

Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Josef Maringer

Universitätsprofessor für Radioökologie, Umweltradiometrie und Strahlenschutz  
an der Universität für Bodenkultur Wien und der Technischen Universität Wien

Arsenal Objekt 3, 1030 Wien

**Projekt-Nummer 1548877, 07 124/0003#0134**

**10. Mai 2021**

## **Gutachten**

**zur Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen - Grundsatzfragen Gutachtergruppe 1 (Wissenschaftler\*innen als außenstehende Beobachter\*innen des Verfahrens)**

## Kurzfassung

Im Zuge des Standortauswahlverfahrens zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland ist eine Berechnungsgrundlage zur einheitlichen Abschätzung der Dosis durch unbeabsichtigte Freisetzung von Radionukliden in die Umwelt zur vergleichenden Beurteilung möglicher Endlagerstandorte hinsichtlich der Langzeitsicherheit vorgesehen.

Im hier vorgelegten wissenschaftlichen Gutachten eines, vom Standortauswahlverfahren außenstehenden Beobachters, werden auftragsgemäß die grundsätzlichen Vorgaben und Bestimmungen im Entwurf der Berechnungsgrundlage vom 31.07.2020 im Lichte des Standes von Wissenschaft und Technik beurteilt. Im Zuge dieser Begutachtung wurden die Kapitel 4 – Ziele und Grundsätze, 5 – Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung, 7 – Potentielle Entwicklungen des Endlagers und 8 – Umgang mit Ungewissheiten, betrachtet.

Wesentlich für eine realitätsnahe Dosisabschätzung sind die Grundsätze für den Umgang mit Ungewissheiten aufgrund des radioökologisch außergewöhnlich langen und damit schwer fassbaren Bewertungszeitraumes von 1 Million Jahren. Dabei ist es notwendig, bisherige wissenschaftlich-technische Erfahrungen mit radioökologischen Transport- und Ausbreitungsentwicklungen in Geo- und Biosphäre von Zeiträumen in der Größenordnung von einigen Jahrzehnten auf den Zeitraum von einer Million Jahren zu übertragen.

Im Gutachten sind zu Beginn die rechtliche Einordnung der Berechnungsgrundlage zur Dosisabschätzung, der Stand von Wissenschaft und Technik dargelegt und die relevanten Fachpublikationen und Referenzen aufgelistet. Anschließend werden die Inhalte der begutachteten Kapitel 4, 5, 6, 7 und 8 zusammenfassend dargestellt. Abgeschlossen wird das Gutachten mit Verbesserungs- und Handlungsempfehlungen und einer zusammenfassenden Beurteilung.

Aus fachlich-wissenschaftlicher Sicht entsprechen die Vorgaben und Bestimmungen der begutachteten Kapitel im Hinblick auf den Zweck der Dosisabschätzung grundsätzlich dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die Ziele und Grundsätze der Bestimmungen, Handlungsanweisungen und erklärenden Hinweise zur Dosisabschätzung sind inhaltlich im notwendigen Umfang und ausreichend detailliert dargelegt. Im Zuge der Begutachtung wurden einige spezifische inhaltliche und redaktionelle Empfehlungen zur Verbesserung der Berechnungsgrundlage sowie Handlungsempfehlungen zu Art und Umfang für weitere, in vertiefende Gutachten gegeben.

Die Verbesserungsempfehlungen betreffen im einzelnen (i) die explizite Angabe des übergeordneten Ziels des Gesundheitsschutzes der Bevölkerung und der belebten Umwelt, (ii) die eindeutige Festlegung der Geo- und Biosphäre sowie eine Detaillierung der Geosphäre, (iii) die Festlegung der Kenngrößen der Dosisabschätzung, (iv) der konkrete Bezug auf ein erprobtes und international anerkanntes Qualitätsmanagementsystems, (v) der Hinweis auf die notwendige Darstellung der Langzeitsicherheit des Endlagers, (vi) eine zusätzliche, vereinfachte Darstellung der Dosisabschätzungen für nichtfacheinschlägig gebildete Bürger\*innen, (vii) die redaktionelle Strukturierung des Abschnitts 4.2 in zweckmäßige Unterabschnitte, (viii) der Hinweis auf eine Zusammenschau von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen, (ix) die kontinuierliche Beobachtung der wissenschaftlichen Entwicklungen und gegebenenfalls notwendige Einbeziehung in die Standortentscheidung und (x) die deutliche Unterscheidbarkeit von Zielen, grundsätzlichen Anforderungen und spezifisch methodische Vorgehensweisen. Die Handlungsempfehlungen für weiterführende Gutachten betreffen den Schutz aller Lebewesen der belebten Umwelt, zusätzlich zur menschlichen Bevölkerung, sowie die Mitbetrachtung potentieller evolutionsbiologischer und epigenetischer Entwicklungen der Strahlungsempfindlichkeit des Menschen im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren.

## **Abstract**

During the site selection procedure for the final disposal of high-level radioactive waste in the Federal Republic of Germany, a calculation basis 'Berechnungsgrundlage' for the uniform estimation of the dose due to the unintentional release of radionuclides into the environment has to be provided for the comparative assessment of possible repository sites with regard to long-term safety.

In the expert assessment presented here, an observer who is external to the site selection procedure is commissioned to assess the fundamental specifications and provisions in the draft of the calculation basis of 31.07.2020 in the light of the state of the art in science and technology. In this assessment, Chapters 4 - Objectives and Principles, 5 - Development of a Strategy for Dose Assessment, 7 - Potential Developments of the Repository and 8 - Dealing with Uncertainties were considered.

Essential for a realistic dose assessment are the principles for dealing with uncertainties due to the radioecologically extraordinarily long and thus scientifically elusive assessment period of 1 million years. In this context, it is necessary to transfer previous scientific-technical experience with radioecological transport and dispersion developments in the geosphere and biosphere from periods of the order of a few decades to a period of one million years.

