fallspezifische Daten
Ernährungsgewohnheiten	generische Daten, abdeckend oder 95. Perzentile	generische Daten	fallspezifische Daten	individuelle Daten
Aufenthaltszeiten	Daueraufenthalt	generische Daten	fallspezifische Daten	individuelle Daten
Anteil lokal angebotener Nahrungsmittel	100 %	generische Daten	fallspezifische Daten	individuelle Daten

* z. B. K_d -Werte, Transferfaktoren, Löslichkeiten etc.

In den Abbildungen 3.5 bis 3.9 sind die in dieser Empfehlung als sinnvoll erachteten Kombinationen von Informationskategorien und Situationskategorien veranschaulicht, um die Unterschiede in der verfügbaren Information zu verdeutlichen.

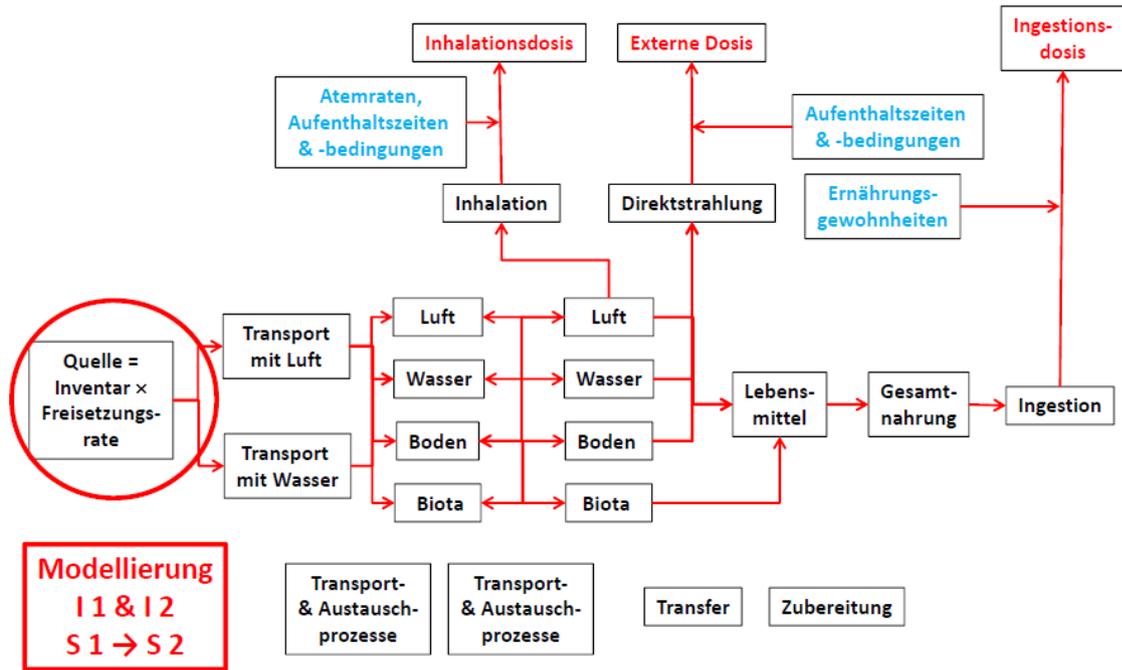


Abb. 3.5: Modellierung der Strahlenexposition aus einem Quellterm mit fallspezifischen Daten über Aufenthaltsbedingungen und Verzehrsmengen (I1 & I2; S1 → S2).

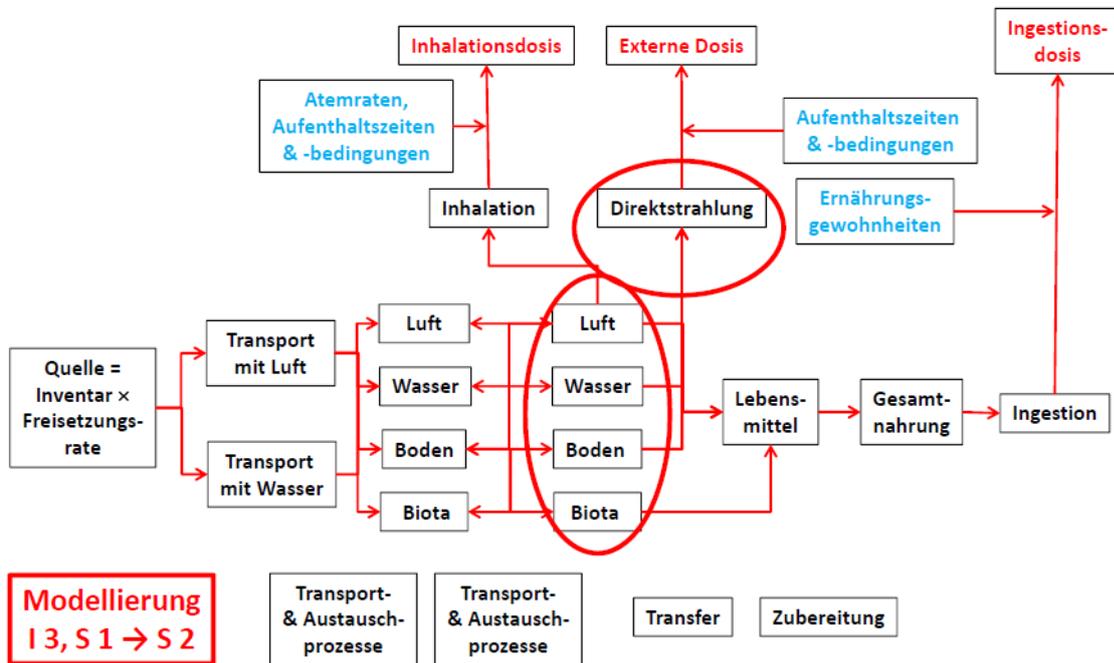


Abb. 3.6: Modellierung der Strahlenexposition aus Aktivitätskonzentrationen in Lebensmitteln und ODL modelliert, aus Daten für Luft, Boden, Wasser (I3; S1 → S2).

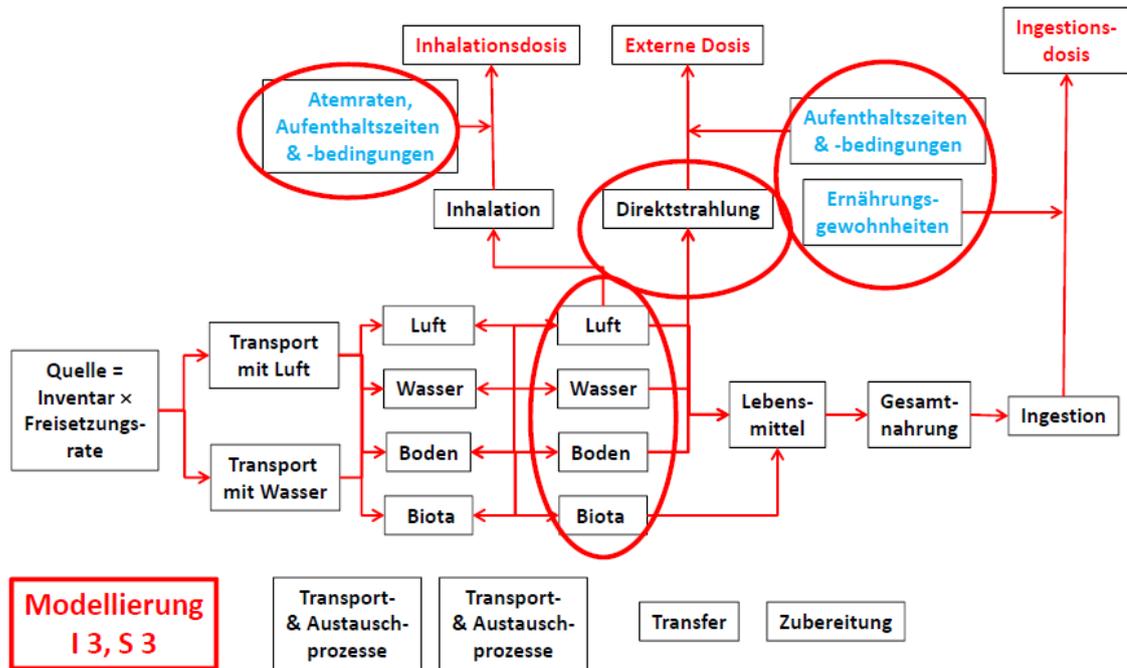


Abb. 3.7: Modellierung der Strahlenexposition aus Aktivitätskonzentrationen in Lebensmitteln und ODL, modelliert aus Daten für Luft, Boden, Wasser (I3; S3).

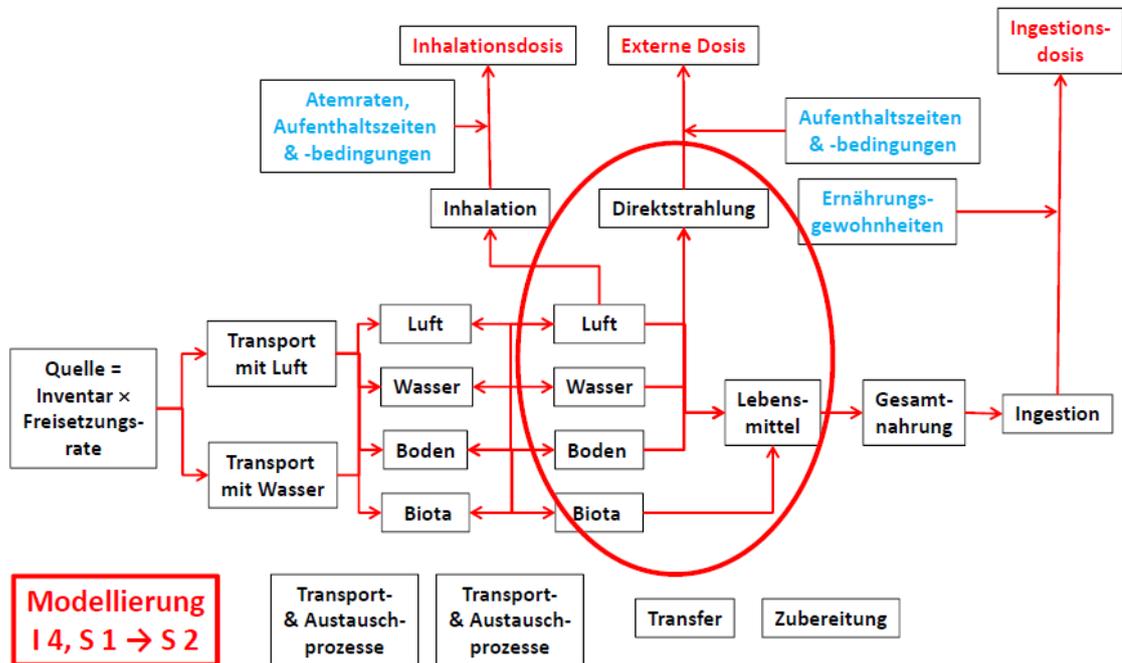


Abb. 3.8: Modellierung der Strahlenexposition aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL (auch Dosimeter, GK-Messung und Bioassay) mit generischen Daten über Aufenthaltsbedingungen und Verzehrsmengen (I4; S1 → S2).

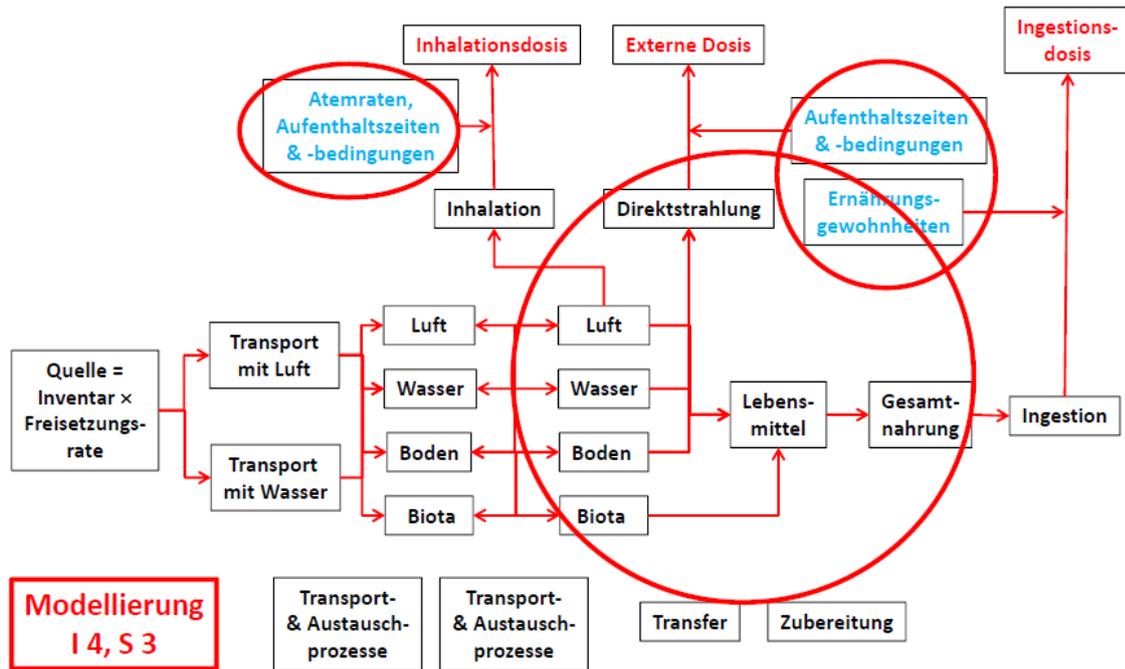


Abb. 3.9: Modellierung der Strahlenexposition aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL (auch Dosimeter, GK-Messung und Bioassay) mit individuellen Daten über Aufenthaltsbedingungen und Verzehrsmengen (I4; S3).

Die verschiedenen Kombinationen von Informationskategorien und Stufen der Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter, FEPs und menschliche Parameter werden im Allgemeinen nicht zu denselben Ergebnissen führen und unterschiedliche Unsicherheiten haben. Die Erfahrung zeigt jedoch, je mehr Information verfügbar ist und je kürzer die Modellkette ist, umso realistischer im Sinne von verlässlicher werden die Ergebnisse.

Die verfügbare Information legt die Informationskategorie fest. FEPs, Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter und menschliche Parameter sollen so realitätsnah wie möglich gewählt werden. Durch die Kombination einer Informationskategorie mit einer Situationskategorie wird die Realitätsnähe der Modellierung festgelegt. Der Realismus der Dosisermittlung steigt mit der Informationskategorie ($I1 < I2 < I3 < I4$) und der Situationskategorie ($S0 < S1 < S2 < S3$). Tabelle 3.5 stellt den Grad des Realismus in einem Farbcodem mit rot = unrealistisch zu grün = realistisch dar.

Die Forderung der EURATOM-Grundnormen, Strahlenexpositionen so realistisch wie möglich zu ermitteln, bedeutet im Schema der Tabelle 3.5, soweit mit vertretbarem Aufwand möglich, nach rechts unten zu kommen.

Tab. 3.5: Kategorisierung der möglichen Ermittlungen von Strahlenexpositionen.

Situationskategorie Informationskategorie	S0 abdeckende (auch unmögliche); z. B. Gleichgewichts- bedingung (50 a), Ubiquität, unplausible Verzehrmengen	S1 nur realistisch und rechtlich mögliche, generisch, Ungleichgewichte	S2 fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte	S3 fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, individuelle Daten einer Kohorte, Ungleichgewichte
I0 aus abdeckendem hypothetischem Quellterm				
I1 aus hypothetischer Quelle				
I2 aus tatsächlicher Quelle				
I3 Daten für Luft, ODL, Boden, Wasser				
I4 Daten für Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL; auch Dosimeter, GK-Messung, Bioassay etc.				

Wie viel Information bei der jeweiligen Fragestellung verfügbar ist, ist nur zum Teil in der Entscheidung des Anwenders. Sie hängt vielfach schlicht davon ab, welche Möglichkeit der Anwender hat, an wünschenswerte Information zu gelangen. Auch der mögliche Aufwand und die einsetzbaren Ressourcen beeinflussen, was an Information verfügbar ist.

Anhand der Einteilung von Expositionssituationen nach ICRP 103 als geplante, bestehende oder Notfall-Expositionssituationen und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass retrospektive und prospektive Ermittlungen der Strahlenexposition stets unterschiedliche verfügbare Informationen haben werden, empfiehlt die SSK, die radioökologische Dosisermittlung nach dem in Tabelle 3.6 und 3.7 festgelegten Schema durchzuführen.

Tab. 3.6: Empfehlung der SSK für die Zuordnung der **Anwendungsbereiche** zu den Kategorien der Ermittlungen der Strahlenexposition.

Situations- kategorie Informations- kategorie	S0	S1	S2	S3
	abdeckende (auch unmögliche); z. B. Gleichgewichtsbedingung (50 a), Ubiquität, unplausible Verzehrsmengen	nur realistisch und rechtlich mögliche, generisch, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte	fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, individuelle Daten einer Kohorte, Ungleichgewichte
I0 aus abdeckendem hypothetischem Quellterm	prospektiv in geplanten Expositionssituationen in Genehmigungsverfahren nach § 47 StrlSchV mittels AVV			
I1 aus hypothetischer Quelle		prospektiv in Notfall-Expositionssituationen und sonstigen* geplanten Expositionssituationen	prospektiv in sonstigen* geplanten Expositionssituationen	
I2 aus tatsächlicher Quelle		retrospektiv und prospektiv in geplanten, bestehenden sowie Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv und prospektiv in geplanten, bestehenden sowie Notfall-Expositionssituationen	
I3 Daten für Luft, ODL, Boden, Wasser		retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen
I4 Daten für Luft, Boden, Lebensmittel, ODL, auch Dosimeter, GK-Messung, Bioassay etc.		retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv und prospektiv in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen	retrospektiv für Kohorten in bestehenden und Notfall-Expositionssituationen

* Expositionssituationen, die nicht einer Genehmigung nach § 47 StrlSchV bedürfen.

Die SSK hält die Annahme der Situationskategorie S0 nur im Falle der AVV zu § 47 StrlSchV und der SBG zu § 49 StrlSchV für sinnvoll. In allen anderen Expositionssituationen ist mindestens die Stufe S1 und – wenn möglich – S2 anzusetzen. S3 sollte der Untersuchung von Kohorten einschließlich real existierenden kritischen Gruppen vorbehalten bleiben. Ein gestuftes Verfahren zur Ermittlung der Strahlenexposition steht nach Auffassung der SSK nicht der Realismusforderung der EURATOM-Grundnormen entgegen, solange die jeweils benutzten Verfahren verzerrungsfrei sind. Eine solche Stufung kann in unterschiedlichem Umfang verfügbarer Information bestehen und damit unterschiedlichen Aufwand der Informationsbeschaffung zur Folge haben. Dabei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass das Ziel „so realistisch wie möglich“ bedeutet, im Schema der Tabelle 3.5, soweit mit vertretbarem Aufwand erreichbar, nach rechts unten zu gelangen.

Tab. 3.7: Empfehlung der SSK zur realistischen Ermittlung der Strahlenexposition.

	prospektiv		retrospektiv	
geplante Expositionssituationen: Genehmigungsverfahren mit AVV zu § 47 StrlSchV und Überwachung	I0	S0	I2	S1 → S2
sonstige geplante Expositionssituationen: z. B. Endlagerung und Altlasten	I1	S1 → S2	I2 → I4	S1 → S2
Notfall-Expositionssituationen	I1 → I4	S1 → S2	I3 → I4	S1 → S3
bestehende Expositionssituationen	I3 → I4	S1 → S2	I3 → I4	S1 → S3

Ein besonderes Problem stellen langfristige Prognosen bei der Betrachtung von Endlagern und Altlasten dar. Hier kann die potenzielle Strahlenexposition nicht realistisch ermittelt werden, da die Bedingungen, die in ferner Zukunft bestehen werden, nicht zuverlässig vorhergesagt werden können. Bei Langzeitbewertungen für Endlager und auch für Altlasten sind die ermittelten potenziellen Strahlenexpositionen lediglich Indikatorwerte im Rahmen der Betrachtungen für einen Langzeitsicherheitsnachweis. Die Variabilität der potenziellen Strahlenexpositionen in der fernen Zukunft kann nur durch Variation möglicher FEPs und Expositionsszenarien abgebildet werden. Zum Vergleich der sich in unterschiedlichen FEPs und Expositionsszenarien ergebenden potenziellen Strahlenexpositionen und damit zur Optimierung geplanter Maßnahmen ist jedoch für die gegebenen FEPs und Szenarien die Ermittlung so realistisch wie möglich durchzuführen.

Den verschiedenen Anwendungsbereichen können keine eindeutige Positionen in der Matrix der Informationskategorien und Stufen der Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter, FEPs und menschliche Parameter zugeordnet werden. In diesem Sinne bietet sich gegebenenfalls gestuftes Vorgehen an, indem bei nicht relevanten Expositionssituationen einfachere und weniger aufwendige Modellierung mit geringerer Information über Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter, FEPs und menschliche Parameter herangezogen werden, während bei relevanteren Expositionen auch höherer Aufwand nicht gescheut werden darf.

Wie bereits oben gesagt, sollte nur ein einziges radioökologisches Modell mit sogenannter „best practice“ für gleiche Anwendungsbereiche benutzt werden. Dann können alle Kombinationen von Informationskategorien und Stufen der Szenarien und Expositionspfade, radioökologische Modellparameter, FEPs und menschliche Parameter mit Ausnahme von (I0, S0) als realistisch bezeichnet werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, die verfügbare Information wird nach dem Regelwerk GUM oder GUM Supplement 1 genutzt, einen besten Schätzwert der Dosis und der ihm zugeordneten Unsicherheit zu erhalten.

Die SSK hält die Angabe von Unsicherheiten bei der Ermittlung von Strahlenexpositionen für unerlässlich. Ein Verzicht auf Unsicherheiten ist nach Ansicht der SSK nur im Falle der AVV zu § 47 StrlSchV und der SBG zu § 49 StrlSchV tolerierbar, da hier lediglich extrem konservative Abschätzungen vorgenommen werden, bei denen, da sie teilweise auf hohe Quantile der Eingangsgrößen als Eingabewerte zurückgreifen, eine Unsicherheitsangabe kaum möglich ist. Um es zu wiederholen: Rechnen mit Quantilen erzeugt keine Quantile.

In allen anderen Anwendungsbereichen können Unsicherheiten nach internationalen Normen bestimmt werden. Hier werden im Folgenden die Abkürzungen GUM bzw. GUM Supplement 1

für die Normen nach (JCGM 2008a) bzw. nach (JCGM 2008b) benutzt. Da es sich bei der Strahlenexposition um ein multifaktorielles Geschehen handelt, ist nach dem multiplikativen Grenzwertsatz der Statistik zu erwarten, dass Radionuklidkonzentrationen in Umweltmedien und Strahlenexpositionen im Allgemeinen logarithmisch normalverteilt sein werden. Der Goldstandard der Unsicherheitsanalyse ist die vollständige Angabe einer Verteilungsdichte oder -funktion zu einer gegebenen Expositionssituation. Standardunsicherheiten nach dem GUM sind nur in einfachen Messsituationen zielführend. Probabilistische Verfahren nach dem GUM Supplement 1 erlauben generell die Bestimmung der PDF der Dosis. Die empfohlenen Anforderungen an die Darstellung der Unsicherheiten sind mit $u(D)$, Unsicherheiten nach GUM bzw. PDF nach GUM Supplement 1, Angabe der Wahrscheinlichkeitsdichte oder Wahrscheinlichkeitsfunktion, dargestellt.

Besonderes Augenmerk ist auf Situationen zu legen, in denen die Unsicherheit einzelner Eingangsgrößen die Unsicherheit der Ergebnisgröße dominiert oder in denen relevante Information über einzelne Eingangsgrößen nicht verfügbar ist. Hier kann die Unsicherheitsanalyse dazu beitragen, festzustellen, wo Anstrengungen unternommen werden müssen, die relevanten Informationen zu beschaffen. Dies ist besonders kritisch bei Fragen der Endlagerung, wo Unsicherheiten von Zeitprojektionen in die Zukunft auf Unkenntnis über geologische Formationen und Parameter treffen. Hier können Verfahren der Possibilistik und der dreidimensionalen Monte-Carlo-Analyse hilfreich sein.

Es sei darauf hingewiesen, dass es Konventionsparameter als Eingangsgrößen gibt, für die keine Unsicherheiten berücksichtigt werden. Hierbei handelt es sich z. B. um Dosiskoeffizienten, sonstige im Regelwerk festgelegte Größen und eventuell andere Größen, wie Ausbreitungsfaktoren und konservative Kalibrierfaktoren.

Es sei ebenfalls auf die Bedeutung der Konsistenz der Modellierung in den verschiedenen Informationskategorien hingewiesen. Hier bietet sich als Evaluierungsverfahren der bereits oben genannte Leitsatz an: Ein Modell, das die Natur oder die vergangenen Erfahrungen nicht beschreibt, ist für die realistische Ermittlung der Strahlenexposition ungeeignet.

Abschließend ist festzustellen, dass jeweils eine Dokumentation erforderlich ist, die klare Angaben zu den Ergebnisgrößen, Modellen, Szenarien und Expositionspfaden und Parametern enthält. Nur so kann Vergleichbarkeit erreicht werden. Anhand der nachstehenden Vorlage (Tab. 3.8) kann eine eindeutige Beschreibung der jeweiligen Ermittlung der Strahlenexposition durchgeführt werden. Im nächsten Kapitel empfiehlt die SSK vollständige Vorlagen für die verschiedenen Anwendungsbereiche der Dosisermittlung.

Tab. 3.8: Vorlage für die Dosisermittlung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen.

Expositionssituation, Anwendungsbereich, Zweck	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	
Modellierung der Exposition (I0 – I4)	
Szenarien und Expositionspfade (S0 – S3)	
radioökologische Modellparameter (S0 – S3)	
Ernährungsgewohnheiten (S0 – S3)	
Aufenthaltszeiten (S0 – S3)	
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel (S0 – S3)	
Unsicherheiten: (GUM, GUM Suppl. 1)	

3.5.2 Exemplarische Anwendungsbereiche

Auf der Basis der vorgenannten Methodik können entsprechend dem Beratungsauftrag des BMU solche Situationen identifiziert und festgelegt werden, die eine realistische Berechnung der Strahlenexpositionen erfordern oder sinnvoll machen. Dies wird anhand der empfohlenen Vorlage im Folgenden durchgeführt.

Eine Festlegung, welche Modelle, Modellparameter oder -größen bei den identifizierten Situationen realistisch anzusetzen sind, würde den Umgang dieser Empfehlung sprengen und sollte bei der Entwicklung oder Weiterentwicklung von Berechnungsgrundlagen getroffen werden.

Die SSK empfiehlt nicht, eine grundsätzliche Änderung der im bisherigen Regelwerk verwendeten Modelle vorzunehmen, wenn auch eine Klarstellung der Modelle und Modellhierarchien bei Fragen der Langzeitsicherheit von Endlagern und Altlasten wünschenswert wäre. Auch die im Notfallschutz verwendeten Prognosemodelle und Annahmen bedürfen nach den Erfahrungen des Reaktorunfalls in Fukushima Dai-ichi einer kritischen Überarbeitung. Allgemeiner wird die Umstellung des Systems des Strahlenschutzes auf die Expositionssituationen nach ICRP 103 – vor allem im Hinblick auf die praktische Ausgestaltung der Optimierung – Anpassungen der bisher verwendeten Modelle notwendig machen.

Die verwendeten Modelle sollen dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Darum ist eine regelmäßige kritische Evaluierung erforderlich. Insbesondere die Validierung der Modelle an neuen Expositionssituationen und Erfahrungen ist unabdingbar.

Mit jedem Modell, das eine Expositionssituation nach dem Stand von Wissenschaft und Technik beschreibt, können sowohl konservative oder restriktive Abschätzungen als auch realistische Ermittlungen der Strahlenexposition vorgenommen werden. Daher werden nun die verschiedenen Anwendungsbereiche im Einzelnen im Hinblick auf die Anforderungen an den Realismus der Ermittlungen abgehandelt.

Die Berichterstattung der natürlichen Strahlenexposition an das Parlament, die EU und UNSCEAR stellt den allgemeinen Fall der retrospektiven Ermittlung der Strahlenexposition in einer bestehenden Expositionssituation dar. Die betrachtete Bevölkerungsgruppe ist hier die allgemeine Bevölkerung Deutschlands oder einzelner Bundesländer. Es liegt umfangreiches historisches und aktuelles Datenmaterial über die Umweltradioaktivität – aber auch über die

Körperaktivität – vor. Die bisherigen deterministischen Ermittlungen ohne Angaben der Unsicherheit können im internationalen Vergleich auf der Grundlage vielfältiger wissenschaftlicher Publikationen als validiert angesehen werden.

Tab. 3.9: *Vorschlag der SSK zur Berichterstattung der natürlichen Strahlenexposition und der Strahlenexpositionen aus dem globalen Fallout der oberirdischen Kernwaffenexplosionen und der durch den Unfall von Tschernobyl an das Parlament, die EU und UNSCEAR.*

Anwendungsbereiche I.1 – I.3:	bestehende Expositionssituation, retrospektiv
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis von Referenzpersonen der Bevölkerung zur Berichterstattung; UNSCEAR Konvention: bester Schätzwert mit PDF
Modellierung der Exposition	I3 → I4: aus ODL und Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Wasser, Lebensmitteln und Dosimetrie
Szenarien und Expositionspfade	S1: alle realistisch und rechtlich möglichen, generisch, Ungleichgewichte
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Unsicherheiten	bei der natürlichen Strahlenexposition und der Strahlenexpositionen als Folge des Unfalls von Tschernobyl nach GUM Supplement 1, bei globalem Fallout reichen Unsicherheiten nach GUM aus.

Bisher gehört die Bundesrepublik Deutschland nicht zur Gruppe der Länder, die eine Dosisverteilung der natürlichen Strahlenexposition an UNSCEAR berichtet haben. Im Bericht UNSCEAR (2000) waren dies 10 Länder. Die SSK empfiehlt, die Analyse der Unsicherheit für die Ermittlung der natürlichen Strahlenexposition – sowie der Strahlenexposition als Folge des Unfalls von Tschernobyl – mit probabilistischen Methoden auf der Basis des GUM Supplement 1 durchzuführen. Bzgl. der probabilistischen Methoden sei auf die umfangreiche Darstellung bei Barthel und Thierfeldt (2012) verwiesen. In Bezug auf die probabilistische Ermittlung der natürlichen Strahlenexposition sind erste Darstellungen bei Vahlbruch (2004) zu finden.

Die SSK empfiehlt, bei der Berichterstattung der natürlichen Strahlenexposition und der Strahlenexpositionen aus dem globalen Fallout der oberirdischen Kernwaffenexplosionen und des Unfalls von Tschernobyl an das Parlament, die EU und UNSCEAR nach Tabelle 3.9 zu verfahren.

Tabelle 3.10 gibt die derzeitige Praxis der Berichterstattung der Strahlenexposition durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen im Normalbetrieb wieder. Dieses Verfahren ist nach Einschätzung der SSK nicht akzeptabel (vgl. auch Kap. 3.2.5). Wenn auch die Dosen für die Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen unter *de minimis* liegen, so sind sie doch von hoher politischer Bedeutung. Hier ist Realismus zu fordern.

Tab. 3.10: *Derzeitige Berichterstattung über die Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen und Einrichtungen an das Parlament und die EU.*

Anwendungsbereich I.4-1: geplante Expositionssituation, retrospektiv: Art. 45 EU	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen (Ubiquität); abdeckender Punktschätzer
Modellierung der Exposition	I2: aus tatsächlichem Quellterm mit tatsächlichem Wetter
Szenarien und Expositionspfade	S0: abdeckende (auch unmögliche), Gleichgewicht
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte
Ernährungsgewohnheiten	S0: generische 95. Perzentile
Aufenthaltszeiten	S0: Daueraufenthalt
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	S0: 100 %
Unsicherheiten	Keine

Darüber hinaus können Dosen für die Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen nicht als repräsentativ für die Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen angesehen werden. Eine saubere Unterscheidung von Dosen für die am höchsten exponierten Personen der Bevölkerung und andere Bevölkerungsgruppen ist erforderlich.

Die SSK schlägt darum eine Änderung des bisherigen Verfahrens gemäß Tabelle 3.11 vor. Die SSK hält die Angabe von Unsicherheiten und Variabilität – bevorzugt in Form von Verteilungen – für dringend erforderlich.

Das BfS hat in Wahrnehmung der gegenwärtigen unbefriedigenden Lage ein Stufenkonzept für die Berichterstattung vorgeschlagen (BfS 2009a). Auch dieses ist nach Ansicht der SSK nicht hinreichend und nur in Ansätzen für die Umsetzung der Realismusforderung der EURATOM-Grundnormen geeignet.

Tab. 3.11: *Vorschlag der SSK für die Berichterstattung über die Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen und Einrichtungen an das Parlament und die EU.*

Anwendungsbereich I.4-1: geplante Expositionssituation, retrospektiv: Art. 45 EU	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis von Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (repräsentative Referenzperson oder MEI = most exposed individual). Bester Schätzwert mit Unsicherheit oder PDF. Mittlere Dosis von Referenzpersonen der allgemeinen Bevölkerung im 5 km-Umkreis mit Unsicherheiten. Mittlere Dosis von Referenzpersonen in Deutschland mit Unsicherheiten
Modellierung der Exposition	I2: aus tatsächlichem Quellterm mit tatsächlichem Wetter
Szenarien und Expositionspfade	S2: fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S2: standortspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S2: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Die Ermittlung der Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung nach Stör- und Unfällen ist von großer politischer, gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Bedeutung. Es ist erforderlich, sowohl die real existierenden Bevölkerungsgruppen mit der höchsten Exposition zu identifizieren und deren Strahlenexposition als auch die Expositionen größerer Bevölkerungsgruppen im Umkreis retrospektiv so realistisch wie möglich zu ermitteln. Dazu gehört die Berücksichtigung von so viel fallspezifischer Information wie möglich. Solange die Umstände nicht die Bildung einer Kohorte für eine Kohortenstudie erfordern (vgl. Anwendungsbereich I.5-1), reicht die Verwendung generischer menschlicher Eigenschaften aus.

Im Falle von Stör- und Unfällen ist in Bezug auf die Ermittlung der Strahlenexposition der Übergang zu den Anforderungen bei epidemiologischen Studien fließend. Die Anforderungen müssen im Ereignisfall mit Augenmaß festgelegt werden, wobei neben radiologischen und ökonomischen Argumenten auch die politischen und gesellschaftlichen Umstände des Einzelfalls berücksichtigt werden sollten.

Tab. 3.12: *Vorschlag der SSK zur Ermittlung der Strahlenexpositionen der allgemeinen Bevölkerung aus Tätigkeiten nach Störfällen und Unfällen.*

Anwendungsbereich I.4-2: bestehende Expositionssituation, retrospektiv: Strahlenexpositionen aus Tätigkeiten nach Störfällen und Unfällen	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis von repräsentativen Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (most exposed individuals). Bester Schätzwert mit Unsicherheit oder PDF Mittlere Dosis von Referenzpersonen der betroffenen Bevölkerung mit Dosisverteilung
Modellierung der Exposition	I2 → I4: nach verfügbarer Information von tatsächlichem Quellterm mit tatsächlichem Wetter bis zu Daten der Umweltradioaktivität und Dosimetrie
Szenarien und Expositionspfade	S2: fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1 → S2: generische Mittelwerte und Unsicherheiten oder erhobene Daten der Betroffenen
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S2: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

Für die epidemiologische Forschung ergeben sich die Anforderungen an die realistische Ermittlung der Strahlenexposition aus den Eigenschaften der unterschiedlichen epidemiologischen Studien: Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien. Grundsatz wird dabei stets sein, alle verfügbare Information zur Modellierung der Exposition sowohl bei der Ermittlung als auch bei der Validierung zu nutzen (Kategorie I4).

Da in Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien die Teilnehmer der Studien bekannt sind, kann bei den menschlichen Parametern auf individuelle Daten zurückgegriffen werden (Tab. 3.13). Beispiele hierfür sind die Kohorte der Life Span Study und die gegenwärtig rekrutierte Fukushima-Kohorte.

Da in ökologischen Studien die beteiligten Individuen unbekannt sind, kann hier nur auf generische oder bestenfalls fallspezifische Daten zurückgegriffen werden (Tab. 3.14). Hier sind die gleichen Anforderungen an die Ermittlung der Strahlenexposition zu stellen, wie man sie nach dem Reaktorunfall in Fukushima Dai-ichi zur Ermittlung der Strahlenexposition in Tokyo und der Präfektur Ibaraki sowie nach dem Unfall in Tschernobyl für Bevölkerungen in weiter entfernten Ländern wie Deutschland benötigt.

Tab. 3.13: **Anwendungsbereich I.5-1: Vorschlag der SSK zur epidemiologischen Forschung; Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien.**

Anwendungsbereich I.5-1: Notfall- und bestehende Expositionssituation, retrospektiv: Epidemiologie	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit oder PDF
Modellierung der Exposition	I4: aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL (auch Dosimeter, GK-Messung und Bioassay)
Szenarien und Expositionspfade	S3: alle realistisch und rechtlich möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidausbreitung relevanten Prozesse,
radioökologische Modellparameter	S3: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S3: individuelle Daten und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S3: individuelle Daten und Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S3: individuelle Daten und Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

Tab. 3.14: **Vorschlag der SSK zur epidemiologischen Forschung: ökologische Studien für bestehende Expositionssituation, retrospektiv oder prospektiv: Berichterstattung**

Anwendungsbereich I.5-2: bestehende Expositionssituation, retrospektiv oder prospektiv: Berichterstattung	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit oder PDF
Modellierung der Exposition	I4: aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL (auch Dosimeter, GK-Messung und Bioassay)
Szenarien und Expositionspfade	S1 → S2: alle realistisch und rechtlich möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidausbreitung relevanten Prozesse, fallspezifisch, wenn verfügbar
radioökologische Modellparameter	S1 → S2: generische Mittelwerte und Unsicherheiten, fallspezifisch, wenn verfügbar
Ernährungsgewohnheiten	S1 → S2: generische Mittelwerte und Unsicherheiten, fallspezifisch, wenn verfügbar
Aufenthaltszeiten	S1 → S2: generische Mittelwerte und Unsicherheiten, fallspezifisch, wenn verfügbar
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1 → S2: generische Mittelwerte und Unsicherheiten, fallspezifisch, wenn verfügbar
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

In stärker betroffenen Regionen, wie z. B. in der japanischen Präfektur Fukushima, benötigt man sowohl für die Berichterstattung, aber vor allem für die Optimierung des Strahlenschutzes durch Sanierungsmaßnahmen, Ermittlungen der Strahlenexposition, die über die generellen Anforderungen ökologischer Studien hinausgehen. Dazu sind die Anforderungen in Tabelle 3.15 formuliert.

Tab. 3.15: *Vorschlag der SSK zur epidemiologischen Forschung: ökologische Studien für bestehende oder Notfall-Expositionssituation, prospektiv.*

Anwendungsbereich I.5-2: bestehende oder Notfall-Expositionssituation, prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer Referenzperson an einem Ort zum Zweck der Optimierung: Dosisverteilung erforderlich, bester Schätzwert mit Unsicherheit oder PDF
Modellierung der Exposition	I4: aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL (auch Dosimeter, GK-Messung und Bioassay)
Szenarien und Expositionspfade	S2: alle realistisch und rechtlich möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse,
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S3: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S3: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

Bei geplanten Expositionssituationen stellt die prospektive Ermittlung der Strahlenexposition bei der Genehmigung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen einen Sonderfall dar. Hier können aus dem Vorsorgeprinzip heraus Anforderungen an den Strahlenschutz gestellt werden, die bei anderen Anwendungsbereichen¹² unmöglich wären. Dies ist die Vorgehensweise in Deutschland nach der AVV zu § 47 StrlSchV (Tab. 3.16) und der SBG zu § 49 StrlSchV (Tab. 3.17).

¹² Überhöhte Anforderungen können zum Beispiel nicht gestellt werden, wenn wie im Falle von NORM-Industrien und Altlasten des Uranbergbaus prospektiv Strahlenexpositionen zu ermitteln sind und solche Anforderungen jegliche Handlungsfähigkeit zunichtemachen würden.

Tab. 3.16: *Errichtung und Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen – Genehmigung – Normalbetrieb; AVV zu § 47 StrlSchV.*

Anwendungsbereich II.1-1: geplante Expositionssituation, prospektiv: AVV zu § 47 StrlSchV	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen; abdeckender Punktschätzer
Modellierung der Exposition	I0: aus Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S0: abdeckende (auch unmögliche), Gleichgewicht
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte
Ernährungsgewohnheiten	S0: generische 95. Perzentile
Aufenthaltszeiten	S0: Daueraufenthalt
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S0: 100 %
Unsicherheiten	keine

Tab. 3.17: *Errichtung und Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen – Genehmigung – Störfall, SBG zu § 49 StrlSchV.*

Anwendungsbereich II.1-2: geplante Expositionssituation, prospektiv: SBG zu § 49 StrlSchV	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen; abdeckender Punktschätzer
Modellierung der Exposition	I0: aus Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S0: abdeckende (auch unmögliche),
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte
Ernährungsgewohnheiten	S0: generische 95. Perzentile
Aufenthaltszeiten	S0: Daueraufenthalt
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S0: 100 %
Unsicherheiten	keine

Der Anwendungsbereich II.1-3 „Überwachung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen im Normalbetrieb“ sollte wie der Anwendungsbereich I.4-1 und I.4-2 behandelt werden.

In Notfall-Expositionssituationen sind prospektive und retrospektive Ermittlungen der Strahlenexposition klar zu trennen. Prospektive Ermittlungen unterscheiden sich extrem von retrospektiven wegen der unterschiedlichen verfügbaren Information, und es entsteht bei prospektiven Ermittlungen und den darauf beruhenden Entscheidungen für oder gegen die Durchführung von Maßnahmen des Katastrophenschutzes ein Konflikt zwischen dem Vorsorgeprinzip und dem Verhältnismäßigkeitsprinzip.

Dieser Konflikt kann nur mit Augenmaß auf der Grundlage möglichst realistischer Ermittlungen der Strahlenexposition für eine mögliche Bandbreite von FEPs gelöst werden. In den folgenden Tabellen 3.18 bis 3.22 werden Vorschläge für Notfall-Expositionssituationen dargestellt.

In der akuten Phase eines sich entwickelnden Notfalls (Tab. 3.18) existiert nur ein Minimum an Information. Entscheidungen müssen schnell getroffen werden, um deterministische Effekte und unangemessen hohe stochastische Risiken (vor allem in Bezug auf die Schilddrüsendosen) in der Bevölkerung zu vermeiden. Die Einschätzungen von Unsicherheiten werden unter dem zeitlichen Druck der Entwicklung Expertenschätzungen überlassen bleiben müssen.

Tab. 3.18: *Vorschlag der SSK zum Notfallschutz: Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – prospektiv aufgrund von Prognosen.*

Anwendungsbereich II.2-1: Notfall-Expositionssituation, prospektiv: kurzfristige Festlegung von Schutzmaßnahmen	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort, bester Schätzwert
Modellierung der Exposition	I1 → I2: aus Quellterm, prognostiziert oder gemessen
Szenarien und Expositionspfade	S1 → S2: generische oder – wenn verfügbar – fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte
Ernährungsgewohnheiten	S1: Generische Mittelwerte soweit relevant
Aufenthaltszeiten	S1: Generische Mittelwerte soweit relevant
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	S1: Generische Mittelwerte soweit relevant
Unsicherheiten	keine

Wenn gemessene Daten der Umweltradioaktivität und der Ortsdosisleistungen vorliegen, werden prospektive Ermittlungen der Strahlenexposition nach Tabelle 3.18 abgelöst werden können durch Ermittlungen nach Tabelle 3.19 mit größerer Realitätsnähe.

Ein besonderes Problem entsteht in Notfall-Expositionssituationen dadurch, dass die zeitliche und räumliche Entwicklung der Verfrachtung radioaktiver Stoffe in der Umwelt zu fließenden Übergängen aus der akuten Phase eines Unfalls in die Nachunfallphase und zum Nebeneinander von Notfall- und bestehenden Expositionssituationen führt. Auch hier ist Augenmaß erforderlich, um verhältnismäßig zu reagieren und die unterschiedlichen getroffenen Maßnahmen der Bevölkerung zu kommunizieren. In den Tabellen 3.19 bis 3.21 sind die unterschiedlichen Vorgehensweisen dargestellt.

Tab. 3.19: *Vorschlag der SSK zum Notfallschutz: Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – retrospektiv aufgrund von Aktivitäts- und ODL-Messwerten.*

Anwendungsbereich II.2-2: Notfall-Expositionssituation, retrospektiv: kurzfristige Festlegung von Schutzmaßnahmen	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert
Modellierung der Exposition	I3 → I4: je nach Verfügbarkeit während der Entwicklung des Notfalls aus gemessener ODL und Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Wasser, Lebensmitteln, Dosimetrie
Szenarien und Expositionspfade	S1 → S2: generische oder – wenn verfügbar – fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte
Aufenthaltszeiten	S1: generische Mittelwerte
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1: generische Mittelwerte
Unsicherheiten	keine

Tab. 3.20: *Vorschlag der SSK zum Notfallschutz – Sanierung.*

Anwendungsbereich II.2-3: bestehende Expositionssituation, prospektiv: Sanierung	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit Dosis von Referenzpersonen der betroffenen Bevölkerung: bester Schätzwert und Dosisverteilung
Modellierung der Exposition	I3 → I4: je nach Verfügbarkeit während der Entwicklung des Notfalls aus gemessener ODL und Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Wasser, Lebensmitteln, Dosimetrie
Szenarien und Expositionspfade	S1 → S2: fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S1 → S2: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten, fallspezifische Daten, wenn verfügbar
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

Tab. 3.21: *Vorschlag der SSK zum Notfallschutz – Festlegung von Schutzmaßnahmen – langfristig (Aufhebung von Nutzungseinschränkungen, Wiederbesiedlung).*

Anwendungsbereich II.2-4: Notfall- und bestehende Expositionssituation, prospektiv: langfristige Festlegung von Schutzmaßnahmen	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit Dosis von Referenzpersonen der betroffenen Bevölkerung: bester Schätzwert und Dosisverteilung
Modellierung der Exposition	I3 → I4: je nach Verfügbarkeit während der Entwicklung des Notfalls aus gemessener ODL und Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Wasser, Lebensmitteln, Dosimetrie
Szenarien und Expositionspfade	S1 → S2: fallspezifisch existierende und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S1 → S2: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten, fallspezifische Daten, wenn verfügbar
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

Tab. 3.22: *Vorschlag der SSK zum Notfallschutz – Rettungsmaßnahmen – Personal.*

Anwendungsbereich II.2-5: Notfall-Expositionssituation, prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I1 → I3: aus hypothetischem oder gemessenem Quellterm und – nach Verfügbarkeit – Daten für ODL und Aktivitätskonzentrationen für Luft, Wasser und Boden
Szenarien und Expositionspfade	S2: fallspezifisch existierende (und rechtlich mögliche), Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	entfällt
Aufenthaltszeiten	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	trifft nicht zu
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Besonders kritisch sind in Notfall-Expositionssituationen prospektive Ermittlungen der Strahlenexposition für das Personal für Rettungsmaßnahmen und die Sicherung kritischer Infrastruktur (Tab. 3.22). Da die Dosisgrenzwerte für das Personal sich von den Schwellen für

deterministische Schäden nur durch geringe Faktoren unterscheiden, ist hier eine Analyse der Unsicherheiten unerlässlich.

Bei der Freigabe radioaktiver Stoffe ist die Ableitung von allgemeinen Freigabewerten (Tab. 3.23) von der Freigabe im Einzelfall (Tab. 3.24) zu unterscheiden. Naturgemäß kann man bei der Ableitung von Freigabewerten anhand eines 10 μSv -pro-Jahr-Kriteriums nur von generischen Daten und hypothetischen Quelltermen ausgehen (IAEA 1988, EC 1993, Deckert et al. 2000, Thierfeldt und Kugeler 2000, SSK 1998). Die vergangene Entwicklung zur Freigabe radioaktiver Stoffe in Deutschland und anderen Ländern belegt dies (SSK 2005c). Die generischen FEPs müssen regelmäßig auf ihre Sinnhaftigkeit überprüft werden, da außerhalb des Strahlenschutzes liegende Faktoren die Randbedingungen verändern können. Dies war zum Beispiel der Fall, als eine neue Deponieverordnung die Regelungen der Freigabe zur Beseitigung in Frage stellte; siehe hierzu (SSK 2007). Angesichts der Unsicherheiten der in die Ermittlung der potenziellen Strahlenexposition eingehenden Parameter hat sich eine Analyse der Unsicherheiten – analog zum damals noch nicht publizierten Supplement 1 zum GUM – als hilfreich erwiesen (Thierfeldt et al. 2003).

Tab. 3.23: *Vorschlag der SSK zur Freigabe; Ableitung von Freigabewerten.*

Anwendungsbereich II.3-1: geplante Expositionssituation, prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I0: aus hypothetischem Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S1: generische realistisch und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: generische Werte mit Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1: generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

Ermittlungen der potenziellen Strahlenexposition zum Zwecke der Freigabe im Einzelfall (Tab. 3.24) entsprechen besonders, wenn es sich um die Freigabe von Gebäuden und Bodenflächen handelt, dem Charakter klassischer radioökologischer Dosisermittlungen. In diesem Fall ist es unumgänglich, – ausgehend von einem hypothetischen Quellterm als bestem Schätzwert – fallspezifische Daten soweit wie möglich heranzuziehen. Eine Analyse der Unsicherheiten ist auch hier unerlässlich.

Tab. 3.24: Vorschlag der SSK zur Freigabe oder Entlassung im Einzelfall.

Anwendungsbereiche II.3-2 und II.6-2: geplante Expositionssituation, prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson der Bevölkerung an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit Dosis von Referenzpersonen der betroffenen Bevölkerung: bester Schätzwert und Dosisverteilung Dosis von Beschäftigten: bester Schätzwert mit Unsicherheiten
Modellierung der Exposition	I1 → I2*: aus hypothetischem Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S1 → S2: generische realistisch und rechtlich mögliche, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S1 → S2: generische Mittelwerte oder fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1 → S2: generische Mittelwerte oder fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1 → S2: generische Werte oder fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1 → S2: generische Mittelwerte oder fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

* in Einzelfällen bei Flächenfreigaben bis I4

In analoger Weise zur Ermittlung von Strahlenexpositionen bei Freigaben sollten solche Ermittlungen bei der Entlassung von überwachungsbedürftigen Rückständen aus der Überwachung im Zusammenhang mit den §§ 95, 96, 97, 98, 101 und 102 StrlSchV behandelt werden. Wie bei der Freigabe von Abfällen sind auch bei der Entlassung von Rückständen aus der Überwachung sowohl die bestehenden als auch die potenziellen und zukünftigen Strahlenexpositionen für die allgemeine Bevölkerung und die Beschäftigten zu betrachten. Die Ermittlungen dienen dem Nachweis der Einhaltung des 1 mSv-pro-Jahr-Richtwertes. Tabellen 3.32 und 3.33 enthalten hierzu Vorschläge der SSK.

Die Vorhersage potenzieller Strahlenexpositionen im Falle der Endlagerung radioaktiver Abfälle stellt die Grundlage jedweder Analyse der Langzeitsicherheit dar. Es handelt sich um Extremfälle prospektiver Ermittlungen potenzieller Strahlenexpositionen, da ein potenzieller Radionuklideintrag aus einem Endlager in die oberflächennahe Biosphäre erst in ferner Zukunft, d. h. in zehntausenden und hunderttausenden von Jahren, erfolgen kann (ein menschliches Eindringen in das Endlager wird an dieser Stelle nicht unterstellt). Für diese Zeiträume sind Prognosen zur zivilisatorischen Entwicklung, zu menschlichen Verhaltensweisen und Nutzungsformen nicht möglich. Zudem bestehen erhebliche Ungewissheiten hinsichtlich der Entwicklungen innerhalb des Endlagers, des Klimas und der hydrologischen Standortverhältnisse und – wenn auch gegenüber der vorgenannten Größen untergeordnet – bezüglich der Entwicklung der geologischen Verhältnisse. Bei Fragen der Langzeitsicherheit

haben die ermittelten Strahlenexpositionen deshalb nur noch den Charakter von Indikatorwerten, die ein relatives Maß für die Sicherheit des Endlagers darstellen, aber nicht den Anspruch einer Abschätzung tatsächlicher künftiger Strahlenexpositionen haben können.

Eine weitere Besonderheit bei der Abschätzung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase eines Endlagers besteht darin, dass sich potenzielle Radionuklideinträge in die oberflächennahe Biosphäre ebenfalls über einen sehr langen Zeitraum (zehntausende und hunderttausende von Jahren) hinziehen können, so dass sich im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Expositionsverhältnissen einstellen wird. Selbst wenn eine realistische Abschätzung der Strahlenexposition in ferner Zukunft möglich wäre, so müsste sie hier für eine Vielzahl von aufeinanderfolgenden Verhältnissen erfolgen, so dass es nicht nur eine realistische Abschätzung gäbe, sondern jeweils eine für unterschiedliche Epochen.

Aus diesen Gründen kann für den Langzeitsicherheitsnachweis keine realistische Abschätzung der Exposition erfolgen. Stattdessen erfolgt die Berechnung eines die Dosis repräsentierenden Indikators für eine repräsentative Referenzperson (bzw. für mehrere repräsentative Referenzpersonen), deren Verhaltensweise als Konvention festgelegt wird. Ebenfalls als Konvention festzulegen sind die Verhältnisse an der Erdoberfläche, d. h. die zu unterstellende oberflächennahe Biosphäre. Ein Teil der Berechnung ist die Abschätzung der Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser. Da diese eine Folge von im Grundsatz bekannten natürlich ablaufenden Prozessen ist, kann auf diesen Teil der Dosisberechnung die Forderung nach einem möglichst weitgehenden Realismus erhoben werden. Extreme konservative Überschätzungen können hier dazu führen, dass die Machbarkeit der Endlagerung generell in Frage gestellt wird. Restriktive Unterschätzungen können in der Zukunft zum Verfehlen der Schutzziele für kommende Generationen führen. Auch hier können nur beste Schätzwerte zu einer ausgewogenen Bewertung der Sicherheit eines Endlagers führen. Allerdings sind auch hier die bestehenden Unsicherheiten umfassend zu ermitteln und zu betrachten.

Bestehen hinsichtlich des Vorliegens von Systemeigenschaften bzw. des Auftretens von Prozessen, die die Systementwicklung prägen, erhebliche Unsicherheiten, sollten die Abschätzungen der Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser und die darauf aufbauenden Dosisberechnungen für verschiedene Szenarien, die mögliche Entwicklungen repräsentieren, durchgeführt werden.

Bestehen hinsichtlich der Ausprägung (d. h. des Umfangs) der Systemeigenschaften und Prozesse Unsicherheiten, so können diese durch Parameterunsicherheiten beschrieben werden. Parameter, die innerhalb des Systems eine Variabilität aufweisen und für die es die vorliegende Informations- bzw. Datenlage erlaubt, begründete Wahrscheinlichkeitsdichten abzuleiten, können wie in den zuvor geschilderten Fällen im Rahmen klassischer Unsicherheitsanalysen nach GUM Supplement 1 behandelt werden.

In Fällen, bei denen diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, kann es erforderlich sein, andere Methoden zur Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten zu verwenden, wie z. B. 2D-Monte-Carlo, p-Box oder Angabe von Bandbreiten (Barthel und Thierfeldt 2012).

In den Tabellen 3.25 und 3.26 ist der derzeitige Stand der Diskussion in der SSK zur Vorgehensweise bei Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager – unterteilt nach Prognosen für überschaubare Zeiträume und für Langzeitbewertungen dargestellt. Der Inhalt der Tabellen ist als Hinweis zu verstehen und nimmt nicht das Ergebnis des anhängigen Beratungsauftrages „Radioökologische Modelle und Berechnungsvorschriften für die Endlagerung“ voraus.

Tab. 3.25: *Vorschlag der SSK zur Langzeitsicherheitsanalyse bei Endlagern – Stand der Diskussion für Prognosen in überschaubaren Zeiträumen.*

Anwendungsbereich II.4-2: geplante Expositionssituation, prospektiv: safety case	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (most exposed individual): bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I1: aus hypothetischem Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S1: alle realistisch möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1 + mehrdimensionales MC

Tab. 3.26: *Vorschlag der SSK zur Langzeitsicherheitsanalyse bei Endlagern – Stand der Diskussion für Langzeitbewertung.*

Anwendungsbereich II.4-3: geplante Expositionssituation, prospektiv: safety case	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle, Indikatorwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I1: aus hypothetischem Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S1: alle realistisch möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse. Berücksichtigung von unterschiedlichen Klimaentwicklungen und Biosphärenbedingungen
radioökologische Modellparameter	S1: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten (GUM Suppl.1 + mehrdimensionales MC)
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Werte
Aufenthaltszeiten	S1: generische Werte
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	S1: generische Werte
Unsicherheiten	GUM Supplement 1 + mehrdimensionales MC

Bei der Beurteilung von radiologischen Altlasten als Situationen mit dauerhafter Strahlenexposition haben Ermittlungen der tatsächlichen oder potenziellen Strahlenexpositionen der allgemeinen Bevölkerung eine herausragende Rolle. Von Bedeutung sind aber auch Ermittlungen der tatsächlichen oder potenziellen Strahlenexposition von Beschäftigten und Personen der Bevölkerung, die als Folge von Sanierungsmaßnahmen vorkommen und die in Hinblick auf die Expositionsermittlung wie geplante Expositionssituationen zu behandeln sind.

Die Anwendung der Berechnungsgrundlagen Bergbau war ursprünglich auf die Bewertung und Sanierung der Altlasten des Uranbergbaus in Sachsen und Thüringen beschränkt, geht aber inzwischen weit darüber hinaus. Mit den Berechnungsgrundlagen Bergbau (BMU 1999a, 1999b; BfS 2010) wurde ein Regelwerk geschaffen, mit dem derartige Expositionssituationen retrospektiv und prospektiv behandelt werden können. Siehe hierzu die ausführliche Darstellung im Anhang A-1.3.

In den Tabellen 3.27 bis 3.30 sind die Einschätzungen der SSK zum gegenwärtigen Stand der Ermittlungen der Strahlenexposition in den Berechnungsgrundlagen Bergbau dargestellt. Die Tabellen gehen aber in ihren Empfehlungen auch über den aktuellen Stand hinaus, indem sie die Erweiterung auf Analysen der Unsicherheit der ermittelten Dosen anmahnen.

Ein bisher nicht in den Berechnungsgrundlagen Bergbau betrachtetes Problem ist das der Langzeitauswirkungen von sanierten Altlasten. Im Rahmen der Gleichbehandlung von Strahlenexpositionen aus natürlichen und künstlichen Strahlenquellen, sollte diese Fragestellung im Rahmen der allgemeinen Diskussion der Langzeitsicherheit mitbetrachtet werden.