At the beginning of the expert report, the legal classification of the calculation basis for dose assessment, the state of the art in science and technology and the relevant publications and references are listed. Subsequently, the contents of the reviewed chapters 4, 5, 7 and 8 are summarised. The report concludes with recommendations for improvement and action and a summary assessment.

From the technical and scientific point of view, the specifications and provisions of the reviewed chapters basically correspond to the state of the art in science and technology regarding the purpose of the dose assessment. The objectives and principles of the provisions, instructions and explanatory notes on dose assessment are presented in the necessary scope and in sufficient detail. In doing the assessment, some specific recommendations on content and editing were made to improve the basis for the calculation, as well as recommendations on the type and scope of further in-depth assessments.

The recommendations for improvement concern (i) the explicit statement of the overriding objective of protecting the health of the population and the living environment, (ii) the clear definition of the geosphere and biosphere as well as a detailing of the geosphere, (iii) the definition of the key parameters of the dose assessment, (iv) the reference to a proven and internationally recognised quality management system, (v) the reference to the necessary presentation of the long-term safety of the repository, (vi) an additional, simplified presentation of the dose estimates for non-technically educated citizens, (vii) the editorial structuring of Section 4.2 into appropriate subsections, (viii) the reference to a synopsis of uncertainty and sensitivity analyses, (ix) the continuous monitoring of scientific developments and, if necessary, their inclusion in the siting decision, and (x) the clear distinction between objectives, basic requirements and specific methodological approaches. The recommendations for further expert opinions concern the protection of all living organisms of the living environment, in addition to the human population, as well as the consideration of potential evolutionary biological and epigenetic developments of the radiation sensitivity of humans in the assessment period of one million years.

**Erklärung**

Ich erkläre, dass die Objektivität und Neutralität des Gutachtens sichergestellt, kein Interessenskonflikt besteht und meine Unparteilichkeit und Unabhängigkeit bei der Erstellung dieses Gutachtens in keiner Weise beeinträchtigt ist, da ich bisher für keine anderen Akteure des Standortauswahlverfahrens tätig gewesen bin.

## Inhalt

1. Gegenstand des Gutachtens .....	6
2. Rechtliche Einordnung .....	6
3. Stand von Wissenschaft und Technik.....	7
3.1 Anforderungen, Methoden und internationale Erfahrungen .....	7
3.2 Liste der relevanten Fachliteratur und Referenzen.....	9
4. Zusammenfassende Darstellung der begutachteten Kapitel .....	11
4.1 Kapitel 4 - Ziele und Grundsätze für die Abschätzung der Dosis.....	11
4.2 Kapitel 5 – Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung .....	12
4.3 Kapitel 6 – Systematik und Typen von Modellen .....	12
4.4 Kapitel 7 – Potentielle Entwicklungen des Endlagers.....	12
4.5 Kapitel 8 – Umgang mit Ungewissheiten.....	12
5. Spezifische Empfehlungen.....	13
6. Handlungsempfehlungen für weitere und vertiefende Gutachten .....	14
7. Zusammenfassende Beurteilung.....	15
Anlage - Begriffsbestimmungen	

## 1. Gegenstand des Gutachtens

Zum Thema „Grundsatzfragen“ im Zusammenhang mit dem Entwurf der Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen vom 31.07.2020 sind folgende Fragestellungen durch dieses Gutachten aus der Gutachtergruppe der Wissenschaftler\*innen als außenstehenden Beobachter\*innen des Standortauswahlverfahrens zu beantworten:

**Entsprechen die in Kapitel 4 dargestellten Ziele und Grundsätze für die Abschätzung der Dosis sowie das in Kapitel 5 beschriebene Vorgehen für die Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung dem Stand von Wissenschaft und Technik?**

**Sind die Ausführungen in den Kapiteln 7 und 8 bezüglich potentieller Entwicklungen des Endlagers und dem Umgang mit Ungewissheiten für die Abschätzung der Dosis ausreichend oder sollten diese z. B. in einer eigenen Handreichung, Verwaltungsvorschrift, etc. weiter ausgeführt werden?**

Dem Gutachten sind darüber hinaus ggf. auch Handlungsempfehlungen zu Art und Umfang für weitere und vertiefende Gutachten anzuschließen und die gutachterlichen Ergebnisse sind auf einer Sitzung des Nationalen Begleitgremiums zu präsentieren.

## 2. Rechtliche Einordnung

Das Gutachten wurde im Rahmen des rechtlichen Standortauswahlverfahrens zur tiefeingeologischen Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland hinsichtlich des Anspruchs in § 1 Absatz 2 Standortauswahlgesetz beauftragt:

„Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden. Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet.“

In den Phasen des Standortauswahlverfahrens findet damit die sukzessive Einengung von mehreren potentiellen Untersuchungsräumen auf einige wenige statt, bis der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit durch Bundesgesetz beschlossen wird.

Die §§ 26 und 27 Standortauswahlgesetz bilden den Rahmen für die Anforderungen an die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Diese Anforderungen werden in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung und in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung festgelegt. In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen stellt die Dosisabschätzung eine von mehreren Analysen dar, welche die Langzeitsicherheit eines Endlagers über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren darstellen und prüfen soll (Abschnitt 2 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung sowie §§ 7 und 9 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung). In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung ist vorgegeben, dass als Indikator für die Geringfügigkeit der möglichen zusätzlichen Exposition die gemittelte zusätzliche jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung heranzuziehen ist,

„die während des Bewertungszeitraums durch Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen auftreten kann“ (§ 7 Absatz 1 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung).