Tab. 3.27: *Altlasten – Beschäftigte (BglBb Stufe 1).*

Anwendungsbereich II.5-1: retrospektiv oder prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I3: aus ODL und Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Wasser und Lebensmitteln
Szenarien und Expositionspfade	S1: alle realistisch (und rechtlich) möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse,
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	entfällt
Aufenthaltszeiten	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	entfällt
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Tab. 3.28: *Altlasten – Beschäftigte (BglBb Stufe 2).*

Anwendungsbereich II.5-1: retrospektiv oder prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I3 → I4: aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Lebensmitteln, wenn verfügbar auch ODL (auch Dosimeter, GK-Messung und Bioassay)
Szenarien und Expositionspfade	S2: alle fallspezifisch und rechtlich möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklid ausbreitung relevanten Prozesse,
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	entfällt
Aufenthaltszeiten	S2: fallspezifische Daten und Unsicherheiten
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	entfällt
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Tab. 3.29: *Altlasten – Allgemeine Bevölkerung (BglBb Stufe 1).*

Anwendungsbereich II.5-2: bestehende Expositionssituation, retrospektiv oder prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit oder PDF
Modellierung der Exposition	I3: aus gemessener ODL und Aktivitätskonzentrationen in Lebensmitteln, modelliert aus gemessenen Daten für Luft, Boden, Wasser
Szenarien und Expositionspfade	S1: alle realistisch (und rechtlich) möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklid ausbreitung relevanten Prozesse,
radioökologische Modellparameter	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	S1: Generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Tab. 3.30: *Altlasten – Allgemeine Bevölkerung (BglBb Stufe 2).*

Anwendungsbereich II.5-2: geplante Expositionssituation, retrospektiv oder prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I4: aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden, Lebensmitteln, ODL (auch Dosimeter, GK-Messung und Bioassay)
Szenarien und Expositionspfade	S1 – S2: alle generisch oder fallspezifisch realistisch und rechtlich möglichen, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller für Radionuklidenausbreitung relevanten Prozesse,
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1 → S2: Generische Mittelwerte oder fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1 → S2: Generische Mittelwerte oder fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1 → S2: Generische Mittelwerte oder fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Auch die im konventionellen Umweltschutz übliche Ableitung von Prüf- oder Maßnahmewerten zur Beurteilung von bestehenden Expositionssituationen ist im Strahlenschutz noch nicht behandelt. Tabelle 3.31 nennt hierzu einen Vorschlag, der im Rahmen einer zukünftigen Altlastenverordnung seinen Niederschlag finden könnte.

Tab. 3.31: *Vorschlag der SSK für Altlasten – Ableitung von Prüf- oder Maßnahmewerten.*

Anwendungsbereich II.5-3: bestehende Expositionssituation, retrospektiv oder prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I0: aus hypothetischer Quelle
Szenarien und Expositionspfade	S1: alle realistisch (und rechtlich) möglichen, generisch, Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller relevanten Prozesse der Radionuklidenausbreitung.
radioökologische Modellparameter	S1 → S2: generische oder fallspezifische Mittelwerte und Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1: generische Mittelwerte und Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Die Anwendungsbereiche II.5-4 – II.5-6 sind wie die Anwendungsbereiche II.5-1 oder II.5-2 zu behandeln.

Zum Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen in Rückständen und anderen Materialien enthält die StrlSchV Überwachungsgrenzen der spezifischen Aktivität, bei deren Überschreiten davon auszugehen ist, dass die effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung 1 mSv pro Jahr überschreiten kann. Eine Ermittlung von Dosen ist nur erforderlich im Zusammenhang mit der Entlassung von Rückständen nach § 98 StrlSchV, der Prüfung von Grundstücken auf Kontaminationsfreiheit (§ 101 StrlSchV) und ggf. der Beurteilung von Materialien in Hinblick auf den Überwachungsbedarf nach § 102 StrlSchV (s. Tab. 3.32 und 3.33).

Tab. 3.32: *Vorschlag der SSK für die Ermittlung der Strahlenexpositionen in NORM-Industrien – Beschäftigte.*

Anwendungsbereich II.6-1: geplante oder bestehende Expositionssituation, retrospektiv und prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I1 (prospektiv) – hypothetischer Quellterm bei Planung von Tätigkeiten im Sinne der neuen EURATOM-Grundnormen I2: tatsächlicher Quellterm bei bereits betriebenen Anlagen bzw. Prozessen
Szenarien und Expositionspfade	S2: fallspezifisch existierende (und rechtlich mögliche), Ungleichgewichte, Berücksichtigung aller relevanten Prozesse der Radionuklid Ausbreitung
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Werte mit Unsicherheiten soweit praktikabel ermittelbar
Ernährungsgewohnheiten	entfällt
Aufenthaltszeiten	S2: Fallspezifische Daten und Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	entfällt
Unsicherheiten	GUM oder GUM Supplement 1

Tab. 3.33: *Vorschlag der SSK für die Ermittlung der Strahlenexposition durch natürlich vorkommende radioaktive Stoffe in Rückständen und anderen Materialien – Allgemeine Bevölkerung.*

Anwendungsbereich II.6-2: geplante Expositionssituation, prospektiv	
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Dosis einer repräsentativen Referenzperson der allgemeinen Bevölkerung an einem Ort: bester Schätzwert mit Unsicherheit
Modellierung der Exposition	I1 → I2: Bei zukünftig anfallendem Material aus hypothetischem Quellterm I1, bei existierendem Material: aus realem Quellterm I2
Szenarien und Expositionspfade	S1 → S2: Personen der allgemeinen Bevölkerung: unter Beachtung des jeweiligen Standortes generische, realistisch und rechtlich mögliche
radioökologische Modellparameter	S1 → S2: für konkrete Anlagen in Entsorgungsprozessen fallspezifische Werte soweit verfügbar (S2), sonst generische Werte (S1)
Ernährungsgewohnheiten	S1: Generische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S1 → S2: Personen der allgemeinen Bevölkerung: unter Beachtung des jeweiligen Standortes generische realistisch und rechtlich mögliche
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1 → S2: Generische Mittelwerte oder fallspezifische Mittelwerte mit Unsicherheiten
Unsicherheiten	GUM Supplement 1

3.5.3 Zusammenfassung der Empfehlung

Die SSK legt mit dieser Empfehlung zur Ermittlung der Strahlenexposition einen Vorschlag zur Ausgestaltung der Realismus-Forderung des Artikels 45 der EURATOM-Grundnormen vor. Tabelle 3.34 fasst die vorstehend im Detail beschriebenen Empfehlungen zusammen.

Tab. 3.34: *Vorschlag der SSK für die verschiedenen Anwendungsbereiche der Ermittlung der Strahlenexposition mit Empfehlungen der Informationskategorien Ii und Situationskategorien Sj mit den Unsicherheiten u(D) oder PDF.*

	Anwendungsbereiche	ICRP ^{a)}	Ii; Sj; u(D) oder PDF	Zweck
I	Information			
I.1	Natürliche Strahlenexposition	B	I3 → I4; S1; PDF	Parlamentsbericht
I.2	Kernwaffenversuche	B	I3 → I4; S1; u(D)	Parlamentsbericht
I.3	Tschernobyl	B	I3 → I4; S1; PDF	Parlamentsbericht
I.4	Kerntechnik, Technik, Forschung, Medizin (zum Zweck der Berichterstattung)			
I.4-1	Strahlenexposition von Referenzgruppen oder der allgemeinen Bevölkerung aus Tätigkeiten im Normalbetrieb	G	I2; S1 → S2; u(D) oder PDF	EU Art. 45 Parlamentsbericht

	Anwendungsbereiche	ICRP ^{a)}	Ii; Sj; u(D) oder PDF	Zweck
I.4-2	Strahlenexposition von Referenzgruppen oder der allgemeinen Bevölkerung aus Tätigkeiten nach Störfällen	B	I2 → I4; S1 → S2 ; PDF	EU Art. 45 Parlamentsbericht
I.5	Epidemiologische Forschung			
I.5-1	Epidemiologische Forschung; Kohorten- und Fall-Kontrollstudien	B, N	I4; S3; PDF	Wissenschaft
I.5-2	Epidemiologische Forschung; ökologische Studien	B	I4; S1 → S2, PDF	Wissenschaft
II	Dosisbegrenzung durch Grenz-, Richt-, Referenz- und Indikatorwerte: Planung und Überwachung			
II.1	Errichtung und Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen, die einer Genehmigung nach § 47 StrlSchV bedürfen			
II.1-1	Genehmigung – Normalbetrieb	G	I0; S0 (S1 bei radioökologischen Modellparametern); keine	§§ 13, 46, 47 StrlSchV
II.1-2	Genehmigung – Störfall	G	I0; S0 (S1 bei radioökologischen Modellparametern); keine	§ 49 StrlSchV
II.1-3	Überwachung – Normalbetrieb	B	I2; S1 → S2; keine	Auflagen aus Genehmigungen
II.2	Notfallschutz			allg.: §§ 51-58 StrlSchV
II.2-1	Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – prospektiv (aufgrund von Prognosen)	N	I1 → I2; S1 → S2 ; keine-	
II.2-2	Festlegung von Schutzmaßnahmen – kurzfristig – retrospektiv (aufgrund von Aktivitätsmesswerten)	N	I3 → I4; S1 → S2; keine	
II.2-3	Sanierung	B	I3 → I4; S1 → S2; PDF	
II.2-4	Festlegung von Schutzmaßnahmen – langfristig (Aufhebung von Nutzungseinschränkungen, Wiederbesiedlung)	N, B	I3 → I4; S1 → S2; PDF	
II.2-5	Rettungsmaßnahmen – Personal	N	I1 → I3; S1 (→ S2); u(D) oder PDF	§ 59 StrlSchV
II.3	Freigabe			
II.3-1	Ableitung von Freigabewerten	G	I0; S1; PDF	§ 29 StrlSchV
II.3-2	Freigabe im Einzelfall	G	I1 → I2 ^{b)} ; S1 – S2; PDF	§ 29 StrlSchV
II.4	Langzeitsicherheitsanalyse bei Endlagern			
II.4-2	Stand der Diskussion für Prognosen in überschaubaren Zeiträumen	G	I1; S1 → S2; PDF	ESK/SSK + ICRP
II.4-3	Stand der Diskussion für Langzeitbewertungen ^{c)}	G	I1; S1; PDF	
II.5	Altlasten			
II.5-1	Beschäftigte		I3 – I4; S1 → S2; u(D) oder PDF	§ 95f StrlSchV

	Anwendungsbereiche	ICRP ^{a)}	Ii; Sj; u(D) oder PDF	Zweck
II.5-2	Allgemeine Bevölkerung	G, B	I3 – I4; S1 → S2; u(D) oder PDF	BglBb
II.5-3	Ableitung von Prüf- oder Maßnahmewerten	B	I0; S1 (S1 → S2 bei radioökologischen Modellparametern); u(D) oder PDF	<i>(gibt es noch nicht)</i>
II.5-4	Einzelfall / Ist-Situation	B	I2 → I4; S1 → S2; u(D)	
II.5-5	Einzelfall / während der Sanierung	B	I3 → I4; S1 → S2; PDF	
II.5-6	Einzelfall / künftig (mit/ohne Sanierung)	B	I1 → I3; S1; PDF	
II.6	NORM			
II.6-1	Beschäftigte	B, G	I1 (hypothetischer Quellterm), I2 (tatsächlicher Quellterm); S2; u(D) oder PDF	§§ 95, 96 StrlSchV
II.6-2	Allgemeine Bevölkerung	G	I1 → I2; S1 → S2; PDF	§§ 97, 98, 101, 102 StrlSchV

- a) Diese Spalte charakterisiert die Expositionssituationen nach ICRP 103:
G: geplante Expositionssituationen, B: bestehende Expositionssituationen, N: Notfall-Expositionssituationen.
- b) In Einzelfällen bei Flächenfreigabe bis I4
- c) Bei Langzeitbewertungen für Endlager und auch für Altlasten sind die ermittelten potenziellen Strahlenexpositionen lediglich Indikatorwerte im Rahmen der Betrachtungen für einen Langzeitsicherheitsnachweis.

„u(D)“: Unsicherheiten nach GUM (JCGM 2008a)

PDF: Unsicherheiten nach GUM Supplement 1 (JCGM 2008b)

Literatur

- Barthel und Thierfeldt 2012 Barthel R, Thierfeldt S. Vergleichende Betrachtung der probabilistischen, stochastischen und deterministischen Modellierung von Expositionen im Hinblick auf die Belastbarkeit des Modellergebnisses und die Anforderungen an die Qualität der Eingangsdaten. Endbericht zum Vorhaben FKZ: 3609S50002. 2012.
- BfS 2009a Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): BfS-Stufenkonzept. Retrospektive Abschätzung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen gemäß Artikel 45 der EURATOM-Grundnormen. Internes Papier des BfS. Januar 2009.
- BfS 2009b Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007: ICRP-Veröffentlichung 103 verabschiedet im März 2007. Deutsche Ausgabe. BfS-SCHR-47/09. urn:nbn:de:0221-2009082154. 2009.
- BfS 2010 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau). März 2010. urn:nbn:de:0221-20100329966.
- BMU 1999a Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau). Teil 1. Entwurf/Stand 30.07.1999.
- BMU 1999b Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau). Entwurf/Stand 30.07.1999. Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau: Teil Radon). Stand 30.07.1999.
- BMU 2003 Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 Strahlenschutzverordnung (Richtlinie Arbeiten)“ vom 15. Dezember 2003.

- BMU 2007
Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, Teil 1: "Ermittlung der Körperdosis bei äußerer Strahlenexposition (§§ 40, 41, 42 StrlSchV; § 35 RöV) – Durchführung der Strahlenschutzverordnung und der Röntgenverordnung vom 08.12.2003 (GMBI. Nr. 22 vom 19.03.2004 S. 410). Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis, Teil 2: Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Inkorporationsüberwachung – §§ 40, 41 und 42 StrlSchV) vom 12. Januar 2007 (GMBI Nr. 31/32 vom 10.07.2007 S. 623).
- BMU 2008
Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz – StrVG) vom 19. Dezember 1986 (BGBl. I S. 2610), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. April 2008 (BGBl. I S. 686) geändert worden ist.
- BMU 2010
Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 30. September 2010.
<http://www.bmu.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/sicherheitsanforderungen-an-die-endlagerung-waermeentwickelnder-radioaktiver-abfaelle/> (10.01.2014)
- BMU 2011a
Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. November 2011 (BGBl. I S. 2370), die durch Artikel 2 Absatz 19 des Gesetzes vom 22. Dezember 2011 (BGBl. I S. 3044) geändert worden ist.
- BMU 2011b
Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung – RöV), Röntgenverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. April 2003 (BGBl. I S. 604), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 4. Oktober 2011 (BGBl. I S. 2000) geändert worden ist.
- BMU 2012a
Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) vom 28.08.2012. BAnz AT 05.09.2012 B1

- BMU 2012b Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.
- BMU 2013 Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2011: Unterrichtung durch die Bundesregierung, Parlamentsberichts 2011. 28. März 2013. urn:nbn:de:0221-2013060410695. 2013.
- BS 1999 Brenk Systemplanung (BS) GmbH. Ableitung von Überwachungsgrenzen für Reststoffe mit erhöhten Konzentrationen natürlicher Radioaktivität. BS-Bearb.Nr. 9410-2. Aachen. 31. Mai 1999.
- Deckert et al. 2000 Deckert A, Thierfeldt S, Kugeler E. Radiologische Bewertung einer Kontamination: Entscheidungshilfe zur Festlegung von flächenbezogenen Freigabewerten und Herleitung von Freigabewerten für flüssige Abfälle und Abschätzung der durch Freigabe von Reststoffen und Abfällen verursachten Kollektivdosis. In: Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. BMU-2000-559, 2000.
- Dymke 2002 Dymke N. Radiological basis for the determination of exemption levels. Kerntechnik 67, No. 1, 13. 2002.
- EC 1993 Europäische Kommission (EC). Radiation Protection 65: Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption values) below which reporting is not required in the European Directive. Doc. XI-028/93. 1993.
- EC 1996 Europäische Kommission (EC). Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. 39: L159, ISSN 0376-9453. 1996.
- EC 1999 Europäische Kommission (EC). Radiation Protection 95: Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 92-828-6616-5. 1999.

- EC 2002 Europäische Kommission (EC). Radiation Protection 129: Guidance on the realistic assessment of radiation doses to members of the public due to the operation of nuclear installations under normal conditions. Recommendations of the group of experts set up under the terms of Article 31 of the EURATOM Treaty. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 92-894-4007-4, ISSN 1681-6803. 2002.
- EC 2012 Europäische Kommission (EC). Proposal for a COUNCIL DIRECTIVE laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, Draft presented under Article 31 Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee. Brussels. 30.05.2012
- EURATOM 1957 Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM). 1957.
- IAEA 1988 International Atomic Energy Agency (IAEA). Principles for the exemption of radiation sources and practices from regulatory control. IAEA Safety series Nr. 89. Wien. 1988.
- IAEA 1996 International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA Safety Series No. 115. ISBN 92-0-104295-7. Wien. 1996.
- ICRP 1975 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Report on the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23. 1975.
- ICRP 1991 International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, Vol. 21 No. 1-3, ISBN 13: 978-0-08-041144-6, 1991.
- ICRP 1996 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 72, Annals of the ICRP, Vol. 26(1). Pergamon Press. New York. 1996.
- ICRP 2002 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP Publication 89, Annals of the ICRP, Vol. 32 (3-4). Pergamon Press, New York. 2002.
- ICRP 2006 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimization of Radiological Protection. ICRP Publication 101, Ann. ICRP 36 (3). 2006.

- ICRP 2007 International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Annals of the ICRP Volume 37(2-4). ISBN 13: 978-0-7020-3048-2. Elsevier. 2007.
- ICRP 2008 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108, Annals of the ICRP 38 (4-6). ISBN 13 978-0444529343 Elsevier. 2008.
- JCGM 2008a Joint Committee for Guides in Metrology. Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM, JCGM 100:2008). 2008.
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (10.01.2014).
- JCGM 2008b Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method (JCGM 101:2008). 2008.
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (10.01.2014).
- JCGM 2008c Joint Committee for Guides in Metrology: International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (JGCM 200:2008). 2008.
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html> (10.01.2014).
- SSK 1992 Strahlenschutzkommission (SSK). Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte nach § 45 StrlSchV. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 17. ISBN 3-437-11419-0. 1992.
- SSK 1997 Strahlenschutzkommission (SSK). Strahlenexposition an Arbeitsplätzen durch natürliche Radionuklide, Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 147. Sitzung der SSK am 03./04.07.1997. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 10. ISBN 3-437-21336-9. 1997.
- SSK 1998 Strahlenschutzkommission (SSK). Freigabe von Materialien, Gebäuden und Bodenflächen mit geringfügiger Radioaktivität aus anzeige- oder genehmigungspflichtigem Umgang. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 151. Sitzung der SSK am 11./12.02.1998. BANz Nr. 193 vom 15.10.1998. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 16. ISBN 3-437-21306-X. 1998.

- SSK 2004 Strahlenschutzkommission (SSK). Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV. Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 186. Sitzung der SSK am 11./12.09.2003. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 44. ISBN 3-437-22197-3. 2004.
- SSK 2005a Strahlenschutzkommission (SSK). Realistische Ermittlung der Strahlenexposition. Klausurtagung des Ausschusses „Radioökologie“ der Strahlenschutzkommission am 25./26. November 2003. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 55. ISBN 3-437-22329-1. 2005.
- SSK 2005b Strahlenschutzkommission (SSK). Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 197. Sitzung der SSK am 16./17.12.2004. BAnz Nr. 202a vom 25.10.2005. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 46. ISBN 3-437-22199-X. 2005.
- SSK 2005c Strahlenschutzkommission (SSK). Vergleich deutscher Freigabekriterien mit denen anderer Länder am Beispiel ausgewählter Radionuklide. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 197. Sitzung der SSK am 16./17.12.2004. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 45. ISBN 3-437-22198-1. 2005.
- SSK 2007 Strahlenschutzkommission (SSK). Freigabe von Stoffen zur Beseitigung. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 213. Sitzung der SSK am 05./06.12.2006. BAnz Nr. 113a vom 22.06.2007. Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 54. ISBN 978-3-87344-135-4. 2007.
- Thierfeldt et al. 2003 Thierfeldt S, Wörlen S, Schartmann F. Abschätzung der Kollektivdosis durch Freigaben in Deutschland. Endbericht zum Vorhaben StSch 4279. Brenk Systemplanung GmbH. Aachen. 2003.
- Thierfeldt und Kugeler 2000 Thierfeldt S, Kugeler E. Freigabe von Gebäuden und Bauschutt aus kerntechnischem Umgang" und "Abschätzung der Strahlenexposition durch Rezyklierung schwach radioaktiver Schlacke aus der konventionellen Müllverbrennung. In: Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. BMU-2000-558. 2000.
- UNSCEAR 2000 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR). 2000 Report to the General Assembly. United Nations. New York. 2000
http://www.unscear.org/unscear/publications/2000_1.html (10.01.2014).

- Vahlbruch 2004
Vahlbruch J-W. Über den Transfer von natürlichen Radionukliden in terrestrischen Ökosystemen und die realistische Modellierung der natürlichen Strahlenexposition in Norddeutschland. Leibniz Universität Hannover. 2004.
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh04/38731427X.PDF> (10.01.2014).
- WHO 2008
World Health Organization (WHO). International Programme on Chemical Safety (IPCS): Uncertainty and Data Quality in Exposure Assessment (Part 1: Guidance Document on Characterizing and Communicating Uncertainty in Exposure Assessment; Part 2: Hallmarks of Data Quality in Chemical Exposure Assessment. IPCS Harmonization Project Document No. 6). Geneva. 2008.
www.inchem.org/documents/harmproj/harmproj/harmproj6.PDF (10.01.2014).

Vortragende der Klausurtagung (SSK 2003):

- R. Michel: Was ist und wozu benötigt man die realistische Ermittlung der Strahlenexposition?
- H.-H. Landfermann: Rechtliche Anforderungen und Überlegungen an die Realität der Ermittlung der Strahlenexposition
- G. Kirchner: Realistische Ermittlung der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland
- L. Hornung-Lauxmann: Empfehlungen der EU zur realistischen Ermittlung der Strahlenexposition: RP 129
- G. Pröhl: Konservativitäten bei der Berechnung der Strahlenexposition durch Ingestion nach AVV
- U. Janicke: Realistische Ausbreitungsrechnungen: AUSTAL 2000
- R. Metzke: Aufsichtsverfahren
- S. Thierfeldt: Konservativitäten bei der Berechnung neue Modellentwicklung bzgl. der Freigabe in Deutschland
- J. Titley: Dose from effluents due to the reprocessing plant Sellafield
- R. Michel: Realistic dose and risk assessment for Cap de la Hague
- P. Jacob: Dosisverteilungen und kritische Bevölkerungsgruppen nach Tschernobyl.
- R. Michel: Ermittlung der Strahlenexposition von Rückwanderern in die evakuierten Gebiete der nördlichen Ukraine
- H. Müller, G. Pröhl: Realistische Dosisabschätzung nach unfallbedingten Radionuklid-freisetzen
- R. Konietzka: Expositionsszenarien der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung -Wirkungspfad Boden – Mensch
- R. Barthel, P. Schmidt: Realistische Abschätzung von Strahlenexpositionen durch Hinterlassenschaften des Uranbergbaus
- H. Schul, /L. Funke: Strahlenexposition bei der Demercurisierung, Immobilisierung und Deponierung von Rückständen der Erdöl-Erdgasgewinnung
- S. Kisting: Unsichere Größen bei der Abschätzung von Strahlenexpositionen durch Altablagerungen: Grundwasserpfad
- E. Schnug: Transferfaktoren Boden–Pflanze: Methoden der Bestimmung und Einflussfaktoren

Anhang

Inhalt

A-1 Bisherige Vorgehensweise in Deutschland.....	A-3
A-1.1 Die Allgemeinen Berechnungsgrundlagen und die Modellstudie Radioökologie Biblis	A-3
A-1.2 Die AVV zu § 47 StrlSchV	A-4
A-1.3 Die Berechnungsgrundlagen Bergbau.....	A-7
A-1.4 Das vom Bundesamt für Strahlenschutz vorgeschlagene Stufenkonzept.....	A-11
A-2 Vorgehensweise im Ausland	A-16
A-2.1 Empfehlung Artikel 31 EURATOM (RP 129)	A-16
A-2.2 IAEA Safety Series No. 19.....	A-18
A-2.3 ICRP 101	A-20
A-2.4 Ermittlung der Strahlenexposition in Frankreich	A-22
A-2.5 Ermittlung der Strahlenexposition im Vereinigten Königreich	A-27
A-2.6 Ermittlung der Strahlenexposition in der Ukraine.....	A-30
A-2.7 Ermittlung der Strahlenexposition in den USA.....	A-33
Literatur.....	A-41

A-1 Bisherige Vorgehensweise in Deutschland

Mit den Allgemeinen Berechnungsgrundlagen (ABG) des Bundesministeriums des Innern (BMI 1979) wurde in der Bundesrepublik Deutschland das erste Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen und Einrichtungen im Rahmen von Genehmigungsverfahren vorgegeben¹. Ursprünglich war geplant, das Verfahren in einer eigenen Radioökologie-Verordnung festzulegen. Im Jahr 1989 wurden dann aber Teile der ABG, nämlich die Daten zur Referenzperson, in die StrlSchV aufgenommen und eine Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 45 StrlSchV (alt) (BMU 1990) erlassen, die die ABG ablösten.

Die Modelle der AVV zu § 45 StrlSchV (alt) wurden in Band 17 der Veröffentlichungen der SSK erläutert (SSK 1992). Zur Anpassung an die Novellierung der StrlSchV im Jahr 2001 wurde eine neue AVV zu § 47 StrlSchV (BMU 2012), der den früheren § 45 StrlSchV ersetzte, entworfen. In die neue AVV wurden nur die Änderungen eingeführt, die durch die neue StrlSchV erforderlich wurden. Die SSK weist darauf hin, dass die mit den Modellen der ABG und AVV abgeschätzten Dosen inkrementelle Dosen sind, die im Allgemeinen klein im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition ausfallen.

A-1.1 Die Allgemeinen Berechnungsgrundlagen und die Modellstudie Radioökologie Biblis

Die Abschätzungen der Strahlenexposition von Referenzpersonen nach der Allgemeinen Berechnungsgrundlage (BMI 1979) basierten auf folgenden Annahmen:

1. Für jeden Belastungspfad wird die ungünstigste Einwirkungsstelle betrachtet, an der aufgrund der Verteilung der freigesetzten radioaktiven Stoffe in Luft und Wasser die höchste Strahlenexposition zu erwarten ist.
2. Sämtliche Nahrungs- und Futtermittel stammen vom Ort mit der höchsten Kontamination.
3. Betrachtet wird eine kritische Bevölkerungsgruppe, d. h. Personen, die über einen oder mehrere Expositionspfade der maximalen Strahlenexposition an den ungünstigsten Einwirkungsstellen ausgesetzt sind.
4. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe in Höhe der oben angegebenen Erfahrungswerte erfolgen kontinuierlich über einen Zeitraum von 50 Jahren. Die jährliche Strahlenexposition wurde für das 50. Jahr berechnet, wodurch alle im Lauf dieser Zeit möglichen Anreicherungen radioaktiver Stoffe berücksichtigt sind. Es wird hier also die unrealistische, aber auf der sicheren Seite liegende Annahme gemacht, dass die Bevölkerung in der Umgebung des Kernkraftwerks durch Zusammenwirken sämtlicher möglicher Belastungspfade unter ungünstigsten Bedingungen maximal exponiert wird.

Eine Überprüfung der Modelle der ABG und ein Vergleich mit einem realistischeren Ansatz wurde in der großen Radioökologiestudie Biblis einmalig in Deutschland durchgeführt (Aurand et al. 1981). Diese erlaubt auch eine detaillierte Diskussion des Beitrags der einzelnen Radionuklide zur kernkraftwerksbedingten Strahlenexposition.

¹ In diesem Anhang werden weitgehend die Wortwahl und die Begrifflichkeiten der jeweils beschriebenen Vorgehensweisen benutzt, auch wenn dies in Einzelfällen im Widerspruch zur Terminologie der aktuellen Empfehlung der SSK stehen kann.

Die Radioökologiestudie Biblis gibt zusätzlich zu diesen allgemeinen Aussagen Information über die Relevanz der verschiedenen Expositionspfade und führt einen Vergleich der Strahlenexpositionen unter der Annahme der Verzehrsmengen nach der ABG und unter Annahme standortspezifischer Daten durch. Auch Entfernungsabhängigkeiten der Strahlenexpositionen wurden untersucht.

In der Radioökologiestudie Biblis wurden die Strahlenexpositionen durch Ableitungen radioaktiver Stoffe über die Fortluft und mit dem Abwasser nuklidspezifisch für die Dosisgrößen Ganzkörperdosis, Dosis des Magen-Darm-Traktes, Schilddrüsendosis und Knochendosis auf den verschiedenen Expositionspfaden untersucht. Zusätzlich wurden für den Wasserpfad die aus der Vorbelastung des Vorfluters resultierenden Expositionen berechnet. Einige dieser Ergebnisse werden hier mit Betonung der Ergebnisse für die Ableitungen mit der Fortluft dargestellt. Angaben oder Analysen zu den Unsicherheiten der Dosisermittlung wurden nicht gemacht.

A-1.2 Die AVV zu § 47 StrlSchV

Die AVV zu § 45 StrlSchV (alt) (BMU 1990) und die AVV zu § 47 StrlSchV (BMU 2012) sind bzgl. Zweck und Zielrichtung folgendermaßen konzipiert:

- Mit der AVV zu § 47 StrlSchV werden Strahlenexpositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung abgeschätzt. Damit soll überprüft werden, ob bei genehmigten Ableitungen radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen die einschlägigen Dosisgrenzwerte der StrlSchV eingehalten werden. § 47 Abs. 2 Satz 3 StrlSchV besagt: *“Die zuständige Behörde kann davon ausgehen, dass die Grenzwerte des Absatzes 1 eingehalten sind, wenn dies unter Zugrundelegung der allgemeinen Verwaltungsvorschriften nachgewiesen wird.”*
- Die AVV zu § 47 StrlSchV legt Details fest, die in Anlage VII Teil A bis C StrlSchV (Expositionspfade, Lebensgewohnheiten der Referenzperson, übrige Annahmen) nicht enthalten sind.
- Ziel der AVV zu § 47 StrlSchV ist es, Modelle und Parameter so festzulegen, dass die zu erwartende Strahlenexposition nicht unterschätzt wird (AVV zu § 47 StrlSchV, Kap. 2.1).
- Mit der AVV zu § 47 StrlSchV wird die Dosis einer Referenzperson berechnet, deren Lebensgewohnheiten keiner existierenden Einzelperson entsprechen müssen. Die AVV zu § 47 StrlSchV ist für die Planung von Anlagen und nicht zur Ermittlung realistischer Strahlenexpositionen ausgelegt.
- Berechnet wird die Strahlenexposition im 50. Jahr nach 50-jährigem Anlagenbetrieb mit jährlicher Ableitung in Höhe der Genehmigungswerte.

Die AVV zu § 47 StrlSchV berücksichtigt folgende Expositionspfade für Ableitungen mit Fortluft:

- Betasubmersion (äußere Bestrahlung innerhalb der Fortluftfahne),
- Gammasubmersion (äußere Bestrahlung aus der Fortluftfahne),
- Bodenstrahlung (äußere Bestrahlung durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten Radionuklide),
- Inhalation (Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft),
- Ingestion (Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung), über
 - Luft→Pflanze,
 - Luft→Futterpflanze→Kuh→Milch,

- Luft→Futterpflanze→Tier→Fleisch,
- Luft→Muttermilch,
- Luft→Nahrung→Muttermilch.

Für Ableitungen mit Wasser werden berücksichtigt:

- Aufenthalt auf Sediment (äußere Bestrahlung durch Gammastrahlung; Spülfeld),
- Ingestion (Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung), über
 - Trinkwasser,
 - Wasser→Fisch,
 - Viehtränke→Kuh→Milch,
 - Viehtränke→Tier→Fleisch,
 - Beregnung→Futterpflanze→Kuh→Milch,
 - Beregnung→Futterpflanze→Tier→Fleisch,
 - Nahrung→Muttermilch

erforderlichenfalls:

- Landwirtschaftliche Nutzung auf Überschwemmungsgebieten,
- Landwirtschaftliche Nutzung von Fluss- und Klärschlamm,
- Berücksichtigung eines Tideneinflusses.

Zu den zu betrachtenden Einwirkungsstellen wird in der AVV zu § 47 StrlSchV ausgeführt:

- Prinzip: Ermittlung der Strahlenexposition an den ungünstigsten Einwirkungsstellen.
- Die ungünstigste Einwirkungsstelle (für einen Expositionspfad) ist der Ort in der Umgebung, an dem aufgrund der räumlichen Verteilung der radioaktiven Stoffe die höchste Strahlenexposition der Referenzpersonen möglich ist.
- Berücksichtigung realer Nutzungsmöglichkeiten unter Einbeziehung möglicher zukünftiger Änderungen.
- Die ungünstigsten Einwirkungsstellen für Inhalation/äußere Exposition (Aufenthalt) und Ingestion (Bezug der Nahrungsmittel) müssen nicht gleich sein.
- Für Ableitung mit Wasser ist die Strahlenexposition im Nahbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe < 10 h) und im Fernbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe > 5 d) zu ermitteln.
- Luft und Wasser sind getrennt zu betrachten.

In der novellierten AVV zu § 47 StrlSchV sind gegenüber der früheren AVV § 45 StrlSchV folgende Änderungen vorgenommen worden:

- 6 statt 2 Altersgruppen (dies hat besondere Auswirkungen durch die Aufnahme der Altersgruppe < 1 Jahr),
- neue Dosis- und Dosisleistungskoeffizienten,
- Einführung des Muttermilchpfades,
- neue Verzehrsmengen (in Deutschland ermittelte mittlere Werte mal Faktoren zur Abdeckung der 95. Perzentile in der Anlage VII Teil B Tabelle 1 Spalte 8 StrlSchV; diese Faktoren decken die ungünstigste aller Altersgruppen für das jeweilige Lebensmittel ab.),
- Änderungen bei wenigen Transferfaktoren (Mg, Pb, Po, Ra, Th, U; Fe bei Fischfleisch),

- Transferfaktoren für Muttermilch.

Bewertung

Die AVV zu § 47 StrlSchV ist nicht zur realistischen Ermittlung der Strahlenexposition geeignet, es handelt sich um eine konservative Abschätzung. Eine realistische Ermittlung der Strahlenexposition war auch nicht Ziel der AVV zu § 47 StrlSchV. Die AVV zu § 47 StrlSchV dient und dient zur Abschätzung einer sicheren oberen Schranke für die zusätzliche maximale Individualdosis durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen. Die Einordnung in die Methodik dieser Empfehlung wurde bereits in Kap. 3.5.2 in der Tabelle 3.16 dieser Empfehlung durchgeführt.

In einer früheren Stellungnahme hat die SSK zur AVV zu § 47 StrlSchV (SSK 2009) ausgeführt: *„Die konservative Abschätzung der Strahlenexposition der Bevölkerung nach der AVV erfolgt durch Berechnung der Exposition von Referenzpersonen der 6 Altersklassen nach StrlSchV. Dabei erfolgt die Modellierung der Ausbreitung der Radionuklide über ein Gaußfahnenmodell auf der Grundlage einer langjährigen Wetterstatistik. Der Transfer der Radionuklide durch die Nahrungskette wird mit besten Schätzwerten der radioökologischen Parameter berechnet. Ihre Konservativität erhalten die generischen Berechnungen nach der AVV durch mehre explizite Festlegungen, u. a. in der StrlSchV:*

- 1. Es wird angenommen, dass die kerntechnische Anlage oder Einrichtung bereits 50 Jahre in Betrieb ist und damit ein Gleichgewichtsmodell für die Strahlenexposition angenommen werden kann.*
- 2. Die Strahlenexpositionen der Referenzpersonen werden an den jeweils ungünstigsten Einwirkungsstellen berechnet, wobei für verschiedene Expositionspfade diese Einwirkungsstellen an unterschiedlichen Orten liegen können, ungeachtet der Tatsache, dass sich der Mensch nicht an unterschiedlichen Orten gleichzeitig aufhalten kann.*
- 3. Die Aufenthaltszeiten der Referenzpersonen sind extrem konservativ. So wird z. B. ein Daueraufenthalt im Freien außerhalb des Betriebsgeländes an den ungünstigsten Einwirkungsstellen von 1 Jahr angenommen.*
- 4. Die Ernährungsgewohnheiten sind in der StrlSchV festgelegt. Dabei sind die mittleren Verzehrsmengen der Anlage VII Teil B Tabelle 1 multipliziert mit den Faktoren der Spalte 8 zu verwenden. Diese Werte decken konservativ die 95. Perzentile der Ernährungsgewohnheiten in Deutschland ab.*
- 5. Es wird angenommen, dass die Referenzpersonen sich ausschließlich aus lokal an den ungünstigsten Einwirkungsstellen angebauten Nahrungsmitteln ernähren und dass auch das Trinkwasser an der ungünstigsten Einwirkungsstelle des Abwasserspades entnommen wird.*

Durch diese Akkumulation von konservativen Annahmen wird eine stark überschätzte Strahlenexposition der realen Bevölkerung erreicht, sodass die Behörde in Genehmigungsverfahren davon ausgehen kann, dass die Grenzwerte nach § 47 StrlSchV eingehalten sind, wenn Berechnungen der Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen nach der AVV die Einhaltung der Grenzwerte für die Referenzpersonen nachweisen.“

Bezüglich einer Diskussion zur Konservativität und zum Grad der Überschätzung der Strahlenexposition realer Gruppen der Bevölkerung sei auf die frühere Stellungnahme der SSK zur KIKK-Studie verwiesen (SSK 2009, Kapitel 4.4). Auch die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens (TÜV 2005), in dem die Berechnungsmethoden der Strahlenexposition in Deutschland, Frankreich und England verglichen wurden, belegen die hohe Konservativität der deutschen Annahmen in der AVV zu § 47 StrlSchV.

A-1.3 Die Berechnungsgrundlagen Bergbau

Zur Berechnung der potenziellen Strahlenexpositionen durch Hinterlassenschaften des Bergbaus hat das BMU nach einer Empfehlung der SSK Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität festgelegt (BMU 1999a, 1999b, BfS 2010). Der Realismusforderung der EURATOM-Grundnormen tragen diese, im Weiteren abgekürzt als Berechnungsgrundlagen Bergbau (BglBb) bezeichneten Regeln, durch realistisch-konservative Modellierung Rechnung.

Die Vorgehensweise wird hier anhand der Berechnungsgrundlagen Bergbau (BfS 2010) exemplarisch dargestellt. Die potenzielle Strahlenexposition wird für Referenzpersonen mit relativ hoher Exposition an den ungünstigsten Einwirkungsstellen unter Annahme realistischer, hoher, aber nicht unmöglicher Verzehrsgewohnheiten und Aufenthaltszeiten für die sechs Altersgruppen der StrlSchV ermittelt.

Nach den BglBb sind „*ungünstigste Einwirkungsstellen [...] die Einwirkungsstellen, an denen für die zu betrachtenden Expositionsszenarien und -pfade unter Berücksichtigung realistischer Nutzungen und Verhaltensweisen jeweils die höchste Strahlenexposition der Referenzperson zu erwarten ist. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind im konkreten Anwendungsfall zu bestimmen. Dabei sind je nach Anwendungsbereich und -fall aktuelle und planungsrechtlich zulässige Nutzungen zu berücksichtigen und/oder mögliche künftige Nutzungen einzubeziehen.*

Bei der Bestimmung möglicher künftiger Nutzungen sind planungsrechtliche Festsetzungen, im Übrigen die Prägung des Gebiets unter Berücksichtigung der absehbaren Entwicklung zu beachten. Soweit Nutzungen durch behördliche Maßnahmen (z. B. Nutzungseinschränkung) oder durch Maßnahmen des Inhabers der bergbaulichen Hinterlassenschaft (z. B. Zugangsbeschränkung) unterbunden werden, bleiben sie bei der Ermittlung der Strahlenexposition außer Betracht. Das gleiche gilt für Nutzungen, die aufgrund der ökologischen Verhältnisse am Standort oder der zeitlichen Begrenzung des Anwendungsfalls, ausgeschlossen werden können.“

Es werden nach den BglBb nur tatsächlich relevante Expositionsszenarien und mögliche Anteile der Szenarien an der Lebensführung berücksichtigt. Es werden insbesondere realistische Annahmen von Aufenthaltszeiten und Verzehrsgewohnheiten gemacht und nur praktisch mögliche Aufenthaltszeiten der Referenzpersonen berücksichtigt. Der Anteil lokal erzeugter Nahrungsmittel wird festgelegt. Für die Ermittlung der potenziellen Strahlenexposition der Bevölkerung berücksichtigen die BglBb folgende Expositionsszenarien:

- Aufenthalt in Wohngebäuden,
- Aufenthalt im Freien,
- Aufenthalt an unterirdischen Arbeitsplätzen
- Verzehr von Muttermilch und lokal erzeugter Lebensmittel (pflanzliche und tierische Produkte sowie Wasser)

und die Expositionspfade:

- Äußere Exposition durch Gammastrahlung des Bodens,
- Exposition durch Inhalation von Staub,
- Exposition durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten,
- Exposition durch Ingestion von Muttermilch und lokal erzeugter Lebensmittel (Trinkwasser, Fisch, Milch und Milchprodukte, Fleisch und Fleischwaren, Blattgemüse, sonstige pflanzliche Produkte) und
- Exposition durch Direktingestion von Boden.

Abbildung A.1 stellt die Expositionsszenarien und -pfade der Berechnungsgrundlagen Bergbau im Detail dar.

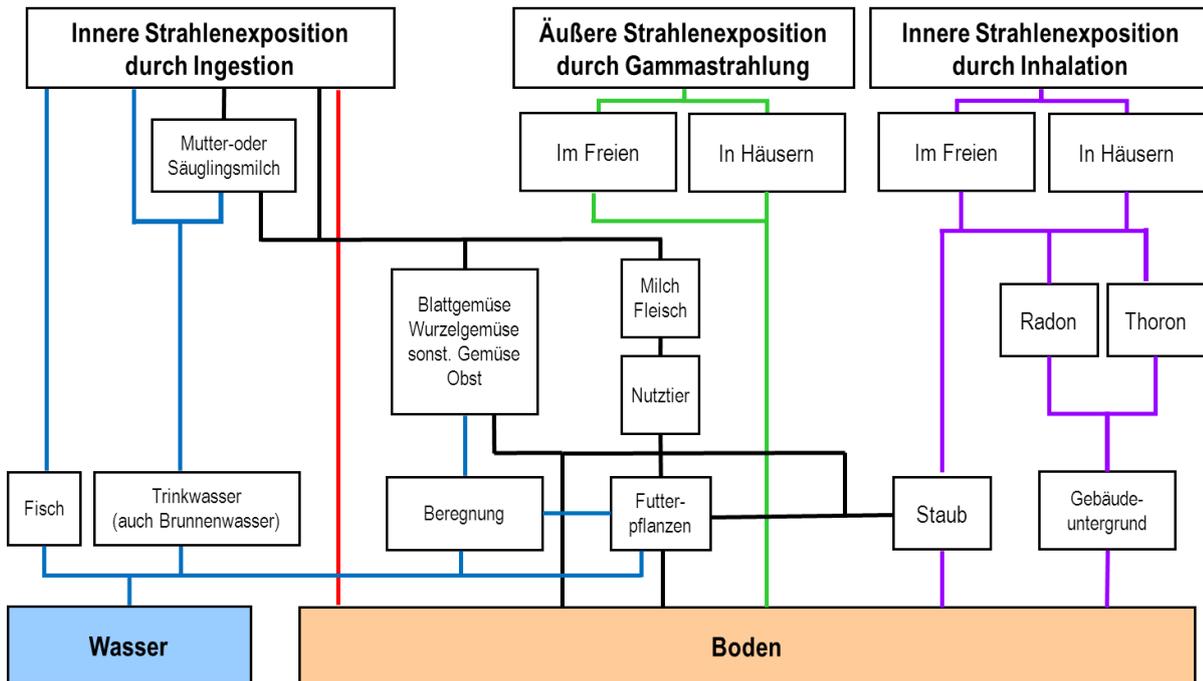


Abb. A.1: Schematische Darstellung der Expositionsszenarien und Expositionspfade nach den Berechnungsgrundlagen Bergbau.

Die BglBb legen die bei der Ermittlung der potenziellen Strahlenexposition generisch anzusetzenden Parameter wie Aufenthaltszeiten, Verzehr- und Lebensgewohnheiten explizit fest. Zu den einzelnen Expositionsszenarien werden detaillierte Vorgaben gemacht, von denen einige im Folgenden aufgeführt sind.

Grundsätzlich sind beim Szenario „Aufenthalt im Freien“ die Expositionspfade „Äußere Exposition durch Gammastrahlung des Bodens“, „Inhalation von Staub“ und „Direktingestion von Boden“ zu berücksichtigen. Diese Pfade sind relevant, wenn sich Expositionsorte von Referenzpersonen für den Pfad „Äußere Exposition durch Gammastrahlung des Bodens“ auf oder in unmittelbarer Nähe (bis zu einer Entfernung von 20 m), für den Pfad „Inhalation von Staub“ auf oder in der Umgebung (bis zu einer Entfernung von 100 m) und für den Pfad „Direktingestion von Boden“ auf bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen befinden.

Ausführlich legen die BglBb die Expositionspfade dar, die beim Verzehr lokal erzeugter Lebensmittel zu berücksichtigen sind. Grundsätzlich sind dies beim Szenario „Verzehr lokal erzeugter Lebensmittel“:

- Transfer vom Boden zur Pflanze,
- Freisetzung mit der Luft,
- Freisetzung mit dem Wasser.

Bei der Freisetzung von Radionukliden mit dem Wasser sind folgende Wege der Radionuklide zum Menschen zu berücksichtigen:

- Trinkwasser,
- Trinkwasser→Muttermilch,
- Wasser→Fisch,

- Wasser→Fisch→Muttermilch,
- Beregnung→Pflanze,
- Beregnung→Pflanze→Muttermilch,
- Beregnung→Futterpflanze→Kuh→Milch,
- Beregnung→Futterpflanze→Kuh→Milch→Muttermilch,
- Beregnung→Futterpflanze→Tier→Fleisch,
- Beregnung→Futterpflanze→Tier→Fleisch→Muttermilch,
- Viehtränke→Kuh→Milch,
- Viehtränke→Kuh→Milch→Muttermilch,
- Viehtränke→Tier→Fleisch,
- Viehtränke→Tier→Fleisch→Muttermilch.

Diese Expositionspfade sind nach den BglBb nur relevant, „wenn beim Kontaminationsweg „Transfer vom Boden zur Pflanze“ die Pflanzen auf bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen wachsen, beim Kontaminationsweg „Freisetzung mit der Luft“ die Pflanzen auf oder in der Umgebung (bis zu einer Entfernung von 100 m) bergbaulicher Anlagen oder Einrichtungen wachsen“.

Nach den BglBb sind bei der Berechnung der Strahlenexposition die Kontaminationswege „Transfer vom Boden zur Pflanze“ und „Freisetzung mit der Luft“ nur zu berücksichtigen, wenn die bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen bzw. die durch Freisetzung mit der Luft kontaminierte Umgebung ausreichend groß und geeignet sind, um einen Anteil von 50 % der Nahrungsmittel an lokaler Produktion (ohne Getreide) für Referenzpersonen der allgemeinen Bevölkerung zu ermöglichen. Bei bergbaubedingt kontaminierten Wässern für die Pfade „Freisetzung mit dem Wasser“ sind Teilpfade, bei denen keine ausreichende Verfügbarkeit oder Eignung gegeben ist, nicht zu betrachten.

Für den Verbrauch von Trinkwasser ist gemäß der BglBb anzunehmen, dass der gesamte Bedarf durch bergbauliche Hinterlassenschaften kontaminiert ist, sofern nicht besondere Umstände (z. B. Fernwasserversorgung) die Annahme eines geringeren Anteils lokal gewonnenen Trinkwassers rechtfertigen.

Der Expositionspfad Direktgestion von Boden ist für die Altersgruppe „≤ 1 Jahr“ nicht zu berücksichtigen.

In den BglBb (BfS 2010) wird ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der bergbaubedingten Strahlenexposition vorgeschlagen:

„Soweit die Berechnung der Strahlenexposition [...] auf der Basis von Messwerten erfolgt, ist zu berücksichtigen, dass die Messwerte jeweils auch den Anteil der natürlicherweise vorhandenen Umweltradioaktivität enthalten. Zur Ermittlung der bergbaubedingten Strahlenexposition ist der Anteil der natürlicherweise vorhandenen Strahlenexposition abzuziehen.“

Zur vereinfachten Prüfung der Einhaltung von [...] Dosisrichtwerten der bergbaubedingten Strahlenexposition [...] kann das folgende, zweistufige Verfahren verwendet werden:

- a) *Im ersten Schritt wird die [...] berechnete Strahlenexposition ohne Abzug der natürlichen Expositionsanteile mit den relevanten Dosiswerten verglichen. Soweit dabei für keine Referenzperson eine Überschreitung festgestellt wird, kann ohne weitere Prüfung von der Einhaltung der relevanten Dosiswerte ausgegangen werden. Anderenfalls ist nachfolgender Untersuchungsschritt durchzuführen.*

b) *Im zweiten Schritt werden von der nach a) ermittelten Strahlenexposition einer Referenzperson [...] allgemeine Werte der natürlichen Umweltradioaktivität abgezogen. Bei diesem Wert handelt es sich um einen mittleren Wert der Umgebungsäquivalentdosisleistung sowie um Werte der spezifischen Aktivität in Lebensmitteln, im Boden und im Viehfutter sowie der Aktivitätskonzentration in Wässern (Trinkwasser, Viehtränkewasser, Beregnungswasser, Oberflächenwasser) und in Staub für eine durch den Bergbau unbeeinflusste Region. Soweit standortspezifische Werte der natürlichen Umweltradioaktivität [...] vorliegen, sind diese anstelle der allgemeinen Werte der natürlichen Umweltradioaktivität [der BglBb; Anm. d. Verf.] zu verwenden. Die Differenz der so ermittelten Strahlenexposition gilt für den Vergleich mit den relevanten Dosiswerten als bergbaubedingte Strahlenexposition der Referenzperson. Wird bei diesem Vergleich für keine Referenzperson eine Überschreitung festgestellt, so kann ohne weitere Prüfung von der Einhaltung des Richtwertes ausgegangen werden.*

Soweit mithilfe des vereinfachten Verfahrens [...] eine Einhaltung der relevanten Dosiswerte nicht festgestellt werden kann, sind zur Ermittlung der bergbaubedingten Strahlenexposition standortspezifische Werte der natürlicherweise vorhandenen Umweltradioaktivität erforderlich. Die Bestimmung dieser Werte hat im Einvernehmen mit der zuständigen Behörde zu erfolgen.“

Bewertung

Die BglBb stellen in Deutschland den ersten Schritt zu einer realistischen Ermittlung der Strahlenexposition dar. Die Einordnung in die Methodik dieser Empfehlung wurde bereits in Kap. 3.5.2 in den Tabellen 3.28 und 3.31 dieser Empfehlung durchgeführt. Es handelt sich um ein gestuftes Verfahren, bei dem in der ersten Stufe nicht zwischen der natürlichen Hintergrundaktivität und bergbaubedingter zusätzlicher Aktivität differenziert wird. Falls der Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr überschritten wird, werden natürliche Hintergrundwerte der Ortsdosisleistungen und spezifischen Aktivitäten aller relevanten Umweltmaterialien in Ansatz gebracht, um den Beitrag der bergbaulichen Aktivitäten zur Strahlenexposition zu quantifizieren. Die BglBb arbeiten mit weit geringeren Konservativitäten als die AVV zu § 47 StrlSchV bzgl. der Verzehrswerten und anderer menschlicher Gewohnheiten. Für die Verzehrswerten werden die mittleren Verzehrswerten der StrlSchV (der Anlage VII Teil B Tabelle 1) angesetzt und für die menschlichen Gewohnheiten die Daten der BglBb (der Anlage I Tabelle I.2) angenommen.

Eine erste Validierung der Vorgehensweise der BglBb in Bezug auf die Ermittlung der natürlichen Strahlenexposition wurde in einem Gutachten zu den Folgen von Ableitungen natürlicher radioaktiver Stoffe mit dem Grubenwasser in die Vorflut vorgenommen (Gellermann et al. 2005), bei der sich zeigte, dass unter den Annahmen der BglBb die mittleren natürlichen Expositionen (ohne Betrachtung von Radon) verifiziert wurden.

Eine detailliertere Validierung in Bezug auf die Ermittlung der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland und eine Erweiterung der BglBb durch probabilistische Berechnungen wurde von Vahlbruch (2004) durchgeführt. Die dort verwendeten Verfahren wurden auch bei der Ermittlung der potenziellen Strahlenexpositionen durch Ableitungen natürlicher radioaktiver Stoffe in die Vorflut und generell durch Altlasten des Uranbergbaus in Sachsen angewandt (Ritzel 2008) und belegen die relativ einfache Erweiterbarkeit der BglBb auf probabilistische Verfahren und eine angemessene Analyse der Parameterunsicherheiten des verwendeten Expositionsmodells im Hinblick auf die ermittelten Strahlenexpositionen.

Nach Einschätzung der SSK sollten die Unsicherheiten der ermittelten Strahlenexpositionen vorzugsweise nach GUM Supplement 1 (JCGM 2008) erfolgen, z. B. wie in (Vahlbruch 2004) und (Ritzel 2008) dargelegt.

Die o. g. Validierungen stellen jedoch keine generelle Validierung der radioökologischen Modellierung aller Expositionspfade der BglBb oder der AVV zu § 47 StrlSchV dar. Dazu bedarf es regelmäßiger Untersuchungen, um auch den Stand von Wissenschaft und Technik für diese Berechnungsgrundlagen zu erhalten. So sind sicherlich weiterhin einige Transferfaktoren mit hohen Unsicherheiten versehen und auch ganze Modellteile, z. B. der Muttermilchpfad und der Luftpfad für Pb-210, noch nicht validiert (siehe hierzu auch SSK 2013).

A-1.4 Das vom Bundesamt für Strahlenschutz vorgeschlagene Stufenkonzept

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat im Laufe der Beratungen der SSK ein Stufenkonzept zur retrospektiven Abschätzung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen gemäß Artikel 45 der EURATOM-Grundnormen vorgestellt (BfS 2009).

Die folgenden Ausführungen skizzieren die vom BfS vorgeschlagenen Grundsätze zur retrospektiven Abschätzung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen im Normalbetrieb.

Der Aufwand bei der retrospektiven Abschätzung der Strahlenexposition sollte sich, auch im Hinblick auf eine Optimierung der eingesetzten Ressourcen, grundsätzlich an der Höhe der Strahlenexposition orientieren. Ausgehend von diesem Leitgedanken schlägt das BfS ein Stufenkonzept vor, bei dem abhängig von der Höhe der Strahlenexposition radioökologische Modelle und Modellannahmen mit einem unterschiedlichen Grad der Konservativität, aber auch einem unterschiedlichen Aufwand bei der Datenbeschaffung eingesetzt werden.

Ausgehend von dem Berechnungsverfahren der AVV zu § 47 StrlSchV werden in der ersten Stufe nur solche Modifikationen vorgenommen, die ohne aufwändige Prüfung der tatsächlichen Gegebenheiten in der Umgebung einer kerntechnischen Anlage oder Einrichtung eine realitätsnähere Abschätzung der Strahlenexposition erlauben. Eine aufwändigere Berechnung der individuellen Strahlenexposition ist nicht gerechtfertigt, wenn durch das Berechnungsverfahren der ersten Stufe nachgewiesen werden kann, dass die individuelle Strahlenexposition nur gering ist. Als Kriterium hierfür schlägt das BfS eine Strahlenexposition in Höhe von 10 % der maßgebenden Grenzwerte für die effektive Dosis und die Organdosen vor. Wird dieses Dosiskriterium der ersten Stufe überschritten, ist die individuelle Strahlenexposition in der zweiten Stufe mit einem detaillierten, insgesamt weniger konservativen Berechnungsverfahren auf der Grundlage ortsspezifischer Daten und Gegebenheiten abzuschätzen. Da bei der retrospektiven Abschätzung der individuellen Strahlenexposition Berechnungsverfahren mit unterschiedlichen Graden der Konservativität zum Einsatz kommen können, sollte bei der Berichterstattung aus Gründen der Transparenz und Nachvollziehbarkeit stets das verwendete Verfahren mit angegeben werden.

Im Stufenkonzept des BfS werden zur Abschätzung der Strahlenexposition hypothetische Referenzpersonen verwendet. Unter Referenzpersonen sind hierbei hypothetische Einzelpersonen der Bevölkerung zu verstehen, denen ungünstige, im Wesentlichen aber vernünftige Lebensgewohnheiten unterstellt werden. Ungünstige Lebensgewohnheiten sind vom Durchschnitt abweichende Lebensgewohnheiten (Aufenthaltsorte und -zeiten, Verzehrsmengen, Anteil der verzehrten Lebensmittel aus lokaler Erzeugung usw.), die insgesamt zu einer höheren Strahlenexposition führen.

Die Berechnung der individuellen Strahlenexposition erfolgt mit deterministischen radioökologischen Modellen. Probabilistische Modellierungsansätze beschränken sich auf die

atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Stoffe, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik mithilfe von Partikelmodellen beschrieben werden sollte.

Grundzüge des Berechnungsverfahrens der Stufe 1

In Stufe 1 kommt ein einfaches, konservatives Berechnungsverfahren mit generischen Werten für die Modellparameter zum Einsatz, das sich konzeptionell eng an die AVV zu § 47 StrlSchV anlehnt. Zur retrospektiven Abschätzung der jährlichen Strahlenexposition werden nur solche Modifikationen vorgenommen, die ohne aufwändige Prüfung eine realitätsnähere Berechnung der Strahlenexposition erlauben oder prinzipiell unmögliche Situationen ausschließen. In diese Kategorie fallen beispielsweise folgende Änderungen:

- Es werden die bilanzierten tatsächlichen Emissionen der jeweiligen kerntechnischen Anlage oder Einrichtung berücksichtigt.
- Es werden nicht alle potenziellen Expositionspfade gemäß Anlage VII Teil A der StrlSchV zugrunde gelegt, sondern nur diejenigen, die aufgrund der realen Gegebenheiten in der Umgebung des Standortes tatsächlich zur Strahlenexposition beitragen. Dabei ist insbesondere die tatsächliche Nutzung (nicht die Nutzungsmöglichkeiten) der Umgebung einer kerntechnischen Anlage oder Einrichtung zur Lebensmittelproduktion maßgebend.
- Um keine unrealistisch hohe Nahrungszufuhr der Referenzpersonen anzunehmen, wird bei den Verzehrsmengen nur für die dosisdominierende Lebensmittelgruppe das 95. Perzentil angesetzt. Für alle anderen Lebensmittelgruppen sind durchschnittliche Verzehrsmengen zu unterstellen. Zur Ermittlung der dosisdominierenden Lebensmittelgruppe sind für jede Lebensmittelgruppe die Dosisbeiträge durch die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft und Wasser für alle relevanten Expositionspfade und alle Radionuklide aufzusummieren, wobei durchschnittliche Verzehrsmengen zugrunde zu legen sind. Hierbei sind die in der AVV zu § 47 StrlSchV genannten zehn Lebensmittelgruppen zu betrachten, sofern die Lebensmittelgruppe in der Umgebung der kerntechnischen Anlage oder Einrichtung erzeugt wurde.
- Die atmosphärische Ausbreitung wird auf der Grundlage realer, standortspezifischer meteorologischer Messwerte mit einem Verfahren nach dem Stand von Wissenschaft und Technik modelliert.
- Für die Akkumulation radioaktiver Stoffe im Boden und in anderen Umweltmedien wird für die retrospektive Abschätzung keine 50-jährige fiktive Betriebsdauer unterstellt, sondern die tatsächliche bisherige Betriebsdauer der Anlage oder Einrichtung.