Gemäß § 26 Absatz 2 Nummer 1 Standortauswahlgesetz muss „[...] im Hinblick auf den Schutz des Menschen und, soweit es um den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit geht, der Umwelt sichergestellt werden, dass Expositionen aufgrund von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind.“ Dabei wird geschlossen, dass mit der Forderung nach nur geringfügigen zusätzlichen Strahlenexpositionen des Menschen auch der Schutz der belebten Umwelt des Menschen hinreichend gewährleistet ist.

Der Berechnungsgrundlage zur Abschätzung der gemittelten zusätzlichen jährlichen effektiven Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung liegt das Verständnis zugrunde, dass die zu berechnende zusätzliche mittlere effektive Jahresdosis aufgrund des Bewertungszeitraums von 1 Million Jahre und den damit verbundenen Ungewissheiten keine prognostizierbare Größe darstellen kann. Daher ist die mögliche zusätzliche mittlere effektive Jahresdosis zwar numerisch zu berechnen, das Ergebnis wird jedoch als Dosisabschätzung bezeichnet. Der § 4 Absatz 4 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung sieht die Anwendung einer einheitlichen Berechnungsgrundlage für diese Dosisabschätzung vor.

Das Ziel der Berechnungsgrundlage ist die regulatorische Festlegung von Anforderungen und Vorgehensweisen, die der Vorhabenträger für die Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle bei der Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis im Zuge der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zugrunde zu legen hat. Darüber hinaus stellt die Dosisabschätzung eine von mehreren Analysen dar, welche die Langzeitsicherheit eines Endlagers über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren darstellen und prüfen soll (Abschnitt 2 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung sowie §§ 7 und 9 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung).

Der hier begutachtete Entwurf der Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen vom 31.07.2020 ist im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Rahmen der weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (Phase 2 und 3 im Ablauf des Standortauswahlverfahrens) anzuwenden (§ 4 Absatz 4 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung).

Die Berechnungsgrundlage regelt die Einzelheiten der Abschätzung der zusätzlichen mittleren effektiven Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung, die nach § 9 Absatz 1 Nummer 3 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung als Teil der Langzeitsicherheitsanalyse für jede Untersuchungsphase durchzuführen ist.

### 3. Stand von Wissenschaft und Technik

#### 3.1 Anforderungen, Methoden und internationale Erfahrungen

Die Herausforderungen an tiefegeologische Endlager für hochradioaktive Abfälle sind Gegenstand umfassender und weitreichender wissenschaftlicher und technologischer Untersuchungen. Erstmals in der Wissenschaftsgeschichte wird eine Bewertungszeitraum für die Dauerhaftigkeit einer technologischen Lösung in der Größenordnung von  $10^6$  Jahren gefordert. Im Rückblick auf die bisherige Kulturgeschichte des Menschen in der Größenordnung von  $10^4$  Jahren wird die enorme wissenschaftlich-technologische Herausforderung deutlich. Im Lichte der aktuellen globalen gesellschaftlichen Ansprüche an Sicherheit, Nachhaltigkeit und zivilgesellschaftliche Verantwortung für die kommenden Generationen sowie die gesamte Ökosphäre zeigt sich die Herausforderung,

hochradioaktive Abfälle aus der gegenwärtigen Nutzung der Nuklearenergie sicher für einen Zeitraum von einer Million Jahren von der Ökosphäre sicher abzuschließen.

Seitens der Vereinten Nationen werden im Rahmen der Internationalen Atomenergiebehörde mit Sitz in Wien, wissenschaftliche Projekte, internationale Kooperationen und technologische Entwicklungen zum Themenkreis Endlagerung radioaktiver Abfälle seit Jahrzehnten angestoßen, begleitet, gefördert und die Ergebnisse und Erkenntnisse frei zugänglich dokumentiert. Im ‚Department of Nuclear Safety and Security‘ der Internationalen Atomenergiebehörde, ‚Division of Radiation, Transport and Waste Safety‘, werden die wissenschaftlichen und technologischen Aktivitäten zur Lösung der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Programm ‚Radioactive waste and spent fuel management‘ weltweit koordiniert.

Im Zusammenhang mit der hier vorliegenden Problemstellung sei auf das seit 2008 kontinuierlich laufende ‚International Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal GEOSAF‘ der Internationalen Atomenergiebehörde hingewiesen, in dem die Grundsätze für die Betriebs- und Langzeitsicherheit von tiefengeologischen Endlagern im Zusammenhang mit der Entwicklung von Programmen zur Entsorgung von hochaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen laufend untersucht, weiterentwickelt und exemplarisch demonstriert werden.

Die jüngere Publikation ‚Design Principles and Approaches for Radioactive Waste repositories. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.27 (2020)‘ gibt einen Überblick über Gestaltungsprinzipien und Ansätze, die entweder bereits umgesetzt wurden oder sich in der Umsetzungsphase befinden. Beispiele für ausgereifte Designs sind für eine Vielzahl von radioaktiven Abfallarten und geologischen Gegebenheiten dargestellt. Die möglichen Endlagerkonzepte basieren auf den Eigenschaften des Abfalls, wie z.B. Volumen und Radiotoxizität, und den verfügbaren konzeptionellen Entsorgungsoptionen. Die vorgestellten Prinzipien basieren auf grundlegenden Sicherheitsprinzipien und verwenden einen systemtechnischen, anforderungsorientierten Planungsansatz, der als Grundlage für die Konzeption von Endlagern für radioaktive Abfälle herangezogen wird.

Im Report Nr. 7532 (2020) ‚Radioactive Waste Management 2020 – Management and Disposal of High-Level Radioactive Waste: Global Progress and Solutions‘ der ‚Nuclear Energy Agency‘ der ‚Organisation for economic co-operation and Development‘ OECD-NEA sind der aktuelle internationale wissenschaftliche Konsens, die technologischen Nachweise und bisher erfolgreichen Anwendungen von Konzepten zur tiefengeologischen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zusammengestellt.

Die Möglichkeiten und Erfahrungen mit unterschiedlichen Methoden von Sensitivitätsanalysen zur Beurteilung der Sicherheit geologischer Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle sind mathematisch-statistisch detailliert im JRC Scientific and Technical Report EUR 23712 EN (2008) des ‚Joint Research Centers‘ der Europäischen Kommission dargelegt.

Die Untersuchungen und wissenschaftlichen Erkenntnisse nach Kernwaffentests und nuklear-technischen Zwischenfällen, Unfällen und Katastrophen und Krisen (z.B. Sellafield 1957, Three Mile Island 1979, Tschernobyl 1986, Fukushima 2011) führten zur Entwicklung, Erprobung und Anwendung von radioökologischen Modellen zur Dosisabschätzung der betroffenen Bevölkerung im Zusammenhang mit der der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Umwelt. Darüber hinaus wurden in der Vergangenheit im Zuge der technischen Umsetzung der rechtlichen Strahlenschutzvorschriften Berechnungsgrundlagen für radioökologische Dosisermittlungen geschaffen.

Radioökologische Dosisberechnungen im Zuge unerwünschter Freisetzungen von Radionukliden in die Biosphäre im Zusammenhang mit der tiefengeologischen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist Gegenstand laufender wissenschaftlich-technologischer Entwicklungen – insbesondere aufgrund des notwendigen langen Bewertungszeitraumes in der Größenordnung von  $10^6$  Jahren. Die Ergebnisse der



Dosisabschätzungen im Zuge des Standortauswahlverfahrens haben lediglich relativen, indikativen Charakter für den Vergleich von potentiellen Endlagerstandorten. Aus heutiger Sicht ist die Dosisabschätzung für grundsätzlich in Frage kommende Endlagerstandorte als eine von mehreren notwendigen semiquantitativen, mit großen Unsicherheiten behafteten Analysen für die Langzeitsicherheit anzusehen.

### 3.2 Liste der relevanten Fachliteratur und Referenzen

BMU, 2020. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) vom 08.06.2020. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, BAnz AT 16.06.2020 B3.

BfS, 2010. Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau – BglBb). Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-SW-07/10, 2010. urn:nbn:de:0221-20100329966.

Belli, M., Tabocchini, M.A. Ionizing Radiation-Induced Epigenetic Modifications and Their Relevance to Radiation Protection. *Int. J. Mol. Sci.* (2020) 21(17), 5993.

Bolado-Lavin, R., Costescu Badea, A. Review of Sensitivity Analysis Methods and Experience for Geological Disposal of Radioactive waste and Spent Nuclear Fuel. JRC Scientific and Technical Report EUR 23712 EN. 2008, European Commission, Joint Research Center, Luxembourg.

Duursma, E.K., Carroll, J. Environmental Compartments. Equilibria and Assessment of Processes between Air, Water, Sediments and Biota. Environmental Series. 1996, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

GRS, 2009. Impact of climate change on far- field and biosphere processes for an HLW-repository in rock salt. GRS-241. 2009, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (2009).

IAEA, 1989. Evaluating the Reliability of Prediction Made Using Environmental Transfer Models. Safety Series No. 100. IAEA, Wien.

IAEA, 1999. Verification and Validation of Software Related to Nuclear Power Plant Instrumentation and Control, Technical Reports Series No. 384. IAEA, Wien.

IAEA, 2000a. Software for Computer Based Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.1, IAEA, Wien.

IAEA, 2000b. Quality Assurance for Software Important to Safety, Technical Reports Series No. 397, IAEA, Wien.

IAEA 2001. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Safety Report Series No. 19. IAEA, Wien.

IAEA, 2003. Radioactive Waste Management Glossary, IAEA, Wien.

IAEA, 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Volume I, IAEA, Wien.

IAEA, 2011a. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide No. SSG-14. IAEA, Wien.

IAEA, 2011b. Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements SSR-5. IAEA, Wien.

- IAEA, 2012a. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide SSG-23. IAEA, Wien.
- IAEA, 2012b. GEOSAF - The International Intercomparison and Harmonisation Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal. Draft report. IAEA, Wien.
- IAEA, 2014. Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities. Specific Safety Guide SSG-31. IAEA, Wien.
- IAEA, 2016, An International Peer Review of the Safety Options Dossier of the Project for Disposal of Radioactive Waste in Deep Geological Formations (Cigéo). Final Report of the IAEA International Review Team, November 2016. IAEA, Vienna.
- IAEA, 2018a. GEOSAF II - Managing integration of pre-closure activities and post-closure safety in the Safety Case for Geological Disposal. The International Intercomparison and Harmonisation Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal. Draft report. IAEA, Wien.
- IAEA, 2018b. GEOSAF III – Demonstration of the operational and long-term safety of geological disposal facilities for radioactive waste. Draft Terms of Reference, IAEA, Wien.
- IAEA, 2019. IAEA Safety Glossary: 2018 Edition. IAEA, Wien.
- IAEA, 2020. Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.27. IAEA, Wien.
- IAEA, 2020. Underground Disposal Concepts for Small Inventories of Intermediate and High-Level Radioactive Waste. IAEA-TECDOC-1935. IAEA, Wien
- ICRP, 2003. A framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species. ICRP Publication 91 Ann. ICRP 33(3).
- ICRP, 2017. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46(2).
- IRPA, 2004. IRPA Code of Ethics. Document IRPA11/GA/4 (Rev.). International Radiation Protection Association.
- NIEA, 2009. Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes – Guidance on Requirements for Authorisation. Northern Ireland Environment Agency. Belfast.
- OECD-NEA, 2016. Scenario Development Workshop Synopsis. Radioactive Waste Management NEA/RWM/R(2015)3, March 2016.
- Poinssot, C., Geckeis, H. Radionuclide behaviour in the natural environment. Woodhead Publishing Series in Energy No. 42. 2012, Woodhead Publishing, Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi.
- Schuster et al. Rate of individuals with clearly increased radiosensitivity rise with age both in healthy individuals and in cancer patients. BMC Geriatrics (2018) 18(105).
- Whicker, F.W, Schultz, V. Radioecology: Nuclear Energy and the Environment. Vol. I & II. 1982, CRC Press, Boca Raton, Florida.