Für die Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen werden mit Ausnahme der Verzehrsmengen und der Lebensmittelgruppen, bei denen von einer lokalen Produktion auszugehen ist, die konservativen Annahmen der AVV zu § 47 StrlSchV unverändert beibehalten. Die Annahme, dass sich die Referenzpersonen stets an der ungünstigsten Einwirkungsstelle aufhalten, ist nur mit einem erhöhten Aufwand unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten (Wohn-, Arbeits- und Freizeitsituation der Referenzpersonen) realistischer zu gestalten. Sofern geeignete Daten vorliegen, kann für den Aufenthalt in Gebäuden ein Reduktionsfaktor für die äußere Exposition angesetzt werden.

Grundzüge des Berechnungsverfahrens der Stufe 2

Liegen die Ergebnisse des konservativen, generischen Ansatzes der Stufe 1 nicht generell unter 10 % der maßgebenden Grenzwerte für die effektive Dosis und die Organdosen, wird in einer zweiten Stufe eine detailliertere Modellierung vorgenommen. Im Wesentlichen werden die generischen Modellparameter und Modellannahmen der ersten Stufe an die lokalen

Gegebenheiten angepasst. Dies betrifft insbesondere die Aufenthaltsorte und –zeiten der Referenzpersonen sowie die Erzeugung, die Warenströme und den Verzehr von Lebensmitteln. Mögliche Datenquellen sind – je nach örtlicher Variabilität – bundesweite, regionale oder lokale Statistiken.

Für die dosisdominierenden Pfade bzw. Teilpfade sind ungünstige, aber realistische Parameterwerte und Annahmen anzusetzen. Für alle übrigen Pfade bzw. Teilpfade werden, sofern diese signifikant zur Gesamtexposition beitragen, durchschnittliche Gegebenheiten unterstellt. Unter Expositionspfaden sind die Wege radioaktiver Stoffe von der Ableitung aus einer Anlage oder Einrichtung über Ausbreitungs- und Transportvorgänge bis hin zur Strahlenexposition des Menschen zu verstehen. Die in Anlage VII Teil A StrlSchV aufgelisteten Expositionspfade sind im Allgemeinen aggregierte Beschreibungen. Unter Teilpfad ist die detaillierte Darstellung einzelner Ausbreitungs- und Transportvorgänge und der jeweiligen Expositionssituation zu verstehen.

Auch für die Lebensgewohnheiten der Referenzpersonen aller Altersgruppen sind in Stufe 2 insgesamt ungünstige, aber nicht unrealistische Lebensgewohnheiten anzusetzen. Bei der Festlegung ungünstiger Lebensgewohnheiten ist sicherzustellen, dass durch die Kombination mehrerer ungünstiger Parameter oder Annahmen insgesamt keine unrealistischen Situationen unterstellt werden. Diese Vorgehensweise steht in Einklang mit den Empfehlungen der ICRP zur Wahl der repräsentativen Person („Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public“), wonach die Lebensgewohnheiten nicht außerhalb der Bandbreite des täglichen Lebens gewählt werden sollten. Dies betrifft nicht nur die Nahrungszufuhr durch Lebensmittel, sondern auch die Aufenthaltsorte und -zeiten der Referenzpersonen während der Arbeit, in der Freizeit und in Wohngebäuden, sofern die Summe aus äußerer Strahlenexposition und der Strahlenexposition durch Inhalation signifikant zur Gesamtexposition beiträgt. Insgesamt soll erreicht werden, dass der überwiegende Teil der Bevölkerung geringeren Strahlenexpositionen als den berechneten ausgesetzt ist. Ein solcher Ansatz wird vom BfS als realitätsnah und maßvoll konservativ eingestuft.

Insbesondere bei höheren Strahlenexpositionen ist in der Stufe 2 zu prüfen, ob abdeckende Expositionssituationen und die damit einhergehende Konservativität beibehalten werden können, oder ob die abgedeckten Expositionssituationen detailliert zu modellieren sind. Ferner ist zu prüfen, ob in der ersten Stufe bewusst konservativ gewählte Modellansätze zu modifizieren sind. Expositionspfade und Teilpfade, die nur unwesentlich zur Gesamtexposition beitragen, können weiterhin durch ein vereinfachtes, abdeckendes Expositionsszenarium beschrieben werden. Wegen der geringen Bedeutung eines solchen Pfades wird die Gesamtdosis durch dieses konservative Vorgehen nur unwesentlich überschätzt. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit der berechneten Strahlenexpositionen ist anzumerken, dass damit in der Praxis kleinere Dosisbeiträge tendenziell konservativer abgeschätzt werden als größere.

Eine Überschreitung maßgebender Dosisgrenzwerte ist sicher ausgeschlossen, wenn – wie in Deutschland – in Genehmigungsverfahren für die jeweiligen kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen insgesamt wesentlich konservativere Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Strahlenexposition eingesetzt werden. Die aufwändige Abschätzung der tatsächlichen Strahlenexposition für reale, aufgrund ihrer Lebensgewohnheiten hoch exponierte Personen, wie sie z. B. in Großbritannien durchgeführt wird, ist nach Ansicht des BfS bei einem solchen Vorgehen in Genehmigungsverfahren weder erforderlich noch gerechtfertigt.

Tab. A.1: Überblick über das Stufenkonzept zur retrospektiven Abschätzung der Strahlenexposition (BfS 2009)

	Stufe 1	Stufe 2
Ausgangspunkt	Berechnungsverfahren, das sich konzeptionell eng an die AVV zu § 47 StrlSchV anlehnt, den Stand von Wissenschaft und Technik widerspiegelt und insgesamt unrealistische Expositionssituationen weitgehend ausschließt.	
Höhe der Strahlenexposition	Gering, d. h. das Berechnungsverfahren der Stufe 1 ergibt eine Strahlenexposition von höchstens 10 % der Grenzwerte des § 47 Abs. 1 StrlSchV für die effektive Dosis und die Organdosen.	Das Berechnungsverfahren der Stufe 1 ergibt, dass die effektive Dosis oder mindestens eine der Organdosen 10 % des jeweiligen Grenzwerts des § 47 Abs. 1 StrlSchV überschreitet.
Grad der Konservativität	Konservativ	Realitätsnah, maßvoll konservativ
Datengrundlage	Generische Daten	Lokale, regionale oder bundesweite statistische Daten je nach örtlicher Variabilität der Daten.
Aufwand für Modellierung und Datenbeschaffung	Gering	Erhöht
Expositionspfade	In Anlage VII Teil A der StrlSchV genannte Expositionspfade, sofern sie tatsächlich dosisrelevant waren. Zusätzliche Expositionspfade sind zu berücksichtigen, wenn diese aufgrund der örtlichen Besonderheiten des Standorts oder aufgrund der Art der Anlage oder Einrichtung dosisrelevant sein konnten. Zur Abschätzung der Ingestionsdosis sind die in der AVV zu § 47 StrlSchV genannten 10 Lebensmittelgruppen zu betrachten.	In Anlage VII Teil A der StrlSchV genannte Expositionspfade, sofern sie tatsächlich dosisrelevant waren. Zusätzliche Expositionspfade sind zu berücksichtigen, wenn diese aufgrund der örtlichen Besonderheiten des Standorts oder aufgrund der Art der Anlage oder Einrichtung dosisrelevant sein konnten. Zur Abschätzung der Ingestionsdosis sind die in der AVV zu § 47 StrlSchV genannten 10 Lebensmittelgruppen zu betrachten.
Abdeckende Expositionsszenarien	Abdeckende, konservative Szenarien (z. B. Weide-Kuh-Fleisch-Pfad) werden beibehalten, sofern der betreffende Expositionspfad tatsächlich dosisrelevant war.	Prüfung, ob der Grad der Konservativität infolge abdeckender Expositionsszenarien akzeptabel ist; ggf. detaillierte Modellierung der abgedeckten dosisrelevanten Expositionssituationen.
Art der produzierten Lebensmittel in der Umgebung des Standorts	Entsprechend der tatsächlichen Nutzung zur Lebensmittelproduktion.	Entsprechend der tatsächlichen Nutzung zur Lebensmittelproduktion.
Produktionsort der Lebensmittel	Nahrungsmittel und Trinkwasser aus Fließgewässern werden jeweils an der ungünstigsten Einwirkungsstelle erzeugt, sofern die betreffenden Lebensmittel tatsächlich in der Umgebung des Standorts produziert wurden. Der Verzehranteil dieser Lebensmittel beträgt 100 %.	Ortsspezifische Daten zur Lebensmittelproduktion in der Umgebung des Standorts.

	Stufe 1	Stufe 2
Verzehrmenge der hypothetischen Referenzpersonen	95. Perzentil der Verzehrmenge für die dosisdominierende Lebensmittelgruppe, durchschnittliche Verzehrsmengen für alle übrigen Lebensmittelgruppen (generische Daten). Hierbei sind die in der AVV zu § 47 StrlSchV genannten 10 Lebensmittelgruppen zu betrachten.	95. Perzentil der Verzehrmenge für die dosisdominierende Lebensmittelgruppe, durchschnittliche Verzehrsmengen für alle übrigen Lebensmittelgruppen (ortsspezifische Daten). Hierbei sind die in der AVV zu § 47 StrlSchV genannten 10 Lebensmittelgruppen zu betrachten.
Aufenthaltssorte und -zeiten der Referenzpersonen	Dauernder Aufenthalt an der ungünstigsten Einwirkungsstelle. Für die äußere Exposition kann ein Reduktionsfaktor für den Aufenthalt in Gebäuden angesetzt werden, sofern geeignete Daten vorliegen.	Realitätsnahe Aufenthaltsorte und -zeiten in der Umgebung des Standorts, sofern die Summe aus äußerer Strahlenexposition und Strahlenexposition durch Inhalation dosisrelevant sein konnte. Für die äußere Exposition ist ein Reduktionsfaktor für den Aufenthalt in Gebäuden anzusetzen.
Akkumulationszeit in Umweltmedien	Tatsächliche bisherige Betriebsdauer der kerntechnischen Anlage oder Einrichtung	Tatsächliche bisherige Betriebsdauer der kerntechnischen Anlage oder Einrichtung
Dekontaminationseffekte bei Lebensmitteln	Keine Dekontaminationseffekte bei der lebensmitteltechnologischen und haushaltmäßigen Zubereitung von Nahrungsmitteln sowie bei der Trinkwassergewinnung	Keine Dekontaminationseffekte bei der lebensmitteltechnologischen und haushaltmäßigen Zubereitung von Nahrungsmitteln sowie bei der Trinkwassergewinnung

Bewertung des BfS-Stufenkonzepts

Der Leitgedanke des BfS, dass sich der Aufwand bei der retrospektiven Abschätzung der Strahlenexposition im Rahmen der Berichterstattung, auch im Hinblick auf eine Optimierung der eingesetzten Ressourcen, an der Höhe der Strahlenexposition orientieren sollte, vernachlässigt nach Einschätzung der SSK einen wesentlichen Aspekt: Es kann gesellschaftlich wichtig sein, auch sehr geringe Dosen realistisch zu ermitteln, um dem Informationsbedürfnis der Bevölkerung Rechnung zu tragen.

Das BfS begründet die Konservativität der retrospektiven Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen mit dem Ziel, die tatsächliche Strahlenexposition nicht zu unterschätzen. Dazu wird in Stufe 1 ein nur wenig an die Realität angepasstes, konservatives Verfahren vorgeschlagen, das weder imstande ist, die Strahlenexposition der am höchsten exponierten Personen noch die anderer Personen in der Umgebung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen zu ermitteln. Es entspricht weitestgehend dem Vorgehen in Tabelle 3.10 dieser Empfehlung und ist auch nach Einschätzung der SSK nicht als realistisch zu bewerten.

Ziel der Berichterstattung sollte nach Meinung der SSK sein, den Bundestag und die Bevölkerung über die tatsächlich von den kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen ausgehende Strahlenexposition zu informieren. Dies kann sowohl durch Ermittlung der Dosen von höchstexponierten Mitgliedern der Bevölkerung als auch von Dosen, die über definierte

Bevölkerungs- oder Referenzgruppen gemittelt sind, geschehen. Optimal wäre eine Dosisverteilung für die Bevölkerung in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen.

Die vom BfS vorgeschlagene Stufe 2 des Berechnungsverfahrens ist ein Schritt hin zu mehr Realismus, entspricht jedoch noch nicht den in dieser Empfehlung formulierten Anforderungen und von der SSK vorgeschlagenen Stufen der FEPs, Szenarien, Expositionspfade, radioökologischer und menschlicher Parameter (vgl. Kap. 3.5.2 und Tab. 3.11 dieser Empfehlung). Mit dem Konzept des BfS, die Strahlenexposition nicht zu unterschätzen, ist die Strahlenexposition der Referenzpersonen an den realen ungünstigsten Einwirkungsstellen nicht realistisch zu ermitteln. Überdies ist durch Mischung von Mittelwerten und Quantilen von Parametern eine Analyse der Unsicherheit nicht mehr möglich. Sie ist im BfS-Stufenkonzept allerdings auch nicht vorgesehen.

Tab. A.2: Einordnung der Stufe 2 des vom BfS vorgeschlagenen Berechnungsverfahrens in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.

Anwendung	geplante Situation, retrospektiv: BfS-Konzept Stufe 2
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	effektive Dosis und Organdosen von Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle
Modellierung der Exposition	I2: aus tatsächlichem Quellterm einschließlich der tatsächlichen Quellterme der Ableitungen der Betriebszeit
Szenarien und Expositionspfade	S0→S2: Vermischung der drei Stufen S0 – S2
radioökologische Modellparameter	S1→S2: Vermischung der Stufen S1 und S2
Ernährungsgewohnheiten	S0→S1: Vermischung der Stufen S0 und S1
Aufenthaltszeiten	S2: fallspezifische Daten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S2: fallspezifische Daten
Unsicherheiten	keine

Die SSK empfiehlt, die retrospektive Ermittlung der Strahlenexposition bei geplanten Tätigkeiten gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.5.2 vorzunehmen und das vorgeschlagene Stufenkonzept entsprechend zu überarbeiten.

A-2 Vorgehensweise im Ausland

A-2.1 Empfehlung Artikel 31 EURATOM (RP 129)

Die Empfehlung der EU „Guidance on the realistic assessment of radiation doses to members of the public due to the operation of nuclear installations under normal conditions (RP 129)“ (EC 2002) soll primär der retrospektiven Ermittlung der Dosis durch Ableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen im bestimmungsgemäßen Betrieb dienen. Der Schwerpunkt wird daher auf Methoden zur retrospektiven Ermittlung gelegt, wobei aber darauf hingewiesen wird, dass die gegebenen Hilfestellungen zu einem großen Teil aber auch für prospektive Untersuchungen genutzt werden können.

Hinsichtlich des Quellterms wird in der Empfehlung ausgeführt, welche Informationen für eine realistische Ermittlung der Dosis benötigt werden. Dies sind: abgeleitete Nuklide und Aktivität, chemische und physikalische Form, Ort und Bedingungen der Ableitung. Die Ermittlung soll in der Regel auf der Basis jährlicher Ableitungen erfolgen.

Bei der Darstellung von Expositionspfaden wird unterschieden, welche dieser Pfade

- stets²,
- abhängig von lokalen Gegebenheiten³ oder
- normalerweise nicht⁴

zu berücksichtigen sind. Die Zuordnung der Expositionspfade zu diesen Kategorien wird anhand vieler Beispiele, getrennt für Ableitungen mit der Fortluft und mit dem Abwasser, letzteres differenziert nach Art des Vorfluters, diskutiert.

Bei Ableitungen in die Atmosphäre sollen nach RP 129 bevorzugt über mehrere Jahre gemittelte meteorologische Bedingungen der Ausbreitung zugrunde gelegt werden. Für den weiteren Transfer in der Umwelt und in die Nahrungskette können generische Modelle angewandt werden. Bei der Ermittlung von Aktivitätskonzentrationen in Oberflächengewässern und im Abwassersystem sind standortspezifische Betrachtungen erforderlich. Von einer Akkumulierungszeit über 50 Jahre durch den Betrieb der Anlage sollte nach RP 129 ausgegangen werden.

Als Referenzgruppen empfiehlt RP 129 kritische Gruppen heranzuziehen, die normalerweise bis zu einigen 10 Personen umfassen. Diese können entweder aus fallspezifischen Untersuchungen oder auf der Basis generischer Daten definiert werden. Die Referenzgruppen soll repräsentativ für Individuen sein, die wahrscheinlich die höchsten Dosen erhalten. Es kann erforderlich sein, mehr als eine Referenzgruppe zu definieren und zu untersuchen, um zu entscheiden, welche die höchstexponierte ist. Falls nur eine oder zwei Personen – bei nicht extremen Lebensgewohnheiten – eine deutlich höhere Dosis als der Rest der Bevölkerung erhalten, sollten die Referenzgruppen entsprechend klein gewählt werden.

Die Dosis für Personen der Referenzgruppe soll nach RP 129 für die Altersgruppen Kleinkinder (Alter 1 Jahr), Kinder (Alter 10 Jahre) und Erwachsene ermittelt werden. Eine Dosisermittlung speziell für das Ungeborene soll nur dann erfolgen, wenn für dieses besonders relevante Radionuklide, z. B. P-32, abgeleitet werden.

Wenn die Variabilität und Unsicherheit abgeschätzt werden sollen, soll zunächst eine Dosisermittlung auf der Basis bester Schätzwerte der Parameterwerte erfolgen. Ergeben sich mit besten Schätzwerten Dosen in der Größenordnung von 10 μ Sv im Jahr oder darunter, wird es als nicht sinnvoll angesehen, den Aufwand zur Ermittlung von Variabilität und Unsicherheit zu leisten. Mit einer Sensitivitätsanalyse kann darüber hinaus festgestellt werden, welche Eingangsparameter den größten Einfluss auf die Dosis haben und damit besonders sorgfältig ausgewählt werden müssen.

² z. B. bei Ableitungen in die Atmosphäre: Ingestion terrestrischer angebaute Nahrungsmittel, Inhalation, Submersion, Bodenstrahlung; Ableitungen in marine Gewässer: Ingestion von Fisch, Schalentieren und Weichtieren, äußere Gammaexposition beim Aufenthalt am Strand

³ z. B. bei Ableitungen in die Atmosphäre: Ingestion von Waldbeeren, Pilzen, Kaninchen etc.; Ableitungen in marine Gewässer: Ingestion von Algen, Ingestion von auf mit Algen gedüngten Flächen angebaute Produkten, Verzehr von entsalztem Trinkwasser

⁴ z. B. bei Ableitungen in die Atmosphäre: Verzehr von Trinkwasser und Fisch, Direktiongestion von Boden; Ableitungen in marine Gewässer: Inhalation von Gischt, Ingestion von Meerwasser beim Baden

RP 129 weist darauf hin, dass durch Vergleiche mit Messdaten das Ergebnis der Berechnung überprüft werden kann. Eine Validierung der benutzten Modelle ist somit erforderlich. Gegebenenfalls können dann Korrekturen der Modelle und Parameterwerte vorgenommen werden, um zu einem realistischeren Gesamtergebnis zu kommen.

Bewertung

Insgesamt bietet RP 129 keine Formeln zur Berechnung der Strahlenexposition oder Sätze von Parameterwerten an. Die Empfehlung gibt aber viele Hinweise, wie bei der realistischen Ermittlung der Strahlenexposition vorgegangen werden kann und welche Aspekte dabei zu berücksichtigen sind.

Tab. A.3: Einordnung des Verfahrens nach RP 129 in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.

Anwendung	geplante Situation, retrospektiv:
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	effektive Dosis und Organdosen von Referenzgruppen, die als höchst exponierte Gruppen der Bevölkerung angesehen werden können.
Modellierung der Exposition	I2, allerdings mit der Annahme einer 50jährigen Akkumulation.
Szenarien und Expositionspfade	S1→S2: Generische und fallspezifische Daten soweit verfügbar
radioökologische Modellparameter	S1→S2: Generische und fallspezifische Daten soweit verfügbar
Ernährungsgewohnheiten	S1→S2, abhängig von der Höhe der Strahlenexposition
Aufenthaltszeiten	S1→S2, abhängig von der Höhe der Strahlenexposition
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1→S2, abhängig von der Höhe der Strahlenexposition
Unsicherheiten	Unsicherheitsanalyse bei Dosen > 10 µSv pro Jahr

A-2.2 IAEA Safety Series No. 19

Der IAEA-Bericht „*Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, ... expands on and supersedes previous advice published in IAEA Safety Series No. 57*“ (IAEA 2001) enthält Modelle, mit denen Auswirkungen auf die Umwelt durch Ableitungen radioaktiver Stoffe für die Entscheidungsfindung in Genehmigungsverfahren ermittelt werden können. Die errechneten Strahlenexpositionen für Einzelpersonen sowie Kollektivdosen werden als prognostische Werte bezeichnet, die mit einschlägigen Dosisgrenzwerten verglichen und bei der Festlegung von Emissionsgrenzwerten zugrunde gelegt werden können. Sie können darüber hinaus genutzt werden, um die Auswirkungen bereits genehmigter Tätigkeiten zu beurteilen. Die generischen Modelle des IAEA-Berichts wurden unter der Randbedingung ausgewählt, dass sie einfach und robust sein sollen.

Im IAEA-Bericht wird ein iteratives Verfahren angegeben, bei dem die Einhaltung eines Dosiskriteriums mit unterschiedlichem Aufwand überprüft wird. In der ersten Stufe wird keine Verdünnung der abgeleiteten radioaktiven Stoffe in der Umgebung angenommen. Wird das Dosiskriterium in diesem Fall nicht eingehalten, wird in der zweiten Stufe die Strahlenexposition mit einem generischen Modell errechnet. Ist auch dann noch das Dosiskriterium

nicht eingehalten, werden die Randbedingungen der generischen Modellierung mit den standortspezifischen Gegebenheiten abgeglichen und die Dosis mit gegebenenfalls modifizierten Annahmen ermittelt.

Die generische Modellierung soll nach dem IAEA-Bericht gewährleisten,

- dass die Dosis für Personen der kritischen Gruppe grundsätzlich eher überschätzt wird, und
- dass unter keinen Umständen die Dosis um mehr als einen Faktor 10 unterschätzt wird.

Ermittelt wird mit der Modellierung des IAEA-Berichts die maximale Dosis in einem Jahr während der Betriebszeit der jeweiligen Einrichtung. Dabei wird von einem Betrieb über 30 Jahre ausgegangen.

Die atmosphärische Ausbreitung wird im IAEA-Bericht mit einem Gauß-Fahnenmodell berechnet. Wegen der zunehmenden Unsicherheiten dieser Modellierung bei größeren Entfernungen von der Emissionsquelle soll bei Aufpunkten in größerer Entfernung als 20 km für diese Orte die für die Entfernung von 20 km ermittelte Dosis zugrunde gelegt werden. Bei der Modellierung der Ausbreitung in Gewässern wird zwischen Fließgewässern, Flussmündungsgebieten, Küstengewässern, kleinen Seen und großen Seen unterschieden. Darüber hinaus erfolgt eine Modellierung der Ableitung in die Kanalisation.

Hinsichtlich der Lebensgewohnheiten werden im IAEA-Bericht die beiden Gruppen Erwachsene und Kleinkind (Alter 1 Jahr) unterschieden.

Für die Ermittlung von Kollektivdosen werden im IAEA-Bericht keine Modelle angegeben, sondern nuklidspezifische Konversionsfaktoren in Personen-Sv/Bq für verschiedene Arten der Ableitung. Die Konversionsfaktoren sind aus verschiedenen Berechnungen abgeleitet worden.

Für die modifizierte Dosisermittlung auf der zweiten Stufe werden folgende Bedingungen angegeben, die vorrangig gegebenenfalls fallspezifisch angepasst werden sollten:

- Aufenthaltsort der Mitglieder der hypothetischen kritischen Gruppe sowie Ort der Produktion von Lebensmitteln,
- Verzehr- und Aufenthaltsgewohnheiten der Mitglieder der hypothetischen kritischen Gruppe,
- mittlerer jährlicher Abfluss von Oberflächengewässern,
- mittlere Windgeschwindigkeit,
- spezifische Expositionspfade,
- standortspezifische Kd-Werte und chemische Form von Radionukliden,
- Migration der Radionuklide in den Boden, falls die äußere Exposition relevant ist.

Falls auch mit diesen Modifizierungen die Einhaltung des Dosiskriteriums nicht gezeigt werden kann, werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

- Reduzierung der Ableitung,
- Modifizierung der Ableitungsbedingungen,
- detaillierte standortspezifische radioökologische Untersuchung.

Bewertung

Das Vorgehen der IAEA Safety Series No. 19 ist bestimmungsgemäß nicht realistisch. Es werden zwar standortspezifische Daten genutzt, aber die Szenarien und Expositionspfade sind nicht realistisch. Auch hier findet man eine Mischung von realistischen und konservativen Elementen, die speziell eine Analyse der Unsicherheiten unmöglich macht.

Tab. A.4: Einordnung des Verfahrens nach IAEA Safety Series No. 19 in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8 dieser Empfehlung.

Anwendung	geplante Situation, prospektiv und retrospektiv
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	effektive Dosis und Organdosen einer kritischen Gruppe und Kollektivdosen der Bevölkerung in der gesamten Umwelt
Modellierung der Exposition	I0: aus abdeckendem hypothetischem Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S0→S1: Vermischung von abdeckenden und unmöglichen mit realistischen möglichen generischen Szenarien und Expositionspfaden
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Daten
Ernährungsgewohnheiten	S2: fallspezifische Daten
Aufenthaltszeiten	S2: fallspezifische Daten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S2: fallspezifische Daten
Unsicherheiten	keine

A-2.3 ICRP 101

Die ICRP-Empfehlung 101 „*Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process*“ (ICRP 2006) hat das Ziel, Hilfestellung bei der Ermittlung der individuellen Dosis zu geben, wenn die Übereinstimmung mit den von der ICRP für den Schutz der Bevölkerung empfohlenen Zielen überprüft werden soll. Sie ist daher anwendbar für geplante Tätigkeiten, existierende Situationen und Notfallsituationen, jeweils zur Ermittlung der prospektiven wie auch der retrospektiven Dosis.

ICRP 101 enthält kein vollständiges Modell mit entsprechenden Parametersätzen, um eine Dosis zu ermitteln, sondern es werden die Randbedingungen dargestellt, die bei verschiedenen möglichen Vorgehensweisen zu beachten sind:

- Die Dosis soll für eine „repräsentative Person“ abgeschätzt werden. Diese Person soll eine Dosis erhalten, die repräsentativ für höher exponierte Personen der Bevölkerung ist. Die Dosis der repräsentativen Person ist äquivalent der mittleren Dosis der Personen der kritischen Gruppe in früheren ICRP-Empfehlungen und ersetzt diese.
- Es wird als ausreichend angesehen, die Altersgruppen Kleinkind (Alter 1 Jahr, repräsentativ für bis 5-Jährige), Kind (Alter 10 Jahre, repräsentativ für 6- bis 15-Jährige) sowie Erwachsener (repräsentativ für 16- bis 70-Jährige) zu betrachten.
- Die ICRP definiert ein „specified individuum“, dessen Dosis sich aus den Eigenschaften der Quelle und der Verknüpfung von resultierenden Konzentrationen radioaktiver Stoffe

in der Umwelt mit Lebens- und Verzehrsgewohnheiten der Person ergibt. Die Dosisabschätzung und -ermittlung kann in einem iterativen Prozess erfolgen, in dem – ausgehend von eher konservativen Annahmen – auf einzelnen Stufen festzulegen ist, ob fallspezifische oder realistische Informationen benötigt werden.

- Eine ausreichend robuste Ermittlung der Dosis soll erreicht werden. Dazu sind die Variabilität sowie Unsicherheiten zu beachten. Bestimmte Parameterwerte können deterministisch festgelegt werden, für andere Verteilungsfunktionen implementiert werden. Die konkrete Ausgestaltung der Berücksichtigung von Variabilität und Unsicherheiten sollte von der Regulierungsbehörde festgelegt werden.
- Abhängig von der spezifischen Situation und der zur Verfügung stehenden Datenbasis kann die Dosis mit rein deterministischen Methoden, mit rein probabilistischen Methoden oder anhand einer Mischung aus beiden Methoden ermittelt werden.
- Bei der Charakterisierung der repräsentativen Person kann die Einbeziehung von Stakeholdern eine wichtige Rolle spielen. Die Ausgestaltung kann zwischen einzelnen Ländern aufgrund unterschiedlicher kultureller, sozialer und politischer Rahmenbedingungen sehr stark variieren.

Grundsätze des Vorgehens bei der Auswahl von Parameterwerten, je nachdem ob eine probabilistische oder deterministische Berechnung angestrebt wird, sind in Tabelle A.5 für die Ermittlung der Konzentration radioaktiver Stoffe in Umweltmedien, die Lebensgewohnheiten, die Dosiskoeffizienten sowie die Dosis der repräsentativen Person zusammen gestellt.