## 4. Zusammenfassende Darstellung der begutachteten Kapitel

### 4.1 Kapitel 4 - Ziele und Grundsätze für die Abschätzung der Dosis

Die Grundsätze der Berechnungsgrundlage sind im Abschnitt 4.2 in den Bestimmungen (1) bis (21) ausgeführt.

Einleitend (1) bis (3) werden Pflicht des Vorhabensträgers und Zweck der Modellierungen für Geosphäre und Biosphäre – die Quantifizierung des Radionuklidtransports nach Mobilisierung aus den Abfällen und die damit verbundene zusätzliche Exposition der Bevölkerung – dargelegt.

Im Weiteren (4) bis (7) wird in zweckentsprechender Weise Bezug genommen auf den Schutz der belebten Umwelt und der notwendigen Stetigkeit und Vollständigkeit der radioökologischen Modellierungen. Die übergeordnete Planung und das strategische Vorgehen sowie qualitätssichernde Maßnahmen für Analysen und Bewertungen werden dezidiert gefordert.

Anschließend (8) werden Charakter, Grundlagen und Abgrenzung der Dosisabschätzung beschrieben, während in (9) bestimmt wird, wie mit Tochernukliden in Zerfallsreihen zu verfahren ist.

In (10) bis (12) wird die Aufteilung der Betrachtung in Geo- und Biosphäre begründet und auf welche Art und Weise die Modellbildung in diesen beiden Sphären vorzunehmen ist. Dabei wird insbesondere festgehalten, dass Änderungen in der Biosphäre (wie z.B. anthropogene Einflüsse, Klimaänderungen, geographische Veränderungen) verglichen mit dem Bewertungszeitraum kurzfristig sind, die Entwicklungen nicht abgesichert prognostizierbar sind und daher stilisierte Annahmen für die Dosisabschätzung zu treffen sind. In (13) werden die Grundsätze und konzeptionellen Unterschiede der Abschätzung möglicher Expositionen für die Geosphären- und Biosphärenmodellierung unter Einbeziehung der Ungewissheiten von Modellen und Daten vorgegeben. Basis für hinreichend qualifizierte Modellierungen sind realitätsnahe Annahmen.

In (14) und (15) werden die Bedingungen für die einheitliche Anwendung von generischen, stilisierten Modellen in verschiedenen Untersuchungsräumen und die Plausibilität von Annahmen beschrieben. In (16) wird die Widerspruchsfreiheit (Konsistenz) der verwendeten Informationen, getroffenen Annahmen, gewählten Vorgangsweisen und Begrifflichkeiten gefordert und dafür rechtlich vorgegebene Anforderungen, Betrachtungen und Analysen explizit aufgelistet. Weiters werden in (17) und (18) der zu bewertende Kontext zum jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik und die Notwendigkeit der Standortunabhängigkeit der Berechnungsgrundlage inklusive der Begründung vorhandener Einschränkungen und Auswirkungen auf das Ergebnis gefordert.

In (19) wird die Auswirkung miteingelagerter schwach- und mittelaktiver radioaktiver Abfälle in Bezug auf das vorzusehende Radionuklidinventar behandelt und dessen umfassende und sorgfältige Analyse und Darstellung hinsichtlich der Entwicklungen des Endlagers gefordert.

In (20) werden die Bedingungen für das begründete Abweichen von der Berechnungsgrundlage und in (21) die Bedingungen und rechtlichen Vorgaben für die Nachvollziehbarkeit der Dosisabschätzungen durch Dritte, insbesondere der Aufsichtsbehörde, festgehalten.

#### 4.2 Kapitel 5 – Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung

In diesem Kapitel werden in Bestimmung (1) die Ziele der Strategie für die Dosisabschätzung erläutert in Bezug auf Komponenten, Prinzipien und Beziehungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse für alle Untersuchungsräume. In den Bestimmungen (2) und (3) werden Möglichkeiten und Bedingungen für die Anwendung unterschiedlicher Strategien in den Standortauswahlphasen aufgezeigt und Prinzipien, Schlüsselemente und Inhalte offenbleibend (nicht abgegrenzt) aufgelistet.

#### 4.3 Kapitel 6 – Systematik und Typen von Modellen

In diesem Kapitel werden anwendbare und erprobte Modelltypen für die Dosisabschätzung im Zusammenhang mit der tiefengeologischen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Anlehnung an die Publikation *The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, SSG-23, IAEA (2012)*, detailliert beschrieben. Dabei werden die grundsätzlichen Anforderungen und die wesentlichen, zu betrachtenden Gesichtspunkte angeführt.

#### 4.4 Kapitel 7 – Potentielle Entwicklungen des Endlagers

In diesem Kapitel werden in sechs Bestimmungen Methodik und Grundlagen der Szenarientwicklung zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers unter Berücksichtigung grundlegender internationaler Empfehlungen beschrieben. Dabei wird festgehalten, dass die Entwicklung der Szenarien der Dosisabschätzung voranzustellen ist. In Bestimmung (4) wird die Nachvollziehbarkeit und Widerspruchsfreiheit der ermittelten Entwicklungen über den Bewertungszeitraum gefordert. In den folgenden Bestimmungen (5) und (6) wird in begründeten Fällen die Gruppierung von Szenarientwicklungen freigestellt und die Bedingungen dazu festgehalten.