Tab. A.5: Berechnungsmethoden nach ICRP101

Parameter für die Dosisermittlung	Berechnungsmethode	
	probabilistisch	deterministisch
Konzentration radioaktiver Stoffe in Umweltmedien	Verteilung geschätzter oder gemessener Werte	feste Parameterwerte
Lebensgewohnheiten	Bandbreite oder feste Werte	Mittelwert der höher exponierten Gruppe oder 95. Perzentil nationaler oder regionaler Werte
Dosiskoeffizienten	altersabhängige feste Werte	altersabhängige feste Werte
Dosis der repräsentativen Person	Methode durch Betreiber oder Behörde auszuwählen; die Wahrscheinlichkeit, dass eine zufällig aus der Bevölkerung ausgewählte Person eine höhere Dosis erhält als die der repräsentativen Person, soll kleiner als etwa 5 % sein	Ergebnis aus der Verarbeitung der oben genannten Werte

Bewertung

Wegen des generischen Charakters der Empfehlung ICRP 101 entfällt eine direkte Einordnung in das Schema dieser Empfehlung nach Tabelle 3.8. Die empfohlene Vorgehensweise ist aber weitgehend in Übereinstimmung mit dieser Empfehlung der SSK.

A-2.4 Ermittlung der Strahlenexposition in Frankreich

Die in Frankreich benutzten Methoden zur Ermittlung der Strahlenexposition wurden auf der Grundlage zweier Quellen betrachtet. Die Darstellung hier beruht zum einen auf einem Gutachten des TÜV (2005), in dem die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Strahlenexposition in Europa analysiert wurden. Da die Genehmigungsbehörden in Frankreich seitdem umorganisiert wurden, hat sich die SSK zum anderen im Jahr 2009 über die aktuellen Entwicklungen in Frankreich informieren lassen (Chartier 2009).

In (TÜV 2005) wird die Vorgehensweise in Frankreich dargestellt. Atomrechtliche Genehmigungen erteilen in Frankreich die Minister für Industrie und Umwelt. Das ausführende Organ ist die Direction Générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection (DGSNR). Das Office de Protection contre les Radiations Ionisantes (OPRI) trug bisher die Verantwortung für Gesundheit und Umweltüberwachung sowie für den Schutz der Bevölkerung und Beschäftigten vor ionisierender Strahlung. Die Dosisermittlung bei Ableitungen aus Kernkraftwerken auf die Bevölkerung für das OPRI wurde vom Institute de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) durchgeführt. Inzwischen wurde das Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN) aus IPSN und OPRI gegründet, das vom DGSNR zu Sachverständigenfragen eingeschaltet wird. Da die in (TÜV 2005) verwendeten Unterlagen noch vom IPSN stammen und im Jahre 2002 zur Verfügung gestellt wurden, wird im Folgenden auch nur Bezug auf die Vorgehensweise des früheren IPSN genommen.

In Frankreich existiert keine rechtlich festgelegte Vorschrift zur Berechnung der Strahlenexposition. Der Betreiber einer Anlage kann die Modelle und Methoden selbst wählen und eigene Annahmen über die zu betrachtende Personengruppe (critical group) treffen. Falls die Ermittlung einer Dosis für ein bestimmtes Vorhaben erforderlich ist, prüfte und verifizierte das frühere IPSN die Ergebnisse der vorgelegten Berechnungen mit eigenen Methoden. Das IPSN führte die radioökologischen Berechnungen mit den Modellen COTRAM2⁵ (Ausbreitungsmodell) (Deville-Cavelin et al. 1994) und FOCON96 (Dosismodell) (Morin 1995) durch.

In (TÜV 2005) konnten aus Frankreich nur wenig konkrete Vorgaben zur Ermittlung der Referenzgruppe in Erfahrung gebracht werden. Generell werden zunächst Lebensweise, Demographie und Wohnumgebung der Bevölkerung charakterisiert, um den Personenkreis herauszufinden, der die höchste Dosis erhält. Grundlage hierfür bilden Erhebungen zur Landwirtschaft, Siedlungsstruktur und spezielle Umfragen. Nach französischer Auffassung kann es mehrere Referenzgruppen, z. B. ähnlich wie in England Fischer und Bauern, geben, die jeweils repräsentativ die höchste Dosis durch einen Belastungspfad aufweisen. Daneben können weitere Gruppen „groupes témoin“ definiert werden, die jeweils die höchste Dosis aus der Gesamtheit der übrigen Pfade erhalten. Die Dosis soll möglichst realistisch abgeschätzt werden. Dementsprechend werden als Referenzperson keine hypothetischen Einzelpersonen oder Kleingruppen, sondern immer eine größere Zahl an Personen zugrunde gelegt. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Informationen ist davon auszugehen, dass häufig ein Teil der Bewohner eines dem KKW naheliegenden Dorfes betrachtet wird, wobei die Bevölkerung nach den oben genannten Kriterien nicht unbedingt im nächstgelegenen Dorf zu finden sind. Teils werden auch Gruppen von besonderem Interesse betrachtet. Dies können beispielsweise Kinder sein. Da zum Zeitpunkt der Untersuchung von (TÜV 2005) keine Koeffizienten oder Daten für nicht erwachsene Personen vorlagen, ist davon auszugehen, dass die rechnerische Ermittlung von Strahlenexpositionen der jüngeren Altersgruppen zumindest früher von untergeordneter

⁵ COefficient de TRansfer Atmosphérique et Surfaccique Moyens

Bedeutung war. Neben der effektiven Dosis werden die Organäquivalentdosen von Schilddrüse, Knochenmark und Magen-Darmtrakt errechnet.

Zum Auffinden des Referenzraumes („espace reference“) wird der Bereich um die Anlage, basierend auf der lokalen meteorologischen Situation (z. B. Windrose), in verschiedene durch die Emission beeinflusste Zonen unterteilt. Im Wesentlichen gibt es eine Haupt- und Nebenzone sowie Zonen ohne nennenswerte Beeinflussung. Informationen über Verzehrsgewohnheiten und Nahrungsmittelgewinnung durch Viehzucht und Ackerbau werden aus Vor-Ort-Informationen abgeleitet. Ferner wird davon ausgegangen, dass die gesamte Nahrung lokalen Ursprungs ist.

In Frankreich werden die mittleren Verzehrdaten von Erwachsenen aus den Untersuchungen für die Bezirke „Zones Economiques d'Aménagement du Territoire (ZEAT)“ und für Gesamtfrankreich sowie die vom ISPN abgeleiteten höheren Verzehrsmengen zugrunde gelegt. Im Hinblick auf Milchprodukte werden Bearbeitungsschritte in der Nahrungsmittelaufbereitung durch entsprechende Transferkoeffizienten berücksichtigt. Abhängig von der Mobilität des betrachteten Radionuklids kann der Bearbeitungsschritt zu einer Erhöhung oder zu einer Erniedrigung der Aktivitätskonzentration führen. Abgesehen von einigen unterschiedlichen Faktoren und unterschiedlichen Werten ähnelt das Dosismodell FOCON aus Frankreich dem Modell zum Aktivitätstransfer in Nahrungsmittel der AVV zu § 47 StrlSchV.

Für die Dosisberechnung bei Ausbreitung mit Luft entsprechen die verwendeten Pfade mit Ausnahme des Muttermilchpfades den Pfaden der AVV zu § 47 StrlSchV. Die Ausbreitungsmodellierung unterscheidet sich jedoch gegenüber den Modellen der AVV zu § 47 StrlSchV. Es wird ein Gaußsches Wolkenmodell verwendet, und die Gamma-Wolkenstrahlung wird nach dem Gamma-Immersionsmodell gerechnet.

Das Gaußsche Wolkenmodell ist im Gegensatz zum Gauß-Fahnenmodell ein Episodenmodell. Es beschreibt den zeitlichen Verlauf der Aktivitäts- bzw. Konzentrationsverteilung der freigesetzten Wolke. Eine kontinuierliche Emission wird hierzu in einzelne Teilwolken zerlegt, die dann einzeln zeitlich verfolgt werden. Der atmosphärische Ausbreitungskoeffizient CTA (Coefficient de Transfer Atmosphérique – Ausbreitungsfaktor) ist demnach durch das Zeitintegral der einzelnen Konzentrationen gegeben. Dabei werden zwei meteorologische Zustände unterschieden, nämlich Diffusionskategorie normal (Diffusion normal – DN) und Diffusionskategorie schwach (Diffusion faible – DF). Üblicherweise wird die Umgebung um die Quelle in 18 Sektoren je 20° unterteilt. Im Gegensatz zum englischen und deutschen Modell werden die Beiträge, die in einen Sektor fallen, nicht azimutal gemittelt, sondern nach Stabilitäts- und Windgeschwindigkeitsklassen aufsummiert. Ortspezifische meteorologische Daten liegen im Allgemeinen nicht vor. Zugrunde gelegt werden die Daten einer 1-dimensionalen, nicht in Sektoren aufgeteilten, prozentualen Wind- und Regenstatistik aus einer allgemeinen Untersuchung an vier KKW-Standorten.

Ein Vertreter des IRSN hat zu den aktuellen Entwicklungen zur Problematik der realistischen Ermittlung der Strahlenexposition in Frankreich Folgendes ausgeführt (Chartier 2009), wobei er prospektive und retrospektive Ermittlungen der Strahlenexposition für regulatorische und andere Zwecke unterschied:

Nach dem Gesetz n°2006-686 vom 13. Juni 2006 (République française 2006) ist nach Art. 28.II der Betreiber einer kerntechnischen Anlage oder Einrichtungen verantwortlich für die Sicherheit der Anlage einschließlich des Strahlenschutzes. Daher sind auch die Betreiber verantwortlich für die Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitungen radioaktiver Stoffe im Normalbetrieb. Dies gilt auch für die Wahl der Modelle, Annahmen und Methoden.

Das IRSN ist dafür zuständig, eine Stellungnahme zur ermittelten Strahlenexposition abzugeben. Dazu gehört:

- eine kritische Betrachtung der vom Betreiber verwendeten Modelle, Annahmen und Methoden,
- eine unabhängige Ermittlung der Strahlenexposition mit den vom IRSN benutzten Modellen, Annahmen und Methoden und
- eine Erklärung zu möglichen Unterschieden der ermittelten Expositionen.

Diese getrennte Vorgehensweise führt dazu, dass die Richtigkeit der Ermittlungen unterschiedlich sein kann. Es wird akzeptiert, dass weniger realistische und mehr konservative Modelle benutzt werden können, wenn die Strahlenexpositionen sehr niedrig sind. Realismus wird von den unterschiedlichen handelnden Institutionen durchaus nicht einheitlich gesehen. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die französischen Behörden die Genehmigungswerte für die Ableitungen von radioaktiven Stoffen aus einer Anlage jederzeit herabsetzen können.

Auch in Frankreich wurde über die Umsetzung der Realismusforderung des Artikels 45 der EURATOM-Grundnormen debattiert. Unter Einbindung der betroffenen Ministerien, der Betreiber, des IRSN und von Experten diverser Stakeholder-Organisationen konnte Konsens erreicht werden, wie die realistische Ermittlung der Strahlenexposition zu interpretieren sei. In einem Grundsatzdokument, das vom französischen Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) bestätigt wurde, heißt es *„Die Dosen für die am höchsten exponierten Personen sollten in der höchsten realistischen Weise mit der Angabe von Vertrauensbereichen ermittelt werden unter Vermeidung systematischer konservativer Annahmen und unter Anwendung der besten Modelle, die das Verhalten der Radionuklide in der Umwelt und im Organismus beschreiben.“* (CSHPF 1999).

In Frankreich werden folgende Anwendungen von Ermittlungen der Strahlenexposition unterschieden:

- Prospektive Ermittlung im Rahmen von Genehmigungsverfahren,
- Retrospektive Ermittlungen der Strahlenexposition der Bevölkerung, jährlich für jede Anlage,
- Retrospektive Ermittlungen im Rahmen epidemiologischer Studien,
- Expositionsermittlungen im Rahmen radioökologischer Studien.

Ziel der prospektiven Ermittlung im Rahmen von Genehmigungsverfahren ist es, Grenzwerte für Ableitungen radioaktiver Stoffe auf der Grundlage einer guten Schätzung des damit verbundenen Risikos festzulegen, nicht auf der Grundlage eines weit überschätzten Risikos. Die Schwierigkeit besteht darin, das Risiko nicht zu unterschätzen. In der Praxis wird das so gehandhabt, dass die Exposition für eine reale Referenzgruppe, die klein sein kann und sogar nur aus einem Individuum bestehen kann, jedoch nicht mit extrem unrealistischen und nicht beobachteten Gewohnheiten, ermittelt wird. Da bei Ableitungen in einen Vorfluter solche Referenzgruppen schwierig zu ermitteln sein können, geht man dort pragmatisch von einer hypothetischen Referenzgruppe aus. Es werden mehrere Altersgruppen betrachtet, wobei alle realen Expositionspfade berücksichtigt werden. Es werden dabei standortspezifische Daten – auch für die Wetterstatistik – und ein realistischer Nuklidvektor der beantragten Ableitungen zugrunde gelegt. Die Verzehrsmengen werden nationalen und lokalen Erhebungen entnommen, und es wird – wenn erforderlich – ein Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel berücksichtigt. Es wird eine Sensitivitätsanalyse und eine Analyse der Unsicherheit unsicherer Parameter empfohlen. Die Betreiber benutzen ihre eigenen Modelle und Daten, müssen diese jedoch rechtfertigen.

Als Schwäche dieser Methodik wird gesehen, dass die Ermittlungen nur für eine begrenzte Zeit ihre Gültigkeit bewahren, da die Orte der Referenzgruppen sich verändern können, sich die Gewohnheiten der Mitglieder der Referenzgruppen ändern können, neue Modelle verfügbar werden oder die Dosiskoeffizienten sich ändern können.

Da jedoch jährlich eine retrospektive Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik durchzuführen ist, können die prospektiven Ermittlungen mit diesen evaluiert und gegebenenfalls revidiert werden. Hier kommt es den französischen Behörden zugute, dass die Genehmigungsgrenzwerte – wenn nötig – jederzeit geändert werden können.

Die Ergebnisse der jährlichen retrospektiven Ermittlung der Strahlenexposition der Referenzgruppen der Bevölkerung in der Umgebung einer Anlage sind nach Anordnung vom 26. November 1999 (République française 2013) durch den Betreiber zu veröffentlichen. Die Veröffentlichung hat die Dosen der Referenzgruppen für das vergangene Jahr so realistisch wie möglich darzustellen. Dazu benutzen die Betreiber die gleichen Methoden wie für die prospektive Ermittlung der Strahlenexposition. Periodisch werden die Referenzgruppen verifiziert. Die angesetzten realen Ableitungen bleiben insofern abdeckend, da für Nuklide, die nicht nachgewiesen wurden, die Nachweisgrenzen als Ableitungen zugrunde gelegt werden.

Die Methodik hat auch Eingang in einen im IRSN erarbeiteten Leitfadens gefunden (IRSN 2002).

Die Empfehlungen des Leitfadens, die jedoch nicht verbindlich sind, wurden von der French Safety Authority und dem French Ministry of Public Health bestätigt.

Im Rahmen einer epidemiologischen Studie wurde abweichend vom einfachen Verfahren des Vergleichs konzentrischer Regionen um kerntechnische Anlagen für die sogenannte Evrard-Studie (Evrard et al. 2006) zur Untersuchung kindlicher Leukämien in der Umgebung von französischen kerntechnischen Anlagen vom IRSN und INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale) ein neues Verfahren der Ermittlung der Strahlenexposition entwickelt.

Diese Studie umfasst viele Anlagen, bei denen für die 20 km-Umkreise um die Anlagen die Definition von Vergleichszonen auf der Grundlage einer retrospektiven Ermittlung der Strahlenexpositionen für gleiche Dosiskategorien vorgenommen wurde. Diese Studie wurde als Machbarkeitsstudie für die Dosisermittlung am Beispiel der Ableitungen über die Fortluft durchgeführt. Es wurden die effektive Dosis und die Äquivalentdosis für das rote Knochenmark für Kinder ermittelt. Es wurde angenommen, dass die Kinder sich ständig im jeweiligen Distrikt aufgehalten haben. Dann wurden mit den mittleren Ableitungen der letzten 10 Jahre anhand realer Wetterdaten und der tatsächlichen Schornsteinhöhe sowie nationaler Verzehrsmengen unter Berücksichtigung des Anteils lokal angebaute Nahrungsmittel die Dosen ermittelt (Eine Beispielabbildung für das Ergebnis dieses Verfahrens ist in der SSK-Stellungnahme zur KiKK-Studie zu finden; siehe SSK 2009, Abb. 4-118).

In einer großen radioökologischen Studie wurde die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague durch die Groupe Radioecologie Nord-Cotentin (GRNC) untersucht (GRNC 2002). Die Gruppe umfasste französische Experten von IRSN, AREVA, EDF⁶, ANDRA⁷, Defence, ausländische und NGO-Experten. Sie wurde von der französischen Regierung eingesetzt, um die Erhöhung kindlicher Leukämien in der

⁶ Électricité de France SA

⁷ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs

Umgebung von La Hague zu untersuchen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde die bisher umfangreichste Ermittlung der Strahlenexposition und des Risikos in Frankreich durchgeführt.

Dazu gehörte die Überprüfung der Ableitungen der Anlagen über ihren gesamten Betriebszeitraum für den Normalbetrieb und zwei Störfälle. Die Ergebnisse von 500 000 Messungen der Umweltradioaktivität wurden geprüft, von denen 20 000 im Rahmen der Ermittlung der Strahlenexposition nutzbar waren. Die benutzten Modelle wurden sorgfältig evaluiert und mittels Benchmarks getestet und validiert. Lokale Verzehrsgewohnheiten und Daten über den Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel wurden ermittelt. Es wurden die Äquivalentdosen für das rote Knochenmark ermittelt und das Risiko in der Umgebung von La Hague mit dem einer fiktiven Referenzgruppe gleicher Altersstatistik verglichen. Eine Analyse der Unsicherheiten der Expositionen und der Risiken wurde mit zwei unabhängigen Methoden durchgeführt. Ausführliche Darstellungen sind im Internet zu finden⁸. Die Methodik der Untersuchungen der GRNC wird in Frankreich als Idealfall einer realistischen Ermittlung der Strahlenexposition angesehen.

Bewertung

Die Verfahren in Frankreich nach der Darstellung in (Chartier 2009) mit ihrer Anforderung, mit dem bestmöglichen radioökologischen Modell entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik unter Zugrundelegung aller verfügbaren Information den Wert der Strahlenexposition so realistisch wie möglich zu schätzen, entsprechen nach Einschätzung der SSK weitestgehend der Realismusforderung der EURATOM-Grundnormen und sind im Einklang mit dieser Empfehlung der SSK (Tab. A.6). Das Verfahren der GRNC (Tab A.7) ist wohl das Beste, was ohne die Anforderungen einer Kohortenstudie (Tab. 3.13 dieser Empfehlung) getan werden kann.

Tab. A.6: Einordnung der Ermittlung der Strahlenexposition für regulatorische Zwecke in Frankreich in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.

Anwendung	geplante Situation, prospektiv und retrospektiv
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	effektive Dosis und Organdosen einer realen Referenzgruppe, die die höchsten Expositionen erhält. Im Falle des Abwasserpfads kann die Referenzgruppe hypothetisch sein.
Modellierung der Exposition	I1→I2: aus hypothetischem Quellterm (bester Schätzwert) für die Genehmigung und mit tatsächlichem Quellterm in der Folge
Szenarien und Expositionspfade	S2: fallspezifische und existierende
radioökologische Modellparameter	S2: fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Ernährungsgewohnheiten	S2: fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S2: fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S2: fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Unsicherheiten	Analyse der Unsicherheiten und Validierung erforderlich

⁸ http://www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/Environnement/surveillance-environnement/GRNC/Pages/sommaire.aspx

Das in Evrard et al. (2006) benutzte Verfahren stellt eine interessante Machbarkeitsstudie zur Kartierung der Strahlenexposition als Folge von Ableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen über die Fortluft dar (siehe Tab. A.7). Es ist als realistisch einzustufen. In Bezug auf die übrige Parameterwahl ist sie mit S1→S2 einzustufen.

Tab. A.7: Einordnung der Ermittlung der Strahlenexposition nach GRNC für die Ableitungen aus der Wiederaufarbeitungsanlage La Hague in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.

Anwendung	geplante Situation, retrospektiv
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Organdosen realer Referenzgruppen, die die höchsten Expositionen erhalten
Modellierung der Exposition	I2→I4: alle verfügbaren Daten aus I2 bis I4
Szenarien und Expositionspfade	S2→S3: fallspezifische Daten mit Unsicherheiten (S2) mit Berücksichtigung individueller Unterschiede (S3)
radioökologische Modellparameter	S2→S3: fallspezifische Daten mit Unsicherheiten (S2) mit Berücksichtigung individueller Unterschiede (S3)
Ernährungsgewohnheiten	S3: fallspezifische Daten mit Unsicherheiten
Aufenthaltszeiten	S3: individuelle Daten
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	S3: individuelle Daten
Unsicherheiten	probabilistische und possibilistische Analyse der Unsicherheit

A-2.5 Ermittlung der Strahlenexposition im Vereinigten Königreich

Die nachfolgenden Ausführungen zur Ermittlung der Strahlenexposition beschreiben die Vorgehensweise der Food Standards Agency (FSA). Sie entstammen aus (TÜV 2005) und sind auf die Ausbreitung mit Luft sowie auf den in (TÜV 2005) geltenden Untersuchungszeitpunkt 2002 bezogen.

Den Verbleib und die Verwendung von radioaktivem Abfall regelt das Radioactive Substances Act (RSA) 1993. Unter diesem Gesetz war das Ministry of Agriculture, Fisheries and Foods (MAFF) bis zum Jahr 2000 Regulierungsbehörde für die Vergabe von Genehmigungen für die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken.

Die FSA definiert die kritische Gruppe als eine hypothetische Gruppe, die keinen Bezug zu existierenden Einzelpersonen aufweisen muss. Die Dosisermittlung basiert zwar auf beobachteten Lebensgewohnheiten, zukünftige Änderungen, wie z. B. die mögliche Kultivierung von brachliegendem Land, werden mit berücksichtigt. Die für die Genehmigung von Anlagen abgeschätzte Dosis soll eine obere Grenze darstellen und höher sein als die reale Dosis der existierenden kritischen Gruppe. Es werden zwei unterschiedliche Dosisvorhersagen getroffen. Es werden eine potenziell mögliche Dosis (possible dose) und eine wahrscheinliche Dosis (probable dose) definiert, wobei für Genehmigungen nur die potenziell mögliche Dosis zugrunde gelegt wird. Die Vorgehensweise der FSA stand aber im Untersuchungszeitraum von (TÜV 2005) in Diskussion. Es wurde hierzu ein Unterausschuss der NDAWG (National Dose Assessment Working Group) gebildet, der sich unter anderem mit den impliziten Annahmen des lokalen Lebensmittelkonsums befasst. Angesichts der laufenden Entwicklung sind die vorliegenden Informationen nicht aktuell.

In der Regel werden 2 kritische Gruppen definiert. Die eine Gruppe steht für die Inlandbewohner, die andere für Bewohner der Küstenregionen. Farmer und Fischer stellen die typischen erwachsenen Vertreter der beiden Gruppen dar. Es kann vorkommen, dass eine kombinierte Gruppe existiert, die Nahrung aus der Landwirtschaft und aus dem Meer bezieht. Dann werden beide Pfadsysteme betrachtet. Während die National Radiological Protection Board (NRPB) unwahrscheinliche Pfadkombinationen bei ihren Berechnungen ausschließt, kombiniert die FSA eher solche Pfade.

Die FSA betrachtet derzeit vier Altersgruppen (1-, 10- und 15-Jährige, Erwachsene). Da im Gegensatz dazu die NRPB neben vier Altersgruppen bei Erfordernis auch das 3 Monate alte Kind in die Untersuchung mit einbezieht, hat die FSA angekündigt, wenn notwendig, den 3 Monate alten Säugling mit in ihre Betrachtung aufzunehmen.

In England wird die effektive Dosis ermittelt. Die berücksichtigten Pfade bei der Dosisberechnung entsprechen den Pfaden, die in der AVV zu § 47 StrlSchV zugrunde gelegt sind sowie einem zusätzlichen Pfad „Ingestion Luft-Tier-Tierprodukte“. Da der Säugling standardmäßig nicht betrachtet wird, liegt allerdings keine Information zu „Muttermilchpfaden“ vor.

Zur Berechnung der Dosis wird von der FSA angenommen, dass 100 % der genehmigten Emission ausgeschöpft wird. Die Aufenthaltsorte der kritischen Gruppe (determining habitation) sind die der Anlage am nächsten befindlichen, tatsächlich existierenden Gebäude, die bewohnbar sind. Dort wird die externe Strahlenexposition inklusive Inhalation bestimmt. Dabei wird unterstellt, dass die Bewohner der „determining habitation“ sich zur Hälfte oder überwiegend in den Gebäuden aufhalten und solche lokalen Produkte konsumieren, die am Ort der höchsten Einwirkung gewonnen werden.

Im Hinblick auf die Exposition durch kontaminierte Nahrung wird von der FSA zunehmend ein realistischerer Ansatz verfolgt als von der Vorgängerbehörde. Die Annahmen zur Aufnahme und Produktion von Nahrungsmitteln sollen immer mehr auf standortspezifisch erhobenen Daten mit einem Umfragebereich von bis zu 5 km um die Anlage mit Priorität der Nahrungsmittelproduktion innerhalb eines 3 km-Radius basieren. Für die Inlandbewohner werden die „terrestrial food groups“ ermittelt. Die Auswahl basiert auf der momentan vorliegenden Anbaupraxis und potenziellen Produktionsmöglichkeiten. Meist werden Blattgemüse, Wurzelgemüse, Kartoffeln, sonstiges Gemüse, Hülsenfrüchte, Gartenfrüchte, Milch, Rind-, Lamm- und Geflügelfleisch sowie Eier mit in die Ermittlung einbezogen. Die Informationen werden aus Vor-Ort-Erkundungen und lokalen Behördenkenntnissen gewonnen.

Bei der Festlegung des Ortes der Nahrungsgewinnung (reference location) muss die Voraussetzung gegeben sein, dass ausreichend Fläche für Viehzucht und Landwirtschaft vorhanden ist, um den gesamten Umfang der betrachteten pflanzlichen Nahrungsmittel zu ernten. Um dies zu gewährleisten, wird ein Referenzort festgelegt, der mindestens 100 m von der Anlage entfernt ist, auch wenn eine anlagennähere Produktion vorliegt. Wenn geeignetes Gelände zur Landwirtschaft vorhanden ist, wird die Nutzung unterstellt und davon ausgegangen, dass ein Großteil der Nahrung lokal gewonnen wird (Farmer). Existiert kein geeignetes Gelände um das Kraftwerk, werden die Annahmen zu Ackerbau und Viehzucht entsprechend variiert bzw. reduziert.

Aus den regionalen Umfragen werden die Ernährungsgewohnheiten einzelner Personen ermittelt und über die bei Ausschöpfung der Emissionsgrenzwerte berechneten Aktivitätskonzentrationen in der Nahrung die personenbezogene Dosis für jede Nahrungsmittelgruppe bestimmt. Die Dosen aus den Nahrungsmittelgruppen werden personenbezogen summiert. Aus der so gewonnenen Dosisverteilung in der Bevölkerung wird das 97,5te Perzentil als „possible dose“ der kritischen Gruppe verwendet.

Die Vorgehensweise der FSA, regional Verzehrsgewohnheiten zu erheben, war zum Untersuchungszeitpunkt von (TÜV 2005) neu und unterscheidet sich vom Vorgehen der früheren Genehmigungsbehörde Ministry of Agriculture, Fisheries and Foods (MAFF). Die faktorielle Gewichtung aus den unterschiedlichen Erhebungen ist nicht bekannt. Das MAFF hat die Top 2 Methode zugrunde gelegt. Hier wird von zwei konservativ ausgewählten Nahrungsmittelgruppen das 97,5te Perzentil und für die darüber hinaus zu betrachtenden Nahrungsmittelgruppen die Mittelwerte der Verzehrsmengen genommen.

Die für die in (TÜV 2005) zum Vergleich mit den Modellen der AVV herangezogenen Modelle aus England sind die von der FSA verwendeten Gaußsche Fahnen-Ausbreitungsmodelle für Kurz- und Langzeitausbreitung aus den Berichten R91 bis R122 des NRPB (1979, 1981) und das von Coughtrey und Thorne (1983) entwickelte Kompartimentmodell SPADE (Soil-Plant-Animal-Dynamic-Evaluation) zur Modellierung des Aktivitätstransfers in der Nahrungskette.

Das Ausbreitungsmodell auf der Grundlage des Gaußschen Fahnenmodells im NRPB-Bericht R91 wird auch im Bericht EUR 15760 der Europäischen Kommission (Simmonds et al. 1995) beschrieben und ist im Computerprogramm PLUME des Programmpaketes der Europäischen Kommission PC-CREAM (EC 1997) umgesetzt. Seit dem Jahr 2003 wird in England auch das modernere Ausbreitungsmodell ADMS⁹ eingesetzt.

Für das R91-Modell wird ein erweitertes Pasquill-Smith-Hosker-Schema verwendet, bei der die atmosphärische Stabilität anhand einer kontinuierlichen Variablen P beschrieben wird und gegenüber der AVV zu § 47 StrlSchV eine zusätzliche Stabilitätsklasse G definiert ist. Bei der Beschreibung des Washout findet ein Modell Anwendung, das neben dem Washoutfaktor die Wahrscheinlichkeiten P_w und P_d benötigt. Diese Werte geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Regenperiode (P_w) und eine Trockenperiode (P_d) pro Einheitszeit enden. Im Allgemeinen liegt für die Berechnungen eine ortsspezifische meteorologische Statistik (Wind und Windrichtung für 12 – 18 Sektoren mit Stabilitätsklassen und Regenwahrscheinlichkeit) vor. Sonst werden für England übliche Mittelwerte zugrunde gelegt.

Das englische Programm SPADE zur Berechnung des Aktivitätstransfers in Nahrungsmitteln beruht auf einem Multi-Kompartiment-Modell. Da die tatsächlich ablaufenden Transferprozesse in der Nahrungskette nicht im Detail bekannt sind, werden die Prozesse zwischen den Kompartimenten oder Zellen parametrisiert. Das Modell ist komplex und für eine zeitabhängige Berechnung der Aktivitätskonzentrationen in Nahrungsmitteln geeignet. Die zur Verfügung stehenden Daten sind aber gering.

Bewertung

Das Verfahren setzt die Realismusforderung der EURATOM-Grundnormen in Ansätzen um (Tab. A.8.) Als retrospektive Betrachtung ist die Annahme eines abdeckenden hypothetischen Quellterms jedoch nicht als realistisch zu betrachten. Die Betrachtung von Unsicherheiten wird nur ansatzweise vorgenommen.

⁹ <http://www.cerc.co.uk/environmental-software/ADMS-model.html>

Tab. A.8: Einordnung des Verfahrens im Vereinigten Königreich in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.

Anwendung	geplante Situation, retrospektiv
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	„possible“ und „probable“ effektive Dosen für Referenzgruppen, die den höchsten Expositionen ausgesetzt sind
Modellierung der Exposition	I0: aus abdeckendem, hypothetischem Quellterm
Szenarien und Expositionspfade	S1→S2: Mischung aus realistisch möglichen, generischen Szenarien und Expositionspfaden und fallspezifischen
radioökologische Modellparameter	nicht bekannt
Ernährungsgewohnheiten	S2: Mittelwerte bzw. hohe Perzentile
Aufenthaltszeiten	S1: generische Daten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1→S2: fallspezifische Daten, soweit verfügbar, ansonsten generische Daten
Unsicherheiten	nur ansatzweise

A-2.6 Ermittlung der Strahlenexposition in der Ukraine

Die Quantifizierung der aus dem Unfall von Tschernobyl resultierenden Strahlenexposition für die Bevölkerung wird in der Ukraine auf der Grundlage radioökologischer Modellierung durchgeführt. Wegen der außergewöhnlichen Situation nach einem schweren Unfall ist die Frage des Realismus dieser Ermittlung in diesem Zusammenhang von Interesse.

Hier wird das Methodik-96 genannten Verfahren (Methodik-96) dargestellt, mit dem die Strahlenexposition der Bevölkerung für Erwachsene auf der Grundlage von Aktivitätskonzentrationen in Nahrungsmitteln und von Depositionsdichten der Fallout-Radionuklide ermittelt wird und dessen Ergebnisse in den jährlichen staatlichen Strahlenschutzberichten der Ukraine, z. B. (Diduch et al. 2006), berichtet werden. Diese Strahlenexpositionen sind auch im Hinblick auf die Frage der Evakuierung oder Wiederbesiedlung relevant.

Die durch den Unfall pro Jahr verursachte Strahlenexposition wird als Summe der effektiven Dosen der externen Strahlenexposition durch Gammastrahlung von Cs-137 (+Cs-134) und der internen Strahlenexposition, verursacht durch Ingestion von Cs-137, Sr-90 und der Transurane (TUE) Pu-238,239,240,241 und Am-241, berechnet.

$$D_{\text{total}} = D_{\text{ext}} + D_{\text{int}} = D_{\text{ext}} + D_{\text{int,Cs-137}} + D_{\text{int,Sr-90}} + D_{\text{int,TUE}}$$

Als wesentlichen Parameter, der die Exposition entscheidend beeinflusst, wird der Wohnort der Menschen genutzt. Es werden drei Klassen von Wohnorten unterschieden, die als

- Dörfer (Ansiedlungen mit bis zu 8 000 Einwohnern)
- Kleinstädte (Ansiedlungen mit 8 000 – 20 000 Einwohnern)
- Städte (Ansiedlungen mit mehr als 20 000 Einwohnern)

bezeichnet werden.

Über diese Wohnortklassen werden wesentliche Parameter, wie die Aufenthaltszeiten im Freien und der Anteil von Nahrungsmitteln aus lokaler Produktion gesteuert. Modifizierungen von

Aufenthaltszeiten erfolgen nach Alter und Beruf. Gegenmaßnahmen werden bei der Berechnung der Strahlenexposition nicht mildernd berücksichtigt.

Bei Dörfern geht man von vollständiger Selbstversorgung der Bevölkerung mit lokal angebauten Nahrungsmitteln aus. In Kleinstädten werden Nahrungsmittel bereits hauptsächlich aus Läden bezogen, aber die Hausgärten tragen noch signifikant zur Versorgung bei. In Städten geht man von vollständiger Versorgung durch fremde Nahrungsmittelquellen aus.

Die berechneten Strahlenexpositionen durch Ingestion von Cs-137 werden stichprobenartig durch Messungen der Körperaktivität validiert. Sollten die Daten voneinander abweichen, wird die durch die Modellrechnungen bestimmte potenzielle Dosis, nicht aber die durch Ganzkörpermessung ermittelte reale Dosis im Register weiter benutzt.

Die externe Strahlenexposition D_{ext} wird nach Verfahren, die in (Likhtarev et al. 1993) etabliert wurden, mittels aggregierten Dosiskoeffizienten k_{γ} über die aktuelle Cs-137 flächenbezogene Aktivität $a_{\text{F,Cs-137}}$ berechnet.

$$D_{\text{ext}} = k_{\gamma} \cdot a_{\text{F,Cs-137}}$$

mit

$$k_{\gamma} = 1,91 \mu\text{Sv/a}/(\text{kBq}/\text{m}^2) \text{ für Dörfer,}$$

$$k_{\gamma} = 1,41 \mu\text{Sv/a}/(\text{kBq}/\text{m}^2) \text{ für Kleinstädte,}$$

$$k_{\gamma} = 0,91 \mu\text{Sv/a}/(\text{kBq}/\text{m}^2) \text{ für Städte.}$$

Die interne Strahlenexposition durch Ingestion von Cs-137 $D_{\text{int,Cs-137}}$ wird nach Verfahren, die in (Chumak et al. 1993, Likhtarev et al. 1996) entwickelt wurden, berechnet mittels aggregierten Dosiskoeffizienten $k_{x,\text{Cs-137}}$ über die spezifische Cs-137-Aktivität $a_{x,\text{Cs-137}}$ in Bq/l oder Bq/kg in Leitnahrungsmitteln x .

Für Dörfer gilt

$$D_{\text{int,Cs-137}} = 7,4 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq}/\text{l}) \cdot a_{\text{Milch,Cs-137}}$$

oder

$$D_{\text{int,Cs-137}} = 7,4 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq}/\text{l}) \cdot a_{\text{Milch,Cs-137}} + 1,61 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq}/\text{kg}) \cdot a_{\text{Kartoffel,Cs-137}}$$

Für Kleinstädte gilt

$$D_{\text{int,Cs-137}} = 3,7 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq}/\text{l}) \cdot a_{\text{Milch,Cs-137}}$$

oder

$$D_{\text{int,Cs-137}} = 3,52 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq}/\text{l}) \cdot a_{\text{Milch,Cs-137}} + 0,8 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq}/\text{kg}) \cdot a_{\text{Kartoffel,Cs-137}}$$

Für Städte, wie Kiew, wird aufgrund der radiologischen Kontrollen von vermarkteten Nahrungsmitteln nach (Likhtarev et al. 1996) eine konstante jährliche interne Strahlenexposition durch Cs-137 von 15 μSv angenommen.

Die interne Strahlenexposition durch Ingestion von Sr-90 $D_{\text{int,Sr-90}}$ wird nach Verfahren, die in (Diduch et al. 2006) entwickelt wurden, mittels aggregierten Dosiskoeffizienten $k_{\text{Milch,Sr-90}}$ über die spezifische Sr-90-Aktivität $a_{\text{Milch,Sr-90}}$ in Bq/l in Milch berechnet.

Es gilt

$$D_{\text{int,Sr-90}} = 16 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq/l}) \cdot a_{\text{Milch,Sr-90}} \cdot$$

Der aggregierte Dosiskoeffizient $k_{\text{Milch,Sr-90}} = 16 \mu\text{Sv/a}/(\text{Bq/l})$ ergibt sich aus dem ICRP 67-Dosiskoeffizienten (ICRP 1993) von $2,8 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}/(\text{a/Bq})$ für Ingestion von Sr-90 unter der Annahme einer jährlichen Verzehrsmenge von 365 l Milch.

Falls keine spezifischen Aktivitäten für Milch vorliegen, wird die interne Strahlenexposition durch Ingestion von Sr-90 $D_{\text{int,Sr-90}}$ mittels aggregierten Dosiskoeffizienten $k_{\text{BodenSr-90}}$ über die flächenbezogene Sr-90-Aktivität $a_{\text{F,Sr-90}}$ in kBq/m^2 in Milch berechnet:

$$D_{\text{int,Sr-90}} = 3,2 \mu\text{Sv/a}/(\text{kBq/m}^2) \cdot a_{\text{F,Sr-90}}$$

Der aggregierte Dosiskoeffizient $k_{\text{BodenSr-90}} = 3,2 \mu\text{Sv/a}/(\text{kBq/m}^2)$ ergibt sich unter den oben genannten Verzehrsmengen und Dosiskoeffizienten nach ICRP 67 mit einem Transferfaktor von $0,2 \text{ Bq/l}/(\text{kBq/m}^2)$.

Eine Überwachung der Sr-90-Aktivitäten in Nahrungsmitteln findet nur für Milch statt. Die übrigen Nahrungsmittel werden über separat ermittelte Konversionsfaktoren in Milchäquivalente umgerechnet. Bei den Aktivitäten werden die Jahresmittelwerte zur Berechnung der Dosis angesetzt.

Für Städte wie Kiew wird aufgrund der radiologischen Kontrollen von vermarkteten Nahrungsmitteln eine konstante jährliche interne Strahlenexposition durch Sr-90 von $2 \mu\text{Sv}$ angenommen.

Bei der Berechnung der internen Strahlenexposition durch TUE $D_{\text{int,TUE}}$ wird neben Ingestion von Wasser und Nahrungsmitteln auch die Inhalation berücksichtigt.

Die Aktivitätskonzentrationen von TUE in Luft liegen bei 10^{-8} Bq/m^3 bis 10^{-7} Bq/m^3 . Unter der Annahme von 10^{-7} Bq/m^3 wird konservativ eine resultierende effektive Dosis von $0,1 \mu\text{Sv/a}$ angesetzt.

Die Aktivitätskonzentrationen von TUE in Wasser liegen bei 10^{-5} Bq/l bis 10^{-4} Bq/l (Bondietti et al. 1976). Unter der Annahme von 10^{-4} Bq/l^3 wird bei einem Jahresverzehr von 800 l Wasser, von dem 50 % als aus kontaminiertem Oberflächenwasser stammend angenommen wird, konservativ eine resultierende effektive Dosis von $0,05 \mu\text{Sv/a}$ angesetzt.

Bei der Ingestion von Nahrungsmitteln geht man davon aus, dass 40 % der Exposition durch TUE durch den Verzehr von Kartoffeln verursacht wird. Die jährliche Verzehrsmenge an Kartoffeln beträgt 130 kg. Die gesamte Strahlenexposition durch TUE durch den Verzehr von Nahrungsmitteln wird dann aus „Kartoffeläquivalenten“ in Höhe von 320 kg pro Jahr berechnet, falls Aktivitätskonzentrationen für Kartoffeln vorliegen.

Liegen lediglich Daten über die flächenbezogene Aktivität von Pu-239,240 vor, wird die gesamte jährliche Strahlenexposition durch TUE berechnet nach:

$$\begin{aligned} D_{\text{int,TUE}} &= D_{\text{ing Nahrungsmittel,TUE}} + D_{\text{ing Wasser,TUE}} + D_{\text{inh,TUE}} \\ &= (0,004 \cdot (a_{\text{F,TUE}} - 70 \text{ Bq/m}^2) + 0,15) \mu\text{Sv/a} \end{aligned}$$

Liegen keine Daten über die flächenbezogene Aktivität des Bodens oder der Nahrungsmittel durch TUE vor, wird eine totale Ingestionsdosis

$$D_{\text{int,TUE}} = 0,45 \mu\text{Sv/a}$$

angesetzt. Dabei geht man von den oben genannten Jahresdosen durch Inhalation und durch den Verzehr von Wasser und von einer hypothetischen TUE-Bodenkontamination von 140 Bq/m^2 aus. 140 Bq/m^2 wird als das Doppelte des Fallouts der oberirdischen Kernwaffenexplosionen angesetzt.

Alle Dosiskoeffizienten werden nach ICRP 67 angenommen, und es wird die 50-Jahre-Folgedosis als Jahresdosis angesetzt.

Bewertung

Die Vorgehensweise in der Ukraine beruht auf empirischen Untersuchungen, die die realen Expositionssituationen als Folge der Kontaminationen durch den Reaktorunfall von Tschernobyl quantifizieren. Die Vorgehensweise ist insofern als realistisch einzustufen (Tab. A.9). Die Nichtberücksichtigung von Gegenmaßnahmen bleibt jedoch ein konservativer Aspekt des Vorgehens in der Ukraine. Eine Betrachtung von Unsicherheiten der ermittelten Strahlenexpositionen findet nicht statt.

Tab. A.9: *Einordnung des Verfahrens in der Ukraine in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.*

Anwendung	geplante Situation, retrospektiv:
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung als effektive Dosis
Modellierung der Exposition	I3: aus gemessenen ODL und Aktivitätskonzentrationen in Lebensmittel, Luft, Wasser und Boden; I4 zur Evaluation und Validierung
Szenarien & Expositionspfade	S1: mit generischer Unterscheidung der Wohnorte und Berufe
radioökologische Modellparameter	S1→S2: generische Daten mit fallspezifischen Präzisierungen
Ernährungsgewohnheiten	S1: generische Daten
Aufenthaltszeiten	S1: mit generischer Unterscheidung der Wohnorte und Berufe
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S0: mit generischer Unterscheidung der Wohnorte, ohne Gegenmaßnahmen
Unsicherheiten	keine, aber beim Cs-137 regelmäßige Validierung durch Ganzkörpermessungen

A-2.7 Ermittlung der Strahlenexposition in den USA

Einleitung

Hier wird ein kurzer Überblick über zwei wesentliche Methoden der Dosisermittlung in den USA mit Stand des Jahres 2011 gegeben. Die historische Literatur ist sehr umfangreich und kann hier nicht umfassend gewürdigt werden. Referenzen zu den in der Vergangenheit

benutzten Methoden finden sich in den verschiedenen UNSCEAR-Reports¹⁰. Viele der dort zitierten US-Quellen sind auch im Internet verfügbar.

Lange Zeit war eine umfassende Referenz von NRC (1983) die Grundlage der Dosisermittlungen. Auch das NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) hat eine Serie von Dokumenten hierzu veröffentlicht, z. B. den NCRP-Report No. 76 (NCRP 1985).

Es gibt eine umfangreiche Literatur über Dosisrekonstruktionen ziviler und militärischer kerntechnischer Anlagen, die für das National Cancer Institute und das Center for Disease Control in Atlanta durchgeführt wurden. Auch Literatur zur Dosisrekonstruktion zu den Themen Tschernobyl und Mayak existiert. Auf diese Arbeiten wird hier jedoch nicht eingegangen.

Gültig ist gegenwärtig in den USA der NRC Regulatory Guide 1.109 „Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Annex I“ vom Oktober 1977 (NRC 1977). Derzeit ist die US Nuclear Regulatory Commission (NRC) damit befasst, die *Regulatory Guides for Nuclear Facilities* zu überarbeiten im Hinblick auf die Beantragung und Erteilung neuer Genehmigungen für Kernreaktoren. Dieses Verfahren ist jedoch noch in einem frühen Stadium und kann hier noch nicht dargestellt werden.

Die Berechnung der Strahlenexposition aus kerntechnischen Anlagen oder aus Anlagen, in denen mit radioaktiven Stoffen umgegangen wird, berücksichtigt die tatsächlichen Emissionen in Atmosphäre und Hydrosphäre und dient zwei Zwecken:

- der Bestimmung der potenziellen Strahlenexposition des höchst exponierten Mitglieds der Bevölkerung (MEI = maximum exposed individual) in der Umgebung der Anlage, um die Einhaltung der Grenzwerte nachzuweisen, und
- der Ermittlung der tatsächlichen Strahlenexposition der Bevölkerung im 80 km-Umkreis um die Anlage in Form einer Kollektivdosis der dort ansässigen realen Bevölkerung.
- Der Ermittlung des Risikos stochastischer Schäden in der Bevölkerung (im RESRAD-OFFSITE-Programmsystem).

Die Rechenvorschriften des NRC Regulatory Guide 1.109 (NRC 1977) können auch zur Berechnung potenzieller Strahlenexpositionen durch hypothetische Emissionen genutzt werden.

Der NRC Regulatory Guide 1.109 berücksichtigt alle gängigen Expositionspfade, soweit sie im aktuellen Fall tatsächlich existieren. Er weist aber darauf hin, dass zusätzliche, eventuell existierende Expositionspfade hinzuzunehmen sind, wenn diese mehr als 10 % der Gesamtdosis ausmachen.

Das MEI ist charakterisiert als „maximal“ in Bezug auf Ernährungsgewohnheiten, Aufenthaltszeiten und Nutzung seines Lebensraumes in der Umgebung der Anlage. Seine Lebensgewohnheiten werden als vernünftige Abweichungen vom mittleren Verhalten der Bevölkerung beschrieben. NRC ermutigt die Anwender des Guides, soweit vorhanden standortspezifische Daten auch für das MEI zu benutzen. Die Strahlenexposition für das MEI wird für den Ort oder das Sektorsegment mit der höchsten Dosis, in dem wenigstens ein Einwohner lebt, berechnet. Bezüglich metabolischer und physiologischer Eigenschaften entspricht das MEI den Mittelwerten der Bevölkerung.

¹⁰ <http://www.unscear.org>

Für die Ermittlung der zusätzlichen Strahlenexposition der Bevölkerung im 80 km-Umkreis um Anlagen wird das mittlere Verhalten der Bevölkerung in Form von Mittelwerten der Ernährungsgewohnheiten, Aufenthaltszeiten, Nutzung des Lebensraumes in der Umgebung der Anlage sowie metabolischer und physiologischer Eigenschaften zur Berechnung vorgegeben.

Generell weist der NRC Regulatory Guide 1.109 darauf hin, dass fallspezifischen Daten auch in Bezug auf Ernährungsgewohnheiten, Aufenthaltszeiten und Nutzung des Lebensraumes der Vorzug vor den Defaultannahmen des Guides zu geben ist. Die benutzten Daten sind zur Prüfung durch das NRC zu dokumentieren.

Die Berechnung der Strahlenexpositionen des MEI und der Mitglieder der normalen Bevölkerung erfolgt nach gängigen radioökologischen Modellrechnungen. Erwähnenswert ist, dass in den Berechnungen bei der atmosphärischen Ausbreitung die Abreicherung der Radionuklide aus der Wolke während des Transportes berücksichtigt wird, und dass auf allen Expositionspfaden Kredit vom radioaktiven Zerfall während der Transport- und Verzögerungszeiten in Lebensmittel-Verteilungssystemen genommen wird. Sowohl für das MEI als auch für Mitglieder der normalen Bevölkerung werden z. B. unterschiedliche Daten für die Zeit zwischen Kontamination und Verzehr für verschiedene Lebensmittelklassen angegeben. Außerdem werden detaillierte Anweisungen zur Berechnung der Verdünnung auf dem Wasserpfad und der Kontamination im Uferbereich gegeben.

Es wird für die Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung eine Standzeit der Anlage von 15 Jahren zugrunde gelegt. Für das MEI wird eine Standzeit von 100 Jahren und damit Gleichgewicht angenommen (Parks 2007).

Bei landwirtschaftlichen Produkten, die in der Umgebung der Anlage erzeugt werden, begrenzt man die Kollektivdosis der allgemeinen Bevölkerung dadurch, dass nicht mehr kontaminierte Nahrungsmittel verzehrt werden können als in der Umgebung der Anlage tatsächlich erzeugt werden. Auch hier wird der Vorzug von standortspezifischen Daten betont.

Die Berechnungen werden für die vier Altersklassen Kleinkind (0 – 1 Jahr), Kind (1 – 11 Jahre), Teenager (11 – 17 Jahre) und Erwachsene (> 17 Jahre) durchgeführt. Für das MEI werden die Alter in den Altersklassen mit 0 Jahre, 1 Jahr, 11 Jahre und 17 Jahre angesetzt.

Das Programmsystem CAP88-PC im rechtlichen System der USA

Das Programmsystem CAP88-PC¹¹ (CAP88 = Clean Air Act Assessment Package – 1988) dient zwei Zwecken:

- der Bestimmung der potenziellen Strahlenexposition der Bevölkerung durch kerntechnische Anlagen oder Forschungseinrichtungen,
- der Ermittlung der tatsächlichen Strahlenexposition der Bevölkerung im Umkreis um kerntechnische Anlagen oder Forschungseinrichtungen in Form der Kollektivdosis.

Diese Verfahren dienen nach amerikanischem Recht dazu, die Einhaltung der Dosisgrenzwerte nachzuweisen, die durch das U. S. Department of Energy (DOE) und der U.S. Environmental Protection Agency (EPA) gesetzt sind. Die DOE Environmental Radiation Protection Standards sind in der DOE Order 5400.5 “Radiation Protection of the Public and the Environment” (DOE 1993) und in der Federal Regulation 10 CFR 835 “Occupational Radiation Protection” (DOE 2011) niedergelegt. Letztere enthält auch Standards für die Kontrolle der Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung von DOE-Anlagen. Sie beruhen auf ICRP- und NCRP-Empfehlungen. Im Falle des unten dargestellten Berichtes des Lawrence

¹¹ <http://www.epa.gov/radiation/assessment/CAP88/index.html>

Livermore National Laboratory (LLNL) für das Jahr 1996 (LLNL 1997) auf ICRP (1977 und 1980) und auf NCRP (1987).

Die primären Grenzwerte des DOE für den Schutz der Bevölkerung liegen bei effektiven Dosen von 1 mSv/a für Langzeit-Expositionen und bei 5 mSv/a für kurzfristige Ereignisse. Diese Grenzwerte gelten für die Exposition des sogenannten MEI in nicht kontrollierten Bereichen und umfassen alle Expositionspfade. Dabei wird die Summe aus externer Strahlenexposition im Jahr und der 50-Jahre-Folgedosis für interne Exposition betrachtet.

Unabhängig von der Einhaltung der DOE-Grenzwerte gelten Dosisgrenzwerte der EPA, die in Section 112 der Clean Air Act Amendments (EPA 1990) niedergelegt sind. Diese EPA-Grenzwerte beziehen sich ausschließlich auf den Luftpfad und sind in Subpart H der NESHAPs (National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants) unter 40 CFR 61 (EPA 1989) festgelegt. Die EPA-Grenzwerte begrenzen nach 40 CFR Part 61.92, Subpart H die effektive Dosis für Mitglieder der allgemeinen Bevölkerung auf 0,1 mSv/a. Zusätzlich verlangen NESHAPs Part 61.93, dass jede Tätigkeit, von der eine mittlere Jahresdosis von 0,001 mSv/a ausgehen kann und die keine Überwachung der Emissionen durchführt, nach von der EPA zugelassenen Methoden der Dosisermittlung zu überwachen ist und damit die Einhaltung der Grenzwerte nachgewiesen wird.

Bezüglich des Wasserpfades gelten zusätzlich die Festlegungen der National Primary Drinking Water Regulations; Final Rule (EPA 2000).

Da der Grenzwert der EPA von 0,1 mSv/a klein ist gegenüber der natürlichen Strahlenexposition und da die tatsächlich durch Emissionen verursachten Expositionen noch deutlich geringer sind, hat EPA in Anerkennung der Schwierigkeit, solche Dosen zuverlässig zu schätzen, ein dosimetrisches Modell offiziell zugelassen und in Form von Computerprogrammen zur Verfügung gestellt. Das Programmsystem CAP88-PC erlaubt die Berechnung der potenziellen Dosis für das MEI sowie die Ermittlung der Kollektivdosis der Bevölkerung in der Umgebung einer Anlage. Außerdem ist mit CAP88-PC die Ermittlung des strahleninduzierten Risikos, sowohl für das MEI als auch für die allgemeine Bevölkerung möglich.

Am 31. Oktober 1989 erließ die EPA "final rules" für die Emission von Radionukliden mit der Fortluft unter 40 CFR 61, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAPS). Die Emissionsüberwachung und die Prozeduren zum Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte verlangen für DOE-Anlagen (40 CFR 61.93 (a)) die Anwendung von CAP88- oder AIRDOS-PC-Computermodellen oder anderer zugelassener Verfahren zur Berechnung der effektiven Dosis für Mitglieder der allgemeinen Bevölkerung. CAP88 enthält modifizierte Versionen des AIRDOS-EPA (Moore et al. 1979) und DARTAB (ORNL-5692).

Programmsystem CAP88-PC

Eine ausführliche Beschreibung von CAP88-PC findet sich im CAP88-PC Version 3.0 User Guide (Rosnick 2007). CAP88-PC erlaubt die Ermittlung der Kollektivdosis der Bevölkerung und der potenziellen Dosis des MEI. Die Berechnung der Risiken erfolgt nach den Dosis- und Risikofaktoren des Federal Guidance Reports 13 (EPA 1999), der seinerseits auf ICRP Publication 72 (ICRP 1996) beruht.

CAP88-PC benutzt ein modifiziertes Gaußsches Ausbreitungsmodell, um die mittlere Dispersion der Radionuklide von bis zu sechs emittierenden Quellen zu berechnen. Die Quellen können hohe Schornsteine, wie Abluftkamine, oder Flächenquellen, z. B. Halden oder Absetzbecken des Uranbergbaus, sein. Die Kaminüberhöhung der Abluftfahne wird berücksichtigt. Die Berechnungen werden für ein kreisförmiges Gitter bis zu einem Abstand von 80 km auf der Grundlage allgemeiner oder individueller Wetterstatistiken durchgeführt.

Die unterschiedlichen Berechnungsmöglichkeiten werden durch detaillierte Datensätze gesteuert, die für die Beurteilung des Realismus bzw. der Konservativität der Berechnungen wesentlich sind. Es gibt Eingabedaten, die vom Benutzer einzugeben sind, sowie solche Modellparameter, die mit Defaultwerten hinterlegt sind. Werden Defaultwerte geändert, müssen diese Änderungen von der EPA zugelassen werden, wenn mit den Rechnungen rechtlich relevante Dosisberechnungen durchgeführt werden.

Neben allgemeinen Daten, die die jeweiligen Berechnungsoptionen steuern, sind umfangreiche Datensätze über die jeweilige Anlage, die meteorologischen Daten, die Quellterme und die agrarwirtschaftliche Landnutzung im betrachteten 80 km-Kreis bereit zu stellen.

Für die Berechnung der effektiven Dosis des MEI muss in einem "Location Index of Exposed Individual" die Richtung und der Abstand angegeben werden, für den die MEI Exposition berechnet werden soll. Es handelt sich dabei um Sektorinformationen.

Für die Berechnung der Kollektivdosis muss ein "Population File" in vorgegebenem Format erstellt werden, der die Bevölkerung in jedem Sektor quantifiziert. Ein Drop-down-Menü mit bereitgestellten Populationsdaten erleichtert die Erstellung. Der File kann aber auch individuell anhand erhobener Daten erstellt werden.

Die benötigten anlagenspezifischen meteorologischen Daten können aus generellen Vorgaben oder aus eigenen Wetterdaten erstellt werden. Für viele Standorte sind Wind-Dateien des National Weather Service im Programm verfügbar. Jährliche Temperatur- und Niederschlagsdaten sind vom Benutzer einzugeben.

Eine DEFAULT.DAT-Datei enthält die verschiedensten Modellparameter als Defaults für CAP88-PC. Die Datei ist in zwei Teile geteilt. Der erste Teil enthält Parameter, die vom Benutzer geändert werden können, der zweite Teil solche, die nicht geändert werden dürfen. Letztere sind gegen Eingriffe geschützt.

Bei den Default-Werten in der DEFAULT.DAT-Datei für die meteorologischen Daten, für Inhalations- und Ingestionsraten, Wasserverbrauch, agrarwirtschaftliche Produktivität handelt es sich um von der EPA für den Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte nach 40 CFR 61.93(a) zugelassene Werte. Sie können für spezielle Fragestellungen vom Benutzer geändert werden. Es wird jedoch dringend davon abgeraten. In den folgenden Tabellen sind die vom Benutzer veränderbaren Parameter angegeben.

Das Programmsystem RESRAD-OFFSITE

Das kommerzielle RESRAD-OFFSITE-Programmsystem, das vom Argonne National Laboratory entwickelt wurde und das von DOE zur Ermittlung der Strahlenexposition und des strahleninduzierten Risikos der Bevölkerung auf und in der Umgebung kontaminierter Flächen genutzt wird, ist eine Erweiterung des ursprünglichen RESRAD Programms, das für die radiologische Beurteilung der Situation von Menschen auf kontaminierten Bodenflächen entwickelt wurde und die Strahlenexposition einer Person durch "RESidual RADioactive materials" im Boden beschrieb (Yu et al. 1993, 2001).

Das RESRAD-OFFSITE Programm ist in der Lage, auch außerhalb kontaminierter Flächen die Strahlenexposition der Bevölkerung zu modellieren (Yu et al. 2006). Detaillierte Beschreibung von RESRAD-OFFSITE ist im „User's manual for RESRAD-OFFSITE Version 2“ (Yu et al. 2007) gegeben.

RESRAD-OFFSITE berücksichtigt die Expositionspfade auf und außerhalb der kontaminierten Flächen

- Direktstrahlung bei Aufenthalt im Freien und in Gebäuden,

- Inhalation von Staub und Radon,
- Ingestion von Boden, Gemüse, Fleisch, Milch und aquatischen Lebensmitteln.