#### 4.5 Kapitel 8 – Umgang mit Ungewissheiten

In diesem Kapitel wird der Ergebnis-kritische Umgang mit Ungewissheiten im notwendigen Umfang ausführlich behandelt. In **8.1 Allgemeines** – sind in (1) bis (3) die rechtliche Begründung, die Konkretisierung der Anforderungen, die Auswirkungen sowie eine exemplarische Auflistung von Ungewissheiten dargelegt. In **8.2 Übergeordnete Vorgaben** (1) und (2) – werden die Anwendungsbereiche und die zu beachtenden strategischen Aspekte beim Umgang mit Ungewissheiten vorgegeben. In (3) und (4) werden die einheitliche Berücksichtigung von Ungewissheiten bei der Modellierung und Fehlern im Zuge der Dosisabschätzungen verschiedener Endlagesysteme und Untersuchungsräume näher spezifiziert.

Weiters wird in **8.3 Spezifische Vorgaben, 8.3.1 Informationsquellen** – die Vollständigkeit, die Nachvollziehbarkeit und die Qualität der herangezogenen Informationen gefordert. In **8.3.2 Qualität der Daten und Komplexität der Modelle** – werden in (1) bis (3) die Nachvollziehbarkeit und Bewertung der Belastbarkeit und Güte der herangezogenen Daten und der Subjektivität von Ungewissheiten sowie die Angemessenheit der Komplexität der Modelle gefordert. Im Abschnitt **8.3.3 Nicht-Wissen und Fehler** – werden in (1) und (2) beispielhaft angeführte qualitätssichernde Maßnahmen beim Umgang mit Fehlern und Nicht-Wissen und die Bewertung ihrer Wirksamkeit gefordert.

In **8.4 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse** – werden in (1) Zweck und Basis der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen, Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der Ungewissheiten bzw. Szenarienanalysen (Kapitel 7), angegeben. In (2) sind die Anforderungen an die notwendigen Analysenparameter (inkl. Anfangs- und Randbedingungen), deren Unsicherheitsbandbreiten, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen hinsichtlich der notwendigen Quantifizierung der Gesamtunsicherheiten der Analysenergebnisse angeführt. In den folgenden Bestimmungen (3) bis (6) werden die Anforderungen an die anzuwendenden mathematisch-statistischen Methoden der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen sowie Vorgehensweise und Validierung detailliert angegeben.

In **8.5 Besonderheiten der Biosphärenmodellierung** – wird in (1) festgehalten, dass wegen der ungesicherten Vorhersage von Entwicklungen der Biosphäre im Bewertungszeitraum Unsicherheitsbetrachtungen bei der Biosphärenmodellierung nicht möglich sind. In (2) werden Festlegungen für und Anforderungen an die klimaabhängigen Modellparameter der Biosphärenmodellierung bei den anzuwendenden probabilistischen oder deterministischen Parameter-Sensitivitätsanalysen getroffen, wobei die Biosphärenmodellierung selbst deterministisch mit plausiblen Punktschätzern für die Modellparameter durchzuführen ist.

## 5. Spezifische Empfehlungen

**Empfehlung 1 zu Abschnitt 4.1 - Ziele:** Die Ziele der Berechnungsgrundlage – Schaffung eines einheitlichen Rahmens und einer gleichwertigen Methodik – sind im Abschnitt 4.1 zweckmäßig fokussiert, plausibel und konsistent angeführt. Ich empfehle, die indikative Bewertungsmöglichkeit der Langzeitsicherheit des Endlagers im Hinblick auf den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der belebten Umwelt als übergeordnetes Ziel ebenfalls anzuführen. Damit wird klar zum Ausdruck gebracht, dass die Dosisabschätzung auch die Beurteilungsmöglichkeit der Langzeitsicherheit des Endlagers zum Ziel hat.

**Empfehlung 2 zu Abschnitt 4.2 – Grundsätze (1) bis (3):** Im Hinblick auf die Modellierung der radioökologischen Prozesse empfehle ich, die grundsätzlich mehrdeutigen Begriffe ‚Geosphäre‘ und ‚Biosphäre‘ zweckentsprechend und eindeutig zu definieren, insbesondere welche ökologischen Kompartments in der Geosphärenmodellierung jeweils zumindest enthalten sein müssen und welche Kompartments der beiden Sphären interagierend bzw. überlappend darzustellen sind (z.B. nach der Definition von Pierre Teilhard de Chardin der Geosphäre, die sämtliche unbelebten Teile des globalen Ökosystems, der Ökosphäre, umfasst, welche die ökosphärischen Abschnitte von Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre beinhaltet in *La Place de l'Homme dans la Nature. Paris 1956*). Ich empfehle, die begriffliche Aufspaltung der ‚Geosphäre‘ in Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre für eine zweckmäßige radioökologische Modellierung zu Grunde zu legen, insbesondere im Hinblick auf die im Kapitel 10 der Berechnungsgrundlage geforderte Geosphärenmodellierung.

**Empfehlung 3 zu Abschnitt 4.2 (1) bis (3):** Ich empfehle explizit vorzugeben, dass das jeweilige Resultat einer Dosisabschätzung die zeitliche Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen Effektivdosis der repräsentativen Person auf Basis der angewendeten Modelle unter Berücksichtigung der Ungewissheiten und Unsicherheiten ist. Kenngrößen der Dosisabschätzungen zum Vergleich der in Frage kommenden potentiellen Endlagerstandorte sind die jeweilige zeitliche Entwicklung des Erwartungswertes und die Varianz der jährlichen Effektivdosis der repräsentativen Person.

**Empfehlung 4 zu Abschnitt 4.2 (4) bis (7):** Ich empfehle, die quantitativen Analysen und qualitativen Bewertungen für die Dosisabschätzung im Rahmen eines erprobten Qualitätsmanagementsystems – soweit zweckmäßig und möglich unmittelbar, ansonsten sinngemäß – entsprechend international anerkannter Standards wie z.B. EN ISO/IEC 17025 vorzuschreiben. Damit wird erreicht, dass ein langjährig erprobter und weltweit anerkannter Qualitätsmanagement-Standard angewendet wird, der nicht nur die organisatorischen, sondern auch die fachlichen Kompetenzen einer wissenschaftlich-technischen Einrichtung sicherstellt.

**Empfehlung 5 zu Abschnitt 4.2 (8):** Die Dosisabschätzung stellt damit eine von mehreren Analysen dar, welche die Langzeitsicherheit des Endlagers über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren indikativ darstellen und qualitativ prüfen soll. Damit wird klargestellt, dass es bei der Dosisabschätzung zusätzlich zur (relativen) Vergleichbarkeit der verschiedenen, in Frage kommenden Standorte auch um

die indikative Abschätzung der Dosisexposition im Hinblick auf die Langzeitsicherheit der Endlagerstandorte geht.

**Empfehlung 6 zu Abschnitt 4.2 zusätzlich:** Ich empfehle einzufordern, dass die Ergebnisse, der Prozess und die methodischen Schritte der Dosisabschätzungen zusätzlich auch vereinfacht, klar, eindeutig und nachvollziehbar für BürgerInnen, die über kein spezifisches Fachwissen verfügen, textlich und grafisch darzustellen sind.

**Empfehlung 7 zu Abschnitt 4.2 redaktionell:** Ich empfehle, Abschnitt 4.2 in zweckmäßige Unterabschnitte zu strukturieren (analog Kapitel 8), um eine höhere Klarheit für den Anwender der Berechnungsgrundlage und eine bessere Lesbarkeit hinsichtlich der Anwendung der Grundsätze für die Abschätzung der Dosis zu schaffen.

**Empfehlung 8 zu Kapitel 6 – Systematik und Typen von Modellen:** Hinsichtlich der notwendigen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen (behandelt in Abschnitt 8.4) sei auf die Ergebnisse der Studie *Review of Sensitivity Analysis Methods and Experience for Geological Disposal of Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel, Bolado-Lavin & Costescu Badea (2008)*, verwiesen. Die darin aufgezeigten Erfahrungen und Anwendungsbeispiele sollten – soweit zweckmäßig und notwendig – beachtet werden bei der Anwendung von Modellen zur Dosisabschätzung.

**Empfehlung 9 zu Kapitel 7 – Potentielle Entwicklungen des Endlagers:** Da der Einfluss der potentiellen Entwicklung eines Endlagers über den Bewertungszeitraum von 1 Million Jahren kritisch ist in Bezug auf die Robustheit der langfristigen Dosisabschätzung wird empfohlen, jüngere, international gemachte wissenschaftliche Erfahrungen bei der Szenarienentwicklung von Endlagern kontinuierlich und aktuell zu beobachten und hinsichtlich der Anforderungen und Vorgaben für die Dosisabschätzung in einem laufenden Prozess zu evaluieren und, wenn notwendig und zweckmäßig, für die endgültige Standortentscheidung zu berücksichtigen.

**Empfehlung 10 zu Kapitel 8 – Umgang mit Ungewissheiten:** Die Vorgaben im **Kapitel 8** zum Umgang mit Ungewissheiten entsprechen aus meiner Sicht auf Basis des wissenschaftlich-technischen Kenntnisstandes in Umfang und Detailgrad für die Abschätzung der Dosis. Die Anforderungen und Vorgaben an die Methodik sind entsprechend detailliert und nachvollziehbar dargelegt und geben ausreichend Spielraum für im Zuge der Dosisabschätzung notwendige Anpassungen und Erweiterungen in der methodischen Vorgangsweise. Es sollten jedoch (i) Ziele, (ii) grundsätzliche Anforderungen und (iii) spezifisch methodische Vorgehensweisen jeweils deutlicher unterscheidbar angegeben werden.

Die in **Kapitel 5 – Erstellung einer Strategie** beschriebenen Anforderungen und Vorgaben in Bezug auf die Erstellung einer Strategie für die Dosisabschätzung sind aus meiner Sicht entsprechend des wissenschaftlich-technischen Kenntnisstandes umfassend, und, falls notwendig mit der Möglichkeit zu Ergänzungen, ausreichend detailliert festgelegt.

## 6. Handlungsempfehlungen für weitere und vertiefende Gutachten

Dass mit der erfüllten Forderung nach nur geringfügigen zusätzlichen Strahlenexpositionen des Menschen auch der Schutz der belebten Umwelt insgesamt, d.h. auch aller anderen Lebewesen, im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren hinreichend gewährleistet ist, wie im Abschnitt 4.2 (4) ausgedrückt, ist nachweisbedürftig. Diese strahlenschutztechnisch generelle Annahme ist für die überwiegende Zahl der Fälle gerechtfertigt, jedoch für radioökologisch spezifische Gegebenheiten im Zusammenhang mit langzeitlicher tiefengeologischer Endlagerung nachweisbedürftig (*ICRP, 2017*). Ich

empfehle daher, dass diese Frage in einem weiterführenden strahlenbiologischen Gutachten verifiziert und falls notwendig in der Endfassung der Berechnungsgrundlage differenziert wird. Gegebenenfalls sind die Ergebnisse eines derartigen Gutachtens in der Endfassung der Berechnungsgrundlage zu berücksichtigen.

Analog zu den im Entwurf der Berechnungsgrundlage, Abschnitt 4.2 Grundsätze (12), beispielhaft angeführten stilisierten Annahmen über zukünftige Lebens- und Wirtschaftsweisen der Bevölkerung, sollten auch entsprechende stilisierte Annahmen zur möglichen genetischen Entwicklung der Strahlungsdisposition der menschlichen Art im Bewertungszeitraum (z.B. mögliche bzw. erwartbare zukünftige genetische Ausprägungen der Strahlungsempfindlichkeit bzw. der Strahlungsresilienz des Menschen) getroffen werden. Ich empfehle daher, dass diese Frage in einem weiterführenden strahlenbiologisch-anthropologischen Gutachten erhoben und beantwortet wird, da potentielle evolutionsbiologische und epigenetische Entwicklungen und biotechnologische Veränderungen der menschlichen Art im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren nicht auszuschließen sind (*Belli and Tabocchini, 2020, Schuster et al., 2018*).