Dabei werden jeweils die primäre Kontamination, atmosphärischer Transport der Kontamination, Transport mit Grund- und Oberflächenwasser, sekundäre Kontamination agrarisch genutzter Flächen durch Beregnung und Ablagerung von Staub berücksichtigt. Für den Transport mit dem Grundwasser wird ein "advektives Grundwasser Transport Modell" benutzt, für den atmosphärischen Transport ein Gaußsches Ausbreitungsmodell.

RESRAD-OFFSITE erlaubt für generische Modellierung die Wahl von vier Hauptszenarien für die exponierte Bevölkerung:

- Bauer in ländlicher Umgebung,
- Stadtbewohner,
- Arbeiter,
- Erholungssuchender.

Dabei können vorgegebene oder vom Benutzer definierte Unterszenarien wie Büroangestellte, Industriearbeiter oder Bauarbeiter zusätzlich gewählt werden. In Kapitel 5 des RESRAD-OFFSITE User Manuals oder in Appendix I von NUREG-1757 (NRC 2003) sind Anleitungen zur Erstellung bestimmter Szenarien gegeben.

Die generischen Szenarios unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, welche der Expositionspfade zu berücksichtigen sind und welche nicht. Zusätzlich sind die Expositionsszenarios mit individuellen Parameterwerten ausgestattet.

Die RESRAD (on-site)- und RESRAD-OFFSITE-Programme wurden und werden umfangreichen Validierungen unterzogen. Näheres dazu findet sich in Kapitel 5 des RESRAD User's Manual und in anderen Quellen (Yu et al. 2001, Halliburton NUS 1994, Cheng et al. 1995, Gnanaprasam et al. 2000, Mills et al. 1997, Whelan et al. 1999a und 1999b).

Die benutzten Parameter, wie Boden-Pflanze-Transferfaktoren, Transferfaktoren für Milch und Fleisch, Faktoren für Bioakkumulation, Dosiskonversionsfaktoren, Kerndaten und szenariospezifische Aufenthalts- und Ernährungsgewohnheiten sind im Detail dargestellt und wurden verifiziert (Yu et al. 2000, 2001, 2003).

Das Besondere an RESRAD-OFFSITE ist, dass es auch eine Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse durch Parametervariation erlaubt. Die benutzten Parameter werden in die Klassen physikalische Parameter, Verhaltensparameter und metabolische Parameter eingeteilt.

"Any parameter whose value would not change if a different group of receptors were considered is classified as a physical parameter. Physical parameters are determined by the source, its location, and the geological characteristics of the site (i.e., these parameters are source- and site-specific)." Die metabolischen Parameter nach ICRP 43 (ICRP 1985) werden dabei als nicht variabel oder unsicher betrachtet.

Anlage 2 zum RESRAD-OFFSITE User Manual enthält eine Dokumentation der Parameter, ihrer Klassifizierung, der aktuellen Default-Werte und des möglichen Wertebereiches. Für probabilistische Rechnungen sind in Kapitel B-3 des RESRAD-OFFSITE User Manuals die Verteilungsfunktionen bzw. Verteilungsdichten für eine Vielzahl von Parametern angegeben und begründet. Perzentile können interaktiv abgefragt werden.

Probabilistische Rechnungen mit RESRAD-OFFSITE erlauben sowohl die Untersuchung der Sensitivität einzelner Parameter als auch multivariante Rechnungen, die für Dosen und Risiken die entsprechenden Verteilungsfunktionen ergeben.

RESRAD-OFFSITE berechnet aus den ermittelten effektiven Dosen auch das strahleninduzierte Risiko gemäß ICRP-Risikomodellen nach ICRP 72 (ICRP 1996). Dabei wird in typischer Weise ein Zeithorizont von 1 000 Jahren angesetzt. Das Programm erlaubt jedoch auch die Behandlung wesentlich längerer Zeiträume. Die Anwendungen des Programms zur Risikoberechnung sind jedoch nicht Thema dieser Darstellung.

Bewertung von CAP88-PC im Hinblick auf die realistische Dosisermittlung

CAP88-PC nutzt ein deterministisches Modell zur Ermittlung von effektiven Dosen der allgemeinen Bevölkerung für Strahlenexpositionen durch atmosphärische Ableitungen.

Das CAP88 User Manual enthält keine Information über die nicht veränderbaren Defaultdaten. Diese sind im NRC Regulatory Guide 1.109 festgeschrieben. Die Verzehrsmengen des MEI liegen danach um Faktoren zwischen zwei und drei über denen der allgemeinen Bevölkerung. Zu den Festlegungen der StrlSchV existieren teilweise signifikante Unterschiede, die aber hier nicht diskutiert werden sollen. Im Grundsätzlichen ist bzgl. der Konservativität und den Modellen das Konzept des MEI konsistent mit dem Ansatz der AVV zu § 47 StrlSchV. Auch von Seiten amerikanischen Regulierer und Anwender wird betont, dass die Dosis des MEI größer ist als die tatsächlich von Mitgliedern der Bevölkerung erhaltenen effektiven Dosen.

Dies gilt auch für die allgemeine Bevölkerung und ist dabei aufgrund der bei der Bestimmung der Kollektivdosis angestrebten Realitätsnähe andauernder Gegenstand der Diskussion, z. B. (Parks 1997).

CAP88-PC behandelt die Strahlenexposition der Bevölkerung durch Tätigkeiten bei Emissionen über den Luftpfad. Expositionen über den Wasserpfad und durch Direktstrahlung müssen noch separat ermittelt werden. EPA hat die Version 2.1 von CAP88 offiziell zugelassen. Dabei enthält die bereits verfügbare Version 3 einige wesentliche Weiterentwicklungen, z. B.:

- Die Transferfaktoren für Radionuklide wurden an NCRP-Report Nr. 123 angepasst.
- Die Nuklid-Eingabetabellen wurden modifiziert, um die Angabe spezieller chemischer Formen und Resorptionsraten berücksichtigen zu können
- Das Programm enthält in Version 3:
 - Altersabhängige Dosisfaktoren,
 - Dosisfaktoren für den Verzehr von Trinkwasser und für externe Bestrahlung als Folge der Kontamination von Boden,
 - Dosisfaktoren für externe Exposition in unendlichen Wolken.

Außerdem werden Daten spezieller EPA-Nahrungsmittelquellenszenarien (städtisch, ländlich, lokal, regional und importiert) für die Bestandsdichte von Rindvieh für Milch- und Fleischproduktion und Flächenerträge von Gemüse für alle 50 Staaten der USA als wählbare Defaultwerte vorgegeben.

Tab. A.10 *Einordnung des Verfahrens nach CAP-88 in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.*

Anwendung	geplante Situation, prospektiv und retrospektiv:
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	Effektive Dosis für das MEI und Kollektivdosis im 80 km-Umkreis
Modellierung der Exposition	I2: aus hypothetischem Quellterm (bester Schätzwert)
Szenarien und Expositionspfade:	S1→S2: nur in der Realität mögliche, generische Szenarien und Expositionspfade bis fallspezifische
radioökologische Modellparameter:	S1→S2: generische und fallspezifische Daten
Ernährungsgewohnheiten	S0→S2: Vermischung von abdeckenden generischen Daten bis fallspezifisch
Aufenthaltszeiten	S0→S2: Vermischung von abdeckenden generischen Daten bis fallspezifisch
Anteil lokal angebauter Nahrungsmittel	S2: fallspezifische Daten
Unsicherheiten	keine

Bewertung von RESRAD-OFFSITE

RESRAD-OFFSITE¹² modelliert die Strahlenexposition der Bevölkerung als Folge von Bodenkontaminationen in etwa wie die Berechnungsgrundlagen Bergbau.

Es existiert eine umfangreiche Datensammlung der in die Berechnung eingehenden Parameter (Yu et al. 1993). Im Laufe der Entwicklung des Programmsystems wurde der Schwerpunkt der Modellierung auf probabilistische Verfahren gelegt (Kamboj et al. 2000). Die Verfahren sind bis ins Detail der Modelle, der Parameter und der Parameterfestlegung für aktuelle Berechnungen beschrieben (Yu et al. 2003).

Das RESRAD Programmsystem soll die Beurteilung von Effekten der Unsicherheit oder probabilistischen Natur von Modellparametern erleichtern. Dazu wird eine Monte Carlo Methode benutzt, um Zufallszahlen für die Eingabewerte zu wählen. Die statistische Auswertung einer großen Anzahl von Rechenläufen liefert dann Mittelwerte, Standardabweichungen, Minimal- und Maximalwerte. Wesentliches Ergebnis ist die kumulative Häufigkeitsverteilung und die aus ihr ermittelten Perzentile. Es wird eine Vielzahl von Auswertoptionen geboten. Dazu gehören auch Regressionsmethoden, die die Abhängigkeit und Sensitivität der Ergebnisse von einzelnen Eingabeparametern zu beurteilen erlauben (Yu et al. 2003).

In der jüngsten Version des Benutzerhandbuchs (Yu et al. 2007) sind ausführliche Abhandlungen über die jeweils zugrunde zu legenden Verteilung der Parameter angegeben.

In der Erkenntnis der hohen Variabilität radioökologischer Parameter und der unvollständigen Kenntnis dieser Größen wurden mit RESRAD-OFFSITE und RESRAD-BUILD¹³ die derzeit

¹² <http://www.epa.gov/radiation/assessment/CAP88/index.html>

¹³ <http://web.ead.anl.gov/resrad/home2/Build.cfm>

wohl fortgeschrittensten Systeme probabilistischer Dosisermittlung erstellt. In der Begründung wird auf die grundlegende Arbeit der IAEA (1989) hingewiesen.

Das Besondere an den RESRAD- und CAP-88-Systemen ist jedoch der Detaillierungsgrad der Beschreibung der Eingabegrößen und die Nutzung fallspezifischer Eingabedaten.

Tab. A.11: Die Einordnung von RESRAD-OFFSITE in das Schema dieser Empfehlung nach Tab. 3.8.

Anwendung	existierende Situation, prospektiv und retrospektiv:
Ergebnisgröße und zu berechnende Werte	effektive Dosis und Risiko
Modellierung der Exposition	I2→I3: aus tatsächlichem Quellterm unter Nutzung gemessener ODL und Aktivitätskonzentrationen in Luft, Boden und Wasser
Szenarien und Expositionspfade:	S1: nur realistisch mögliche Szenarien und Expositionspfade mit Berücksichtigung unterschiedlicher Berufe
radioökologische Modellparameter:	S1→S2: generische und fallspezifische Daten
Ernährungsgewohnheiten	S1→S2: generische und fallspezifische Daten
Aufenthaltszeiten	S1→S2: generische und fallspezifische Daten
Anteil lokal angebaute Nahrungsmittel	S1→S2: generische und fallspezifische Daten
Unsicherheiten	Analyse der Unsicherheiten, Sensitivitätsanalyse und Validierung

Literatur

- Aurand et al. 1981 Aurand K, Gans I, Rühle H (Hrsg.). Modellstudie Radioökologie
Biblis. Erich Schmidt Verlag. Berlin, 1981.
- BfS 2009 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Stufenkonzept:
Retrospektive Abschätzung der Strahlenexposition von
Einzelpersonen der Bevölkerung durch Ableitungen aus
kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen gemäß Artikel 45
der EURATOM-Grundnormen. Internes Papier des BfS. Januar
2009.
- BfS 2010 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Berechnungsgrundlagen zur
Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umwelt-
radioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau). März 2010.
urn:nbn:de:0221-20100329966.
- BMI 1979 Der Bundesminister des Innern (BMI). Allgemeine Berechnungs-
grundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen
mit der Abluft oder in Oberflächengewässer (Richtlinie zu § 45
StrlSchV). GMBI. 1979, S. 371-435. 1979.

- BMU 1990 Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen vom 21. Februar 1990. BAnz. 1990, Nr. 64a. 1990.
- BMU 1999a Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umwelt-radioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau). Teil 1, Entwurf/Stand 30.07.1999.
- BMU 1999b Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BM). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau: Teil Radon). Entwurf/Stand 30.07.1999.
- BMU 2012 Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) vom 28.08.2012. BAnz AT 05.09.2012 B1. 2012
- Bondiotti et al. 1976 Bondiotti JM, Reynolds SA, Shanks MH. Interaction of plutonium with complexing substances in soils and natural waters. In: Transuranium nuclides in the environment. IAEA-SM-199/51. Wien, 1976.
- Chartier 2009 Chartier M. Institute de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Persönliche Mitteilung am 01.12.2009.
- Cheng et al. 1995 Chen JJ, Droppo JG, Failace ER, Gnanapragasam EK, Johns R, Laniak G, Lew C, Mills W, Owens L, Strenge, DL, Sutherland JF, Travis CC, Whelan G, Yu C. Benchmarking Analysis of Three Multimedia Models: RESRAD, MMSOILS and MEPAS. DOE/ORO-2033. U.S. Department of Energy. Washington, D.C. 1995.
- Chumak et al. 1993 Chumak VV, Repin VS, Likhtarev IA. Retrospektive Dosimetrie der evakuierten Bevölkerung: Ergebnisse und Perspektiven. In „Aktuelle Fragen der retrospektiven, laufenden und prospektiven Dosimetrie der Strahlenexposition in Folge des Chernobyl-Unfalls: Abstracts der Beiträge der wissenschaftlichen Tagung in Kiew“. 108-110, 1993 (in Ukrainisch).

- CSHPF 1999 Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF). Etude de l'impact radiologique sur le public des installations nucléaires en fonctionnement normal. CSHPF-section de Radioprotection. Editions TEC & DOC. ISBN: 2-7430-0340-5. 1999.
- Deville-Cavelin et al. 1994 Deville-Cavelin G, Carol B, Monfort M. Description du Code COTRAM 2 de Calcul de Coefficients de Transfert Atmosphérique Moyens. Note Technique. SEAC/94/188. Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire. 1994.
- Diduch et al. 2006 Diduch MI, Mojar JA, Chikalyuk VA, Vinnichuk VO, Martynyuk MV. Allgemeines dosimetrisches Register der infolge von Unfall auf Tschernobyl KKW radioaktiv kontaminierten Ansiedlungen der Zhytomyr-Oblast (zusammengefasste Daten für den Zeitraum zwischen 1991 und 2004). Staatliche Agroökologische Universität Zhytomyr, Zhytomyr. 2006 (in Ukrainisch)
- DOE 1993 U. S. Department of Energy (DOE). Radiation Protection of the Public and the Environment. DOE Order 5400.5. 01.07.1993. Online im Internet unter <https://www.directives.doe.gov/directives/5400.05-BOrder-c2/view> (24.10.2013)
- DOE 2011 U.S. Department of Energy (DOE). Occupational Radiation Protection. 10 CFR 835. 2011. Online im Internet unter <http://www.gpo.gov/fdsys/search/pagedetails.action?collectionCode=CFR&searchPath=Title+10%2FChapter+III%2FPart+835&granuleId=CFR-2011-title10-vol4-part835&packageId=CFR-2011-title10-vol4&oldPath=Title+10%2FChapter+III&fromPageDetails=true&collapse=true&ycord=1368> (24.10.2013)
- EC 1997 Europäische Kommission. Handbuch der europäischen Kommission zum Programmpaket PC CREAM. EUR 17791 (NRPB-SR296). National Radiological Protection Board. 1997.
- EC 2002 Europäische Kommission (EC). Radiation Protection 129: Guidance on the realistic assessment of radiation doses to members of the public due to the operation of nuclear installations under normal conditions, Recommendations of the group of experts set up under the terms of Article 31 of the EURATOM Treaty. Luxembourg. Office for Official Publications of the European Communities. ISBN 92-894-4007-4. 2002.
- EPA 1989 Environmental Protection Agency (EPA). 40 CFR Part 61. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAPS) – Subpart H National Emission Standards for Emissions of Radionuclides Other Than Radon from Department of Energy Facilities. 1989. Online im Internet unter <http://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/61> (24.10.2013)
- EPA 1990 Environmental Protection Agency (EPA). Section 112(g) of the Clean Air Act Amendments of 1990. Online im Internet unter <http://www.epa.gov/ttn/atw/112g/112gpg.html> (24.05.2013)

- EPA 1999 Environmental Protection Agency (EPA). Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report 13. USEPA Office of Radiation and Indoor Air. EPA 402-R-99-001. Washington DC. 1999.
- EPA 2000 Environmental Protection Agency (EPA). 40 CFR Parts 9. 141 and 142. National Primary Drinking Water Regulations. Radionuclides. Final Rule. Federal Register, Vol. 65, No. 236. December 7, 2000. Rules and Regulations, p. 76708. 2000. Online im Internet unter www.epa.gov/ogwdw/mdbp/dbpfr.pdf (24.10.2013)
- Evrard et al. 2006 Evrard A-S, Hémon D, Morin A, Laurier D, Tirmarche M, Backe J-C, Chartier M, Clavel J. Childhood leukaemia incidence around French nuclear installations using geographic zoning based on gaseous discharge dose estimates. *Br J Cancer* 94(9) 1342-7. 2006.
- Gellermann et al. 2005 Gellermann R, Michel R, Wiegand J, Müller W-U. Radiologische Bewertung der Grubenwässer-Einleitungen des Steinkohlenbergbaus im Bereich Fossa Eugeniensis. Abschlussbericht, Phase A. HGN Hydrogeologie GmbH. 2005.
- Gnanapragasam et al. 2000 Gnanapragasam E, Yu C, Whelan G, Mills WB, McDonald JR, Lew CS, Hung CY, Hoffmeyer D. Comparison of Multimedia Model Predictions for a Contaminant Plume Migration Scenario. *J. Contaminant Hydrology* 46(1-2):17-38. 2000.
- GRNC 2002 Nord-Cotentin Radioecology Group (GRNC). Estimation of exposure levels to ionizing radiation and associated risk of leukemia for populations in the Nord-Cotentin. 2002. Online im Internet unter http://www.irsn.fr/FR/base_de_connaissances/Environnement/surveillance-environnement/GRNC/Documents/irsn_gnrc_rapport-synthese-anglais.pdf (24.10.2013).
- Halliburton NUS 1994 Halliburton NUS Corporation. Verification of RESRAD. A Code for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines. Version 5.03. HNUS-ARPD-94-174. Gaithersburg. 1994.
- IAEA 1989 International Atomic Energy Agency (IAEA). IAEA Safety Series 100. Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models. ISBN: 92-0-124089-9. 1989.
- IAEA 2001 International Atomic Energy Agency (IAEA). Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA Safety Report Series Nr. 19. 2001.
- ICRP 1977 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 26. Pergamon Press. New York. 1977.

- ICRP 1980 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Publication 30. Pergamon Press. New York. 1980.
- ICRP 1985 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Principles of monitoring for the radiation protection of the population. ICRP Publication 43. Ann ICRP 5 (1). 1985.
- ICRP 1993 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 67. Annals of the ICRP 23 (2-3). ISBN 13: 978-0-08-041155-2. 1993.
- ICRP 1996 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5. Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 72. Annals of the ICRP, Vol. 26(1). Pergamon Press. New York. 1996.
- ICRP 2006 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process. ICRP Publication 101. Annals of the ICRP, Volume 36 (3). ISBN 13: 978-0-7020-2927-1. Elsevier. 2006.
- IRSN 2002 L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Evaluation Guide for the Radiological Impact Study of a Basic Nuclear Installation. Report/IRSN/2002-24. 2002. Online im Internet unter www.irsn.fr/EN/publications/technical-publications/Documents/IRSN_radiological_impact_study_nuclear_installation_2002.PDF (24.10.2013)
- JCGM 2008 Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method (JCGM 101:2008). 2008. Online im Internet unter <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html> (24.10.2013).
- Kamboj et al. 2000 Kamboj S, LePoire D, Gnanapragasam E, Biwer BM, Cheng J, Arnish J, Yu C, Chen SY. Probabilistic Dose Analysis Using Parameter Distributions. Developed for RESRAD and RESRAD-BUILD Codes. NUREG/CR-6676. ANL/EAD/TM-89. Argonne National Laboratory. May 2000.
- Likhtarev et al. 1993 Likhtarev IA, Gulko GM, Sobolev BG, Kajro IA. Methodische Empfehlungen zum Schilddrüsenregister der Ansiedlungen in der Ukraine. Kiew. B.i. 22 S. 1993 (in Ukrainisch).

- Likhtarev et al. 1996 Likhtarev IA, Kovgan LN, Vavilov SE, Gluvchinsky RR, Perevoznikov ON, Litvinets LN, Anspaugh LR, Kercher JR, Bouville A. Internal exposure from the ingestion of foods contaminated by ^{137}Cs after the Chernobyl accident. Report I. General Model: Ingestion doses and countermeasure effectiveness for the adults of the Rovno Oblast of Ukraine. Health Physics 70(3). 297 – 317. 1996.
- LLNL 1997 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Robert J Harrach, Gretchen M. Gallegos: Environmental Report for 1996, chapter 12, Radiological Dose Assessment. 1997. Online im Internet unter https://saer.llnl.gov/saer96/saer96_home.html (24.10.2013)
- Methodik-96 Methodische Vorschriften „Strahlungsdosimetrisches Register der infolge des Unfalls im Tschernobyl KKW radioaktiv kontaminierten Ansiedlungen in der Ukraine, inklusive Schilddrüsenregister“ (Methodik-96). Kiew, 74 S., 1996 (in Ukrainisch)
- Mills et al. 1997 Mills WB, Cheng JJ, Droppo JG Jr, Faillace ER, Gnanapragasam EK, Johns RA, Laniak GF, Lew CS, Strenge DL, Sutherland JF, Whelan G, Yu C.: Multimedia Benchmarking Analysis for Three Risk Assessment Models: RESRAD, MMSOILS, and MEPAS, Risk Analysis 17(2):187–201, 1997.
- Moore et al. 1979 Moore RE, Baes CFIII, McDowell-Boyer LM, Watson AP, Hoffman FO, Pleasant JC, Miller CW. Publication 72: A Computerized Methodology for Estimating Environmental Concentrations and Dose to Man from Airborne Releases of Radionuclides. (Reprint of ORNL-5532). EPA 520/1-79-009. U.S. EPA Office of Radiation Programs. 20460. 1979.
- Morin 1995 Morin A. FOCON 96 Version 1.0. NOTICE THEORIQUE. Note Technique. SEGR/SAER/96-108 Indice 5. Institute de Protection et de Sûreté Nucléaire. 1995.
- NCRP 1985 National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Radiological Assessment: Predicting the Transport, Bioaccumulation, and Uptake by Man of Radionuclides Released to the Environment. NCRP Report No. 76. 1985
- NCRP 1987 National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Recommendations on Limits of Exposure to Ionizing Radiation, Report No. 91, National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington, DC. 1987.
- NRC 1977 United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). NRC Regulatory Guide 1.109 „Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Annex I“. 1977. Online im Internet unter <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003740384.pdf> (24.10.2013)

- NRC 1983 United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). Radiological Assessment: A Textbook on Environmental Dose Analysis. NUREG/CR-3332. ORNL-5968. U.S. Department of Commerce. National Technical Information Service. 1983. Online im Internet unter <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0917/ML091770419.pdf> (24.10.2013)
- NRC 2003 United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). Consolidated NMSS Decommissioning Guidance. Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria. NUREG-1757. Vol. 2. Washington, D.C. 2003. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1757/> (24.10.2013)
- NRPB 1979 National Radiological Protection Board (NRPB). A model for short and medium range dispersion of radionuclides released to the atmosphere. Chilton. NRPB-R91. 1979.
- NRPB 1981 National Radiological Protection Board (NRPB). A Procedure to Include Deposition in the Model for Short and Medium Range Atmospheric Dispersion of Radionuclides. The Second Report of a Working Group on Atmospheric Dispersion. NRPB R122. 1981.
- ORNL-5692 DARTAB. A Program to Combine Airborne Radionuclide Environmental Exposure Data With Dosimetric Health Effect Data to Generate Tabulations of Predicted Health Impact. ORNL-5692/DE81030434. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge. Tennessee. November 1981.
- Parks 1997 Parks B. Tritium Dose Overestimates by CAP88-PC. Health Physics. 1997.
- Parks 2007 Parks, B. (United States Department of Energy, DOE). private Mitteilung an R. Michel, August 2007.
- République française 2006 République française. LOI n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (1). NOR: DEVX0100081L. 2006. Online im Internet unter <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEX000000819043&categorieLien=id>. (25.10.2013)
- République française 2013 République française. Arrêté du 26 novembre 1999 fixant les prescriptions techniques générales relatives aux limites et aux modalités des prélèvements et des rejets soumis à autorisation, effectués par les installations nucléaires de base. NOR: ECOI9900570A. Version consolidée au 01 juillet 2013. Online im Internet unter <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEX000000762255>. (25.10.2013)
- Ritzel 2008 Ritzel S. Natürliche Radionuklide in der Umwelt: Vorkommen, anthropogene Einflüsse und radiologische Relevanz in ausgewählten Bergbaugebieten Deutschlands. Leibniz Universität Hannover. 2008.

- Rosnick 2007 Rosnick R. (EPA Project Manager Office of Radiation and Indoor Air). CAP88-PC Version 3.0 User Guide. Ariel Rios Building. 1200 Pennsylvania Avenue. NW Washington. DC 20460 by Trinity Engineering Associates. Inc. 8832 Falmouth Dr. Cincinnati. OH 45231-5011. 9. Dezember 2007. Online im Internet unter <http://www.epa.gov/rpdweb00/assessment/CAP88/#version3> (24.10.2013)
- Simmonds et al. 1995 Simmonds JR, Lawson G, Mayall A. Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment. Radiation Protection 72. European Commission Report EUR 15760 EN. 1995.
- SSK 1992 Strahlenschutzkommission (SSK). Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte nach § 45 StrlSchV. In: Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission. Band 17. ISBN 3-437-11419-0. 1992.
- SSK 2009 Strahlenschutzkommission (SSK). Bewertung der epidemiologischen Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie). Wissenschaftliche Begründung zur Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 232. Sitzung der SSK am 16.12.2008. In: Berichte der Strahlenschutzkommission. Heft 58. ISBN 978-3-87344-151-4. 2009.
- SSK 2013 Strahlenschutzkommission (SSK). Krebshäufigkeit in der Samtgemeinde Asse. Wissenschaftliche Begründung der Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet auf der 260. Sitzung der SSK am 28.02./01.03.2013. urn:nbn:de:101:1-201403128179
- Thorne und Coughtrey 1983 Thorne MC, Coughtrey PJ. Dynamic models for radionuclide transport in soils, plants and domestic animals. In: Ecological aspects of radionuclide release. Ed. Coughtrey PJ, Bell JNB and Roberts TM. Oxford. Blackwell Scientific. 1983.
- TÜV 2005 TÜV Süddeutschland Bau und Betrieb GmbH. Vergleich der Berechnungsmethoden der Strahlenexposition in Europa. In: Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. BMU-2005-674. 2005.
- Vahlbruch 2004 Vahlbruch J-W. Über den Transfer von natürlichen Radionukliden in terrestrischen Ökosystemen und die realistische Modellierung der natürlichen Strahlenexposition in Norddeutschland. Leibniz Universität Hannover. 2004.
- Whelan et al. 1999a Whelan G, JP McDonald, EK Gnanapragasam, GF Laniak, CS Lew, WB Mills, C Yu. Benchmarking of the Saturated-Zone Module Associated with Three Risk Assessment Models: RESRAD MMSOILS, and MEPAS. Environmental Engineering Science 16(1):67–80. 1999

- Whelan et al. 1999b Whelan G, JP McDonald, EK Gnanapragasam, GF Laniak, CS Lew, WB Mills, C Yu. Benchmarking of the Vadose-Zone Module Associated with Three Risk Assessment Models: RESRAD, MMSOILS and MEPAS. *Environmental Engineering Science* 16(1):81–91. 1999.
- Yu et al. 1993 Yu C, Zielen AJ, Cheng J-J, Yuan, YC, Jones, LG, LePoire, DJ, Wang YY, Loureiro CO, Gnanapragasam, E, Faillace E, Wallo A III, Williams WA, Peterson H. Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines Using RESRAD, Version 5.0, ANL/EAD/LD-2. Argonne National Laboratory. 1993.
- Yu et al. 2000 Yu C, LePoire D, Gnanapragasam E, Arnish, J, Kamboj S, Biwer BM, Cheng J-J, Zielen A, Chen SY. Development of probabilistic RESRAD 6.0 AND RESRAD-BUILD 3.0 computer codes. NUREG/CR-6697. ANL/EAD/TM-98. Argonne National Laboratory. 2000.
- Yu et al. 2001 Yu C, Zielen AJ, Cheng J-J, LePoire DJ, Gnanapragasam E, Kamboj S, Arnish J, Wallo A III, Williams WA, Peterson H. User's Manual for RESRAD Version 6. ANL/EAD-4. Argonne National Laboratory. 2001.
- Yu et al. 2003 Yu C, LePoire DJ, Cheng J-J, Gnanapragasam E, Kamboj S, Arnish J, Biwer, BM, Zielen AJ, Williams WA, Wallo A III, Peterson HTJr. User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3, ANL/EAD/03-1, Argonne National Laboratory. 2003.
- Yu et al. 2006 Yu C, Gnanapragasam E, Cheng J-J, Biwer BM. Benchmarking of RESRAD-OFFSITE: Transition from RESRAD (onsite) to RESRAD-OFFSITE and Comparison of RESRAD-OFFSITE Predictions with Peer codes. ANL/EVS/TM/06-3. Argonne National Laboratory. 2006.
- Yu et al. 2007 Yu C, Gnanapragasam E, Biwer BM, Kamboj S, Cheng J-J, Klett TR, LePoire DJ, Zielen AJ, Chen S-Y, Williams WA, Wallo A, Domotor S, Mo T, Schwartzman A. User's Manual for RESRAD-OFFSITE. Version 2. ANL/EVS/TM/07-1. DOE/HS-0005. NUREG/CR-6937. prepared by the Environmental Science Division. Argonne National Laboratory. for the U.S. Department of Energy. Offices of Environmental Management and Health. Safety and Security and the U.S. Nuclear Regulatory Commission. June 2007