## 7. Zusammenfassende Beurteilung

Aus Sicht und Kenntnisstand von Wissenschaft und Technik sind die von mir begutachteten Kapitel des Entwurfs der Berechnungsgrundlage inhaltlich im Großen und Ganzen in sich geschlossen, ausreichend detailliert, plausibel, konsistent und nachvollziehbar dargelegt.

Zur Frage, ob die in den Kapiteln 4 und 5 dargestellten Ziele und Grundsätze dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen, sind nach meiner Beurteilung die dargelegten Bestimmungen – unter Berücksichtigung der von mir begründet vorgelegten Empfehlungen – dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik weitestgehend entsprechend ausgeführt.

Zur Frage, ob die Ausführungen der Kapitel 7 und 8 ausreichend sind, oder diese in einer eigenen Handreichung, Verwaltungsvorschrift etc. weiter ausgeführt werden sollten, ist aus meiner Sicht kein zusätzliches, eigenes Dokument erforderlich, es sollten jedoch im Kapitel 8 (i) Ziele, (ii) grundsätzliche Anforderungen und (iii) spezifisch methodische Vorgehensweisen jeweils deutlich unterscheidbar angegeben werden.

Zur Verbesserung des vorliegenden Entwurfs der Berechnungsgrundlage empfehle ich, die spezifischen Empfehlungen zu den begutachteten Kapiteln zu berücksichtigen und den Handlungsempfehlungen für weitere und vertiefende Gutachten im Zuge der Erstellung der Endfassung der Berechnungsgrundlage in geeigneter Art und Weise nachzukommen.

Aufgrund der notwendigen Längerfristigkeit des Standortauswahl-Prozesses und der raschen wissenschaftlichen und technischen Weiterentwicklungen im Themenfeld empfehle ich, wesentliche wissenschaftliche Erkenntnisgewinne, neue Technologieerfahrungen und Berechnungsverfahren im Laufe des Auswahlprozesses so weit wie möglich zu berücksichtigen und für derartige laufende Verbesserungsmöglichkeiten auch rechtlich vorzulegen.

Wien, am 10. Mai 2021

*Univ.-Prof. DI Dr. Franz Josef Maringer*



## Anlage – Begriffsbestimmungen

*(aus dem Entwurf der Berechnungsgrundlage)*

**Dosisabschätzung:** Analyse, in deren Rahmen für einen Untersuchungsraum die mögliche zusätzliche über die Lebenszeit gemittelte effektive Jahresdosis durch ein potentielles tiefengeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle im Bewertungszeitraum für eine repräsentative Person unter Einbeziehung der Ungewissheiten abgeschätzt wird.

**Szenario:** Die Beschreibung einer potentiellen Entwicklung des Endlagersystems, insbesondere hinsichtlich der geologischen und klimatischen Situation im Untersuchungsraum sowie der Barrieren und der einzulagernden Abfälle ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers bis zum Ende des Bewertungszeitraums. Die in der Szenarientwicklung ermittelten Entwicklungen sind synonym als Szenarien zu verstehen.

**Szenarientwicklung:** Systematische Herleitung und Beschreibung potentieller Entwicklungen des Endlagersystems insbesondere hinsichtlich der geologischen und klimatischen Situation im Untersuchungsraum sowie der Barrieren und der einzulagernden Abfälle ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers bis zum Ende des Bewertungszeitraums.

**Szenariengruppe:** Die Aggregation potentieller Entwicklungen zum Zweck der Reduktion der zu betrachtenden Rechenfälle.

**Ungewissheit:** Ein Zustand unvollständigen Wissens über ein Phänomen oder einen Sachverhalt, der sich aus einem Mangel an Informationen, nicht auflösbaren Unschärfen oder aus unterschiedlichen Auslegungen zu bereits bekanntem Wissen ergeben kann. Dies führt zu Zweideutigkeiten und Interpretationsspielräumen von Informationen und Modellen im Rahmen der Dosisabschätzung und hat somit Einfluss auf deren Aussagekraft.

**Unsicherheit:** Ein Maß an Vertrauen in die Aussagekraft eines Ergebnisses, welches aufgrund von Ungewissheiten einem bestimmten Wertebereich unterworfen ist.

**Unsicherheitsanalyse:** Untersucht den aufgrund der Ungewissheiten möglichen Wertebereich der Ergebnisse mit Blick auf sein Ausmaß und seine Grenzen.

**Bezugsjahr:** Kalenderjahr innerhalb des Bewertungszeitraums, für das die effektive Dosis der repräsentativen Person berechnet wird.

**Referenzperson:** Hypothetische, idealisierte Personen der sechs Altersgruppen der Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV, denen für dosimetrische Zwecke standardisierte Eigenschaften zugeschrieben werden. Die Organdosen der Referenzperson sind die Mittelwerte der entsprechenden Dosiswerte des männlichen und weiblichen Referenzmenschen. Die effektive Dosis der Referenzperson ist die Summe der Organdosen der Referenzperson, die mit den entsprechenden Gewebe-Wichtungsfaktoren gewichtet werden.

**Repräsentative Person:** Hypothetische Personen der sechs Altersgruppen der Anlage 11 Teil B Tabelle 1 StrlSchV, die aufgrund ihrer Lebensgewohnheiten für höher exponierte Bevölkerungsgruppen in der jeweiligen Altersgruppe repräsentativ sind. Extreme Lebensgewohnheiten werden nicht berücksichtigt.